

Uso de Bluetooth de Baja Energía en Aplicaciones de Localización Indoor

Daniel Barba¹, Ana Moretón-Fernández², Héctor del Campo-Pando³, Sergio García-Villanueva⁴, Juan March⁵ y Diego R. Llanos⁶

Resumen— La localización de activos en el interior de edificios es un problema con aplicaciones en diferentes campos y actividades, como la sanidad, prevención de riesgos laborales o diferentes actividades comerciales. En estos lugares, donde la localización mediante GPS no está disponible, es necesario ofrecer una nueva solución que permita resolver el problema ofreciendo una precisión adecuada y manteniendo la viabilidad económica del proyecto. En este paper presentamos Xtremeloc, un sistema de posicionamiento indoor basado en tecnología Bluetooth de Baja Energía. Además, compararemos nuestra propuesta con las diferentes alternativas disponibles, describiendo sus ventajas e inconvenientes.

Palabras clave— Indoor Positioning, localización, Bluetooth, BLE

I. INTRODUCCIÓN

La Localización Indoor es una técnica aún en desarrollo para el posicionamiento de objetos y personas en el interior de un edificio. En estas circunstancias el uso de GPS no es viable bien por una baja cobertura que limita a la obtención de conexión tras 15-30 minutos de funcionamiento, o bien por una precisión con un margen de error en el rango de las decenas de metros, se hace necesario encontrar una alternativa de bajo coste y con la precisión requerida.

Frente al *Global Positioning System* (GPS), aparece el concepto de *Local Positioning System* (LPS) [1]. Estos sistemas, al contrario que el GPS y similares, no ofrecen cobertura global sino que abarcan una zona relativamente pequeña, delimitada por el alcance de las balizas detectoras. Estas balizas se ubican en posiciones que son conocidas de antemano y, mediante el uso de distintos algoritmos, permiten ubicar un objeto o persona en su sistema de coordenadas local. En concreto, un subtipo de LPS es el denominado *Real-time Locating System* o RTLS. Estos sistemas añaden a la identificación la posibilidad de ubicar en un instante dado su posición en una zona delimitada.

Durante los últimos años se han propuesto técnicas basadas en diferentes tecnologías inalámbricas, como Infrarrojos, Ultrasonidos, WIFI, RFID, Bluetooth, etc. Recientemente están surgiendo algunas nuevas, como el uso de la tecnología Ultra-Wideband

(UWB). No obstante, aún no se ha conseguido un sistema de tiempo real con una adecuada respuesta a los movimientos y una precisión aceptable, así como con un coste suficientemente bajo para animar a su despliegue comercial.

Nuestro trabajo ha consistido en el desarrollo de una solución que hemos llamado Xtremeloc. Esta solución se basa en el uso de tecnología Bluetooth de Baja Energía (BLE), permitiendo localizar en el plano de un edificio dispositivos BLE emisores gracias al despliegue de un número de dispositivos receptores llamados RDHubs. En este paper, además de explorar las diferentes tecnologías disponibles, explicamos la arquitectura de Xtremeloc, describiendo los diferentes dispositivos implicados. Comentamos los diferentes problemas relacionados con la gran variabilidad en la intensidad de la señal Bluetooth, y mostramos los resultados obtenidos al aplicar un algoritmo de filtrado, desarrollado en colaboración con RDNest SL.

XtremeLoc es un sistema de localización indoor en tiempo real (RTLS) de bajo coste. En el momento de la escritura de este paper, un prototipo piloto del sistema ha sido desplegado en la Escuela de Ingeniería Informática de Valladolid, dónde ya se puede utilizar el sistema para la ubicación de personas o activos en un área del edificio. Este sistema puede implantarse fácilmente y con un coste muy asequible en otros edificios públicos o industriales en los que la ubicación de personas o activos puede ser interesante. Los hospitales y centros de salud son un claro ejemplo. Con un elevado número de personas en constante movimiento, la ubicación a tiempo real de los pacientes puede mejorar las condiciones de seguridad de los mismos. Grandes centros industriales pueden mejorar sensiblemente las condiciones de seguridad en caso de emergencia, como por ejemplo la posibilidad de conocer la ubicación de los trabajadores durante un incendio o accidente. Existen también aplicaciones fuera del ámbito de la seguridad o de la salud. La localización a tiempo real de material en almacenes o recintos industriales en los que dichos materiales suelen moverse con relativa frecuencia puede reducir las situaciones en las que estos materiales se pierden durante los transportes. La principal contribución de XtremeLoc frente a sistemas tradicionales es la capacidad de disponer de la ubicación real en un instante dado, sin necesidad de control de accesos o anotaciones manuales, además de permitir el almacenamiento de los desplazamientos de la persona o activo en seguimiento.

