

# A new VLC System for Localization in Underground Mining Tunnels

D. Iturralde, *Member, IEEE*, F. Seguel, I. Soto, *Member, IEEE*, C. Azurdia, *Member, IEEE* and S. Khan, *Member, IEEE*

**Abstract**— In this paper we present a new system that uses new technology that has the ability to transmit data using light emitting diodes (LED) and a photodetector (PD) capable of sensing very soft changes of light. The system developed in conjunction with the trilateration technique can be used for localizing personnel as well as machinery in underground mining tunnels. Simulations are performed, and comparisons are made with other well-known techniques in terms of the location estimation error. Overall, it is shown that the proposed system is a viable option for localization in underground mining tunnels.

**Keywords**— Visible light communications, localization, trilateration.

## I. INTRODUCCIÓN

LA OIT (Organización Internacional del Trabajo) en su página web afirma que cada 15 segundos, 153 trabajadores tienen un accidente laboral y anualmente ocurren más de 317 millones de accidentes en el trabajo, muchos de los cuales resultan en absentismo laboral. De la misma manera dicha organización asegura que cada 15 segundos un trabajador muere a causa de accidentes o enfermedades relacionadas con el trabajo, es decir, que cada día mueren 6.300 personas por dicha causa que equivalen a más de 2,3 millones de muertes por año [1].

Las tasas de accidentes laborales a nivel general siguen siendo altas, es por eso que los empleadores están obligados por ley a poner en marcha todos los procedimientos que sean necesarios para evitar contratiempos. Existen ambientes laborales que por naturaleza son más peligrosos que otros, ya que durante los procesos se presentan situaciones riesgosas. Es el caso de la industria minera, donde el número de accidentes fatales anualmente es elevado [2]–[5].

En el verano de 2006, el Congreso de Estados Unidos promulgó la ley Mejora de Minas y Nueva Respuesta a Emergencias (MINER, por sus siglas en inglés) en respuesta a una serie de tragedias que ocurrieron a principios de ese año. La Ley MINER exige a los gerentes de la mina a presentar un plan de respuesta de emergencia [6].

La tecnología ha provisto nuevas soluciones y herramientas muy eficaces para la seguridad y prevención de accidentes. Se trata básicamente de soluciones de comunicación. Se ha probado que en muchas situaciones laborales contar con la

información adecuada en forma instantánea y en el momento preciso puede salvar vidas [7].

En un trabajo posterior los autores presentaron un sistema de localización basado en la colocación de puntos de referencia y la tecnología VLC que muestra una comparación con un sistema RFID. En el presente trabajo se presenta un diseño general basado en la tecnología de comunicación por luz visible (VLC), el sistema se muestra como una opción viable para la comunicación en ambientes subterráneos y el uso de la misma para cumplir con requisitos de localización, y así generar mayor seguridad laboral, el método propuesto es comparado con los trabajos presentados en la sección II.

La organización del trabajo es la siguiente: en la sección II se presenta un estado del arte actual de los sistemas de localización para minas subterráneas, la sección III presenta un breve marco teórico de las comunicaciones por luz visible. La sección IV detalla el sistema propuesto. La sección V muestra los resultados numéricos obtenidos en el proceso de simulación. Finalmente, se pueden encontrar las conclusiones en la sección VI.

## II. ESTADO DEL ARTE

En el trabajo presentado por el gobierno de Estados Unidos por intermedio del Instituto Nacional de Seguridad y Salud ocupacional, se realiza una revisión de las tecnologías electrónicas de localización utilizadas en las minas subterráneas, donde se observa que tecnologías tales como: RFID, Wi-Fi y Zigbee han sido las preferidas para cumplir con este propósito [6].

En [8] se presenta un método para la localización de un vehículo equipado con un lector RFID en un ambiente subterráneo, el uso de un filtro de partículas y etiquetas RFID pasivas se utilizan en la creación de los mapas de nodo para ayudar a resolver el problema de localización. El error de localización registrado es de un mínimo de 30 cm hasta un máximo de 5 metros.

El estudio presentado en [9] investiga el uso de etiquetas RFID distribuidas aleatoriamente para localización de forma autónoma y para navegación en entornos subterráneos. La localización mínima da un error de 0,35 m, mientras que el error de localización máxima es de 0,98 m.

En el trabajo mostrado en [10], se propone un algoritmo híbrido basado en RFID para localización y mapeo simultáneo (SLAM), que permite la navegación autónoma en entornos GPS negados. Un filtro de partículas junto con un modelo de sensor que caracteriza la fuerza de la señal recibida (RSS), así como la probabilidad de detección de la etiqueta se utiliza para crear submapas. El error de estimación de la posición promedio es de 0.3 metros.

