



GOBIERNO DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS

CONSEJERÍA DE EMPLEO, INDUSTRIA Y TURISMO



UNIÓN EUROPEA

Fondo Europeo de Desarrollo Regional



RESULTADOS IWHERE

Investigación aplicada en algoritmos de intensidad de señal recibida para la localización de EPIs y objetos en interiores.

En Gijón , a 31 de Diciembre de 2017



1. MEMORIA TÉCNICA

Introducción

El proyecto **iWHERE (Investigación aplicada en algoritmos de intensidad de señal recibida para la localización de EPIs y objetos en interiores)** ha sido ejecutado por Fundación CTIC – Centro Tecnológico entre **el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2017**.

El proyecto iWHERE toma como base las Políticas de Calidad, Seguridad, Medio Ambiente e I+D+I de la mayoría de empresas, que buscan la optimización de sus procesos a través de la mejora continua, y la mejora de los resultados económicos. Estas políticas tienen como objetivo no solo garantizar la viabilidad de las empresas, sino también garantizar la seguridad, la salud y el bienestar de su personal, fomentando y vigilando que el trabajo se desarrolle en condiciones de máxima seguridad.

Teniendo en cuenta estas prioridades, iWHERE ha investigado algoritmos avanzados para la localización en interiores de personas y objetos. La solución propuesta por iWHERE permite superar las limitaciones de otras soluciones disponibles actualmente en el mercado, que son válidas únicamente para geolocalizar en exteriores y que no permiten la localización en interiores en continuo, como es el caso de los algoritmos Choke-Point.

Con este proyecto hemos desarrollado una solución basada en la aplicación de algoritmos RSSI a la localización de personas en instalaciones interiores a partir de nodos fijos con posiciones conocidas en el entorno. Esta solución es capaz de localizar recursos (EPIs y equipos/herramienta) en vez de personas, siendo capaz de llevar esta localización a un entorno industrial con grandes cantidades de metal, superando los problemas de interferencias o pérdida de calidad en las señales, cumpliendo así el principal objetivo del proyecto.

Para el desarrollo de esta solución propuesta se ha partido de tecnologías nodo-móvil y algoritmos de localización existentes para, a partir de éstos, desarrollar un nuevo algoritmo basado en la intensidad de señal recibida (RSSI), que puede ser utilizado en un entorno industrial para la localización de recursos (EPIs, equipos, herramientas...) en interiores.

Los resultados obtenidos tienen un claro impacto en el aseguramiento de las condiciones óptimas de seguridad en el trabajo, ya que permiten identificar en todo momento los equipos de protección individual (EPIs) que porta cada trabajador. Así mismo, permiten la localización de equipamiento y herramientas de trabajo en una planta de fabricación, lo que permite optimizar los flujos de equipos y personas en la planta, evitar movimientos innecesarios y, en consecuencia, hacer más eficientes los procesos.

El proyecto iWHERE se ha estructurado en cuatro fases, desarrolladas de forma secuencial:

- Hito 1: Análisis de contexto.
- Hito 2: Investigación en lógica de localización.
- Hito 3: Montaje experimental.
- Hito 4: Experimentación.



Hito 1: Análisis de contexto.

T1.1: IDENTIFICACIÓN DE REQUISITOS Y CARACTERÍSTICAS LIMITANTES EN ENTORNO INDUSTRIAL.

A través de esta tarea, realizada durante el mes de enero de 2017, se ha llevado a cabo el estudio de las características que se dan en un entorno empresarial, que podían ser clave y afectar o condicionar la implantación de la solución iWHERE. Una vez identificados y estudiados estos factores, se procedió a identificar los requisitos que se debían cumplir, en lo referente a las condiciones del entorno industrial y que se debían tener en cuenta para poder llevar a cabo con éxito la implantación de la solución propuesta.

Para las empresas industriales en general es muy importante poder optimizar flujos de equipos y personas en una planta y evitar movimientos innecesarios para hacer más eficientes los procesos productivos a la vez que se maximiza la seguridad y salud de los trabajadores. Para ello es importante conocer la localización de personas y equipos y poder hacerles seguimiento.

En exteriores, la localización de este tipo de recursos se puede realizar de forma sencilla mediante sistemas GPS. Sin embargo, esta tecnología no puede ser utilizada en zonas de sombra ni en zonas de interior, donde no se tiene visión directa de los satélites.

En este ámbito, las redes de sensores inalámbricas se postulan como unas de las tecnologías más interesantes para obtener sistemas de localización complementarios a los sistemas GPS.

Partiendo de este contexto el proyecto iWhere plantea un caso de estudio en el que se investigarán posibles soluciones para el desarrollo y despliegue de un sistema de localización de personas u objetos en interiores en un entorno industrial. Este sistema deberá actuar como un GPS, permitiendo ver en todo momento la localización del objetivo dentro de un “mapa” de una planta o recinto. Además, se diseñarán y ejecutarán diferentes baterías de pruebas en laboratorio como validación tecnológica de los conceptos investigados.

En este caso de estudio, los recursos a monitorizar serán EPIs (al localizar un EPI se localiza también a la persona que lo lleva) y/o equipos o herramientas industriales. Estos recursos portarán un dispositivo electrónico que emita de forma continua una señal que será recogida por la red de sensores. El análisis inteligente de esta señal, realizado a través de diferentes algoritmos, permitirá determinar la posición de dicho dispositivo y del recurso que lo porta. Para el caso de estudio se investigarán 3 tecnologías inalámbricas, que son 3 de entre las más extendidas y desarrolladas en la actualidad, como son las tecnologías RFID, ZigBee y Beacons.

Los experimentos que se realicen en el proyecto permitirán establecer cuál es el mejor sistema (tecnología + algoritmo) de localización.

Para que el sistema pueda ser escalado a nivel industrial, y fácilmente utilizado por cualquier tipo de operario, se desarrollará teniendo en cuenta los estándares promovidos por el W3C, tanto en el ámbito de la usabilidad como en el ámbito del IoT (*Internet of Things*) / WoT (*Web of Things*).

Una vez establecidos los requisitos mínimos que debe cumplir el proyecto, se han estudiado las características limitantes que vamos a encontrarnos en un entorno industrial metalmecánico, en el cual se espera encontrar maquinaria pesada, planchas de acero y materiales voluminosos que pueden obstaculizar las señales



electromagnéticas. Otro tipo de escenarios pueden presentar altas temperaturas, uso de potentes electroimanes, polvo y sedimentos. También cabe destacar que en esta industria puede ser necesaria la localización de personas u objetos en espacios reducidos o de difícil acceso. Este tipo de entornos pueden conllevar una serie de características específicas que dificultan la transmisión de señales inalámbricas y que, por lo tanto, deberán de tenerse en cuenta en el estudio a realizar.

Por un lado, tenemos que las ventajas que aportan las redes inalámbricas a la industria obligan a buscar alternativas de alimentación energética, dado que la energía suministrada por la red en muchas industrias tiene fluctuaciones, fallas, ruido... que pueden afectar a los dispositivos inalámbricos. Por ello se utilizan alternativas como baterías de larga duración.

Otro de los inconvenientes que se pueden sufrir en entornos industriales son las pérdidas de señal (fading), en las que se puede experimentar como la señal desaparece y de repente vuelve a aparecer sin motivo aparente, a veces sin dejarte tiempo a poder ver cuál es la causa del desvanecimiento.

Las señales inalámbricas también pueden sufrir interferencias por consecuencia de otras señales que puedan estar presentes, como señales microondas, teléfonos inalámbricos, WiFi, señales de radio de las máquinas....

Por otro lado, la propagación de las ondas de radio es lineal, y muy parecida a la de las ondas de luz. Del mismo modo, dichas ondas pueden pasar a través de cristales u objetos transparentes sin ser muy afectadas por la atenuación, pero, en materiales densos como muros, la atenuación será proporcional a la densidad del objeto cruzado. También hay materiales muy presentes en las plantas industriales que absorben o atenúan la mayoría de las señales, como por ejemplo el acero inoxidable.

Otro elemento que influye a las ondas de radio es la luz solar, que aporta una parte de ruido al emitir un amplio espectro de ondas electromagnéticas en todas las frecuencias, lo que puede llegar a interferir señales inalámbricas en plantas con mucha luz natural.

Así, y a modo de resumen, las principales características limitantes del sector metalmecánico son:

- La presencia de diversos equipos de fabricación puede producir:
 - Interferencias electromagnéticas entre los mismos.
 - Zonas de sombra u obstáculos en la propagación de las señales, modificando su trayectoria y la intensidad de la señal recibida.
 - Daños en los dispositivos desplegados debido al movimiento.
- La presencia de grandes cantidades de metal en el entorno puede producir problemas de interferencias o pérdida de calidad en las señales.
- Las variaciones de temperatura pueden atenuar las señales.
- El tamaño del área a controlar puede ser excesivo tanto en altura como en superficie para cualquier tecnología.
- Las fluctuaciones de energía y ruido en la red eléctrica hacen que sea recomendable utilizar baterías para alimentar los equipos.



T1.2: CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS A LOCALIZAR.


En esta parte del proyecto, se han identificado y caracterizado algunos de los principales Equipos de Protección Individual que utilizan los trabajadores de las plantas industriales, así como algunos de los principales equipos / herramientas que utilizan. A partir de esta caracterización, se podrá determinar qué tipo de tecnología se acoplará a dichos recursos para poder llevar a cabo la localización.

Se indican a modo de resumen las características principales de dichos EPIs:

- **Botas:** Según el nivel de protección ofrecido, el calzado de uso profesional puede clasificarse en calzado de seguridad, calzado de protección, y calzado de trabajo.
- **Casco:** Según la norma UNE-EN 397: 1995, un casco de protección para la industria es una prenda para cubrir la cabeza del usuario, que está destinada esencialmente a proteger la parte superior de la cabeza contra heridas producidas por objetos que caigan sobre el mismo
- **Gafas y pantallas de protección:** Las gafas de protección están diseñadas para proteger los ojos de impactos, polvo fino y gases, líquidos, radiaciones o polvo grueso. Si además de los ojos protegen toda la cara se denominan pantallas de protección.
- **Protectores del oído:** Los protectores auditivos son equipos de protección individual que, debido a sus propiedades para la atenuación de sonido, reducen los efectos del ruido en la audición, para evitar así un daño en el oído.
- **Arnés anticaídas:** Dispositivo de prensión del cuerpo destinado a parar las caídas. El arnés anticaídas puede estar constituido por bandas, elementos de ajuste y de enganche y otros elementos, dispuestos y ajustados de forma adecuada sobre el cuerpo de una persona para sujetarla durante una caída y después de la parada de ésta.
- **Protección respiratoria:** Los equipos de protección respiratoria son equipos de protección individual de las vías respiratorias en los que la protección contra los contaminantes aerotransportados se obtiene reduciendo la concentración de éstos en la zona de inhalación por debajo de los niveles de exposición recomendados.
- **Guantes:** Un guante es un equipo de protección individual (EPI) que protege la mano o una parte de ella contra riesgos. En algunos casos puede cubrir parte del antebrazo y el brazo.