¹Departamento de Informática, Universidad de Valladolid, e-mail: daniel@infor.uva.es.

²Departamento de Informática, Universidad de Valladolid, e-mail: ana@infor.uva.es.

³Departamento de Informática, Universidad de Valladolid, e-mail: hectorcampop@outlook.com.

⁴Departamento de Informática, Universidad de Valladolid, e-mail: srgarcia91@gmail.com.

⁵RDNest SL, e-mail: jamarch@rdnest.com.

⁶Departamento de Informática, Universidad de Valladolid, e-mail: diego@infor.uva.es.

El resto del paper se estructura de la siguiente manera. La Sección II presenta una descripción de las tecnologías que se utilizan en Localización Indoor con un coste medio-bajo de implementación y una precisión media-alta, analizando sus fortalezas y debilidades. En la Sección III presentamos nuestra solución, Xtremeloc. La Sección IV describe los problemas de la tecnología Bluetooth relativos a la intensidad de la señal y su efecto en el sistema de localización. La Sección V contiene las conclusiones y trabajo futuro relativos a este trabajo.

II. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se describen las técnicas actuales de Localización Indoor [2, 3], especialmente RFID, Ultra-Wideband, Bluetooth y Ultrasonidos, analizando su funcionamiento así como sus ventajas e inconvenientes en un despliegue real. La literatura es muy amplia en este campo y algunas tecnologías llevan años utilizándose en el campo del LPS y RTLS. Para los propósitos de nuestro estudio, analizaremos las tecnologías mejor indicadas para los siguientes requisitos:

- Posicionamiento en tiempo real.
- Despliegue en entornos con un alto número de obstáculos y tráfico de personas.
- Posicionamiento con interacción mínima de la persona o activo a localizar.
- Soluciones de bajo coste cuyo despliegue sea económicamente viable.

Estas características hacen difícil la implementación de sistemas de localización indoor que ya han sido probadas y utilizadas en situaciones como el guiado de robots en fábricas. Esto se debe a que muchos de esos sistemas no son capaces de funcionar correctamente en entornos menos controlados.

A. RFID: Radio Frequency Identification

La tecnología RFID [4, 5] existe desde hace años. Se basa en el uso de pequeñas etiquetas, compuestas por un chip y una antena. Su uso más conocido es para la lectura de información almacenada en dichas etiquetas. Los sistemas RFID se dividen en dos tipos:

- RFID Pasivo: Las etiquetas son más simples, activándose mediante energía transferida por el lector RFID por radio frecuencia. Debido a esto, su alcance y potencia son extremadamente pequeños (del orden de tres metros).
- RFID Activo: Las etiquetas tienen su propia batería, lo que permite aumentar su potencia y su alcance (hasta 100m).

A pesar de que las etiquetas RFID son extremadamente baratas, en particular las de RFID pasivo, esta tecnología presenta varios inconvenientes. En primer lugar, el precio de los lectores RFID es muy alto. En segundo lugar, la lectura RFID tiene una fuerte componente direccional, obligando a aumentar enormemente el número de lectores a instalar para una cobertura aceptable. Los sistemas de posicionamiento

basados en este sistema consisten más en un seguimiento del paso de las etiquetas RFID bajo los lectores que en una ubicación a tiempo real.

B. UWB: Ultra-Wideband

La tecnología Ultra-Wideband [6, 7] es relativamente nueva y consiste en el envío de pulsos de gran ancho de banda. Un sistema de posicionamiento basado en UWB consistiría en una serie de estaciones fijas y un número de dispositivos móviles a localizar.

El funcionamiento de un sistema basado en UWB consiste en el siguiente proceso:

1. El dispositivo móvil emite un primer mensaje.
2. La estación fija recibe el mensaje y envía una respuesta.
3. El dispositivo móvil recibe la respuesta y envía un segundo mensaje.
4. La estación fija recibe el segundo mensaje y, con los tiempos de recepción de ambos mensajes, calcula la distancia existente entre ambos.

El cálculo de la distancia es realizado utilizando el tiempo transcurrido en el envío de los mensajes entre los dos dispositivos, cuya velocidad es conocida (la velocidad de la luz).