En [11] la información de localización de los nodos

D. Iturralde, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador, diturralde@uazuay.edu.ec

F. Seguel, Universidad Santiago de Chile, Santiago de Chile, Chile, fabian.seguelg@usach.cl

I. Soto, Universidad Santiago de Chile, Santiago de Chile, Chile, ismael.soto@usach.cl

Cesar A. Azurdia-Meza, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, cazurdia@ing.uchile.cl

S. Khan, Universidad de Ingeniería y Tecnología, Peshawar, Pakistan, salmankhan@uetpeshawar.edu.pk

móviles es capturada por los nodos subterráneos de la red Wi-Fi. El resultado de la simulación muestra que el método utilizado en el sistema de localización puede alcanzar precisiones de localización de hasta 1,6 metros.

El trabajo presentado en [12] se investiga el sistema de posicionamiento Búho (OwlPS) el mismo que se adapta a túneles de minas subterráneas, que traen sus propias problemáticas en términos de propagación de la señal de radio. Se dice que, con una media de error por debajo de los 20 metros, OwlPS es utilizable como un sistema de posicionamiento personal para realizar un seguimiento a trabajadores de la mina en caso de incidente.

En [13] se propone un sistema de posicionamiento de toda la red de túneles basado en tecnología Zigbee. El sistema de posicionamiento global está compuesto por el centro de control, estaciones base de monitoreo, gateways, nodos de referencia y nodos móviles. El diseño del software y del hardware se detallada pero no se muestran resultados numéricos del sistema implementado.

En el trabajo presentado en [14], se propone un sistema de localización subterráneo basado en tecnología ZigBee y WebGIS. Los mineros están equipados con dispositivos sensores Zigbee que tienen la capacidad de comunicarse, los dispositivos determinan la ubicación de los mineros en tiempo real por un algoritmo basado en el RSSI (Indicador de intensidad de señal recibida), la transferencia de información se envía a través de ZigBee y Ethernet que actúan como principales canales de transmisión de datos, un servidor proporciona el servicio para mostrar la distribución de los mineros en el e-map a través de la web. Tampoco se muestran resultados numéricos del sistema implementado.

En el trabajo mostrado en [15], se describe e implementa un nuevo tipo de sistema de vigilancia de seguridad en las minas de carbón, que es una especie de sistema de red inalámbrica de sensores basados en tecnología ZigBee. La red de sensores inalámbricos está constituida por nodos fijos, nodos móviles y un gateway que se encuentran en los túneles subterráneos. Mientras que un software de monitoreo se despliega en la superficie. El error promedio se cuantifica en aproximadamente 2.5 metros.

En [16] se expone el esquema, composición y principio de funcionamiento de un sistema de posicionamiento personal subterráneo, diseñando una estación de posicionamiento personal subterránea basado en la tecnología de comunicación inalámbrica ZigBee, la cual incluye un receptor RF inalámbrico, comunicaciones y dispositivos de procesamiento de datos, utiliza el máximo algoritmo de estimación de probabilidad para determinar la ubicación precisa. En este trabajo no se muestran resultados numéricos relacionados con la estimación de localización.

En [17] se presenta un nuevo tipo de sistema de localización para personal de la mina. Es un tipo de red inalámbrica de sensores basados en la tecnología de comunicación inalámbrica ZigBee. El sistema puede alcanzar rápidamente y en tiempo real la información precisa sobre la localización de los mineros en los túneles de la mina subterránea. A través del indicador de intensidad de señal

recibida (RSSI), el nodo de localización se aprovecha de su motor de localización incorporada para calcular su localización de coordenadas basado en un algoritmo de localización. El error de localización del sistema máximo es de aproximadamente 6 metros.

Otro trabajo [18], propone un nuevo algoritmo de posicionamiento para la mina subterránea de carbón basado en tecnología ZigBee, en el que NNSS (intensidad de la señal de vecinos cercanos) se adoptó para la ubicación preliminar, y luego el método de localización DTM (medición triangular dinámica para el posicionamiento preciso. El sistema con el algoritmo para las empresas mineras del carbón proporciona un seguimiento de personal, monitoreo, además de otras funciones relacionadas. No se muestran resultados relacionados con el error de posición.

En el trabajo expuesto por [19] se diseña software y hardware para el sistema de localización del personal de minas subterráneas. El sistema se compone del nodo de gateway, el nodo de referencia y el nodo de ubicación, y los tres conectados con un monitor superior. Puede transmitir datos de localización en tiempo real desde el personal al software monitor gráfico, y lograr la función de seguimiento en tiempo real para el nodo ubicación. Un algoritmo que se basa en la RSSI se adopta como algoritmo de localización. Los resultados muestran un error mínimo de localización inferior a 3 metros.

