

**Libro Blanco sobre Espacios
Inteligentes y Tecnologías
de Posicionamiento y
Navegación en Entornos
de Interior**

Bahillo Martínez, Alfonso
Lázaro Galilea, José L.
Pérez Navarro, Antoni
Rodríguez Negro, José A.
(Editores)

Libro Blanco sobre Espacios
Inteligentes y Tecnologías
de Posicionamiento y
Navegación en Entornos
de Interior

TEXTOS UNIVERSITARIOS
TECNOLOGÍA

UAH

Libro Blanco sobre Espacios Inteligentes y Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interior

Bahillo Martínez, Alfonso
Lázaro Galilea, José L.
Pérez Navarro, Antoni
Rodríguez Negro, José A.
(Editores)

Red de Posicionamiento y Navegación en Interiores REPININ
(TEC2015-71426-REDT)

Red de Posicionamiento y Navegación en Interiores y Exteriores Delimitados REPININ+
(TEC2017-90808-REDT)

Aguilera-Benítez Teodoro (Grupo GISS – Universidad de Extremadura)
Álvarez-Franco Fernando (Grupo GISS – Universidad de Extremadura)
Bahillo-Martínez, Alfonso (Grupo Mobility - Deusto Tech)
Díez-Blanco, Luis E. (Grupo Mobility - Deusto Tech)
Espinosa-Zapata, Felipe (Grupo GEINTRA - Universidad de Alcalá)
García-Domínguez, Juan J. (Grupo GEINTRA - Universidad de Alcalá)
Hernández-Alonso, Álvaro (Grupo GEINTRA - Universidad de Alcalá)
Jiménez-Ruiz, Antonio R. (CAR – Consejo Superior de Investigaciones Científicas)
Lázaro-Galilea, José L. (Grupo GEINTRA - Universidad de Alcalá)
López-Salcedo José A. (Grupo SPCOMNAV – Universitat Autònoma de Barcelona)
Mazo-Quintas, Manuel (Grupo GEINTRA - Universidad de Alcalá)
Montoliu-Colás, Raúl (Grupo init – Universitat Jaume I)
Pérez-Navarro, Antoni (Grupo ICSO-IN3 – Universitat Oberta de Catalunya)
Rodríguez-Negro, José A. (GRADIANT – Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Galicia)
Seco-Granados Gonzalo (Grupo SPCOMNAV – Universitat Autònoma de Barcelona)
Seco-Granja, Fernando (CAR – Consejo Superior de Investigaciones Científicas)
Torres-Sospedra, Joaquín (Grupo init – Universitat Jaume I)
Ureña-Ureña, Jesús (Grupo GEINTRA - Universidad de Alcalá)

Grupo GEINTRA - Universidad de Alcalá
Grupo Mobility - Deusto Tech
GRADIANT – Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Galicia
Grupo ICSO-IN3 – Universitat Oberta de Catalunya
CAR – Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Grupo GISS – Universidad de Extremadura
Grupo init – Universitat Jaume I
Grupo TSTC – Universidad de Granada
Grupo SPCOMNAV – Universitat Autònoma de Barcelona
Grupo SIT – Universidad de Murcia



Universidad
de Alcalá

SERVICIO DE PUBLICACIONES

El contenido de este libro no podrá ser reproducido,
ni total ni parcialmente, sin el previo permiso escrito del editor.
Todos los derechos reservados.

© Universidad de Alcalá, 2019

Servicio de Publicaciones

Plaza de San Diego, s/n

28801 Alcalá de Henares

www.uah.es

I.S.B.N.: 978-84-17729-47-9

Composición: Solana e Hijos, A. G., S.A.

Impresión y encuadernación: Solana e Hijos, A.G., S.A.

Impreso en España

ÍNDICE

PRÓLOGO	11
RESUMEN EJECUTIVO	13
AGRADECIMIENTOS	15
ACRÓNIMOS	17
1. INTRODUCCIÓN	27
2. IMPACTO SOCIOECONÓMICO	33
2.1. Introducción	33
2.2. Sectores, usos actuales y grado de implantación	36
2.2.1. Consumo (retail)	36
2.2.2. Transporte y logística	38
2.2.3. Salud, sector sociosanitario	39
2.2.4. Servicios profesionales (actividades oficina, publicidad y seguridad)	40
2.2.5. Turismo, viajes y ocio	41
2.2.6. Industria	43
2.3. Tendencias y oportunidades futuras	44
3. TECNOLOGÍAS DE POSICIONAMIENTO EN ENTORNOS DE INTERIOR	51
3.1. Introducción	51
3.2. Principales requisitos de las Tecnologías de Posicionamiento	53
3.3. Cámaras	56
3.3.1. Localización con cámaras RGB	59
3.3.2. Cámaras de tiempo de vuelo (ToF)	67
3.4. Señales ópticas	69

3.4.1.	Posicionamiento mediante desfase diferencial (PDoA)	70
3.4.2.	Posicionamiento mediante determinación de la orientación (AoA)	72
3.4.3.	Posicionamiento mediante VLC	73
3.5.	Acústico	76
3.5.1.	Codificación de señal	77
3.5.2.	Sistemas basados en dispositivos portables	80
3.6.	Radiofrecuencia	81
3.6.1.	WiFi	81
3.6.2.	Bluetooth	83
3.6.3.	RFID	84
3.6.4.	Zigbee	85
3.6.5.	Ultra Wide Band	86
3.6.6.	Redes celulares	87
3.6.7.	Señales de radio y TV	88
3.7.	GNSS de alta sensibilidad	88
3.7.1.	GNSS de alta sensibilidad	90
3.7.2.	Prestaciones	92
3.8.	Navegación Inercial	94
3.8.1.	Pedestrian Dead-Reckoning (PDR)	95
3.8.2.	Pedestrian Navigation System (PNS)	97
3.9.	Campo magnético	98
3.10.	Infraestructura eléctrica	101
3.10.1.	Powerline Positioning (PLP)	102
3.10.2.	Otras alternativas de posicionamiento usando la red eléctrica	103
3.10.3.	Monitorización de actividad humana a través del consumo eléctrico	103
4.	PRINCIPALES DESAFÍOS	107
4.1.	Desafíos tecnológicos	108
4.2.	Desafíos de estandarización	111
4.3.	Desafíos legislativos	114
5.	ANÁLISIS ESTRATÉGICO	119
5.1.	Introducción	119
5.2.	Demandas de mercado, fortalezas y debilidades	119
5.3.	Líneas estratégicas	121
5.4.	Financiación pública al I+D+I.	124
5.4.1.	Financiación nacional	125

5.4.2. Financiación europea	132
5.5. Transferencia tecnológica	136
6. ECOSISTEMA EN ESPAÑA	145
7. CONCLUSIONES	155

PRÓLOGO

El Libro blanco sobre Espacios Inteligentes y Tecnologías de Posicionamiento y Navegación está desarrollado por la Red de Posicionamiento y Navegación en Interiores REPIN (EC2015-71426-REDT) y la Red de Posicionamiento y Navegación en Interiores y Exteriores Delimitados REPIN+ (TEC2017-90808-REDT) financiadas por el Ministerio de Economía y Competitividad, participadas por 10 grupos de investigación y otras tantas instituciones (universidades, CSIC y centros tecnológicos –www.repin.es–), aportando sus experiencias de investigación, y enfoques, en diferentes campos del posicionamiento y navegación en interiores. Este documento tiene como principal objetivo establecer la base del desarrollo y regulación y aplicación del uso de sistemas de posicionamiento en interiores, analizando aspectos tales como sus precedentes y estado actual, necesidad e implantación de futuro, impacto socioeconómico, tecnologías a utilizar etc. Pero sin duda el mayor y principal objetivo perseguido es establecer una vía de información y tender puentes para la transferencia a la sociedad y las empresas de los resultados que los investigadores alcancen, y para dar solución a las necesidades que la sociedad demande.

Este Libro es hasta la fecha el único estudio de esta naturaleza realizado a nivel nacional.