En la siguiente tabla se identifican estos EPIs, indicándose para cada uno de ellos el tamaño que tiene, aspecto fundamental dado que en función de este tamaño se podrá acoplar a dicho EPI una tecnología de localización u otra:



<i>EPI</i>	<i>Foto</i>	<i>Tamaño</i>
<i>Calzado de seguridad</i>		Mediano
<i>Casco.</i>		Mediano
<i>Gafas de seguridad.</i>		Pequeño
<i>Protectores auditivos.</i>		Pequeño
<i>Arnés</i>		Grande
<i>Mascarilla</i>		Mediano

Hay que tener en cuenta que, para poder localizar estos recursos, deben de tener un tamaño suficiente como para poder portar un dispositivo que los permita localizar (baliza o nodo móvil). Éste es principal factor limitante a considerar, ya que hay diversos elementos, como, por ejemplo, tapones de seguridad, que por su pequeño tamaño no será posible localizar. Por otro lado, hay que considerar el factor económico. La adquisición del hardware necesario para el funcionamiento de un sistema de localización puede ser costosa, lo que dificulta la



localización de todos los EPIS existentes en una nave industrial. En su lugar, la localización se centrará en equipos con especial interés, bien por ser necesarios en áreas de alta peligrosidad o por ser elementos básicos que se deberían de llevar en todo momento.

Teniendo en cuenta estos factores, los principales equipos de protección individual a localizar serían: mascarillas con filtros de partículas, escafandra, traje antiácido en procesos de decapado y arnés. Estos equipos son de especial interés por ser necesarios en tareas que presentan riesgos adicionales y donde se debe de hacer un mayor esfuerzo en comprobar que se utilizan correctamente. Además, tienen un tamaño suficiente como para poder llevar un dispositivo. Por otro lado, también se localizarán los cascos, ya que son un elemento básico de seguridad necesario en la mayoría de las tareas a realizar. Las pruebas de validación se realizarán sobre algunos de estos equipos que sean fácilmente accesibles para CTIC.

Además de los Equipos de Protección Individual, en todo proceso de fabricación no continuo existen una serie de equipos y herramientas que deben utilizarse en distintas zonas de trabajo de la planta por existir un número limitado de los mismos. Estos equipos y herramientas se van desplazando por la planta en función de las necesidades de la producción, por lo que es importante poder localizarlos para saber en cada momento su ubicación real. Los equipos y herramientas a tener en cuenta en este punto, son recursos utilizados habitualmente en plantas metalmecánicas para los trabajos y procesos más comunes como son, entre otros:

- Procesos de soldadura (por ejemplo, máquinas de arco sumergido, pórticos de soldadura...).
- Procesos de taladrado (por ejemplo, taladros de bandera).
- Procesos de montaje de piezas o estructuras (por ejemplo, ensambladores móviles o curvadoras de tubos).
- Útiles de uso general en todos estos procesos (como por ejemplo un carro de transporte de herramientas o material).

De forma análoga al caso de los EPIS, la siguiente tabla muestra imágenes de estos equipos o herramientas, así como su tamaño. En todos los casos, se trata de recursos más voluminosos que los equipos de protección individual, por lo que no se deberían encontrar problemas a la hora de acoplar una baliza móvil.

Equipo / Herramienta	Foto	Tamaño
<i>Máquinas de arco sumergido.</i>		Grande



<i>Pórticos de soldadura.</i>		Grande
<i>Taladros de bandera.</i>		Mediano
<i>Ensambladores móviles.</i>		Mediano
<i>Carros de transporte.</i>		Grande
<i>Curvadora de tubos</i>		Grande

Su localización en tiempo real puede suponer una importante mejora en el proceso productivo, ya que puede permitir a futuro optimizar los movimientos de los recursos de una zona a otra de trabajo dentro de la planta y calcular rutas óptimas para su traslado, interfiriendo lo menos posible con otras zonas de trabajo y evitando



movimientos innecesarios. En consecuencia, los procesos serían más eficientes.

Al igual que sucede en los EPIs, para poder localizarlos se deben de tener en cuenta dos factores:

- **Tamaño.** Deben tener un mínimo de superficie para poder portar un dispositivo de localización
- **Economía.** Puesto que la adquisición de dispositivos de localización supone un coste, la localización se centrará en aquellos equipos y herramientas de mayor interés.

Atendiendo a estos factores, los dispositivos a localizar serían carretones de transporte, pórticos de soldadura, ensambladores móviles, taladros de bandera, viradores y expansores de tubos. Estas herramientas son comúnmente utilizadas en los procesos de fabricación y son las que se mueven con más frecuencia entre las diferentes zonas de trabajo, por lo que su localización es más importante. Además, todos ellos tienen un tamaño suficiente como para poder portar un dispositivo de localización. Dado que CTIC no dispone de estas máquinas en sus instalaciones, las pruebas de validación se realizarán con un carro de herramientas.

T1.3: CARACTERIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IDENTIFICACIÓN-LOCALIZACIÓN

Se realizó un estudio comparativo entre todas las tecnologías inalámbricas identificadas, que pueden ser utilizadas en sistemas de localización en entornos de interiores como base para la implantación de la inteligencia investigada en hitos posteriores:

Así, en el proyecto iWhere se han identificado diversas tecnologías que pueden ser adecuadas para su utilización en el caso de uso del proyecto. Destacar que el objetivo de esta tarea no ha sido realizar un estado del arte de tecnologías, sino identificar las principales características que presentan estas tecnologías, para poder seleccionar cuáles utilizar en el proyecto. Por ello, se resumen a continuación las principales características de dichas tecnologías inalámbricas, susceptibles de ser utilizadas para localización en interiores

- **RFID:** Sistema de transmisión y recepción de datos mediante señales de radio frecuencia, entre una etiqueta (tag) y un dispositivo. Existen dos tipos de etiquetas RFID según cómo emitan sus datos, las etiquetas activas, a diferencia de las pasivas, tiene batería o fuente de alimentación propia, lo que proporciona capacidad de memoria y mayor alcance en la transmisión de la información.

Una de las principales características de esta tecnología es la posibilidad de recibir información de las etiquetas dispersas por el entorno a través de radiofrecuencia y sin necesidad de que exista contacto físico entre el dispositivo lector y el transpondedor. No obstante, la distancia no podrá superar un cierto valor máximo impuesto por la potencia de transmisión máxima y la potencia de recepción mínima detectable (las precisiones obtenidas oscilan entre los 5 y 100 m). Por otro lado, presenta el inconveniente de que no es compatible con Smartphone, lo que hace que su uso requiera de una infraestructura más compleja y con un coste elevado.

- **ZigBee:** Protocolo de comunicación inalámbrica caracterizado por su bajo consumo, topología de red en malla y su baja demanda de electrónica en comparación con otras tecnologías inalámbricas. Además, el hardware necesario para implementar la arquitectura es más accesible que el de RFID. El bajo consumo característico de esta tecnología es posible gracias a una estrategia de comunicaciones, en la que el nodo móvil permanece en stand-by, de modo que sólo se activa durante una fracción de segundo para enviar una señal.



La principal ventaja que presenta es la facilidad a la hora de implementarlo en un sistema de control. Sin embargo, presenta el gran inconveniente de una baja capacidad de transmisión, lo que restringe el uso de esta especificación para usos muy concretos y actividades que requieran poco intercambio de datos, como accionar un interruptor de la luz o monitorizar un sensor de temperatura o luminosidad. La precisión normalmente obtenida mediante esta tecnología es limitada, oscilando entre los 3 y 10 m.

Como en RFID, esta tecnología no es común en dispositivos móviles actuales y por tanto su implantación requerirá de un coste adicional en infraestructura y en desarrollo.

- **Beacons:** Dispositivos que emiten señales de onda corta por medio de la tecnología Bluetooth de baja energía. Emiten periódicamente paquetes al aire con información, que incluye identificadores UUID, que identifican inequívocamente un dispositivo. Este comportamiento hace que actúen como balizas, lo que permite que un objeto se pueda referenciar respecto a varias balizas, determinando su posición. Las comunicaciones se realizan por radiofrecuencia, por lo que los dispositivos no tienen que estar alineados para comunicarse, pudiendo incluso estar en habitaciones separadas si la potencia de transmisión es suficiente. Para su funcionamiento utilizan una fuente de alimentación, en la mayoría de los casos una batería de botón, que, dependiendo del uso, puede durar hasta años.

La principal ventaja de esta tecnología es su compatibilidad con Smartphone, lo que reduce la necesidad de adquirir hardware específico y, por tanto, los costes de implantación. También cabe destacar que no es necesaria una conexión activa con los beacons, estos emiten señales cada cierto tiempo que cualquier dispositivo puede leer.

- **WiFi:** Es una tecnología inalámbrica concebida para la interconexión sin cables de múltiples dispositivos. Se basa en la red libre de 2.4Ghz y se ha convertido en uno de los estándares más populares para acceder a internet. Los sistemas existentes que utilizan el WiFi como plataforma para la localización en interiores no requieren de una conexión con el punto de acceso (AP, Access Point) WiFi, simplemente necesitan recoger los datos que estos emiten cada cierto tiempo para hacer un cálculo de la distancia al AP en base a la intensidad de la señal recibida (RSSI) y a la MAC del AP. El uso de WiFi permite que cualquier Smartphone fabricado hoy en día, con el software adecuado, pueda calcular su posición en base a los APs cercanos.

La precisión de las medidas de distancia depende en gran medida del entorno (paredes, muebles, personas, otras redes WiFi...). Una de las ventajas que tiene el WiFi es que puede usarse para decir en qué planta de un edificio nos encontramos, cosa que no se podría hacer de manera fiable con el GPS. El uso de WiFi plantea otra ventaja y es que no es necesaria en muchos casos la instalación de APs, ya que estas ya se encuentran instaladas para proporcionar el acceso a internet a diferentes dispositivos.

Las principales ventajas son el amplio despliegue existente de estas redes, así como de dispositivos adaptados para su uso y no requerir una conexión activa con la red. También se destaca su amplio alcance, ya que una red WiFi en un espacio abierto puede llegar a cubrir hasta 150m a su alrededor.

Por otro lado, una concentración excesiva de APs puede generar interferencias y falsear las señales recibidas. También cabe tener en cuenta que los mensajes que envían generalmente los APs para su descubrimiento, y que nuestra aplicación utilizaría para los cálculos, pueden demorarse hasta 30 segundos, lo que impediría una visualización en tiempo real de la posición del objeto. El amplio alcance también lo hace poco preciso, con entre 5 y 15 metros de precisión.



- **Ultra Wideband:** Utiliza una señal de radiofrecuencia con un gran ancho de banda (500 Mhz) en la banda de los 3-10 Ghz, lo que le permite enviar una gran cantidad de información utilizando muy poca energía. La posición de los objetos se calcula mediante las pequeñas diferencias de tiempo de llegada de las diferentes señales de radiofrecuencia que emite para calcular la distancia desde el punto de referencia hasta el objetivo. El objetivo ha de portar un pequeño chip con alimentación eléctrica que envía unos parámetros a las antenas receptoras. Deben existir al menos tres antenas para poder realizar la triangulación con una precisión de entre 10 y 30cm.

Las principales ventajas son el gran alcance de hasta 150 metros, ausencia de interferencias en las bandas que utiliza y una precisión casi centimétrica.

Las principales desventajas de esta tecnología son la necesidad de sincronización precisa entre lectores, que la detección de llegada de pulsos se realiza mediante filtros adaptados y que la estimación se basa en la medida de TOA (*Time Of Arrival*), dado que AOA (*Angle Of Arrival*) es inservible por el multicamino. Por otro lado, el uso de esta tecnología requiere una inversión tanto en hardware para los receptores (antenas) y los chips localizadores, como en software pues no es una tecnología que se encuentre integrada en los dispositivos de hoy en día como si hacen Bluetooth o WiFi.

- **Basado en imagen:** También conocidas como métodos ópticos, utilizan métodos de visión por computador para la localización de personas u objetos. Esta tecnología no se limita a interiores, pero depende en gran medida de la información que se pueda obtener de la cámara de video utilizada para tal propósito. Estos sistemas utilizan algoritmos que detectan patrones en las imágenes y capturan el movimiento y profundidad de los mismos para asignarles una posición en un espacio dado.