Como se ha podido observar la mayoría de los trabajos previos analizados utilizan tecnología de radio frecuencia para cumplir con el propósito de localización en minería. Hay una serie de problemas con los sistemas de radiofrecuencia aplicados a localización de interiores, que incluyen: (i) el tiempo de respuesta largo y de baja precisión; (ii) los sistemas basados en radiofrecuencia no están permitidos en ambientes como hospitales y aviones, debido a razones de seguridad; (iii) tecnologías como Wi-Fi, Zigbee, RFID incurren en costos adicionales asociados con el desarrollo y la configuración particular cuando se aplican a grandes superficies; y (iv) menor precisión (típicamente entre algunas decenas y varios centenares de metros), debido a que en un ambiente interior la señal puede ser bloqueada fácilmente por la mayoría de materiales de construcción.

### III. COMUNICACIONES POR LUZ VISIBLE

Las comunicaciones por luz visible son parte de las comunicaciones ópticas inalámbricas (OWC) la cual se presenta como una tecnología que implica la transmisión de radiación óptica cargada de información a través de un canal en el espacio libre. En los últimos años, se ha podido observar una creciente investigación en las comunicaciones de luz visible (VLC), y la idea de utilizar LEDs para iluminación y comunicaciones de datos. La doble funcionalidad proporcionada por VLC (iluminación y comunicación de datos) han creado una amplia gama de aplicaciones interesantes, incluyendo redes en el hogar, comunicación de datos a alta velocidad a través de las infraestructuras de alumbrado en oficinas, comunicaciones coche a coche,

comunicaciones de alta velocidad en ambientes como hospitales y aviones, por nombrar algunas [20]–[23].

Para explicar el modelo de canal VLC [24], se utiliza la Fig. 2, en la misma se observa un transeceptor  $i$  colocado en el techo del túnel subterráneo con coordenadas  $(x_i, y_i, h_i)$  y otro transeceptor  $p$  colocado en el caso de seguridad del personal minero con coordenadas  $(x_p, y_p, h_p)$ , además de  $\Psi$  que es el ángulo de incidencia de la luz y donde  $\phi$  es el ángulo de irradiación.

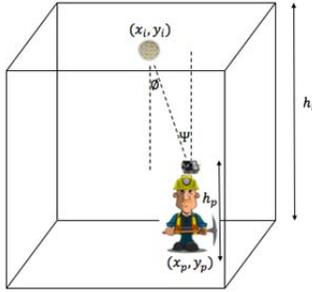


Figura 2. Canal de comunicaciones por luz visible.

La potencia óptica recibida por cada transeceptor  $p$  desde el LED  $i$  puede ser descrita como:

$$Pr_{(i,p)} = Pt_i Hlos(i,p), \quad (1)$$

Donde,  $Pt_i$  es la potencia transmitida por cada LED  $i$ . La respuesta del canal  $Hlos(i,p)$  entre el LED  $i$  y el fotodetector  $p$  puede ser expresada como:

$$Hlos_{i,p} = \begin{cases} \frac{A_t(m_1 + 1)}{2\pi d_{(i,p)}^2} \cos^{m_1}(\phi) T_s(\Psi) g(\Psi) \cos(\Psi), & 0 \leq \Psi \leq \Psi_c \\ 0, & \text{Otros valores} \end{cases}, \quad (2)$$

Donde,  $A_t$  es el área física del fotodetector en el receptor,  $d_{(i,p)}$  es la distancia entre el LED  $i$  y el fotodetector  $p$ ,  $T_s(\Psi)$  es la ganancia del filtro óptico,  $\Psi_c$  denota el ancho del campo de visión del fotodetector,  $m_1$  es el orden de emisión lambertiana y está dado por el semiángulo a media potencia del LED:

$$m_1 = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos \Phi_{1/2})}, \quad (3)$$

Mientras que, la ganancia del concentrador óptico  $g(\phi)$  está dada por:

$$g(\phi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \Psi \leq \Psi_c \\ 0, & \Psi > \Psi_c \end{cases}, \quad (4)$$

Donde  $n$  representa el índice de refracción.

Usando el sistema de coordenadas tridimensional del sistema descrito en la Fig. 2, es posible encontrar una expresión para:

$$\cos(\phi) = \frac{h_i - h_p}{[(h_i - h_p)^2 + (x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

Donde,  $h_i$  es la altura a la cual se encuentra el LED  $i$  y  $h_p$  es la altura a la cual se encuentra el fotodetector  $p$ . Se asume también un sistema de control ubicado en cada uno de los cascos de seguridad, que utiliza un acelerómetro para mantener siempre al fotodetector paralelo al techo de la mina, con lo cual  $\cos(\phi) = \cos(\Psi)$ , y la ecuación de respuesta del canal quedaría escrita como:

$$Hlos_{i,p} = \frac{T_s(\Psi) g(\Psi) A_t (m_1 + 1) (h_i - h_p)^{m_1 + 1}}{2\pi [(h_i - h_p)^2 + (x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2]^{m_1 + 3/2}} \quad (6)$$

