

Human Real Time Localization System in Underground Mines Using UWB

F. Capraro, M. Segura, and C. Sisterna

Abstract—This work proposes an improved Real Time Localization System using UWB technology, for people and asset tracking in a closed environment, particularly in underground mines. The UWB technology has demonstrated a very good performance with a localization error margin below 41 centimeters. The main objective of this work was to develop an affordable, easy to use, and scalable localization system to detect people in underground mines that allows fast location and rescue in case of disaster. It can also improve the mine productivity under normal conditions. Different tests were carried out in mines and urban buildings to validate the design and evaluate the error margin. The test in an underground mine was done at “Casposo Mining”, which is located in the town of Calingasta, San Juan province, Argentina. Finally, an autonomy of 25 hours of continuous use was achieved using a 2000mAh battery.

Index Terms—UWB localization, Search and Rescue, Productivity, Real Time Localization System, Security.

I. INTRODUCCIÓN

UN objetivo clave de la industria minera es evitar los accidentes de todo tipo, ambientales o de personas, en cada lugar de trabajo a través de la mejora continua, la capacitación intensiva, la introducción de prácticas de trabajo avanzadas y la implementación de nuevas tecnologías. Se han realizado considerables esfuerzos para desarrollar tecnologías relacionadas con la seguridad, como el monitoreo de fatiga mediante el seguimiento de ojos y cabeza [1] y además de nuevos sistemas de capacitación, legislación y reglamentaciones. Sin embargo, los accidentes en las minas aún ocurren.

Según lo expresado en [2], la localización y seguimiento de personas y activos ha sido identificado en la industria minera como una de las tecnologías claves a resolver para mejorar la productividad y la seguridad de la mina. Conocer el patrón de movimiento de las personas y de los equipos permite mejorar la productividad y localizar los operarios en caso de accidente. Por otra parte, el seguimiento de activos permite coordinar la producción y por ende mejorar los procesos productivos de la mina, haciéndola más eficiente. Para las minas a cielo abierto u otras actividades de superficie, el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) es la tecnología de georreferenciación preferida.

Sin embargo, el posicionamiento en el entorno de una mina subterránea no es factible de realizar con GPS y es por ellos que la tecnología Ultra Wide Band (UWB) es una de las tecnologías preferidas gracias a su bajo costo y reducido error.

La localización y seguimiento de personas, maquinarias o activos en minas subterráneas es un problema que aún se encuentra en investigación, ya que los sistemas económicos como los de por medición de potencias recibida (RSSI, del inglés Received Signal Strength Indicator) no son efectivos en dichos ambientes [3]. La localización de personas es de suma importancia ya que se pone en riesgo la vida de las mismas ante un posible derrumbe. Las técnicas de localización tradicionales se basan en procedimientos de informe manual de la ubicación del minero usando radio de dos vías (del inglés walky-talky). Sin embargo, la precisión está limitada al conocimiento del nivel, nombre de la galería, segmento o número de sección donde se encuentra el minero. Otras técnicas de infraestructuras inalámbricas, tales como RFID o IEEE802.11, son utilizadas pero la precisión depende de la implementación de lectores RFID (del inglés Radio Frequency Identification) o puntos de acceso inalámbrico y por ende son sistemas menos escalables.

Se ha demostrado que las técnicas utilizadas ampliamente para el posicionamiento en interiores, como la triangulación y la trilateración basadas en RF, son extremadamente difíciles de desplegar bajo tierra [4]. La trilateración es una técnica que utiliza medidas de rango, mientras que la triangulación usa mediciones de ángulos para estimar la posición de los mineros o dispositivos [5] [6]. Los ambientes de minas subterráneas generalmente consisten en túneles largos y angostos, típicamente se extienden por grandes distancias manteniendo el ancho y alto constante en torno a los 5 metros. El uso de sistemas de triangulación / trilateración basados en RF tienen diversos problemas, pero en particular la precisión del posicionamiento es muy pobre como se indica en [7], con errores en el rango de 1 o 2 metros. Esto se debe a que las señales sin línea de vista (del inglés Non Line of Sight) y multitrayecto son muy comunes bajo tierra por la propia naturaleza de los túneles angostos, por lo cual estas técnicas raramente encuentran aplicación en minas subterráneas.

Otros sistemas de localización utilizan la Unidad de Medición Inercial (IMU), la cual consiste de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros. Los sistemas que usan IMU se han implementado en entornos donde el GNSS tiene bajas prestaciones. Sin embargo, el error acumulado hace que la precisión de la posición derivada de IMU sea inaceptable y, por lo tanto, se requiere periódicamente la reinicialización del sensor de IMU [8]. En el caso de los sistemas microelectromecánicos de bajo costo (MEMS), los intervalos entre la reinicialización son muy cortos, del orden de segundos

Este trabajo fue financiado por Secretaria de Ciencia, Tecnología e Innovación, Universidad Nacional de San Juan and Casposo Argentina LTD. Franco Capraro, San Juan, Argentina (francocapraro00@gmail.com) Marcelo Segura, San Juan, Argentina (msegura@unsj.edu.ar). Cristian Sisterna, San Juan, Argentina (csisterna@unsj.edu.ar).

a decenas de segundos, lo que significa que se requiere una gran cantidad de puntos de referencia o estaciones bases con coordenadas conocidas.