En la actualidad los grupos de investigación nacionales que se dedican a posicionamiento y navegación se encuentran en una etapa «adulta» con una trayectoria muy destacable a tenor de sus resultados y producción científica, y de sus relaciones y colaboración con grupos internacionales; nuestros grupos se encuentran en un punto en el que establecer el estado de la técnica con potestad, al igual que y de las tendencias a corto, medio y largo plazo. También están comenzando a surgir un gran número de empresas nacionales que fabrican sus propios productos, o que los instalan mantienen y explotan en muy diversos campos y aplicaciones. Acorde a las tendencias y demanda actual, se vaticina que la implantación y aplicaciones de sistemas de posicionamiento en interiores van a crecer enormemente en los próximos años. Por todo lo anterior y por la demanda y predisposi-

ción de empresas centros y negocios en implantar los resultados de las investigaciones, es muy recomendable que a nivel nacional se impulse y potencie la investigación y colaboración público-privada de investigación y transferencia para no dar pie a una dependencia tecnológica, y que se dan las condiciones para aprovechar la gran oportunidad actual para nuestro país, con múltiples beneficios socioeconómicos.

RESUMEN EJECUTIVO

El conocimiento de la posición y rutas recorridas por personas y agentes y disponer de sistemas tecnológicos que los determinen equivale a poseer una fuente de información valiosa, de aplicaciones y de negocio. Los servicios que cuentan con información de la localización y rutas realizadas por personas, y agentes móviles, robotizados o no, se encuentran en una mejor posición de competitividad, prestación de servicios, productividad, etc., y su imagen transmite una percepción amigable, de apoyo, con aplicaciones y servicios para facilitar el día a día y ocio de usuarios y clientes, Además, los servicios y empresas que los ofrecen (comerciantes, servicios de seguridad, atención al ciudadano, etc.) son percibidos, como más actualizados tecnológicamente, más útiles y más atractivos y con un potencial de dar soporte. Pero a la vez obtiene una información muy codiciada que pueden utilizar en sus negocios y servicios. En la última década los trabajos e inversión en desarrollar sistemas de posicionamiento en interiores, que complementen los sistemas ya existentes para exteriores han experimentado un gran desarrollo, así como las inversiones en ellos y aplicaciones que los utilizan.

Todas las previsiones indican que los desarrollos y aplicaciones más importantes basados en el conocimiento de la posición en interiores y su continuación y enlace con los sistemas en exteriores están por llegar y serán de gran importancia para la sociedad en términos de seguridad, apoyo, eficiencia, etc. De forma continua irán apareciendo aplicaciones y servicios de ayuda al cliente, de apoyo al usuario, de automatización de tareas, etc., que marcarán la diferencia entre los servicios prestados a los usuarios. Así, estos servicios pueden ir desde apoyo a sistemas de seguridad, generación de rutas óptimas en quehaceres cotidianos, asistencia en centros de salud, aplicaciones para la educación y ocio, automatización de sistemas robotizados, y un largo etc. Todo ello repercutirá en aspectos sociales y económicos de forma notable.

La innovación aportada por los sistemas de posicionamiento en interiores no solo presenta un importante impacto en términos de seguridad confianza, productividad o mejora del tiempo dedicados a un proceso (fijemos en lo que han

supuesto los sistemas de posicionamiento en exteriores y podremos imaginar el impacto que tendrán en interiores y combinado interiores exteriores), si no que pueden mejorar enormemente la calidad de vida y el apoyo al ciudadano y la calidad de los servicios. Además, hay que señalar que el estado de avance de nuestra sociedad en el uso y consumo de tecnología, aplicaciones tecnológicas y uso de dispositivos móviles permite la rápida implantación y aceptación de servicios basados en el conocimiento de la posición.

A día de hoy tanto el sector social, como productivo y los propios ciudadanos son conscientes de la importancia de ir incorporando en nuestras vidas las aportaciones tecnológicas, por lo que la introducción de aquellas basadas en el conocimiento de la localización deben aprovecharlo para introducir en el mercado todo el valor añadido que pueden aportar, y aprovechar toda la innovación que suponen.

Otra posición que debe ser aprovechada es la de los grupos de investigación nacionales que trabajan en el desarrollo de sistemas y aplicaciones de posicionamiento en interiores, y que se encuentran posicionados en una posición destacada a nivel mundial, en las diferentes tecnologías empleadas para ello. De hecho, algunos de ellos son miembros activos y destacados en organización conferencias internacionales asociaciones de la temática. Se pueden contar una veintena de grupos, que trabajan con las diferentes tecnologías, y todos ellos tienen relevantes publicaciones a nivel internacional y algunos de ellos resultados muy destacables. Además, se advierte un crecimiento en el número de personas dedicadas a esta línea de investigación/innovación. A nivel mundial en el último lustro ha existido una explosión en la cantidad de personas dedicadas al posicionamiento en interiores, con la aparición de algunas técnicas nuevas, y con un boom en las publicaciones al respecto. Todo esto significa que el Know how de nuestros grupos de investigación debería ser canalizado y aprovechado, apoyándolos con la financiación adecuada que tendrá retornos tanto sociales como económicos, y que puede rentabilizar la expansión de nuestras tecnologías hacia otros países

El objetivo de este Libro blanco sobre Espacios Inteligentes y Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interiores presentar las tecnologías existentes actualmente para poderlos llevar a cabo, y que ofrecen mejores garantías de futuro, analizar los principales requerimientos técnicos de los potenciales usuarios y los principales desafíos tecnológicos que se deben abordar, describir el ecosistema de posicionamiento y navegación en interiores que existe actualmente en nuestro país, presentar el impacto socio-económico que representa hoy y pueden representar en el futuro, las posibles dificultades en su consecución y, en definitiva, prepararnos para los futuros cambios. Para finalizar se incluye un capítulo de análisis estratégico de investigación y desarrollo a corto y medio plazo y que deberían plasmarse en una Prioridad Estratégica en los Planes Nacionales de I+D+i.

AGRADECIMIENTOS

El apoyo económico es importantísimo, en general, en cualquier actividad de investigación e iniciativa entusiasta. Pero, además, es imprescindible contar durante toda la andadura con un grupo de personas que sean capaces de creer en su concepción y apoyarla y trabajar por ella; capaces de llevar a cabo, desde los distintos puntos de vista, las acciones necesarias para su consecución, y sobre todo en los primeros pasos del proyecto. La parte más importante de cualquier proyecto radica en la implicación y soporte de las personas e instituciones que lo hacen posible, por lo que queremos dejar constancia de nuestro reconocimiento a todos los que han apoyado los objetivos de la Red REPNIN y el desarrollo de este libro blanco sobre Posicionamiento y Navegación en interiores.

En primer lugar, queremos agradecer a la Secretaría de Estado de Investigación del Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación de la Red Nacional de Excelencia «RED DE POSICIONAMIENTO Y NAVEGACION EN INTERIORES TEC2015-71426-REDT». De manera muy especial el agradecimiento a los miembros participantes de los grupos de investigación de CAR (CSIC), GEINTRA (UAH), GISS (UEX), ICSO (UOC), INIT (UJI), MOBILITY (DT) y TSTC (UGR), participantes en la elaboración de este libro blanco. También el agradecimiento de las aportaciones de empresas e instituciones como: Eurecat, Mysphera, Nebusens, Nologis, Tracktio, Market-ADD, IMDEA networks y al grupo SPCN de la UAB.

Un proyecto como es la elaboración del Libro Blanco sobre Posicionamiento y Navegación en Interiores, y en general el resto de los objetivos perseguidos por la Red, que presentan un perfil transversal sobre muchísimos actores, no sería posible sin contar con las aportaciones, en bastantes ocasiones anónimas, de muchas otras personas; a todas ellas también nuestro agradecimiento.