La potencia recibida entonces sería:

$$Pr_{(i,p)} = \frac{Pt_i T_s(\Psi) g(\Psi) A_t (m_1 + 1) (h_i - h_p)^{m_1 + 1}}{2\pi [(h_i - h_p)^2 + (x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2]^{m_1 + 3/2}} \quad (7)$$

Debido al caso de la aplicación en particular en el lado del receptor, el fotodetector solamente se expone a las señales ópticas de las fuentes LED de transmisión y no a otras fuentes de iluminación naturales o artificiales. Por lo que se puede decir que la señal recibida se modela como:

$$Y_{i,p} = rx Hlos_{(i,p)} + n, \quad (8)$$

Donde,  $Y_{i,p}$  representa la señal eléctrica recibida desde el LED  $i$  al receptor  $p$ ,  $r$  es la sensibilidad en el fotodetector en unidades de A/W,  $x$  representa el pulso óptico transmitido y  $n$  se modela como ruido Gaussiano aditivo con media cero y varianza  $\sigma^2$ .

#### IV. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema propuesto que se muestra en la Fig. 3 está basado en una red de telecomunicaciones que posee las tres capas fundamentales dentro los diseños de red: acceso, distribución y núcleo. Cada capa se puede considerar como un módulo estructurado bien definido, con funciones específicas. El modelo de tres capas asegura que la red mantenga la resistencia y la flexibilidad suficientes para proporcionar servicios fundamentales así como también permitir el crecimiento y los cambios que ocurren con el tiempo [25].

En el centro de monitoreo se encuentra la capa de núcleo, un enrutador es capaz de proporcionar la conectividad al backbone de alta velocidad (Internet) con el objetivo de que los datos recopilados por el sistema de localización y que se encuentran almacenados en el servidor de base de datos estén disponibles para las personas interesadas en cualquier momento y en cualquier lugar; además la capa de núcleo mediante el enrutador se interconecta con los enrutadores de distribución a través de un enlace de fibra óptica.

Los enrutadores de distribución interactúan entre la capa de acceso y la capa de núcleo para proporcionar una alta disponibilidad al usuario final y una ruta hacia la capa de

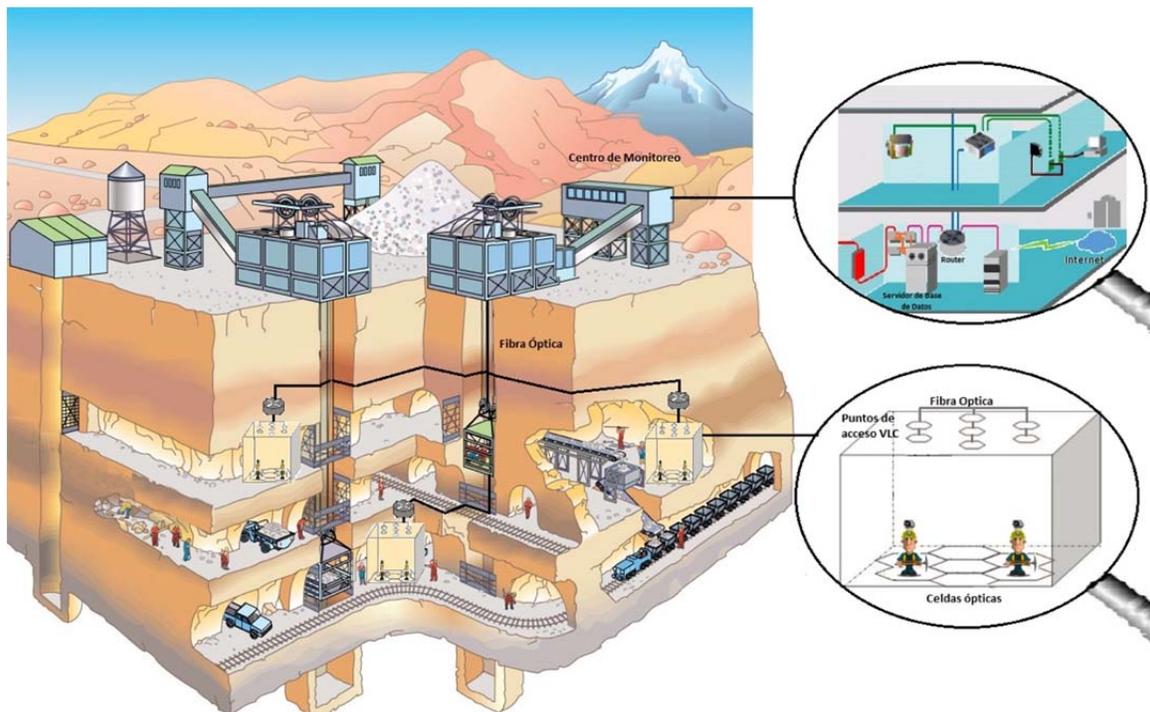


Figura 3. Configuración del túnel subterráneo adaptado de [26].

núcleo.