La tecnología UWB es una de las más prometedoras para el posicionamiento indoor. Tiene numerosas ventajas, como por ejemplo:

- Bajo consumo de energía.
- Los obstáculos tienen un escaso impacto en el sistema.
- Permite una rápida transferencia de información entre dispositivos emisores y receptores gracias al gran ancho de banda utilizado.
- El margen de error está en el orden de los centímetros.

A pesar de todo, actualmente esta tecnología tiene también algunas desventajas:

- El coste del sistema es, por el momento, bastante elevado para su despliegue a gran escala.
- La señal interfiere con sistemas como GPS, o sistemas que operen en las bandas de frecuencia 250-750MHz, 3.2-4.7GHz, y 5.9-10.2GHz.

Si los efectos de las interferencias son aceptables y el coste de despliegue de este sistema continua reduciéndose, esta tecnología permitirá dar una solución económicamente viable con un margen de error muy pequeño para sistemas de posicionamiento indoor de tiempo real.

C. Ultrasonidos

Pueden utilizarse soluciones basadas principalmente en ultrasonidos [8,9] (a veces se complementan con radiofrecuencia para tareas de sincronización de dispositivos) para la localización indoor de objetos y personas.

No obstante, su bajo coste puede convertir una solución basada en ultrasonidos en una alternativa viable.

Existen tres tipos de sistemas de localización basados en ultrasonidos. El primero de ellos es el denominado sistema *bat*. En este sistema, las personas u objetos que se pretenden localizar llevan un dispositivo emisor de ultrasonidos que se activa al recibir una señal. Una red de receptores desplegada a corta distancia unos de otro reciben los ultrasonidos y permiten ubicar el punto de emisión.

Otro sistema, bajo el nombre de *cricket* consiste en el despliegue de emisores en posiciones fijas. Estos dispositivos emiten ultrasonidos que permiten a los receptores localizarse.

La tercera alternativa se trata del sistema *DOLPHIN*. Este sistema se basa en la igualdad entre todos los dispositivos, con la salvedad de que algunos de ellos están ubicados en posiciones fijas y sirven de referencia. Los dispositivos móviles utilizan esta información junto con los datos obtenidos mediante el uso de ultrasonidos para calcular su posición.

Esta tecnología tiene una serie de limitaciones, entre las cuales se encuentran:

- Las señales se limitan a la habitación en la que se producen.
- Las refracciones afectan severamente a las mediciones
- La identificación del objeto o persona localizados es problemática.

D. Infrarrojo

La tecnología de infrarrojo se ha utilizado para la localización indoor [10, 11] en numerosas ocasiones. Estos sistemas se basan en la existencia de una línea de visión sin obstáculos entre un emisor de luz infrarroja y un detector. El posicionamiento de activos se efectúa mediante triangulación, para lo cual se necesita conocer el ángulo de incidencia de la luz, así como la posición de las balizas fijas.

Como en otras tecnologías, este sistema puede utilizar indistintamente como baliza fija tanto los receptores como los emisores. En cualquier caso, es necesario que exista una línea visual entre emisores y receptores, lo cual limita su uso a situaciones en las que sea posible mantener esta visual entre un número de dispositivos suficiente para realizar la triangulación.

Con el objetivo de identificar distintos emisores en un sistema de infrarrojos es necesario que dichos dispositivos emitan un identificador. La capacidad de transmisión está ligada a la frecuencia de toma de datos de los receptores y necesita de una sincronización adecuada.

Los dispositivos de infrarrojos pueden alcanzar una precisión muy alta, de unos pocos centímetros. No obstante, su uso en un sistema localización en tiempo real presenta un número de problemas con difícil solución:

- Necesidad de una línea visual directa y constante entre dispositivos.
- Dificultad para conseguir una cobertura completa en un edificio.

- Identificación de los dispositivos y baja frecuencia de transmisión de datos.

E. Computer Vision

El concepto de *Computer Vision* o Visión Artificial consiste en la automatización del proceso llevado a cabo por el sistema visual humano. Las imágenes adquiridas mediante cámaras digitales se procesan para extraer información. Es posible desarrollar un sistema de posicionamiento indoor mediante el uso de Visión Artificial [12].

Este sistema consiste en el uso de dispositivos con cámara que toman imágenes de los alrededores del usuario o activo a localizar. Estos dispositivos envían las imágenes a un servidor remoto que las procesa, identificando la posición del activo o persona. Esta tarea requiere de la detección de los denominados marcadores identificativos que permiten la asociación de una imagen con una ubicación real. Posteriormente, mediante el uso de secuencias de imágenes, se calcula la posición con más exactitud.