La tecnología Ultra Wide Band (UWB) proporciona una estimación bastante precisa, esta capacidad se debe fundamentalmente a la buena resolución temporal inherente a las señales UWB y su robustez frente a desvanecimientos por múltiples trayectos. Según lo expresado en [9], UWB es la tecnología elegida en este trabajo para localización de activos en entornos cerrados. En este trabajo se propone el uso de un módulo comercial UWB de bajo costo y componentes COTS que permiten extender el rango de cobertura y así disminuir los costos de implementación del sistema de localización.

El presente trabajo toma como punto de partida un sistema RTLS con tecnología UWB e incorpora tecnología Wi-Fi para la disminución de costos y aumento de la escalabilidad que se necesita para la Industria Minera y otros entornos cerrados como control de almacenes, depósitos, hospitales, entre otros.

II. METODOLOGÍA

La metodología general es la propia de las ciencias experimentales: 1) Comprensión del problema en el contexto de aplicación especificada; 2) Planteamiento de solución y verificación de las mismas; 3) Modelado y simulación para validación y evaluación de las propuestas de solución; 4) Experimentación de los sistemas desarrollados en escala de laboratorio y campo utilizando dispositivos a nivel prototipo y reales.

Para realizar la comprensión del problema que se pretende solucionar, en la Sección III se evalúan las diferentes técnicas actuales de localización y su problemática. En la Sección IV se propone la solución al problema propuesto, se realiza la programación necesaria para la validación y se detalla la implementación del prototipo desarrollado. En la Sección V, se demuestra mediante experimentos de laboratorio y de campo la funcionalidad del sistema RTLS propuesto. Finalmente, en la Sección VI se elaboran las conclusiones del trabajo.

III. TECNOLOGÍA DE LOCALIZACIÓN

A. Tecnología UWB

Los sistemas UWB usan pulsos sin portadora, de corta duración y con un ciclo de trabajo muy bajo (inferior al 0.5%) para la transmisión y recepción de información. Este corto ciclo de trabajo ofrece una potencia media de transmisión muy pequeña en sistemas de comunicación UWB. Sin embargo, el pico o potencia instantánea de los pulsos UWB pueden ser relativamente grande. Los transceptores UWB requieren de baja potencia de transmisión debido a este control sobre el ciclo de trabajo, lo cual se traduce en una vida más larga para las baterías en dispositivos portátiles. Dado que la frecuencia es inversamente proporcional al tiempo, la corta duración de los pulsos extiende su energía a lo largo de un amplio rango de frecuencias con muy bajo nivel de densidad espectral de potencia como se observa en la Fig. 1.

Según lo expresado en [10], el desvanecimiento por múltiples trayectos es un problema inevitable en canales de comunicación inalámbricos. Como se observa en la Fig. 2, la línea directa entre transmisor y receptor se conoce como Línea de Vista

(Line of Sight, LOS), mientras que las señales provenientes de reflexiones sobre otras superficies se conocen como Sin Línea de Vista (Non Line of Sight, NLOS). Los escenarios NLOS pueden causar un bloqueo completo de la recepción de la señal. Dado que la duración de la transmisión es inferior al nanosegundo el pulso reflejado tiene una probabilidad extremadamente pequeña de colisionar con el pulso LOS y causar degradación.

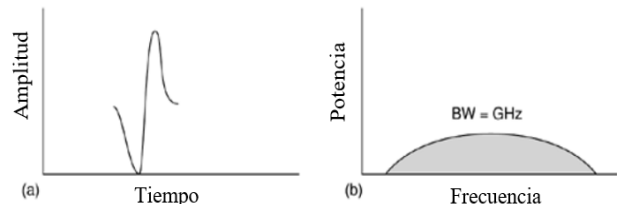


Fig. 1. Señal del pulso UWB- A dominio temporal, B dominio frecuencial

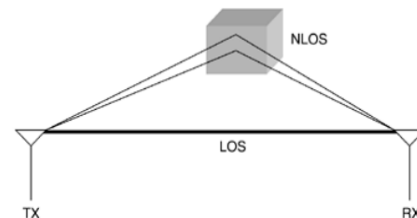


Fig. 2. Transmisión por Múltiples Trayectos.

B. Estimación de Distancia por Tiempo de Arribo

Según lo expresado en [11], la estimación por tiempo de arribo (Time of Arrival, TOA) mediante comunicación UWB es actualmente la técnica más popular para la geolocalización precisa en interiores.

El TOA es el tiempo que demora una señal de radio en viajar desde un transmisor a un receptor remoto. Una vez que se conoce este tiempo con precisión, se puede determinar la distancia entre ambos con el uso de distintas técnicas de medición como Medición de tiempo Bidireccional (del inglés Two Way Ranging, TWR) y Medición de tiempo Unidireccional (del inglés One Way Ranging, OWR) [12] y la velocidad de propagación de las ondas de radio en el aire.

Para implementar un sistema de localización en tiempo real completo, se debe medir la distancia entre el objeto usando un Tag (nodo móvil) y un número de Anclas (nodos fijos) en ubicaciones conocidas. En la Fig. 3 podemos ver que la Ancla P1 calcula la distancia entre sí y el Tag B como r_1 . Esto ubica al Tag en un círculo de radio r_1 desde P1. De manera similar, P2 calcula la distancia como r_2 colocando el Tag B en un círculo de radio r_2 desde P2 y finalmente P3 calcula la distancia como r_3 colocando el Tag en un círculo de radio r_3 desde P3. El cálculo del punto de intersección entre estos tres círculos (trilateración) da la posición del Tag B. Si la ubicación absoluta de las Anclas se conoce en el espacio 2D o 3D, también se conoce la ubicación absoluta del objeto etiquetado.