La capa de acceso representa el perímetro de la red, por donde entra o sale el tráfico de la misma. La función principal de los puntos de acceso VLC es proporcionar el ingreso del usuario a la red. Los puntos de acceso VLC se conectan a los enrutadores de distribución, que implementarían tecnologías para calidad de servicio y seguridad.

Para proporcionar una alta tasa de datos y un área de cobertura más amplia, así como para asegurar la disponibilidad del enlace en todo momento, una estructura celular es la opción escogida. Se asume que dentro del túnel subterráneo se colocan  $i$  puntos de acceso VLC montados en el techo a lo largo de todo el túnel subterráneo, donde cada uno de ellos está compuesto por un LED y un fotodetector situado en las coordenadas  $(x_i, y_i, h_i)$ , para proporcionar tanto iluminación, así como comunicación en la celda óptica formada por el haz de luz. Para establecer un enlace de comunicación full-dúplex un dispositivo móvil basado en VLC que también está compuesto por un LED y un fotodetector es colocado en el casco de seguridad del minero  $p$  a coordenadas desconocidas  $(x_p, y_p, h_p)$  y los mismos están conectados a una unidad de procesamiento digital.

El estándar IEEE 802.15.7 describe la capa física y la capa de enlace de datos para el uso de VLC en redes de área personal inalámbricas (WPAN); cubriendo temas como: topologías de red, direccionamiento, prevención de colisiones, entre otros [27].

Basados en el estándar, la topología que se escoge para el presente trabajo es la topología estrella en la que la comunicación es establecida entre los dispositivos móviles y un punto de acceso VLC. Las redes en estrella operan independientemente de todas las otras redes en estrella en

funcionamiento. Esto se logra mediante la elección de un identificador de WPAN que no está siendo utilizado por otra red dentro del área de cobertura. Una vez elegido el identificador de WPAN, el punto de acceso VLC permite que los dispositivos móviles se unan a su red.

El estándar define al método CSMA/CA (acceso múltiple con escucha de portadora y evasión de colisiones) como una de las técnicas utilizadas para acceso al canal; de modo que cada uno de los dispositivos móviles pueda utilizar el mismo medio de transmisión.

La exploración de canales es utilizada por un dispositivo VLC móvil para evaluar el estado actual de un canal (o canales), localiza todos los puntos de acceso VLC dentro de su campo de vista.

Una vez que la señal se ha enviado desde los  $i$  puntos de acceso VLC y es captada por el dispositivo móvil VLC  $p$  montado en el casco de seguridad del minero, la unidad de procesamiento digital se encargará de leer las señales de potencia, a continuación, se obtienen las distancias requeridas mediante:

$$d(i, p) = \left( \frac{P_t T_s(\Psi) g(\Psi) A_t(m_1+1)(h_i-h_p)^{m_1+1}}{2\pi Pr(i, p)} \right)^{1/m_1+3} \quad (9)$$

Para calcular la posición, el dispositivo móvil VLC a través del procesador digital implementa la técnica de trilateración escogiendo las tres señales más fuertes dentro del sistema propuesto para localizar a los mineros dentro de las distintas zonas y enviar la posición calculada al centro de monitoreo mediante el punto de acceso VLC con el cuál exista coordinación. La Fig. 4 muestra una descripción general de la técnica de trilateración. El objetivo de la técnica es estimar el punto de intersección entre los tres círculos que vendría siendo

la posición estimada  $(x, y, h)$  del dispositivo móvil colocado en el casco de seguridad del minero, mientras que el centro de cada círculo está dado por la coordenada conocida de cada punto de acceso VLC  $(x_i, y_i, h_i)$ .

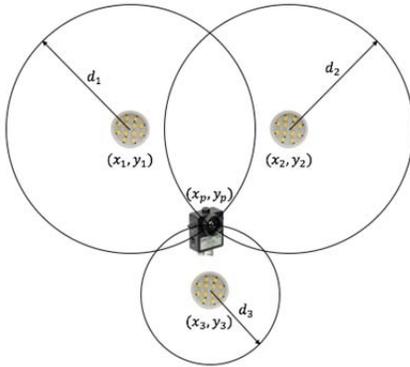


Figura 4. Técnica de trilateración.

Una posible solución analítica para estimar las coordenadas del fotodetector viene dada por la solución de tres ecuaciones cuadráticas que se indican a continuación:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (h - h_i)^2} \quad i = 1,2,3. \quad (10)$$

### V. RESULTADOS NUMÉRICOS

En esta sección se muestra el rendimiento del sistema propuesto en términos del error de estimación de ubicación. Dentro de las simulaciones, un total de 1000 ubicaciones de mineros a ser estimadas fueron generadas aleatoriamente siguiendo una distribución uniforme.