ACRÓNIMOS

A-GNSS	Siglas tomadas del término inglés ‘Assisted Global Navigation Satellite Systems’. Sistema satelital de navegación global asistido. Tecnología en la que el receptor GNSS recibe la información orbital de los satélites objetivo desde una fuente diferente a los propios satélites.
AAL	Siglas tomadas del término inglés ‘Ambient Assisted Living’. Vida asistida por el entorno.
AGV	Siglas tomadas del término inglés ‘Automated Guided Vehicle’. Los sistemas de vehículo de guiado automático, de manera simplificada, representan un vehículo que se mueve de manera automática, sin conductor, estando concebidos para la realización del transporte de materiales, especialmente en tareas repetitivas y con alta cadencia.
AmI	Siglas tomadas del término inglés ‘Ambient Intelligence’. Inteligencia ambiental. Concepto que hace referencia a que el usuario se envuelve de tecnología de forma no intrusiva y se comunica con ella de forma natural. Surgió a finales del siglo XX como una revolución en la forma de aplicar la tecnología y relacionarse con ella. De ahí surgen los espacios inteligentes.
AoA/AOA	Siglas tomadas del término inglés ‘Angle of Arrival’. Ángulo de llegada. Método que permite conocer con qué ángulo llega una señal desde un emisor a un receptor y, a partir de los ángulos de llegada de diversos emisores, obtener la posición del receptor.
API	Siglas tomadas del término inglés ‘Application Program Interface’. Interfaz de programación de aplicaciones. Conjunto de librerías software, normalmente estructuradas mediante metodología orientada a objetos, que facilita la creación de nuevo software al permitir la reutilización de un software útil contenido de las librerías.
BLE	Siglas tomadas del término inglés ‘Bluetooth Low Energy’.

Tecnología de red de área personal inalámbrica, diseñada y comercializada por Bluetooth Special Interest Group destinada a aplicaciones novedosas en el cuidado de la salud, fitness y beacons, seguridad y las industrias de entretenimiento en el hogar. Comparado con el Bluetooth clásico, Bluetooth Low Energy está diseñado para proporcionar un consumo de energía y un costo considerablemente reducidos, manteniendo un rango de alcance de comunicación similar.

- Bluetooth** Especificación industrial para WPAN.
- C/A** Siglas tomadas del término inglés ‘Coarse Acquisition’
Referido a la señal abierta de uso civil que se transmite en la frecuencia L1 del sistema GPS.
- C/N0** Siglas tomadas del término inglés ‘Carrier to Noise spectral density ratio’.
Referido a la relación entre la potencia de la señal portadora y la densidad espectral del ruido. La C/N0 se utiliza habitualmente como medida de la calidad de la señal recibida a la entrada de un receptor de GNSS. A diferencia de otras métricas como la relación señal a ruido o SNR, la C/N0 no depende del ancho de banda del receptor.
- CARS** Siglas tomadas del término inglés ‘Context Aware Recommender Systems’.
Sistemas de recomendación basados en el contexto. Hace referencia a aquellas aplicaciones y sistemas cuya respuesta depende del contexto: localización, hora del día, preferencias, etc.
- CDMA** Siglas tomadas del término inglés ‘Code Division Multiple Access’.
Acceso Múltiple por División de Código. Método de control de acceso al medio por división de código, donde se emiten simultáneamente varias secuencias ortogonales entre sí que pueden ser posteriormente detectadas en el receptor si se conocen los patrones emitidos.
- CSS** Siglas tomadas del término inglés ‘Chirp Spread Spectrum’.
Técnica de espectro ensanchado en el que la frecuencia de portadora se modula barriendo un rango establecido, esta técnica de modulación se aplica a la transmisión de datos digitales y por radiofrecuencia.
- DLL** Siglas tomadas del término inglés ‘Delay Locked Loop’.
Bloque de procesamiento de señal útil para sincronizar la llegada de señales y mitigar el efecto de multicamino.
- DToA** Siglas tomadas del término inglés ‘Differential Time of Arrival’.
Tiempo Diferencial de Llegada. Tiempo de llegada de una señal emitida al receptor respecto a el tiempo empleado por otra que se toma como referencia.

- DTW** Siglas tomadas del término inglés ‘Dynamic Time Warping’. Deformación dinámica en tiempo. Algoritmo que permite comparar curvas obtenidas en rangos de tiempo distintos.
- ECID** Siglas tomadas del término inglés ‘Enhanced Cell ID’. Identificador de celda mejorado. Capacidades de posicionamiento incluidas en el estándar LTE.
- EI** Siglas tomadas del término ‘Espacios inteligentes’. Son espacios en los que se han instalado sensores y actuadores que llevan a determinadas actuaciones o recolección de datos en el espacio en que están instalados.
- FCC** Siglas tomadas del término inglés ‘Federal Communications Commission’. Comisión Federal de Comunicaciones. Agencia estatal independiente de Estados Unidos encargada de la regulación de telecomunicaciones interestatales e internacionales por radio, televisión, redes inalámbricas, teléfonos, satélite y cable.
- Fingerprint** Término inglés correspondiente a ‘Huella’. En posicionamiento se utiliza como sinónimo de conjunto de datos asociado a un punto.
- FoV** Siglas tomadas del término inglés «Field of View». Muy utilizado para indicar el campo de visión o área que cubre un determinado sensor para la localización y posicionamiento. Puede venir expresado como un ángulo de apertura o bien el área de cobertura a una cierta distancia.
- Galileo** Sistema GNSS europeo que actualmente está en fase de despliegue.
- GLONASS** Sistema mundial de navegación por satélite. Sistema GNSS de Rusia formado por 31 satélites (24 en activo, 3 satélites de repuesto, 2 en mantenimiento, uno en servicio y otro en pruebas).
- GML** Siglas tomadas del término inglés ‘Geography Markup Language’. Lenguaje de Marcado Geográfico. Es un sublenguaje de XML descrito como una gramática en XML Schema para el modelaje, transporte y almacenamiento de información geográfica.
- GNSS** Siglas tomadas del término inglés ‘Global Navigation Satellite System’. Sistema global de navegación por satélite. Sistema de satélites que permite obtener la posición de un objeto y navegar en la superficie de la Tierra.
- GPS** Siglas tomadas del término inglés ‘Global Positioning System’. Abreviatura de NAVSTAR-GPS (‘NAVigation System and Ranging - Global Position System’, Sistema de navegación y rango-sistema de posicionamiento global. Sistema GNSS de los Estados Unidos de Norteamérica formado por 24 a 27 satélites.

- GPU** Siglas tomadas del término inglés ‘Graphic Processing Unit’.
Unidad de Procesamiento Gráfico. Es una unidad de procesamiento para gráficos que se diseñó para acelerar la representación de gráficos en pantallas de ordenador, pero que se usa también para hacer procesamiento paralelo en la implementación de otros algoritmos con necesidades intensas de cálculo (optimización, inteligencia artificial, etc.).
- GSM** Siglas tomadas del término inglés ‘Global System for Mobile communications’.
Sistema global para las comunicaciones móviles. Segunda generación de telefonía móvil.
- HSDPA** Siglas tomadas del término inglés ‘High Speed Downlink Packet Access’.
Acceso de paquete descendiente de alta velocidad. Es la evolución de la tercera generación de tecnología móvil, llamada 3.5G.
- IEEE** Siglas tomadas del término inglés ‘Institute of Electrical and Electronics Engineers’.
Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Organización sin ánimo de lucro. Es la organización profesional técnica más grande del mundo dedicada al avance de la tecnología para el beneficio de la humanidad. A veces se le denomina ‘i-e-cubo’ o ‘i-triple-e’.
- ILPS** Siglas tomadas del término inglés ‘Indoor Local Positioning System’.
Sistema de aplicación en interiores para el posicionamiento local. Hace referencia a aquellas aplicaciones y sistemas que localizan la posición de un objeto móvil.
- IMU** Siglas tomadas del término inglés ‘Inertial Measurement Unit’.
Se refiere a una unidad de medida inercial, o simplemente sensor inercial que está compuesto de tres acelerómetros colocados a lo largo de tres ejes ortogonales, y otros tres sensores giroscópicos en ejes ortogonales. Se utiliza para estimar la aceleración y cambio de orientación del propio sensor y por ende del objeto al que se fija.
- IndoorGML** Especificación de GML para entornos de interiores.
- INS** Siglas tomadas del término inglés ‘Inertial Navigation System’.
Sistema de Navegación Inercial. Es un algoritmo que a partir de las señales de aceleración y giro que proporciona una IMU, permite estimar la velocidad, el desplazamiento y la orientación en 3D de un objeto que porte una IMU.
- IoT** Siglas tomadas del término inglés ‘Internet of Things’.