La existencia de ángulos muertos, malas condiciones de visibilidad debidas al polvo por ejemplo y otros condicionantes del sector metalmecánico hacen que la detección basada en imagen tenga que utilizar cámaras especiales, lo que incrementa en gran medida el coste de implantación.

Tras este análisis de tecnologías disponibles, se ha decidido que las tecnologías seleccionadas para las investigaciones del proyecto serán Beacons, Bluetooth, RFID y ZigBee, por ser las tecnologías que ofrecen una mejor relación prestaciones-precio de entre las analizadas. En documentos posteriores del proyecto se profundizará en ellas, se describirán los experimentos a realizar y, en función de todo ello, cuál es la tecnología seleccionada para la implementación final.

Hito 2: Investigación en lógica de localización.

T2.1: GENERACIÓN DE LÓGICA-ALGORITMOS PARA LOCALIZACIÓN DE OBJETOS

Una vez finalizado el análisis del estado del arte realizado en el Hito 1, en el que se identificaron y analizaron las tecnologías disponibles para la localización de objetos y teniendo en cuenta los condicionantes de dichas tecnologías, así como el grado de precisión requerido en la localización de los recursos:

- Se han identificado y analizado los parámetros de la señal recibida que se pueden medir y que, por tanto, se deben tener en cuenta: potencia de la señal recibida, ángulo y tiempo de llegada, diferencia en los tiempos de llegada, etc.



- Se han identificado y analizado las diferentes técnicas de localización, escogiendo para su utilización en el proyecto la más adecuada: “Basadas en balizas”, utilizando para ello el modelo de propagación, basado en técnicas de triangulación.
- Se ha generado la lógica para la localización y posicionamiento de objetos.

A continuación, se describen con más detalle dichos trabajos:

Parámetros de la señal recibida.

La señal recibida emitida y recibida por los diferentes nodos de comunicaciones ubicados en un determinado entorno, presenta una serie de parámetros característicos que pueden ser susceptibles de utilizarse para extraer información sobre la localización del objetivo. Estos parámetros están relacionados con la energía, el retardo o la dirección de la señal. A continuación, se describirán estos parámetros prestando más atención a aquellos más relevantes.

Potencia de la señal recibida.

La potencia de señal recibida o por sus siglas inglesas RSSI (Received Strength Signal Indication), se corresponde con una medida de la potencia de señal presente en el receptor tras la correspondiente emisión del transmisor. Por tanto, si se conocen la potencia de transmisión y la potencia de recepción, se puede realizar una estimación de la distancia existente entre ambos a través del modelo de propagación. Como puede verse en la siguiente figura, la intensidad de la señal (RSSI) es proporcional a la distancia.

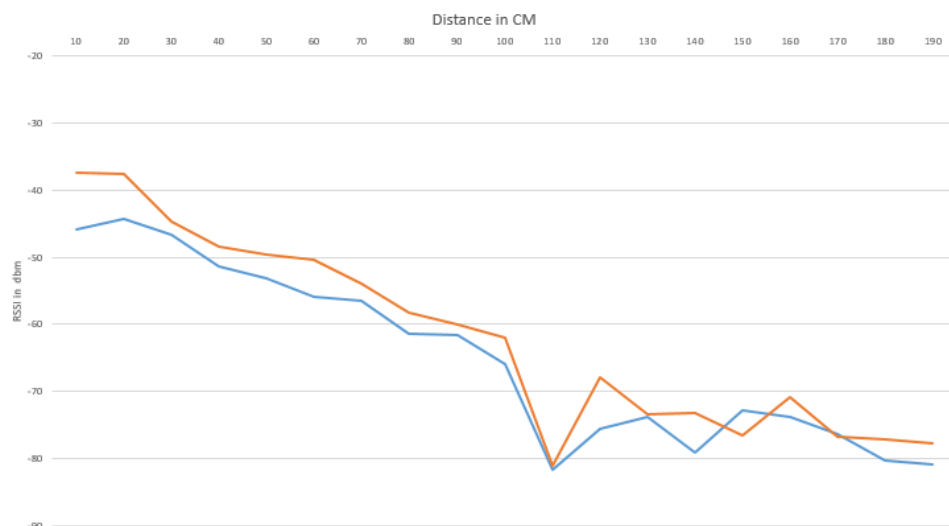


Figura 1: Relación RSSI / distancia.

En el espacio libre, el RSSI varía con el inverso al cuadrado de la distancia que separa el transmisor del receptor. Si se denota por $P_r(d)$ a la potencia recibida, ésta se puede relacionar con la distancia d a través de la ecuación de Friis:

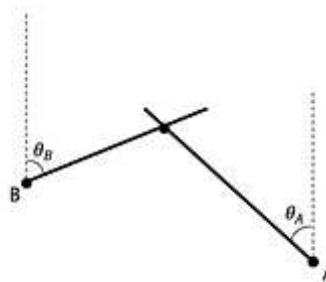


$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi^2) d^2}$$

Donde P_t es la potencia transmitida, G_t es la ganancia de la antena de transmisión, G_r es la ganancia de la antena de recepción y λ la longitud de onda de la señal transmitida en metros.

Ángulo de llegada.

Este parámetro expresa el ángulo con el que el nodo receptor recibe la señal procedente del emisor. Para poder utilizarlo con el fin de localizar algún objetivo, es necesario disponer de un conjunto de antenas que permitan determinar los diferentes ángulos con los que se recibe la señal, lo que permitirá trazar líneas rectas indicadoras de la dirección de procedencia de la señal. El punto de intersección de todas ellas dará el punto del nodo a localizar. Para ello, es necesario realizar una observación de la diferencia en los tiempos de llegada en los diferentes elementos de la antena de geometría conocida.



(b) Angulation

Figura 2: Angulación.

Tiempo de llegada.

Se corresponde con el tiempo que tarda una señal, generada en el transmisor, en alcanzar el receptor y viceversa. Este tiempo se puede usar para realizar una estimación de la distancia existente entre ambos dispositivos.

Un factor importante a tener en cuenta, es la necesidad de mantener una base de tiempos común que permita conocer el instante en el que se inició la transmisión.

Por este motivo, un requisito imprescindible es la sincronización de la red, de tal forma que todos los nodos estén perfectamente sincronizados con el nodo emisor, o bien, sean capaces de intercambiar la información de temporización pertinente mediante algún protocolo.

Diferencia de tiempos de llegada.

Este parámetro se basa en la medida de la diferencia entre los tiempos de llegada de la señal procedente del objetivo a localizar a las diferentes balizas estáticas (o el tiempo de llegada de la señal emitida por las estaciones fijas al dispositivo móvil, en el caso de que la localización esté asistida por un terminal).



Hay que tener en cuenta que, la curva cuyos puntos satisfacen la condición de que su distancia a dos referencias es una constante, es en realidad una hipérbola. Si se calcula esta correlación para varios pares de estaciones, la intersección de las hipérbolas resultantes muestra el punto donde se encuentra el terminal móvil. Este tipo de parámetro se utiliza en la tecnología Ultra Wideband para la localización de objetivos.

Técnicas de localización.

Las técnicas de localización se clasifican en cuatro grupos:

- *Basadas en balizas.* Algunos nodos conocen sus posiciones absolutas, de tal forma que la distancia estimada a las balizas puede obtenerse por interacción directa con éstas. Dicha interacción puede ser de un solo salto si interviene una única baliza o multisalto si colaboran diversas balizas intermedias.
- *Balizas libres.* Ninguno de los nodos conoce su posición. Por este motivo, sólo se puede hablar de coordenadas relativas o virtuales, debido a que se desconocen las posiciones absolutas de las mismas.
- *Basadas en el rango.* Las medidas proporcionan una especie de información sobre la distancia o ángulo de los nodos.
- *Rango libre.* Sólo aportan información sobre la conectividad.

Para la solución final utilizaremos las técnicas basadas en balizas.

Por su parte, los sistemas más utilizados en posicionamiento se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- *Modelos empíricos.* Son aquellos en los que el sistema de posicionamiento a construir se basa en la recolección de información del entorno "*a priori*". Dicha información debe ser clasificada y almacenada en base de datos, siguiendo modelos de "*minería de datos*".
- *Modelos de propagación.* Se basan en los sistemas de radioenlaces y las técnicas de multitrayecto de la señal de radiofrecuencia. La posición se obtiene usando como referencia los puntos de acceso más cercanos.

En este proyecto se utilizarán únicamente métodos basados en modelos de propagación, por ser los más adecuados para el sistema de localización pretendido. Estos métodos consisten en el empleo de técnicas de triangulación, que se describen a continuación.

Métodos de triangulación.

Los métodos de triangulación se basan en las propiedades geométricas de los triángulos para calcular la posición de los objetos. Los diferentes algoritmos utilizados para efectuar la triangulación pueden ser divididos en dos categorías: lateración (uso de medidas de distancias) y angulación (utilización de la medida de los ángulos).

Lateración.

Se define como el cálculo de la posición a partir de las medidas de distancias efectuadas. Es necesario tener en cuenta que, para poder llevar a cabo la localización en una superficie de dos dimensiones, se necesitan al menos



tres medidas de distancias no co-lineales. La técnica consiste en que, el dispositivo a localizar, envíe una señal a todos los nodos fijos a su alcance, comunicando éstos al sistema que se encarga de ejecutar el algoritmo. Las medidas de la potencia de señal recibida permiten trazar unas circunferencias, cuyo centro es cada uno de los nodos. La ubicación del objetivo se halla mediante la intersección de dichas circunferencias.

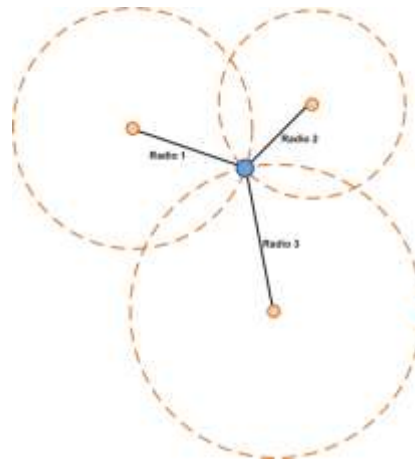


Figura 3: Métodos de triangulación: Lateración.

Angulación.

Este método permite calcular la posición a partir de las medidas de ángulos. Para poder localizar un objetivo en una superficie de dos dimensiones, la angulación requiere de dos medidas de ángulos y una medida de longitud, como puede ser la distancia entre los nodos de referencia.

Para esta técnica, los arrays de antenas sincronizadas son una excelente tecnología. Al disponer de múltiples antenas con una separación conocida, el tiempo de llegada puede ser calculado. Teniendo en cuenta las diferencias en el tiempo de llegada y la geometría del array receptor, es posible calcular el ángulo del segmento que une el receptor con la fuente de transmisión.

Si hay suficientes elementos en el array y la separación entre ellos es lo suficientemente grande, los valores obtenidos por el mecanismo de angulación pueden ser muy precisos.

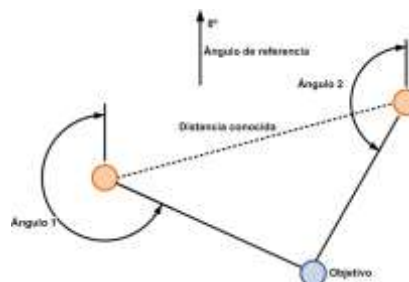


Figura 4: Métodos de triangulación: Angulación.



Algoritmos.

Para finalizar, se analizan a continuación los algoritmos de localización y posicionamiento basados en la intensidad de la señal recibida, con el fin de generar la lógica que se aplicará al sistema de localización iWhere.

Multilateración.