Los parámetros utilizados en la simulación se resumen en la Tabla 1, las dimensiones del túnel y las posiciones de los transmisores fueron escogidas para generar un espacio de simulación coherente, las características tanto del LED, así como también del fotodetector fueron obtenidas de las diferentes hojas de datos de los dispositivos [28], [29].

TABLA 1  
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Dimensiones del túnel $(a, b, h_i)$	(6 m, 6 m, 5 m)
Posiciones de los transmisores, $(x_i, y_i)$	(3,2), (2,5) y (4,5)
Potencia óptica transmitida, $(P_t)$	70W
Semi-ángulo a media potencia, $(\Phi_{1/2})$	60°
Área del fotodetector, $(A_t)$	1 cm <sup>2</sup>
Ganancia del filtro óptico, $T_s(\Psi)$	1
Índice de refracción, $n$	1.5
Campo de visión del fotodetector, $\Psi_c$	70°

Para obtener los resultados computacionales, se define el error de estimación de ubicación,  $e$  como la distancia lineal entre las coordenadas reales del tranceptor óptico unido al casco de seguridad del minero  $(x_p, y_p)$  y las coordenadas estimadas  $(x, y)$ . Y se calcula como:

$$e = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + (h - h_p)^2}. \quad (11)$$

En la Fig. 5 se muestra el rendimiento del sistema propuesto en términos del número de ubicaciones generadas y del error de estimación de ubicación, analizando los datos obtenidos se pudo establecer que el error promedio es solamente de 12 cm.

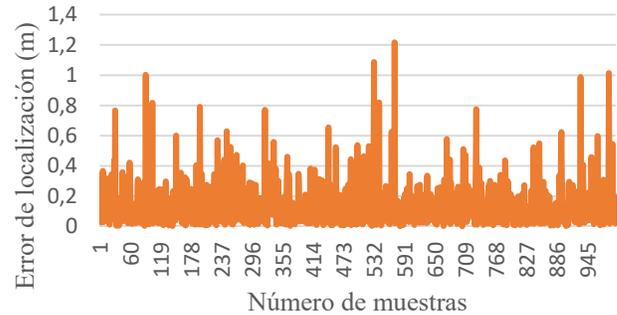


Figura 5. Rendimiento del sistema propuesto.

En la Fig. 6 se muestra el rendimiento del sistema propuesto en comparación con los distintos sistemas y tecnologías revisadas en la introducción del presente trabajo, se puede observar que el modelo planteado presenta una mejora considerable en cuanto al error de localización promedio.

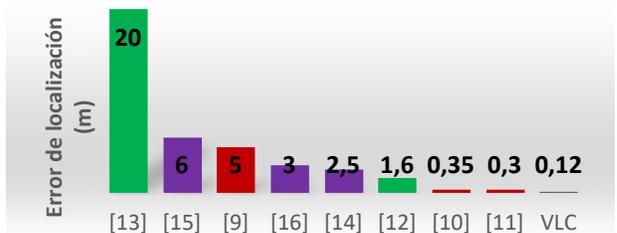


Figura 6. Comparación del sistema propuesto con otros sistemas y tecnologías

En la Fig. 7 se muestra el rendimiento del sistema propuesto y de los trabajos de las tecnologías de radiofrecuencia que presentan un error de estimación de ubicación menor. Se puede comprobar que el error máximo de localización del sistema propuesto es de apenas 1,13 mts y que aproximadamente el 80% de la cantidad de veces que el sistema determina la posición, los errores no exceden los 20 cm. Es decir que, solamente el 20% de las veces el sistema genera un error de más de 20cm.

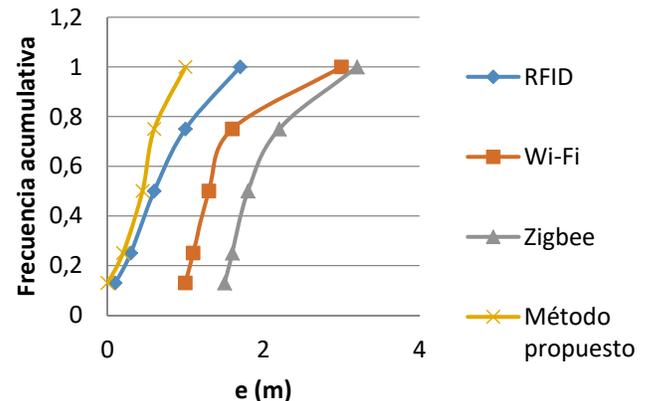


Figura 7. Frecuencia acumulativa del sistema propuesto.

## VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un novedoso sistema para la localización de personal en minas subterráneas usando VLC y la técnica de trilateración. El nuevo sistema se puede utilizar para calcular las distancias utilizadas por el algoritmo de localización, que se compone de varios puntos de acceso VLC ubicados en el techo del túnel subterráneo y dispositivos móviles VLC colocados en los cascos de seguridad de los mineros. El sistema propuesto se evaluó en términos del error de estimación de ubicación y los resultados muestran una opción viable para el seguimiento de personas y objetos en un entorno de minería subterránea, frente a los sistemas que utilizan tecnologías de radiofrecuencia, donde el ruido generado por la maquinaria, la humedad y otros factores, aumentan el factor de atenuación de la señal, un sistema VLC es inmune al ruido antes mencionado, por lo tanto, es capaz de generar una localización más precisa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al “Centro de Investigaciones Multidisciplinarias en procesamiento de señales” proyecto CONICYT/ACT1120, al proyecto USACH/DICYT 061413SG, al Proyecto FONDECYT Iniciación No. 11160517 y también a la Universidad del Azuay por el soporte financiero.

## REFERENCIAS

- [1] Organización Internacional del Trabajo. *Tasas de accidentes laborales*. 2015. URL: <http://www.oit.org/>.
- [2] Warner, F. *Free Frank Warner*. URL: <http://frankwarner.typepad.com/>. 2014
- [3] Safe Work Australia. *WORK-RELATED TRAUMATIC INJURY FATALITIES, AUSTRALIA 2013*. 2014
- [4] Sernageomin. *Accidentes fatales y graves en la minería chilena*. 2015
- [5] Centers for Disease Control and Prevention. *Statistics: All mining*. URL: <http://www.cdc.gov>. 2015.
- [6] Sunderman, C., & Waynert, J. *An Overview of Underground Coal Miner Electronic Tracking System Technologies*. National Institute for Occupational Safety and Health, Office of Mine Safety and Health Research. U.S. Government. 2012.
- [7] Diario TI. *Tecnología: la nueva herramienta de prevención y seguridad en el trabajo*. URL: <http://diarioti.com>. 2014.
- [8] Radacina, S., Hayes, M., & Marshall, J. *LOCALIZATION IN LARGE-SCALE UNDERGROUND ENVIRONMENTS WITH RFID*. 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). pp. 1140-1143. 2014
- [9] James, S., Verrinder, R., Sabatta, D., & Shahdi, A. *Localisation and Mapping in GPS-denied Environments using RFID Tags*. 5th Robotics and Mechatronics Conference of South Africa (ROBOMECH), pp. 1-4. 2012.
- [10] Forster, C., Sabatta, D., Siegwart, R., & Scaramuzza, D. *RFID-Based Hybrid Metric-Topological SLAM for GPS-denied Environments*. IEEE International Conference in Robotics and Automation (ICRA), pp. 5228-5234. 2013
- [11] Yinjing, G., Hong, L., Lizhu, S., & Jin, L. *The precise underground localization method based on WIFI network*. 18th Asia-Pacific Conference Communications (APCC), pp. 664-667. 2012.
- [12] Cypriani, M., Delisle, G., & Hakem, N. *Wi-Fi-based positioning in underground mine tunnels*. International Conference Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1-7. 2013
- [13] Zhigao, L., Chunwen, L., Qingqing, D., & Danchen, W. *A coal mine personnel global positioning system based on wireless sensor networks*. Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 7026-7031. 2010.
- [14] Xuhui, H., Wei, Z., & Dongxin, L. *Underground Miners localization System Based on ZigBee and WebGIS*. 18th International Conference in Geoinformatics, pp. 1-5. 2010.