Esta tecnología no necesita dispositivos emisores y receptores, no obstante, sigue requiriendo de balizas fijas (marcadores) que permitan asociar la posición actual con una posición conocida. El grueso del coste del sistema se encuentra en los dispositivos con cámara utilizados, así como en el servidor central, que tiene una carga computacional bastante elevada en comparación con otras alternativas. Debido a esto último, su utilización a gran escala en un entorno de tiempo real puede presentar problemas de escalabilidad.

Además, este sistema necesita que el usuario esté involucrado activamente en el proceso de localización, lo cual hace inviable su uso en la localización de personas o activos en un gran número de situaciones.

F. Bluetooth Low Energy

Los dispositivos Bluetooth se engloban en los denominados dispositivos WPAN (Wireless Personal Area Network). No obstante, su alcance puede llegar a los 30-40m fácilmente a costa de una reducción en las capacidades de transferencia bidireccional de información. Para aplicaciones de posicionamiento indoor esto no supone un problema demasiado grave. Este tipo de dispositivos opera en la banda de 2.4GHz y su consumo energético es muy bajo, permitiendo una larga autonomía con baterías comunes.

Los sistemas de posicionamiento indoor basados en Bluetooth Low Energy [13, 14] consisten en lo siguiente:

- Dispositivos emisores o beacons.
- Dispositivos receptores de paquetes BLE (Bluetooth Low Energy).

Existen dos enfoques diferentes en el uso de Bluetooth para el posicionamiento indoor, en función del tipo de dispositivo que se pretenda localizar. La solución más común consiste en el despliegue de un número de beacons en ubicaciones fijas de un edificio. Estos beacons emiten cada cierto tiempo un pequeño

paquete de datos (habitualmente utilizando el protocolo *iBeacon* [15]). Un dispositivo receptor se encarga de leer estos paquetes y, basándose en la intensidad de la señal recibida puede calcular su distancia con respecto a cada uno de los beacons, permitiendo así su posicionamiento.

Este enfoque tiene una serie de ventajas:

- Las necesidades de cómputo pueden trasladarse a los dispositivos receptores, quienes únicamente tienen que preocuparse de su ubicación según los paquetes que reciben.
- La complejidad del despliegue se reduce.
- Los dispositivos receptores pueden ser de diferentes tipos, habitualmente *smartphones* con una aplicación Android o iOS.

No obstante, las desventajas son numerosas:

- Su uso sólo tiene sentido para la localización de personas que portan smartphones con una aplicación determinada instalada.
- Se traslada la responsabilidad de la localización al usuario, quien tiene que hacer un esfuerzo para que el sistema funcione, lo cual imposibilita el uso del sistema bajo ciertas circunstancias.
- Dado que los receptores son más caros que los beacons, el coste del sistema aumenta.

El segundo enfoque consiste en el uso de los beacons como dispositivos a localizar. Para ello, son los dispositivos receptores los que se despliegan por el edificio en puntos fijos. Los beacons se despliegan junto a los objetos o personas que desean localizarse en el interior del edificio. Los dispositivos receptores reciben los paquetes de los beacons y, de nuevo basándose en la intensidad de la señal, calculan la distancia entre ellos y la almacenan en un servidor central.

Este segundo enfoque tiene las siguientes ventajas:

- Dado el pequeño tamaño de los beacons y su autonomía, puede usarse para la localización tanto de objetos como de personas.
- El usuario no necesita realizar ningún esfuerzo para que el sistema funcione, únicamente llevar el beacon consigo.
- Se reemplaza el uso de un smartphone por persona por un beacon, por lo que el coste global del sistema disminuye.
- El hardware es homogéneo, lo que reduce diferencias en las intensidades de la señal entre dispositivos.