Consiste en la intersección de, como mínimo tres círculos, centrados cada uno de ellos en las coordenadas de los correspondientes nodos de localización. La posición del objetivo se corresponderá con la intersección de estos círculos. Si se define el parámetro e_i como el error cometido entre la distancia medida y la distancia resultante de estimación de la posición, se obtiene:

$$e_i = r_{it} - \hat{r}_{it} = r_{it} - \sqrt{(\hat{x}_t - x_i)^2 + (\hat{y}_t - y_i)^2}$$

Donde r_{it} representa la distancia medida por el nodo de localización con respecto al objetivo, las coordenadas (\hat{x}_t, \hat{y}_t) la posición estimada del objetivo, y las coordenadas (x_i, y_i) conocidas del nodo de localización.

Algoritmo Min-Max.

Este algoritmo surge para simplificar el algoritmo de multilateración, que, al requerir operaciones matriciales en punto flotante, es muy costoso.

La idea consiste en construir un rectángulo que actúa de frontera para cada nodo de localización. Dicho rectángulo se encuentra centrado en las coordenadas de cada nodo. En concreto, las esquinas de cada uno de estos rectángulos coincidirán con el siguiente valor:

$(x_i - d_i, y_i - d_i) \times (x_i + d_i, y_i + d_i)$

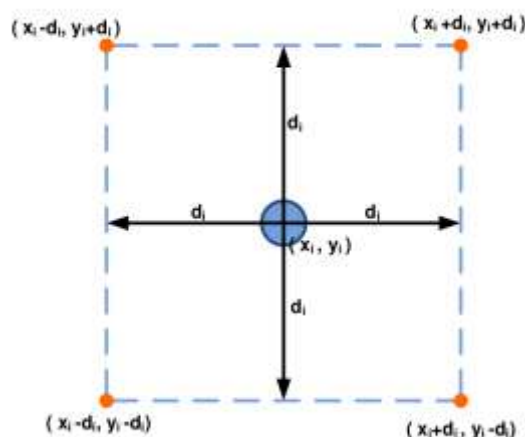


Figura 5: Representación gráfica del algoritmo Min-Max.

La posición estimada se obtiene como el centro de la intersección de estos rectángulos. Para ello, basta con determinar el mínimo de todas las coordenadas máximas y el máximo de todas las coordenadas mínimas.

Multilareación iterativo.

Utiliza el valor obtenido por el algoritmo de lateración como semilla de un proceso iterativo, donde se somete la posición estimada a un proceso de refinamiento. Para ello, se define una función de error parcial f_i relativa a cada nodo de localización:

$$f_i = \frac{1}{d_i} \cdot (d_i - \sqrt{(x_i - \widehat{x}_e)^2 + (y_i - \widehat{y}_e)^2})$$

Donde d_i representa la distancia estimada mediante la calibración del canal de propagación, (x_i, y_i) son las coordenadas del nodo de localización y $(\widehat{x}_e, \widehat{y}_e)$ son las posiciones estimadas mediante el algoritmo de multilateración.

Malguki.

Este algoritmo está basado en un símil mecánico, en vez de la intensidad de la señal recibida. Aunque la documentación de proyecto especifica que los algoritmos a utilizar deben estar basados en la intensidad de la señal recibida, se ha decidido aprovechar que este algoritmo también se aplica en nodos, para obtener resultados con una metodología diferente. De este modo, los resultados obtenidos permitirán contrastar la precisión obtenida mediante RSSI.

Los nodos de localización se consideran como masas que están unidas entre ellas mediante una fuerza elástica similar a la de un muelle. Por tanto, cada muelle representa una restricción para la posición del nodo y su fuerza está relacionada con la distancia estimada que une dichos nodos. Cuando los nodos se ubican en la posición determinada por el conjunto de distancias estimadas, entonces los muelles no deberán efectuar ningún tipo de fuerza que corrija dicha posición. No obstante, si el nodo estuviera desplazado con respecto a la posición estimada, entonces los muelles actuarían ejerciendo una fuerza sobre dicho nodo tal que permitiese trasladarlo hacia la posición estimada. De esta forma, el error global de la posición se reducirá al mínimo. Con este proceso, se consigue reducir la energía elástica de todo el sistema cuando los nodos se encuentran en su posición final.

Si se representa por \vec{r}_i a la posición ocupada por el nodo de localización, entonces la fuerza elástica \vec{m} producida por los muelles se podrá determinar como la suma de cada una de las fuerzas, es decir:

$$\vec{m} = \sum_{i=1}^N \vec{m}_i = \sum_{i=1}^N (d_i - |\vec{r} - \vec{r}_i|) \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} = \sum_{i=1}^N \psi(u_i) \vec{r}_i$$

$$\psi(u_i) = u_i = d_i - |\vec{r} - \vec{r}_i|$$

Los términos que aparecen en la ecuación se corresponden con:

- \vec{m}_i : fuerza elástica ejercida por el nodo de localización sobre el objetivo.
- d_i : distancia estimada del nodo de localización con respecto al objetivo que se desea localizar.
- $|\vec{r} - \vec{r}_i|$: módulo de la distancia existente entre el nodo de localización y el objetivo cuya posición se desea estimar.



- $\hat{r}_l = \frac{\vec{r} - \vec{r}_l}{|\vec{r} - \vec{r}_l|}$ vector unitario que marca la dirección relativa del objetivo a posicionar frente al nodo de localización
- $\psi(u_i)$ función escalar que depende de la relación $d_i - |\vec{r} - \vec{r}_l|$

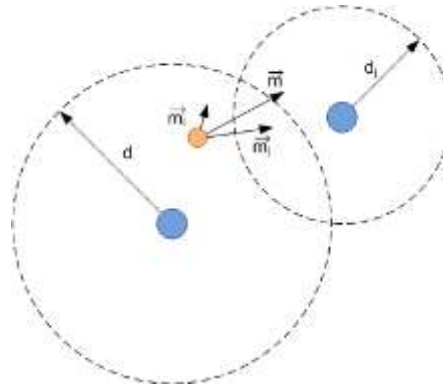


Figura 6: Representación gráfica algoritmo Malguki.

El objetivo principal de este algoritmo es minimizar el error global dado por la suma de todos los errores parciales. Esta tarea se puede llevar a cabo de una forma eficaz teniendo en cuenta que la fuerza elástica total \vec{m}_l tiene la misma dirección y sentido opuesto que el gradiente de la función del error. En consecuencia, para una posición dada por \vec{r} , la fuerza \vec{m}_l mostrará en qué dirección debe corregirse ésta para reducir el error asociado. El vector nuevo de fuerza será indicado mediante un vector desplazamiento $\Delta\vec{r}_l$, usando un parámetro (γ) como factor de conversión.

T2.2: GENERACIÓN DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN Y ENVÍO

A través del trabajo desarrollado durante este tiempo se han podido definir las condiciones que se tienen que dar para garantizar la comunicación efectiva entre los sensores incorporados a los recursos que se desean localizar, (también llamados “nodos móviles”) y los sensores que determinan su posición (denominados nodos fijos).

El estudio de protocolos de comunicación se ha realizado atendiendo a cada una de las tres tecnologías inalámbricas que se han seleccionado para el proyecto iWhere. Se describen a continuación los protocolos de comunicación y envío empleados en cada una de estas tecnologías inalámbricas.

RFID activo:

Se ha decidido utilizar el protocolo LLRP universal, por ser el sistema de comunicación estandarizado y comúnmente adoptado para comunicar lectores RFID y aplicativos de software.

El proveedor del protocolo de lectura de bajo nivel proporciona integración con cualquier dispositivo compatible con el protocolo LLRP. Utiliza un canal dúplex WCF (Windows Communication Foundation) para



comunicarse. El canal WCF gestiona las solicitudes de codificación y decodificación LLRP, las respuestas y los mensajes de notificación.

El funcionamiento básico del protocolo LLRP es el siguiente:

- Configura el lector según las necesidades establecidas por el usuario.
- Envía comandos de operaciones al lector RFID. Estos comandos son llamados Reader Operation Specification (ROSpec) y contienen una lista de comandos secuenciales para la operación de lectura llamados Antenna Inventory Specifications (AISpec).
- Envía al lector Acces Specifications (AccessSpec), comandos para decir al lector que operaciones (tanto de lectura como de escritura) de acceso a datos tiene que realizar sobre el tag.
- Obtención de información por parte del lector RFID.

ZigBee:

Hace referencia a un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal.

Utiliza la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos, en concreto, 868 MHz en Europa, 915 en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo. En este proyecto se ha decidido optar por la banda de 2,4 GHz, por ser libre en todo el mundo.

Beacons:

Emiten señales sobre Bluetooth 4.0 en formato Eddystone-UID. Se escoge este protocolo por tener soporte oficial en las plataformas iOS y Android y por ser abierto. Se caracteriza por asignar un UUID a cada Beacon, lo que permite identificarlo de forma unívoca. Dicho UUID está formado por 16 bytes, que se dividen en dos partes:

- Namespace: se corresponde con los primeros 10 bytes. Se utiliza el mismo en todos los Beacons del proyecto para diferenciarlos de los de otros proyectos.
- Instance: se corresponde con los últimos 6 bytes. Se utilizan para diferenciar cada Beacon individual.

Por otro lado, Bluetooth es un protocolo de comunicaciones diseñado especialmente para dispositivos de bajo consumo, que requieren corto alcance de emisión, como es el caso de los Beacons. Está definido como un protocolo de arquitectura de capa. Toda pila de protocolos de Bluetooth debe tener, como mínimo, los siguientes protocolos: LMP, L2CAP y SDP.

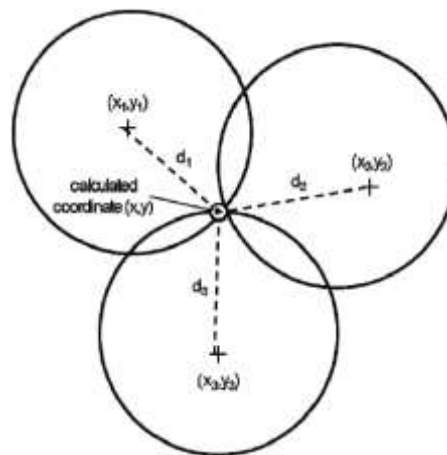
Generación de un protocolo robusto en entorno industrial.

El protocolo de comunicación entre el nodo móvil (recurso a localizar) y los nodos fijos (sensores que determinarán la posición) elegido (LLRP para RFID activo, ZigBee en la banda de 2,4GH o Bluetooth para Beacons), debe ser capaz de solventar los principales problemas que surjan en un entorno como el industrial y



que se traducen en una pérdida de conexión entre el nodo móvil y los nodos fijos. Para asegurar la robustez de la comunicación, se ha implementado un protocolo de comunicación con las características que se muestran a continuación. Indicar en este punto, que el código que se plasma aquí a modo de ejemplo corresponde al protocolo Beacons – Bluetooth.

El uso del protocolo Bluetooth para localización en interiores se basa en el hecho de que los dispositivos Bluetooth proveen del dato de nivel de señal recibida (RSSI por las siglas del inglés Received Signal Strength Indicator). Este indicador nos permite deducir la distancia con el dispositivo Bluetooth, ya que la señal decrece en potencia con el cuadrado de la distancia. Por tanto, sabiendo la posición de los nodos Bluetooth fijos y la distancia a al menos tres de ellos, es posible calcular un punto triangulando la señal.



El método de triangulación utilizado se denomina trilateración. Este método utiliza tres puntos de referencia y las distancias a cada uno de ellos, por lo que encaja perfectamente con los datos que podemos obtener. El método se basa en hallar las intersecciones entre las tres circunferencias que se forman con centro en los nodos fijos. Estas intersecciones retornarán uno o dos puntos en los que se localiza la baliza objetivo. Estos puntos se obtendrán al resolver estas ecuaciones:

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \\ d_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \end{cases}$$

Conociendo las distancias y los puntos fijos (x_1, y_1) , (x_2, y_2) y (x_3, y_3) , se resolverán las variables x e y que representan el punto de corte. Esto suponiendo que exista un solo punto de corte, para resultados más complejos en los que no exista un punto, sino un área de corte, la solución sería más compleja.