IV. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA RTLS

A. Sistema de Localización en Tiempo Real

Los Sistemas de Localización en Tiempo Real (Real-time location system, RTLS) son sistemas que identifican y rastrean

automáticamente la localización de objetos o personas en tiempo real, usualmente dentro de un edificio u otra área cerrada.

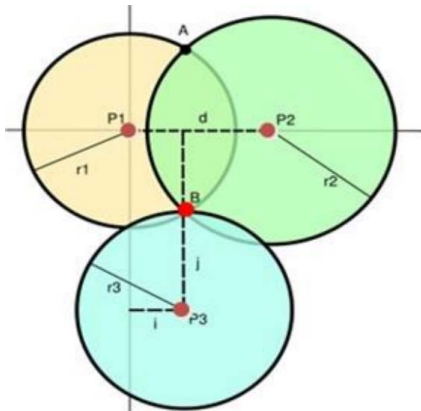


Fig. 3. Diagrama de estimación de posición por tiempo de llegada.

Actualmente existen en el mercado kits de desarrollo en los cuales se hace uso de la tecnología UWB e implementan un sistema RTLS. Sin embargo, son de código cerrado y por lo tanto no se tiene acceso al código fuente (del inglés closed-source software) evitando la modificación de las funcionalidades más importantes del sistema, incluyendo limitaciones en el rango de cobertura que trabajan los dispositivos. La mayoría de las empresas plantean una “solución” mediante el uso de mayor cantidad de dispositivos de su marca, resultando en un aumento innecesario del costo.

El sistema RTLS implementado en este trabajo está formado por un conjunto TAG (dispositivos móviles), ANCLAS (dispositivos fijos de posición conocida) y GATEWAYS (dispositivo recolector de información).

Para el cálculo de la posición se utiliza el firmware desarrollado por Decawave [13], denominado PANS (del inglés Positioning and Networking Stack). Para la implementación del sistema se definen 3 componentes:

- Gateway: consta de un módulo DWM1001-dev y una Raspberry Pi 3B+, Fig. 4. Este Gateway conecta las Anclas con la red externa e implementa un Servidor o MQTT Broker, el cual recibe la posición de cada Tag mediante señales UWB.



Fig. 4. Gateway conformado por DWM1001-dev y Raspberry Pi 3B+.

- Ancla: consta de un módulo DWM1001-dev ubicado en una posición fija y conocida.
- Tag: consta de un módulo DWM1001-dev y un WeMos D1, Fig. 6, mini de la empresa WeMos [14], que estarán en posiciones desconocidas y en constante variación.



Fig. 5. Módulo DWM1001-dev de Decawave.

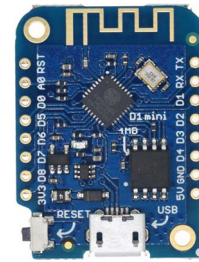


Fig. 6. WeMos D1 mini.

A continuación, en la tabla 1 se muestra el consumo energético y alimentación necesaria para los distintos dispositivos usados:

TABLA 1
CONSUMO Y ALIMENTACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Dispositivo	Consumo		Alimentación
	Promedio	Reposo	
Raspberry Pi 3B+	1.34A	0.30A	5v
DWM1001-dev	17mA	12uA	3.6v – 5.5v
WeMos D1 mini	73mA	163uA	5v

B. Medición de Tiempo Bidireccional

Existen distintas metodologías para la estima de la distancia entre Ancla y Tag, una de las más simples que no requieren sincronismo entre las Anclas es la mediación de dos vías (Two Way Ranging, TWR). Este método determina el tiempo de vuelo de la señal de UWB desde la Ancla, ida y vuelta, hasta el Tag y luego calcula la distancia multiplicando el tiempo por la velocidad de la luz. El proceso se aplica entre las Anclas y los Tag, por lo tanto, solo un Ancla puede participar en un intervalo de tiempo determinado.

Este esquema se muestra en la Fig. 7. En ese escenario, el Dispositivo A estima su distancia desde el Dispositivo B midiendo el tiempo de vuelo de la señal (ToF). Para ello se envía una señal al dispositivo B y se recibe una respuesta. El dispositivo A será capaz de calcular el tiempo de propagación utilizando la siguiente fórmula:

$$T_{prop} = \frac{T_{round-Treply}}{2} \quad (1)$$

El Dispositivo B deberá comunicar su tiempo de respuesta T_{reply} al dispositivo A, pero se sugiere que esto se pueda hacer en un marco posterior.

Según lo expresado en [15], este esquema simplifica el cálculo de las estimaciones de TOA en comparación con un rango bidireccional de dos lados (DS-TWR), ya que los dispositivos necesitan intercambiar solo dos mensajes en lugar

de tres. A primera vista, esto puede no parecer tanto, pero reduce el tiempo de transmisión general necesario, lo que ahorra la vida útil de la batería y aumenta la capacidad del canal de radio al mismo tiempo.

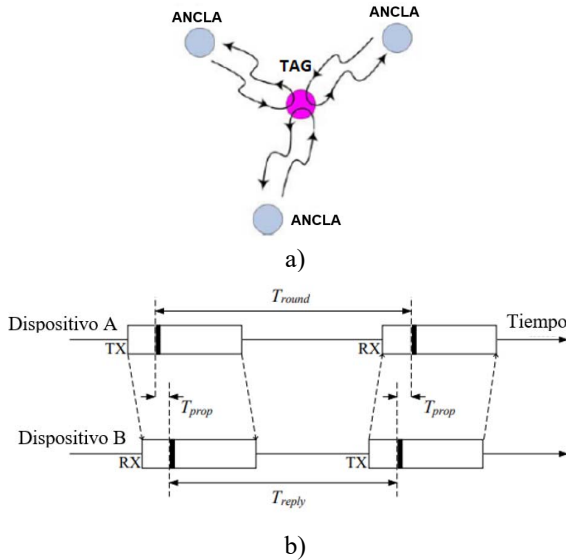


Fig. 7. Single-Sided Two-Way Ranging (SS-TWR). a) análisis gráfico, b) análisis temporal.