- [15] Dongxuan, Y., Yan, C., & Kedong, W. *A Coal Mine Environmental Monitor System with Localization Function Based on ZigBee-Compliant Platform*. 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), pp. 1-4. 2011.
- [16] Xiucan, G., & Yantao, L. *Underground Personnel Positioning System Based On ZigBee*. Fourth International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), pp. 298-300. 2011.
- [17] Huping, X., Feng, L., & Yancheng, M. *A ZigBee-based miner Localization System*. 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, pp. 919-924. 2012.
- [18] Hong, Z., & XuHui, L. *A Localization Algorithm for Miners underground of Coal Mines Based on ZigBee Technology*. 7th International Forum in Strategic Technology (IFOST), pp. 1-4. 2012
- [19] Huang, Y., Fan, J., Hui, D., & Sun, Y. *Design of location system for underground personnel based on ZigBee technique*. International Conference on Software Intelligence Technologies and Applications & International Conference on Frontiers of Internet of Things, pp. 292-297. 2014.
- [20] C. W. Chow, Y. Liu, C. H. Yeh, S. J.Y., y L. Y. L., *A Practical In Home Illumination Consideration To Reduce Data Rate Fluctuation in Visible Light Communication*, n.º abril, pp. 17-23, 2015.
- [21] A. T. Hussein y J. M. H. Elmighani, *Mobile Multi-Gigabit Visible Light Communication System in Realistic Indoor Environment*, *J. Light. Technol.*, vol. 33, n.º 15, pp. 3293-3307, 2015.
- [22] M. Uysal, A. Ghassemlooy, Zabih (Fary) Bekkali, A. Kadri, y H. Menouar, *Visible Light Communication for Vehicular Networking*, n.º diciembre, pp. 45-53, 2015.
- [23] D. R. Dhatchayeny, A. Sewaiwar, S. V. Tiwari, y Y. H. Chung, *Experimental Biomedical EEG Signal Transmission Using VLC*, *IEEE Sens. J.*, vol. 15, n.º 10, pp. 5386-5387, 2015.
- [24] M. Yasir, S. Member, S. Ho, y S. Member, *Indoor Position Tracking Using Multiple Optical Receivers*, vol. 34, n.º 4, pp. 1166-1176, 2016.
- [25] W. Wang, Y. Lin, Y. Zhao, G. Zhang, J. Zhang, J. Han, H. Chen, B. Hou, Y. Ji, y L. Zong, *First Demonstration of Virtual Transport Network Services With Multi-layer Protection Schemes over Flexi-grid Optical Networks*, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, n.º 2, pp. 260-263, 2016.
- [26] F. Vergara, *Mina subterránea*. 2012.
- [27] IEEE. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks— Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*. 2011.
- [28] THORLABS. *PDA36A Si Switchable Gain Detector*. 2013.
- [29] CINA. *Technical Datasheet for 70W LED High Bay*. 2014.



**Daniel Esteban Iturralde Piedra**, received the Engineering degree in electronics from University of Azuay in 2011 the M.Sc. degree in electrical engineering from University of Santiago de Chile, in 2013 and the Ph. D. degree in Engineering Sciences, Automatic mention of the University of Santiago de Chile in 2016. He joined the Department of Electronic Engineering of the University of Azuay and University of Cuenca as an Assistant Professor in March 2014. Professor Daniel Iturralde is member and counselor of the Institute of Electrical and Electronic Engineers. His research interests include wireless communication, computer networks, visible light communications, and Zigbee. In his career as a researcher he has published in several recognized conferences.



**Fabián Seguel**, received the Engineering degree and the M.Sc. in Electrical engineering from the University of Santiago de Chile, Chile in 2014. Currently he is a PhD. Student in Engineering Sciences, Automatic mention of the University of Santiago de Chile, and is developing his research in the area of digital signal processing applied to visible light communications. In his career as a researcher he has published in several recognized conferences.



**Ismael Soto**, was born in Punta Arenas, Chile. He received an Engineering degree from the University of Santiago de Chile in 1982, the degree of Master of Engineering University Federico Santa Maria in 1990 and the degree of PhD at the University of Staffordshire, UK. in 1997, respectively. He

has taught in the departments of Computer Science, Industrial Engineering and Electrical Engineering at the University of Santiago of Chile, currently he is professor of telecommunications and signal processing at Electrical Engineering department. He has worked in wireless networking and security. Professor Ismael Soto has been National Director and member of the Institute of Electrical and Electronic Engineers, and member of International Speech Communication Association. His main research interests are information security, signal processing, coding and equalization.



**Cesar A. Azurdia-Meza**, received the B.Sc. degree in electrical engineering from Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala in 2005, and the M.Sc. degree in electrical engineering from Linnaeus University, Sweden in 2009. In 2013 he obtained the Ph.D degree in Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University, Republic of Korea. He joined the Department of Electrical Engineering, Universidad de Chile as an Assistant Professor in August 2013. He has served as Technical Program Committee (TPC) member for multiple conferences, as well as a reviewer in journals such as IEEE Communications Letters, IEEE Transactions on Wireless Communications, Wireless Personal Communications, Telecommunication Systems, and EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. Dr. Azurdia is an IEEE and IEICE Communications Society Member. His research interests include topics such as Nyquist's ISI criterion, OFDM-based systems, SC-FDMA, visible light communication systems, 5G & beyond enabling technologies, and signal processing techniques for communication systems.



**Muhammad Salman Khan**, received the B.S. (Hons), M.S. and the Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Engineering and Technology (UET), Pakistan, in 2007, The George Washington University, Washington, D.C., USA, in 2010, and Loughborough University, England, U.K., in 2013, respectively. Dr. Khan then proceeded to the Center for Multidisciplinary Research on Signal Processing, Department of Electrical Engineering, Universidad de Chile, Santiago, Chile, to pursue his postdoctoral research from 2013 to 2015. He is currently an Assistant Professor with the Department of Electrical Engineering, University of Engineering and Technology, Peshawar, Pakistan. His research interests include signal processing, communications, speech source separation, computational auditory scene analysis, time-frequency masking, dereverberation, human-robot interaction, emotion detection, machine learning, and pattern recognition. He is a member of the IEEE and the IEEE Signal Processing Society.