A continuación, se puede ver un pequeño bloque de código extraído de la sección del programa encargada de implementar el mecanismo visto previamente. Este bloque recorre los Beacons activos para extraer las distancias aproximadas de cada uno de ellos y aplicar la triangulación.



```
beaconManager.setRangeNotifier(new RangeNotifier() {
    @Override
    public void didRangeBeaconsInRegion(
        final Collection<Beacon> activeBeacons, Region region) {
        runOnUiThread(new Runnable() {
            @Override
            public void run() {
                for (int pos = 0; pos < selectedBeacons.length; pos++) {
                    Iterator iteraActivos = activeBeacons.iterator();
                    Beacon auxiliarNextActivo;
                    while (iteraActivos.hasNext()) {
                        auxiliarNextActivo = (Beacon) iteraActivos.next();
                        if (auxiliarNextActivo
                            .getBluetoothAddress()
                            .equals(selectedBeacons[pos]
                                .getBluetoothAddress())) {
                            distanciaMetros[pos] = auxiliarNextActivo
                                .getDistance();
                            posiLocal = localiza.posiciones(
                                coordenadax,
                                coordenaday,
                                distanciaMetros);
                            Log.d(
                                "Prueba",
                                "Coords: " + posiLocal[0] + " " + posiLocal[1]);
                        }
                    }
                }
            }
        });
    }
});
```

Mecanismos Adicionales de Robustez

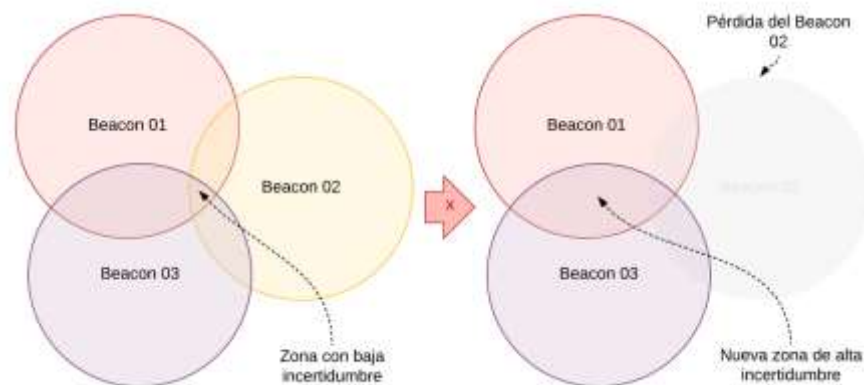
Aunque la tecnología de localización por Bluetooth es razonablemente robusta es de esperar que surjan problemas de disponibilidad con los Beacons desplegados. Es decir, en un entorno agresivo se debe considerar la posibilidad de que algún Beacon deje de funcionar por avería, o que la cobertura se pierda repentinamente por un crecimiento repentino del ruido electromagnético.

Como se ha comentado en el punto anterior, la efectividad en la localización se basa en la triangulación a partir de, al menos, 3 nodos. Por ello, el mecanismo de robustez buscado e implementado es aquel que pueda



solventar la pérdida de señal de alguno de los nodos, de forma que el nodo móvil no tenga forma de triangular la señal con 3 nodos fijos.

Cuando una localización se ha obtenido por triangulación y se produce la caída repentina de un Beacon, la zona de incertidumbre de localización crece en consecuencia. Este problema se puede ver descrito en el gráfico a continuación.



Para reducir el impacto de esta situación se ha diseñado un mecanismo de robustez que se ha implementado mediante dos procedimientos o características complementarias. Por un lado, el sistema está controlando de forma constante la disponibilidad de los nodos cercanos para verificar que se puede acceder a la señal que proporcionan dichos nodos. Por otro lado, y en caso de que se pierda la comunicación con alguno de esos nodos, entra en juego un algoritmo que “completa” la información que se ha perdido a partir de una memoria de localizaciones, que reduce la incertidumbre derivada de esa pérdida de señal.

Se describen a continuación estas dos características:

Disponibilidad de nodos.

Esta característica implementa un controlador de nodos, que monitoriza en todo momento qué nodos están disponibles o no para, posteriormente, aplicar el código mostrado en el apartado anterior y extraer mediante él la distancia a cada uno de los nodos.

A continuación, se muestra el código de dicho controlador.

```
public void onBeaconServiceConnect() {
    beaconManager.setMonitorNotifier(new MonitorNotifier() {
        @Override
        public void didEnterRegion(Region region) {
            Log.i(TAG, "I just saw an beacon for the first time!");
        }

        @Override
        public void didExitRegion(Region region) {
            Log.i(TAG, "I no longer see a beacon");
        }
    });
}
```



```
    }

    @Override
    public void didDetermineStateForRegion(int state, Region region) {
        Log.i(TAG, "I have just switched from seeing/not seeing beacons: " + state);
    }
});

try {
    beaconManager.startMonitoringBeaconsInRegion(new Region("myMonitoringUniqueId", null, null,
null));
} catch (RemoteException e) {
}

beaconManager.setRangeNotifier(new RangeNotifier() {
    @Override
    public void didRangeBeaconsInRegion(final Collection<Beacon> activeBeacons, Region region) {
        runOnUiThread(new Runnable() {
            @Override
            public void run() {

                ActiveBeacons = activeBeacons;

                for (int pos = 0; pos < selectedBeacons.length; pos++) {
                    Iterator iteraActivos = ActiveBeacons.iterator();
                    Beacon auxiliarNextActivo;
                    while (iteraActivos.hasNext()) {
                        auxiliarNextActivo = (Beacon) iteraActivos.next();
                        if
(auxiliarNextActivo.getBluetoothAddress().equals(selectedBeacons[pos].getBluetoothAddress())) {
                            distanciaMetros[pos] = auxiliarNextActivo.getDistance();
                            posiLocal = localiza.posiciones(coordenadax, coordenaday,
distanciaMetros);
                            Log.d("Prueba", "The coordinates of point U are " + posiLocal[0] + "
" + posiLocal[1]);
                        }
                    }
                }
            }
        });
    }
});
});
```

Memoria de Localizaciones

En caso de que el procedimiento anterior detecte la pérdida de conexión de alguno de los nodos, este mecanismo reduce la incertidumbre de la siguiente manera.

Cuando la pérdida de cobertura del Beacon es reciente (dentro del orden de segundos) se restringe la posible localización del usuario a las inmediaciones cercanas. Esto permite resistir micro-pérdidas de cobertura probablemente causadas por ruido.

Si la pérdida persiste en el tiempo, la incertidumbre crece de manera inexorable. Para acotar esta incertidumbre se analiza el movimiento perpendicular del usuario con respecto a los Beacons:

- Movimiento perpendicular es aquel que se aleja de manera radial con respecto al Beacon. Es decir,

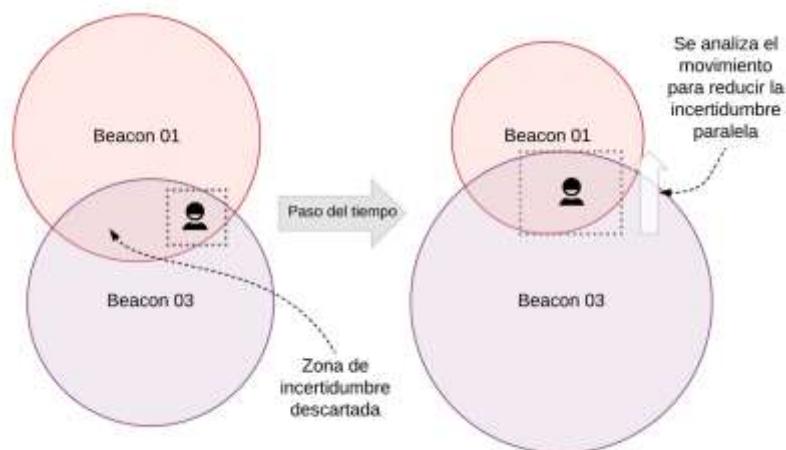


produce un incremento o disminución del nivel de señal recibido por el dispositivo.

- Movimiento paralelo es aquel se mueve en una zona de cobertura constante con respecto al Beacon. Es decir, no produce una variación del nivel de señal.

Si se observa una tendencia de movimiento perpendicular claramente definida se entiende que el usuario no se está moviendo de manera paralela, por lo que se acota dicha incertidumbre paralela dentro de unos límites razonables. Es de destacar que la efectividad de este método decrece proporcionalmente con el tiempo, hasta que se llega a un punto en el que se desactiva completamente.

A continuación, se puede ver un gráfico que describe este comportamiento.



El siguiente fragmento de código recoge el algoritmo descrito en esta sección:

```
using_location_memory = false
timestamp_last = null

func get_current_location:
    current_location = get_location_from_active_beacons()

    location_history_buffer.add(current_location)

    enough_active_beacons =
        get_num_active_beacons() >= min_num_beacons

    if enough_active_beacons:
        using_location_memory = false
        timestamp_last = now()
        return current_location
    else if is_beacon_loss_detected() and timestamp_last != null:
        using_location_memory = true
```



```
if !using_location_memory:
    return current_location

time_diff = now() - timestamp_last

if time_diff > max_time_diff_precise_location:
    using_location_memory = false
    return current_location

recent_displacement = get_recent_displacement(
    location_history_buffer)

return fit_location_to_displacement(
    current_location,
    recent_displacement)
```

Hito 3: Montaje experimental.

T3.1: DISEÑO ELECTRÓNICO DE ARQUITECTURA PARA LOCALIZACIÓN.

Durante su ejecución se diseñaron las características de la arquitectura de localización sobre el que se centró la investigación posterior para generar los algoritmos RSSI.

El diseño electrónico de la arquitectura tuvo en cuenta tanto el diseño de aquellos dispositivos móviles seleccionados para ser implantados en los recursos a identificar, como los dispositivos fijos que se colocarían en el entorno y las tecnologías inalámbricas seleccionadas para su utilización (RFID activo, ZigBee y Beacons).

Las distintas arquitecturas de localización en interiores se basan en lo que se denomina redes de nodos, cada una con sus características correspondientes. Es decir, en todas ellas hay una serie de equipos terminales que cooperan entre sí y/o con una estación base para medir y registrar algún parámetro del entorno que los rodea (en este caso la intensidad de la señal recibida), y transmitir de forma inalámbrica la información obtenida a un equipo que la procesará. Las redes de nodos pueden tener diversas aplicaciones que es importante conocer, ya que el diseño de la arquitectura dependerá del uso esperado de las mismas. Las posibles aplicaciones que pueden tener se agrupan en dos grandes categorías según el tipo de seguimiento que se realice del objeto. Estas se explican a continuación:

- **Detección de sucesos.** El seguimiento se basa en la detección del objetivo a su paso por determinados puntos específicos indicados en el sistema (una puerta, la entrada a un edificio o un determinado sector de una nave). Para ello, los nodos deberán comprobar los valores obtenidos por parte del sensor con los niveles de disparo, es decir, los valores definidos por el usuario como críticos y a partir de los cuales se consideraría que se ha producido el suceso.

Puede ser de interés en la localización de equipos y herramientas que se utilizan en distintas zonas de



trabajo de una empresa metalmecánica, ya que permite determinar cuándo un determinado elemento pasa por un sector de la misma. Así mismo, también es de interés en la identificación de los EPIs que porta cada trabajador, ya que se permite detectar cuándo un trabajador está en un área de peligro y, por tanto, cuándo es necesario comprobar que porta el equipo de protección adecuado a la tarea que va a realizar.