C. PANS Firmware

El firmware utiliza el control de acceso al medio denominado acceso múltiple por división de tiempo (Time Division Multiple Access, TDMA). Las Anclas operan utilizando una estructura repetitiva de "supertrama" de 100 ms de duración [16]. Esta estructura se muestra en la Fig. 8. El Ancla iniciador controla la sincronización y la supertrama consta de 30 ranuras de mensajes Beacons (BCN), en las cuales las Anclas envían mensajes BCN, el cual contienen información sobre la posición de los mismos y el uso de las ranuras de red (es decir, qué ranuras TWR están siendo utilizadas actualmente por los nodos). A esto le siguen dos ranuras de Servicio (SVC) que se usan para el mensaje Almanac, el cual proporcionan información sobre la versión del firmware del nodo y algunos mensajes especiales. Cada supertrama solo puede llevar un único mensaje Almanac, por lo que cada una de las 30 Anclas del grupo toma su turno para enviar su mensaje una vez.

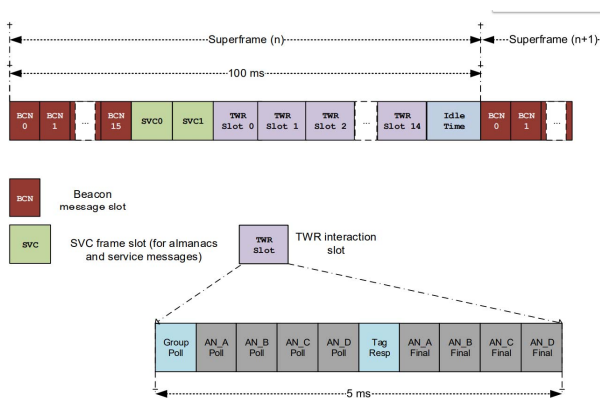


Fig. 8. Mensaje supertrama del sistema RTLS.

Hay un tiempo de protección / inactividad al final de la supertrama que completa la supertrama.

Los nodos Tags se encuentran en modo reposo y despiertan periódicamente para escuchar la supertrama. Al despertarse los tags recompilan la información de la posición de las Anclas y calcula la distancia en función de su posición actual.

El sistema RTLS utiliza un esquema TWR, en el que el Tag calcula su propia ubicación con respecto a las posiciones de las Anclas. Los Tags escucharán inicialmente los mensajes Beacon y Almanac y aprenderán sobre la topología de la red, y luego seleccionarán las Anclas con los que se alinearán. Necesita un mínimo de tres Anclas para calcular una ubicación. Luego, la posición del Tag se envía a través de las ranuras de datos de enlace ascendentes al Servidor.

El Servidor está montado sobre un Gateway maestro, el cual recopila la información de la red UWB y permite la configuración y monitorización del RTLS mediante una interfaz gráfica. Para poder recopilar la información, los nodos deben estar dentro del rango UWB, por lo cual deben de utilizarse Gateways esclavos el cual envían la información de los nodos dentro de su rango UWB. Esto resulta en el uso de la misma cantidad de Gateways (un Gateway maestro y varios Gateways esclavos) que Anclas para poder recopilar la información de toda la red.

Esta es la principal limitación de escalabilidad que presenta el firmware provisto por la empresa, ya que no resulta posible que un Gateway actúe como Ancla a la vez, es decir que interactúe en la supertrama. Es por ello que nuestra contribución radica en el envío de la localización de cada Tag mediante el uso de un módulo Wi-Fi, el cual puede realizar un envío directo o post al Servidor (Gateway maestro) sin necesidad de utilizar ningún Gateway esclavo de por medio. Esto resulta en una independización de los Gateways esclavos mediante una tecnología barata, resultando únicamente un Gateway maestro en el cual montará el servidor.

Se utilizó un módulo WeMos D1 mini basada en el SoC (system on a chip) ESP8266 para realizar el envío de datos Wi-Fi. Junto con ello se añadió de un módulo cargador/regulador de batería de litio TP4056 y una batería de 2000mah. Los módulos fueron montados en cada Tag. En la Fig. 9 puede observarse el resultado del nuevo Tag a utilizar.

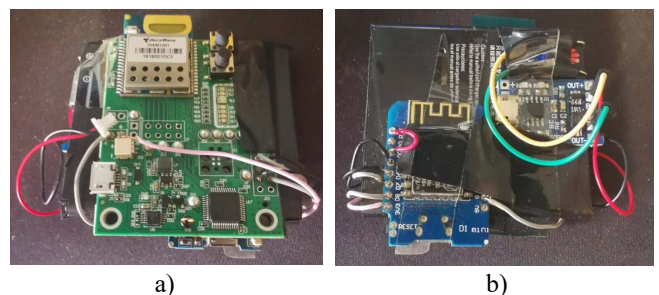


Fig. 9. Módulo Tag modificado. a) Cara Frontal y b) Cara Posterior.