Este método tiene también desventajas:

- El grueso del cómputo necesario para el posicionamiento se centraliza en el servidor.
- Se incrementa la complejidad del software requerido.
- La infraestructura necesaria para el despliegue de los receptores es más costosa que el despliegue de beacons estáticos.
- Las antenas receptoras tienen que poder conectarse a una infraestructura de comunicaciones,

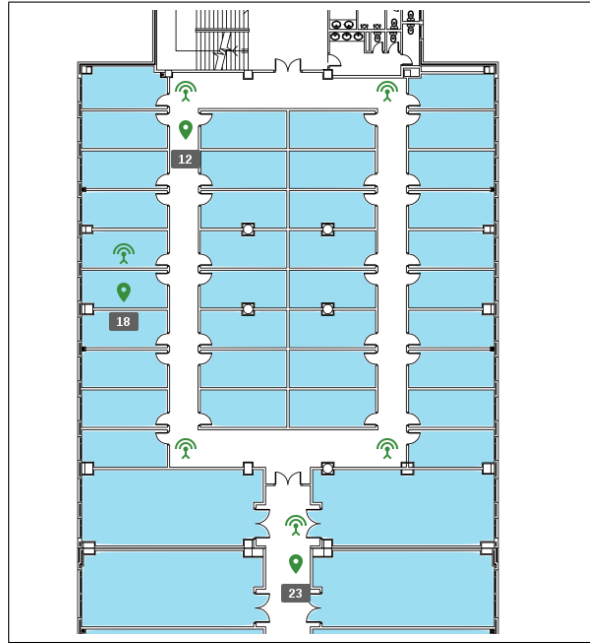


Fig. 1. Aspecto de la interfaz web de Xtremeloc en la Escuela de Ingeniería Informática de Valladolid. Los beacons aparecen asociados a las antenas (RDHubs) más cercanas.

bien sea por WIFI o 3G/4G, para poder enviar la información al servidor.

III. XTREMELOC

En esta sección presentamos nuestra solución, llamada Xtremeloc, y que se trata de un sistema de Localización Indoor basado en Bluetooth de Baja Energía (BLE) desarrollado en colaboración con RDNest, una empresa de base tecnológica especializada en IoT y participada por la Universidad de Valladolid. Los motivos que nos han llevado a desarrollar un sistema basado en Bluetooth se basan, principalmente, en el bajo coste necesario para el despliegue, así como en un adecuado equilibrio entre precisión espacial y tiempo requerido para la localización.

En estos momentos, disponemos de un prototipo piloto en funcionamiento en la Escuela de Ingeniería Informática de la Universidad de Valladolid, tal y como se muestra en la Fig. 1.

Nuestro sistema se compone de los siguientes elementos:

- Un servidor central en el que se aloja la lógica de Xtremeloc, junto con una aplicación web para acceder a los datos, utilizando un framework de visualización GIS desarrollado por nosotros llamado *Mapache*.
- Un número de beacons BLE que mantenemos localizados con nuestro sistema.
- Una serie de dispositivos receptores denominados RDHubs que reciben y procesan la señal BLE de los beacons a su alcance, aplicando una serie de correcciones para el filtrado de la señal y para el cálculo de la distancia entre ambos.

Nuestra infraestructura consiste en un número de RDHubs (receptores) desplegados en la planta del

edificio. Estos RDHubs son ordenadores con Linux de bajo coste alimentados por la misma red eléctrica que alimenta a las luminarias del edificio y conectados a una red WIFI para el envío de los datos al servidor y para la recepción de actualizaciones software.

Los beacons son pequeños y ligeros, con una autonomía de varios meses incluso bajo condiciones de alta frecuencia y potencia de transmisión.

Xtremeloc es un sistema en desarrollo y actualmente consiste en un sistema de Localización Indoor basado en el modo de *Receptor más cercano*, es decir, la ubicación de los beacons viene dada por la ubicación del RDHub más cercano a ellos. En estos momentos, nuestro desarrollo se centra en filtrar adecuadamente la señal BLE recibida en los RDHubs, así como analizar el comportamiento del sistema frente a los obstáculos. Una vez concluida esta etapa del desarrollo, nos centraremos en desarrollar un modo de *Ubicación Real* basado en trilateración.

Para el cálculo de la distancia nos decantamos por una función exponencial que relaciona la distancia con la intensidad de la señal:

$$d = x \cdot e^{y \cdot rssi}$$

Donde x e y son constantes que nos permiten ajustar la curva a las particularidades de nuestro hardware, y $rssi$ es la intensidad de la señal para un par RDHub-beacon.

Dado que nuestro sistema utiliza los beacons como dispositivos a localizar, Xtremeloc no supone ningún inconveniente para el usuario más allá de llevar consigo el beacon, cuyo tamaño es suficientemente pequeño como para ser integrado en colgantes, pulseras, o similares. Por otra parte, dado que no requiere el uso del smartphone del usuario, reduce la posibilidad de que existan problemas relacionados con la privacidad. Además, dado que cada beacon emite su propio identificador, el sistema no necesita almacenar datos relativos al usuario (salvo el identificador puntual para poder distinguir a las personas localizadas en un instante dado, pudiendo usar un pseudónimo para ello).

