

ISSN 1390-6712

# MASKAY



Vol. 10, No. 1

## **Revista MASKAY**

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

### DIRECTOR DEL DEEE

Mayo. de COM. Carlos Enrique González Mantilla

### EDITOR GENERAL

Diego Arcos Avilés

### CONSEJO EDITORIAL

Enrique V. Carrera (ESPE)  
Carlos Julio Tierra (UFRJ)  
Diego Benítez (USFQ)  
Lauro Ojeda (UMICH)  
Ana Guamán (ESPE)  
Juan Pablo Robelly (R&S)  
Vinicius Petrucci (UFBA)  
José Luis Rojo (URJC)  
Daniel Ochoa (ESPOL)  
Alexis Tinoco (ESPE)  
Martha Cecilia Paredes (EPN)

### INFORMACIÓN DE CONTACTO

Revista MASKAY  
Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Av. Gral. Rumiñahui (S/N)  
P. O. Box 17-15-243B  
Sangolquí, Pichincha, Ecuador  
Telf. +593 2 3989400 ext 1867

El contenido de los artículos aquí publicados es responsabilidad exclusiva de sus correspondientes autores. Mayor información en <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/maskay/index>.

# Presentación

El Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, consciente de su gran responsabilidad con la sociedad, busca proponer e impulsar iniciativas tendientes a fomentar el desarrollo integral de la ingeniería eléctrica y electrónica en el Ecuador. Como resultado de este compromiso, nace en el año 2011 la revista Maskay. Esta revista sintetiza de una forma documentada los esfuerzos en investigación y desarrollo que desarrollan los docentes/investigadores y estudiantes de la región.

En la actualidad, la revista MASKAY se encuentra indexada en diversas bases de datos: **SciELO-Ecuador**, **Latindex**, **LatAm-Studies** Estudios Latinoamericanos, **RootIndexing**, **MIAR** (Matriz de Información para el análisis de Revistas), **DOAJ** (Directory of Open Access Journals), **DRJI** Directory of Research Journals Indexing), **Dialnet** y **REDIB** (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico), con el objetivo de difundir a nivel internacional las publicaciones realizadas en esta revista. Además, para que exista una mejor divulgación de sus contenidos, la revista MASKAY cuenta con número **DOI (Digital Object Identifier)** legítimamente registrado y validado por **Crossref**, lo que permite una fácil localización de sus contenidos en la web.

En este primer número de su décima edición, la revista MASKAY pone a consideración de la comunidad científica tres trabajos de investigación realizados por investigadores de centros de educación superior del país

*Diego Arcos Avilés*  
Editor General

# Contenido

**Sistema de medición del nivel de riesgo de zonas de desprendimiento con tecnología SDRadar en ambientes de laboratorio**

DOI: 10.24133/maskay.v10i1.1245

*David Moreno Avilés, Nancy Veloz, Hugo Moreno, Fabricio Santacruz..... 1*

**Robust Multidimensional Optical Modulation Based on Hybrid Subcarrier/Amplitude/Phase/Dual Polarization for Wavelength-Division Multiplexing Systems**

DOI: 10.24133/maskay.v10i1.1322

*Andres Ortega, Brayan Fabian Peñafiel Pinos..... 8*

**Diseño de una WSN para el monitoreo de CO2 en el aire y niveles de ruido en la ciudad de Loja**

DOI: 10.24133/maskay.v10i1.1522

*Ángel José Ordóñez Mendieta, Ángel Paúl Garrochamba ..... 20*

**Evaluación del tiempo de operación de un nodo inalámbrico en la transmisión de video sobre Ipv6**

DOI: 10.24133/maskay.v10i1.1524

*Carlos Egas A, Iván Ontaneda, Carlos Herrera..... 32*

**Lámpara de Fototerapia LED de elaboración propia y su uso para el tratamiento de ictericia, comparada con otras tecnologías**

DOI: 10.24133/maskay.v10i1.1473

*Jorge Villarreal, Paola Vélez..... 38*

**Diseño e implementación de una red de sensores para el monitoreo de los niveles de radiación solar en la ciudad de Loja**

DOI: 10.24133/maskay.v10i1.1523

*Kevin Rodrigo Orozco Jaramillo, Ángel José Ordóñez Mendieta ..... 44*



## Comité Técnico

Darwin Aguilar

Gino Alvarado

Andrés Arcentales

Vinicio Corral

Rodrigo Fonseca

Fausto Granda

Ana Guamán

Diego Marcillo

Geovanni Ninahualpa

Geovanny Raura

Sang Guun Yoo

Daniel Altamirano

Jorge Álvarez

Geovanni Brito

Marco Flores

Estevan Gómez

Tatiana Gualotuña

Román Lara

Mauro Martínez

Flavio Pineda

Diego Villamarín

# Sistema de medición del nivel de riesgo de zonas de desprendimiento con tecnología SDRadar en ambientes de laboratorio

## *Risk level measurement system for landslide zones using SDRadar technology in lab environment*

David Moreno, Nancy Veloz, Hugo Moreno, Fabricio Santacruz

**Abstract**—This prototype was carried out in lab environment at ESPOCH in Ecuador, using USRP B210 working at 5GHz and including two ZJL6G+ amplifiers in cascade connection with 20dB of total gain, in order to improve the overall system power. In the measurement stage, three different samples with different humidity levels were used to determine the risk in diverse conditions. The sample materials were macadam, soil and sand. Depending on their humidity level, risks oscillate between maximum and minimum, where high humidity led to a high risk and inversely. Macadam was the best material for a landslide area since it showed lowest permittivity indexes, in consequence lowest risk. Results were processed in order to get reflection and relative permittivity values and afterwards they were stored in a database to be analyzed and determine levels of risks simulating landslides as function of humidity level.

**Index Terms**—SDRadar, USRPB210, landslide zones, risk level

**Resumen**—Este trabajo propone un sistema de medición de riesgo en zonas de desprendimiento de tierra con tecnología SDRadar. El prototipo fue desarrollado en un ambiente de laboratorio en la ESPOCH de Ecuador, con la utilización de una USRP B210 que trabaja a 5 GHz, se ha incluido dos amplificadores ZJL6G+ en cascada con 20dB de ganancia total para mejorar la potencia total del sistema. En la etapa de mediciones, se usaron 3 muestras de distinto material con diferentes niveles de humedad para determinar el riesgo en diversas condiciones. Estos materiales fueron macadam, tierra y arena. En dependencia de sus niveles de humedad, los riesgos oscilan entre valores máximos y mínimos, dónde una alta humedad conlleva a un alto riesgo y viceversa. El macadam fue el mejor material para un área de derrumbe debido a que presenta un menor índice de permitividad, esto da como resultado el menor riesgo. Los resultados fueron procesados para obtener los valores de reflexión y permitividad de los materiales y fueron guardados en una base de datos para analizar y determinar los niveles de riesgo, mediante simulaciones de desprendimientos de tierras como función del nivel de humedad.

D. Moreno, H. Moreno, F. Santacruz, son docentes de la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, Panamericana Sur Km 1 ½, Riobamba – Ecuador (e-mail: pdmoreno@esPOCH.edu.ec).

N. Veloz es estudiante del programa de Maestría en Sistemas de Telecomunicaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, Panamericana Sur Km 1 ½, Riobamba – Ecuador (e-mail: nan\_pavoz@hotmail.com)

**Palabras Claves**—SDRadar, USRPB210, zonas de desprendimiento, medición del nivel de riesgo

### I. INTRODUCCIÓN

LA TECNOLOGÍA ha sido un factor fundamental en la evolución y desarrollo de la humanidad, ha contribuido significativamente en la solución de problemas al mejorar la calidad de vida de las personas. Sin embargo, dicha contribución es importante siempre y cuando la tecnología se encuentre vigente. El verdadero problema radica en la versatilidad y flexibilidad que la tecnología puede alcanzar para permitir adaptarse y cambiar de acuerdo con nuevas necesidades y requerimientos. La flexibilidad es una característica importante que permite o hace posibles cambios o ajustes en procesos o infraestructuras, se logra mayor control, y se reduce costos y tiempo de implementación [1]. La tecnología de Radar Definido por Software (SDRadar) posee un hardware dedicado desarrollado en términos de módulos de software que permiten implementar aplicaciones de bajo costo con una flexibilidad y versatilidad fácilmente adaptable a cambios. Varias investigaciones han sido desarrolladas mediante el uso de tecnología SDRadar, con la explotación de todas sus características, debido a que se puede obtener información valiosa para desarrollar aplicaciones relacionadas a necesidades que posee la sociedad tal como analizar niveles de riesgo en zonas de desprendimiento de tierra, también conocidos como deslaves [2]-[4].

Por otro lado, los deslaves son grandes masas de terreno que involucran deslizamiento de tierra o flujo de escombros, donde el nivel de impacto depende del monitoreo temprano y de la eficiencia de predicción [3]. Como parte de la prevención de desastres naturales, es muy importante llevar a cabo un estudio para analizar los deslaves y evaluar posibles riesgos que estos pueden conllevar [5]. Algunos prototipos han sido implementados con el objetivo de alertar tempranamente cuando exista la posibilidad de un derrumbe, los cuales basan su funcionamiento en el pronóstico del tiempo para predecir lluvias torrenciales en zonas de riesgo o índices de humedad en el suelo [6], [7].

Existen varios métodos para determinar el nivel de humedad de una porción específica de terreno, tal como

obtener la permitividad eléctrica de la tierra, control de la tierra mediante observaciones satelitales u obtención de la composición del terreno mediante reflectometría en el dominio del tiempo.

Como parte del análisis de riesgo en zonas de desprendimiento, es posible utilizar tecnología radar, tal como el georadar (Ground Penetrating Radar) a través de SDRadar [8], [9]. Esta técnica permite realizar una optimización de hardware al aplicar algoritmos de software que facilitan la recolección de información y el procesamiento de datos.

Este estudio está orientado al diseño e implementación de un sistema de radar definido por software con una tarjeta USRP (Universal Software Radio Peripheral) [10]. El sistema propuesto servirá para determinar niveles de riesgo en zonas de desprendimiento.

El sistema SDRadar propuesto consiste en la radiación de ondas electromagnéticas a una porción de terreno con el fin de causar reflexión en el mismo y poder determinar el coeficiente de reflexión del terreno al realizar un procedimiento de calibración previo y mediante los principios fundamentales de la técnica radar, se calcula posteriormente el valor de la permitividad eléctrica relativa del suelo en cuestión, lo cual ha sido ampliamente corroborado en literatura existente [11], [12]. Los resultados obtenidos en las mediciones han sido contrastados con valores de permitividad almacenados en una base de datos recogida para diferentes grados de humedad y con diferentes tipos de terreno. Posteriormente los posibles niveles de riesgo se han determinado en base a pruebas realizadas respecto a los diferentes grados de humedad de la tierra. Finalmente, se han establecido niveles de riesgo y de seguridad para cada terreno evaluado a partir de los grados de humedad y la permitividad que esto provoca.

## II. TRABAJOS RELACIONADOS

### A. Sistemas de radar definido por software para el monitoreo de deslaves

Este trabajo diseña un sistema integrado para alerta temprana frente a posibles deslizamientos de tierra, basado en una arquitectura de red flexible que incluye varios sensores, se describe la evolución de monitoreo de deslaves en escenarios críticos [2]. Este prototipo utiliza el sistema LEWIS para integrar señales radar y fue desarrollado en un escenario real. Se definió y aplicó un estimador matemático para la detección apropiada de deslizamiento de tierra en la medición de perfiles de distancia, y se ha demostrado la utilidad del enfoque de monitoreo por radar propuesto.

### B. Sistema de radar definido por software de alta resolución para detección de objetivos.

En este trabajo se ha utilizado la tarjeta USRP NI 2920 para diseñar un sistema SDRadar de banda L de alta resolución. Adicionalmente, una aplicación específica desarrollada en Labview en la cual se implementó los algoritmos del sistema radar, realiza las tareas de operación y procesamiento de datos. Se ha desarrollado una validación en la cual se demuestra la capacidad de detección precisa de objetivos de la arquitectura del sistema radar propuesto [13].

Se llevaron a cabo mediciones en interiores y pruebas para validar el correcto funcionamiento de todo el sistema. Los resultados y el rendimiento de este prototipo lograron una resolución de 6 metros, que pueden ser mejorados con técnicas y algoritmos de optimización de resolución [14].

### C. Sistemas radar para monitoreo de deslaves

Dos aplicaciones compactas y de bajo costo fueron diseñadas en este trabajo, la primera con una plataforma software de radio y la otra con el uso de SFCW (Step Frequency Continuous Wave), mediante un analizador de redes vectoriales (VNA) compacto. Los resultados obtenidos con tarjetas USRP en el primer caso fueron resoluciones iguales a 6 metros. Por otro lado, los resultados con el analizador de redes vectoriales se obtuvieron con mediciones a una resolución igual a 30 centímetros para un ancho de banda de 500 MHz [15].

## III. METODOLOGÍA

Para el Desarrollo de este trabajo se utilizó una tarjeta USRP B210 marca Ettus, la cual tiene la posibilidad de realizar una conexión con un computador a través de un puerto USB 3.0. Se ha generado una señal FMCW mediante los bloques de configuración de la tarjeta con el programa GNU Radio [1]. Fue necesario trabajar con el sistema operativo UBUNTU 14.04 debido a la compatibilidad con el programa GNU radio. La configuración del bloque de transmisión y recepción se observa en la Fig. 1 en donde se ha dispuesto un archivo fuente el cual se utiliza para generar la señal deseada FMCW y enviarla continuamente a través del sistema radar. Adicionalmente se realizó la conexión de 2 amplificadores IZJL6G+ de 10 dB de ganancia en cascada con el transmisor, que provoca una ganancia total de 20 dB para poder incrementar la potencia de la señal transmitida.

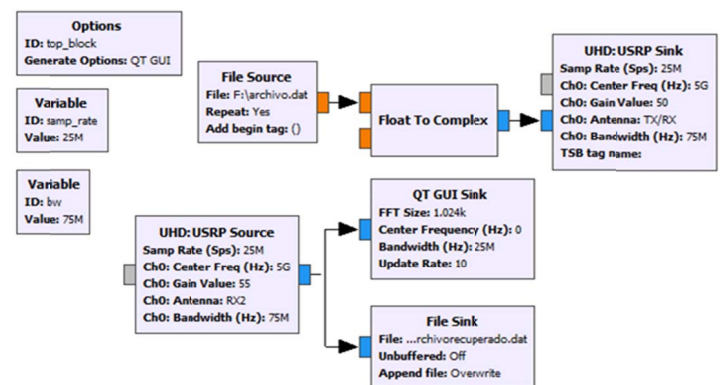


Fig. 1. Diagrama de bloques en GNU Radio para TX y RX.

Las antenas transmisora y receptora han sido diseñadas para operar a una frecuencia de 5 GHz, las cuales fueron posicionadas en el sistema con una separación de 7.5 cm para evitar el solapamiento de sus lóbulos de radiación, las mediciones fueron realizadas con una separación de 40 cm de las muestras de terreno, las antenas transmisora y receptora fueron posicionadas de forma perpendicular a la superficie de medición, según el principio de funcionamiento de un sistema

radar, como se observa en la Fig. 2.

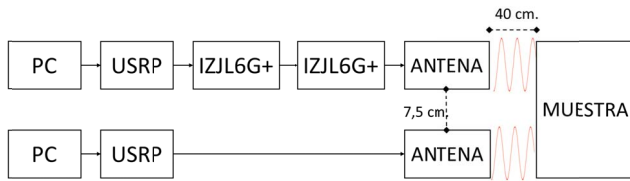


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema de medición.

### A. Plataforma de Medición SDRadar

Un esquema general del sistema propuesto para determinar el nivel de riesgo en zonas de deslaves es mostrado en la Fig. 3, en el cual intervienen dos tarjetas USRP B210 para transmisión y recepción respectivamente, conectadas con dos computadores para generar, controlar y procesar la información. El sistema adicionalmente cuenta con dos antenas una de transmisión y otra de recepción para operar en 5 GHz y dos amplificadores de 10 dB ZJL6G+ en el lado transmisor.

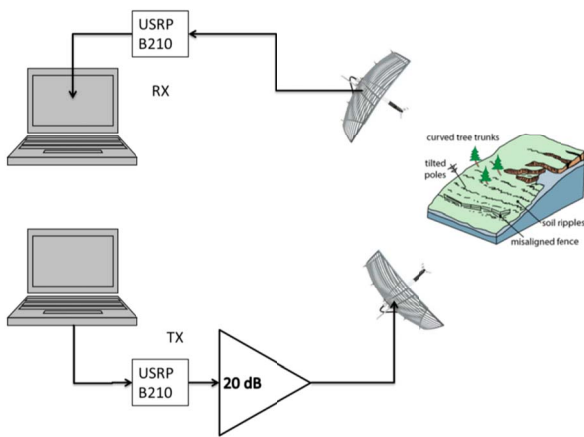


Fig. 3. Plataforma de medición SDRadar para detección de niveles de riesgo.

El Sistema es capaz de analizar señales radar, determinar índices de reflexión y coeficientes de permitividad eléctrica para poder establecer niveles de riesgo en zonas de desprendimiento de tierra con un algoritmo que aprovecha el valor calculado de la permitividad.

Se ha diseñado un sistema radiante mediante un arreglo de antenas (2X2) con el uso de tecnología microstrip con FR4 como material dieléctrico cuya permitividad es de 3.4 y un espesor de 1.6 mm, el sistema trabaja a una frecuencia central de 5 GHz con un ancho de banda de 2 %, el diseño de la antena se observa en la Fig. 4.

Los parámetros de directividad y ganancia de la antena diseñada se observan en la Fig. 5, donde se puede deducir que dicha antena posee una directividad adecuada para aplicaciones radar, que es específicamente para lo que fue diseñada con una ganancia superior a las 10 dB en frecuencias de 5 GHz.

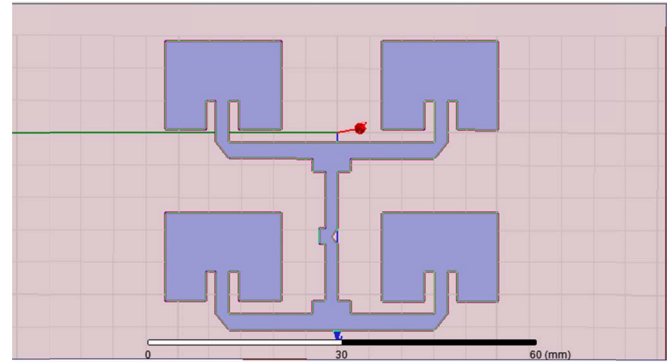


Fig. 4. Diseño de la antena transmisora y receptora microstrip.

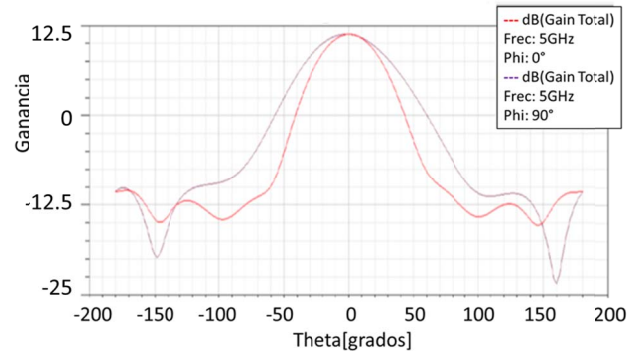


Fig. 5. Ganancia y Directividad de las antenas Transmisora y Receptora.

### B. Calibración del Sistema de Medición SDRadar

El análisis fue desarrollado al realizar una comparación de amplitudes entre dos señales, la primera de la señal recibida de la reflexión con una placa eléctrica conductora perfecta (CEP) situada antes de la muestra de análisis, esta representa una etapa de calibración como se observa en la Fig. 6, ya que en este caso se obtiene una reflexión perfecta, mientras que la segunda medición se realiza con la radiación directa hacia la muestra de terreno y se obtuvo la señal reflejada, Fig. 7. Ambas señales reflejadas fueron procesadas y se obtuvo cada uno de sus respectivos Radargramas, en el cual se analizaron las amplitudes de los picos.

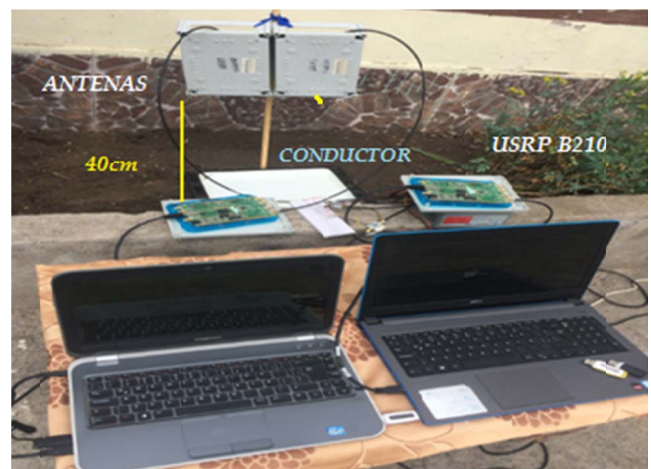


Fig. 6. Calibración del sistema con un plano conductor perpendicular a las antenas.

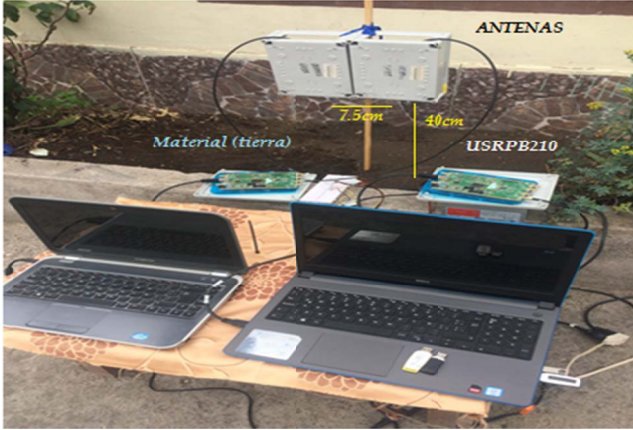


Fig. 7. Medición del sistema a una muestra de terreno.

Los radargramas obtenidos con las dos señales recibidas se muestran en la Fig. 8, los cuales fueron normalizados respecto al valor más alto de la señal de calibración con el fin de obtener una referencia unitaria en cada una de las mediciones, en línea azul se observa el radargrama de la señal calibrada y en línea roja el radargrama de la medición a la muestra de terreno, los picos más altos indican la variación en el coeficiente de reflexión en el material de prueba, dicho valor depende de la permitividad de los medios en la discontinuidad y a su vez del grado de humedad que posea la muestra de terreno.

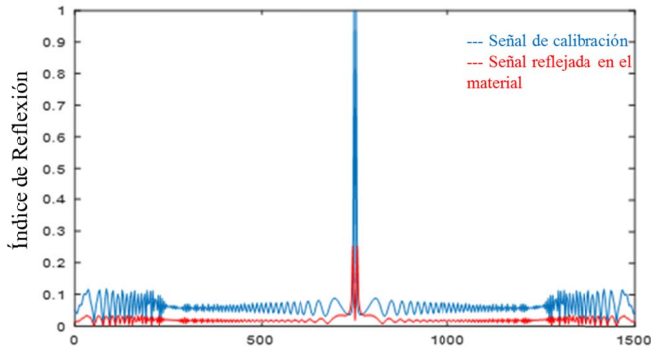


Fig. 8. Gráfica normalizada para obtener índice de reflexión. (Línea azul).

### C. Determinación de niveles de humedad en el terreno

Se han determinado diferentes valores de humedad al considerar la cantidad volumétrica en litros vertida en una superficie definida del terreno a analizar (1 m<sup>2</sup>), como se observa en la Tabla I.

TABLA I  
NIVELES DE HUMEDAD

Nivel de Humedad	Volumen (L)
Nulo	0
Leve 1	0.5
Leve 2	1
Leve 3	2
Moderado 1	3
Moderado 2	7
Moderado 3	11
Fuerte	15

Los materiales utilizados para realizar la prueba fueron tierra negra, arena y macadam, dichos materiales fueron expuestos a cada uno de los niveles de humedad establecidos, la cantidad de agua en cada caso afecta considerablemente el valor de la permitividad eléctrica del material [1]

Una vez provocado cada nivel de humedad en cada uno de los materiales, las muestras a analizar fueron expuestas a la radiación del sistema, obteniéndose los diferentes radargramas normalizados respecto a la señal calibrada y a su vez los valores correspondientes de los índices de reflexión para cada caso, con lo que se pudo calcular el coeficiente de permitividad eléctrica para cada nivel de humedad en cada material, y se consolidó una base de datos con los valores correspondientes.

Finalmente, se realizó un análisis experimental observativo en el cual se realizaron mediciones del coeficiente de permitividad en muestras de material donde se incrementó progresivamente el nivel de humedad y poder determinar valores de riesgo de deslizamiento de terreno a causa de la falta de compactación debido a la ausencia o exceso de agua en el terreno.

### D. Algoritmo de procesamiento de datos

Ambas señales recibidas, tanto la de calibración como la señal medida, fueron procesadas para calcular y obtener la permitividad eléctrica del material bajo prueba a partir de los radargramas normalizados de cada medición respecto a la señal de calibración, lo cual brinda la información del índice de reflexión. La Fig. 9 muestra diferentes mediciones realizadas con este Sistema en un mismo material.

La línea azul representa el radargrama de la señal de calibración, mientras que las líneas de otros colores representan los radargramas del material bajo prueba en diferentes condiciones de humedad.

El índice de reflexión puede ser calculado como se muestra en (1) [3], [17].

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

donde  $\Gamma$  es el índice de reflexión,  $\epsilon_1$  es la permitividad del primer medio, en este caso el aire y  $\epsilon_2$  es la permitividad del material bajo prueba.

La permitividad del material bajo prueba se calcula con la ecuación (1) y si se establece que la permitividad del aire es 1, se tiene:

$$\epsilon_2 = \left( \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \quad (2)$$

La ecuación (2) es importante ya que permite calcular la permitividad del material bajo prueba y determinar cómo los campos eléctricos afectan los materiales con diferentes grados de humedad. Un ejemplo de los valores de permitividad obtenidos en las mediciones realizadas en las diferentes muestras con los distintos grados de humedad se muestra en la Figura 10.



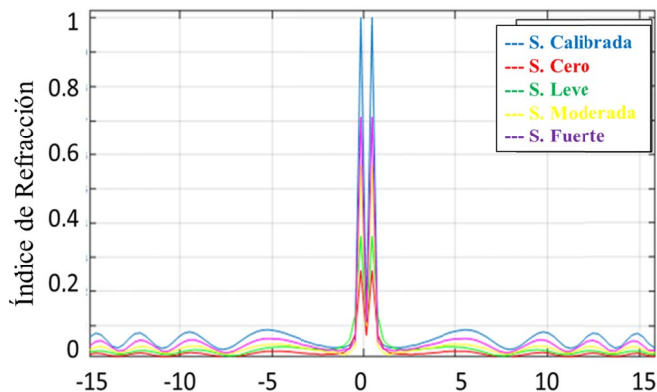


Fig. 9. Índice de Reflexión con diferentes niveles de humedad.

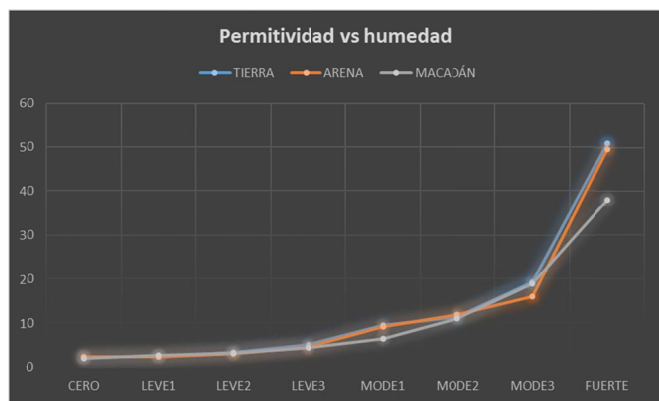


Fig. 10. Permittividad Relativa calculada con diferentes niveles de humedad.

#### IV. RESULTADOS

En esta sección se analiza los resultados experimentales obtenidos. La Fig. 9 muestra el índice de reflexión del material 1 (tierra), el cual se incrementa conforme aumenta el nivel de humedad.

Se realizaron 20 mediciones para cada nivel de humedad en cada material y los valores promedio obtenidos de permitividad relativa se registraron en la Tabla II.

TABLA II  
PERMITIVIDAD RELATIVA PROMEDIO

Material	Tierra	Arena	Macadam
Nulo	2.4	2.3	2
Leve 1	2.4	2.34	2.67
Leve 2	3.38	3.01	3.13
Leve 3	5.01	4.48	4.4
Moderado 1	9.56	9.21	6.45
Moderado 2	11.41	11.82	10.96
Moderado 3	19.19	16.03	18.95
Alto	50.94	49.53	38.05
Tierra	2.4	2.4	3.38
Arena	2.3	2.34	3.01
Macadam	2	2.67	3.13

Como se puede observar en la tabla precedente los tres materiales poseen el mismo comportamiento, pero es necesario determinar los valores de permitividad de cada material (respecto a niveles de humedad) en los cuales puede comenzar a existir deslizamiento de material a causa de la falta de compactación, lo cual implica presencia de riesgo.

Con el fin de determinar niveles de riesgo, se realizaron mediciones en tiempo real del valor de la permitividad de porciones de terreno con cierta inclinación y se aplicó variaciones graduales de humedad como se muestra en las Fig. 11 a la Fig. 16. Se pudo determinar dos escenarios de desprendimiento, cuando el terreno está muy seco y cuando está muy húmedo, pudiéndose obtener un rango de seguridad según los valores de permitividad medidos, y de la misma forma definir niveles de riesgo. En la Tabla III se observa dichos rangos de permitividad que implican niveles de riesgo de deslizamiento de terreno.



Fig. 11. Escenario de medición de niveles de riesgo para Tierra en condiciones muy secas.



Fig. 12. Escenario de medición de niveles de riesgo para Arena en condiciones muy secas.





Fig. 13. Escenario de medición de niveles de riesgo para Macadam en condiciones muy secas.



Fig. 16. Escenario de medición de niveles de riesgo para Macadam en condiciones muy húmedas.



Fig. 14. Escenario de medición de niveles de riesgo para Tierra en condiciones muy húmedas.



Fig. 15. Escenario de medición de niveles de riesgo para Arena en condiciones muy húmedas.

TABLA III  
NIVELES DE RIESGO DE DESLAVE EN FUNCIÓN DE PERMITIVIDAD MEDIDA DEL MATERIAL

Material	Muy Seco	Muy Húmedo
Tierra	< 2.89	> 5.99
Arena	< 2.41	> 5.76
Macadam	< 2.9	> 5.59

Los valores obtenidos son los límites de cada material donde existirá un riesgo de un posible desprendimiento de terreno.

## V. CONCLUSIONES

Se ha diseñado e implementado un sistema de medición para zonas de desprendimiento que mediante valores de permitividad relativa de la tierra, arena y macadán en diferentes condiciones de humedad puede determinar niveles de riesgo de desprendimiento con tecnología SDRadar. Debe existir un cierto grado de humedad en un terreno para que exista compactación, es decir si el terreno es muy seco o muy húmedo existirá un riesgo de desprendimiento. La etapa de calibración es un paso muy importante para realizar las mediciones ya que de esta depende la referenciación para las mediciones. El material 2 y 3 o Arena y Macadán son los materiales con valores de permitividad bajos, y el material 1 o tierra posee valores de permitividad altos en comparación de los otros dos, al analizar el concepto de la permitividad, a mayor permitividad mayor capacidad de penetración de campo eléctrico en el material, es decir el material que más permitividad tiene será el material más inestable del que podría estar compuesto una zona de desprendimiento debido a sus características de absorción de humedad.

## REFERENCIAS

- [1] Nelson. K, Nelson. H & Ghods. M., "Technology flexibility, the conceptualization, validation, and measurement," in *Proc. of the Thirtieth Hawaii International Conference on System Sciences*, Wailea, HI, USA, Aug. 2017, 76-87.

- [2] Costanzo S. et al., "Potentialities Of Usrp-Based Software Defined Radar Systems," *Progress In Electromagnetics Research B, EMW*, vol. 53, no. 53, pp. 417-435, Dec. 2012.
- [3] Costanzo S. et al., "Software-Defined Radar System for Landslides Monitoring," *New Advances in Information Systems and Technologies. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 445, pp. 325-331, Mar. 2016.
- [4] Costanzo S. et al., "Radar Systems For Landslides Monitoring," in *Proc. 5th International Workshop on Hydrological Extremes*, Cosenza, Italy, Jun. 2014, pp. 41-49.
- [5] Chleborad, A.F., Baum, R.L., Godt, J.W., "A prototype system for forecasting landslides in the Seattle," *Reviews in Engineering Geology*, vol. 10, pp. 103-120, 2008.
- [6] Baum, R.L. and Godt, J.W., "Early Warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA," *Landslides*, vol. 7, no. 3, Sep. 2010, pp. 259-272.
- [7] R. Greco, M. Giorgio, G. Capparelli, P. Versace, "Early warning of rainfall-induced landslides based on empirical mobility function predictor," *Engineering Geology*, vol. 153, Feb. 2013, pp. 68-79.
- [8] Borecka, A., Herzig, J., and Durjasz-Rybacka, M., "Ground Penetrating Radar investigations of Landslides: A case study in a landslide in Radziszow," *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. 37, no. 3, Nov. 2015, pp. 11-18.
- [9] J. Karczewski, "The outline of GPR method," AGH-UST, 2011.
- [10] U. B. (. O. Ettus Research, 2017. [En línea]. Available: <https://www.ettus.com/product/details/UB210-KIT..>
- [11] D. Moreno, "Permittivity characterization of a dielectric material using radar technique," Dissertation, Rende - Italia, UNICAL, 2015.
- [12] D. Llalau, "Desarrollo de un prototipo mediante un radar de apertura sintetica (sar) para la deteccion y ubicacion de objetos en ambientes internos con una tarjeta USRP B210," Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2017.
- [13] R. Bassem., *Radar System Analysis and Design Using MATLAB*, Alabama: CRC Press, 2013.
- [14] Moreno Avilés, David; Mejía, Julio; Moreno, Hugo, "Desarrollo de un algoritmo en MATLAB para la optimización de la resolución de una tarjeta USRP B210 para aplicaciones SDRadar," *Maskay*, vol. 7, no. 1, Nov. 2017, pp. 31-40.
- [15] Costanzo S. et al., "Low-Cost Radars Integrated into a Landslide Early Warning System," *New Contributions in Information Systems and Technologies. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 354, 2015.
- [16] J. Hernandez, "Monitoreo de la humedad del suelo superficial a partir de observaciones satelitales de microondas activas y pasivas," *Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, vol. 19, no 81, Oct. 2016.
- [17] R. Neri, *Líneas de Transmisión*, México: McGraw-Hill, 1999.