D. Comunicación en el Tag

Para comunicar el módulo DWM1001-dev y el WeMos D1 mini se utiliza el protocolo de comunicación SPI. Es necesario utilizar una codificación especial llamada TLV (Type-Length-Value) para la transmisión de datos, la cual es propia del fabricante del firmware PANS. Mediante esta comunicación se

adquieren la posición y el id del Tag, luego se procesan para formar los mensajes que serán enviados al servidor en formato JSON. Una vez creados los mensajes, se enviarán al Servidor tres publicaciones con dichos mensajes: la configuración del tag (config), el estado del tag (status) y la posición junto con el id del tag ("location") mediante comunicación Wi-Fi usando el protocolo MQTT. En la Tabla 2 se puede observar un ejemplo de envío.

TABLA II
MENSAJES A PUBLICAR EN EL SERVIDOR

Topic	Mensaje
/uplink/status	{"present":true} {"configuration":{"label":"DW819","nodeType":"TAG","ble":true,"leds":true,"uwbFirmwareUpdate":false,"tag":{"stationaryDetection":true,"responsive":true,"locationEngine":true,"nomUpdateRate":500,"staUpdateRate":500}}}
/uplink/config	{"position":{"x":4.0644865,"y":2.3056207,"z":0.48466945,"quality":98},"superFrameNumber":731}

El mensaje con tópic "uplink/status" es usado para comprobar el estado del nodo. El mensaje con tópic "uplink/config" establece la configuración del nodo respecto al nodo ID, tipo de nodo, uso de bluetooth, leds, actualización vía inalámbrica, detección estacionaria, cálculo de la localización y velocidad de refresco. El mensaje con tópic "uplink/location" indica el cálculo de la posición junto con la calidad de la medición.

El funcionamiento del WeMos D1 mini puede observarse en la Fig. 10.



Fig. 10. Esquema de funcionamiento del WeMos D1 mini.

V. EXPERIMENTACIÓN

Para poder realizar el testeo del sistema desarrollado es necesario ubicar al menos tres Anclas en posiciones conocidas (se recomienda el uso de cuatro Anclas para control de error), y seleccionar uno de ellos como Ancla iniciador, el cual será el que inicie la supertrama y además representará el origen de

coordenadas ($x = 0$, $y = 0$) en dos dimensiones. La ubicación dependerá de las condiciones de LOS entre las Anclas y del área de recorrido en el cual estarán los objetos. Según nuestras mediciones de laboratorio tiene como limitación 30 metros de distancia máxima de transmisión entre Tag/Ancla en LOS y en condiciones de NLOS 10 a 15 metros, sin embargo, dependerá en gran medida del caso en particular.

Una vez ubicados las Anclas, se debe medir la distancia del Ancla iniciador hacia las demás Anclas, debido a que es necesario conocer la distancia entre las Anclas para calcular por trilateración la posición del Tag. La precisión con la que se mida dichas distancias afectará a la estimación de la posición de los objetos, por lo cual es recomendado el uso de medidores de distancia laser o utilización de los planos.

Conocidas todas las distancias, se le asignará dichos valores a las Anclas mediante la interfaz gráfica del servidor, vía Bluetooth o UART. Además, es necesario asignar la tasa de refresco de la posición del Tag, siendo en el caso de la minería de un minuto, ya que no es necesario conocer la posición del operario con mayor frecuencia.

Es de gran utilidad, pero no indispensable realizar un plano ilustrativo del área de trabajo simple ya que esto podrá ser mostrado en la interfaz gráfica y hará más intuitivo la visualización de los objetos. En la Fig. 11 puede observarse un plano ilustrativo de una zona en la Facultad de Ingeniería (UNSJ, San Juan, Argentina) como ejemplo a utilizar en la siguiente sección. En dicho plano se muestra la ubicación de los nodos y el eje de coordenadas asignado en la interfaz gráfica.

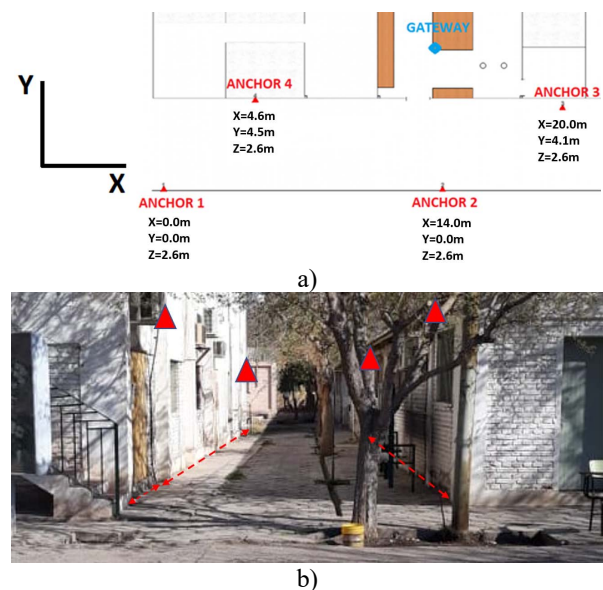


Fig.11. Visualización de área de trabajo y ubicación de Anclas. a) Plano, y b) Área de trabajo.

A. Mediciones en Edificio

Para comprender la ventaja introducida al hacer uso del envío de posición mediante Wi-Fi se realizaron pruebas en un área de 45 metros de largo por 12 metros de ancho utilizando 4 Anclas y 1 Tag. El Ancla 1 representa el origen en el plano de dos dimensiones, es decir $x=0$ e $y=0$.

Por otra parte, el único Gateway utilizado, en el cual se montará el Servidor, fue ubicado dentro del edificio ($x=13.5$ m,

y=6.5 m) debido a que debe ser conectado a la red eléctrica. Para la prueba se realizó el envío al servidor por UWB (DW719) y Wi-Fi (WW719) en forma simultánea. En ambos casos el Gateway debe estar dentro del área de cobertura de Wi-Fi para subir la información al Servidor y el Tag dentro del rango UWB de al menos 3 Anclas para obtener su posición.