- El internet de las cosas es un concepto que se refiere a una interconexión digital de objetos cotidianos con internet.
- IPIN** Siglas tomadas del término inglés ‘Indoor Positioning and Indoor Navigation’.
Posicionamiento y navegación en interiores. Este término se suele utilizar para hacer referencia a la conferencia «International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation».
- IPS** Siglas tomadas del término inglés ‘Indoor Positioning System’.
Ver ILPS.
- IRED** Siglas tomadas del término inglés «InfraRed Emitting Diode».
- ISO** Siglas tomadas del término inglés ‘International Organization for Standardization’.
Organización Internacional de Normalización.
- L1** Siglas que hacen referencia a la banda de frecuencias de GPS centrada a la frecuencia de 1575.42 MHz y que se extiende desde 1563 MHz hasta 1587 MHz.
- LAN** Siglas tomadas del término inglés ‘Local Area Network’.
Red de área local. Término genérico para denominar las redes de comunicaciones de ámbito local en edificios o zonas pequeñas (por ejemplo, WiFi es una red LAN).
- LBS** Siglas tomadas del término inglés ‘Location Based Systems’.
Sistemas basados en localización. Hace referencia a aquellas aplicaciones y sistemas que utilizan la posición del usuario como uno de los datos de entrada.
- LeI** Localización en interiores.
- LFM** Siglas tomadas del término inglés ‘Linear Frequency Modulation’.
Modulación Lineal de Frecuencia. Técnica que permite la transmisión de información a través de una onda portadora variando su frecuencia de forma lineal.
- LoS** Siglas tomadas del término inglés ‘Line of Sight’.
Línea de Visión. Línea de propagación directa entre emisor y receptor.
- LPP** Siglas tomadas del término inglés ‘LTE Positioning Protocol’.
Protocolo de posicionamiento LTE.
- LPS** Siglas tomadas del término inglés ‘Local Positioning System’.
Se refiere a Sistemas Locales de Posicionamiento, o dispositivo para estimar la localización al estilo de un GPS, pero a nivel local o en un área o zona limitada a una sala o un edificio.
- LS** Siglas tomadas del término inglés ‘Loosely Synchronous’.

- Sincronización Débil. Secuencias basadas en la técnica de espectro expandido que presentan una ventana de correlación cero en torno al pico principal.
- LTE** Siglas tomadas del término inglés ‘Long Term Evolution’. Evolución de larga duración. Este término corresponde a la evolución de la tercera generación de tecnología móvil, anterior a la cuarta generación, siendo descrito como una tecnología 3.9G.
- MAC** Siglas tomadas del término inglés ‘Media Access Control’. Control de acceso al medio. Conjunto de mecanismos y protocolos de comunicaciones a través de los cuales varios ‘interlocutores’ (dispositivos en una red, como computadoras, teléfonos móviles, etcétera) se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común (por lo general, un cable eléctrico o fibra óptica, o en comunicaciones inalámbricas el rango de frecuencias asignado a su sistema).
- MEMS** Siglas tomadas del término inglés ‘Micro-Electro Mechanical System’. Sistema micro-electro mecánico. Tecnología de fabricación que permite integrar sensores en circuitos integrados y conseguir una miniaturización muy importante posibilitando la realización de dispositivos ligeros y portables (por ejemplo, los múltiples sensores de un móvil son elementos MEMS).
- MP** Siglas tomadas del término inglés ‘Multipath’. Fenómeno que se produce por las múltiples reflexiones de un haz o señal en diferentes superficies y que alcanzan un receptor en tiempos distintos y con diferentes características.
- NFC** Siglas tomadas del término inglés ‘Near Field Communication’. Tecnología de comunicación inalámbrica, de corto alcance y alta frecuencia que permite el intercambio de datos entre dispositivos.
- NILM** Siglas tomadas del término inglés ‘Non-Intrusive Load Monitoring’. Alude al uso de técnicas de monitorización de cargas eléctricas (por ejemplo, conexión y desconexión) usando sólo medidas de consumo agregado, como hace el contador de entrada; y por tanto sin intrusión en el resto de la instalación.
- NLOS** Siglas tomadas del término inglés ‘Non Line of Sight’. Sin línea de visión. Se usa para describir un trayecto parcialmente obstruido entre la ubicación del transmisor de la señal y la ubicación del receptor de esta.
- OCXO** Siglas tomadas del término inglés ‘Oven Controlled Crystal Oscillator’. Se refiere a un oscilador basado en un cristal encapsulado en un dispositivo térmico. Éste se encarga de mantener constante la tempera-

tura del oscilador para evitar las fluctuaciones de frecuencia debidas a cambios de temperatura ambiental.

- OEM** Siglas tomadas del término inglés ‘Original Equipment Manufacturer’. Se denomina fabricante de equipos originales a la empresa que manufactura productos que luego son comprados por otra y vendidos al por menor bajo la marca de la empresa compradora.
- OSM** Siglas tomadas del término inglés ‘Open Street Map’. Base de datos que contiene los campos necesarios para definir un mapa a nivel global o mundial. Es un mapa abierto a la comunidad en la que todos podemos contribuir a mejorar y completar el mapa del mundo (<https://www.openstreetmap.org/>). Es utilizado en aplicaciones de escritorio y en apps de móvil para calcular rutas y guiar usuarios usando el sistema GNSS de localización.
- PAN** Siglas tomadas del término inglés ‘Personal Area Network’. Red de ámbito personal. Red de menor alcance que una red LAN y que cubre las conexiones en las inmediaciones de una persona.
- PDA** Siglas tomadas del término inglés ‘Personal Digital Assistant’. Asistente digital personal. Computadora de bolsillo, precursor de los teléfonos inteligentes.
- PDR** Siglas tomadas del término inglés ‘Pedestrian Dead Reckoning’. Se refiere a un método para estimar el desplazamiento de una persona mientras esta camina, haciendo uso de sensores inerciales (o IMUs), fijadas en el cuerpo de la persona, o en algún dispositivo electrónico que porte la persona (por ejemplo, un móvil).
- PDOA** Siglas tomadas del término inglés ‘Phase Differential of Arrival’. Fase diferencial de llegada. Método que permite conocer la fase con la que ha llegado una señal desde un emisor a un receptor y, a partir de dicha información obtenida en varios receptores, obtener la posición del emisor.
- PIC** Siglas tomadas del término inglés ‘Paralell Interference Cancellation’. Cancelación de Interferencias en Paralelo. Técnica de procesamiento de señal basada en la estimación dispersa de los distintos canales que permite la cancelación de las interferencias entre ellos.
- PLC** Siglas tomadas del término inglés ‘Power Line Communications’. Comunicaciones a través de la línea eléctrica.
- PLP** Siglas tomadas del término inglés ‘Power Line Positioning’. Posicionamiento a través de la línea eléctrica.
- PNI** Siglas tomadas del término ‘Posicionamiento y navegación en interiores’.

PNS	Siglas tomadas del término inglés ‘Pedestrian Navigation System’. Se refiere a un sistema de navegación de personas, el cual incluye sensores IMU, algoritmos de navegación PDR, y métodos de corrección de la deriva o error acumulativo típico de soluciones inerciales.
POA	Siglas tomadas del término inglés ‘Phase of Arrival’ Fase de llegada. Método que permite conocer la fase con la que ha llegado una señal desde un emisor a un receptor y, a partir de dicha información obtenida en varios receptores, obtener la posición del emisor.
PR	Siglas tomadas del término inglés ‘Pseudo-Random’. Pseudoaleatorio. Proceso determinista de generación de secuencias aparentemente aleatorias desde el punto de vista estadístico.
PSD	Siglas del término inglés ‘Positioning Sensitive Device’.
RF	Siglas tomadas del término inglés ‘Radio frequency’. Radiofrecuencia, referido a señales de radio electromagnética.
RFID	Siglas tomadas del término inglés ‘Radio Frequency Identification’. Identificación por radiofrecuencia. Sistema que transmite información de un objeto a otro mediante ondas de radio. Normalmente es información de identidad.
RSS	Siglas tomadas del término inglés ‘Received Signal Strength’. Fuerza de señal recibida. Medida de la potencia presente en una señal de radio recibida. Se usa como métrica en algunos sistemas de localización.
RTT	Siglas tomadas del término inglés ‘Round-Trip Time’. Tiempo de ida y vuelta. Se aplica en el mundo de las telecomunicaciones y redes informáticas al tiempo que tarda un paquete de datos enviado desde un emisor en volver a este mismo emisor habiendo pasado por el receptor de destino.
SDK	Siglas tomadas del término inglés ‘Software Development Kit’. Herramientas para el desarrollo de programas informáticos (software).
SLAM	Siglas tomadas del término inglés ‘Simultaneous Localization and Mapping’. La localización y modelado simultáneos es una técnica usada por robots y vehículos autónomos para construir un mapa de un entorno desconocido en el que se encuentra, a la vez que estima su trayectoria al desplazarse dentro de este entorno.
T-CDMA	Siglas tomadas del término inglés ‘Time-Code Division Multiple Access’. Acceso Múltiple por División de Tiempo y Código. Método de control de acceso al medio por multiplexación temporal y división de