# Robust Multidimensional Optical Modulation Based on Hybrid Subcarrier/Amplitude/Phase/Dual Polarization for Wavelength-Division Multiplexing Systems

## *Modulación Multidimensional Óptica Basado en un sistema híbrido Subportadora/Amplitud/Fase/Doble Polarización para Sistemas de Multiplexación por División de Longitud de Onda.*

Andrés Ortega, Brayan Peñafiel

**Abstract**—Here, we propose a novel scheme based on advanced techniques of digital modulation in optical communications to achieve a single-channel transmission rate above 100 Gb/s. We utilize a hybrid scheme amplitude/phase/frequency/dual polarization, combined with multidimensional dual lattice and a low-density parity-check-coded modulation. The Stokes parameters are applied to the proposed scheme to map the four-dimensional classical polarization  $I_X$ ,  $Q_X$ ,  $I_Y$ ,  $Q_Y$  in a three-dimensional space. In addition, in the proposed system, the packing theory is applied to the bit interleaver process. Three wavelengths are packaged before being transmitted over a wavelength-division multiplexing optical channel. This modulation process is carried out using symmetrical geometric shapes, such as a hypercube or a polyhedron, based on the molecular links theory using a grouping of 12 and 13/15 bits for the cubic and spherical lattices, respectively. The proposed technique is evaluated in the context of long-distance communications over distances up to 100km. The bit error rate (BER) results showed that the optical signal-to-noise ratio was approximately 4dB over a distance of 50km. In addition, the power spectral efficiency was found to be 3 lambdas, which is considered good performance considering the effects of distance and the non-linear effects influencing the number of lambdas. Also, we use an optical time-division multiplexing scheme (OTDM) in order to achieve a transmission rate beyond 1Tbit/s, where the speed effect is evaluated, taking into consideration that the power spectral efficiency is degraded.

**Index Terms**—Coherent Optical Communications; Polyhedron; Hypercube; Multidimensional Modulations; Stokes parameters; Poincaré sphere

**Resumen**— En este documento propone un nuevo esquema basado en las técnicas avanzadas de modulación digital en comunicaciones ópticas para lograr una velocidad de transmisión de un solo canal sobre los 100 Gb/s. Utilizamos un esquema híbrido de amplitud/fase/frecuencia/doble polarización, combinado con un doble enmallado multidimensional y una modulación codificada por verificación de paridad de baja densidad. Los parámetros de Stokes se aplican al esquema propuesto para mapear la polarización clásica de cuatro dimensiones  $I_X$ ,  $Q_X$ ,  $I_Y$ ,  $Q_Y$  en un espacio tridimensional. Además, en el sistema propuesto, la teoría de empaquetamiento se aplica al proceso de entrelazado de bits. Se empaquetan tres longitudes de onda antes de transmitirse a través de un canal óptico de multiplexación por división de longitud de onda. Este proceso de modulación se lleva a cabo utilizando formas geométricas simétricas, como un hipercubo o un poliedro, basado en la teoría de enlaces moleculares que utiliza una agrupación de 12 y 13/15 bits para los enmallados cúbicos y esféricos, respectivamente. La técnica propuesta se evalúa en el contexto de las comunicaciones a larga distancia en distancias de hasta 100 km. Los resultados de la tasa de error de bits (BER) mostraron que la relación señal/ruido óptico era de aproximadamente 4 dB en una distancia de 50 km. Además, se encontró que la eficiencia espectral de potencia con 3 lambdas, lo que se considera un buen rendimiento teniendo en cuenta los efectos de la distancia y los efectos no lineales que influyen en el número de lambdas. Además, utilizamos un esquema de multiplexación óptica por división de tiempo (OTDM) para lograr una velocidad de transmisión más allá de 1Tbit/s, donde se evalúa el efecto de la velocidad, tomando en consideración que la eficiencia espectral de potencia se degrada.

A. Ortega, Grupo de Investigación de Telecomunicaciones (GITEL), Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador (e-mail: aortega@ups.edu.ec).

B. Peñafiel, Grupo de Investigación de Telecomunicaciones (GITEL), e la Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador (e-mail: bpenafiel@ups.edu.ec).

**Palabras Claves— Comunicaciones ópticas coherentes; Esfera de Poincaré; Hipercubo; Modulaciones multidimensionales; Parámetros de Stokes; Poliedro.**

## I. INTRODUCTION

IN RECENT years, network operators have been considering and installing network infrastructures even more robust than those before them. The rapidly increasing demand for transmission capacity and the ineffective use of optical fiber links have led to many studies to develop advanced schemes that achieve transmission rate beyond 240 Gb/s per wavelength channel.

A promising approach to improving the transmission performance of future access networks, called multidimensional modulations was discovered a long time ago by Wei [1]. This technique involves the use of a rectangular or cross-lattice grouping technique to provide other modulations formats, being compatibility with traditional formats. This strategy improves the peak-to-average power ratio (PAPR) and SNR efficiency due to shaping component constellation-expansion-ratio (CER) that depends only on the shape of the constellation. Consequently, the shape gain (dB) is evaluated in terms of PAPR and CER, where cross constellations achieve better results in comparison with rectangular constellations.

The increase in PAPR is considered primarily as a negative effect of OFDM systems. However, this technique has more recently been applied to modern mobile access networks, such as sparse code multiple access networks (SCMA) [2] to achieve the high capacity needed to support large volumes of information and massive connectivity.

It is widely known, that optical-fiber communication is a strong candidate for connecting the backbone with the end-users in future access networks. For this reason, research has been done to optimize optical channels by using advanced modulation formats so that they can transmit data at higher rates with flexible spectral and power efficiency. Furthermore, N-dimensional signal constellations may be incorporated to increase the system performance compared to that using traditional two-dimensional (2D) formats.

In this context, the spectrum allocation in conventional WDM Network is replaced for an elastic optical network (EON) which improves the spectral efficiency. EON is based on OFDM, they provide an alternative to single carrier modulation technique as the data stream divided and multiplexed onto multiple consecutive low rate subcarriers and hence increases the symbol duration and provides a higher data rate [3]. This approach leads us to think that our proposal is the key to the next generation of optical networks in order to obtain a flexible allocation of spectral resources improving in this way the spectral efficiency.

Incoherent detected optical transmission, polarization-division-multiplexing (POLMUX) can be used to generate two orthogonal polarization signals, X and Y, for transmission through a single-wavelength channel with a high SE and

ultra-high-speed [4]. In this context, passive optical networks with two orthogonally polarized orthogonal frequency-division multiple access signals have recently been proposed. This system can transmit data at a rate of 108 Gb/s after 20km SSMF in comparison with the back-to-back transmission. The fiber dispersion penalty is negligible due to distance of transmission, the attenuation (15dB) and the excellent Bit Error Rate (BER) achieved  $1.4 \times 10^{-3}$  [5].

Adaptive turbo-trellis-coded modulation (ATTCM32QAM) provides 7.3dB ( $BER = 1 \times 10^{-3}$ ) coding gain [6] compared to uncoded system (16QAM) that achieves and 2.3dB ( $BER = 1 \times 10^{-3}$ ) coding gain.

In this way, wavelength-division multiplexing (WDM) can facilitate the integration of coding (FEC, trellis, turbo code, LDPC) with code modulation together in order to improve the spectrum efficiency and coding gain. These are the promising solutions for 5G network access with optical communications known as 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON) [7] that should coexist with GPON and WDM-PON networks, and also guaranteeing an optimal allocation of wavelength bands in order to avoid the undesirable interference of GPON with XG-PON.

Another promising technology is the polarization switching system, which sends a three-dimensional (3D) constellation with an asynchronous in-phase/quadrature (IQ) polarization, which represents the transmitted symbol in 3D [8]. Dual-polarization (DP) modulation provides a lower SE but better performance for a long-distance transmission [9].

4D set-partitioning quadrature amplitude modulation (SP-QAM) is a special case of advanced optical modulation, in which a regular 4D cubic can be constructed by polarization-division multiplexing (PDM). A PDM-QAM model using a coherent detection scheme with Reed-Solomon encoding was shown to improve the SE and provide a data transmission rate of over 112 Gb/s [10]. In another study, the use of 4D 512-ary and 2048-ary SP-QAM signals and soft-decision forward error correction (FEC) with penalties resulted in BERs of  $3.8 \times 10^{-3}$  and  $2 \times 10^{-2}$ , respectively [11].

In addition to the use of spectrally efficient modulation formats low-density parity-check (LDPC) codes can be incorporated into the physical design for new schemes to make them compatible with 4D modulations and, thereby, enable coherent optical communications with high aggregate bit rates. LDPC codes offer significant benefits compared to other codes and hybrid codes like turbo-trellis code modulations. In this context, 4D bit-interleaved LDPC-coded modulation has been developed by connecting a distributed-feedback (DFB) laser to a polarization beam splitter (PBS) to combine two polarization (X and Y) for each IQ modulator, thus, forming the structure of a 4D modulator [12]. The aggregate information bit rates with 16-, 32-, and 64-QAM were measured as 160, 200, and 240 Gb/s, respectively; the best optical SNR of approximately 5 dB and a BER of  $1 \times 10^{-8}$  was attained with 16-QAM. In another study, 320 Gb/s data transmission was achieved using an M-ary 3D constellation with LDPC coded modulation; an SNR of nearly 12dB and a BER of  $1 \times 10^{-9}$  was achieved for 8-QAM [8].

Therefore, the optimization of the power efficiency of an N-dimensional constellation that provides both flexible SE and high-power efficiency at the same time can be solved by considering it as a sphere-packing problem [13]. The number of degrees of freedom for optical transmission can be represented by the vertical axis, where the first and second dimensions represent the electrical field of the X-polarized IQ components, and the third and fourth dimensions represent the electrical field electrical of the Y-polarized IQ components. In this context, a 4D lattice is constructed, and optimized with respect to the discrete-time represented by the horizontal axis. This approach has been used to optimize a 3D constellation with four degrees of freedom, achieving data transmission of 224 Gb/s over a distance of 100km.

The use of polarization-mode dispersion can improve the coding gain due to the error floor and the iterative exchange of extrinsic soft-bit reliabilities between posterior probabilities. Hussam developed a way to implement such a modulation with different sub-carriers in a 3D space using coded hybrid sub-carrier/amplitude/phase/polarization (H-SAPP) [14]. Using Stokes parameters, H-SAPP allows 20 points to be incorporated into a 3D constellation mapping in the form of a dodecahedron inscribed in a Poincaré sphere based on regular polyhedrons [15]. Numerical results using 20-HSAPP show that  $BER = 1 \times 10^{-6}$  with an OSNR of 0.5dB could be achieved with a back-to-back configuration.

Here, we propose a hybrid subcarrier/amplitude/phase/dual polarization (H-SAPDP) system for optical transmission of 300 Gb/s. To improve performance, the system is based on polyhedrons. We demonstrate that the proposed system can be significantly banked to the Shannon limit over optical channels of different distances using WDM techniques.

The use of multidimensional modulations is a novel technique that holds promise for future generations of communication systems with both enhanced SE and superior BER performance. The SE and BER performances are known to be inversely proportional to one another according to the Shannon theory. In addition, the system may suffer from distortion effects if larger amounts of information are transmitted. However, the use of multidimensional techniques mitigates these challenges because, if the amount of information increases, it can be packaged by an interleaving bit distribution process to generate an N-dimensional lattice. This approach reduces the bit error rate, the inter-symbol interference, and the power transmission and consequently increases the SE as if two different modulations were being used at the same time: high-index modulation to improve the SE and low-index modulation to enhance the BER performance.

The proposed technique is implemented with different lattice dimensions in the interleaver process: a hypercubic multidimensional lattice with 16 symbols for 12 bits in an even alignment, and a polyhedron-spherical lattice with 32 symbols for 13 or 15 bits in an odd alignment. 12\_13 or 15 bits are allocated to each block and packed with three sub-carriers composed of DP signals ( $I_x, Q_x, I_y, Q_y$ ) and aligned in parallel (i.e., they transmit at the same time). One bit is added

to denote the change from even to odd alignment; thus, the packed block will have 5 bits and, consequently, the distribution packing can be set in the range of 13-15 bits.

Finally, this packaging is transformed into a 4D optical signal using Jones vectors and Pauli matrices designed according to the parameters of the polarized signal. Thus, the H-SAPDP system performs dual-lattice packing with multidimensional modulations at 50 Gsymbols/s. In this way, the binary input is divided among the 4D carriers for transmission over a distance of 50, 80, or 100km. This approach is compared with dodecahedral techniques based on the Poincaré technique and with different-dimensional packing.

Several possible constructions for the packing lattice have been proposed. However, unfortunately, this remains an unsolved problem in mathematics. The face-centered cubic lattice is obtained using a generator matrix in which the vectors represent the deep holes that arise from sphere packing (referred to as glue vectors). Another strategy is to consider the kissing number, which represents how many spheres can be arranged so that they all touch one central sphere of the same size [16]. In this study, we base the lattice on the theory of the sphere-packing problem which can be observed in the orange pyramid in fruit stands. Using this lattice configuration, the advantage of the triangles found in pyramids leads to geometrically equivalent packings.

To be precise, herein, we define the thickness (also called density, sparsity or coverage) as the number of spheres that contain a single point in space.

The remainder of this paper is organized as follows. Section II presents a description of the optical system considered here and the H-SAPDP coded modulation, the dual lattice used to build the cubic and spherical lattices (Section II-A), the interleaver process (Section II-B), the multidimensional modulator (Section II-B), and Stokes and polarized signal parameters (Section II-D). The numerical results of the simulation are presented in Section III. Finally, the conclusions are summarized in Section IV.

## II. H-SAPDP CODED MODULATION

There are many ways of building a constellation lattice in order to optimize the signal constellations using N-dimensions. Fig. 1 shows different methods of polarization over an optical fiber. Previously, 4D formats with single-polarization and switch polarization were severely limited due to the synchronization of X and Y signals (Fig. 1(b) and Fig. 1(c)) [17]. Today, it is possible to modulate different signals with orthogonal X and Y polarization with total dependency between them. Thus, we leveraged the four dimensions of the optical carrier field as shown in Fig. 1(d) in order to transport 16-point rectangular constellations and 28-point circular constellations through a cube and hypercube respectively in the 3D with total independence among them.



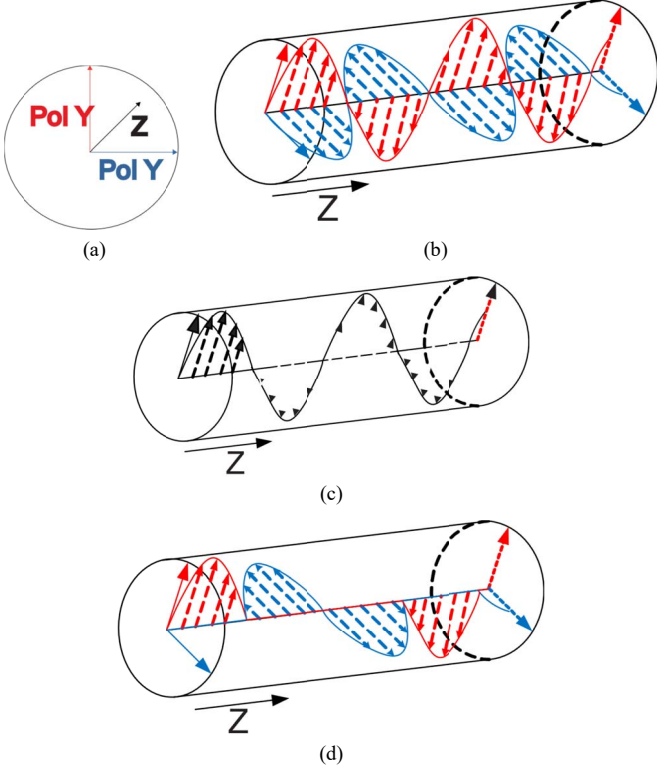


Fig. 1. Optical wave polarization techniques (a) Axis, (b) Single polarization, (c) Switch polarized, and (d) Dual polarization.

The proposed system, shown in Fig. 2 is composed of  $m$ -bit sources of  $n$  bits. Each source inserts input bit streams to the H-SAPDP transmitter to obtain a 4D lattice for each sub-carrier,  $A_{\lambda_q}$ . These carriers transmit modulated optical pulses to achieve different constellations, as shown in Fig. 5 (i.e., a cubic or spherical lattice, which are described later; Fig. 6). All the carriers are combined and transmitted by a single-mode optical fiber. Finally, at the receiver end, an optical splitter divides the optical carriers to recover the information.

Fig. 4(a) shows the general block diagram of the H-SAPDP transmitter which accepts  $m$ -bit inputs from the information sources, passes them through a set of identical LDPC encoders with a code rate of  $R = k/n$ , where  $k$  represents the number of information bits that the encoder accepts and  $n$  the length of the resulting codeword. The encoded data from these branches is forwarded to an  $[m \times n]$  block interleaver where it is written row-wise and read column-wise. In addition, the interleaver process performed by a dual-lattice multidimensional  $[D_N \times D_N]$  building matrix that is defined based on the lattice-packing process.

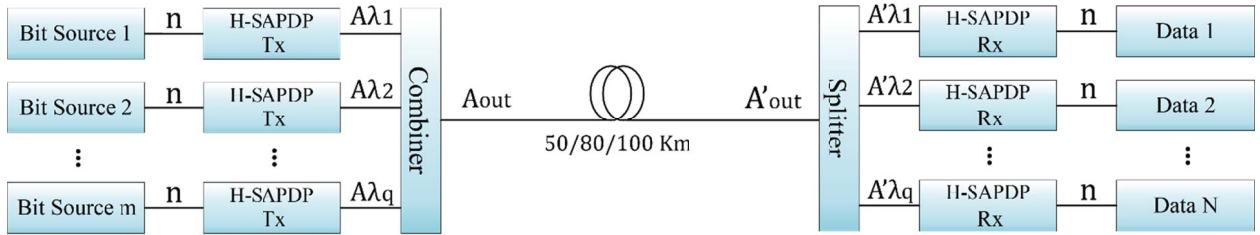


Fig. 2. Block Diagram Multi-Dimensional optical system.

#### A. Dual Lattice $D_N^*$

The checkerboard lattice is defined as  $D_N = \{(x_1, \dots, x_N) \in \mathbf{Z}^N: x_1 + \dots + x_N\}$ , where the four-dimensional lattice  $D_4$  is the most useful and defined by the following generator matrix described in [16]. The packing radius is normalized at  $\rho = 1/2$ :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & \dots & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

In our packing design, we adopted the generator matrix of four-dimensional lattice in order to integrate over 12, 13 and 15-dimensional lattices ( $D_N^* \times D_N^*$ ) that are explained later in the next scheme

#### B. Interleaver Process

The information that is output by the encoder is grouped into different  $N$ -dimensional lattices to obtain the multidimensional modulation matrix  $M$  and, subsequently, form the output bitstream  $m$ . However, we propose packaging strategies with 12, 13, and 15 bits in order to build  $N$ -dimensional lattices. In this way, different types of multidimensional dual-lattice packing, with different signal polarization parameters are used to obtain different signal constellations (Fig. 5 and Fig. 6). The signal polarization parameters based on the Stokes theory are described in the next section.

Fig. 3 shows the interleaver bit distributions for 12, 13, and 15 bits, which are evaluated in terms of performance and compared with previous results presented by Hussam in [14] to optimize the interleaver. 4D multidimensional packages of 16 symbols can be transmitted independently using four Stokes parameters as well as quadrature phase-shift keying (Q-PSK) and IQ modulation, each with both polarizations (X and Y) as shown in Table I. To package 12 bits in an even alignment with a 4D constellations (Fig. 5) shows for each sub-carrier,  $\lambda_q$ , the bits are packaged in 12 dimensions,  $D_N^* \times D_N^*$ , where the rows are written based on each vector of  $M$ , forming the block shown in Fig. 3(a).

For the 13 bit odd alignment, we use 32 symbols per sub-carrier to form the polyhedral and hypercubic multidimensional constellations (Fig. 6). The first column shows the odd bits, which are defined according to the most significant bit. These are used to decide whether to use the 16



symbols shown in Table I or the remaining 16 symbols shown in Table II. To maintain consistency in the data interleaving, the first dimension of the packing must contain bit1 for every sub-carrier as shown in Fig. 3(b).

Similarly, for 15 bits in an odd alignment, 32 symbols are used for each sub-carrier. However, the interleaver bit distribution is packaging 5 bits inside each sub-carrier to obtain the block shown in Fig. 3(c).

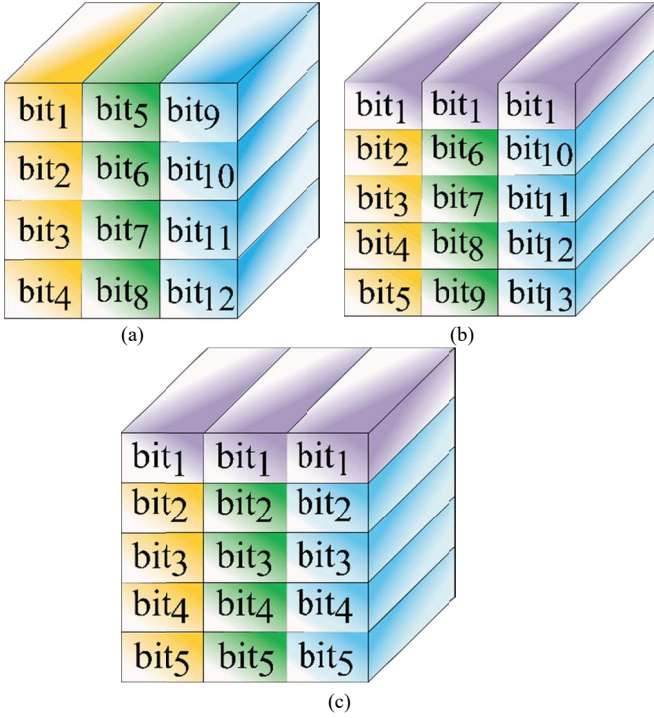


Fig. 3. Interleaver bit distribution (a) 12-bit even alignment, (b) 13-bit odd alignment, and (c) 15-bit odd alignment.

### C. Multidimensional Modulator

The symbol-mapping process is defined based on X-Y polarization information according to the lookup tables (LUTs) presented in Tables I and II to generate a 4D cube or polyhedron, respectively, as described in [18].

The  $I_{X_{\lambda_q}}/Q_{X_{\lambda_q}}$  and  $I_{Y_{\lambda_q}}/Q_{Y_{\lambda_q}}$  driving signals in the mapper output pass through the zero-insertion training symbols process defined as eight times the q-carrier frequencies (i.e.,  $\hat{I}_{X_{\lambda_q}}$ ), then, the signal is inserted to Multidimensional Modulator Block as is shown in Fig 4(a) and detailed in Fig. 4(c).

The modulation process uses a fiber ring with an internal phase modulator and an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) to compress the laser pulses in order to generate an ultrashort pulse width of 1.77ps. This optical oscillator is called the mode-locked fiber laser (MLFL) [19], using periodic rectangular pulses  $A_0(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \prod_{np} (t - T_m) \cdot e^{j\omega_{\lambda_q} np \cdot t}$ , where  $np$  is the number of infinite pulses,  $T_m = 1/f_m$  where  $f_m$  is

frequency of the modulator at 50 GHz [20].

Then,  $A_0(t)$  signal is divided by an optical splitter with the corresponding wavelengths, which is represented in the same way as two mutually orthogonal components of the electric field in a plane perpendicular but it is taken with optical frequency, defined in the same way [1]:

$$A_{0\lambda_q}(t) = A_0(t) \cdot e^{j(\omega_{\lambda_q}(t) + \phi_{XY}(t))} \quad (2)$$

where,  $\phi_{XY}$  has the probability of being  $\phi_X$  or either  $\phi_Y$ , defining them as the different polarization phases, which are both corrupted by the same phase noise of the transmitter.

Once the ultrashort pulses are input to PBS, it is branched for the X and Y polarization to obtain the instantaneous amplitudes of the two orthogonal vectors both modulated by In-phase Quadrature Mach-Zehnder Modulator (IQ-MZM) [17], which is shown in Modulator  $X_{\lambda_q}$  and Modulator  $Y_{\lambda_q}$  blocks in the Fig. 4(c). These blocks are composed by two Mach-Zehnder Modulators (MZM) each one, which were used to modulate the electrical signals ( $\hat{I}_{X_{\lambda_q}}$ ), ( $\hat{Q}_{X_{\lambda_q}}$ ), and ( $\hat{I}_{Y_{\lambda_q}}$ ), ( $\hat{Q}_{Y_{\lambda_q}}$ ) in light intensity, thus in this way we generate at the output of MZM an optical signal with in-phase and quadrature components respectively. These equations are described below:

$$\begin{aligned} A_{0\lambda_q, \hat{I}_X}(t) &= \frac{-|A_0|}{2} \sin(\phi_{I_X}(t)) \cdot e^{j\omega_{\lambda_q}(t)} \\ A_{0\lambda_q, \hat{I}_Y}(t) &= \frac{-|A_0|}{2} \sin(\phi_{I_Y}(t)) \cdot e^{j\omega_{\lambda_q}(t)} \\ A_{0\lambda_q, \hat{Q}_X}(t) &= \frac{-|A_0|}{2} \sin(\phi_{Q_X}(t)) \cdot e^{j\omega_{\lambda_q}(t)} \\ A_{0\lambda_q, \hat{Q}_Y}(t) &= \frac{-|A_0|}{2} \sin(\phi_{Q_Y}(t)) \cdot e^{j\omega_{\lambda_q}(t)} \end{aligned} \quad (3)$$

where  $A_0$  is the amplitude pulse normalized at 1 and:

$$\begin{aligned} \phi_{I_X}(t) &= \frac{\hat{I}_{X_{\lambda_q}}(t) \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)}{2V_\pi} \\ \phi_{I_Y}(t) &= \frac{\hat{I}_{Y_{\lambda_q}}(t) \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)}{2V_\pi} \\ \phi_{Q_X}(t) &= \frac{\hat{Q}_{X_{\lambda_q}}(t) \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)}{2V_\pi} \\ \phi_{Q_Y}(t) &= \frac{\hat{Q}_{Y_{\lambda_q}}(t) \cdot \pi \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)}{2V_\pi} \end{aligned} \quad (4)$$

where  $V_\pi$  is the voltage equal to 2.5V in order to achieve a phase shift. Thus, the modulated pulse for X and Y polarization are represented as follows:

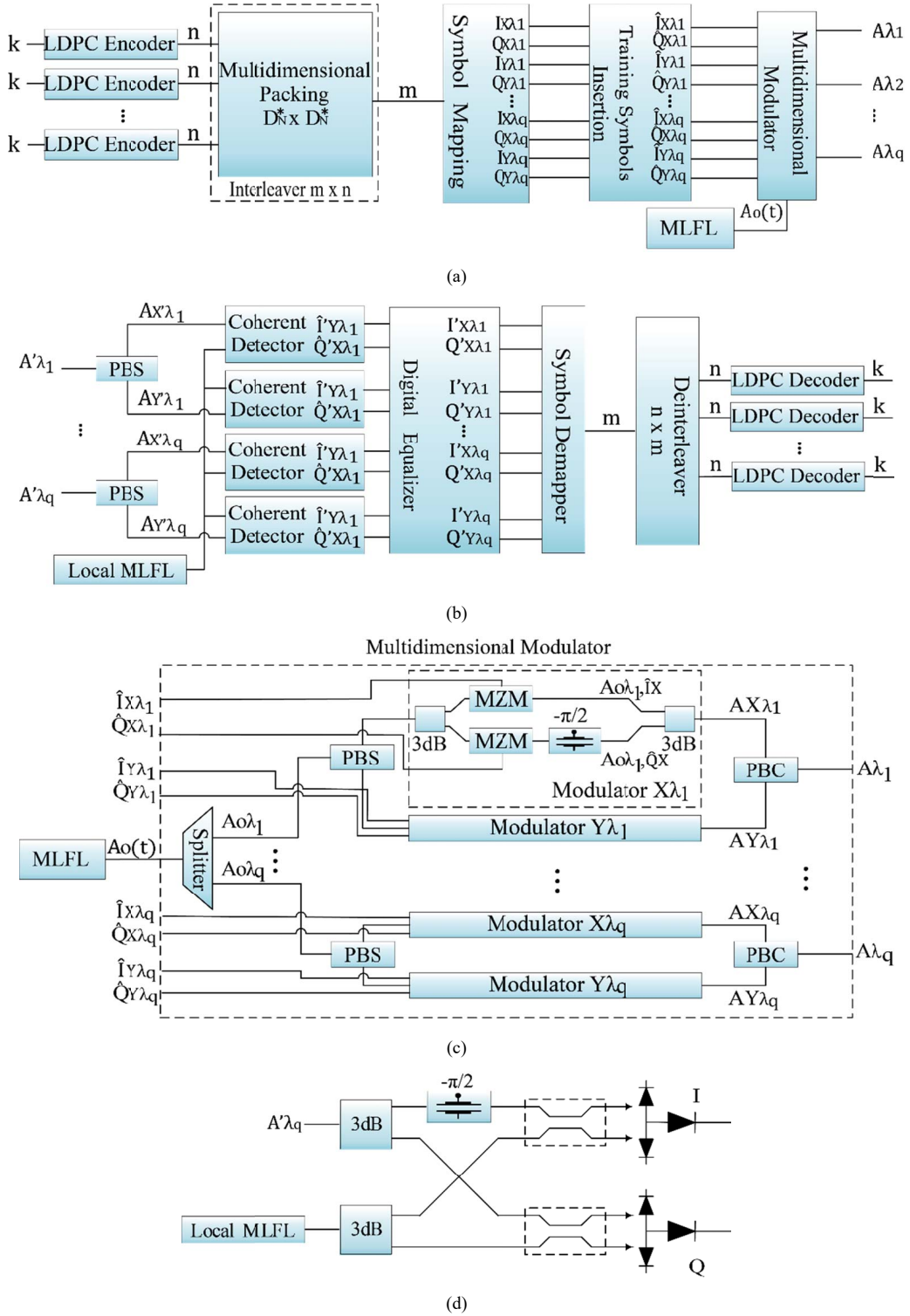


Fig. 4. H-SAPDP System (a) Transmitter Scheme, (b) Receiver Scheme, (c) Multidimensional modulator scheme, and (d) Coherent Detector scheme

$$\begin{aligned}
 A_{X_{\lambda_q}}(t) &= \Re\{A_{0\lambda_q, \hat{I}_X}(t)\} + \Im\{A_{0\lambda_q, \hat{Q}_X}(t)\} \\
 A_{Y_{\lambda_q}}(t) &= \Re\{A_{0\lambda_q, \hat{I}_Y}(t)\} + \Im\{A_{0\lambda_q, \hat{Q}_Y}(t)\}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Thus, the polarized outputs  $A_{X_{\lambda_q}}(t)$  and  $A_{Y_{\lambda_q}}(t)$  are combined by Polarization Beam Combiner (PBC) to obtain  $A_{\lambda_q}$  as the modulated signal for  $q$  subcarrier.

#### D. Stokes and Polarized Signal Parameters

Based on the coherent properties of a light beam, the spin

angular momentum defines the polarization state and the orbital angular momentum is associated with the azimuthal phase structure but is independent of the spin parameter. A geometric representation of the polarization state called the Jones vector was proposed in 1892; the amplitude and phase of the Jones Vector represent the 2D complex vectors of the electric field.

$A_{x,\lambda_q}$  and  $A_{y,\lambda_q}$  are used to denote the amplitudes of the waves in the two components of the electric field vector and their respective phases. The product between a Jones vector and a complex number gives a different Jones vector represented in the same state of polarization.

To represent the monochromatic Stokes parameters [22] as a linear expansion, we use the Jones vectors of the instantaneous electric field as elements of the coherency matrix of the  $n$ -th wave and combine them by Pauli matrices [21], where any wave may be regarded as the sum of independent waves (completely unpolarized and completely polarized waves):

$$A_X = \sum_{n=1}^N A_X^{(n)}(t), \quad A_Y = \sum_{n=1}^N A_Y^{(n)}(t) \quad (6)$$

Next, the coherency matrix is written as the conjugate of each element in the matrix, which produces a Hermitian matrix, as follows:

$$J = \begin{bmatrix} J_{XX} & J_{XY} \\ J_{YX} & J_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle A_X A_X^* \rangle & \langle A_X A_Y^* \rangle \\ \langle A_Y A_X^* \rangle & \langle A_Y A_Y^* \rangle \end{bmatrix} \quad (7)$$

The Stokes parameters are physically measurable and are properties represented as [23]:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; & \sigma_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \\ \sigma_2 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; & \sigma_3 &= \begin{pmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

The coherency matrix is not easy to visualize, so that we describe the partially polarized radiation in terms of the total beam intensity ( $S_0$ ).  $S_1$  and  $S_2$  denote the azimuthal phase information for the right and left circular polarization, respectively and  $S_3$  is defined as [24]. Thus, the Stokes parameters can be written as functions of the intensity and polarization, where the intensity is referred to at Jones Matrices and the polarization is referred to at Pauli matrices. Thus, the Stokes parameters are defined as follows:

$$\begin{aligned} S_0 &= (A_X^* A_Y^*) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \end{pmatrix} = J_{XX} + J_{YY} = A_X^2 + A_Y^2 \\ S_1 &= (A_X^* A_Y^*) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \end{pmatrix} = J_{XX} - J_{YY} = A_X^2 - A_Y^2 \\ S_2 &= (A_X^* A_Y^*) \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \end{pmatrix} = J_{XY} + J_{YX} = 2A_X A_Y \cos(\delta) \\ S_3 &= (A_X^* A_Y^*) \begin{pmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \end{pmatrix} = j(J_{YX} - J_{XY}) = j2A_X A_Y \sin(\delta) \\ \delta &= \theta_X - \theta_Y \end{aligned} \quad (9)$$

Then, the outputs of the H-SAPDP transmitters are forwarded to a combiner before being transmitted via the optical fiber. On the receiver side, as shown in Fig. 4(b), the signal is split into  $\lambda_q$  branches, forwarded to the H-SAPDP receivers, and sampled at the symbol rate.

The process of information recovery begins by using a PBS to separate the X - Y polarized information from  $A\lambda_q$  to retrieve the IQ signal through the coherent detector composed by an MLFL as local oscillator (LO) and an internal phase modulator in order to compare the input and LO signals to obtain the IQ electrical signals, as shown in Fig. 4(d).

TABLE I

	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$A_X$	$A_Y$	$I_X$	$Q_X$	$I_Y$	$Q_Y$
0000	$\sqrt{3}/2$	0	0	$\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2
0001	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	-1/2	-1/2	-1/2	1/2
0010	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	-1/2	-1/2	1/2	-1/2
0011	$\sqrt{3}/2$	0	0	$-\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	-1/2	-1/2	1/2	1/2
0100	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	-1/2	1/2	-1/2	-1/2
0101	$\sqrt{3}/2$	0	0	$\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	-1/2	1/2	-1/2	1/2
0110	$\sqrt{3}/2$	0	0	$-\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	-1/2	1/2	1/2	-1/2
0111	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	-1/2	1/2	1/2	1/2
1000	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	1/2	-1/2	-1/2	-1/2
1001	$\sqrt{3}/2$	0	0	$-\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	1/2	-1/2	-1/2	1/2
1010	$\sqrt{3}/2$	0	0	$\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	1/2	-1/2	1/2	-1/2
1011	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	1/2	-1/2	1/2	1/2
1100	$\sqrt{3}/2$	0	0	$-\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	1/2	1/2	-1/2	-1/2
1101	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	1/2	1/2	-1/2	1/2
1110	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	1/2	1/2	1/2	-1/2
1111	$\sqrt{3}/2$	0	0	$\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	1/2	1/2	1/2	1/2

All the IQ polarized sub-carrier signals are forwarded by a digital equalizer in order to compensate the obtained signal by removing the training symbols by applying the intra-symbol frequency-domain averaging channel estimation technique developed previously [25].