En la Fig. 12 puede observarse que el envío por UWB posee un rango muy limitado. Mediante el cálculo de la hipotenusa representado como h_1 , el Tag al estar a 9,93 metros de separación del Gateway su conexión se pierde (esto puede observarse en la Fig 12 con en el sombreado rojo claro sobre la tabla). El Tag está fuera del rango UWB del Gateway pero aun dentro del rango UWB de las Anclas (su posición puede ser aun calculada pero no enviada al Servidor por UWB). Sin embargo, el envío por Wi-Fi continúa recibándose en el Gateway a través del envío directo al Servidor montado en el mismo.

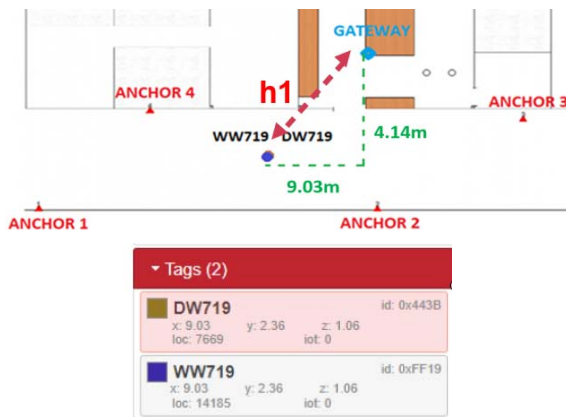


Fig. 12. Mensaje recibido por UWB (DW719) y Wi-Fi (WW719).

En la Fig. 13 puede observarse que, al continuar el movimiento del Tag, el envío de la posición por Wi-Fi continúa ya que no depende del rango UWB del Gateway sino del rango UWB de 3 Anclas, independientemente de la posición del Gateway. Por último, la distancia de separación del Tag al Gateway, representado por h_2 , es de 28 m. Sin embargo, la distancia al Ancla 2 (27.24 m) es quien limitará el cálculo de la posición, resultando en un envío por Wi-Fi correcto, pero con dificultades para calcular la posición debido a estar levemente obstruido por la estructura y a una distancia considerable.

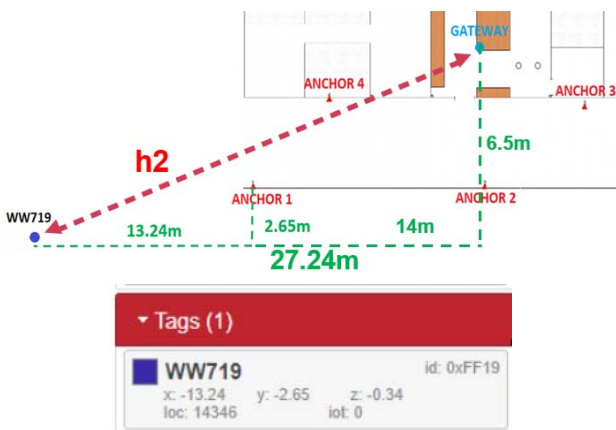


Fig. 13. Mensaje recibido por Wi-Fi.

B. Mediciones en Mina Subterránea

Con el fin de contrastar las mediciones de laboratorio con las del ambiente real de trabajo, se realizaron pruebas en la mina subterránea Casposo, ubicada en Calingasta, San Juan, Argentina. En la Figura 14 la entrada al túnel. Dicha mina cuenta con Wi-Fi a lo largo de toda su veta. Por normas de la empresa no es posible conocer la extensión del túnel.



Fig. 14. Túnel de entrada a la mina subterránea Casposo.

Por seguridad y normas de la mina las mediciones se hicieron al comienzo del túnel en un área reducida. Se ubicaron las Anclas en posiciones conocidas abarcando en este caso un área de 38 metros por 5.8 metros. En la Fig. 15 se observa sus posiciones.

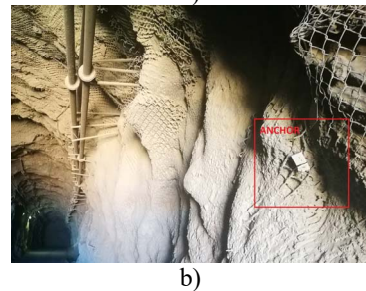
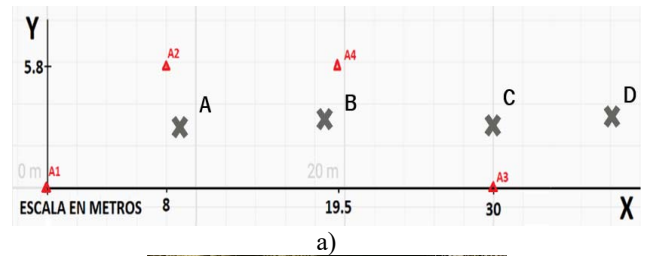


Fig. 15. Anclas en el túnel. a) Ubicación en el Túnel, y b) Disposición física de Anclas en el Túnel.

Para comprobar la precisión con la que se estima la posición se dispuso de cuatro puntos conocidos y una persona (objeto a detectar) debía pasar por dichos puntos. La colocación del nodo Tag en la persona se realizó en el casco de seguridad como se observa en la Fig. 16.



Fig. 16. Nodo Tag colocado en el casco de seguridad.

En la Tabla 3 pueden observarse las posiciones reales.