- **Estimación de procesos aleatorios temporales y espaciales.** Se pretende monitorizar de forma periódica el entorno para localizar el objetivo y seguirlo, estimando la posición del objetivo en el espacio.

A diferencia de la detección de eventos, el envío de la información se realiza de manera periódica, siendo la frecuencia de muestreo establecida un parámetro crítico. Si se elige una frecuencia demasiado baja, puede darse el caso de que no se pueda estimar el proceso aleatorio, debido a que éste varía muy rápidamente. Por otro lado, si la frecuencia es demasiado alta, se estará sobrecargando la red WSN con un volumen de datos muy elevado.

Esta arquitectura es de interés en el proyecto, ya que permite localizar equipos y herramientas en un área determinada, y comprobar si un trabajador lleva el equipo de protección individual de forma continua, no solamente en el momento en el que accede a un área peligrosa.

A continuación, se describe la arquitectura diseñada para cada una de las tecnologías a utilizar:

RFID activo.

La arquitectura a implementar está compuesta por los siguientes elementos:

- 1 tag (chip RFID) activa.
- 3 antenas.
- 3 lectores.
- 1 ordenador.

El elemento a localizar debe portar una tarjeta RFID, que emite información mediante señales de radio frecuencia. En este caso se ha decidido utilizar una tag activa, es decir, una tag con una fuente de alimentación que suministra la energía necesaria para poder transmitir la señal de información.

La información enviada es leída por tres antenas, situadas en ubicaciones de coordenadas conocidas. Cada una de ellas está conectada a un lector, que recibe los datos y los envía al ordenador para su procesamiento por el software servidor. Dicho procesamiento consiste en calcular la distancia que hay entre la tag y cada una de las antenas, mediante la medida de la potencia de la de las señales recibidas.

A continuación, se aplican los algoritmos de localización para determinar la ubicación del elemento que lleva la tag.

La siguiente figura muestra un ejemplo de funcionamiento de un sistema RFID:

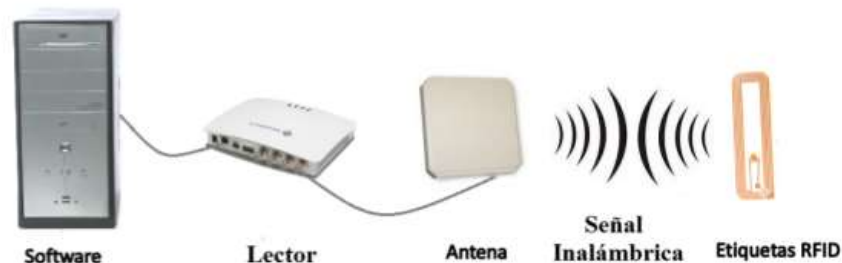


Figura 7: Esquema de funcionamiento de un sistema RFID.

En cuanto al hardware, se han estudiado diferentes dispositivos existentes en el mercado, y se ha concluido que estos productos disponibles en el mercado son suficientes para el propósito del proyecto y por tanto no es necesario desarrollar nuevo hardware o hacer adaptaciones físicas del hardware para adaptarlos a las necesidades de iWhere.

ZigBee.

La arquitectura a implementar está compuesta por los siguientes elementos:

- Red de sensores: se compone de un total de 4 nodos.
- Servidor en el que se reciben los paquetes provenientes desde la red: dispone de una interfaz para la edición de los parámetros de configuración y la visualización de los puntos calculados por el sistema de localización.
- Estación base: es la encargada de actuar de mediadora entre la red inalámbrica de sensores y el ordenador.

Los nodos tienen dos roles diferentes: 3 son puntos de referencia y uno es un nodo móvil.

La ubicación de los puntos de referencia es conocida, por lo que se introducen manualmente las coordenadas de los mismos en el software cliente desarrollado. El nodo móvil, por su parte, se encarga de enviar una secuencia de paquetes a los puntos estáticos cada cierto tiempo, lo que permitirá estimar la distancia entre éste y los nodos fijos a partir de la intensidad de la señal recibida.

Por otro lado, dentro de los nodos que actúan como referencia, hay uno que posee un comportamiento que difiere del resto, ya que se encuentra acoplado a la estación base, lo que lo convierte en el único que puede enviar paquetes hacia el ordenador. Esta información se transmite a través de un cable USB conectado a la estación base hacia el software servidor, el cual se mantiene a la escucha desde un puerto especial de comunicaciones que emplea el nodo.

Finalmente, una aplicación instalada en el servidor, ejecutará los algoritmos para obtener la localización, que se podrá visualizar mediante una interfaz gráfica.



Beacons

La arquitectura a implementar está compuesta por los siguientes elementos:

- Beacons: emiten de forma continua una señal sobre Bluetooth 4.0 en formato Eddystone-UID.
- Dispositivo móvil Android.
- Un ordenador.

El dispositivo móvil tiene instalada una aplicación Android que realiza periódicamente un rastreo de las señales emitidas por los Beacons. Cuando escucha un Beacon, envía la información del mismo al servidor.

Esta información permite obtener la distancia entre el dispositivo móvil y los Beacons mediante la medida de la potencia de la señal recibida. Para ello, es necesario conocer la posición de los Beacons, que se introduce manualmente en el software servidor.

A continuación, se ejecutan los algoritmos de localización en el servidor para obtener la ubicación del dispositivo móvil, que se muestra gráficamente.

T3.2: INTEGRACIÓN DE LÓGICA EN ARQUITECTURA.

Para llevar a cabo esta integración se tuvieron en cuenta los factores que pueden afectar la propagación de las señales (variaciones de temperatura, sombras del mobiliario, etc.) y se buscó la solución más idónea para superar esta barrera. Se analizaron todas las posibles y se optó por la realización de una calibración dinámica que evitara la necesidad de tener que disponer de un mecanismo de caracterización de cada entorno donde se implantara la solución iWHERE.

La lógica de la aplicación se basa, como se ha dicho, en los valores de intensidad de la señal recibida desde el objeto a localizar. Hay que tener en cuenta que la propagación de señales se puede ver afectada por factores tales como la propagación multitrayecto, las variaciones de la temperatura o la aparición de sombras debidas a las máquinas, materiales, mobiliario, etc., del recinto.

Por tanto, el valor RSSI (Received Signal Strength Indicator o indicador de la intensidad de la señal recibida) de la señal es dependiente del entorno por donde se propaga. Para evitar este problema, se puede modelar el valor de RSSI para cualquier valor de la distancia en una localización particular, como una variable aleatoria distribuida logarítmica normal, con un valor medio dependiente de la distancia.

Sin embargo, esta caracterización tiene el inconveniente de que requiere un modelado del entorno donde se está llevando a cabo la localización, lo que provocaría tener que realizar un estudio exhaustivo de cada uno de los posibles recintos donde este sistema se aplicase. Para evitar la necesidad de disponer de un mecanismo de caracterización del medio, se decidió realizar una calibración dinámica.

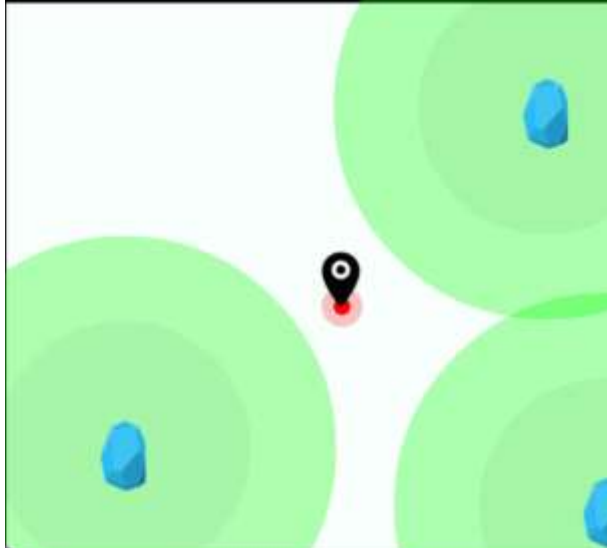


Figura 8: Captura de localización en la aplicación.

Para hacer dicha calibración, se necesita disponer de los valores RSSI entre el objetivo a localizar y los nodos de localización, y además los valores RSSI entre los distintos nodos de localización. Estos valores se obtienen mediante disparos periódicos de paquetes de los cuales se extrae la intensidad de la señal. De esta forma se realiza una estimación del medio físico que compensa las condiciones de propagación del canal.

Una vez realizada la conversión entre los valores RSSI recibidos y un valor de distancia, se efectúa la estimación de la posición del objetivo mediante la aplicación de los algoritmos descritos.

Para ello, se ejecuta una aplicación desarrollada en Java que codifica los diferentes algoritmos. Se aplica la misma aplicación en las diferentes tecnologías a utilizar, siendo necesario un proceso previo de calibrado, ya que cada una de ellas utiliza potencias diferentes.

En el caso de Beacons, se utiliza, además, una aplicación que recoge las señales emitidas por los Beacons y las envía al servidor. Esta aplicación se desarrolla en Android, debido a que el dispositivo que la ejecuta es Android.

Finalmente, para comparar los resultados obtenidos con los diferentes algoritmos, se utiliza Matlab, lo que nos permitirá determinar cuál presenta menor error cuadrático medio, que se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$E_{rms} = \sqrt{(\hat{x}_t - x_t)^2 + (\hat{y}_t - y_t)^2}$$

Los términos \hat{x}_t e \hat{y}_t , representan las coordenadas estimadas, mientras que los términos x_t e y_t hacen referencia a las coordenadas reales del objetivo.

T3.3: CONSTRUCCIÓN DE BANCO DE ENSAYOS PARA EXPERIMENTACIÓN.



El resultado fue la construcción de tres bancos de ensayos que permitieron simular las características de un entorno industrial real.

En la investigación a realizar, se han empleado 3 tecnologías inalámbricas diferentes, para cada una de las cuales se ha diseñado un banco de ensayos. Estos bancos de ensayos serán utilizados en el Hito 4 para testear sobre ellos los diferentes algoritmos de localización, para comprobar la eficacia de los mismos en cada tecnología. Destacar que el algoritmo Malguki no se basa en RSSI, sino en un símil mecánico, que considera los nodos de localización como masas unidas entre ellas mediante una fuerza elástica similar a la de un muelle.

A continuación, se describen los bancos de ensayos diseñados en el ámbito del proyecto.

Banco de ensayos RFID.

El banco de ensayos con tecnología RFID se ha realizado en un área del tamaño de una habitación de aproximadamente 5x5 metros, utilizando 3 antenas para triangular la posición de los objetos.

Sin embargo, al ejecutar el banco de ensayos se ha comprobado que esta tecnología posee limitaciones para ser utilizada en un entorno industrial, y es que para distancias mayores de las mencionadas, estas antenas se vuelven inefectivas debido a que tienen un rango de acción limitado y, sobre todo, a que son altamente direccionales, es decir, que no reciben las señales en todas direcciones, sino solamente las señales que vienen de frente.

Por lo tanto, para escalar este banco a una planta más grande, serán necesarias múltiples antenas para cubrir el máximo área posible. La colocación de dichas antenas se indica en la Figura 9.



Figura 9: Montaje RFID.

En esta imagen se puede apreciar que la solución RFID adolece de una alta direccionalidad y eso provoca que el área efectiva en la que todas las antenas son capaces de leer un tag que porte el recurso a localizar sea bastante reducida.

Para ampliar esta área sería necesario o disponer de aún más antenas o de una antena toroidal que emita en



todas direcciones, lo que elevaría de forma muy importante el precio de implantación y la complejidad de la solución.