Next, demapping was applied to these signals to yield 16 or 32 multidimensional symbols placed in cubic or spherical lattices, respectively, as shown in Fig. 5 and Fig. 6, respectively, to form a hypercube or polyhedron, respectively. Based on the theory of molecular links, the use of these geometric figures can reduce the symbol energy due to grouping and allow more data to be transmitted. Then, the output signals are forwarded to deinterleaver and, finally, to the bit log-likelihood ratio calculator which provides  $N$  LDPC decoders with the appropriate code rate,  $[k/n]$ . This process helps to improve the system performance (i.e., reduce the BER) without increasing the system's complexity.

TABLE II  
STOKES AND POLARIZED SIGNAL PARAMETERS FOR POLYHEDRAL LATTICE

	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	A <sub>X</sub>	A <sub>Y</sub>	I <sub>X</sub>	Q <sub>X</sub>	I <sub>Y</sub>	Q <sub>Y</sub>
00000	$\sqrt{3}/2$	0	0	$\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2
00001	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	-1/2	-1/2	-1/2	1/2
00010	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	-1/2	-1/2	1/2	-1/2
00011	$\sqrt{3}/2$	0	0	$-\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	-1/2	-1/2	1/2	1/2
00100	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	-1/2	1/2	-1/2	-1/2
00101	$\sqrt{3}/2$	0	0	$\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	-1/2	1/2	-1/2	1/2
00110	$\sqrt{3}/2$	0	0	$-\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	-1/2	1/2	1/2	-1/2
00111	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	-1/2	1/2	1/2	1/2
01000	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	1/2	-1/2	-1/2	-1/2
01001	$\sqrt{3}/2$	0	0	$-\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	1/2	-1/2	-1/2	1/2
01010	$\sqrt{3}/2$	0	0	$\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	1/2	-1/2	1/2	-1/2
01011	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	1/2	-1/2	1/2	1/2
01100	$\sqrt{3}/2$	0	0	$-\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	1/2	1/2	-1/2	-1/2
01101	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	1/2	1/2	-1/2	1/2
01110	$\sqrt{3}/2$	0	$-\sqrt{3}/2$	0	$\sqrt{3}/4$	$\sqrt{3}/4$	1/2	1/2	1/2	-1/2
01111	$\sqrt{3}/2$	0	0	$\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/4$	$-\sqrt{3}/4$	1/2	1/2	1/2	1/2
10000	1/4	-1/4	0	0	0	-1/2	0	0	0	-1
10001	1/4	-1/4	0	0	0	1/2	0	0	0	1
10010	1/4	-1/4	0	0	0	-1/2	0	0	-1	0
10011	1/4	-1/4	0	0	0	1/2	0	0	1	0
10100	1/4	1/4	0	0	1/2	0	0	-1	0	0
10101	1/4	1/4	0	0	-1/2	0	0	1	0	0
10110	1/4	1/4	0	0	1/2	0	-1	0	0	0
10111	1/4	1/4	0	0	-1/2	0	1	0	0	0
11000	1/2	0	1/4	0	1/2	1/2	-1	0	0	-1
11001	1/2	0	-1/4	0	1/2	1/2	-1	0	0	1
11010	1/2	0	-1/4	0	-1/2	1/2	1	0	0	-1
11011	1/2	0	1/4	0	-1/2	1/2	1	0	0	1
11100	1/2	0	-1/4	0	1/2	1/2	0	-1	-1	0
11101	1/2	0	1/4	0	1/2	1/2	0	-1	1	0
11110	1/2	0	1/4	0	-1/2	1/2	0	1	-1	0
11111	1/2	0	-1/4	0	-1/2	1/2	0	1	1	0

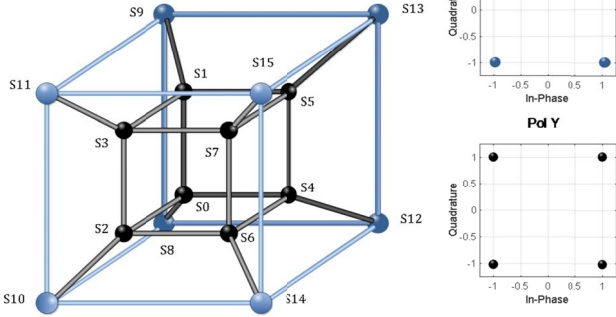


Fig. 5. Multidimensional Construction of the hypercube.

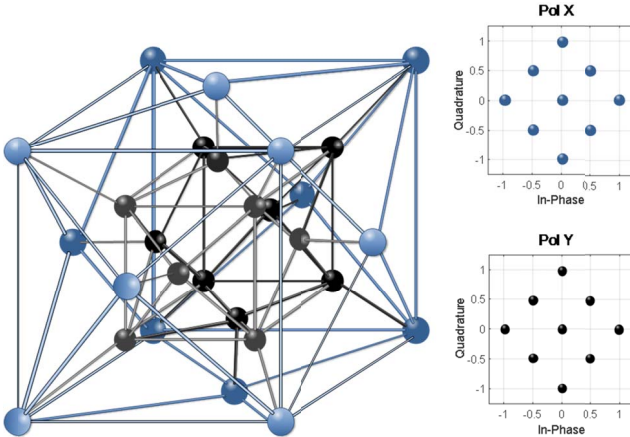


Fig. 6. Multidimensional Construction of the polyhedron.

### III. MULTIDIMENSIONAL SIMULATION SETUP AND NUMERICAL RESULTS

The functionality of the H-SAPDP LDPC-coded-modulation system was tested by simulation in MATLAB based on the parameters shown in Table III, the optical

parameters proceed to SMF-28 Ultra optical fiber<sup>1</sup> due to low attenuation and polarization mode dispersion index

TABLE II  
SIMULATION PARAMETERS

	Value	Unit
Distance	50/ 80/ 100	[Km]
Attenuation ( $\alpha$ )	0.18	[dB/Km ]
Non-linearity Index ( $\eta_2$ )	$2.6e^{-20}$	[m <sup>2</sup> /W ]
$A_{eff}$	$80e^{-12}$	[m <sup>2</sup> ]
Dispersion Slope ( S )	0.056	[ps/(nm <sup>2</sup> · Km)]
Dispersion ( D )	18	[ps/(nm · Km)]
Sub-Wavelength ( $\lambda_n$ )	1543/ 1548/ 1553	[nm]
Carrier Frequency ( $f_c$ )	193.56	[THz]
Modulation Frequency ( $f_m$ )	50	[GHz]
Modulation Period ( $T_m$ )	20	[ps]
Initial Pulse Amplitude ( $A_0$ )	0.5	[—]
Carrier Period ( $T_c$ )	5.1667	[fs]
Sources	[25 × 1200]	[bits]
LDPC Encoder	[25 × 2400]	[bits]
Interleaver Cube	[12 × 5000]	[bits]
Interleaver Polyhedron	[15 × 4616]	[bits]
Bit Rate Cube	300	[Gbps]
Bit Rate Polyhedron	375	[Gbps]
Information Bits Cube	12	[bits]
Information Bits Polyhedron	13	[bits]

According to Fig. 4(a), the simulation setup feed by  $m = 25$  parallel data sources, each source is coded by LDPC Encoder which the code rate is  $R = 1/2$ . The Interleaver block reshapes the information into different N-dimensional lattices in the way described in Section II.B, next the coded data are divided in order to translate the binary information into driving voltage signals through Table I or Table II for each subcarrier, depending on dimensional alignment, to feed the multidimensional modulator described in Section II.C.

For the DP pulse propagation, the split-step Fourier method extension presented in [26] was used to present the Schrödinger propagation at the single-mode in the X-Y plane.

In the first scenario, the BER performance was analyzed for a 4D signal transmitted through each 4D sub-carrier  $\lambda_1, \dots, \lambda_q$ , with 12 bits. The symbol data constellations were built according to polarized signal parameters as shown in Table I in order to represent the 16-points in 3D. Fig. 7(a) shows the results after transmission over distances of 50, 80, and 100 km. The best result was obtained over 50km, exhibiting a very close response with an OSNR of 6dB and a  $BER = 10^{-6}$ . The transmission rate, defined as the product of the number of sub-carriers, the modulation frequency, the bits transmitted and codification rate ( $3 \times 50 \times 4 \times 0.5$ ), was 300 Gbps.

The performance in terms of BER was excellent compared to that achieved using traditional modulation techniques with 2D dimensions over a transmission distance of 100km. Moreover, the proposed hybrid technique made it possible to transmit more information (up to 256-QAM) while, at the same time, reducing the OSNR.

Fig. 8(a) shows the 4D constellation diagram mapped in 3D space for one sub-carrier. This was the expected result of the hypercube construction based on the molecular technique with identical inscribed polygons. The OSNR in the back-to-back configuration was set to 10dB to visualize the multidimensional system noise. The hypercube was generated

<sup>1</sup> <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/SMF-28%20Ultra.pdf>



by setting the height and length in the first two dimensions based on the  $I_Y/Q_Y$  data, the width in third-dimension was set based on the  $Q_X$  data, and an internal or external cube was selected (i.e., the fourth dimension based on the  $I_X$  data). In this way, the 4D symbol generates the lattice despite the noise to facilitate suitable robust transmission.

Similarly, Fig. 7(b) shows the BER performance when an odd alignment was used to generate a 4D polyhedron constellation for each sub-carrier.

With the polyhedron technique, a gain of 2 dB in terms of the OSNR was achieved for 12-bit transmission over 50km while transmission over 80 and 100km resulted in a 3dB OSNR gain. Furthermore, the BER was approximately  $10^{-6}$  for 12-bit transmission. In this context, it is more convenient to work with an additional bit but the same performance cannot be achieved with 15 bits due to the packing process.

As the multidimensional system noise sensibility for the 4D-polyhedron constellation is presented in Fig. 8(b) shows the result when a back-to-back configuration is used again, the OSNR was set at 10dB to visualize the hypercube and polyhedron techniques under the same conditions.

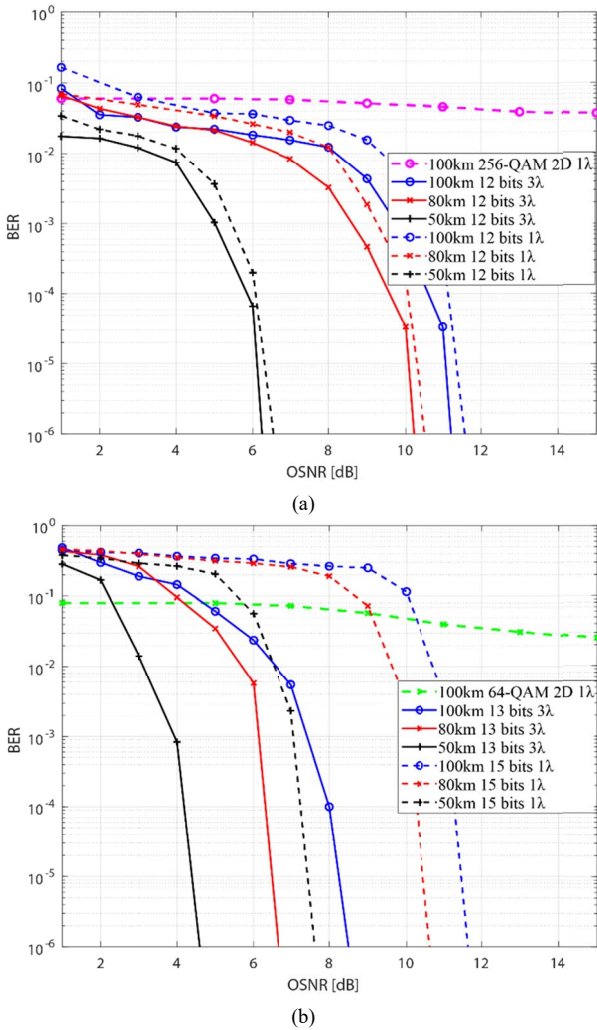


Fig. 7. BER performance analysis (a) with a 4D cubic lattice (even alignment) and (b) with a polyhedral lattice (odd alignment).

In the non-linear effect, the spectral envelope gives rise to a wider peak power due to chromatic dispersion and non-linear phase variation on X-Y plane; this effect generates new optical frequency components as the pulses propagate.

It is important to note that this non-linearity effect is due to transmission distance and the wavelength compression due to data packing for single-channel transmission. In this system, increasing the wavelength could cause a distortion in the system and, consequently, degraded the SE. However, with three sub-carriers the SE and BER are very stable over long distances, as shown in Fig. 10 and Fig. 11. Note that the effect of wave mixing occurs when N-subcarriers are used. However, it is not necessary to analyze the non-linearity or implement compensation to avoid channel interference, for the reasons described previously.

Spectral density (PSD) was obtained using (10), where  $T_s$  is the period for a pulse and  $R(k)$  represents the pulse autocorrelation defined in (11) for a bipolar RZ signal.

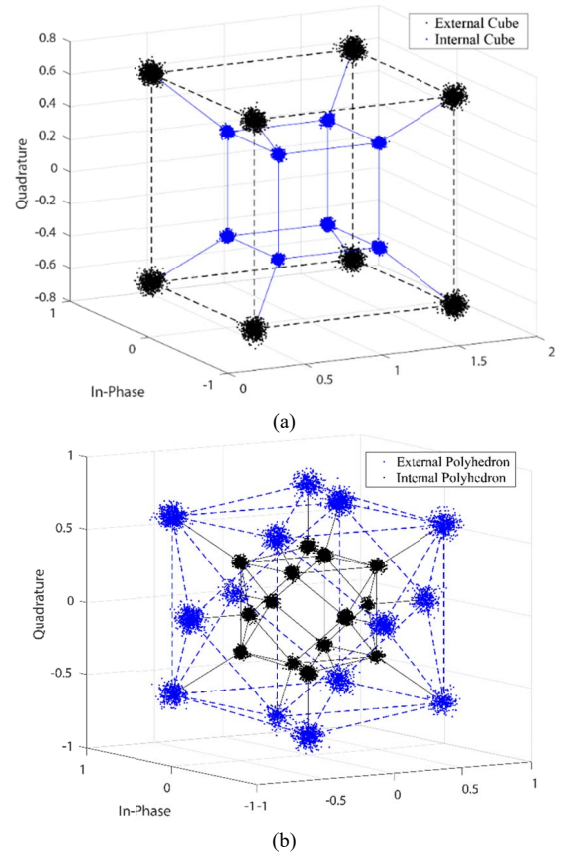


Fig. 8. 4D Geometric (a) Back-to-back representation of the 4D cubic lattice (even alignment) with an OSNR of 10dB and (b) Back-to-back representation of the 4D polyhedral lattice (odd alignment) alignment) with an OSNR of 10dB.

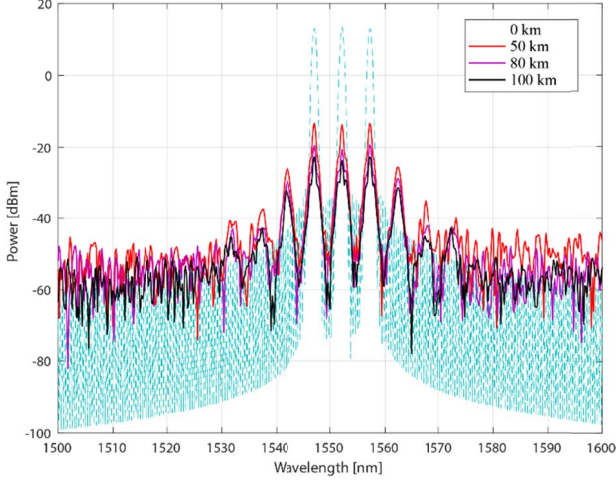


Fig. 9. PSD with the proposed system at an OSNR of 5 dB.

PSD comparison between system proposed H-SAPDP with Hussam at OSNR = 5dB.

$$P(f) = \frac{|F\{A_{OUT}(t)\}|^2}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(k) e^{jk2\pi f_c T_s} \quad (10)$$

$$R(k) = \begin{cases} |A_{OUT}|^2/2 & k=0 \\ -|A_{OUT}|^2/4 & |k|=1 \\ 0 & |k|>0 \end{cases} \quad (11)$$

Given the complex envelopment signal,  $A_{OUT}$ , the PSD function in Equation (10) can be rewritten as follows:

$$P(f) = \frac{|A_{OUT}(t)|^2 T_s}{8} \left( \frac{\sin(\pi T_s / 2)}{\pi T_s / 2} \right)^2 (1 - \cos(2\pi f_c T_s)) \quad (12)$$

$$P(f) = \frac{|A_{OUT}(t)|^2 T_s}{4} \left( \frac{\sin(\pi T_s / 2)}{\pi T_s / 2} \right)^2 (\sin^2(\pi f_c T_s))$$

The PSD in Fig. 9 shows that two new frequency components occurred at 1542 and 1562nm due to chromatic dispersion over the propagation distance. This secondary frequency has 13.66% less power than the central pulse peak power at a transmission distance of 50km.

The Hussam system supports up to 10km of distance using two sub-carriers. Fig. 10 shows the comparison between Hussam and the proposed method in terms of PSD. H-SAPDP remained superior compared to the Hussam system using even one additional sub-carrier. The SE in Hussam method at 50km is already degraded.

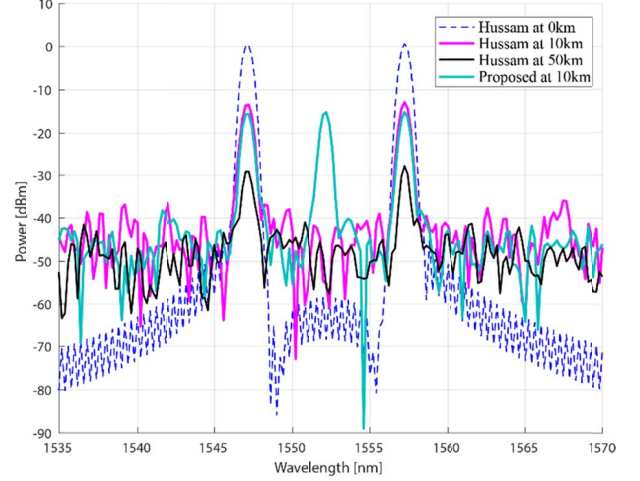


Fig. 10. PSD Comparison between system proposed H-SAPDP with Hussam at OSNR=5 dB.

We further compare the BER performance using the proposed system with the Poincaré technique developed by Hussam and our HSAPDP proposal over 10 km and 50 km respectively. Fig. 11 shows the simulation results among these two techniques, where the 10 km scenario presents an interesting result of OSNR = 4dB and a  $BER=1 \times 10^{-8}$  for the Poincaré technique, however, the proposed technique has a gain of 0.5dB and 1dB for 12-bit and 13-bit multidimensional format, respectively.

On the other hand, the 50km scenario shows a high error level of  $BER = 1 \times 10^{-1}$  for the Poincaré technique, meanwhile, the proposed technique achieves a  $BER = 1 \times 10^{-8}$  at 6.5dB and 5dB of OSNR for 12-bit and 13-bit multidimensional formats respectively. As is shown, there exists a gain of 1.5dB and 0.5dB in terms of OSNR between 13-bit and 12-bit multidimensional formats. In this context, the Poincaré technique involves the use of a dodecahedral geometry for symbol mapping in 3D space, but this technique cannot be supported beyond 10km of distance while, in contrast, we demonstrated that our systems can be used for long transmissions at different wavelengths. In this context, the Power Spectrum degradation is negligible between 80km and 100km of distance as is shown in Fig. 9.

Also, in order to achieve a beyond 1Tb/s transmission, our proposed is evaluated over optical time-division multiplexing (OTDM), based on the Nyquist filter combined by MLFL to generate a Nyquist pulse train [27]. In the reception, a homodyne coherent detection achieves  $(3 \times 50 \times 4 \times 0.5) \times 4$  timeslots = 1.2Tb/s transmission for 12-bit system and  $(3 \times 50 \times 5 \times 0.5) \times 4$  timeslots = 1.5Tb/s for the 13 bits system based on the definition of the transmission rate used previously, improvement the rate of 320 Gb/s over 4-time slots for OTDM-DQPSK and a homodyne coherent detection scheme presented in [28]



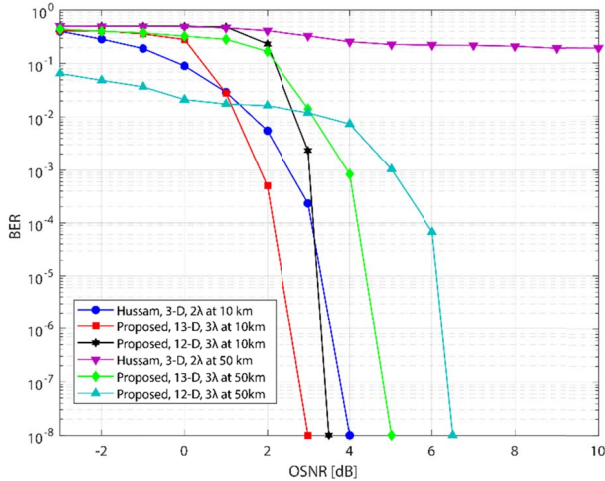


Fig. 11. Comparison of BER Performance between system proposed HSAPDP and Hussam over 10km and 50km.

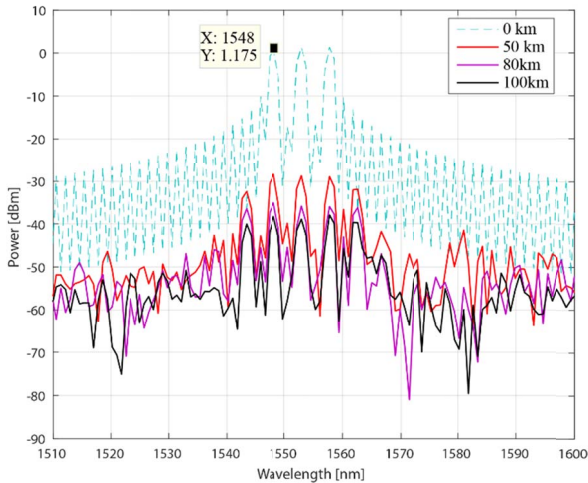


Fig. 12. PSD with the proposed system H-SAPDP using 4-time slots OTDM at an OSNR of 5 dB.

The simulation results, expressed in Fig. 12, show the power reduction over the OTDM transmitted signal. Here, we can compare the spectral efficiency between OTFDM-DQPSK systems and our proposal of Fig. 9. In order to demonstrate that our systems can increase the velocity, but its spectral efficiency is worsened. In conclusion, our system is widely affected when it is used the OTDM signal, having a penalty of 12 dB with respect to the non-OTDM signal. This reduction of peak to average in the OTDM signal is due to Nyquist pulse compression, which is used to OFDM signals [29]. Consequently, the SE is degraded even more if the distance is increased. Concluding in this way, that there exists a trade-off between the transmission rate and the Spectral Efficiency due to the time-multiplexing degrade, is being this very important penalty to consider when the system can be implemented at high-speed data transmission.

#### IV. CONCLUSIONS

In this study, we demonstrated that the novel H-SAPDP LDPC-coded-modulation system can improve the BER

performance for long-distance transmission. In addition, we demonstrated a novel technique based on the Poincaré sphere and Stokes parameters to achieve more data packaging in the 3D space. The results are promising since the multidimensional modulation can achieves high data transmissions in the same way that high-index traditional modulation format but using a grouping of two polarizations for each subcarrier either in 12 bits and 13 bits. In this way, we transmit with less energy per symbol improving the spectral efficiency and BER performance at the same time.

Moreover, we implemented the Pol-Mux technique over the WDM system using three sub-carriers to achieve 12 bits-even alignment, which is not possible with another type of 4-D independent carrier modulation. We further expanded the technique to be N-dimensional for handling 13 and 15 bits-odd alignment. Finally, cubic and polyhedral constellations were used in the three-dimensional plane to demonstrate that our proposed exceeds the Hussam method. Results reveal the efficiency of BER performance at 3 dB and 0.3 dB for odd and even configuration respectively in traditional systems with the only-one subcarrier. Also, our proposal can support greater distance with spectral efficiency penalty negligible respect to Hussam method.

From a system general performance perspective, a 13-bits odd configuration offers more robust transmission compare to a simple 4-D transmission over single-mode fiber. On the other hand, the analysis performance considering the shape lattice between rectangular (12-bits) and cross-constellation (13-bits), we conclude that 13-bits is the ideal method in order to implement over real systems. The numerical results reveal an important gain in terms of Optical-SNR when the systems supported at 100km of distance. We obtain around 8.5dB of OSNR with a  $BER = 1 \times 10^{-6}$  using the max distance. Another relevant aspect, our proposal has a gain compared with the traditional multidimensional modulation using one-carrier. The gain corresponds to 3.7dB for all distances (50/80/100km) when  $3\lambda$  were used.

In future studies, the SE can be improved further by analyzing the non-linear channel formed due to the increased number of sub-carriers. Moreover, to apply new techniques of compensating for the four-wave-mixing effects, the number of lambdas should be increased in future iterations of the system. Additional to increase the number of subcarriers, we could to study the allocation of wavelengths in order to improve the spectrum efficiency and power consumption in the system. This study will bring us to deepen the elastic networks for the future generation.

#### REFERENCES

- [1] G. D. Forney y L. F. Wei, "Multidimensional Constellations-Part I: Introduction, Figures of Merit, and Generalized Cross Constellations," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 7, pp. 877-892, Aug. 1989.
- [2] M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh y H. Baligh, "SCMA Codebook Design," Vancouver, Dec. 2014.
- [3] D. Sharma y S. Kumar, "An overview of elastic optical networks and its enabling technologies," *Int. J. Eng. Technol.(IJET)*, vol. 9, pp. 1643-1649, Jun-Jul. 2017.

- [4] S. G. Evangelides, L. F. Mollenauer, J. P. Gordon y N. S. Bergano, "Polarization Multiplexing with Solitons," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, pp. 28-35, Jan. 1992.
- [5] D. Qian, N. Cvijetic, J. Hu y T. Wang, "108 Gb/s OFDMA-PON With Polarization Multiplexing and Direct Detection," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 484-493, Aug. 2010.
- [6] F. Tian, D. Guo, B. Liu, Q. Zhang, Q. Tian, R. Ullah y X. Xin, "A Novel Concatenated Coded Modulation Based on GFDM for Access Optical Networks," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, pp. 1-8, Feb. 2018.
- [7] J. Müllerová, D. Korček y M. Dado, "On wavelength blocking for XG-PON coexistence with GPON and WDM-PON networks," in Proc. of the *14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Coventry, UK, Jul. 2012. pp. 1-4.
- [8] H. G. Batshon, I. B. Djordjevic, L. L. Minkov, L. Xu, T. Wang y M. Cvijetic, "Proposal to Achieve 1 Tb/s per Wavelength Transmission Using Three-Dimensional LDPC-Coded Modulation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, pp. 721-723, Apr. 2008.
- [9] S. O. Arik, D. Millar, T. Koike-Akino, K. Kojima y K. Parsons, "High-dimensional modulation for mode-division multiplexing," in Proc. of the *Optical Fiber Communication Conference*, San Francisco, CA, USA, Mar. 2014, pp. 1-4.
- [10] H. Bülow, "Polarization QAM modulation (POL-QAM) for coherent detection schemes," in Proc. of the *Optical Fiber Communication Conference*, San Diego, CA, USA, Mar. 2009, pp. 25-27.
- [11] J. K. Fischer, C. Schmidt-Langhorst, S. Alreesh, R. Elschner, F. Frey, P. W. Berenguer, L. Molle, M. Nölle y C. Schubert, "Generation, Transmission, and Detection of 4-D Set-Partitioning QAM Signals," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, pp. 1445-1451. Dec. 2014.
- [12] M. Arabaci, I. B. Djordjevic, L. Xu y T. Wang, "Four-dimensional nonbinary LDPC-coded modulation schemes for ultra-high-speed optical fiber communication," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, pp. 1280-1282, Jun. 2011.
- [13] J. Leibrich y W. Rosenkranz, "Power efficient multidimensional constellations," in Proc. of the *Photonic Networks; 15. ITG Symposium*, Leipzig, Germany, May. 2014.
- [14] H. G. Batshon y I. B. Djordjevic, "Beyond 240 Gb/s per wavelength optical transmission using coded hybrid subcarrier/amplitude/phase/polarization modulation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, pp. 299-301, Jan. 2010.
- [15] H. G. Batshon y I. B. Djordjevic, "Hybrid amplitude/phase/polarization coded modulation for 100 Gb/s optical transmission and beyond," in Proc. of the *LEOS Annual Meeting Conference Proceedings*, 2009. LEOS'09. IEEE, Belek-Antalya, Turkey, Oct. 2009, pp. 604-605.
- [16] N. J. A. S. J.H Conway, *Sphere Packings, Lattices and Groups*, vol. 338, 1998, pp. 0,488.
- [17] F. Buchali y H. Bülow, "Experimental transmission with POLQAM and PS-QPSK modulation format using a 28-Gbaud 4-D transmitter," in Proc. of the *38th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC)*, Amsterdam, Netherlands, Sep. 2012, pp. 1-3.
- [18] H. G. Batshon, I. Djordjevic y T. Schmidt, "Ultra high speed optical transmission using subcarrier-multiplexed four-dimensional LDPC-coded modulation," *Opt. Express*, vol. 18, pp. 20546-20551, Sep. 2010.
- [19] J. Yao, J. Yao, Y. Wang, S. C. Tjin, Y. Zhou, Y. Loy Lam, J. Liu y C. Lu, "Active mode locking of tunable multi-wavelength fiber ring laser," *Optics Communications*, vol. 191, pp. 341-345, Feb. 2001.
- [20] D. T. Nguyen, J. Abou y A. Morimoto, "Ultrashort pulse generation using fiber FM laser," *Optical review*, vol. 19, pp. 337-340, 2012.
- [21] J. J. Gil, "Polarimetric characterization of light and media," *Eur. Phys. J. Appl. Phys*, vol. 40, pp. 1-47, Oct. 2007.
- [22] M. Born y E. Wolf, "Principles of Optics," chap. 1, Cambridge University Press, vol. 7, pp. 360-370, 1975.
- [23] W. H. McMaster, "Matrix representation of polarization," *Reviews of modern physics*, vol. 33, p. 8, Jan-Mar. 1961.
- [24] G. Milione, H. I. Sztul, D. A. Nolan y R. R. Alfano, "Higher-order Poincaré sphere, Stokes parameters, and the angular momentum of light," *Physical review letters*, vol. 107, p. 053601, Jul. 2011.
- [25] X. Liu y F. Buchali, "Intra-symbol frequency-domain averaging based channel estimation for coherent optical OFDM," *Optics Express*, vol. 16, p. 21944, Dec. 2008.
- [26] R. Deiterding y S. W. Poole, "Robust split-step Fourier methods for simulating the propagation of ultra-short pulses in single-and two-mode optical communication fibers," in *Splitting Methods in Communication, Imaging, Science, and Engineering*, Springer, Jan. 2016, pp. 603-625.
- [27] M. Yoshida, J. Nitta, K. Kimura, K. Kasai, T. Hirooka y M. Nakazawa, "Single-channel 3.84 Tbit/s, 64 QAM coherent Nyquist pulse transmission over 150 km with frequency-stabilized and mode-locked laser," in Proc. of the *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Los Angeles, CA, pp. Th2A.52, Mar. 2017, Jun. 2017.
- [28] N. D. Nguyen y L. N. Binh, "Demultiplexing techniques of 320 Gb/s OTDM-DQPSK signals: A comparison by simulation," in Proc. of the *2010 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, Singapore, Singapore, Nov. 2010. pp. 171-175.
- [29] R. Schmogrow, M. Winter, M. Meyer, D. Hillerkuss, S. Wolf, B. Baeuerle, A. Ludwig, B. Nebendahl, S. Ben-Ezra, J. Meyer y others, "Real-time Nyquist pulse generation beyond 100 Gbit/s and its relation to OFDM," *Optics Express*, vol. 20, pp. 317-337, Jan. 2012.

# Diseño de una WSN para el monitoreo de CO<sub>2</sub> en el aire y niveles de ruido en la ciudad de Loja

## *Design of a WSN for monitoring CO<sub>2</sub> in the air and noise levels in the Loja city*

Ángel José Ordóñez Mendieta, Ángel Paúl Garrochamba

**Abstract**—This article describes the design of a wireless network of sensors for monitoring CO<sub>2</sub> in the air and noise levels developed for the urban area of the city of Loja. The design starts with the analysis of the functionality, protocols, and characteristics of the Wireless Sensor Networks (WSN) with the implementation of Zigbee communication technology. For the design of the network, the monitoring scenario was determined through the greater concentration of socio-economic activity within the city, from these scenarios the sectorization of the city center was preceded, establishing the main sources of emission of CO<sub>2</sub> and noise levels. Then, the simulation was carried out in the Riverbed Modeler software to determine the evaluation parameters, such as the transmission speed, the delay and the packets received from the chosen technology. Also, the sensor nodes and the coordinating node were designed, which allows the establishment and communication of the network, through the XBee PRO S2B module, of the Zigbee technology. Finally, to evaluate the designed network, two types of tests were performed: a reception power level test and a validation test of the operation of the network, based on the construction and implementation of prototypes of the proposed sensors, a node coordinator and two sensor nodes (one node for CO<sub>2</sub> monitoring and one for noise). The generated information is displayed in a graphical interface developed in the VS Express 2017 software.

**Index Terms**— Zigbee, WSN, CO<sub>2</sub>, Xbee PRO, Wireless Networks, Sensors.

**Resumen**—En el presente artículo se describe el diseño de una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de CO<sub>2</sub> en el aire y niveles de ruido desarrollado para el casco urbano de la ciudad de Loja. El diseño parte del análisis de la funcionalidad, protocolos y características de las Wireless Sensor Networks (WSN) con la implementación de la tecnología de comunicación Zigbee. Para el diseño de la red, se determinó el escenario de monitoreo a través de la mayor concentración de actividad socioeconómica dentro de la urbe, a partir de estos escenarios se procedió a la sectorización del centro de la ciudad, al establecer los principales focos de emisión de CO<sub>2</sub> y niveles de ruido. Luego,

se realizó la simulación en el software Riverbed Modeler, con el objetivo de determinar los parámetros de evaluación, como: la velocidad de transmisión, el retardo y los paquetes recibidos de la tecnología escogida. Además, se diseñó los nodos sensores y el nodo coordinador, que permite el establecimiento y comunicación de la red, a través del módulo XBee PRO S2B, de la tecnología Zigbee. Finalmente, para evaluar la red diseñada, se realizó dos tipos de prueba: una prueba de nivel de potencia de recepción y una prueba de validación del funcionamiento de la red, a partir de la construcción e implementación de prototipos de los sensores propuestos, un nodo coordinador y dos nodos sensores (un nodo para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y otro para el ruido). La información generada se visualiza en una interfaz gráfica desarrollada en el software VS Express 2017.