	código, donde se emiten secuencialmente varias secuencias ortogonales entre sí que pueden ser posteriormente detectadas en el receptor si se conocen los patrones emitidos.
T	Tesla. Unidad de campo magnético. Equivale a $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$.
tag	Etiqueta. Elemento de un sistema RFID que contiene una antena para recibir y responder a peticiones por radiofrecuencia desde un emisor-receptor RFID.
TDOA	Siglas tomadas del término inglés ‘Time Difference of Arrival’. Diferencia de tiempo de llegada. Método que permite conocer el tiempo que ha tardado una señal desde un emisor a un receptor y, a partir de ese tiempo desde diversos receptores, obtener la posición del emisor. Se diferencia de TOA en que no es necesario que el emisor esté sincronizado con los receptores.
ToA/TOA	Siglas tomadas del término inglés ‘Time of Arrival’. Tiempo de llegada. Método que permite conocer el tiempo que ha tardado una señal desde un emisor a un receptor y, a partir de ese tiempo desde diversos receptores, obtener la posición del emisor.
TTFF	Siglas tomadas del término inglés ‘Time To First Fix’, referido al tiempo que necesita un dispositivo de posicionamiento para proporcionar la primera posición de usuario.
UMTS	Siglas tomadas del término inglés ‘Universal Mobile Telecommunications System’. Sistema universal de telecomunicaciones móviles. Tercera generación de telefonía móvil.
UWB	Siglas tomadas del término inglés ‘Ultra Wide Band’. Banda ultra ancha. Hace referencia a cualquier tecnología de radio que utiliza la banda mayor de 500 MHz o del 25% de la frecuencia central, de acuerdo con la FCC. Permite paquetes de información muy grandes (480 Mbits/s) en distancias de unos pocos metros.
VLC	Siglas tomadas del término inglés ‘Visible Light Communication’. Tecnología de comunicación que a partir de la codificación de señales luminosas emitidas desde dispositivos tipo led realizan la comunicación de información.
Wi-Fi	Marca de la Alianza Wi-Fi que adopta, prueba y certifica que los equipos cumplen con los estándares 802.11. En ocasiones se suele utilizar el término wifi sin guion como sinónimo de interconexión inalámbrica entre dispositivos.
WLAN	Siglas tomadas del término inglés ‘Wireless Local Area Network’. Red inalámbrica de área local.
WPAN	Siglas tomadas del término inglés ‘WiFi Personal Area Network’.

- WPLP** Red Inalámbrica de área Personal.
Siglas tomadas del término inglés ‘Wideband Power Line Positioning’.
- ZigBee** Especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo. Se basa en el estándar IEEE 802.15.4 de WPAN. Permite comunicaciones seguras de bajo consumo.
- ZUPT** Siglas tomadas del término inglés ‘Zero Velocity UpDaTe’.
Referido a la actualización o corrección de la velocidad cuando esta es cero. Estrategia algorítmica que aprovecha que la velocidad del pie de una persona (y del sensor IMU que lleve en su zapato) se hace cero durante el apoyo del pie en cada paso, para de esa forma obtener estimaciones PDR de desplazamiento y orientación muy precisas.

1. INTRODUCCIÓN

Hace miles de años que la humanidad empezó a buscar la manera de cómo saber y comunicar dónde estaba y cómo llegar de un punto a otro. Al principio las estrellas y el Sol fueron el mecanismo para posicionarse. Sin embargo, no basta con saber la posición (unas coordenadas), es importante saber la localización, es decir, dónde estamos respecto a un sistema de referencia. Así nacieron los mapas.

A lo largo de los siglos diversos avances han ayudado a la humanidad a depender cada vez menos del entorno (¿qué pasa un día nublado en el cual no se ven las estrellas o el Sol?): la brújula, el octante, el sextante, el cronómetro, las radiobalizas, entre otros, han ayudado a mejorar cómo saber la posición, la localización y también, cómo navegar de una localización a otra.

La cúspide de estos avances ha llegado a finales del siglo XX, con los *sistemas de navegación por satélite* (GNSS), entre los que los más conocidos son el GPS de los Estados Unidos de América, el GLONASS ruso, el Galileo europeo o el Beidou chino. Estos sistemas han significado un cambio de paradigma fundamental: por un lado, son capaces de dar la posición con precisión de centímetros; y por el otro, permiten conocer la posición a personas sin conocimientos previos. Este hecho, junto con el nacimiento y popularización de los smartphones, que son capaces de ofrecer la posición (vía GNSS y otros mecanismos) han llevado a la humanidad a una situación sin precedentes en la historia: prácticamente cualquier persona puede conocer en todo momento cuál es su localización e, incluso, cómo llegar de un punto a otro sin tener conocimientos de navegación.

Esta situación ha llevado a la eclosión de aplicaciones basadas en localización a todos los niveles: desde aplicaciones de ocio para usuarios particulares, hasta aplicaciones que son parte de grandes infraestructuras como las de tráfico aéreo, pasando por aplicaciones logísticas de transporte.

Así pues, los GNSS han democratizado las aplicaciones basadas en localización y han acostumbrado a la humanidad a disponer siempre de servicios derivados, son lo que se conoce como *servicios basados en localización* (LBS) y *sistemas de recomendación basados en el contexto* (CARS). Pero las posibilidades

que ofrecen estos sistemas van más allá de los LBS o los CARS: pueden transformarse en lo que se conoce como *espacios inteligentes* (EI). El concepto de *inteligencia ambiental* (AmI), donde el usuario se envuelve de tecnología de forma no intrusiva y se comunica con ella de forma natural surgió a finales del siglo XX como una revolución en la forma de aplicar la tecnología y relacionarse con ella. De ahí nacen los EI, que tienen interés tanto en escenarios abiertos como en recintos cerrados.

A pesar de que los EI corresponden tanto a espacios abiertos como cerrados, hay una diferencia fundamental entre ambos, y es que actualmente no existe un sistema de localización universal en espacios interiores al estilo de los GNSS. El motivo es doble: por un lado, la señal del GPS no penetra en el interior de los edificios con intensidad suficiente como para ofrecer una posición fiable; y por el otro, no tienen por qué estar disponibles los «mapas» de los edificios. Además, las personas pasamos el 90% del tiempo en interiores [1, 2, 3] por lo que podemos afirmar que los GNSS son útiles sólo el 10% del tiempo de una persona.

Cabe aclarar, sin embargo, que gracias a los dispositivos móviles y a partir de las *redes inalámbricas de área local* (WiFi o WLAN) y de telefonía celular, es posible obtener una localización aproximada del usuario, pero con precisiones de decenas de metros.

Uno de los aspectos más relevantes de la AmI es, por tanto, la *localización en interiores* (LeI) o indoor, o más en general, la actividad de *posicionamiento y navegación en interiores* (PNI). El motivo es el gran número de aplicaciones potenciales: desde el guiado de personas o robots en grandes espacios (hospitales, dársenas, etc.), hasta la ayuda a servicios de emergencia, pasando por localización y guía de minusválidos o las aplicaciones de ocio. Por otro lado, se prevé que el mercado mundial de LeI moverá del orden de 4.000 millones de euros en 2019 [1, 2, 3] y que experimentará, al menos, un crecimiento sostenido (CAGR) del 35% anual hasta 2025. La consultora Gartner Inc. la clasifica también entre las tecnologías clave en el futuro. Estamos por tanto ante una tecnología en eclosión, que está previsto que sea una revolución al nivel de lo que han sido los sistemas de posicionamiento por satélite (GNSS) en exteriores.