A la vista de estas complicaciones técnicas que se han detectado al implementar este banco de pruebas en CTIC, unido al elevado coste del montaje todas las antenas RFID que serían necesarias para cubrir una planta industrial metalmeccánica, esta tecnología se descarta como solución para una empresa metalmeccánica.

Banco de ensayos ZigBee.

Para el experimento con ZigBee ha planteado una solución basada en una red ZigBee de 4 nodos y una base. En la siguiente figura se muestra uno de los nodos ZigBee.

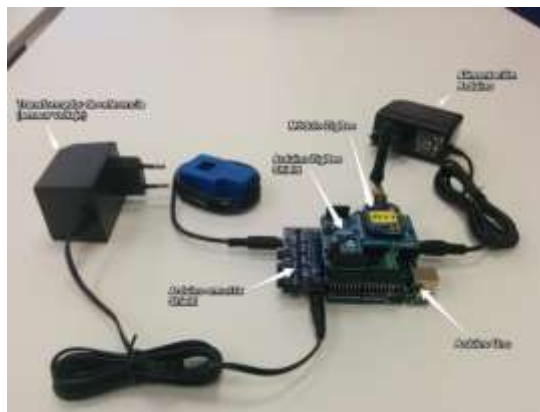


Figura 10: Nodo ZigBee.

Estos nodos se han repartido uniformemente por la habitación (en cada esquina) y se comunican entre ellos. El montaje se representa en la Figura 11.



Figura 11: Montaje conceptual ZigBee.

Al ejecutar este banco de ensayos, se ha detectado un problema derivado de este montaje, y es que en



habitaciones muy amplias, es posible que existan puntos ciegos en la zona central, lo que implicaría la instalación de más dispositivos ZigBee. En la prueba realizada en el banco de pruebas implementado en CTIC, la solución a esta área ciega pasa por la instalación de un quinto dispositivo en el área central.

El problema radica en que, al extender este banco a una planta industrial, no siempre va a ser posible instalar estos nodos de manera adecuada, ya que requieren de un espacio libre para alcanzar su máximo rango y, aún más en este tipo de plantas industriales con las condiciones de entorno comentadas con anterioridad, para dar una medida de la distancia fiable.

De hecho, al ubicar estos nodos en un entorno industrial este rango no es suficiente, por lo que la densidad de nodos necesaria tiene que ser aún mayor para minimizar los fallos por obstáculos.

Por otra parte, no solo sería necesario adquirir todos los dispositivos ZigBee, sino que sería necesario realizar algún tipo de desarrollo que permita a estos emitir en modo Beacon para encontrar al objetivo, el cual también deberá implementar ZigBee y no es algo muy común en los dispositivos actuales (Smartphone, Tablet...). Sería necesario acoplar al objetivo un módulo ZigBee sincronizado con la red ya existente.

Debido a estos motivos y limitaciones aparecidas en la ejecución del banco de ensayos, se descarta escalar este sistema de localización en interiores a una planta industrial.

Banco de ensayos Beacons Bluetooth.

Este banco de ensayos se ha diseñado un montaje con dispositivos denominados beacons, los cuales emiten una señal periódica a todos los dispositivos Bluetooth cercanos.

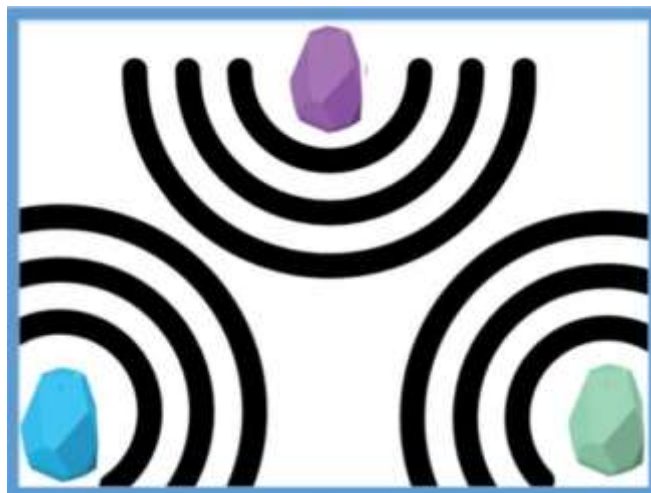


Figura 12: Colocación conceptual de los beacons bluetooth.

Gracias al rango efectivo del Bluetooth (25 metros), estos dispositivos son capaces de cubrir una estancia grande sin dificultad y sin dejar puntos ciegos. Este rango también nos permite minimizar el número de beacons, pudiendo utilizar únicamente 3, que es lo mínimo para la triangulación. Además, la implementación del Bluetooth es algo estándar en todos los dispositivos inteligentes producidos hoy en día y resultará mucho



más fácil su implementación e inclusión que con cualquier otra tecnología.

En la Figura 13 se pueden ver los dispositivos instalados en una sala en puntos estratégicos para dar cobertura a la misma.



Figura 13: Ubicación de los *Beacons Bluetooth*

Estos dispositivos Beacons ofrecen otras ventajas, como es que son dispositivos baratos y de fácil uso; que su instalación se reduce a simplemente colocarlos y emparejarnos con el dispositivo bluetooth; y que su batería interna les otorga una vida útil de alrededor de 2 años.

Además, la latencia de la señal es de un segundo (emiten un pulso cada segundo), por lo que se puede decir que la localización se producirá en tiempo real.

Por todo ello, tras la ejecución de este banco de ensayos en el entorno de laboratorio de CTIC, se concluye que esta tecnología es la más idónea de las tres escogidas inicialmente para realizar las pruebas de integración y validación del Hito 4, con vistas a obtener un sistema de localización en interiores para un entorno industrial.

HITO 4: INTEGRACIÓN Y VALIDACIÓN

T4.1: DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Esta tarea llevada a cabo en octubre 2017, sirvió para diseñar los experimentos que se llevarían a cabo en la siguiente tarea (T4.2).

A lo largo del Hito 2 se han estudiado los diferentes algoritmos a ejecutar para poder ubicar diferentes recursos en el interior de una planta metalmeccánica. Por su parte, en el Hito 3 se ha detallado el diseño arquitectónico de cada una de las tecnologías a utilizar en los experimentos. En base a los resultados de dichos hitos, se ha determinado que los diferentes experimentos de validación de la tecnología se realizarán sobre la arquitectura



de Beacons Bluetooth. Sobre esta tecnología se compararán los resultados que ofrecen los diferentes algoritmos:

<i>Tecnología/ Banco de ensayos</i>	<i>Algoritmo</i>
Beacons Bluetooth	Multilaración Multilateración iterativa Min-Max Malguki

El banco de ensayos se ha instalado en el almacén de CTIC, con materiales metálicos análogos a los que normalmente se pueden encontrar en un entorno metalmeccánico, con lo que el escenario se asemeja a un entorno industrial que emula las condiciones reales de operación. En este escenario se ubican 3 nodos fijos (Beacons) en forma de triángulo y separados lo más posible unos de otros.

El nodo móvil, dotado de tecnología bluetooth, se ubicará en 15 posiciones diferentes, obtenidas de forma aleatoria. Para facilitar las mediciones de los test y para simplificar la infraestructura electrónica del banco de ensayos, se utilizará como nodo móvil un Smartphone, dispositivo que tiene un tamaño que permite ubicarlo en los EPIS y máquinas catalogados como de tamaño grande, y en el que se instalará una aplicación capaz de medir los valores RSSI de los Beacons. Hay que destacar que dado el actual desarrollo de la tecnología Bluetooth, no sería complicado acoplar dispositivos Bluetooth a EPIS más pequeños, como botas o cascos, dado que en el mercado existen dispositivos de tamaño muy reducido, como puede verse en la siguiente imagen:



Figura 14: Módulos Bluetooth de tamaño reducido:
izquierda: 26.9mm x 13mm x 2.2mm;
derecha: 4.6 mm x 5.6 mm x 1.0 mm

Los experimentos a realizar en este banco de ensayos consisten en localizar un elemento situado en distintas posiciones mediante el empleo de diferentes algoritmos de localización para cada una ellas. De esta forma se determinará qué algoritmo es más eficiente. Además, se aplicará el algoritmo Malguki para contrastar los



resultados obtenidos mediante RSSI, y corroborar si realmente el algoritmo obtenido es eficaz.

A continuación, se recuerda brevemente en qué consiste cada algoritmo:

- **Multilateración:** La multilateración consiste en un método de posicionamiento basado en la intersección de, al menos, tres círculos centrados cada uno de ellos en las coordenadas de los correspondientes nodos de localización. La intersección de estos círculos se corresponderá con la posición del objetivo. Este algoritmo implica un gran coste computacional ya que realiza operaciones con matrices en punto flotante para el cálculo de la posición.
- **Multilateración interactivo:** Se trata de una variante del algoritmo de multilateración. En este caso, lo que se hace es utilizar éste para una estimación inicial de la posición. Tras dicho cálculo, el valor obtenido se utiliza como semilla de un proceso iterativo, donde se somete la posición estimada a un proceso de refinamiento.
- **Min-Max:** Este algoritmo surge de la complejidad que presenta realizar las operaciones en punto flotante en los algoritmos de multilateración. Por este motivo, surge el algoritmo Min-Max, que se corresponde con una variante de la multilateración. En este caso, la idea consiste en construir un rectángulo que actúa de frontera para cada nodo de localización. Dicho rectángulo se encontrará centrado en las coordenadas de cada nodo. En concreto, las esquinas de cada uno de estos rectángulos coincidirán con el siguiente valor:
- **Malguki:** El objetivo de este algoritmo es el cálculo de la posición de un objeto basado en los valores RSSI recibidos de los nodos conocidos. Este algoritmo toma en cuenta no solo la posición de los beacons y el valor RSSI obtenido en el nodo a localizar, sino también los valores RSSI entre beacons. En este algoritmo la distancia entre el nodo y el beacon se representa como la fuerza de un muelle y, utilizando al menos 3 fuerzas medidas con 3 beacons, se puede calcular un punto de equilibrio asociado a una posición estimada del objeto.

Para la ejecución de las pruebas se utiliza la metodología Taguchi, por la que se diseña un conjunto de experimentos en los que intervienen tres parámetros correspondientes a las coordenadas de la posición medida (x, y) y al algoritmo a utilizar, por lo que serían necesarios solo 2 experimentos con cada algoritmo, haciendo un total de 8. De todas formas, y siendo un número de variables tan reducido, se realizarán pruebas adicionales para asegurar la fiabilidad de los resultados.

Según se ha indicado, como nodo móvil, se utilizará un Smartphone con Bluetooth, en el cual se instalará una aplicación capaz de medir los valores RSSI de los beacons. El nodo móvil se situará en distintas ubicaciones para poder comparar los resultados obtenidos con los diferentes algoritmos.

El número de posiciones del nodo móvil a emplear es importante, ya que debe ser lo suficientemente alto como para poder realizar un análisis comparativo de los distintos algoritmos. Por ello, se ha decidido utilizar un total de 15 puntos seleccionados aleatoriamente para los cuales se realizará una prueba individual con cada algoritmo y se calculará un error.

Plan de pruebas.

Metodología.



En primer lugar, se definen un conjunto de criterios de evaluación que permitan comprobar el cumplimiento de cada uno de los requisitos indicados para los desarrollos del proyecto.