**Palabras Claves**—Zigbee, WSN, CO<sub>2</sub>, Xbee PRO, Redes Inalámbricas, Sensores.

### I. INTRODUCCIÓN

EN LOS últimos años, la tecnología ha dado un gran salto Econ la creación de nuevos dispositivos y nuevos métodos de procesamiento de la información, de esto, no están exentas las comunicaciones inalámbricas, en donde las redes inalámbricas de sensores, han desarrollado un amplio campo de estudio al permitir desde aplicaciones simples como monitoreo de variables en un invernadero, hasta complejas redes que monitorean estructuras en una ciudad de manera autónoma.

Esta tecnología ha procedido a incorporarse paulatinamente en el desarrollo de sistemas tecnológicos en ciudades donde se busca mejorar el estilo de vida de sus habitantes [15]. Es el panorama de la ciudad de Loja, que con su crecimiento, por un lado, ha incorporado interesantes sistemas de monitoreo y control de varios servicios, como por ejemplo: el sistema integral de transporte urbano SITU, el sistema digital de taxis KTAXI, el monitoreo de seguridad por parte del ECU-911 Loja, monitoreo de la radiación ultravioleta realizada por la estación meteorológica implementada por el Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología (INAMHI), entre otros. Por otro lado, este crecimiento, ha conllevado al incremento de diferentes inconvenientes que alteran el estilo de vida de los habitantes, principalmente, el problema del ruido y de la contaminación del aire en el casco urbano de la ciudad, donde, en una pequeña área, estrecha en el dimensionamiento de sus

A. J. Ordóñez Mendieta profesor de la Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador (angel.j.ordonez@unl.edu.ec).

A. P. Garrochamba ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador (apgarrochamba@unl.edu.ec).

calles, se encuentran la mayor parte de servicios públicos y privados. En este aspecto, la investigación realiza un análisis de estos dos parámetros fundamentales que afectan la vida de los habitantes de una ciudad. Es importante considerar, que el ruido, generado principalmente por los vehículos, tiene grandes afectaciones en la salud, si a esto se suma el ruido ambiental que se genera en el centro de la ciudad por los diversos servicios y actividades que se realizan, esta afectación crece. Se ha llegado establecer que estos niveles de ruido generados en la ciudad pueden provocar diferentes enfermedades de tipo fisiológico y mental, donde priman trastornos auditivos, pérdida de la audición, hipoacusia, dificultad de la comunicación oral, estrés inducido por el tráfico, perturbación del sueño, enfermedades cardiovasculares, problemas en el embarazo, entre muchos más [1]. En lo que corresponde a la contaminación del aire, es un parámetro que va relacionado con la contaminación auditiva, dado que, en una ciudad, su principal fuente son los vehículos que la transitan [2]. Diferentes investigaciones han establecido que la exposición prolongada a niveles elevados de contaminación del aire pueden presentar entre sus efectos agudos problemas respiratorios, respuesta inmunológica alterada, exacerbación de cuadros asmáticos y se lo ha relacionado también con el aumento de la tasa de mortalidad por enfermedades cardiovasculares [2].

Por los motivos expuestos, el presente trabajo plantea diseñar un sistema de monitoreo ambiental para el CO<sub>2</sub> y niveles de ruido para al casco urbano de la ciudad de Loja. Para ello, se recolectó información sobre las características y tecnologías habilitadoras para este diseño, con el direccionamiento de obtener un diseño adaptable a la mayoría de los sectores en la ciudad, sin la necesidad de instalar grandes infraestructuras, lo que permite un monitoreo constante que permita identificar valores críticos en estos sectores. En lo que corresponde a la estructura de la red inalámbrica de sensores aplicada, se encuentra compuesta de una estación base en la que se realiza la obtención de datos que se han sentido en todos los otros dispositivos (nodos) de una manera sincronizada y estructurada, que constan de un microcontrolador, una fuente de energía, un radio transceptor y un elemento sensor [13].

## II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación, se utilizó los siguientes métodos y herramientas:

### A. Métodos

El trabajo de investigación implementó una metodología deductiva y analítica, que permite en primer lugar, el estudio de las tecnologías inalámbricas habilitadoras para las redes inalámbricas de sensores, la determinación de escenarios de estudio en la ciudad, elección de equipos, para lograr contrastar un análisis efectivo del diseño desarrollado para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y niveles de ruido. A continuación, analíticamente se procedió a evaluar el funcionamiento del sistema propuesto, mediante el uso de simuladores y la implementación de un prototipo para la evaluación práctica.

### B. Herramientas

Para la configuración y evaluación del sistema de monitoreo, se realizó el uso los siguientes sistemas:

1) *Software de simulación*: Para el desarrollo de la simulación del diseño realizado en este trabajo se ha seleccionado al software Riverbed Modeler; usado para comparar el impacto de diferentes diseños de la tecnología Zigbee en el comportamiento de extremo a extremo y en diferentes entornos, esto quiere decir, a diferentes distancias de conexión. Además, permite ensayar y demostrar el diseño de la tecnología antes de la producción; aumentar la productividad de la red; desarrollar protocolos y tecnologías inalámbricas propietarias; y evaluar mejoras en los protocolos basados en estándares [7].

2) *Software para la configuración del nodo*: En cuanto al software para la configuración de los nodos, tanto coordinador, como nodo sensor, se usa el programa XCTU [4], mismo que permite la evaluación práctica del diseño realizado en dos diferentes maneras:

- Para la configuración de los módulos Zigbee de RF que conformaron la red, mediante los parámetros como: PAN ID, direccionamiento, tiempo de transmisión y modo de operación.
- Para la prueba de rango entre 2 módulos de radio de la misma red, se logra verificar las distancias de operación. Además, que se utiliza para la interpretación de tramas recibidas, al decodificar una trama API y ver sus valores de trama específicos.

3) *Software para la recolección de datos*: Con respecto a la recolección de datos, es necesario realizar la programación de cada una de las placas Arduino usadas, para ello se necesitó del software Arduino IDE.

4) *Software para la interfaz de monitoreo*: Para el desarrollo de la interfaz de monitoreo se usa el software VS Express 2017, que cumple con las siguientes actividades: creación del programa de escritorio de Windows para el monitoreo de la red, recepción e interpretación de los datos obtenidos a través del nodo coordinador y finalmente el almacenamiento de la información receptada en una base de datos [4].

## III. DISEÑO DE LA RED

Para el diseño de la red inalámbrica de sensores se tomaron en consideración aspectos importantes como: análisis de las tecnologías habilitadoras y la planificación para el desarrollo de la red. Además, es importante considerar que estos parámetros se han trabajado a partir de la selección de una topología en estrella, donde existe un nodo coordinador que envía o recibe la información del resto de nodos, su ventaja está en que los nodos remotos tienen un bajo consumo de energía [5].

### A. Análisis de tecnologías inalámbricas

Para la elección de una u otra tecnología inalámbrica se debe considerar algunas características como: tiempo de conexión, alcance, consumo de potencia reducido, velocidad de transferencia y cantidad de datos a transmitir/recibir

[14]-[16]. Para ello se realiza un análisis comparativo de cada una de las tecnologías inalámbricas que se presenta la Tabla I:

TABLA I  
ESTÁNDARES O TECNOLOGÍAS HABILITADORES PARA LAS REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

Caract.	Wi-Fi	Bluetooth	Zigbee	Wimax	Lora
Cobertura	50 – 100 m	10 – 100 m	10 – 100 m	Hasta 48 km	10 – 20 km
Topologías	Punto – hub	Ad – hoc	Ad – hoc, punto a punto, estrella o mesh	Punto a punto, estrella o mesh	Punto a punto, estrella o mesh
Velocidad	54 Mbps	1 Mbps	250 kbps	70 Mbps	50 kbps
Frecuencia	2.4 5.8 GHz	2.4 GHz	868 MHz (Europa) y 2.4 GHz	2.5 y 3.5 MHz.	868 Mhz (Europa), 915 Mhz (América) y 433 Mhz (Asia)
Nº de nodos por master	32	7	64000	2048	Altamente escalable
Consumo de energía	Alto	Medio	Muy bajo	Medio	Bajo
Seguridad	-	Cifrado de 64 y 128 bits	AES 128	OSA y SKA	AES-128
Costo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto

De acuerdo con las características de los tecnologías presentes en la Tabla I, se selecciona el estándar Zigbee, debido a su excelente funcionalidad con respecto a las otras tecnologías [11], además, permite trabajar establemente sobre una red de sensores para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y contaminación auditiva. Características como su alto nivel de desplazamiento, principalmente a muy bajo coste y con un número elevado de nodos, la hace ideal para el desarrollo de investigaciones de este tipo, además que es de fácil adquisición en el mercado local.

### B. Análisis y delimitación geográfica

De acuerdo a estudios realizados, en: 2014 [2] y según el Plan de Ordenamiento Urbano de la ciudad de Loja, POUL, 2009- 2022, la zonas con mayor actividad en la urbe lojana se puede apreciar en la Fig. 1 y son las siguientes:

- Centro de la ciudad, que alberga los servicios administrativos y actividades económicas
- Redondel Pío Jaramillo, en el que se encuentra el Centro Comercial “La Pradera” y el mercado “La Tebaida”.
- Mercado Gran Colombia, uso especialmente de comercio y servicios.
- Terminal Terrestre, uso especialmente de comercio y servicios.
- El Valle, uso especialmente de comercio y servicios.

A partir de esta información se ha seleccionado la parte céntrica de la ciudad como escenario de estudio al considerar que dentro de esta zona se concentra los servicios administrativos y actividades comerciales de la ciudad. Dentro de este escenario se ha dividido en 6 zonas como se muestra en la Fig. 1, que permitieron identificar correctamente los puntos de muestreo para la investigación. Se procede a

delimitar el escenario a las siguientes direcciones Norte: Calle José Antonio Eguiguren, Sur: Calle Lourdes, Este: Calle Bernardo Valdivieso y Oeste: Calle Ramón Pinto.

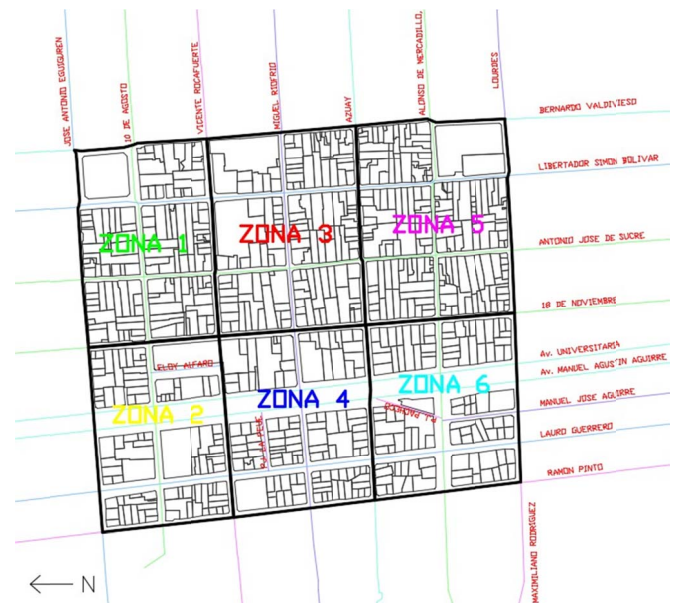


Fig. 1. Planificación y desarrollo de la propuesta.

### C. Planificación de la red

Se consideró observar, identificar y establecer sobre el escenario propuesto, los focos más sobresalientes que generan mayor ruido y CO<sub>2</sub>, para lo cual se toma en cuenta la evaluación de las principales fuentes generadoras de emanaciones de CO<sub>2</sub> y fuentes generadoras de contaminación acústica obtenidas de informes de la OMS [7]. Además, se han considerado algunos informes realizados por la UCOT [3] que determinan las calles más congestionadas dentro de la ciudad mismas que se resume en la Tabla II:

TABLA II  
LISTA DE INTERSECCIONES MÁS CONGESTIONADAS EN LA CIUDAD DE LOJA

Principal	Intersecciones		
	Calle 1	Calle 2	Calle 3
Ramón Pinto	10 de Agosto	Miguel Riofrío	Mercadillo
Lauro Guerrero	10 de Agosto	Miguel Riofrío	Mercadillo
Av. Manuel Aguirre	10 de Agosto	Miguel Riofrío	Mercadillo
Av. Universitaria	10 de Agosto	Miguel Riofrío	Mercadillo
18 de Noviembre	10 de Agosto	Miguel Riofrío	Mercadillo
Antonio José de Sucre	10 de Agosto	Miguel Riofrío	Mercadillo
Simón Bolívar	10 de Agosto	Miguel Riofrío	Mercadillo
Bernardo Valdivieso	10 de Agosto	Miguel Riofrío	Mercadillo

Además, se consideró las líneas y paradas del sistema urbano de transporte que circula por la zona establecida para el análisis.

### D. Análisis del ambiente de operación

Este análisis determinó el número de nodos que va a poseer la red, con dicha información se obtuvo un número total de 31 nodos sobre la zona de estudio, que se los puede apreciar en la Fig. 2. Adicionalmente, se ha elaborado la Tabla III con la distribución global de los nodos y sesores para cada zona.



TABLA III  
DISTRIBUCIÓN DE LOS NODOS SENSORES DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

Zona	Nodo	Sensor	Zona	Nodo	Sensor
ZONA 1	NS1	CO2	ZONA 4	NS16	Ruido CO2
	NS2	Ruido		NS17	Ruido CO2
	NS3	Ruido CO2		NS18	Ruido
	NS4	Ruido CO2		NS19	Ruido CO2
	NS5	Ruido		NS20	Ruido CO2
ZONA 2	NS6	CO2	ZONA 5	NS21	Ruido
	NS7	Ruido CO2		NS22	Ruido CO2
	NS8	Ruido CO2		NS23	Ruido CO2
	NS9	Ruido CO2		NS24	Ruido CO2
	NS10	Ruido CO2		NS25	Ruido CO2
ZONA 3	NS11	Ruido	ZONA 6	NS26	Ruido CO2
	NS12	Ruido CO2		NS27	Ruido CO2
	NS13	Ruido CO2		NS28	Ruido CO2
	NS14	Ruido		NS29	Ruido CO2
	NS15	Ruido CO2		NS30	CO2
			NS31	Ruido CO2	

acuerdo con la topología seleccionada, donde se estableció dos tipos de elementos denominados como: Elemento 1: Nodos Sensores (NS) y Elemento 2: Nodo Coordinador (NR), como se puede apreciar en la Fig. 3. Para ello, se tomó en cuenta las características técnicas de la tecnología seleccionada, en consecuencia se distribuyó dichos elementos para abarcar la mayor cantidad de nodos sensores sin que se sature una zona.

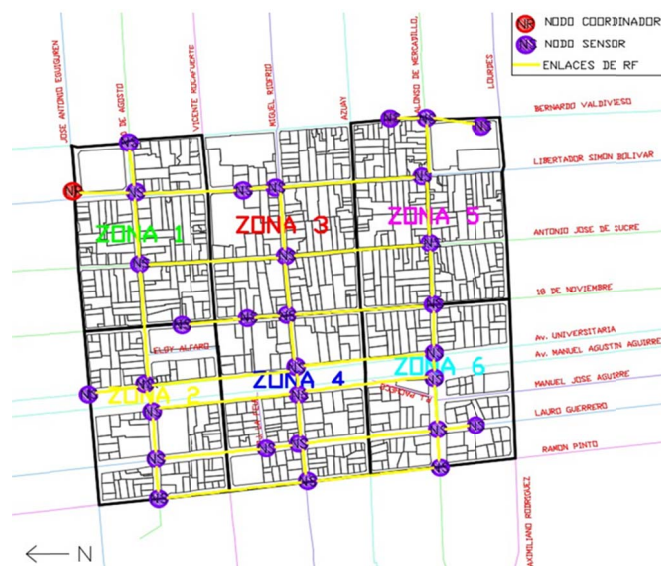


Fig. 3. Distribución de los elementos en el escenario de estudio.

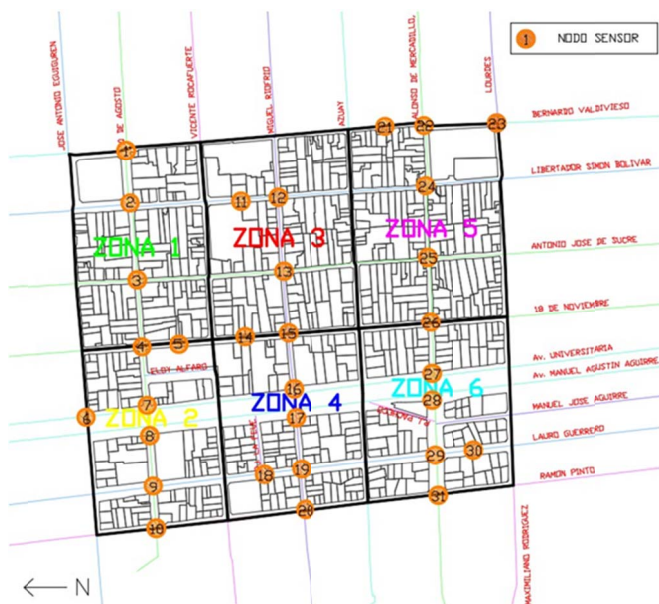


Fig. 2. Número de nodos de la WSN.

Con la organización de los nodos de acuerdo con la Tabla III, se tiene una visión general del diseño, por lo que se puede establecer la topología malla o mesh, como la ideal para este tipo de aplicaciones, la cual requiere que un número elevado de nodos estén conectados a la red.

Finalmente, se identifica los elementos en el diseño de

### E. Diseño del nodo sensor

El nodo sensor es el encargado de recibir y procesar la información captada por los sensores para su posterior envío hacia los otros nodos, para ello se lo ha distribuido en cinco etapas que se describen a continuación:

1) *Etap 1 - Sensado:* esta etapa permite la conversión de una magnitud física en un valor medible, que cumple con características como: precisión, estabilidad, sensibilidad y velocidad de respuesta. Sus elementos son los siguientes: sensor CCS811 para medir el CO2 en el aire y el detector de donido Sparkfun para medir los niveles de ruido.

2) *Etap 2 - Procesamiento de Información:* esta etapa permite al nodo sensor la interpretación y la adecuación de la información para su posterior transmisión, esta información corresponde a los valores registrados por los sensores de CO2 y sonido. Una función adicional es la de proporcionar la alimentación adecuada para los elementos tanto de sensado como de acondicionamiento. El elemento de procesamiento seleccionado para los nodos sensores es una placa Arduino Uno R3 compatible CH340 k [10].

3) *Etap 3 - Alimentación:* Esta etapa proporciona la energía necesaria para el funcionamiento total del nodo sensor.

4) *Etap 4 - Acondicionamiento:* Esta etapa incorpora un dispositivo que se encarga de crear el vínculo entre el Arduino y su módulo de comunicación inalámbrica. El elemento utilizado es el Shield XBee PRO v1.1.



5) *Etapa 5 - Comunicación Inalámbrica:* Esta etapa es la encargada de transmitir y entablar la comunicación inalámbrica con los otros nodos y con el nodo coordinador, para la cual, es necesario que cumpla con los siguientes requerimientos: potencia, tiempo de vida y estabilidad, para conseguir la cobertura necesaria para el monitoreo del proyecto. El elemento asignado es el módulo XBee Pro S2B con conector RP-SMA. Todas estas etapas se encuentran representadas en la Fig. 4.

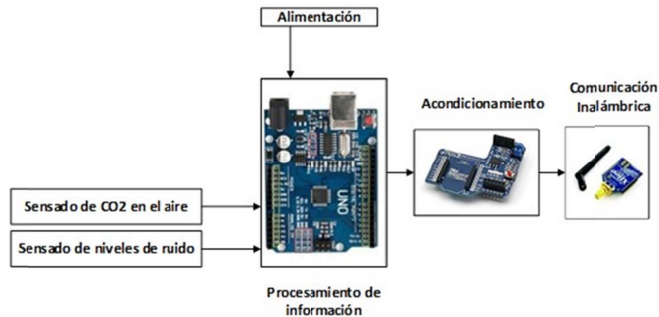


Fig. 4. Diseño del nodo sensor.

#### F. Diseño del nodo coordinador

El nodo coordinador es el encargado de recibir y procesar la información enviada por los nodos sensores para su posterior presentación a través de una interfaz gráfica en un computador, para ello se lo ha distribuido en tres etapas que se describen a continuación:

1) *Etapa 1 - Comunicación Inalámbrica:* Al igual que la etapa 5 de transmisión en el nodo sensor, la etapa 1 de recepción en el nodo coordinador es de gran importancia pues se encarga especialmente de la comunicación con los nodos sensores para la correcta recolección de datos. Esta etapa recibe los datos provenientes de los nodos sensores o finales y los envía hacia la interfaz HMI que se encarga de procesarlos para su posterior interpretación por el usuario. El elemento que cumple esta función es el módulo XBee Pro S2B [4].

2) *Etapa 2 - Acondicionamiento:* Este se encarga de conectar el módulo XBee Pro S2B con el ordenador en el que se encuentra la interfaz de monitoreo, además de proporcionar el voltaje necesario al módulo de recepción. El elemento que se usó es el módulo XBee USB Explorer.

3) *Etapa 3 - Presentación de la información:* Esta etapa es la encargada de realizar la interpretación de los datos obtenidos a través de la etapa 1 y los presenta en una interfaz gráfica amigable al usuario. El nodo coordinador es la parte principal de la red de sensores, de su correcto funcionamiento depende el trabajo de los demás dispositivos que conforman la red, por tal razón, este nodo estará continuamente alimentado por el voltaje proporcionado por una computadora mediante el puerto USB, que por motivos de seguridad deberá poseer un sistema de alimentación alterno, para precautelar posibles averías en la línea principal de alimentación.

#### IV. DESARROLLO DE LA RED

En este apartado se muestra paso a paso como se efectuó la evaluación de la red diseñada, que va desde la simulación de

la red, las pruebas de recepción de la señal y la validación del diseño hasta la evaluación práctica de la tecnología a usar.

#### A. Simulación de la red inalámbrica de sensores

Con el fin de comprobar la viabilidad y la escalabilidad de este estudio, previamente a la implantación en un ambiente real, es necesario introducir las herramientas de simulación, ya que sería altamente costoso desplegar cientos de sensores para replicar cualquier escenario de riesgo potencial. Para realizar la simulación de la red inalámbrica de sensores, se ha modelado un esquema de la red diseñada anteriormente en el software Riverbed Modeler, mediante la selección de los componentes de la red: nodo coordinador, nodo router y dispositivo final

Se dibuja el esquema de la red y se configura cada uno de los componentes con la opción "Edit Attributes" con la información del nodo: potencia de radiación, identificador (ID) de la red, nombre del nodo y topología de red

1) *Funcionalidad:* El simulador está configurado a través de un nodo coordinador, que incluye una lista de nodos router que enrutan la información, con su descripción y configuración especificada, hacia los nodos sensores que se desea simular. El simulador implementado es capaz de generar mediciones de un alto número de sensores, y consideran además los errores de medición y anomalías. En la simulación, se puede identificar el ID del sensor, la ubicación (longitud y latitud), y otros parámetros.

#### V. SIMULACIÓN Y CONFIGURACIONES

En la Fig. 5 se presenta la simulación topología malla considerada para este estudio de red, la simulación se hizo en base a los equipos de la tecnología elegida.

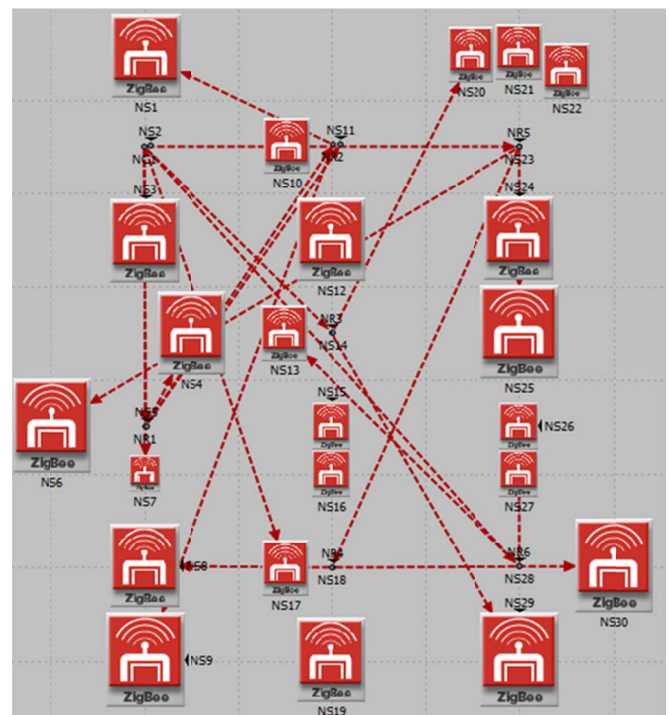
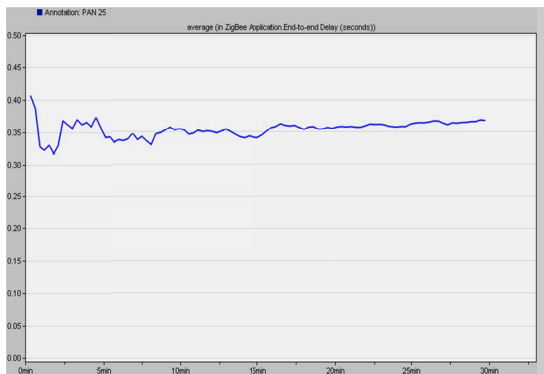
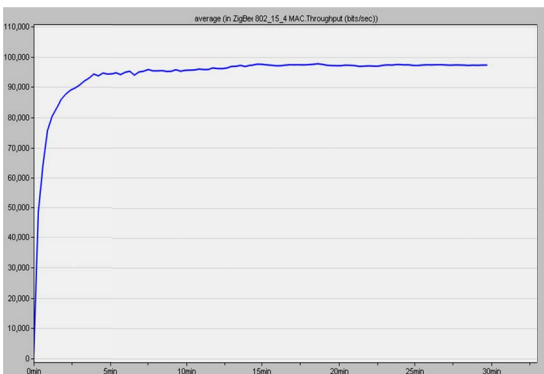


Fig. 5. Simulación de la red desarrollada.

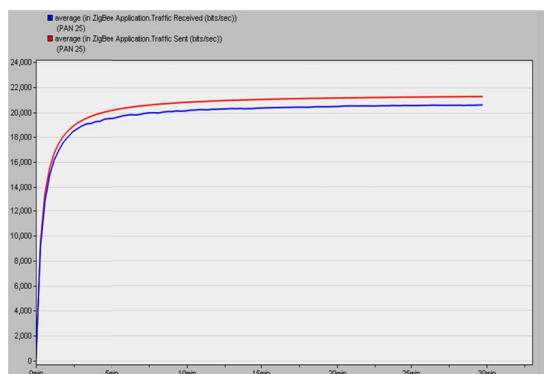
En la Fig. 6, se puede apreciar las curvas con los valores obtenidos de los parámetros evaluados en la simulación. En la Fig. 6(a) se observa el resultado del parámetro End to end Delay expresado en segundos, que indica la velocidad para transmitir los datos. En la Fig. 6(b) se aprecia los valores de Throughput, expresados en bits/segundo, que representa los números totales de los bits reenviados desde 802.15.4 MAC a las capas más altas en todos los nodos WPAN de la red. Finalmente, en la Fig. 6(c) y Fig. 6(d) se observa el tráfico enviado (línea roja) versus el tráfico recibido (línea azul) expresados en bits/segundo y paquetes/segundo, respectivamente. Estos resultados se resumen en la Tabla IV:



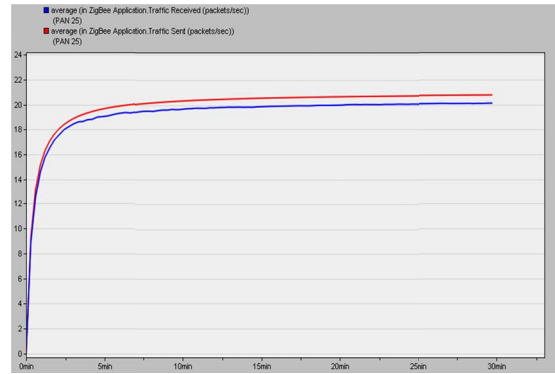
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Resultados evaluados en la simulación: (a) Delay existente, (b) Throughput o velocidad efectiva existente, (c) Tráfico recibido vs tráfico enviado en bits/segundo y (d) Tráfico recibido vs tráfico enviado en paquetes/segundo.

TABLA IV  
RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE RED

Parámetros	Valores obtenidos en la simulación
PAN ID	25
Canal	26
Paquetes enviados	840
Paquetes recibidos	801
Paquetes pendientes	39
Paquetes caídos	0
End of delay (ms)	350
Throughput (kbps)	98
Tráfico enviado (bits/s)	21000
Tráfico enviado (paquetes/s)	21
Tráfico recibido (bits/s)	20100
Tráfico recibido (paquetes/s)	20

La simulación de la red presenta los siguientes resultados favorables:

- El retraso del enrutamiento de malla es menor frente a los otros tipos de topologías como el tipo árbol debido a que el proceso de enrutamiento de malla encuentra rutas más eficientes que el enrutamiento basado en árbol para parte del tráfico. Para algunos nodos, la ruta basada en árbol será la ruta más eficiente, lo que resultará en una mejora general y menor en el retraso de datos.
- La carga para el enrutamiento de malla es menor, debido a la menor cantidad de saltos para el tráfico de aplicaciones lo que se traduce en menos tráfico general visto en la capa MAC. Adicionalmente, el análisis de la Fig. 6(a) presenta un pico inicial que se debe a la carga para el enrutamiento de malla, que es el momento donde los mensajes de enrutamiento se transmiten.
- Los paquetes perdidos, son nulos por lo que se garantiza la transmisión de datos

## A. Configuraciones

1) *Configuración del nodo sensor*: el desarrollo de este apartado se realiza mediante la configuración de los dispositivos usados en el nodo sensor. Primero se configura el módulo para la transmisión de datos que es el módulo XBee PRO S2B, cuyas configuraciones se realizaron en el software X-CTU de DIGI [12], misma que se resume en la Tabla V.

TABLA V  
CONFIGURACIÓN DEL NODO SENSOR

Indicador	Nombre	Valor
NI	Identificador del nodo	SENSOR 1
ID	PAN ID	25
SD	Duración de escaneo	3
DH	Dirección de destino en alto	0
DL	Dirección de destino en bajo	FFF
SH	Dirección de origen en alto	13A200
SL	Dirección de origen en bajo	40F505BD
SN	Número de periodos	3C (5s)

A continuación, se configura el módulo de procesamiento de datos Arduino UNO para la adquisición de variables ambientales y su posterior transmisión al nodo coordinador. Para cumplir este proceso se realizó el código en la plataforma Arduino IDE, cuyo funcionamiento se rige bajo el diagrama de flujo presentado en la Fig. 7.

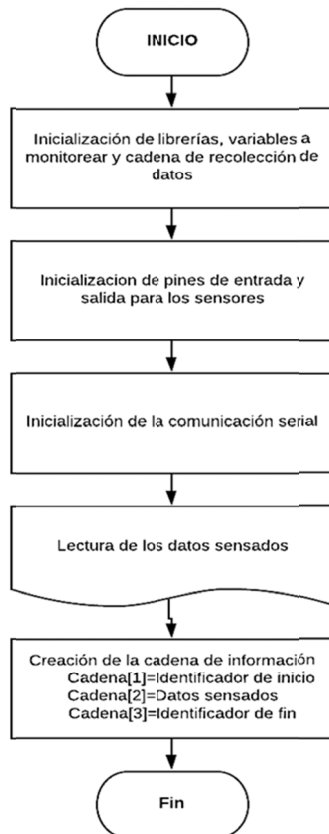


Fig. 7. Diagrama de flujo del procesamiento realizado por el elemento de procesamiento.

2) *Configuración del nodo coordinador*: es similar al nodo sensor en la configuración del módulo de transmisión, con la pequeña variación en la dirección de destino, dado que, al ser el nodo coordinador su destino serán todos los nodos sensores

de la red, por lo tanto, las direcciones de destino van desde el valor 0 al valor FFFF en hexadecimal, estas configuraciones se muestran en la Tabla VI.

TABLA VI  
CONFIGURACIONES DEL NODO COORDINADOR

Indicador	Nombre	Valor
NI	Identificador del nodo	N-COORDINADOR
ID	PAN ID	25
SD	Duración de escaneo	3
DH	Dirección de destino en alto	13A200 (Dirección en alto de nodo coordinador)
DL	Dirección de destino en bajo	40F505BD (Dirección en bajo de nodo coordinador)
SH	Dirección de origen en alto	13A200
SL	Dirección de origen en bajo	40F17162
AP	Modo de operación API	3E8 (10s)

## B. Sistema de adquisición de datos

La adquisición de la información se la realiza por medio del módulo receptor conectado a un computador en el que a través de una aplicación presenta los datos al usuario. Para el desarrollo de la aplicación gráfica de monitoreo, se eligió como lenguaje de programación la herramienta de Microsoft Corporation VS Express 2017 que ofrece una licencia académica de fácil acceso por medio del sitio web: <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/older-downloads/>.

El funcionamiento de la interfaz de monitoreo que se desarrolló sirve para visualizar, en tiempo real, la información que es generada en la red. En este caso, se tiene 31 nodos sensores distribuidos en 6 zonas y que envían información cada 10 minutos, y por medio de la interfaz se conoce el estado de las variables del sitio donde se encuentra el módulo sensor. La interfaz gráfica de usuario como se aprecia en la Fig. 8 y Fig. 9.



Fig. 8. Ventana de selección de zona de la interfaz gráfica.

Como se observa en la Fig. 9, la ventana "Adquisición de datos WSN", presenta toda la información actualizada referente a los nodos sensores creados.

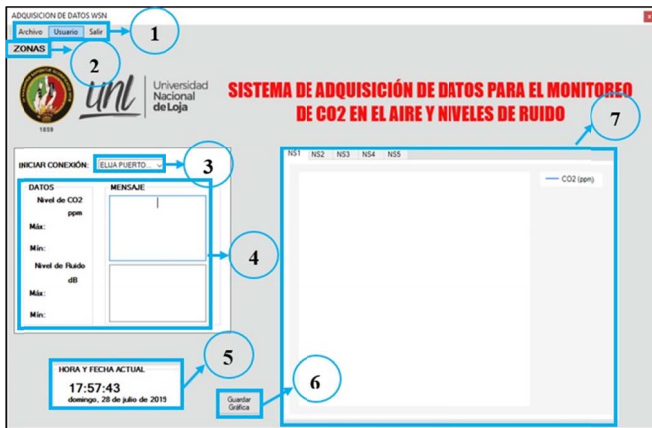


Fig. 9. Ventana de presentación de datos de la interfaz gráfica.