Desde el punto de vista científico, la importancia de la LeI y el PNI se ve reflejada en la elevada producción científica anual, en proyectos europeos como el i-Locate [1], o en el congreso IPIN (*International Conference on Indoor Positioning and Navigation*) auspiciado por el IEEE. Los problemas que plantea actualmente son principalmente tres: falta de mapas de interiores, falta de tecnologías estándares e interoperables, y soporte limitado a servicios basados en localización (i.e. desarrollo de aplicaciones basadas en localización que funcionen en interiores).

La pregunta es entonces: ¿es posible un sistema de posicionamiento, localización y navegación en interiores al estilo del GPS?

A diferencia del caso de GPS, para aplicaciones de posicionamiento en interiores coexisten una diversidad de técnicas y tecnologías. Tal y como se verá a lo largo del presente libro, algunas técnicas permiten un posicionamiento muy preciso para elementos estáticos, mientras otras funcionarán mejor para elementos que estén en movimiento. En cualquier caso, todas dependerán de un mapa de base para localizar el elemento y poder ofrecer navegación por el mismo.

¿Y cuáles son las técnicas que hay actualmente? Las aproximaciones para resolver estos problemas son diversas y se pueden agrupar en extrínsecas e intrínsecas, según si utilizan o no infraestructura en el espacio interior.

En las aproximaciones intrínsecas es el propio elemento a posicionar (una persona, un robot o cualquier otro dispositivo) el que incorpora la tecnología de posicionamiento, entre ellas encontramos:

- Navegación inercial: obtiene la posición mediante un dispositivo que contenga, al menos, un acelerómetro y una brújula, para así conocer la velocidad y dirección en que se mueve el usuario. Con esta información y utilizando ecuaciones de cinemática y dinámica, es posible obtener el desplazamiento del usuario. Cabe destacar que algunos smartphones contienen los sensores necesarios.
- Campo magnético: el campo magnético está presente en toda la Tierra, por lo que es posible explotar las peculiaridades en cada punto para obtener la posición. Para ello es necesario disponer de un dispositivo con magnetómetro, pero algunos smartphones ya disponen de este requerimiento. Las técnicas de ubicación por campo magnético se basan en lo que se conoce como Fingerprinting: se elabora previamente un mapa de los valores de referencia en el espacio a ubicar; y el dispositivo se puede ubicar comparando sus valores con los del mapa de referencia.

En cuanto a las aproximaciones extrínsecas, es necesario disponer de infraestructura desplegada en el entorno para obtener la posición del objeto a localizar. Cabe diferenciar entre dos tipos principales de aproximaciones:

- El primero de los grupos se basa en obtener una estimación de la distancia entre el nodo a localizar y varios nodos de referencia (que constituyen la infraestructura de posicionamiento). Estas estimaciones se pueden obtener en base a: estimaciones del tiempo de vuelo que posteriormente se convierten en distancias usando una estimación de la velocidad de propagación; usando medidas de diferencia de fase entre las señales transmitida y recibida o bien infiriendo la distancia recorrida por la señal en base a la atenuación que ésta sufre durante la propagación. Una vez obtenida las esti-

maciones de distancia (o de diferencia de distancia) a los nodos de referencia, se utilizan algoritmos de triangulación o trilateración para determinar la posición del nodo móvil conocidas las posiciones de los nodos de referencia.

- Una aproximación alternativa es utilizar la medida de la intensidad de señal recibida de varios nodos de referencia para estimar directamente la posición del nodo receptor. En esta aproximación (comúnmente referida como Fingerprinting) se utiliza un mapa de intensidades de señal recibida en diversos puntos del entorno de localización. Comparando las ubicaciones de este mapa con las intensidades recibidas por el móvil, es posible obtener una estimación de la posición de éste.

Entre las tecnologías más comúnmente usada en posicionamiento se encuentran las siguientes:

- Cámaras: el posicionamiento por cámaras permite ubicar cualquier elemento tan sólo mediante técnicas de visión por computador, con lo que, en principio, no es necesario ningún dispositivo en el elemento a ubicar. Sin embargo, a menudo se utilizan elementos pasivos como etiquetas para facilitar la identificación.
- Infrarrojos: el posicionamiento por infrarrojos necesita de emisores y receptores de infrarrojos y hay tanto sistemas en que se posiciona el emisor, como sistemas en los que se posiciona el receptor. En cuanto a las técnicas de posicionamiento, son diversas, pero destacan principalmente las basadas en la fase de la señal (o en la diferencia de fase) combinada son algoritmos de trilateración.
- Acústico: el posicionamiento acústico acostumbra a hacerse mediante el uso de ultrasonidos. Se caracteriza por una gran precisión, pero un corto alcance. Es necesario disponer de al menos un micrófono y emisores de ultrasonidos y las técnicas de posicionamiento se basan principalmente en la determinación del tiempo de vuelo de la señal ultrasónica para la estimación de las distancias a un conjunto de nodos de referencia, combinadas con algoritmos de trilateración.
- Radiofrecuencia: dentro de la radiofrecuencia hay un gran número de tecnologías: WiFi, *Radio Frequency Identification* (RFID), Bluetooth, ZigBee, *Ultra Wide Band* (UWB) y señales de radio y televisión. En todos los casos es necesario disponer de un receptor con un sensor para la radiofrecuencia específica que se utiliza. En general, todos los smartphones disponen de sensor para WiFi y Bluetooth, pero no para el resto. Para posicionar el elemento se pueden utilizar técnicas basadas en Time of arrival y trian-

gulación (entre otras). Existen aproximaciones basadas en tiempo de vuelo o fase de la señal (o sus versiones diferenciales) así como aproximaciones basadas en la intensidad de la señal recibida. En el caso de WiFi es muy común utilizar técnicas de Fingerprinting. En general esta técnica podría clasificarse dentro del grupo de las técnicas sin infraestructura, ya que se utiliza una infraestructura preexistente no específica del sistema de posicionamiento (por ejemplo, la red WiFi de un edificio).

- GNSS de alta sensibilidad: es el uso de sistemas GNSS orientado al posicionamiento en interiores.

Todas estas tecnologías están aún en fase de exploración y aún se están sentando las bases de lo que será el posicionamiento en interiores en el futuro. Además, a menudo, más que utilizar una única técnica, se combinan varios sistemas para mejorar el posicionamiento o se puede utilizar un primer sistema para un primer posicionamiento de baja precisión y un segundo sistema para un posicionamiento de alta precisión.

Por otro lado, sea cual sea la aproximación, la parte de software es muy importante en todos los casos. Así, es común usar uno o varios algoritmos y técnicas de machine learning entre los que destacan: probabilísticos, filtros de partículas, filtros de Kalman, support vector machines, y un largo etcétera, combinados con diferentes métricas.

Finalmente, como se ha dicho al principio, no basta con conocer unas coordenadas, es necesario conocer la localización, para lo que es imprescindible disponer de un mapa. En cuanto a la creación de mapas de interiores, indoorGML es una propuesta que está en fase de implementación [3,4], pero todavía se está lejos un estándar universal.

En este panorama es donde nace el presente libro blanco, creado por red de excelencia de Posicionamiento y Navegación en Interiores (REPNI). Lo hace en un momento en que ya han visto la luz las primeras aplicaciones de usuario final en LeI y PNI, aunque no al nivel, ni en cantidad ni en calidad, de las aplicaciones para exteriores. Los objetivos que persigue el libro son los siguientes:

1. Analizar el impacto socioeconómico que tienen actualmente y que podría tener, una normalización de los sistemas de EI y PNI.
2. Dar a conocer las diversas técnicas actuales de EI y PNI, con su rango de aplicación, ventajas e inconvenientes.
3. Pintar el mapa del estado actual de los EI y los PNI en España a nivel de mercado, industria, investigación y teniendo en cuenta también los stakeholders.