TABLA III
POSICIONES REALES DE LOS PUNTOS DE PRUEBA SELECCIONADOS

Posiciones Reales (metros)				
	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
X	10	19.4	30	38
Y	2.6	3	2.7	2.8

En la Fig.17 se observa los resultados obtenidos con el sistema RTLS.

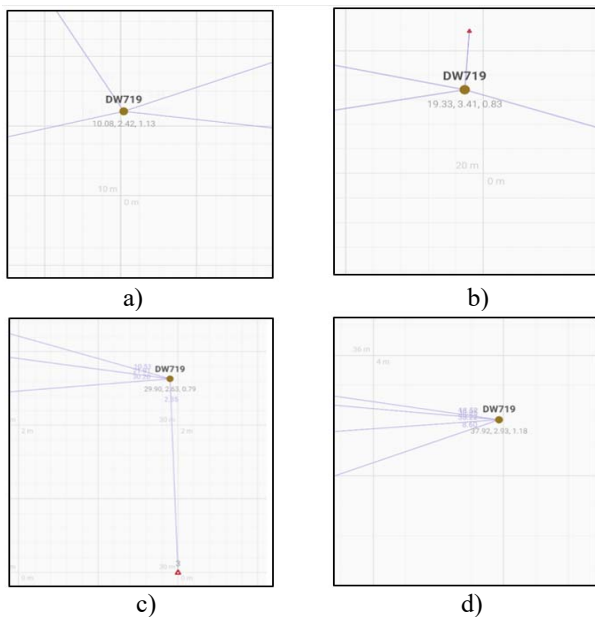


Fig. 17. Estimación de posición. A) Punto A, b) Punto B, c) Punto C, d) Punto D.

En la Tabla 4 puede observarse los resultados y los errores obtenidos en cada punto. Si se visualiza la distribución normal de los errores representado en la Fig. 18, donde su media se da en 0.14 metros (14cm), el cual es una estimación suficiente para la aplicación minera.

TABLA IV
RESULTADOS ESTIMADOS Y ERRORES OBTENIDOS CON EL SISTEMA RTLS

Posiciones Estimadas (metros)				
	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
X	10.08	19.33	29.9	37.92
Y	2.42	3.41	2.63	2.93
Error (metros)				
X	0.08	0.07	0.1	0.08
Y	0.18	0.41	0.07	0.13

VI. CONCLUSIÓN

Los resultados deben analizarse bajo 4 puntos de vista: la precisión con la cual se estima la posición, la escalabilidad, la duración de uso de los Tags y los costos.

La precisión que se obtiene de la estimación de la posición con una media de 14 centímetros y una desviación estándar de 11 centímetros en las mediciones hacen al sistema RTLS apto para su uso en minas subterráneas.

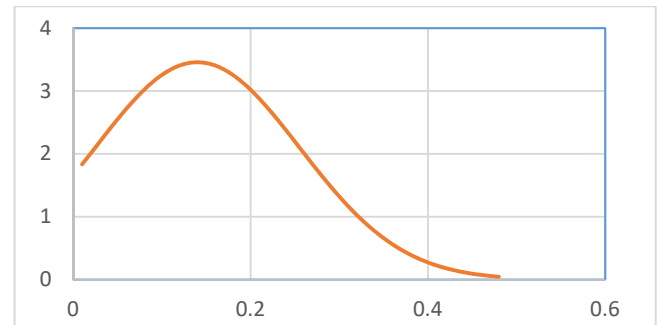


Fig. 18 Grafico de Distribución Normal.

La escalabilidad resulta más fácil debido a la disminución de dispositivos a ubicar en las distintas posiciones necesarias, reduciendo sustancialmente el uso de Raspberrys y DWM1001-dev y todo lo que conlleva el uso de los mismos (micro SD, conexión a la red eléctrica, etc), junto con la independencia de la ubicación del único Gateway necesario donde solo se montara el Servidor.

La duración del Tag con la batería usada consigue una autonomía de 25 horas a una tasa de refresco de 1 minuto siendo este una duración suficiente para el uso en el entorno minero. Una jornada de trabajo completa consta de 8 a 12 horas diarias resultando suficiente para la jornada, además en caso de emergencia siempre se tendrá la última posición del minero.

Por último, como ventaja más importante introducida, es la disminución sustancial de los costos. Si lo escalamos a una gran parte del túnel en la mina subterránea Casposo, usando una longitud de 5 kilómetros y 100 objetos, realizando una distribución correcta de las Anclas en la mina y teniendo en cuenta ciertas zonas en las que hay bifurcaciones las cuales necesitará de mayor cantidad de Anclas (se necesitarían un total de 369 Anclas). Se estima que el valor es de USD 53.164 originalmente (nodo original), mientras que con las mejoras incorporadas al Tag se estima un total de USD 19.888. Esto da un aproximado de 62% de disminución de costos, sin embargo, esto variará según la longitud que se debe abarcar y la cantidad de operarios y/o activos. A continuación, se explica el cálculo realizado.