De acuerdo a la Fig. 9, la ventana principal incluye las siguientes funciones:

TABLA VII  
CONFIGURACIONES DEL NODO COORDINADOR

Sección	Descripción
Archivo	Permite la visualización de un registro de la información que se encuentra al obtener en la unidad de recepción, siempre y cuando se haya iniciado sesión.
Usuario	Esta opción permite al usuario iniciar con su cuenta y habilitar las opciones de guardar y crear nuevos usuarios.
	Permite ingresar nuevos usuarios en una base de datos.
Salir	Permite cerrar sesión del usuario que se encuentre en uso actualmente de la aplicación.
	Permite al usuario salir de aplicación.

- El botón “ZONAS” abre la ventana que permite al usuario seleccionar y mostrar la información de los nodos de una de las seis zonas establecidas en el estudio.
- El menú desplegable Iniciar Conexión permite la conexión con el puerto serie conectado al nodo coordinador, para poder recibir y mostrar los datos.
- Muestra los datos recibidos actualmente con su respectivo valor máximo y mínimo registrados. Un mensaje de advertencia se presenta según el valor actual.
- Muestra la hora y fecha actual en la que se ejecuta la interfaz.
- A través del botón “Guardar gráfica” permite al usuario realizar una instantánea de los datos guardados en las gráficas.
- Permite observar las gráficas de los datos en el tiempo que hayan llegado al nodo coordinador.

Para el almacenamiento de los datos, que se registran en el nodo coordinador, se ha elaborado una base de datos en el que se guardan los valores conforme ingresan, su descripción es la siguiente: nodo al que pertenecen, valor recibido que difiere en nivel de ruido o nivel de CO2 y finalmente fecha y hora de la medición.

La seguridad es un punto muy importante en el desarrollo de cualquier red, por lo tanto, se ha desarrollado para este estudio dos niveles de seguridad; uno a nivel de procesamiento

y otro a nivel de software. Dentro del nivel de procesamiento, se ha realizado una parte en la que se le da cierto grado de seguridad a la información que posteriormente será transmitida, esto consiste en inicializar un vector en el que no solo consta la información recolectada por la unidad de sensado, sino que además se le agregará dos constantes únicas, una de inicio y otra de fin que depende del nodo sensor. Por lo tanto, la información enviada solo podrá ser entendida por el usuario registrado. Además, se ha configurado a los módulos XBee en modo API, que aumenta una trama para el envío de información. Para la seguridad a nivel de software, se ha elaborado el inicio de sesión, que permite que sólo los usuarios registrados puedan ver la información en la interfaz gráfica elaborada. Con esto se asegura la información de la red.

## VI. EVALUACIÓN

A continuación, se detallan las actividades realizadas durante la ejecución de la prueba de funcionamiento, la misma que se llevó a cabo dentro del escenario de estudio los días 28 y 29 de julio de 2019.

### A. Pruebas de recepción de la señal

Para la medición de la potencia de recepción que presentan los módulos XBee PRO S2B, configurados como Nodo Coordinador y Nodos Sensores, se realizaron pruebas a diferentes distancias con el fin de verificar el correcto funcionamiento dentro de la zona de estudio, para lo que realizó lectura de muestras para las siguientes distancias: 100m, 200m y 300m. Estas pruebas fueron realizadas a través del software X-CTU, en la pestaña de configuración, opción “Range Test”. Esta opción permite enviar paquetes de datos de 32 bytes de un dispositivo a otro, el cual a su vez devuelve la trama de datos hacia el origen y evalúa los siguientes parámetros: RSSI (Receive Signal Strength Indication) o potencia de recepción, cantidad de paquetes enviados y cantidad de paquetes recibidos.

Para realizar la medición de prueba se utilizó uno de los nodos sensores (SENSOR-1), el nodo coordinador (N-COORDINADOR) y el PC portátil de monitoreo. Los resultados alcanzados durante la medición se muestran en la Tabla VIII.

TABLA VIII  
RESULTADOS DE PRUEBAS DE RECEPCIÓN DE SEÑAL

Distancia (m)	RSSI (dB)	Recepción de paquetes (%)
100	-69	100
200	-81	100
300	-91	100

Según las pruebas realizadas a una distancia de 100m, 200m y 300m; el nivel de recepción de los paquetes en todos los casos es de un 100% y el nivel de potencia de la señal de recepción en ningún caso es menor a la sensibilidad de recepción (-102 dBm) permitida por el dispositivo, por tanto se corrobora que la eficiencia de la red no se ve afectada. De igual forma mediante esta prueba se constató que entre mayor es la distancia de comunicación entre dos módulos XBee

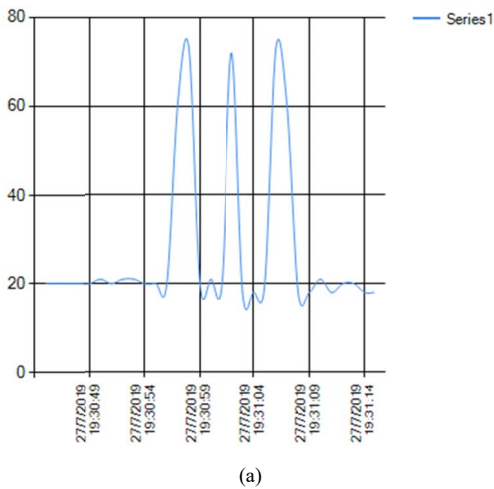


disminuye el RSSI (Receive Signal Strength Indication).

### B. Validación del diseño

Con el objetivo de validar el diseño del nodo sensor se consideró evaluar el funcionamiento de los sensores de CO<sub>2</sub> y de ruido de la siguiente manera:

Se comparó los valores obtenidos por el detector de sonido Sparkfun con una aplicación para Android ejecutada desde un dispositivo celular denominada “Sound Analyzer App”, que al igual que el sensor utilizado mide los niveles de ruido expresados en dB. A continuación, se presentan las comparaciones obtenidas por la aplicación para la validación de los datos receptados por el sensor comparador con los datos en la aplicación.



(a)



(b)

Fig. 10. Validación de datos obtenidos (a) por el detector de sonido Sparkfun y (b) por la app Sound Analyzer.

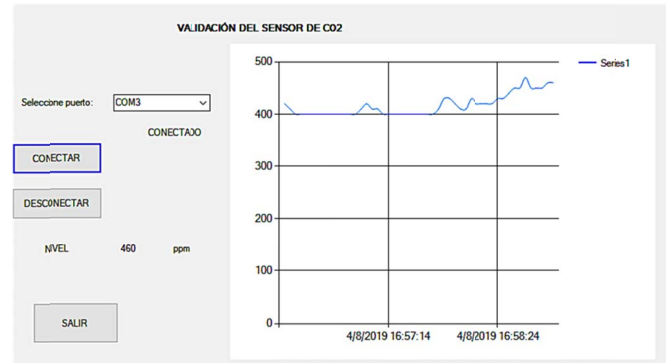
Como se puede verificar en la Fig. 10(a) y Fig. 10(b), los valores presentados en ambas figuras son similares con una ligera diferencia debido a la sensibilidad de cada dispositivo, donde se verifica así el correcto funcionamiento del nodo sensor con el detector de sonido Sparkfun.

Para la validación del sensor CCS811, se decidió comparar los valores obtenidos por el sensor con los valores promedios de concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> obtenidos por el

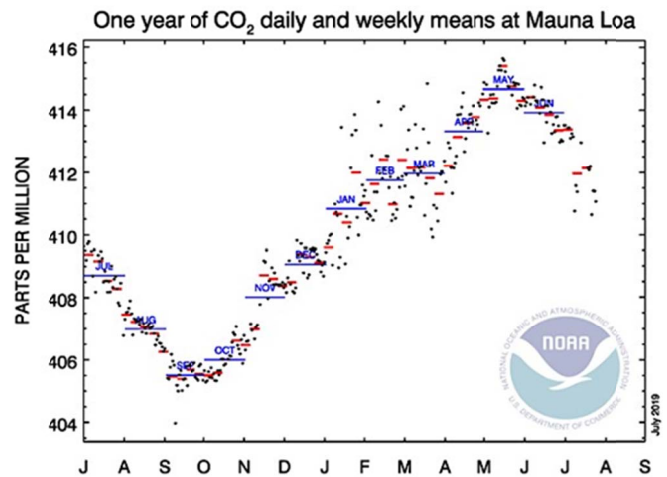
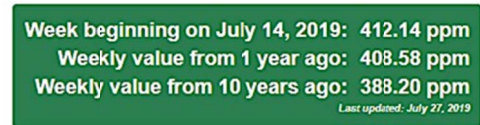
observatorio Mauna Loa en Hawái, para lo cual se requirió que las mediciones del sensor CCS811 se realice en un lugar con poca exposición a gases contaminantes. En la Fig. 11(a) se presenta los valores medidos por el sensor CCS811 cuyo promedio es de 447ppm y en la Fig. 11(b) se presenta el valor promedio de 412ppm del observatorio obtenidos través de la página web:

<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html>.

Por lo tanto, se corrobora que el sensor funciona correctamente, la variación que se puede notar, es debido a la ubicación donde se realizó las mediciones.



(a)



(b)

Fig. 11. Validación de datos obtenidos por (a) sensor CCS811 y (b) observatorio Mauna Loa.

Se debe tomar en cuenta, las especificaciones técnicas del sensor, dado que, este tiene un tiempo de precalentamiento de 20 minutos.

### C. Pruebas del diseño de la red

Para objeto de estudio se evaluó el funcionamiento del diseño de la red, con la implementación de un nodo coordinador y dos nodos sensores sobre la zona de estudio,



que permitieron verificar el uso de la tecnología establecida, al comprobar el funcionamiento del diseño realizado y la fiabilidad para su posible implementación sobre toda la zona de estudio. Para el cumplimiento de este fin, se dispuso de la topología lógica, en la que se realizó esta prueba. Los nodos sensores se instalaron a lo largo de la calle Bolívar entre José Antonio Eguiguren y 10 de Agosto, formando una red de sensores punto – multipunto, se consideró esta ubicación de acuerdo a observaciones realizadas y al determinar que es una zona muy transitada por vehículos y peatones, además que se encuentra en sus alrededores: lugares comerciales, gobernación y municipio de la ciudad y centros religiosos como la Catedral de Loja. A continuación, en el escenario se estableció el lugar del nodo coordinador para el monitoreo, que puede ser cualquier punto cercano a la zona de estudio y que para este caso se lo estableció específicamente en la esquina de las calles Bolívar y 10 de Agosto. El nodo coordinador se encuentra directamente conectado al computador personal en uno de los puertos de comunicación serial.

Las mediciones para la prueba del diseño de la red se realizaron en el transcurso de dos días, en diferentes horarios: Domingo, 28 de julio de 2019 de 16:45 a 18:00 y Lunes, 29 de julio de 2019 de 08:00 a 09:30, con el fin de generar información relevante y que permita realizar un análisis adecuado.



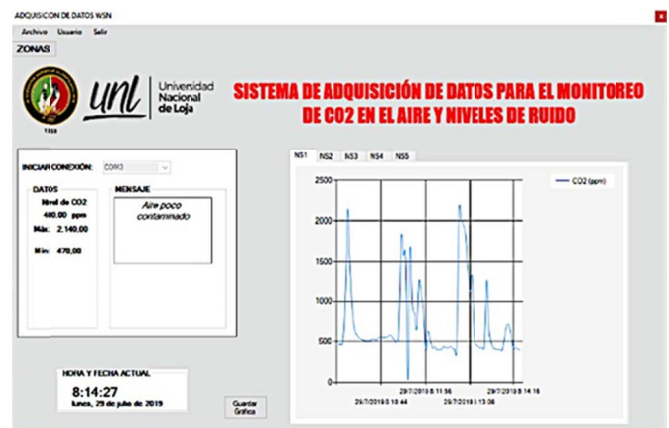
Fig. 12. Pruebas de diseño - topología física.

Una vez que la red se pone ejecución, la comunicación empieza entre el nodo coordinador y el computador. El nodo coordinador forma la red mediante el envío de un broadcast a todos los dispositivos que posean el mismo identificador de red, en este caso se ha seleccionado el ID = 25, así se establece

una frecuencia de rango de acuerdo a las especificaciones de esta tecnología. Al mismo tiempo, se ejecuta la interfaz gráfica de monitoreo desarrollada, se ingresa con su respectivo “Usuario” y “Contraseña” para que permita la visualización de los datos, para ello, primero se debe establecer la zona en la que se va obtener los datos y posterior se debe establecer la conexión con el puerto serie conectado al nodo coordinador. Posterior a establecer la comunicación correcta del nodo coordinador con la interfaz, ésta procederá en la ventana de “Adquisición de datos WSN” a presentar las mediciones de valores correspondientes a cada nodo sensor, en conjunto con la observación de los datos obtenidos en tiempo real, donde se confirma el buen funcionamiento de la red. En las Fig. 13(a) y Fig. 13(b) se muestran las mediciones obtenidas de CO<sub>2</sub> y en la Fig. 14(a) y Fig. 14(b), las mediciones de niveles de ruido obtenidas durante la prueba de implementación los días domingo 28 y lunes 29 de julio de 2019. Los valores obtenidos de CO<sub>2</sub> son muy notables debido a que existen algunos valores elevados, como se observa en las gráficas siguientes.



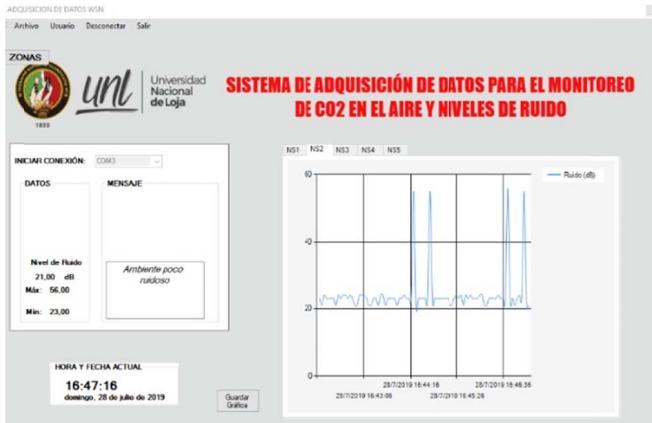
(a)



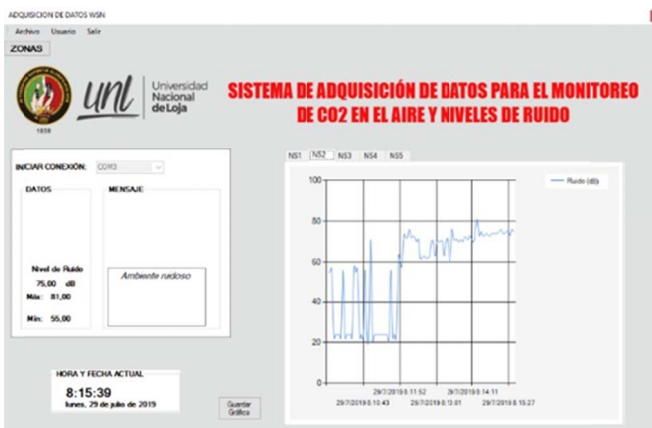
(b)

Fig. 13. Mediciones de CO<sub>2</sub> realizadas en el nodo SENSOR 1 (a) 28/07/2019 y (b) 29/07/2019.

Con respecto al día domingo los valores no son muy elevados comparados con los del día lunes, debido a que los fines de semana el tránsito vehicular y las actividades comerciales no son regulares, sin embargo, los valores leídos por el sensor están por sobre lo recomendado.



(a)



(b)

Fig. 14. Mediciones de CO2 realizadas en el nodo SENSOR 2 (a) 28/07/2019 y (b) 29/07/2019.

De acuerdo con las gráficas anteriores algunos de los valores se encuentran por encima de los 75 dB, lo que destaca que existe una mayor actividad vehicular y comercial. Niveles constantes por encima de los 75 dB indican un tránsito vehicular constante y posible congestión. Con el desarrollo de la prueba in situ, se completó la validación del sistema desarrollado para las zonas establecidas en el casco urbano de la ciudad de Loja.

## VII. CONCLUSIONES

La investigación, evaluó el estado del arte de las redes inalámbricas de sensores, con la finalidad de realizar un análisis a su funcionamiento, determinar sus principales características y señalar sus aplicaciones en el entorno, el cual determinó los diferentes protocolos que permiten que la red sea eficiente si existen varias rutas para llevar la información hacia el nodo final, se diferenciaron y establecieron las tecnologías inalámbricas habilitadoras como es el caso de Zigbee cuyo soporte y bajo costo permiten la evaluación del proyecto para la transmisión y recepción de los datos y finalmente se seleccionaron los dispositivos, al tomar en cuenta la disponibilidad de información de los dispositivos de campo y sus especificaciones técnicas, donde se determinó que el detector de sonido Sparkfun y el sensor de CO2 CCS811

presenta mejores características para la adquisición de estas variables. La delimitación y planificación geográfica de la zona de estudio, determinó entre varias cosas: la topología física tipo malla adecuada para implementar una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de CO2 en el aire y niveles de ruido, debido a que elimina la necesidad de que cada nodo terminal tenga una línea de vista directa con el nodo coordinador, de tal forma que cada nodo sensor de la red, tenga la capacidad de retransmitir el mensaje encaminándolo hacia su destino, además que permitió la selección de la tecnología a desarrollarse en conjunto con los dispositivos. El análisis de la simulación desarrollada en el software Riverbed Modeler, permitió conocer el rendimiento de la red inalámbrica de sensores diseñada en la topología tipo malla, donde se obtuvo excelentes parámetros como un retardo de comunicación de 350ms, velocidad efectiva de 98 kbps, paquetes recibidos por segundo de 20, cantidad de información recibida de 20.1 kbps y paquetes perdidos son nulos, por lo que al cumplir con los requisitos se garantiza la transmisión de datos dentro de la red. Las pruebas de recepción de la señal en exteriores, a través del software XCTU y la evaluación práctica del diseño a través de un nodo coordinador y dos nodos sensores (CO2 y ruido), determinó el alcance de la red (existiendo una distancia aproximada de 882 metros entre el nodo coordinador y el nodo sensor más distante) y verificó que los módulos de comunicación XBee de la tecnología Zigbee, son adecuados para implementar una red inalámbrica de sensores en el casco urbano de la ciudad de Loja.

## REFERENCIAS

- [1] J. Quintero González, "El ruido del tráfico vehicular y sus efectos en el entorno urbano y la salud humana," *Puente*, vol. 7, pp. 93-99, 2017.
- [2] M. Alfie Cohen and O. Castillo Salinas, "Noise in the city. Acoustic pollution and the walkable city," *Estudios demográficos y urbanos*, vol. 32, 2017.
- [3] Comisión Federal para la Protección contra Riesgos, "Efectos a la salud por la contaminación del aire ambiente," 2017. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/3-efectos-a-la-salud-por-la-contaminacion-del-aire-ambiente>. [Accessed julio 2019].
- [4] Romero, C., Jaimes, J., & González, D., "Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO® S2B ZB para medición de variables ambientales.," *Tecnura*, vol. 19, no. 45, pp. 141-157, 2015.
- [5] Microsoft, "Visual Studio," [Online]. Available: <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/>. [Accessed Mayo 2019].
- [6] C. P. Townsend and S. W. Arms, "Wireless Sensor Networks: Principles and Applications," in *Sensor Technology Handbook*, 2004, pp. 439-449.
- [7] J. P. Iñiguez Armijos, *Análisis Espacio - Temporal del ruido ambiental en la ciudad de Loja*, Loja: UTPL, 2014.
- [8] OMS, "Global ambient air pollution," 2019. [Online]. Available: <http://maps.who.int/airpollution/>.
- [9] UCOT, "Transparencia 2019," 2019. [Online]. Available: <https://www.loja.gob.ec/contenido/ucot>.
- [10] Ó. T. Artero, *ARDUINO. Curso práctico de formación*, Madrid: RC Libros, 2013.
- [11] Ministerio del Ambiente, "Ministerio del Ambiente - Calidad Ambiental," Gobierno de la República del Ecuador, 2019. [Online]. Available: <http://www.ambiente.gob.ec/biblioteca/>. [Accessed 2019].
- [12] I. Akyildiz and M. Vuran, "Wireless Sensor Networks," in *Advanced Texts In Communications and Networking*, New Jersey, Mankrono Print Media, 2010, pp. 413-502.

- [13] R. Faludi, *Building Wireless Sensor Networks*, New York: BRIAN, 2010, p. 320.
- [14] S. Hasan, M. Z. Hussain and R. K. Singh, "A Survey of Wireless Sensor Network.," 2013. [Online]. Available: <http://ijetae.com>.
- [15] Libelium, "Libelium Comunicaciones Distribuidas SL," 2015. [Online]. Available: [http://www.libelium.com/resources/top\\_50\\_iot\\_sensor\\_applications\\_ranking](http://www.libelium.com/resources/top_50_iot_sensor_applications_ranking).
- [16] E. J. Guaña Moña, "Protocolos WSN," in *Diseño de una red de sensores inalámbricos (WSN) para monitorear parámetros relacionados con la agricultura.*, Escuela Politécnica Nacional, 2016, pp. 25-31.

# Evaluación del tiempo de operación de un nodo inalámbrico en la transmisión de video sobre IPv6

## *Evaluation of the operating time of a wireless node in the transmission of video over IPv6*

Carlos Egas A, Iván Ontaneda, Carlos Herrera

**Abstract**—Many applications on the Internet of things require portable nodes, with mobile connectivity, powered by batteries to be able of transmitting video of good quality for long periods. Maximizing the operating time of portable nodes that work with batteries is a challenge today. We present the results of the evaluation of the operating time of a small size wireless node that uses batteries and transmits video over IPv6 to devices connected to the Internet. The tools used for the implementation, configuration of the prototype elements, and the descriptions of the different scenarios are presented, where the current and the operating voltage of the node are measured to calculate the energy consumed and the operating time of the node. The calculated value is compared with the operating time measured in a real environment validating the simple expressions used to evaluate the operating time of a node.

**Index Terms**—Ipv6, Energy, Video, IoT

**Resumen**—Muchas aplicaciones en Internet de las Cosas requieren nodos portátiles para transmitir video de buena calidad, durante largos períodos, con conectividades móviles y alimentadas por baterías. Maximizar el tiempo de funcionamiento de los nodos portátiles que usan baterías es un desafío hoy en día. Se presentan los resultados de la evaluación del tiempo de funcionamiento de un nodo inalámbrico de pequeño tamaño que usa baterías y transmite video a través de IPv6 a dispositivos conectados a Internet. Se presentan las herramientas utilizadas para la implementación, la configuración de los elementos prototipo y las descripciones de los diferentes escenarios. La corriente y el voltaje de funcionamiento del nodo se miden para calcular la energía consumida y el tiempo de funcionamiento del nodo. El tiempo calculado se compara con el tiempo medido en un entorno real, para validar las expresiones simples utilizadas para evaluar el tiempo de funcionamiento de un nodo.

**Palabras Claves**—Ipv6, Energía, video, IoT

### I. INTRODUCCIÓN

EL VERTIGINOSO avance de la tecnología experimentado en los últimos años, ha contribuido de una manera eficaz al desarrollo del Internet de las Cosas, en aspectos tan

C. Egas, C. Herrera son miembros del Grupo de Investigación GI-IOT Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador (e-mail: carlos.egas, carlos.herrera@epn.edu.ec).

I. Ontaneda, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador (e-mail: ivan.ontaneda@hotmail.com)

cotidianos como la iluminación, climatización, seguridad, comunicación, etc. La utilización de nodos inalámbricos que trabajen con batería por largos periodos de tiempo para estas aplicaciones, es un problema a resolver, es por esta razón, que el grupo de investigación GI-IoT de la Escuela Politécnica Nacional, trabaja en la optimización del consumo de energía en nodos inalámbricos, en varios proyectos de investigación. Dentro de las pruebas realizadas en el proyecto PII-17-7 [1] se realizaron varios experimentos, uno de los cuales presentamos en este artículo.

En la actualidad, hasta el momento, no se ha difundido aplicaciones que utilicen para su funcionamiento el protocolo IPv6 (Internet Protocol version 6) aun cuando las redes de los proveedores de Internet en el país ya operan con este protocolo y los nodos de acceso a los hogares se configuran automáticamente con IPv6. Debido a que el tráfico de IPv6 a nivel internacional crece exponencialmente [2], se espera que a corto plazo el desarrollo de nuevas aplicaciones con este protocolo sea cada vez mayor.

Por otra parte, la necesidad de tener nodos portátiles [3], requiere el uso de baterías como fuente de alimentación de los nodos, lo que permite que la selección del lugar donde se colocará el nodo, no dependa de puntos de acceso a la energía eléctrica.

El uso de baterías limita el tiempo de operación de los nodos, por lo que el reto tecnológico en este tipo de nodos es lograr un máximo tiempo de operación [4]. El tamaño de los nodos también es un requerimiento importante para ciertas aplicaciones ya que se necesita que el nodo sea portable (peso y tamaño) y este en capacidad de transmitir video con buena resolución.

La movilidad de conectividad del nodo en la red, también es importante, por lo que, el transporte de la información requiere de redes con IPv6 [5] para tener una conectividad extremo a extremo, y por sobre todo, se requiere que el nodo este operativo por largos periodos de tiempo. En el mercado, en la actualidad, existen nodos que satisfacen parcialmente los requerimientos planteados para la transmisión de video.

La determinación de una manera sencilla del tiempo máximo de operación del nodo sensor, cuando transmite video, es el objetivo planteado en este estudio. Para determinar

el tiempo de operación del nodo se realizan mediciones del consumo de energía cuando se transmite video sobre la red IPv6 y sus resultados se comparan con el tiempo medido de operación de un nodo sensor hasta que deje de funcionar. Para realizar las medidas se implementa un prototipo de red, con un nodo sensor inalámbrico con una interface WiFi que transmite video sobre IPv6 a un dispositivo conectado a la red Internet con IPv6

## II. METODOLOGÍA

Para la obtención de los datos que permiten evaluar el tiempo de operación del nodo sensor, se utiliza la plataforma de computación ultra pequeña, denominada Intel Edison desarrollada por Intel® y que es capaz de transmitir video con alta resolución mediante IPv6 [6].

La plataforma Intel Edison se compone del módulo Intel Edison [7]. Esta plataforma, que opera con baterías, está diseñada para facilitar la implementación de aplicaciones para el Internet de las Cosas y permite cumplir con el requerimiento de tener nodos móviles y portátiles para la transmisión de video.

La tarjeta de desarrollo Intel Breakout [8], fue diseñada para la creación de prototipos con hardware y software libre, y permite la creación de aplicaciones con la plataforma Intel Edison la cual se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Tarjeta de desarrollo Intel Breakout.

La tarjeta Intel Breakout, que en adelante se llamará nodo sensor, puede funcionar con una batería con valores de voltaje en el rango de 7 a 15Vdc, banda dual (2.4 y 5GHz) con la norma IEEE 802.11a/b/g/n, 1GB de memoria RAM, almacenamiento interno de 4GB, y con un procesador Intel® Atom™ que trabaja a una frecuencia de 500MHz.

### A. Implementación del prototipo

El diagrama del prototipo implementado se presenta en la Fig. 2. El nodo sensor permite transmitir video captado por una cámara web, sobre la red IPv6 y el video transmitido se visualiza en una página web del dispositivo móvil, laptop o PC.

El sistema operativo seleccionado para programar y configurar el nodo sensor es Linux Ubuntu 14.04 de 32 bits, el firmware de la versión 3.5 le permite tener conectividad con el protocolo IPv6. Para instalar el firmware en el módulo se

utiliza la herramienta Intel Platform Flash Tool Lite [9] que se encuentra disponible de manera gratuita. Para el desarrollo de la aplicación se utilizó el código del proyecto Edi-cam [10] el cual fue modificado para el presente trabajo.

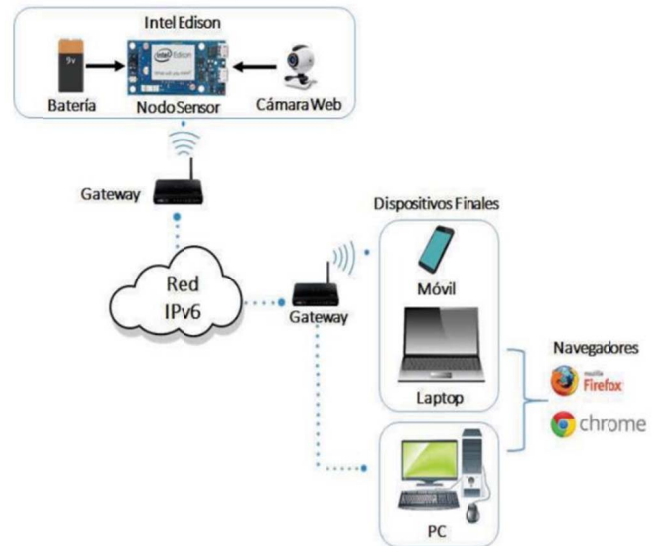


Fig. 2. Diagrama del prototipo.

El proyecto Edi-cam está dividido en diferentes bloques que inician con la ejecución de los scripts contenidos en el archivo node.js, el servidor HTML, el servidor WebSocket, el script de video y la página web. Se realizó modificaciones al código del proyecto Edi-cam con el fin de transmitir video sobre el protocolo IPv6. El nodo sensor implementado se presenta en la Fig. 3.



Fig. 3. Nodo sensor implementado.

En la Fig. 4 se presenta el diagrama de flujo del funcionamiento del sistema para la transmisión de video.

En el proceso para la captura video en el nodo sensor, se utiliza el script JSMpeg [11] y de la herramienta FFmpeg [12]. El proceso inicia con la captura de video de la cámara, por ejemplo, con un formato de 640x480, luego se codifica el video con la herramienta FFmpeg en MPEG1 con 30 cuadros por segundo y un flujo de datos de 800 kbit/s.

Posteriormente, el video codificado es procesado por el módulo Intel Edison y enviado al puerto especificado en el



servidor web a través del protocolo HTTP. En el servidor web, el flujo MPEG1 se distribuye a través de WebSockets a todos los navegadores conectados.

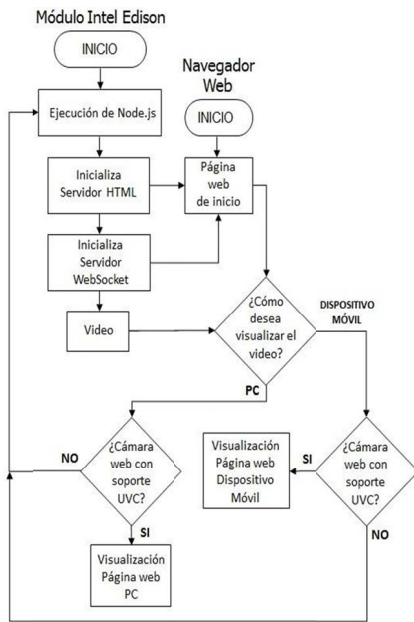


Fig. 4. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema.

Finalmente, el navegador, en el dispositivo de recepción, decodifica el flujo MPEG1 y transforma las imágenes decodificadas para implementar el video con la herramienta Canvas [13]. La relación entre los procesos en el nodo se indica en la Fig. 5.

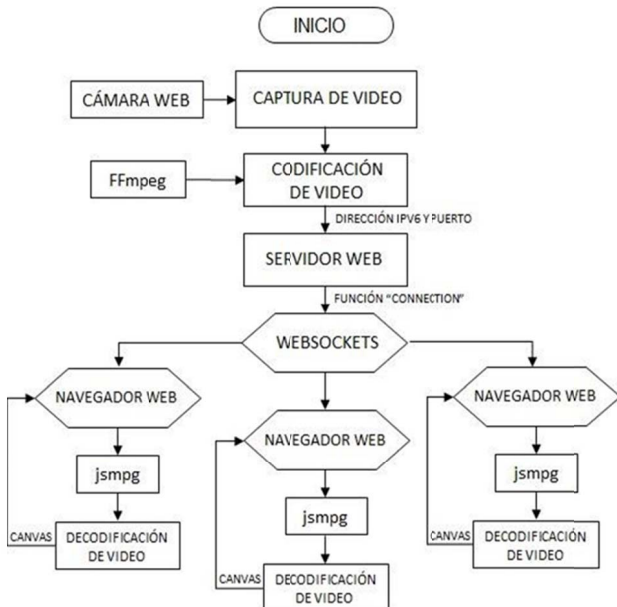


Fig. 5. Relación entre los procesos en la transmisión de video.

El código desarrollado para la visualización del video, considera las dimensiones de pantalla de una laptop y del dispositivo móvil. En la Fig. 6 se presenta la visualización del

video en un teléfono móvil.

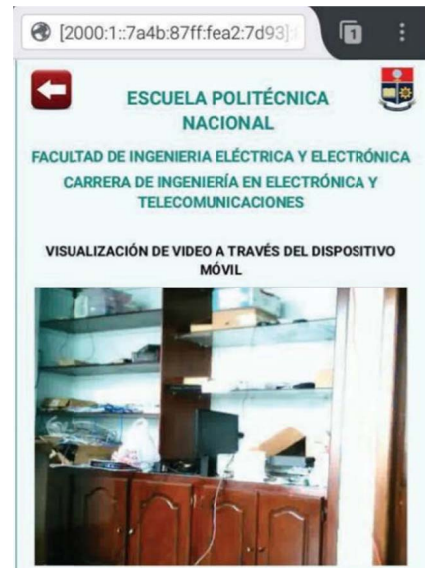


Fig. 6. Imagen del video recibido en el telefono celular.

### III. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE OPERACIÓN

El conjunto de pruebas realizadas, tiene como objetivo demostrar el correcto funcionamiento de la aplicación y evaluar el tiempo de operación del nodo sensor, cuando el nodo transmite video por la red IPv6 hacia los dispositivos finales. La potencia  $P$  (W) consumida por el nodo, cuando transmite video en forma continua, se calcula mediante (1), para lo cual, es necesario tener como datos el voltaje  $V$  (V) aplicado al nodo y la corriente  $I$  (A) consumida por el nodo el momento que el nodo transmite video. Las mediciones fueron realizadas con un multímetro.

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

El tiempo máximo de operación del nodo se lo obtiene al calcular el tiempo de descarga de la batería, mediante (2):

$$\text{tiempo de descarga} = \frac{\text{carga eléctrica de la batería}}{\text{consumo de corriente}} \quad (2)$$

La batería utilizada en las pruebas y que alimenta al nodo sensor, tiene una carga eléctrica de 175 mAh, valor con el cual se calcula su tiempo de operación cuando transmite video.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en diferentes escenarios para evaluar la potencia consumida y el tiempo de operación del nodo sensor.

#### A. Estado de reposo

El valor promedio medido de voltaje y corriente del nodo cuando está en estado de reposo, es de 8.72 V y 0.065mA, por lo que la potencia consumida es de 0.57 W. Se analizó y se verificó que esta potencia permanece aproximadamente constante durante la etapa de reposo. En teoría, el tiempo de descarga calculado de la batería es de 2.7 horas, sin embargo, en la práctica se comprobó que el tiempo en el cual el nodo sensor estuvo en operación en este estado fue de 2 horas.