IV. PROBLEMAS ASOCIADOS A LA SEÑAL

La utilización de Bluetooth para la Localización Indoor presenta un número de problemas derivados de la inestabilidad inherente a la señal. Esta señal presenta una enorme variación en la intensidad incluso en situaciones estáticas. La variación depende de una serie de factores entre los que se encuentran:

- Variaciones producidas por el hardware de los dispositivos.
- Variaciones de intensidad entre las distintas bandas de emisión, ya que el protocolo BLE emite simultáneamente en tres bandas [16].
- Atenuaciones de la señal por objetos que bloquean el beacon.
- Fenómenos de propagación multicamino [17].

Estas variaciones provocan que los datos en crudo obtenidos por el sistema sean demasiado volátiles co-

mo para obtener una precisión adecuada. En la Fig. 2 se presenta un histograma de las intensidades de señal (RSSI) de un beacon con respecto a uno de los RD Hubs, situado exactamente a dos metros de distancia. En este histograma se aprecia cómo existen diferentes zonas de pico en la recepción de la señal.

La variabilidad en la intensidad es bastante regular a lo largo del tiempo, tal y como se puede apreciar en la Fig. 3(a), en la que se puede observar la distribución de la intensidad de los diferentes paquetes recibidos a lo largo de cuatro horas. En la Fig. 4(a) se muestra un intervalo más corto de cinco minutos. Como se puede apreciar, los datos se obtienen con una considerable variabilidad, de ± 15 dB.

Debido a estos problemas, en colaboración con RDNest [18] se ha desarrollado un algoritmo de filtrado de la señal que nos permite obtener datos mucho más estables para utilizarlos en el cálculo de las distancias. Este algoritmo tiene en cuenta los siguientes puntos:

- Alta escalabilidad en un entorno de tiempo real.
- Capacidad de respuesta ante un comportamiento dinámico no previsible.

Esto es importante puesto que el sistema tiene que ser capaz de mostrar información instantánea, de modo que se pueda disponer de datos a tiempo real de la situación de los beacons en movimiento en un edificio. Además los beacons pueden tanto moverse libremente como estar estáticos, por tanto el sistema tiene que poder dar respuesta a ambas situaciones. El mayor problema es distinguir entre una variación de posición o una variación en la intensidad producida por los fenómenos descritos anteriormente, y las variaciones producidas por cambios reales en la posición.

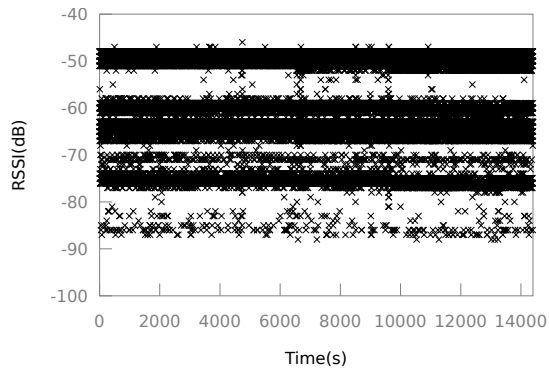
La aplicación de este algoritmo, desarrollado en colaboración con RDNest, produce los resultados mostrados en las Figs. 3(b) y 4(b), correspondientes a los datos en crudo mostrados en las Figs. 3(a) y 4(a) respectivamente.

Como se puede apreciar en estas figuras, conseguimos reducir la variabilidad a ± 5 dB. Si bien se sigue trabajando en este campo, en este punto podemos trabajar con una precisión aceptable en la mayoría de situaciones.

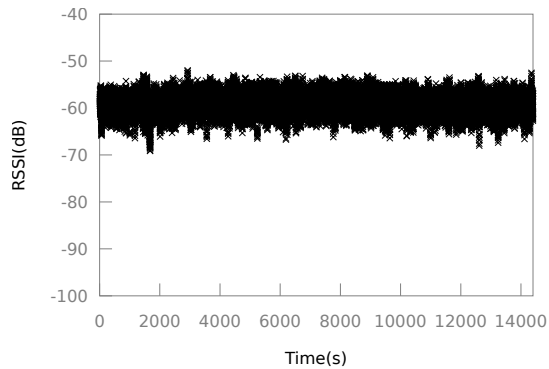
V. CONCLUSIONES

En este paper hemos introducido Xtremeloc, nuestra solución de Localización Indoor basada en Bluetooth de Baja Energía, desarrollada en colaboración con RDNest SL. Hemos presentado nuestro prototipo piloto en funcionamiento en la Escuela de Ingeniería Informática de la Universidad de Valladolid, describiendo el hardware empleado y las responsabilidades de los distintos dispositivos para el funcionamiento del sistema.