Para cada uno de los criterios de evaluación se indicará:

- **Requisito asociado** (identificador y descripción).
- **Aspecto a evaluar** (funcionalidad o aspecto de calidad).
- **Tipo de evaluación**, que podrá ser:
 - **Cuantitativa**: si existe una métrica que permita verificar que se cumple el requisito, o se trata de una característica que existe o no;
 - **Cualitativa**: si es un atributo de calidad o una apreciación subjetiva.
- **Prioridad**: nivel de necesidad temporal (alta, media o baja).
- **Método utilizado para la verificación**, que podrá ser una métrica, verificación por inspección del usuario revisor, o mediante la realización de un caso de test. Los casos de test permiten comprobar las funcionalidades del sistema definiendo una secuencia de comportamiento esperada dada unas condiciones de partida. Para la definición de casos de test se utilizará la siguiente plantilla:

<i>ID</i>	<i>Identificador del caso de test</i> <i>Formato: iWhere_CT_X</i>	<i>Nombre</i>	<i>Nombre del caso de test</i>
ID Requisito	Identificador del requisito a verificar con el caso de test		
Precondiciones	Condiciones que deben cumplirse para la ejecución del caso de test		
Caso de test	Descripción de la prueba a realizar		
Resultado esperado	Resultado ideal de la aplicación de acuerdo a los pasos ejecutados		

T4.2: PRUEBAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS.

Los experimentos se realizaron en un almacén con materiales metálicos normalmente utilizados en entornos metalmecánicos, lo que se asemeja a un entorno industrial real y emula las condiciones reales de operación.

Según se ha indicado, las pruebas se realizan sobre un banco de ensayos en el que han dispuesto 3 dispositivos Beacons que actúan de nodos fijos, y un nodo móvil (Smartphone) con Bluetooth, que se situará en distintas ubicaciones para poder comparar los resultados ofrecidos por los diferentes algoritmos.

Las situaciones del nodo móvil referenciadas al centro de la habitación, han sido las siguientes:



Posición	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
1	0	-1.600
2	-1.645	-1.600
3	-3.305	-1.600
4	-2.385	-0.590
5	-1.460	-0.665
6	-3.560	-0.215
7	-3.890	-2.635
8	-0.090	-2.940
9	0.008	-0.400
10	1.275	-0.580
11	0.380	-2.560
12	-0.380	-3.030
13	1.655	-1.600
14	1.425	-2.545
15	2.735	-2.455

Tras realizar las pruebas con los Beacons Bluetooth se han obtenido en algunos casos precisiones inferiores al metro. A continuación, pueden verse las gráficas correspondientes a los diferentes algoritmos aplicados a los datos.

Multilateración.

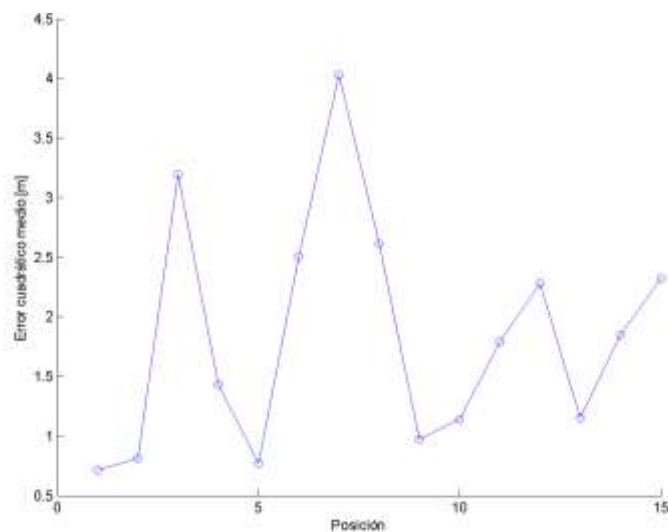




Figura 15: Multilateración: Variación del error cuadrático medio según la posición.

Multilateración iterativa.

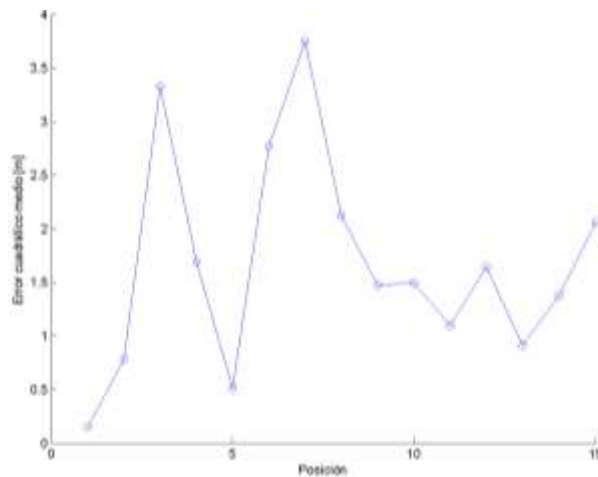


Figura 16: Multilateración iterativa: Variación del error cuadrático medio según la posición.

Min-max.

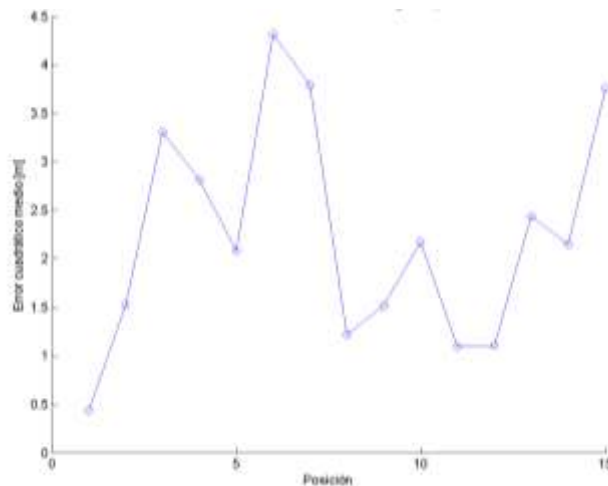


Figura 17: Min-Max: Variación del error cuadrático medio según la posición.

Malguki

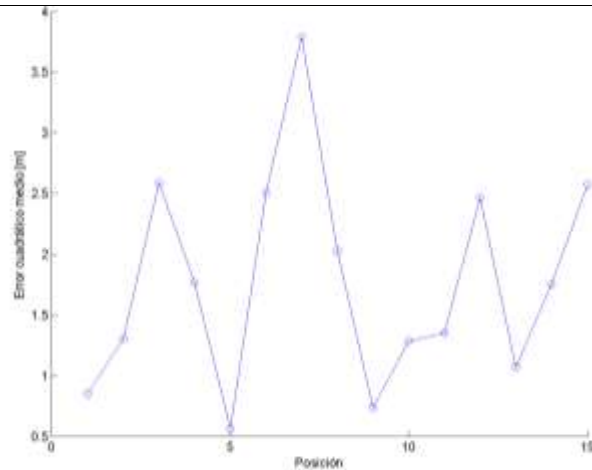


Figura 18: Malguki: Variación del error cuadrático medio según la posición.

Comparativa de los diferentes algoritmos:

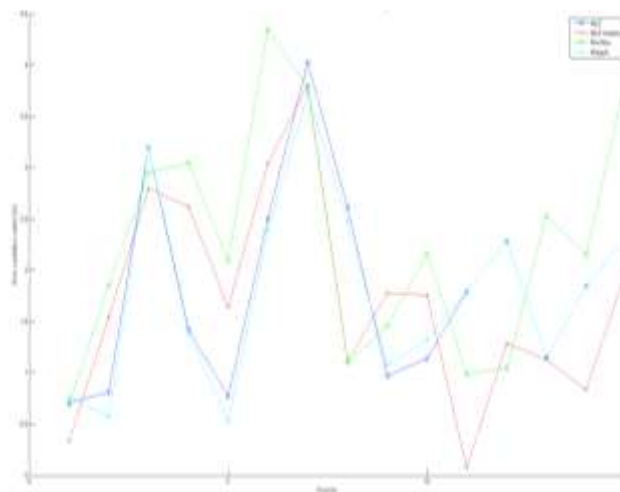


Figura 19: Comparativa del error cuadrático medio de los diferentes algoritmos.

Problemas y limitaciones identificadas

Lo primero que se observa de los resultados obtenidos, es que el error en la posición estimada varía en función de la posición del nodo móvil. Así, los puntos que se encuentran más alejados de la zona media de la habitación, presentan un error mayor. Los principales problemas encontrados para calcular una posición fiable son:

- Presencia de obstáculos en la línea de visión entre el nodo de localización y el objetivo a localizar.



- Presencia de materiales conductores cerca de los nodos estáticos, que alteran el patrón de radiación.
- Forma de la habitación: la propia forma del habitáculo puede condicionar las mediciones por la presencia de esquinas o huecos que impidan la correcta recepción de la señal.

En cuanto a las limitaciones encontradas a la hora de la localización se han encontrado las siguientes:

- Limitación por habitación, no es posible monitorizar más de una habitación de manera precisa, debido a las pérdidas de señal a causa de las paredes.
- Distancia: En una habitación muy grande la propia distancia que hay entre nodos puede ser excesiva y la señal ser muy débil o incluso no llegar al objetivo.
- No es posible calcular de manera efectiva a qué altura o distancia del suelo se encuentra el objetivo.

Conclusiones.

Con respecto a los algoritmos estudiados, se obtienen los siguientes valores medios del error cuadrático medio de cada algoritmo:

	<i>Multilateración</i>	<i>Multilateración iterativa</i>	<i>Min-Max</i>	<i>Malguki</i>
Media	1.8374	1.7171	2.2722	1.7873
Varianza	0.8956	0.9641	1.2143	0.8333

Se puede comprobar que el algoritmo basado en la multilateración iterativa es el que mejor estima la posición, ya que, tal y como se refleja en la tabla, es el que posee una menor media en el error cuadrático medio. Esto se debe al proceso de refinamiento al que somete la posición estimada inicial.

No obstante, el error obtenido por el algoritmo de Malguki es similar al de multilateración iterativa. Esto manifiesta la importancia de someter la posición estimada a un proceso de corrección.

Por otro lado, el método basado en rectángulos es el que peor resultados ofrece, lo que era de esperar, ya que está basado en una simplificación del método de multilateración. Sin embargo, el ahorro computacional que presenta ese algoritmo frente a los demás, puede hacerlo una opción recomendable siempre y cuando el sistema diseñado no requiera una gran precisión en la posición estimada para su funcionamiento.

Por lo tanto, se puede concluir que los métodos basados en la medida de la intensidad de la señal recibida presentan limitaciones en la localización en entornos industriales, debido a la presencia de obstáculos y conductores en el entorno.



La realización de un proceso de calibración dinámica previo a la aplicación de tecnologías de localización, permite reducir los errores producidos, pero se siguen obteniendo variaciones cuando el nodo móvil se aleja de los nodos fijos.

En cuanto a los algoritmos, es llamativo que con Malguki, se obtienen precisiones similares a multilateración iterativa, a pesar de utilizar metodologías diferentes. Esto nos hace ver que, más que la metodología a aplicar, el factor determinante a la hora de obtener una precisión mayor, es la realización de un proceso de corrección de la posición inicial.

De acuerdo a las pruebas realizadas, se puede concluir que, el algoritmo más eficiente en la localización de interiores es multilateración iterativa. Con el fin de obtener una mayor precisión en su implementación en la planta industrial, se propone utilizar el mayor número de nodos posible. Cuanto mayor sea el número de nodos, mayor será el número de circunferencias que intersecten entre sí, delimitando mejor la zona donde se estima que se encuentra el objetivo, aumentando así la precisión obtenida.

2. RESULTADOS CONSEGUIDOS

Durante el periodo de ejecución del proyecto iWHERE (enero-diciembre 2017) se han conseguido todos los resultados planificados, tal y como se había planteado al inicio del proyecto y que se detallan a continuación:

- Investigar en algoritmos de la señal recibida.
- Investigar en algoritmos que permitan identificar el flujo del movimiento en nodos móviles.
- Validar la factibilidad de la solución mediante una prueba de concepto.