### B. Aplicación inicializada

Cuando el nodo ejecuta los procesos de la aplicación pero no se transmite video, el valor medido de voltaje y corriente es de 8.26 V y 0.165 mA respectivamente, valores que fueron constantes durante las pruebas realizadas. La potencia consumida calculada por el nodo en este escenario tiene un valor de 1.36 W. El tiempo de descarga calculado de la batería es de 66 minutos, sin embargo, en la práctica se comprobó que el tiempo en el cual el nodo estuvo en operación en esta condición es de aproximadamente 55 minutos.

### C. Transmisión de video hacia la PC

Los valores obtenidos de voltaje y corriente del nodo sensor cuando el nodo transmite video de manera continua a una PC se presentan en la Tabla I. Las medidas en todos los escenarios propuestos, fueron realizadas con tiempos variables de operación del nodo, diferentes distancia entre el nodo sensor y el Gateway que conecta la red WiFi con la red Internet, y con una transmisión continua de video con diferentes tipos de resolución.

A partir de las mediciones realizadas, para el cálculo de la duración de la batería se consideró el valor promedio de 190mA para el consumo de corriente cuando se transmite video con una resolución de 320x240 y de 205mA para la resolución de 640x480. Con estos datos, el tiempo calculado de descarga total de la batería, es de 55 minutos para la resolución de 320x240 y de 51 minutos para la resolución de 640x480, sin embargo, en la práctica se comprobó que el tiempo en el cual el nodo sensor deja de funcionar es de aproximadamente 47 minutos para la resolución de 320x240 y de 42 minutos para la resolución de 640x480.

TABLA I  
MEDIDAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE (DESTINO PC)

Tiempo operación (min)	Resolución (px)	Distancia Gateway (m)	Voltaje (V)	Corriente (A)
1	320x240	2	8.45	0.190
		6	8.43	0.192
	640x480	2	8.19	0.209
		6	8.37	0.205
3	320x240	2	8.44	0.192
		6	8.39	0.194
	640x480	2	8.08	0.214
		6	8.25	0.211
5	320x240	2	8.43	0.193
		6	8.37	0.196
	640x480	2	7.97	0.218
		6	8.20	0.213

El consumo de energía en función de la resolución del video se presenta en la Tabla II.

TABLA II  
CONSUMO DE ENERGÍA (DESTINO PC)

Resolución (px)	Distancia al nodo Gateway 1 (m)	Potencia promedio consumida (W)	Consumo de energía (kWh)
320x240	2	1.62	0.00162
	6	1.63	0.00163
640x480	2	1.73	0.00173
	6	1.74	0.00174

### D. Transmisión de video hacia el computador portátil

Los valores medidos de voltaje y corriente en el nodo sensor cuando se transmite video a un computador portátil, se presentan en la Tabla III.

TABLA III  
MEDIDAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE (DESTINO LAPTOP)

Tiempo operación (min)	Resolución (px)	Distancia Gateway (m)	Voltaje (V)	Corriente (A)
1	320x240	2	8.47	0.192
		6	8.10	0.202
	640x480	2	8.42	0.206
		6	8.35	0.209
3	320x240	2	8.30	0.197
		6	8.05	0.206
	640x480	2	8.35	0.208
		6	8.21	0.215
5	320x240	2	8.15	0.202
		6	7.95	0.211
	640x480	2	8.20	0.213
		6	8.11	0.221

Para el cálculo de la duración de la batería se consideró el consumo de corriente medido de 192mA para la resolución de 320x240 y de 206mA para la resolución de 640x480. En teoría, el tiempo de descarga de la batería es de 54 minutos para la resolución de 320x240 y de 50 minutos para la resolución de 640x480, sin embargo, en la práctica se comprobó que el tiempo en el cual el nodo sensor transmite video de manera continua es de aproximadamente 45 minutos para la resolución de 320x240 y de 40 minutos para la resolución de 640x480. El consumo de energía se presenta en la Tabla IV.

TABLA IV  
CONSUMO DE ENERGÍA (DESTINO LAPTOP)

Resolución (px)	Distancia al nodo Gateway 1 (m)	Potencia promedio consumida (W)	Consumo de energía (kWh)
320x240	2	1.64	0.00165
	6	1.66	0.00166
640x480	2	1.74	0.00174
	6	1.77	0.00177

### E. Transmisión de video hacia el teléfono móvil

Los valores medidos de voltaje y corriente en el nodo cuando transmite a un teléfono móvil se presentan en la Tabla V.

El consumo de energía en función de la resolución del video y la distancia al Gateway se presente en la Tabla VI. Para el cálculo de la duración de la batería se consideró el consumo de corriente promedio de 195mA para la resolución de 320x240 y de 209mA para la resolución de 640x480.

El tiempo calculado de descarga de la batería, con los datos obtenidos de las mediciones, es de 53 minutos para la resolución de 320x240 y de 49 minutos para la resolución de 640x480, sin embargo, en la práctica se comprobó que el tiempo en el cual el nodo sensor deja de funcionar es de aproximadamente 45 minutos para la resolución de 320x240 y de 40 minutos para la resolución de 640x480.

TABLA V  
MEDIDAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE (DESTINO TELÉFONO MÓVIL)

Tiempo operación (min)	Resolución (px)	Distancia Gateway (m)	Voltaje (V)	Corriente (A)
1	320x240	2	8.35	0.195
		6	8.31	0.197
	640x480	2	8.30	0.209
		6	8.29	0.210
3	320x240	2	8.22	0.199
		6	8.21	0.202
	640x480	2	8.19	0.212
		6	8.15	0.217
5	320x240	2	8.11	0.204
		6	7.10	0.207
	640x480	2	8.05	0.219
		6	8.03	0.223

TABLA VI  
CONSUMO DE ENERGÍA (DESTINO TELÉFONO MÓVIL)

Resolución (px)	Distancia al nodo Gateway 1 (m)	Potencia promedio consumida (W)	Consumo de energía (kWh)
320x240	2	1.64	0.00164
	6	1.66	0.00166
640x480	2	1.74	0.00173
	6	1.77	0.00177

#### IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que el consumo de energía del nodo sensor depende de la resolución del video transmitido, debido a que los procesos de codificación del video que debe realizar el nodo, requieren más tiempo y también porque se necesita transmitir más datos, lo que influye en el mayor tiempo de utilización de la etapa de radio frecuencia del nodo, que se caracteriza por su alto consumo de energía. Es por estas razones, que el nodo tiene un consumo adicional de energía del 6.19% cuando la resolución del video transmitido de 640x480.

Al considerar los tiempos medidos de operación del nodo, presentados en la Fig. 7, cuando se transmite video con el formato 320x240, el nodo opera en promedio un 12.29% más de tiempo en comparación al formato 640x480. Además, si se considera los tiempos calculados de operación del nodo presentados en la Fig. 8, cuando se transmite video con el formato 320x240, el nodo opera un 7.32% más de tiempo en comparación al formato 640x480

Tiempo de operación medido (min)

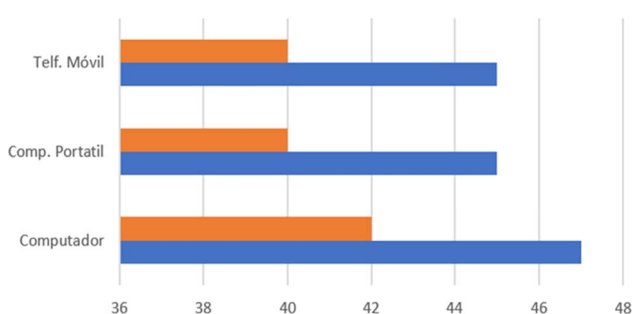


Fig. 7. Tiempo de operación medido.

Tiempo de operación calculado (min)

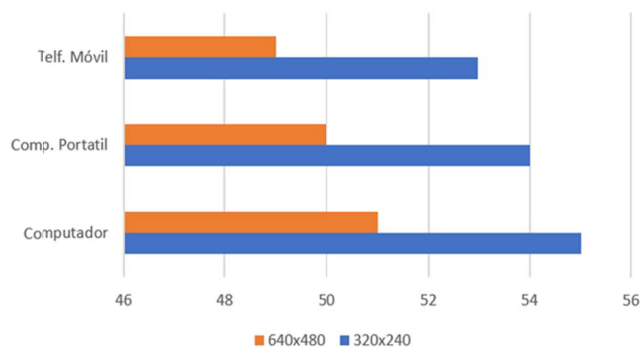


Fig. 8. Tiempo de operación calculado.

La razón de porque el nodo consume energía adicional para transmitir video con una resolución de 640x480, se debe a que el nodo debe procesar más información y tiene más datos que transmitir lo cual implica mayor consumo de energía.

Cuando se compara el tiempo promedio de operación del nodo, medido y calculado, obtenido de los tres escenarios, se concluye que, cuando se transmite una resolución de 320x240 la diferencia es del 17 % y cuando se transmite con una resolución de 640x480 esta diferencia es del 22 %. La razón de esta diferencia entre el valor medido de tiempo y el calculado, es porque cuando el nodo deja de funcionar, la batería todavía tiene energía almacenada que no proporciona ni el voltaje ni la corriente para que el nodo funcione.

El tiempo que el nodo transmite video continuo con una batería de 175mAh, y con una resolución de video de 320x240 es de 45.66 minutos, y con una resolución de 640x480 es de 40.66 minutos.

En estado de reposo, el nodo permanece operativo 2 horas, teóricamente se calculó 2.7 horas, es decir una diferencia del 26% cuando el nodo está operativo sin transmitir video, el tiempo en el cual, el nodo está operativo es de 55 minutos, el valor calculado es de 66 minutos, una diferencia del 16.6%. Nuevamente, la diferencia entre el valor calculado y real, se deben a que la batería aún tiene energía cuando el nodo deja de funcionar. De igual manera se puede apreciar, aunque es mínima la diferencia, que el nodo sensor consume más energía cuando el Gateway está más lejos.

#### V. CONCLUSIONES

El consumo de energía aumenta en promedio un 6.7% cuando el nodo transmite video de alta calidad, lo que implica una disminución promedio del 11% en el tiempo de operación del nodo. El tiempo de operación del nodo transmisor de video depende del tamaño y capacidad de la batería, lo que influye en el tamaño del nodo y su portabilidad. La diferencia promedio entre el tiempo de operación medido del nodo en comparación con el tiempo de operación calculado es del 20%. Las diferencias en los resultados, se debe a que, si bien, la batería todavía contiene energía, esta no es suficiente para que el nodo esté operativo. La investigación responde a la necesidad de tener nodos portables que permitan

la transmisión de video de buena calidad que opere con baterías por largos períodos de tiempo. A futuro se pretende evaluar el tiempo de operación de un nodo con menor capacidad de procesamiento, y determinar si la capacidad de procesamiento del nodo influye en su tiempo de operación.

#### RECONOCIMIENTOS

Los resultados presentados en este artículo, forman parte del proyecto interno PII-17-07 financiado por la Escuela Politécnica Nacional.

#### REFERENCIAS

- [1] T. Sanchez. "Informe de Rendición de cuentas 2018," EPN, Quito, Ecuador, 2018. [Online]. Available: [https://www.epn.edu.ec/wp-content/uploads/2019/02/gesti%C3%B3n\\_2018\\_final.pdf](https://www.epn.edu.ec/wp-content/uploads/2019/02/gesti%C3%B3n_2018_final.pdf)
- [2] Internet Society, "State of ipv6 Deployment," Jun. 6, 2018. [Online]. Available: <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2018/06/2018-ISOC-Report-IPv6-Deployment.pdf>
- [3] L. M. Dang, J. Piran, D. Han, K. Min and H. Moon, "A Survey on Internet of Things and Cloud Computing for Healthcare," *Electronics*, vol 8, pp. 1-49 jul. 2019.
- [4] H. Nguyen, A. Förster, D. Puccinelli and S. Giordano, "Sensor node lifetime: An experimental study," 2011, in *the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, Seattle, WA, 2011, pp. 202-207.
- [5] V. Gupta and Jayaraghavendran, "Invited Talk: IoT Protocols War and the Way Forward," in *the 28th International Conference on VLSI Design*, Bangalore, 2015, pp. 28-28.
- [6] M. Hachman, "PcWorld," Enero, 2014. [Online]. Available: <http://www.pcworld.com/article/2085003/intel-ceo-points-toward-wearable-future-with-smart-earbud-smartwatch.html>
- [7] Software Intel, [Online]. Available: <https://software.intel.com/en-us/iot/hardware/edison>.
- [8] Intel® Edison Breakout Board, [Online]. Available: [http://mu.elecfans.net/201611/Intel-04-disonbreakout\\_hg\\_331190006.pdf](http://mu.elecfans.net/201611/Intel-04-disonbreakout_hg_331190006.pdf).
- [9] Intel® Edison Breakout Board, [Online]. Available: <https://01.org/node/2463>
- [10] E. Kim, GitHub, [Online]. Available en: <https://github.com/drejkim/edicam>
- [11] Mit.LicenseJSMpeg, [Online]. Available: <https://github.com/phoboslab/jmpeg>
- [12] FFmpeg, [Online]. Available: <https://www.ffmpeg.org/download.html>
- [13] HTML5Canvas, [Online]. Available: [https://www.w3schools.com/html/html5\\_canvas.asp](https://www.w3schools.com/html/html5_canvas.asp)

# Lámpara de Fototerapia LED de elaboración propia y su uso para el tratamiento de ictericia, comparada con otras tecnologías

## *Handmade LED phototherapy used for the treatment of jaundice compared with others technologies*

Jorge Villarreal, Paola Vélez

**Abstract**—Phototherapy is the treatment indicated for the management of neonatal jaundice. There are different technologies to provide this treatment, including LED devices. For this study, a LED phototherapy lamp is developed to be used in neonatal jaundice. Its efficacy is compared with other devices by measuring the speed in reducing bilirubin levels. This lamp is built with an LED light source composed of a 15×25 LED array that generates 460nm. This device is characterized by being a very compact source of low energy consumption, long duration, and low cost. The obtained results are comparable with industrial manufacturing devices, but less expensive, therefore, more efficient in terms of health costs.

**Index Terms**—Phototherapy; jaundice; LED

**Resumen**—La fototerapia es el procedimiento indicado para el manejo de la ictericia neonatal. Existen diferentes tecnologías para proporcionar este tratamiento, entre ellas los dispositivos LED. Para este estudio se elaboró una lámpara de fototerapia con tecnología LED para uso en neonatos con ictericia y se comparó su eficacia con otros dispositivos midiendo la velocidad en la reducción de los niveles de bilirrubina. Esta lámpara se construyó con una fuente de luz LED compuesta por una matriz de 15 x 25 LEDs que genera 460 nm; este dispositivo se caracteriza por ser una fuente muy compacta, de bajo consumo energético, de larga duración y de bajo costo. Los resultados obtenidos fueron comparables con dispositivos de fabricación industrial, pero al ser de elaboración propia resultó ser menos costosa, por lo tanto más eficiente en términos de costos en salud.

**Palabras Claves**—Fototerapia; ictericia; LED

### I. INTRODUCCIÓN

**L**AICTERICIA es la coloración amarilla de la piel y mucosas producida por el depósito de bilirrubina en la piel; alrededor del 50% de los recién nacidos a término y el 80% de los prematuros desarrollan ictericia, la cual aparece generalmente entre los 2 y 4 días de vida. Cuando los niveles

de bilirrubina son muy elevados, pueden causar neurotoxicidad, con encefalopatía aguda o crónica, que se manifiesta clínicamente como retraso del desarrollo, sordera y convulsiones [1].

La fototerapia es el tratamiento de elección para reducir la gravedad de la hiperbilirrubinemia neonatal, independientemente de su etiología [2]. La fototerapia reduce los niveles de bilirrubina al transformar la bilirrubina en isómeros hidrosolubles que pueden ser eliminados sin conjugarse en el hígado [3].

Como todo tratamiento, la implementación de fototerapia está basada en directrices existentes fundamentadas en evidencia lo que promueven su uso más seguro y eficaz.

El uso óptimo de la fototerapia se ha definido por rangos específicos de umbrales de bilirrubina sérica total ajustados para la edad del recién nacido (en horas) y el riesgo potencial de neurotoxicidad por bilirrubina [2]. Es así que la eficacia de la fototerapia en el tratamiento de la hiperbilirrubinemia está influenciada por la longitud de onda de luz usada, la intensidad de la fuente de luz, el total de dosis lumínica recibida (tiempo de fototerapia, porcentaje de piel expuesta) [3].

La fototerapia efectiva implica su uso en longitudes de onda de luz azul específica (emisión máxima,  $450 \pm 20\text{nm}$ ) y espectro de emisión (rango, 400-520nm), preferiblemente en un ancho de banda estrecho que se administra a una irradiación de  $\geq 30\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$  hasta un 45% de la superficie corporal del niño [2]. Sin embargo, esto a menudo no es factible en entornos clínicos con recursos limitados en los que generalmente se usan fototerapias de confección propia para proporcionar este tratamiento, pero estas deben cumplir con los estándares establecidos para así conseguir el objetivo final: evitar la neurotoxicidad [4].

Los costos de proporcionar cuidados intensivos o especiales para los recién nacidos con ictericia podrían ser prohibitivos, después del cuidado de los niños prematuros en los países de bajos recursos [5]. La Organización Mundial de la Salud mantiene un valioso compendio de tecnologías innovadoras y de bajo costo, incluidos los dispositivos de fototerapia recomendados para los países de ingresos medios, sin embargo, cualquiera sea la fuente de luz, la efectividad de los

J. Villarreal, Jefe de Mantenimiento. Hospital Homero Castanier Crespo, Azogues, Ecuador. Estudiante Maestría Ingeniería Eléctrica CUJAE, HABANA, CUBA (e-mail: jorgevillarreal89@hotmail.com).

P. Vélez, Pediatra. Hospital Homero Castanier Crespo, Azogues, Ecuador. Docente Universidad del Azuay (e-mail: piovp@yahoo.com.mx).



dispositivos de fototerapia puede verse comprometida por un suministro de energía errático, exposición inadecuada de la piel por hacinamiento con múltiples bebés colocados bajo un solo dispositivo, niveles de irradiación subóptimos y mantenimiento deficiente del equipo [6]. Por estas razones, el desarrollo de dispositivos de fototerapia asequibles y económicos, así como medidas simples como monitorizar la intensidad de la luz, cambiar los bulbos y celdillas regularmente y reducir la distancia entre el niño y las lámparas, puede mejorar la efectividad de la fototerapia [7].

Los tubos fluorescentes o lámparas halógenas se han utilizado como fuentes de luz para la fototerapia durante muchos años. Un diodo emisor de luz (LED) es un tipo de fuente de luz más nueva que es eficiente en el consumo de energía, tiene una vida más larga y es portátil con baja producción de calor y son tan efectivos como otras fuentes de luz para disminuir la hiperbilirrubinemia, pero tienen ventajas especiales en los países de bajos y medianos ingresos como el Ecuador [8].

En varios estudios realizados sobre la eficacia de la fototerapia con LED en comparación con la fototerapia convencional (sin LED), se ha observado que la fototerapia con LED era eficaz para reducir los niveles de bilirrubina total sérica, a tasas similares a la fototerapia con fuentes de luz convencionales [9].

En un estudio prospectivo en recién nacidos a término que comparó la efectividad de fototerapia convencional versus LED demostró que la duración media de la fototerapia en el grupo LED fue significativamente menor que en el grupo de fototerapia convencional (10 horas). Del mismo modo, la tasa de caída de los niveles séricos de bilirrubinas a las 6, 12 y 18 horas fue significativamente mayor en el grupo LED que en el grupo convencional [10].

En un estudio realizado en niños pretérmino de 33 a 36 semanas de gestación se demostró que los dispositivos de luces LED son más efectivos que la fototerapia con tubos fluorescentes en los niños pretérmino para reducir la hiperbilirrubinemia indirecta, se considera además la menor frecuencia de eventos adversos, menos consumo de energía y menor costo de la terapia [11].

En síntesis, la fototerapia con tecnología LED es más efectiva que la fototerapia convencional al reducir el número de horas de tratamiento requerido en los recién nacidos a término y pretérmino, por lo tanto reduce el tiempo de estancia hospitalaria y con ello los costos en salud [1].

La dosis de fototerapia, llamada irradiancia, determina su efectividad. La medición se realiza en microwatts ( $\mu\text{W}$ )/ $\text{cm}^2$  de la superficie corporal del área expuesta / nanómetros (nm) de la longitud de onda. La irradiancia depende del tipo de luz utilizada, la distancia entre la luz y el paciente, y el área de la piel expuesta [12].

Para garantizar la efectividad de la fototerapia es necesario monitorizar el nivel de irradiancia emitido por el equipo, sin embargo esa es una práctica poco usual en las unidades de neonatología. En un estudio realizado en 2016, los niveles de irradiancia ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ ), fueron medidos semanalmente con el dispositivo BiliBlanket® II Meter en fototerapias de tubos

fluorescentes y fototerapias LED en un periodo de 19 semanas. Los dispositivos LED mostraron niveles de irradiancia estables que no requirieron el cambio de ninguna lámpara, pero los dispositivos convencionales sí declinaron su irradiancia y requirieron el cambio completo de lámparas a las 5-6 semanas [13].

En el Ecuador la ictericia neonatal ocupa el segundo lugar dentro de las 10 primeras causas de morbilidad en niños menores de 1 año con una tasa de 220 niños afectados por 10000 niños menores de 1 año; en noveno lugar se ubica la enfermedad hemolítica del recién nacido, causa importante de ictericia, con una tasa de 78 por 10000, precedido en el quinto lugar por la prematuridad (tasa de 133 por 10000), que en muchos casos también presentan ictericia [14].

El Hospital Homero Castanier Crespo de la ciudad de Azogues es un hospital general perteneciente al Ministerio de Salud Pública de Ecuador, de referencia provincial, dispone de la unidad de Neonatología que cuenta con 12 camas para ingresos de niños de 0 a 28 días, con un promedio de ingresos anuales de alrededor de 600 pacientes, de los cuales 50% ingresan por hiperbilirrubinemia y necesitan fototerapia. Al momento la Unidad de Neonatología dispone de dos lámparas de fototerapia con tubos fluorescentes y dos dispositivos de fototerapia con tecnología LED de comercialización industrial.

Por todo lo expuesto se puede inferir que al optimizar los equipos para proporcionar fototerapia se consigue mejorar los días de estadía y por lo tanto los costos en salud asociados a ictericia. Es así que se hace necesaria la implementación de nuevas tecnologías aplicadas al campo de la salud, aprovechar si se dispone de los recursos tecnológicos para elaborar dispositivos propios que cumplan con los niveles de calidad recomendados y a un menor costo.

En este trabajo se propuso elaborar un dispositivo propio de fototerapia LED que cumpla con las especificaciones técnicas necesarias para el tratamiento de la ictericia neonatal y que sea comparable en términos de eficacia con otros dispositivos de elaboración industrial.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

En las diferentes unidades de neonatología aún se usan lámparas de fototerapia con tubos fluorescentes azules, cuyos repuestos no se encuentran con facilidad en el mercado y algunas de ellas no cuentan con las características técnicas necesarias [15]. El Hospital Homero Castanier Crespo no es la excepción, esto dio paso a la posibilidad de diseñar un sistema de fototerapia con tecnología LED que permita el tratamiento de la hiperbilirrubinemia y cuyos resultados en función a la efectividad en el paciente sean comparables con las fototerapias LED comercializadas en el mercado.

Este dispositivo de fototerapia fue elaborado en el Departamento Técnico del Hospital Homero Castanier Crespo y el seguimiento de la evolución de la hiperbilirrubinemia neonatal fue realizado por un especialista en Pediatría de la misma institución.

Para el diseño de la lámpara se tomó en cuenta las especificaciones técnicas necesarias para cumplir con la efectividad del tratamiento de la ictericia (ver Tabla I) [16].

Tabla I  
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EQUIPOS DE FOTOTERAPIA PARA  
ICTERICIA NEONATAL

Requerimiento	Valor establecido
Longitud de onda	450-500nm
Irradiancia	30μW/cm <sup>2</sup> /nm
Área iluminada	alrededor de 700cm <sup>2</sup>

Como fuente de luz una placa con LEDs de alta potencia color azul, los mismos que emiten un espectro de luz entre los 440 a 500nm de longitud de onda necesaria para el objetivo de tratamiento de la ictericia (degradar la molécula de bilirrubina), como se observa en la Fig. 1.

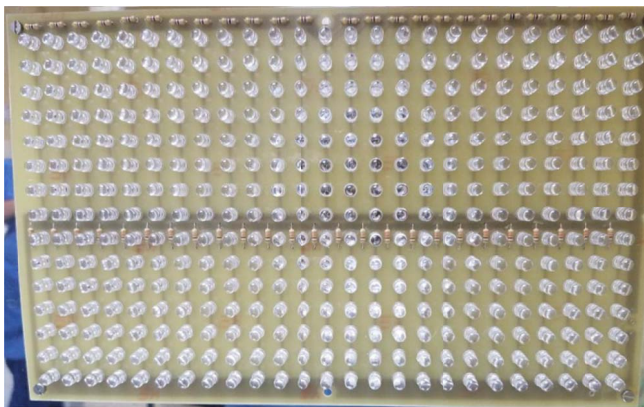


Fig. 1. Placa de fototerapia con lámparas LED elaborada por los autores.

Se calculó el número de LEDs necesarios para generar los parámetros requeridos para suministrar fototerapia. La ecuación con la que se describe la iluminación generada por la fuente de luz (cada LED irradia un área determinada) y obtener un cálculo aproximado para alcanzar especificaciones mínimas del equipo es la siguiente [16]:

$$E = \frac{I \cos(\theta)}{R^2} \quad (1)$$

Donde  $E$  es la iluminación en lux,  $I$  es la intensidad de luz (cd),  $\cos(\theta)$  es el ángulo generado entre la fuente de luz y el área irradiada y  $R$  es el radio entre la fuente de luz y el área irradiada.

En la Fig. 2, se presenta un modelo generado por computadora de la iluminancia generada por el LED con aperturas de 0 a 180 grados; con la aplicación de la ecuación antes descrita y luego de revisar las características de diferentes tipos de LEDs se determinó que el uso de los LEDs de alta potencia cubre un rango de 140° garantizan la correcta distribución lumínica necesaria para aplicar fototerapia efectiva [16].

Para contar con una correcta distribución del flujo luminoso y con los cálculos realizados mediante (1) se determinó que la placa requiere de 375 LEDs. Estos LEDs fueron distribuidos en una matriz 25×15, y esto a su vez dividido en 5 submatrices de 5×15 para el correcto control de la excitación de cada uno de los LEDs, lo cual se representa esquemáticamente en la Fig. 3.

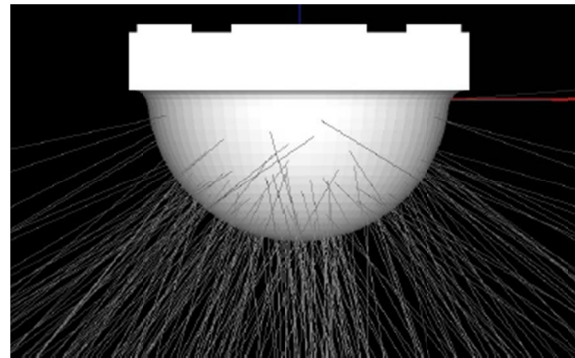


Fig. 2. Trazado de los rayos del LED mediante distribución de luz en el espacio de acuerdo al cálculo proporcionado con un ángulo de 140 grados.

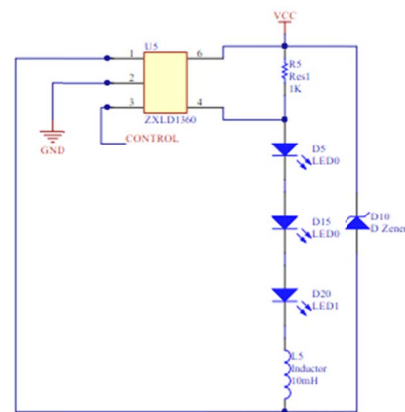


Fig. 3. Placa de fototerapia con lámparas LED elaborada por los autores.

La parte de control de esta lámpara se encuentra comandado por el microcontrolador 16F628 y en cada una de sus salidas alimenta a cada submatriz de LEDs constituida por grupos de controladores del tipo ZXL D1360. El sistema de control enlazado y calibrado con las cinco submatrices entrega 460nm la cual fue medida con un analizador de espectro óptico.

Una de las partes claves para el desarrollo de la lámpara es la correcta distribución de la irradiación sobre la superficie de piel expuesta del recién nacido, la cual debe ser superior al 45% (estándar establecido por la Academia Americana de Pediatría) [15]. Este dispositivo se ubicó en la parte superior de un cuero regular, cuyas medidas estándar para sus lechos son de 60cm×30cm, la lámpara enfoca toda esta área donde estará ubicado el recién nacido con la protección ocular.

Para corroborar la irradiancia (watts de potencia que inciden sobre el lecho) se usó un medidor de potencia luminosa (radiometro), para longitud de onda específica (450-500nm) y se verificó la misma a diferentes alturas entre el lecho y el panel de fototerapia desde los 20cm hasta los 60cm de distancia, tomando en cuenta que uno de los determinantes directos de la irradiancia es la distancia entre el paciente y la lámpara.

Para medir la eficacia clínica se comparó el tiempo que los pacientes requirieron fototerapia para bajar sus niveles de bilirrubina a valores que no ocasionen riesgo de neurotoxicidad, con base en las recomendaciones de la Academia Americana de Pediatría que establece normogramas predictivos de bilirrubinemia basado en las horas

de vida de los recién nacidos y su edad gestacional [15]. Estos normogramas clasifican a los recién nacidos en riesgos alto, intermedio y bajo para desarrollar hiperbilirrubinemia (ver Tabla II).

TABLA II  
NIVELES DE BILIRRUBINA QUE REQUIEREN TRATAMIENTO CON FOTOTERAPIA

Riesgo según paciente	Horas de vida							
	12h	24h	36h	48h	60h	72h	96h	≥120h
Bajo	9	12	14	15	17	18	20	21
Intermedio	8	10	12	13	15	16	17	18
Alto	6	8	9	11	12	13	14	15

Fuente: Academia Americana de Pediatría

Se comparó lámparas con tubos fluorescentes (marca Olidef), lámparas comercializadas con tecnología LED (Lámpara marca Medix modelo MediLed) y la lámpara elaborada en este estudio.

Para el cálculo muestral se tomó en cuenta el ingreso promedio anual de niños a la unidad de Neonatología (600 pacientes), considerando que el 10% de ingresos de neonatos a término, sin patología concomitante desarrolla ictericia clínicamente significativa, con un margen de error de 5% y con un nivel de confianza del 90%, el número total de pacientes para participar en el estudio fue de 84 por lo que se ajustó a 90, distribuyéndose 30 pacientes a cada grupo, al azar, en orden de ingreso a la unidad: Grupo 1: Fototerapia con tecnología LED comercializada, Grupo 2: Fototerapia de confección propia y Grupo 3: Fototerapia de tubos fluorescentes; fueron colocados en cunero y la lámpara a una distancia de 50 centímetros del lecho. Todas las lámparas tuvieron 0 horas de uso previo.

Se calculó el promedio de días de permanencia bajo fototerapia, el promedio de velocidad de reducción de bilirrubinas en plasma a las 24 y 48 horas de ingreso. Se excluyeron pacientes prematuros, de bajo peso o que presente cualquier patología concomitante que condicione elevación de las bilirrubinas.

Los datos del estudio fueron introducidos y analizados en el sistema estadístico IBM SPSS (versión 22); se realizó un análisis univariado que utilizó distribuciones de frecuencias y porcentajes; para determinar diferencias en la eficacia clínica entre los equipos se utilizó el odds ratio, con intervalos de confianza del 95%, se tomó como pruebas de significancia estadística los valores de  $p$  menores a 0.05.

El presente estudio fue presentado a la Gerencia y al Comité de ética del hospital y cuenta con la aprobación respectiva una vez que se confirmó que los niveles de irradiancia emitidos por el equipo de elaboración propia cumplieron con los estándares respectivos (Memorando Nro. MSP-CZ6-HHCC-2018-2948-M).

### III. RESULTADOS

Una vez que se elaboró la placa de fototerapia LED se sometió a las mediciones técnicas y clínicas respectivas.

En primer lugar se midió la irradiancia emitida por el equipo mediante un radiómetro. Al considerar que la

irradiancia está influenciada por el espectro de luz (en este caso 460nm), superficie corporal expuesta (45% del recién nacido) y la distancia entre el dispositivo de fototerapia y el lecho del recién nacido, se procedió a medir la irradiancia espectral a diferentes distancias entre la fuente de luz y el lecho del paciente, los resultados se muestran en la Tabla III.

TABLA III  
NIVELES DE IRRADIANCIA ENTREGADOS

Distancia entre la fuente de luz y el paciente (cm)	Irradiancia Espectral ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ )
20	95
30	74
40	55
50	40
60	33

A diferentes distancias nuestra lámpara emite niveles óptimos de irradiancia ( $\geq 30\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ ) necesarios para la reducción de los niveles de bilirrubina, por lo que cumple con los estándares establecidos por la Academia Americana de Pediatría: fototerapia convencional cuya irradiancia varía de 6 a  $12\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ , y la fototerapia intensiva que alcanza los  $30\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$  [15].

Sobre los resultados de la aplicación clínica de esta lámpara LED de elaboración propia, la Tabla IV resume las características clínicas de los participantes. En todos los grupos el promedio de peso fue de 3000 a 3200 gramos, con una edad gestacional de 39 semanas. Las horas de vida al ingreso a fototerapia bordearon de 60 a 70 horas. El promedio de días de estadía estuvo alrededor de 2 días en los 3 grupos.

Los valores de fototerapia con los que ingresaron los pacientes en los tres grupos se resumen en la Fig. 4. En ella se evidencia que en el grupo de Fototerapia LED comercializada los valores se encuentran en el rango de 22 a 7mg/dl, en nuestra fototerapia de elaboración propia de 22 a 10mg/dl y en lámparas de tubos fluorescentes de 21 a 10mg/dl.

TABLA IV  
CARACTERÍSTICAS DE LOS PACIENTES ESTUDIADOS

	Tubos fluorescentes	Lámpara led comercializada	Lámpara led propia
Peso promedio	3050 gramos	3200 gramos	3034 gramos
Edad gestacional promedio	39 semanas	39 semanas	39 semanas
Edad promedio de ingreso a fototerapia	69.8 horas de vida	63.2 horas de vida	60 horas de vida
Promedio de días estada	1.83 días	2 días	2.1 días

Luego de 24 horas de fototerapia, los valores de control obtenidos para la fototerapia LED comercializada estuvieron en el rango de 20 a 6mg/dl; para el equipo de fototerapia de elaboración propia entre 19 y 7mg/dl y en los tubos fluorescentes entre 18 y 10mg/dl, tomando en cuenta que cada uno de los pacientes ingresados tenían diferentes valores de bilirrubina que determinaron su tratamiento con fototerapia mostrando reducción en cada uno de ellos.