Para ello, el libro se estructura en los siguientes capítulos:

- **Impacto Socioeconómico:** analiza el grado de implantación de los EI y PNI en España, así como las tendencias y oportunidades futuras.
- **Tecnologías de Posicionamiento en Entornos de Interior:** hace un resumen de las principales tecnologías de PNI y EI, con sus requerimientos, rango de aplicación, ventajas e inconvenientes.
- **Principales desafíos:** plantea dónde están actualmente las dificultades de los EI y PNI y hacia dónde se debería avanzar.
- **Análisis Estratégico de los Sistemas de Posicionamiento:** lleva a cabo un estudio del mercado en relación con los EI y los PNI, qué líneas se están considerando estratégicas tanto en España como en Europa, y qué está dando ya fruto a nivel de rendimiento económico.
- **Situación de los Sistemas de Posicionamiento en España:** ofrece un mapa de la situación de los EI y PNI en España.

2. IMPACTO SOCIOECONÓMICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Cada vez más, las personas ocupan su tiempo en entornos de interior, según varios informes basados en Strategy Analytics, lo cifran entre el 80%-90% del tiempo [1]. Sumado al crecimiento del uso de los smartphones y los cambios en el comportamiento del consumo, los espacios inteligentes y las tecnologías de posicionamiento y navegación en entornos de interior presentan una gran oportunidad para las empresas. Al permitir involucrar a los usuarios con las marcas, los productos o con los diferentes entornos, se provoca un aumento en las relaciones de las empresas con los clientes y sus ventas. [2]

Esto ha dado lugar al nacimiento de varias aplicaciones en diferentes sectores buscando mejorar la experiencia de los usuarios y su labor. Según el Informe Global de 2016 de IndoorAtlas [2] se estima que existe un despliegue del 72%, de las empresas encuestadas, de sistemas de posicionamiento en interiores.

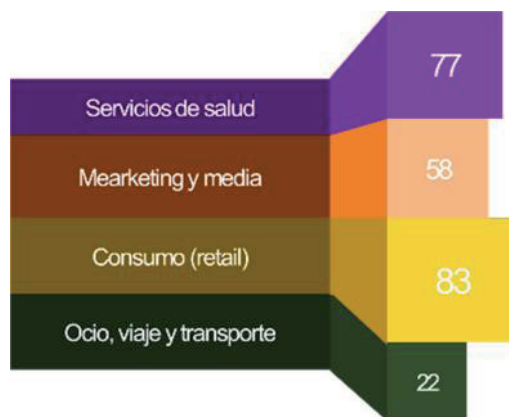


FIGURA 1: Número medio de lugares en los que serán desplegados sistemas de posicionamiento en interiores por sector (modificado de [2])

Estos sistemas presentan un gran valor tanto para los usuarios como para las empresas, y así se puede ver en que, según el Informe Global de 2016 de IndoorAtlas [2], se espera que cada empresa con estos sistemas los despliegue en un promedio de 53 localizaciones. Número que varía, tal y como muestra la imagen, en función del sector, en el que destaca considerablemente el de consumo, con el despliegue en una media de 83 sitios.

A continuación, se muestran algunas de las aplicaciones que se obtendrían a través de estos sistemas en función del sector [3], [4]:

- **Consumo (retail):** Estas tecnologías permiten al cliente localizar los productos que busca, navegar por el centro y guiarlos hasta ellos. A su vez podrán disponer de información personalizada de ofertas basadas en sus hábitos. Las empresas del sector, a través de los datos obtenidos de los usuarios, pueden optimizar sus centros y la distribución de los mismos para obtener la mejor exposición de los productos, minimizar aglomeraciones, potenciar la compra cruzada o incluso la venta *omnichannel* [5], [6], [7], [8].
- **Transporte y Logística:** Los sistemas de localización en interiores pueden ser claves a la hora de conseguir un ahorro de tiempos y costes en los almacenes al permitir cruzar sus datos con los de stock. Estos sistemas permiten controlar la localización de cada elemento, así como cada una de las piezas que lo componen, en las grandes superficies como puede suponer una planta o un almacén.
- **Sanidad:** Estos sistemas pueden ayudar ampliamente tanto a los pacientes en su ubicación como a sus acompañantes. Conseguir que los numerosos visitantes del centro no se pierdan implica una importante optimización de las agendas de consulta y del uso de los recursos del mismo.
- **Servicios profesionales:** Dentro de este sector se pueden encontrar múltiples ventajas gracias a la información que proporcionan estos sistemas. Por ejemplo, en lo referente a **recursos humanos**, a través de estos sistemas se pueden llegar a conseguir reducciones notables en el tiempo de desplazamiento de los trabajadores lo que representa un aumento considerable en la productividad, *engagement* o satisfacción de los empleados, entre otros. El disponer de estos sistemas en los centros de trabajo permite a los trabajadores localizar con rapidez dónde se encuentran las salas de reuniones, el puesto de trabajo, los servicios como cafeterías o baños, la plaza de parking, así como obtener rutas óptimas en tiempo real. Esto también tiene grandes aplicaciones en el ámbito de la **seguridad**, y es que, a través de estos sistemas, las unidades de intervención en emergencias pueden ser capaces de conocer la localización de cada uno de sus miembros y cuáles

son las rutas óptimas para ser capaces de actuar con mayor rapidez, seguridad y efectividad en sus operaciones. Además, respecto a los usuarios, poder tenerlos ubicados en un edificio permite poder avisarlos si entran en zonas restringidas, controlar el tráfico para que no se produzcan aglomeraciones, controlar accesos cerrando y abriendo las puertas para redirigir los flujos de gente, organizar a los equipos de seguridad o para poder hacer estudios para optimizar la distribución de recursos y personas en futuros eventos [6], [9]. Para las operaciones **militares**, y sobre todo en entornos urbanos, estos sistemas permitirán obtener mejor comprensión de su posición y así poder realizar tácticas adaptadas, tomar decisiones bien informadas o definir posiciones defensivas óptimas. De esta forma, se obtiene una mayor efectividad en las unidades desplegadas y se pueden minimizar las bajas. Por último, aprovechando la variedad de información que hoy en día puede llegar a compartir un usuario combinándola con la localización en interiores, es posible realizar una **publicidad** más efectiva enviando los mensajes sólo a aquellas personas interesadas.

- **Turismo, viajes y ocio:** Una aplicación muy útil, ya implantada en múltiples locales de **restauración** con sistemas de pedido automatizados, permite, conocer su ubicación en el local para llevárselo. En este sector existen aplicaciones claras tanto para los usuarios como para las empresas. El usuario podrá beneficiarse de estos sistemas para obtener información del entorno en el que se mueve (locales, puntos de interés o servicios) o conocer rutas hacia las ubicaciones a las que quiere ir. Por otro lado, las empresas podrán obtener, en tiempo real, la información sobre el comportamiento de los usuarios (hacia qué puntos van más o en cuáles se quedan más tiempo), su afluencia, posibles cuellos de botella o si existen servicios sobrecargados o sin gente.
- **Robótica:** Por último, dentro del sector específico de maquinaria estos sistemas permitirán ahorrar gran parte de la infraestructura de sensores y de procesamiento de las señales para los casos en los que los robots tengan que trabajar en entornos controlados, ya que podrán ubicarse sobre el mapa conocido previamente [6], [10].

Como se ha visto las ventajas que presentan estos sistemas repercuten tanto en el ámbito social como en el empresarial. Por un lado, permiten mejorar la experiencia y facilitar las actividades diarias del usuario mejorando su nivel de vida y por otro, permiten generar mayor valor para las empresas, aumentando su conocimiento y posibilidades de actuación sobre los clientes, y por tanto obteniendo mayores beneficios.

2.2. SECTORES, USOS ACTUALES Y GRADO DE IMPLANTACIÓN

Como se ha mostrado anteriormente, los sistemas de posicionamiento en interiores tienen aplicación en diferentes sectores dependiendo del servicio deseado. En general, su grado de aplicación aún está en estado de desarrollo, y aunque existen varios casos de éxito, aún no son sistemas consolidados, por lo que existe mucho margen de crecimiento. Partiendo de esta base, se establece la siguiente barra indicando el grado de aplicación de dicha tecnología en función del número de casos de éxito y productos ya existentes.