Hemos elaborado un resumen de las diferentes tecnologías de Localización Indoor existentes en la actualidad, seleccionando aquellas cuyo coste y precisión pueden ser viables para un despliegue en situa-

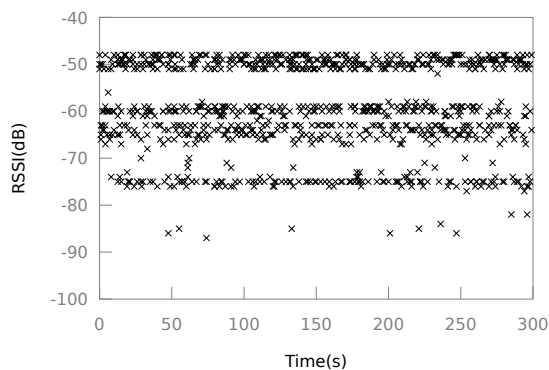


(a) Señales sin filtrar.

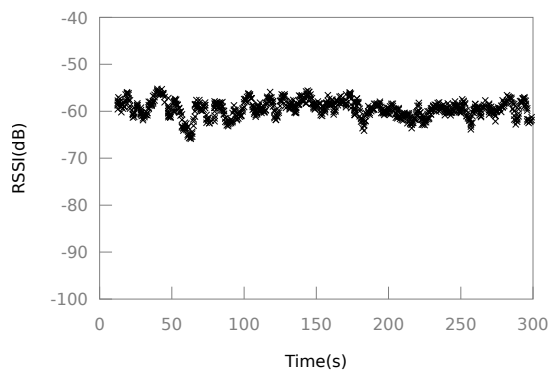


(b) Señales filtradas.

Fig. 3. Distribución de RSSI de un beacon en un periodo de cuatro horas.



(a) Señales sin filtrar.



(b) Señales filtradas.

Fig. 4. Distribución de RSSI de un beacon en un periodo de cinco minutos.

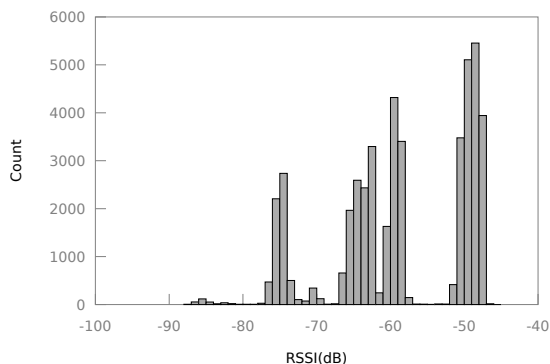


Fig. 2. Histograma de RSSI de un beacon durante cuatro horas.

ciones reales. Se han descrito las diferencias de funcionamiento de las diferentes tecnologías mencionadas, con especial atención a las necesidades de un despliegue basado en esas tecnologías, así como en las fortalezas y debilidades de las mismas.

Finalmente, hecho un análisis de los problemas relativos a la señal Bluetooth, mostrando resultados en crudo así como el correspondiente filtrado utilizando los algoritmos desarrollados por RDNest. Nuestros algoritmos consiguen reducir la variabilidad de la se-

ñal Bluetooth de ± 15 dB a ± 5 dB, aumentando considerablemente la precisión del sistema al mismo tiempo que mantenemos un buen comportamiento del sistema a tiempo real y asegurando la escalabilidad del mismo.

Nuestro trabajo continua en diferentes frentes. Por una parte, en colaboración con RDNest continuamos intentando reducir la variabilidad Bluetooth sin afectar al rendimiento del sistema. Con los actuales niveles de precisión, comenzamos el trabajo para implementar un sistema de *Localización Real* basado en trilateración con los mismos criterios de mantenimiento de la escalabilidad del sistema y de la capacidad de respuesta a tiempo real del mismo. Por otro lado, continuamos expandiendo el prototipo piloto añadiendo más RDHubs y beacons para extender la cobertura en la Escuela de Ingeniería Informática de Valladolid.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el MICINN y el programa ERDF de la Unión Europea: proyecto HomProg-HetSys (TIN2014-58876-P), la red CAPAP-H6 (TIN2016-81840-REDT) y el COST Program Action IC1305: Network for Sustainable Ultrascale Computing (NESUS).