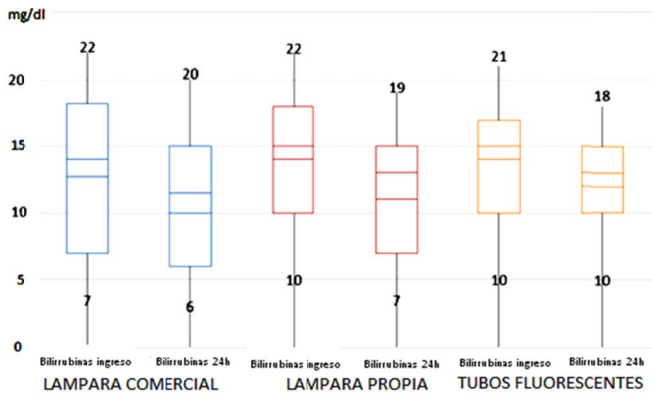


Fig. 4. Valores de bilirrubinas al ingreso y 24 horas en los 3 dispositivos de fototerapia.

El desempeño del dispositivo fue medido al comparar la reducción de los niveles de bilirrubinas en los 3 grupos a las 24 y 48 horas del ingreso. Los valores de bilirrubinas con los que los pacientes ingresaron a fototerapia en los tres grupos, en promedio fueron de 15mg/dl. A las 24 horas de tratamiento se evidenció que en los 3 grupos la reducción promedio de bilirrubinas fue de 2 puntos (2.25-2.4mg/dl) de 15 a 13mg/dl; al medir los niveles plasmáticos a las 48 horas en los tres grupos la reducción se estableció entre 1.86 y 2.17mg/dl y los valores se redujeron de 13 a 11mg/dl.

Se buscó significancia estadística en la reducción de los niveles séricos de bilirrubina al comparar las reducciones registradas por el dispositivo de fototerapia LED de elaboración propia y tubos fluorescentes mediante el cálculo de odds ratio y se encontró un valor de  $p$  de 0.6; así mismo se comparó el dispositivo de fototerapia LED de elaboración propia y la lámpara LED comercializada y el cálculo de  $p$  fue de 1. Es así que en ninguno de los dos casos se encontró diferencia estadísticamente significativa (valor de  $p \leq 0.05$ ) entre aplicar uno u otro dispositivo de fototerapia (ver Tabla V).

TABLA V  
DIFERENCIA DE VALORES DE BILIRRUBINA PARA LOS 3 DISPOSITIVOS

	Tubos fluorescentes	Lámpara led comercializada	Lámpara led propia
Promedio de bilirrubinas al ingreso	15.8 mg/dl	14.93 mg/dl	15.62 mg/dl
Promedio de bilirrubinas a las 24 horas de fototerapia	13.4 mg/dl (2.4) (p=0.6)	12.53 mg/dl (2.4) (p=1)	13.37 mg/dl (2.25)
Promedio de bilirrubinas a las 48 horas de fototerapia	11.3 mg/dl (2.1) (p= 0.62)	10,67 mg/dl (1.86) (p=1)	11.2 mg/dl (2.17)

#### IV. DISCUSIÓN

El uso de fototerapia para el tratamiento de la ictericia en pacientes neonatos es el tratamiento utilizado durante más de 30 años siendo un método seguro para disminuir los índices de bilirrubina, y su tasa de reducción proporcional a la luz, demostrando que la mayor intensidad de irradiación de la

fototerapia aumentaría su eficacia.

La fototerapia actúa produciendo cambios estructurales en la molécula de bilirrubina, debido al efecto de la absorción de la luz y su consiguiente transformación a moléculas más solubles para su posterior excreción por la orina y la bilis [17].

La eficacia de la fototerapia depende de la absorción de fotones de luz por las moléculas de bilirrubina. Sin embargo, sólo la luz de ciertos colores o longitudes de onda puede ser absorbida por la bilirrubina para lograr esta transformación. Estas reacciones ocurren en la piel y se relacionan con la dosis de fototerapia que se mide en niveles de irradiancia [17].

La lámpara de fototerapia con tecnología LED desarrollada en este estudio demostró niveles óptimos de irradiancia espectral que cumplen con las directrices y recomendaciones internacionales para el tratamiento efectivo de la hiperbilirrubinemia neonatal, por lo que puede ser utilizado de manera efectiva para estos pacientes.

La dosis de fototerapia, en gran parte, determina la velocidad de la regresión de la bilirrubina a valores normales. Con un estándar de irradiación considerado eficaz, puede ser obtenida una disminución de la bilirrubina de 6 al 20% en las primeras 24 horas. Por lo tanto, cuanto más alta es la irradiación del aparato de fototerapia, mejor y más rápida será su éxito. Cuando se utiliza la fototerapia intensiva se puede esperar una caída entre 0,5 mg y 1 mg/dl por hora durante las primeras 4-8 horas de terapia [5].

Este tratamiento depende del tipo de tecnología y calidad de fuente de luz usada en la fototerapia. Dentro de los dispositivos más usados se encuentran las lámparas tradicionales de fototerapia con tubos fluorescentes que no emiten un grado alto de irradiación (entre 6 a 12 $\mu$ W/cm<sup>2</sup>/nm) y tienen una vida útil corta (1000 horas de uso) lo que implica cambios frecuentes en los tubos para garantizar una irradiancia eficaz aumentando así los costos en el mantenimiento del equipo [16].

Por otro lado, las lámparas de fototerapia con tecnología LED son más efectivas que los dispositivos de fototerapia con tubos fluorescentes para reducir la hiperbilirrubinemia, pues emiten una mayor irradiancia (30 $\mu$ W/cm<sup>2</sup>/nm o superior), son más fáciles de colocar cerca del bebé (debido a la menor producción de calor) y envejecen más lento que las lámparas fluorescentes con una vida útil más prolongada (hasta 10000 horas de uso), manteniendo así la irradiancia original durante más tiempo y reduciendo la necesidad de reemplazos en los LEDs y por lo tanto los costos en mantenimiento [13].

En este estudio se comparó 3 dispositivos de fototerapia (tubos fluorescentes, lámpara LED comercializada y el dispositivo de elaboración propia), y se demostró que la irradiancia del dispositivo de elaboración propia fue superior a la fototerapia de tubos fluorescentes y similar a la lámpara LED de comercialización industrial (por encima de 30 $\mu$ W/cm<sup>2</sup>/nm) y pese a que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la velocidad de reducción de la bilirrubina a las 24 y 48 horas, el dispositivo elaborado puede ser usado de manera segura y efectiva en el tratamiento de la ictericia, además que garantiza menores costos en salud pues fue elaborado por el personal del hospital y no requirió

reemplazos en los materiales utilizados durante todo el estudio.

## V. CONCLUSIONES

La lámpara de fototerapia elaborada por los autores demuestra ser efectiva para el tratamiento de la hiperbilirrubinemia neonatal, cumpliendo con las especificaciones técnicas requeridas, por lo que constituye una alternativa válida para su uso en las unidades de neonatología, y promueve además el desarrollo de tecnologías propias en Ecuador como una opción segura, eficaz y sobretodo menos costosa frente a equipos de fabricación industrial (ver Fig. 5).



Fig. 5. Fototerapia de elaboración propia implementada en el tratamiento de un neonato con ictericia.

## REFERENCIAS

- [1] L.A. Jardine, P. Woodgate. "Neonatal jaundice: phototherapy". *BMJ Clin Evid*, vol. 05:319, May 2015.
- [2] V.K. Bhutani, B. K. Cline, K. M. Donaldson, H. J. Vreman, "The need to implement effective phototherapy in resource-constrained settings," *Semin Perinato*, vol. 35, no. 3, pp. 192-7. Jun 2011.
- [3] L. A. Stokowski. "Fundamentals of phototherapy for neonatal jaundice". *Adv Neonatal Care*, vol. 6, no. 6, pp.303-12. Dec 2006.
- [4] H. O. Amadi, et al. "Comparative outcome of overhead and total body phototherapy for treatment of severe neonatal jaundice in Nigeria". *Paediatr Int Child Health*, vol. 30, pp. 1-9. May 2019.
- [5] R. C Amos, H. Jacob, W. Leith. "Jaundice in newborn babies under 28 days. NICE guidelines [CG98]". *Arch Dis Child Educ Pract Ed*, vol. 102, no. 4, pp.207-209, Aug 2017.
- [6] World Health Organization. *Medical devices and eHealth solutions: compendium of innovative health technologies for low-resource settings*. Geneva: WHO, 2013.
- [7] B.O. Olusanya, et al. "Management of late-preterm and term infants with hyperbilirubinaemia in resource-constrained settings". *BMC Pediatrics*, vol. 15, no. 39, Apr 2015.
- [8] A. Tridente, D. De Luca. "Efficacy of light-emitting diode versus other light sources for treatment of neonatal hyperbilirubinemia: a systematic review and meta-analysis". *Acta Paediatr*, vol. 101, no. 5, pp.458-65. May 2012.
- [9] JI. Qazi, et al. "Efficacy of different types of phototherapy devices: A 3 year prospective study from Northern India". *J Clin Neonatol*, vol. 6, no. 5, pp. 153-6. Jan 2012.
- [10] P. Kumar, D. Chawla, A. Deorari. "Light-emitting diode phototherapy for unconjugated hyperbilirubinaemia in neonates". *Cochrane Database Syst Rev*. vol. 12, Dec 2011.
- [11] M. Mohammadzadeh M, et al. "Is the light-emitting diode a better light source than fluorescent tube for phototherapy of neonatal jaundice in preterm infants?". *Adv Biomed Res*. vol. 1, no. 51, Aug 2012.

- [12] F. Faulhaber, R. Procianoy, R. Silveira. "Side Effects of Phototherapy on Neonates". *Am J Perinatol*, vol. 36, no. 3, pp. 252-257. Feb 2019.
- [13] B. O. Olusanya, F.B. Osibanjo, A.A. Emokpae, T.M. Slusher. "Irradiance Decay in Fluorescent and Light-emitting Diode-based Phototherapy Devices: A Pilot Study". *J Trop Pediatr*, vol. 62, no. 5, pp. 421-4. Oct 2016.
- [14] "Estadísticas vitales". Instituto nacional de Estadísticas y Censos. Ecuador. 2016.
- [15] American Academy of Pediatrics. "Clinical Practice guideline Submmitte on Hyperbilirubinemia. Management of Hyperbiirubinemia in the Newborn Infant 35 or more weeks of Gestational". *Pediatrics*, vol. 114, no. 1, pp. 297-316, Jul 2004.
- [16] "Guía Tecnológica No. 3 Unidad de Fototerapia (GMDN 35239)". Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud. México. 2012.
- [17] M. González-Valcárcel, R.C. Raynero, S.M. Caballero. "Ictericia Neonatal". *Pediatr Integral*, vol. 23, no. 3, pp. 147 – 153. 2019.



# Diseño e implementación de una red de sensores para el monitoreo de los niveles de radiación solar en la ciudad de Loja

## *Design and implementation of a sensor network for monitoring solar radiation levels in the city of Loja*

Kevin Rodrigo Orozco Jaramillo, Ángel José Ordóñez Mendieta

**Abstract**—The present investigation focused on the design and implementation of a system for monitoring solar radiation levels, in the city of Loja, Ecuador. The solar radiation levels monitoring system is based on the development of a sensor network, in which two ultraviolet (UV) sensors have been placed, representing the nodes of the network, these are communicated in a wired way and wireless, with the base station, which represents the core of the network, where data processing, acquisition and management is performed. The base station manages the data collected by the UV sensors, these data are linked to an application for mobile phones, with Android operating system, in the application you can visualize the level of solar radiation in real time, the history of the data and the respective preventions, according to the level of the ultraviolet index (IUV) presented. In turn, the implementation of a solar light was included, for a direct visualization of solar radiation levels.

**Index Terms**— IUV, Zigbee, WSN, solar radiation, Android

**Resumen**—La presente investigación se enfocó en el diseño e implementación de un sistema para el monitoreo de los niveles de radiación solar, en la ciudad de Loja, Ecuador. El sistema de monitoreo de los niveles de radiación solar, se basa en el desarrollo de una red de sensores, en la cual, se ha colocado dos sensores ultravioleta (UV), que representan los nodos de la red, estos se comunican de forma alámbrica e inalámbrica, con la estación base, que representa el núcleo de la red, donde se realiza el procesamiento, adquisición y gestión de datos. La estación base, gestiona los datos recolectados por los sensores UV, estos datos son vinculados a una aplicación para teléfonos móviles, con sistema operativo Android, en la aplicación se puede visualizar el nivel de radiación solar en tiempo real, el historial de los datos y las prevenciones respectivas, según el nivel del índice ultravioleta (IUV) presentado. A su vez, se incluyó la implementación de un solmáforo, para una visualización directa de los niveles de radiación solar.

**Palabras Claves**— Índice ultravioleta, zigbee, WSN, radiación solar, Android

K. R. Orozco, ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Loja (krorozcoj@unl.edu.ec).

A. J. Ordóñez, profesor de la Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador (angel.j.ordonez@unl.edu.ec).

### I. INTRODUCCIÓN

EN LA ACTUALIDAD, la radiación ultravioleta (UV) es un tema que afecta al mundo entero, diversos países como diferentes organizaciones, han realizado múltiples acciones para concientizar al público en general, sobre: ¿qué es el IUV?, las prevenciones que se debe tener ante este y los peligros de la piel a los que se ven expuesto los seres humanos, por causa de la sobreexposición de la piel, a los altos niveles de radiación UV durante el día. Las quemaduras solares, conjuntamente con el bronceado son los efectos agudos más comunes que se producen en la piel, lo cual a largo plazo se refleja como: un envejecimiento prematuro por causa de la degeneración de las células, del tejido fibroso y de los vasos sanguíneos, pero también, puede existir la posibilidad que se produzcan efectos crónicos correspondientes al cáncer de la piel y a las cataratas en los ojos [1]. Esta radiación afecta a todo el mundo, y en el caso particular del Ecuador, es mucho más evidente, sobre todo en la región Sierra del país, la cual se encuentra afectada por la degradación de la capa de ozono. Por esta razón, en muchas ciudades del Ecuador, las cuales se ven afectadas por el incremento de la radiación solar, tales como: Quito, Cuenca, Imbabura, Ibarra, Riobamba, Manta, Salinas, Guayaquil, Loja entre otros, han tomado la acción de implementar un solmáforo, para prevenir a la ciudadanía de la radiación a la cual se está exponiendo.

En la actualidad, al referirnos de una forma más específica con respecto a la ciudad de Loja, cuenta con un solmáforo, pero este a su vez presenta múltiples fallos, y lastimosamente existen días que no presenta información. Por tal motivo, y dada la importancia del conocimiento en tiempo real de los niveles de radiación solar ultravioleta a la que se exponen los habitantes, se identificó la necesidad de elaborar una herramienta digital, que permita a los habitantes de la ciudad de Loja, visualizar el nivel del índice de radiación solar mediante su móvil, haciendo que esta información sea revisada de manera más oportuna y se tomen las acciones pertinentes, información que la aplicación también presentará a sus usuarios. Para mejorar la información y monitoreo correspondiente, se ha planificado el uso de un red de sensores

inalámbricos, que dada las distancias y la irregularidad geográfica que existe en la ciudad, permitirá incorporar adecuadamente, varios sensores en puntos distribuidos de la ciudad, para contrastar sus datos entre sí y verificar que no existan valores irregulares en los datos que se generan. Es importante, también indicar que mediante el uso del sistema se busca generar una mayor concientización en la comunidad universitaria, sobre la importancia de la prevención ante los niveles del IUUV.

#### A. Red de sensores

Las redes de sensores, son un conjunto de dispositivos físicos, los cuales están ubicados de forma estratégica según la aplicación o el servicio, por el cual, fue diseñada la red, teniendo como objetivo, garantizar la mejor forma de recolectar los datos para su posterior transmisión. Este conjunto de dispositivos, está diseñado para recolectar, procesar y almacenar información específica de algún fenómeno físico, climático, ambiental, u otros. Este tipo de redes son autónomas, es decir, que deben estar creadas de tal forma que ante cualquier eventualidad, la misma red pueda solucionar cualquier percance, de tal manera que, rara vez una persona intervenga para su mantenimiento, por lo que, suelen tener un tiempo de vida de varios años, siempre y cuando la red este correctamente diseñada [2]. La comunicación que se realiza, puede efectuarse de forma alámbrica o inalámbrica (WSN siglas en inglés – Red de Sensores Inalámbrica), siendo esta última, la más conocida y utilizada por todas las personas, está también, se considera como la puerta a un sin número de aplicaciones que van de la mano con el IoT (Internet de las Cosas) [3].

1) *Arquitectura de una red WSN*: Una red WSN básica, está estructurada por 3 etapas indiferentemente de la tecnología que utilice. La primera etapa, se basa en la adquisición de los datos (Nodo), para ellos se hace uso de un sensor, el cual monitoriza las diferentes variables que existen en el entorno, y recolecta solo la información vital para la cual fue diseñado, pero existen diferentes sensores que pueden recolectar varios tipos de información a la vez.

Una vez que la información haya sido adquirida por el sensor, este la transmite al gateway, el cual por ejemplo, podría ser un módulo bluetooth o zigbee definido en el estándar IEEE 802.15.4 que se enfoca en el despliegue de redes de baja tasa de transmisión, costo y consumo, que corresponde a las redes de sensores. El gateway, puede ser también otro nodo, pero mucho más robusto conocido como cabeza de grupo, el cual a su vez es la puerta de enlace a la estación base y esta es la última etapa de la red WSN, donde se realiza el análisis y almacenamiento de la información, cabe recalcar que en los nodos se suele colocar también actuadores, los cuales ejecutan una acción a partir del análisis de la información que se realice en la estación base. Un nodo por lo general está conformado por un sensor, un actuador, una batería, y un transceptor. El actuador acepta una señal eléctrica proveniente de la estación base y la convierte en una acción física para efectuar alguna tarea en el medio en que se encuentra y el transceptor es el que se encarga de establecer la

comunicación con los demás dispositivos [4].

En lo que respecta a la selección de la plataforma, se analizó el uso del sistema Android, dado que, proporciona al usuario un software para el diseño de aplicaciones, en la cual facilita al desarrollador un sin número de herramientas para la implantación sencilla y rápida de cualquier aplicación, a este software se lo denominó bajo el nombre de AndroidStudio [5]. Por estas características, se ha seleccionado Android, como la plataforma bajo la cual se ha desarrollado la presente aplicación, para la visualización de las muestras recolectadas por el sistema de monitoreo de los niveles de radiación solar.

2) *Radiación UV*: La radiación UV, corresponde a las ondas electromagnéticas que comprenden las longitudes de ondas desde, los (100 o 150) nanómetros hasta los 400 nanómetros provenientes del sol, y las cuales se dividen en tres tipos, UVA, UVB y UVC según la longitud de onda que comprende cada una [4]. Gracias a la protección de la capa de ozono, gran parte de los rayos UVC los cuales son los más perjudiciales para la salud, no se impactan de forma directa con la superficie de la tierra, y por ende no afecta de forma perjudicial a las personas, pero si lo hacen los rayos UVA y en una pequeña parte los UVB. A continuación, se detallan cada uno de los tipos de radiación solar nombrados:

- La radiación UVA (Radiación Ultravioleta A), es aquella que posee una longitud de onda, entre los 315 y los 400 nanómetros. Llega casi completamente a la superficie de la tierra, por lo que, representa cerca del 95% de la radiación UV. Por otra parte, es responsable del bronceado de todas las personas produciendo principalmente, el envejecimiento de la piel.
- La radiación UVB (Radiación Ultravioleta B), es aquella que posee una longitud de onda, entre los 280 a los 315 nanómetros, y representa sólo un 0,25% de toda la radiación solar que llega a la superficie de la tierra. Llega a la tierra muy atenuada, porque es absorbida por el ozono, reflejada por los aerosoles, y principalmente atenuada por la cubierta de nubes.
- La radiación UVC (Radiación Ultravioleta C), es aquella que posee una longitud de onda, entre los 100 y los 280 nanómetros. En teoría, como se menciono es la más peligrosa para el hombre, pero es absorbida totalmente por el ozono de la atmósfera [6].

3) *Efectos de la radiación solar en la piel*: La radiación solar que llega a la superficie de la tierra, puede ser perjudicial para la salud de las personas. Los rayos UVA y UVB, son aquellos que pueden producir daños a la piel e incluso al ojo humano, por parte de los rayos o luz que son visibles (350-750 nm / violeta-rojo), ya que, sus efectos en la piel son similares a la radiación UVA. En el caso de la radiación infrarroja (>760 nm) provoca el aumento de la temperatura y el CO<sub>2</sub>, pero el vapor de agua y las pequeñas gotas de agua que forman las nubes, absorben con mucha intensidad las radiaciones infrarrojas, por lo que, no llegan de forma directa a la superficie terrestre [7].

La radiación UVB, es absorbida por la capa de ozono. Ésta puede resultar muy nociva para la piel de las personas, ya que, llega hasta la epidermis, que es la capa superior de la piel y

produce el enrojecimiento de la misma. También, es la responsable del bronceado de la piel, que en realidad, es un mecanismo de defensa por parte de la piel, por causa de la exposición a esta radiación, lo cual a largo plazo puede producir el fotoenvejecimiento. Además, son los principales causantes del cáncer de piel, ya que pueden llegar a producir una alteración directa en el ADN celular del ser humano [8]. Algunos de los síntomas que suelen aparecer, son: las alergias, radicales libres (que indirectamente causan alteración del ADN y riesgo de cáncer cutáneo) fotoenvejecimiento, los cuales son causados por la degradación que se efectúa de las fibras de colágeno, elastina y de los fibroblastos de la dermis [8]. Por último, se tiene a la radiación UVC, la cual es más nociva, debido a la gran potencia que lleva, pero gracias a la protección de la capa de ozono, esta no llega a la superficie terrestre, eh ahí, la gran importancia de la capa de ozono para el mundo.

4) *Índice UV (IUV)*: El índice UV o IUV, es la escala establecida para determinar el nivel de intensidad de radiación solar, que se irradia en la superficie de la tierra, a partir de estos valores, se puede determinar, el peligro que una persona corre al exponerse al sol, según el nivel de la escala en que se encuentre en ese momento, tal y como se puede observar en la Fig. 1 [9]. El IUV fue establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Meteorológica Mundial, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante.

CATEGORIA DE EXPOSICION	INTERVALO DE VALORES DEL IUV
BAJA	<2
MODERADA	3 A 5
ALTA	6 A 7
MUY ALTA	8 A 10
EXTREMADAMENTE ALTA	11+

Fig. 1. Categorías de exposición a la radiación solar [9].

Las recomendaciones impartidas por la OMS son:

- Reducir la exposición durante las horas centrales del día.
- Buscar la sombra.
- Utilizar prendas de protección.
- Colocarse un sombrero de ala ancha para proteger los ojos, la cara y el cuello.
- Protegerse los ojos con gafas de sol con diseño envolvente o con paneles laterales.
- Utilizar crema de protección solar de amplio espectro, con un factor de protección solar (FPS)15+, en abundancia y cuantas veces la necesite.
- Evitar las camas solares.
- Importante proteger a los bebés y niños de corta edad.

#### B. Radiación solar en la ciudad de Loja

La radiación que se produce en la zona ecuatorial alcanza valores muy elevados, esto, por causa de su ubicación, al encontrarse por debajo del desvanecimiento de la capa de ozono, lo que produce que la radiación solar afecte de una forma mayor.

En la actualidad, por medio de los diferentes modelos estadísticos que se han desarrollado y tecnologías aeroespaciales, los mismos que permiten conocer los diferentes fenómenos ambientales que pueden o están por producirse en el mundo, dan la posibilidad de que por medio de diferentes institutos o corporaciones como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - Ecuador (INAMHI), el evaluar la situación actual del Ecuador con respecto a la radiación solar, de la cual se ha establecido que la sierra ecuatoriana, es una de las ciudades más perjudicada dado la destrucción de la capa de ozono, por consecuente, sus habitantes deben tener una mayor precaución por su salud al momento de salir. La radiación en la región interandina, es mucho más alta en los meses de septiembre-octubre y abril-mayo, en los cuales, el índice UV puede llegar hasta niveles extremadamente altos (nivel 15), e incluso alrededor del año este índice UV sigue siendo peligroso, ya que puede alcanzar niveles de 7 a 11 en la escala de radiación [10].

1) *Sistemas de monitoreo de radiación solar*: En la actualidad, existe un gran riesgo a las diferentes enfermedades a las que la persona se puede ver expuesta con el simple hecho de exponerse al sol, ante esta situación, en Ecuador y el resto del mundo se han tomado diferentes acciones, para ayudar a informar al público en general, del riesgo al que se exponen, y que medidas de prevención deben tomar, para evitar verse afectados por la radiación excesiva de la piel. En varias ciudades de Ecuador, por lo general, las ciudades situadas en la sierra ecuatoriana, las mismas que se citaron con anterioridad, tales como: Loja, Cuenca, Quito, Riobamba, Ibarra, entre otras ciudades, han implementado diversos métodos informativos, uno de ellos es el Solmáforo (Fig. 2), el cual indica, el nivel de radiación en tiempo real y posee indicativos de la prevención que se debe hacer, según el nivel de radiación.



Fig. 2. Solmáforo situado en la ciudad de Loja.

Además, en otros países Sudamericanos, como: Perú, Brasil, Chile o Argentina, también han adoptado esta iniciativa, para la prevención de las quemaduras en la piel, causadas por la radiación solar. Adicionalmente, a los diferentes solmáforos situados en los diversos países y ciudades, en Ecuador, también existe, un sistema de monitoreo

de radiación solar, el cual fue establecido por la INAMHI, que basa su sistema en varios sensores colocados a lo largo del territorio ecuatoriano, y a partir de su página web proporciona información de la radiación que se tiene en tiempo real, y de las precauciones que se deben tomar antes de salir al exterior, en la Fig. 3, se puede observar la interfaz web de INAMHI que ofrece al público, para su conocimiento sobre el IUUV al que se encuentran en ese momento.

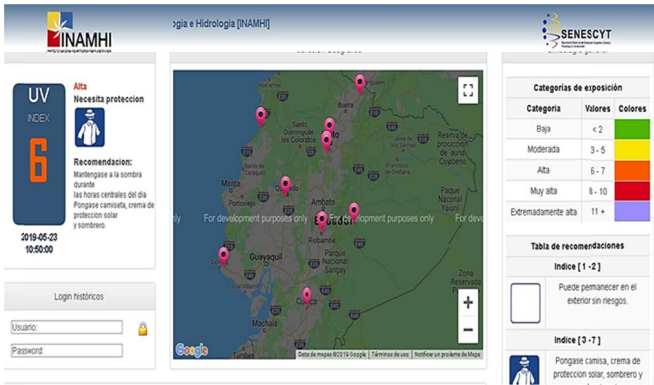


Fig. 3. Área de estudio.

## II. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

### A. Diseño del sistema de monitoreo

1) *Delimitación de la zona:* La ciudad de Loja, es la capital de la provincia de Loja ubicada en Ecuador, la cual se encuentra al sur del país situada geográficamente a los 03°39'55"; 04°30'38" de latitud Sur (9501249 N - 9594638 N) y 79° 05' 58"; 79°05'58" de longitud Oeste (661421 E - 711075 E), y pertenece a la zona interandina, por lo que, su clima es cálido y templado (Fig. 4).



Fig. 4. Captura de pantalla de la página web del INAMHI [11].

El área en la cual se implementó el presente sistema de monitoreo de los niveles de radiación, corresponde a la Facultad de la Energía, las Industrias, y los Recursos Naturales no Renovables (FEIRNNR) de la Universidad Nacional de Loja, la cual cuenta con una distancia de aproximadamente 300 metros de largo y de 15 a 30 metros de ancho, por lo cual, grafica una forma alargada e irregular.

2) *Diseño conceptual del sistema de monitoreo:* El diseño teórico, del sistema de monitoreo de los niveles de radiación solar, se basó en tres fases de desarrollo, que son los mismos que se siguieron para la implementación, en la cual la primera y segunda fase, describe el despliegue de los sensores inalámbricos y alámbricos, colocados en puntos estratégicos a lo largo de la FEIRNNR como se observa en la Fig. 5.

El nodo correspondiente a la red WSN (nodo 2), se distribuyó en una topología en estrella con respecto a la estación base, posteriormente se desarrolló el establecimiento de la comunicación inalámbrica, entre nodo y estación base o Gateway, la cual es el punto central que trabaja como el servidor (base de datos) de toda la información que los sensores recolecten, está se ubicó en la parte interna de un solmáforo, en la que también se colocó un sensor que se comunica de forma alámbrica con la estación base, por motivos de la poca distancia a la que se encontraba. Desde este punto, la estación base realiza todo el procesamiento y gestión de los datos, que posteriormente son enviados al hosting en red, para que a su vez dichos datos recolectados puedan ser visualizados a través de una aplicación, para dispositivos móviles, lo que corresponde a la tercera fase y final del proceso de diseño.

Tanto, la estación base y sensor para medir el IUUV, se establecieron a 40 metros de la Secretaría de Administración Central, junto a la Vivienda Autosustentable de la FEIRNNR, (Nodo 1), y a partir de este punto se colocó a 37 m. el segundo nodo, sobre el edificio de la carrera de Geología (Nodo 2), en la cual, por medio de la estación base, se establecerá la comunicación con Internet tomando en consideración, que el área de estudio posee ya acceso a este servicio.

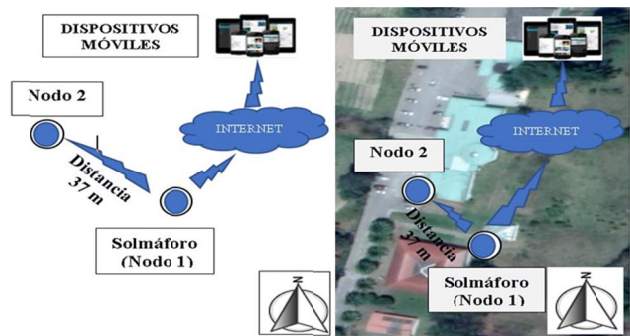


Fig. 5. Arquitectura del Sistema de monitoreo establecido.

### B. Equipos a utilizar

1) *Plataforma de hardware (Estación Base/Gateway):* Tomando en consideración, la arquitectura conceptual preestablecida, en función de las diferentes características que debe cumplir la estación base, como: la recolección de la información de los nodos y almacenamiento de la misma, por esta y muchas más características, se ha optado por establecer a la Raspberry Pi 3B como la mejor alternativa, ya que es un producto barato y económico en el mercado, además de sus particulares características, de las cuales, como se ha mencionado, permiten el poder convertirla en un servidor o proveer directamente de la utilización de módulos de comunicación, que vienen ya integrados a esta como el wi-fi o



bluetooth, lo cual da una solución directa, con respecto al traspaso de la información recolectada desde los nodos, a la base de datos que se crea en la nube, y al respaldo de los mismos, incluyendo a su vez una escalabilidad a la red, para el desarrollo de muchos más proyectos sobre la misma plataforma.

2) *Sensor UV*: A partir del análisis, de los diferentes sensores para medir los niveles de radiación UV, y que son accesibles dentro de Ecuador, se tomó la decisión de trabajar con el sensor GUVAS12SD. La característica fundamental, por la cual se seleccionó a dicho sensor, recae sobre el hecho de que, es un dispositivo de medición diseñado directamente para trabajar con la raspberry pi, lo cual suma diferentes contribuciones al momento de tener soporte de la comunidad de desarrolladores, en función de la programación que se debe hacer en la raspberry para la obtención de los datos, adicionalmente a esto, posee una gran disponibilidad en el mercado, tiene una mayor sensibilidad con respecto a la radiación UV, ya que cuenta con un verdadero lector de radiación ultravioleta, y su costo es reducido.

### C. Comunicación inalámbrica

Para el establecimiento de la conexión inalámbrica, entre el nodo y la estación base, se escogieron los módulos Xbee S2 basados en los protocolos zigbee, de la cual sus características de comunicación en cuanto a la velocidad de transmisión, métricas para el ahorro de energía, comunicación entre nodos, cobertura y costo, fueron de gran importancia para su selección, además este soporta una configuración de punto-multipunto, formando así la topología en estrella mencionada.

1) *Xbee explorer usb*: este dispositivo, permite a los diferentes módulos Xbee, el poder configurarlos o programarlos a través de un ordenador, gracias a que facilita la configuración de los pines y serial del Xbee, por medio de una placa que viene a ser el convertidor entre el USB y la serie FT231X (xbee 2), y esto vendría a ser lo que posibilita la transmisión de datos, desde el módulo al computador y viceversa.

2) *Convertor A/D MCP 3208*: el dispositivo mcp 3208, es un convertor analógico/digital de 12 bits, el cual cuenta con 8 canales de conversión, en este caso el convertor se conecta a la raspberry por medio de los pines del 10 – 13, que corresponde a los pines llamados (10)CS/SHDN – (11)Din – (12)Dout – (13)CLK, que se encuentran de igual manera en la raspberry pi 3B, y corresponden a los pines 19, 21, 23 y 24, con los cuales se pudo enviar los datos del sensor UV a la raspberry pi de forma alámbrica.

### D. Estructura del sistema

1) *Estructura del nodo*: el armazón, en la cual se colocó el sensor y demás dispositivos correspondiente al nodo 2, se puede visualizar en la Fig. 6.

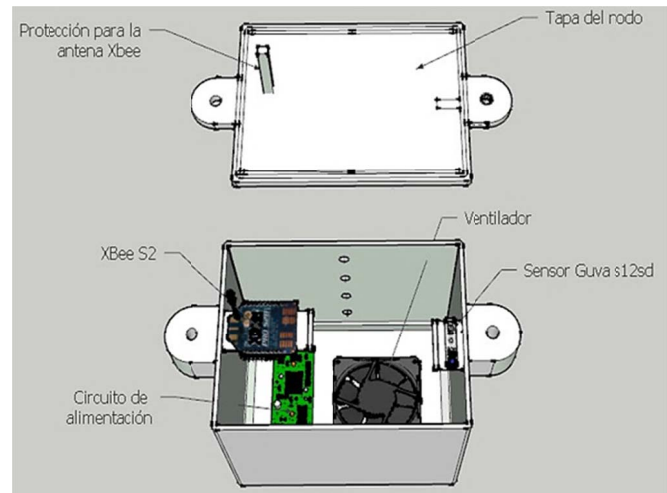


Fig. 6. Diseño de la estructura del nodo 2.

Para su realización, se tomó en consideración que la estructura del nodo cumpla con un grado de protección IP33C, según la norma internacional 60528 establecida por la IEC o Comisión Electrotécnica Internacional, de tal forma que se garantiza que los componentes internos de la estructura, no se expondrán a daños producidos por agua de lluvia, y por artefactos o impurezas que puedan ingresar, superiores a un calibre de 2.5 mm [11].