Valor del Ancla(DWM1001DEV) = 40 dolares

Valor del Gateway(Anchor + Raspberry) = 92 dolares

Valor del Tag Original(DWM1001DEV + Bateria)
= 45 dolares

Valor del Tag Mejorado(DWM1001DEV + Bateria
+ WeMos D1 mini) = 50.5 dolares

Costo Version Mejorada

*= (Cant. de Anclas * Valor del Ancla)*
+ (Valor Gateway) + (Cant. de Tags
** Valor del Tag Mejorado)*

Costo Version Original

*= (Cant. de Anclas * Valor del Ancla)*
*+ (Cant. de Gateways * Valor Gateway)*
*+ (Cant. de Tags * Valor del Tag Original)*

Costo Version Mejorada = 19.888 dolares
Costo Version Original = 53.164 dolares

El inconveniente que surge de introducir Wi-Fi a los nodos Tags resulta en un aumento de consumo debido al módulo Wi-Fi, la mayor parte del tiempo se encuentra en modo reposo el cual tiene un consumo de 163uA, pero en funcionamiento consume una corriente promedio de 73mA, pudiendo generarse picos de corriente de hasta 140mA al realizar el post al Servidor. La duración dependerá de la tasa de refresco de la posición a utilizar y la capacidad de la batería a usar en el Tag, pudiendo usar baterías de mayor capacidad.

REFERENCIAS

- [1] Seeing Machine, DSS(Driver Safety System), <https://www.seeingmachines.com/industry-applications/>
- [2] Peterson, D., LaTourrette T. & Bartis, J.T. "New Forces at Work in Mining: Industry Views of Critical Technologies", Rand Corp, ISBN 0-8330-2967-3. (2001).
- [3] G.-Z. Qiao, J.-C. Zeng, "Localization algorithm of beacon nodes chain deployment based on coal mine underground wireless sensor networks," Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society, 35(7), pp. 1229-1233, (2010).
- [4] Rusu, S.R., Hayes, M. & Marshall, J. "Localization in Large-scale Underground Environments with RFID", in Electrical and Computer Engineering (CCECE), 24th Canadian Conference on, 8-11 May, Niagara Falls, Canada, 001140-001143. (2011).
- [5] Cyganski, D. etc. "WPI Precision Personnel Locator System", ION NTM, 22-24 January, San Diego, US, (2007)
- [6] Rizos, C., Roberts, G.W., Barnes, J. & Gambale, N. "Experimental Results of Locata: A High Accuracy Indoor Positioning System", International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 18-21 September, Zürich, Switzerland, 1-7, (2010).
- [7] Li, B., Dempster, A.G. & Wang, J. "3D DOPs for Positioning Applications Using Range Measurements", Wireless Sensor Network, 3(10), 334-340, (2011).
- [8] Tanenhaus, T., Carhoun, D., Geis, T., Wan, E. & Holland, A., "Miniature IMU/INS with Optimally Fused Low Drift MEMS Gyro and Accelerometers for Applications in GPS-denied Environments", PLANS 2012 IEEE/ION, 23-26 April, Myrtle Beach, US, 259-264. (2012).
- [9] PFC of Luis Diaz and Ambrona Tabernilla, "Sistema de Localización en Interiores", Facultad de Informatica, Universidad Politecnica de Madrid, España.
- [10] PhD of Mario Casas Gonzalez, "Localización Precisa de Objetos Indoor mediante señales UWB y técnicas TOA", Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, España.
- [11] Alavi, Bardia, and Kaveh Pahlavan. "Modeling of the TOA-based distance measurement error using UWB indoor radio measurements." IEEE communications letters 10.4 (2006): 275-277.
- [12] PFC of Eva Lagunas Targarona, "Estimación conjunta de TOA y DOA en sistemas UWB para localización", Barcelona, Junio (2009).
- [1.] DWM1001-dev, decawave, <https://www.decawave.com/product/dwm1001-development-board/>
- [14] ESP8266, Lolin WeMos D1 mini, https://wiki.wemos.cc/products:d1:d1_mini
- [15] Petr Sedlacek, Martin Slanina, and Pavel Mase K. "An Overview of the IEEE 802.15.4z Standard and its Comparison to the Existing UWB Standards", 29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), At Pardubice, Czech Republic (2019).
- [16] DWM1001 System Overview And Performance https://www.decawave.com/sites/default/files/dwm1001_system_overview.pdf



Franco Capraro, is a student of Electronic Engineer in Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional de San Juan, Argentina. He worked with Artificial Neural Network in FPGA's at Universidad Autonoma de Madrid, Madrid, Spain. He obtained a 2nd place at Simposio Argentino de Sistemas Embebidos 2018 (SASE), Cordoba, Argentina with a "Craft beer production automation" project.



Marcelo Segura, receives his B.S. degree in electronic engineering from National University of San Juan (UNSJ), Argentina in 2005. In 2008, he joins the Department of Electronics Engineering at UNSJ, where he is currently a Professor of Advance Telecommunication Systems. In 2009 he got a Fulbright Scholarship at University of Southern California (USC), where he completed his thesis work. In 2010 he received his Ph.D Diploma UNSJ. In 2012 he joined Ming Hsieh Institute at USC as Associated Research. In 2015 he started his actual position as Project Manager of China Argentina Radio Telescope (CART). He currently research focus includes: ultra-wide band communications and localization (UWB), Software Defined Radio (SDR) for Radio Astronomy, Wireless Sensor Networks (WSN), Internet of Things (IoT), embedded systems and digital signal processing on FPGA.



Cristian Sisterna, is a Professor/Researcher at UNSJ. He obtained his Bachelor Degree from Universidad Nacional de San Juan, Argentina, and his Master of Technology degree at Arizona State University, USA. He taught VHDL/FPGA at Arizona State University and he is currently teaching it at National University of San Juan and at National University of San Luis. He has been invited to lecture in different VHDL-FPGA courses organized by the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy. He is an active collaborator of the Polytechnical Campus at Arizona State University. On the other hand, he has working experience with VHDL-FPGA at companies such as Intel Corporation (project lead), Marvell Technology, Philips Semiconductor and Lattice Semiconductor.