Los autores desean agradecer a la Escuela de In-

geniería Informática de la Universidad de Valladolid por su autorización y colaboración en el despliegue del prototipo piloto de Xtremeloc.

También agradecemos los comentarios recibidos por parte de los revisores asignados, cuyas reseñas nos han sido de gran ayuda para mejorar el artículo.

REFERENCIAS

- [1] Krzysztof W Kolodziej and Johan Hjelm, *Local positioning systems: LBS applications and services*, CRC press, 2006.
- [2] Luca Mainetti, Luigi Patrono, and Ilaria Sergi, "A survey on indoor positioning systems," in *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2014 22nd International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 111–120.
- [3] Zhenlong Song, Gangyi Jiang, and Chao Huang, "A survey on indoor positioning technologies," in *Theoretical and Mathematical Foundations of Computer Science*, pp. 198–206. Springer, 2011.
- [4] Abdelmoula Bekkali, Horacio Sanson, and Mitsuji Matsumoto, "Rfid indoor positioning based on probabilistic rfid map and kalman filtering," in *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2007. WiMOB 2007. Third IEEE International Conference on*. IEEE, 2007, pp. 21–21.
- [5] Samer S Saab and Zahi S Nakad, "A standalone rfid indoor positioning system using passive tags," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 1961–1970, 2011.
- [6] Suheer Alhadhrami, A Al-Salman, H Al-Khalifa, Abdulrahman Alarifi, Ahmad Alnafessah, Mansour Alsaleh, and M Al-Ammar, "Ultra wideband positioning: An analytical study of emerging technologies," in *Proceedings of the Eighth International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM, 2014*, pp. 1–9.
- [7] Marco Gunia, Florian Protze, Niko Joram, and Frank Ellinger, "Setting up an ultra-wideband positioning system using off-the-shelf components," in *Positioning, Navigation and Communications (WPNC), 2016 13th Workshop on*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [8] Mike Hazas and Andy Hopper, "Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning," *IEEE Transactions on mobile Computing*, vol. 5, no. 5, pp. 536–547, 2006.
- [9] Yasuhiro Fukuju, Masateru Minami, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama, "Dolphin: An autonomous indoor positioning system in ubiquitous computing environment.," *WSTFES*, vol. 3, pp. 53, 2003.
- [10] Erwin Aitenbichler and Max Muhlhauser, "An ir local positioning system for smart items and devices," in *Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on*. IEEE, 2003, pp. 334–339.
- [11] Chunhan Lee, Yushin Chang, Gunhong Park, Jaeheon Ryu, Seung-Gweon Jeong, Seokhyun Park, Jae Whe Park, Hee Chang Lee, Keum-shik Hong, and Man Hyung Lee, "Indoor positioning system based on incident angles of infrared emitters," in *Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE*. IEEE, 2004, vol. 3, pp. 2218–2222.
- [12] Jongbae Kim and Heesung Jun, "Vision-based location positioning using augmented reality for indoor navigation," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 54, no. 3, 2008.
- [13] Fazli Subhan, Halabi Hasbullah, Azat Rozyyev, and Sheikh Tahir Bakhsh, "Indoor positioning in bluetooth networks using fingerprinting and lateration approach," in *Information Science and Applications (ICISA), 2011 International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 1–9.
- [14] Paul K Yoon, Shaghayegh Zihajehzadeh, Bong-Soo Kang, and Edward J Park, "Adaptive kalman filter for indoor localization using bluetooth low energy and inertial measurement unit," in *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE*. IEEE, 2015, pp. 825–828.
- [15] Markus Kouhne and Jürgen Sieck, "Location-based services with ibeacon technology," in *Artificial Intelligence, Modelling and Simulation (AIMS), 2014 2nd International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 315–321.
- [16] Inc. Bluetooth SIG, "Bluetooth core version 4.2," <https://www.bluetooth.com/specifications/adopted-specifications>, 2014, Accedido: 25-05-2017.
- [17] Sheng Zhou and John K Pollard, "Position measurement using bluetooth," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 52, no. 2, pp. 555–558, 2006.
- [18] "RDNest SL.," <https://www.rdnest.com>, Accedido: 25-05-2017.