2) *Estructura de la estación base*: el segundo sensor y xbee, se colocaron en la estructura del solmáforo, dicha estructura fue diseñada como una alternativa informativa, sobre el IUV al que se están exponiendo las diferentes personas que transitan o ingresen a la FEIRNNR el diseño de la misma se visualiza en la Fig. 7, el cual mide 2,20 metros de altura y 40 metros de ancho, en cada una de sus caras. La estructura del solmáforo, que alberga al nodo 1 y estación base, fue diseñada con un grado de protección IP23B, lo cual indica que a la estructura pueden acceder artefactos o extremidades del grosor de un dedo de 12mm de diámetro y 80 mm de largo, pero sin alcance a los dispositivos internos, adicionalmente, proporciona una protección contra el agua rociada o lluvia [9]. Gracias a la disponibilidad de acceso a la red eléctrica de la universidad, la alimentación tanto del nodo, estación base y solmáforo se la realizaron de forma alámbrica.

3) *Diagrama del diseño preestablecido*: a través de las diferentes fases redactadas, y de la selección de los equipos, en la figura 8, se puede visualizar el correspondiente diagrama de la red. La raspberry pi, además de ejecutar el código, que comanda a los sensores recolectar la información, esta se encarga de almacenar en registros, los diferentes datos recolectados a lo largo del día, esta información es enviada a una base de datos, en MySQL, la cual posteriormente, se vincula con la aplicación que se desarrolló, para visualizar en tiempo real los datos que se recolecten. Adicionalmente, al finalizar la jornada la raspberry subirá el registro generado en el día, a un repositorio de cada nodo en el servidor.



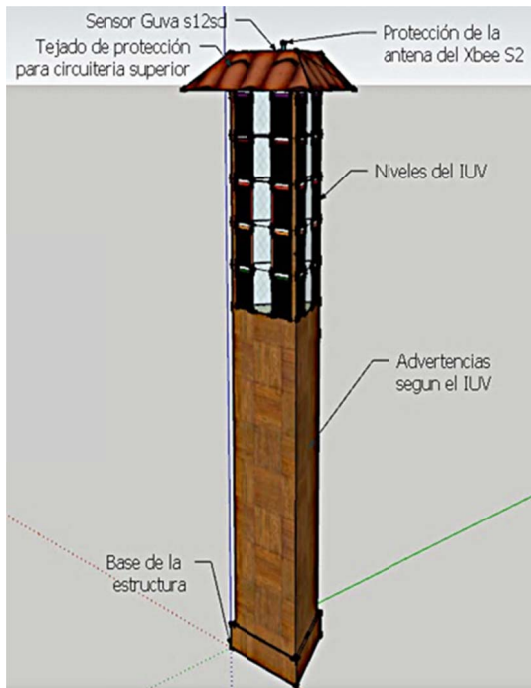


Fig. 7. Diseño de la estructura del solmáforo.

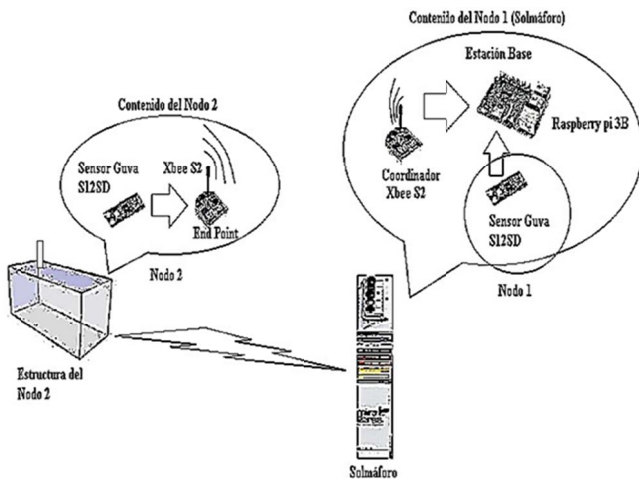


Fig. 8. Diseño de la estructura del solmáforo.

La raspberry pi, además de ejecutar el código, que comanda a los sensores recolectar la información, esta se encarga de almacenar en registros, los diferentes datos recolectados a lo largo del día, esta información es enviada a una base de datos, en MySQL, la cual posteriormente, se vincula con la aplicación que se desarrolló, para visualizar en tiempo real los datos que se recolecten. Adicionalmente, al finalizar la jornada la raspberry subirá el registro generado en el día, a un repositorio de cada nodo en el servidor.

### E. Desarrollo de la aplicación

1) *Requisitos de funcionamiento:* El desarrollo de la aplicación, debe cumplir con diferentes requerimientos al momento de mostrar la información recolectada, como: la lectura captada por los sensores, el mensaje de prevención con respecto al nivel de IUV medido, datos informativos con

respecto a IUV, entre otras características; de tal manera que la aplicación pueda mostrar por una parte, los datos que sean almacenados en el servidor, y por otra, los datos que son registrados en tiempo real por los sensores, además de presentar las advertencias respectivas del IUV, al considerar estos puntos, se planteó la siguiente estructura para el desarrollo de la aplicación en base a las siguiente secciones:

- Presentación de datos en tiempo real.
- Presentación de datos almacenados en el servidor.
- Presentación de información preventiva del IUV. A continuación, se detalla el funcionamiento de la aplicación,
- con la cual se pudo dar cumplimiento a los requisitos previos.

2) *Funcionamiento general de la aplicación MonSolar:* En sí, una vez iniciada los diferentes métodos del ciclo de vida de la aplicación, en el momento en que se ejecuta como tal, pasa a la primer etapa del ciclo de vida de la interfaz que también se la conoce como “activity” dentro del software de AndroidStudio, y con ello se presenta la primera interfaz de la aplicación, que es detallada a continuación en cada literal, con respecto al funcionamiento de cada una de las fases.

- Interfaz de inicio: Tal y como se visualiza en la Fig. 10, la presente actividad o interfaz, se inicia con un mensaje de bienvenida que se crea conjuntamente con el método “onCreate()”. En sí, la interfaz está conformada por dos botones, uno de ellos es un “ImageBoton” (botón con imagen), que representa el logo del escudo y nombre de la Universidad Nacional de Loja, en caso que se presione sobre este, direccionará a la aplicación sobre una “WebView” (ventana web) que permitirá el poder visualizar la página web de la carrera, de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, con posibilidad de retornar a la interfaz de inicio, al presionar la tecla de retroceso propia de los celulares móviles, o la que se encuentra en la parte superior izquierda de la interfaz.

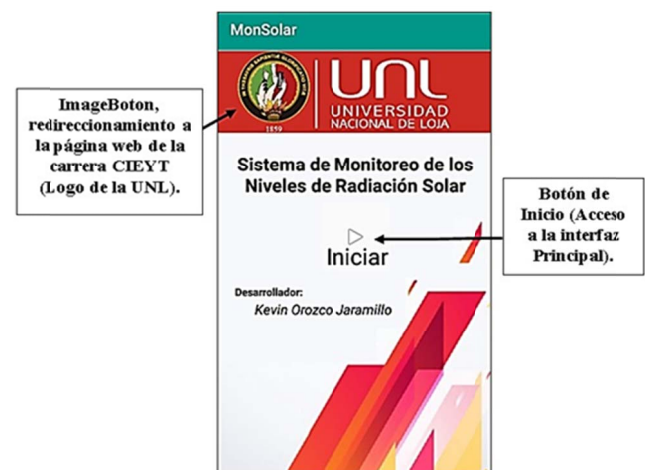


Fig. 9. Interfaz de bienvenida de la aplicación MonSolar.

La segunda opción, que se presenta como Inicio, permite al usuario dirigirse a la “activity” principal de la aplicación, como se visualiza en la Fig. 10.

- Interfaz principal: Una vez, presionado el botón de inicio, se accede a la interfaz principal (Fig. 10) la cual de igual manera cuenta con el “ImageBoton”, del logo de la UNL y tres botones adicionales. Dos de estos botones, representan los datos que se obtienen de los sensores, que vendrían a ser los nodos (nodo 1 ingreso a secretaría y nodo 2 aulas de geología), ubicados dentro de la FEIRNNR, cada uno de ellos se rige a partir del código, que se genera en la estación base (raspberry pi 3B), y actúa en el momento en que el usuario solicita ver los valores de censado, por medio del botón de “Actualizar”, del cual se generará una imagen en la que se visualiza, los puntos donde se encuentran los sensores, dentro de la FEIRNNR y el último valor recolectado por cada sensor, incluyendo la fecha y hora en que fue tomado, con lo cual ya se da por cumplido el primer requisito preestablecido en el desarrollo de la aplicación.

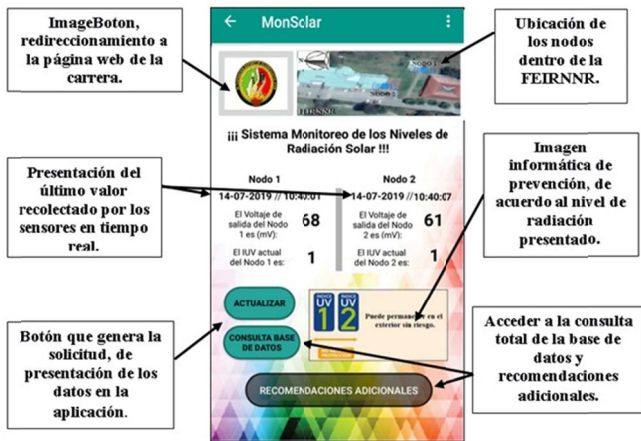


Fig. 10. Actividad o interfaz principal de la aplicación MonSolar.

El segundo botón, permite realizar una consulta a la base de datos, sobre los diferentes valores que se hayan generado en el día a través de uno de los nodos de la red (Fig. 11), al seleccionar uno de estos nodos y presionar el botón ingresar la aplicación accederá a la interfaz de un “WebView”, que funciona igual que el “ImageBoton” del escudo de la UNL, pero este se programó para visualizar un “WebService”, el cual fue diseñado para la base de datos (Fig. 12), en este “WebService” se nos pedirá ingresar dos fechas, correspondientes al rango en que se desea realizar la consulta, pero cabe decir, que al inicio de esta interfaz también se puede ingresar al almacenamiento masivo de los registros de cada nodo, situado dentro de diferentes directorios en el servidor, para ello, se debe presionar el botón “consulta de base de datos”, en el que se encontrarán diferentes documentos, que representan los datos recolectados por los sensores a lo largo de los días; estos datos se diferencian entre sí, por el nombre del documento correspondiente a la fecha del día en que se generó, de esta forma se da cumplimiento al segundo requisito establecido.



Fig. 11. Actividad o interfaz consulta de base de datos en la aplicación MonSolar.



Fig. 12. Interfaz del WebView. Ingreso del rango de datos a consultar, en función de la fecha. Grafica y tabla generada, de los datos obtenidos a partir del rango ingresado.

El tercer botón, corresponde al de recomendaciones, el cual permite observar y tomar en consideración las diferentes precauciones, en función a los diversos niveles de radiación del índice UV que hay, además cuenta de igual manera con el direccionamiento a la página de la carrera, por medio del “ImageBoton” como en las anteriores “activities” (Fig. 13); adicionalmente, frente a cada uno de los niveles del IUUV, se tiene un botón de visualización de las diversas precauciones que se pueden tomar de forma individual, para cada nivel que existe del IUUV (Fig. 13), así, se da por cumplido de forma satisfactoria, los requisitos establecidos previamente al desarrollo de la aplicación.

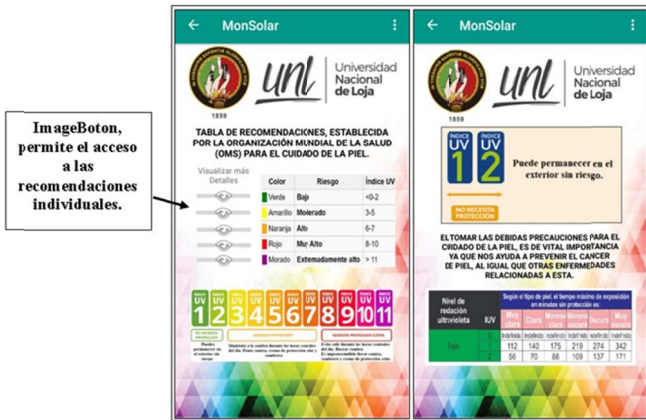


Fig. 13. Interfaz de recomendaciones del IUV. Recomendaciones de cada nivel de radiación.

De igual manera, que en las anteriores interfaces en este caso, la programación que rige a la presente interfaz, se basa en la establecida con el botón inicio, de la interfaz de bienvenida, con la cual se puede acceder a las diferentes interfaces de cada nivel del IUV. Y de una forma práctica, en la parte superior derecha de todas las interfaces, a excepción de la de inicio, se cuenta con dos opciones, una referente al manual de usuario, que se descarga de forma automática al presionar sobre este, y trata sobre el funcionamiento y manipulación de cada interfaz, de tal manera, que sea fácil de utilizar para el usuario; mientras, que la segunda opción corresponde a una interfaz informativa, del desarrollador de la aplicación.

#### F. Implementación del hardware del sistema de monitoreo de los niveles de radiación solar

1) *Instalación de la estación base:* La instalación de la estación base, conjuntamente con el solmáforo, se colocó a 40 metros al norte, a partir del edificio de secretaría general de la FEIRNNR.

2) *Instalación del nodo:* el diseño del nodo, fue desarrollado por medio del software sketchup, del se procedió a crear el mismo, a través de la utilización de una impresora en 3D y del software de diseño Autodesk Fusion 360, que es otra herramienta para el modelado en 3D, este tiene la gran ventaja de permitir exportar los archivos con la extensión compatible, para la impresora en 3D. En la parte superior del nodo, se añadió un aislamiento, para evitar el filtrado de agua, debido al clima lluvioso al que se va exponer, incluyendo la resistencia ante las altas temperaturas, por ende, el aislante utilizado posee también características térmicas, capaces de soportar temperaturas aproximadas a los 398.889 °C y evitar filtraciones externas, de tal forma que se garantiza que los elementos internos se encuentren protegidos ante el agua de lluvia, y a su vez se evita deformaciones del nodo, ante las elevadas temperaturas que pueden producirse, adicional a esto, se colocó una pequeña lamina de acrílico para proteger el sensor, por causa que este se ve expuesto al exterior, para poder realizar la toma de datos, pero corre el riesgo que en caso de lluvia, se vea afectado su funcionamiento. La implementación del nodo dentro de la FEIRNNR, el nodo se colocó sobre las aulas de la carrera de Geología y Minas, este

está conformado por el sensor GUYA, un xbee para la comunicación inalámbrica con la estación base y un circuito regular de voltaje de 3.3 V; para la alimentación, tanto del sensor como del xbee, adicionalmente se colocó un ventilador, para el enfriamiento interno de los dispositivos, por causa de las altas temperaturas a las que se expondrá el nodo, en la Fig. 14 se puede visualizar, los diferentes elementos mencionados dentro del nodo.

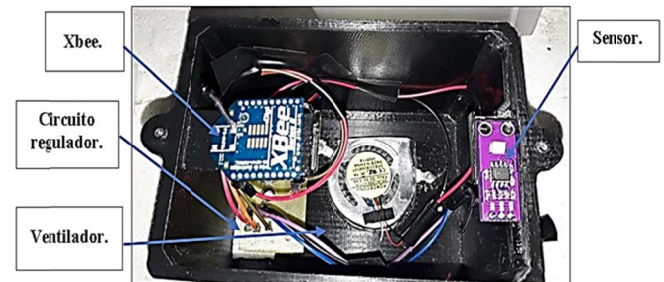


Fig. 14. Elementos internos del nodo.

#### G. Pruebas del sistema

Una vez, realizada la instalación de los diferentes componentes de la red WSN, se realizaron las pruebas pertinentes para la certificación de la eficiencia del sistema, detallados a continuación, en el que se considera la adquisición de los datos, y del envío de los mismos hacia la estación base, para su posterior procesamiento, almacenamiento, envió al servidor y respaldo.

1) *Prueba de adquisición de datos:* En sí, para la obtención de los datos correspondientes al sistema de monitoreo y radiación solar, se colocaron dos sensores como se detalló en el previo diseño, y tal como se mencionó uno de ellos está situado a 40 m. al norte del edificio de Administración Central, junto a la Vivienda Autosustentable, de la FEIRNNR, y el segundo en el edificio correspondiente a las aulas de la Carrera de Geología, pero previo a su colocación se realizó una prueba de calibración del sensor, por medio de una comparativa entre los niveles de voltaje presentados por el sensor GUYA -S12SD, y el nivel del IUV que presentaba el solmáforo que se encuentra implementado en la plaza de Santo Domingo, dentro de la ciudad de Loja, y posteriormente con el sistema de monitoreo solar implementado por parte del INAMHI. Para la adquisición de los datos, se desarrolló un script e el lenguaje de Python, en donde se obtiene el valor de voltaje en mV del sensor y su equivalente al nivel del IUV, incluyendo la hora y fecha en que fue tomada la muestra. Con respecto a la comparativa realizada entre el sensor GUYA y el sistema del INAMHI, esta se basó en 3 pruebas, generadas a diferentes horas del día, en el cual se buscó poder realizar la toma de muestras, con el fin de demostrar el comportamiento de los niveles de radiación solar, a lo largo del día, considerando los diferentes climas, que son característicos de la ciudad de Loja, a continuación se detalla las pruebas realizadas.

Prueba 1: La primera prueba, se basa en una comparativa entre, el valor analógico del sensor GUYA con respecto al IUV, y del valor que es presentado por el sistema de monitoreo de radiación solar del INAMHI, dicha prueba se



realizó durante dos días consecutivos, en la cual, la toma de muestras fue en rangos de 10 minutos cada una durante una hora, correspondiente a 6 muestras por día., durante la hora de mayor radiación UV, en el que el sol se encuentra en el cenit (12h00). En la Fig. 15, se hace un resumen gráfico de las lecturas tomadas del día 24-07-2019 por el sensor GUVVA, y de las presentadas por el sistema del INAMHI.

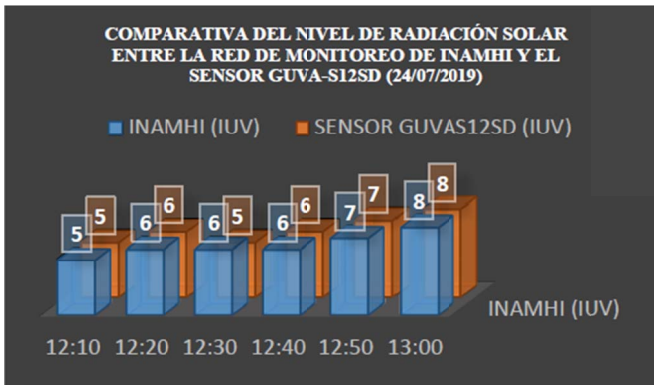


Fig. 15. Gráfica del IUV obtenido, entre INAMHI y el sensor GUVVA-S12SD, en función de las 12 horas del día (clima: soleado y nubloso).

En la Fig. 16, se hace un resumen gráfico del nivel del IUV muestreado durante el día 25-07-2019, correspondiente al segundo día de la toma de datos de la prueba 1, entre el sensor GUVVA y el sistema de monitoreo del INAMHI.

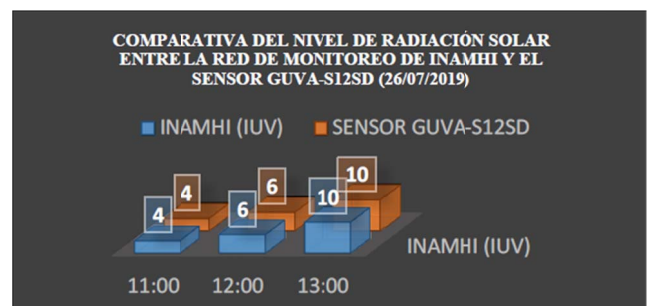


Fig. 16. Gráfica del IUV obtenido, entre INAMHI y el sensor GUVVA-S12SD, en función de las 12 horas del día (clima: semi-soleado y nubloso).

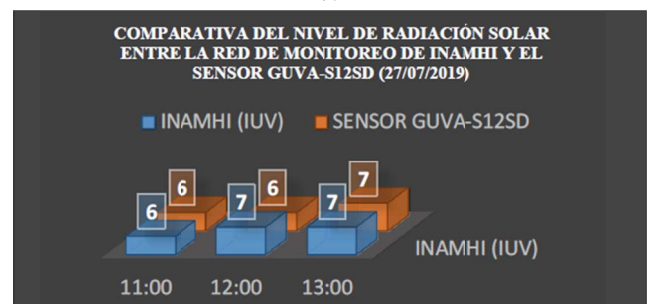
En la presente prueba, durante la toma de datos de los dos días, se obtuvieron valores del IUV entre 4 – 8, que comparados con el IUV establecidos por parte de la OMS (figura1), evidencia un grado de radiación muy alto (color: rojo) aunque este, aún no es extremo, si es perjudicial para la salud del ser humano, si se expone a largas horas con la piel sin protección, en este caso por parte de la OMS se recomienda utilizar: camisa, crema de protección solar, sombrero y gafas de sol. Durante estos días, se evidencian en la toma de datos, que el nivel del IUV aumenta o disminuye de forma lineal en el transcurso del día, tal y como se visualizó en la Fig. 16, este cambio puede también ser muy brusco, aumentando desde un nivel de radiación solar de 5 a uno de 8, en un par de segundos, todo depende de que tan nublado o despejado se encuentre el día. Con respecto, a los valores de la

Fig. 16 y la Fig. 17, generadas en las fechas 24-07- 2019 y 25-07-2019, fueron elaborados a partir del valor que arroja el sistema de monitoreo de INAMHI, y del valor analógico que generó el sensor GUVVA, ya que éste, al estar optimizado para trabajar en modo fotovoltaico, permite obtener a su salida un valor en milivoltios (mV), como referencia al valor del IUV, la conversión de mV a los niveles del IUV, se generan al dividir el valor analógico por un factor de 0.1, del cual se toma en consideración solo el valor entero, de tal manera que en el caso de que se tuviese un voltaje de 775mV, este equivaldría a un IUV=7 ( $775\text{mV} / 0.1 = 7$ ).

Prueba 2: La segunda prueba, se enfocó a la toma de muestras bajo un intervalo de tiempo de una hora por muestra, correspondiente a tres muestras desde las 11 a las 13 horas, las mismas que se recolectaron con el fin de visualizar y evaluar un cambio considerable en el nivel del IUV, pero además, demostrar la correcta presentación y adquisición de los datos, a través de la aplicación desarrollada. En la Fig. 17, se evidencia un resumen de los datos recolectados y comparados con respecto a los generados por el sistema del INAMHI y el sensor GUVVA, se incluye además una figura de la interfaz de la aplicación ejecutada en un celular móvil, presentando los datos recolectados (Fig. 18). Tal y como se pudo observar, en la presente prueba (Fig. 17), para los días 27-07-2019 y 28-07-2019, se evidencian, un cambio lineal en el nivel de radiación solar, en el cual, se obtuvo un valor alto y bajo, con respecto al nivel del IUV obtenido, pero para el caso de los datos recolectados en el día 26-07-2019, se observa un cambio elevado en el nivel del IUV, en el cual de un nivel de IUV= 4 (moderado), varía a un nivel de IUV = 10 (muy alto), que cabe recalcar que este ya es un nivel, que está muy próxima a subir al nivel 11, y ser considerado como un nivel extremo, que aumenta la posibilidad de provocar cáncer en la piel.



(a)



(b)



(c)

Fig. 17. Gráfica del IUV obtenido, entre INAMHI y el sensor GUAVA- S12SD, en función de tres de las horas (11-12-13 horas) con mayor radiación en el día (clima: soleado y semi-templado).

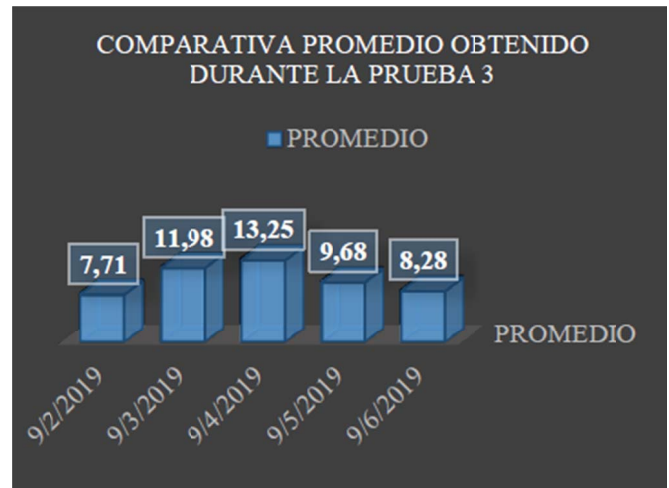


Fig. 19. Gráfica del IUV obtenido, entre INAMHI y el sensor GUAVA- S12SD, en función de tres de las horas (11-12-13 horas) con mayor radiación en el día (clima: soleado y semi-templado).

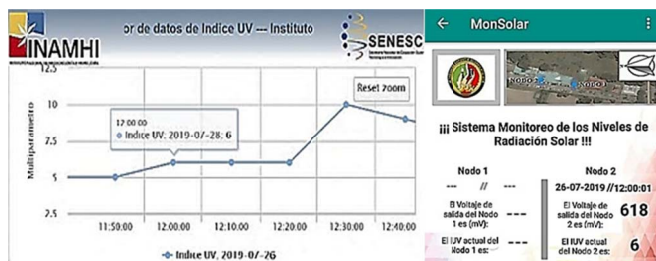


Fig. 18. Gráfica del IUV obtenido, entre INAMHI y el sensor GUAVA- S12SD, en función de tres de las horas (11-12-13 horas) con mayor radiación en el día (clima: soleado y semi-templado).

2) *Funcionamiento general del sistema:* El funcionamiento completo del sistema se basa en tres objetivos puntuales. El primer objetivo se enfoca, en recolectar y presentar, al público en general por medio del solmáforo, el nivel de radiación solar censado, a través del encendido de sus luces (Fig. 20).

Prueba 3: A partir de la comparativa y calibración del sensor, se prosiguió a realizar la tercera prueba de adquisición de datos, en el nodo 1 y nodo 2, pero estos ya implementado dentro de sus respectivas estructuras, situadas en las ubicaciones establecidas. Esta prueba, se ejecutó considerando la toma de muestras, en intervalos de 10 minutos, en un rango de seis horas consecutivas, correspondientes a las horas, que a lo largo del día, producen mayor radiación, la prueba fue realizada durante cinco días. Para su validación, se realiza la comparativa, entre los valores presentados del INAMHI y el sensor GUVAS12SD, de la cual se genera una gráfica visual en la Fig. 19, con respecto al promedio de error obtenido, durante cada día en que se realizó la presente prueba, de la cual, se denota que el mayor promedio de error es el 13.25, que al considerar la diferencia en la gama de sensores, y el número de dispositivos que utiliza el INAMHI, permite dar por satisfactoria la pruebas generadas.



Fig. 20. Solmáforo implementado.

El segundo objetivo, permite la visualización de los datos recolectados, por medio de la aplicación desarrollada, en la cual, también se muestran las prevenciones a tomar en cuenta, según el nivel de radiación solar presentado (Fig. 21).





Fig. 21. Solmáforo implementado.

El objetivo final, se basa en la consulta de los datos recolectados, al ingresar en una de las opciones de la aplicación creada, en la que permite el visualizar todos los datos censados, a partir de la colocación de la fecha que se desea consultar (Fig. 22).

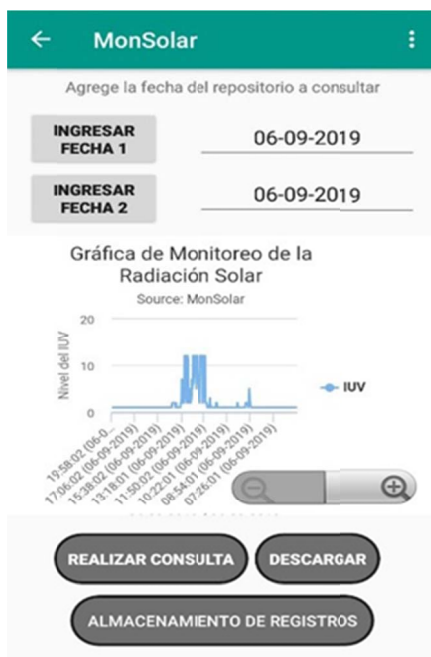


Fig. 22. Solmáforo implementado.

### III. CONCLUSIONES

Se ha diseñado un sistema de monitoreo de radiación ultravioleta funcional, el cual, parte de la integración de un nodo, que incorpora un sensor de radiación UV GUA-S12SD, y una tarjeta de comunicación inalámbrica xbee S2,

que recopila y envía la información recolectada, por medio de la utilización de un protocolo zigbee, basado en el estándar 802.15.4 de la IEEE, esta información es enviada hacia la raspberry pi 3B, en la que se realiza la conversión de los bits a valores hexadecimales, y posteriormente a números decimales, que son almacenados en la raspberry pi 3B, y en la base de datos de MySQL, para su posterior presentación, a través de la aplicación desarrollada, otorgándole la capacidad de recobrar los datos recolectados por los sensores, pudiendo así, crear estadísticas de los diferentes valores censados a lo largo de la semana o mes. Para la presentación de la información en la aplicación móvil, se utilizó el software AndroidStudio, mediante el cual se creó una aplicación, amigable con el usuario e informativa, desarrollada bajo el lenguaje de programación Java. En la aplicación creada se visualiza: el valor censado por parte de los nodos, su ubicación, prevenciones con respecto al nivel de IUV mostrado, los mismos que, son descargados desde la base de datos en MySQL, por medio de la programación ejecutada, también presenta la base de datos de los valores censados en diferentes días, manual de usuario y recomendaciones adicionales para la protección de la piel, ante todos los niveles de radiación UV que existen. Esta aplicación, se puede ejecutar en las diversas gamas que trabajan bajo el sistema operativo de Android, otorgando así, al público en general a través de su celular, un punto informativo del nivel de índice UV, en todo momento.

La utilidad de la raspberry pi 3B, como núcleo de la red de acuerdo a las pruebas realizadas, es satisfactoria, ya que esta puede gestionar de forma fácil y sencilla la masiva cantidad de datos, mediante la utilización de su procesador ARMv8 de cuatro núcleos a 1.2GHz, que le permite administrar los datos recolectados a lo largo del día, de una manera rápida y oportuna, gestionando a su vez la programación mediante los diversos software, tales como Python, Eclipse, Java, Anaconda entre otros, que vienen por defecto en el sistema operativo de la raspberry pi 3B, esta programación rige el funcionamiento de cada uno de los nodos, con respecto a la adquisición de los datos, y de esta forma la raspberry pi 3B, proporciona diferentes alternativas, que permiten el no tener que disponer de diversas plataformas, para el almacenamiento o administración de la información recolectada, por su alta capacidad de soporte, que a su vez le permiten trabajar como un servidor local, eliminando la necesidad de utilizar un hosting externo. La comunicación inalámbrica por medio de los xbee S2, facilitó realizar la recolección de los datos en diferentes puntos a lo largo de la FEIRNNR, gracias a su alta cobertura entre la tarjetas xbee S2 del nodo y estación base, dando así, diferentes perspectivas con respecto al punto idóneo en donde colocar el nodo y la estación base, adicional a esto, la utilización del protocolo zigbee en las tarjetas, fue crucial, ya que con sus características de bajo consumo y bajas tasas de transmisión, permitieron establecer fácilmente la comunicación inalámbrica, sin necesidad de utilizar mayores dispositivos, en lo que corresponde al establecimiento de la comunicación, entre el nodo 2 y la raspberry pi 3B. La sensibilidad del sensor GUA-S12SD, con respecto a la toma

de datos en las diferentes pruebas de campo desarrolladas, fue satisfactoria, para ello, se tomó como referencia los datos presentados por el sistema de radiación del IUV, implementado por el INAMHI, a partir del cual, se obtuvo una variación de  $\pm 1$  con respecto a los valores del IUV medidos por el sensor GUV-A-S12SD, y los presentados por el INAMHI, y al considerar el mayor número de sensores que utiliza el INAMHI, que recolectan además, diferentes tipos de reflexiones de los rayos UV, ante estas premisas, se observa que la variación obtenida es mínima, garantizando así, la eficiencia en la toma de muestras. Las diferentes pruebas realizadas, se evidencian en la sección de resultados.

#### REFERENCIAS

- [1] L. Delgado, "Índice ultravioleta," Departamento de Física, Universidad de Antofagasta, 2003.
- [2] J. Rueda, and J. Talavera, "Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora," *Revista Colombiana de Computación (RCC)*, vol. 18, n° 2, pp. 58-74, 2017.
- [3] S. Campaña, and J. Londoño, "Estudio de redes de sensores y aplicaciones orientadas a la recolección y análisis de señales Biomédicas," *Gerencia Tecnológica Informática (GTI)*, vol. 12, n° 33, pp. 85-99, 2013.
- [4] C. Nayibe, "Redes de Sensores Inalámbricos," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2014.
- [5] J. Ranieri, S. Villar, y A. Rodríguez, "Sistemas Operativos," 2016. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/JoaoRanieri1/sistemas-operativos-69809663>. [Último acceso: Junio 2019].
- [6] J. Piña, "Guía Técnica radiación Ultravioleta de Origen Solar," Ministerio de Salud (Chile), Santiago, 2011.
- [7] C. Galizia, "Los grados de protección IP en los equipos e instalaciones y su interpretación según IEC y NEMA," [Online]. Available: [http://electrico.copaipa.org.ar/attachments/102\\_Interpretación%20de%20los%20Grados%20de%20Protección%20según%20IEC%20y%20NEMA.pdf](http://electrico.copaipa.org.ar/attachments/102_Interpretación%20de%20los%20Grados%20de%20Protección%20según%20IEC%20y%20NEMA.pdf). [Accessed 2019].
- [8] S. Gabrielloni, "Enfermedades Cutáneas," enero 2011. [Online]. Available: <http://www.cosmetologas.com/noticias/val/912-42/radiaciones-solares-y-sus-efectos-sobre-la-piel.html>. [Accessed 2019].
- [9] OMS, "Índice UV solar mundial: Guía práctica," Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2003.
- [10] A. Alvarado, "La radiación ultravioleta es mayor durante los equinoccios en Quito," *Diario El Comercio*, 4 abril 2018. [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/tendencias/quito-supera-escala-radiacionuv-organizacionmundialdelasalud.html?fbclid=IwAR0A4oi>. [Accessed 2019].
- [11] INAMHI, "Visualizador de datos de índice UV," 2019. [En línea]. Available: <http://186.42.174.236/IndiceUV2/>. [Accessed 2019].
- [12] Chen, J., "Physics of solar energy," John Wiley and Sons, 2011.

## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

El Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (antigua Facultad de Ingeniería Electrónica) fue creado el 25 de abril de 1977 e inicia sus labores en octubre del mismo año en la modalidad presencial, con sus planes y programas de estudio encaminados a la formación del Ingeniero Electrónico. A partir de octubre de 1990, ofrece dos carreras con perfiles profesionales definidos: Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones e Ingeniería Electrónica en Computación.

En la propuesta actual del Departamento se integran en un sólo perfil estas aspiraciones, ofreciendo las carreras de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, e Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control.

Además oferta los siguientes programas de posgrado: **Maestría de Investigación en Electrónica menciones en Automática y Telecomunicaciones**, Maestría en Redes de Información y Conectividad, y Maestría en Gerencia de Redes y Telecomunicaciones.



**Departamento de Eléctrica y Electrónica**  
**Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE**  
**Copyright © 2020**