Actualmente, los principales sectores en los que se están introduciendo estas tecnologías son los siguientes:

2.2.1. Consumo (retail)

Este sector es el más afectado por los sistemas de posicionamiento y navegación en interiores. La aplicación por excelencia en este sector es el marketing por proximidad. Son ya varias las empresas que están poniendo en práctica este tipo de soluciones para enviar publicidad, ofertas o cupones a usuarios en función del lugar en el que se encuentran y el interés que ha mostrado por dichos productos en algún momento. Otra aplicación existente es la de navegación en los edificios destinados a ventas para la mejor experiencia del comprador, llevándolo a las tiendas que cumplen sus necesidades e indicándole puntos de interés en el edificio (puntos de información, servicios, salidas, etc.) [12], [7].

El posicionamiento interior también tiene sus aplicaciones en las actividades clave de las empresas de retail, como, por ejemplo, el estudio del comportamiento de los clientes dentro de las instalaciones, obteniendo información del recorrido y posición en cada momento, que permite a las tiendas establecer la estructura comercial más eficiente. También permite a las empresas trabajar en la mejora de eficiencia de sus procesos logísticos, manteniendo monitorizado en cada momento sus productos dentro de la tienda, aplicando medidas de prevención en situaciones como roturas de stock [13].

Como se indica, el marketing por proximidad es la aplicación más difundida dentro del sector retail, donde los ejemplos son de lo más variados. Por ejemplo,

Macy's, una de las grandes cadenas omnicanal estadounidense, han llevado a cabo pilotos en sus tiendas en los que envían descuentos y recompensas a los clientes que disponen de su aplicación mientras compran; de esta forma se aplica una capa digital -como en una tienda online- pero en la tienda física, mejorando la experiencia. Otro caso conocido es el de Mercadona, en el que envía mensajes a los clientes al entrar a sus centros, con las ofertas en sus productos [12], [14], [15], [16], [8].

La navegación a través de grandes centros comerciales es también una realidad gracias a este tipo de tecnología, Harrods, en Londres, lanzó una aplicación que mediante beacons permitía a los clientes localizar las tiendas o servicios que necesitaban y marcar la ruta para llegar a ellos, facilitando así la compra a los usuarios [17]. El Corte Inglés, es otra gran superficie que también ha lanzado su propio piloto en Goya y Castellana, en Madrid, y en El Duque, en Sevilla. Otros centros comerciales que también cuentan con esta tecnología son: Galerías (Bogotá), Paragon (Singapur), Allegra (Madrid), Sambil (Madrid) o Clementi (Singapur)[E10]. También se puede tomar como ejemplo la App de Nebraska Furniture Mart, que además de permitir localizar los productos que se están buscando permite escanear sus códigos de barras para obtener más información [18].

La aplicación de las tecnologías de posicionamiento para la mejora de los procesos del sector retail se ha hecho realidad en experiencias como las de Zara, donde para mejorar su proceso logístico ha comenzado a etiquetar con un sistema basado en RFID, con el que tienen localizado el producto en toda la cadena de suministro; además permite controlar el inventario de las prendas y las variaciones de estas para la posterior toma de medidas [11]. Otra experiencia fructífera es la de las cadenas de supermercados Carrefour y Nisa, aplicando beacons a sus carritos para monitorizar el recorrido de sus clientes. De esta forma se pueden obtener datos sobre el recorrido, la distribución y el tiempo que permanecen en las instalaciones; información que se puede utilizar posteriormente para tomar decisiones sobre mercadotecnia [14].

Basada en otra tecnología, como es *Visible Light Communication* (VLC), se encuentra la solución desplegada en MediaMarkt Eindhoven a través de la aplicación «Store Guide» [19] o en Carrefour de Lille (Francia) [20]. Esta solución permite a sus clientes localizar los productos en la tienda o conocer sus promociones a través de su smartphone mediante la modulación de la luz. Otro ejemplo de su uso es la aplicación implantada en aswaaq (Dubái) [21] que permite a los clientes del supermercado obtener una guía de la mejor ruta, alertas sobre descuentos en los productos cercanos o sugerencias de recetas. Además, esta aplicación, permite crear la lista de la compra escaneando los productos en casa, de esta forma, al llegar al supermercado la aplicación guiará al comprador de la forma más eficiente a cada uno de los productos.

Como se puede ver en los ejemplos anteriores, este es uno de los sectores con mayor inserción y con más soluciones en el mercado, por ello su grado de implantación se establece como:



2.2.2. Transporte y logística

Este sector recoge las soluciones para la localización y gestión de activos en interiores [22]. Éstas pueden ser soluciones para la localización y trazabilidad de los medios de transporte para la logística interior, así como para la localización de productos dentro de los almacenes de distribución o de OEMs (*Original Equipment Manufacturer*). También se incluyen soluciones para el transporte con medición de datos en su interior.

En los grandes centros productivos, las tecnologías de posicionamiento sirven para tener controlados los transportes de la cadena de suministro. Por ejemplo, en ŠKODA se aplicó un nuevo control totalmente automático de los vehículos de transporte en el almacén. Se trata de un sistema de *vehículo de guiado automático* (AGV) que entrega las piezas y componentes requeridos a través de vehículos de transporte guiados centralmente directamente a la línea de montaje de la forma más eficiente, reduciendo tiempo y costes [23]. Otra solución de este tipo fue la implementada para Yusen Logistics que consiguió reducir a la mitad el tiempo de operación [E16].

Por otro lado, también es necesario tener controlados los productos, y por ello la Fundación i2CAT ha desarrollado una solución que permite identificar y localizar con gran precisión -y en tiempo real- la posición de paquetes u objetos en espacios interiores, tales como almacenes o centros logísticos a través de comunicaciones por luz visible. El sistema monitoriza a través de *comunicación de campo cercano* (NFC) y wearables que portan los operarios, los movimientos de los productos mientras se manipulan en las instalaciones [24]. Un gran ejemplo del uso de estas tecnologías con este fin es el sistema desarrollado a medida para Zara que localiza, controla y gestiona todos sus productos en el almacén [11].

Además de los productos, también es posible controlar las herramientas. Un caso de éxito fue el proyecto que desarrolló Ubisense para el almacén de una empresa. En él se implantó una solución que permitía localizar herramientas inalámbricas resolviendo los problemas existentes en zonas metálicas, o relacionadas con la pérdida o interferencia de la señal [E28].

Otra aplicación a la que se puede enfocar el uso de tecnologías de posicionamiento en este sector es la orientada al control de activos del transporte. Este es el caso de las implementaciones llevadas a cabo en Metro Transit, Minneapolis/St

Paul o en Le Réseau de Transport de Longueuil que les permite registrar automáticamente los autobuses al entrar en el garaje y asignarlos con mayor facilidad, incluso a través de tarjetas inteligentes, pudiendo optimizar las operaciones de asignación y reducir costes. Otro ejemplo de esta casuística es el de la aplicación que desarrolló Ubisense para la monitorización y control de los camiones en el muelle de carga, que permitía controlar la llegada y salida pudiendo optimizar los tiempos en la logística de salida [E28].

Por otro lado, se encuentran las empresas Exterion Media y Proxama que han realizado un piloto con 500 autobuses de Londres en los que se han instalado estas tecnologías para enviar mensajes e información relevante a los viajeros en los momentos precisos [25].

Estaciones de tren como Swiss Federal Railways o Leningradsky Railway Station están utilizando soluciones basadas en estos sistemas para mejorar la experiencia de sus usuarios. Les permite, a través de su móvil, tener bajo control todo lo que sucede en la estación (qué trenes salen, dónde comprar los billetes, localización de establecimientos, parking, etcétera) y saber cómo llegar a cualquier punto que les interese [15], [26]- [28].

Concretamente la aplicación de Infsoft [27] aún va más allá, dando la posibilidad a los usuarios de compartir su ubicación con sus amigos y dirigirlo al punto de encuentro, realizar compras y recogerlas en la estación al llegar o clasificar los establecimientos según sus gustos.

Por último, un caso a comentar es el de la empresa KAP Robotics que ha desarrollado la maleta inteligente (Olive). Esta maleta tiene movilidad autónoma y dispone de sensores y cámara estereoscópica para localizar al propietario [29].

Se establece su grado de implantación como:



2.2.3. Salud, sector sociosanitario

Este sector es uno de los más influenciados por estos sistemas. Existen diferentes soluciones en el mercado para los centros médicos, hospitales, residencias y para la vigilancia y control de personas mayores. Estas soluciones buscan mejorar la estancia del paciente, y la de sus familiares, ayudando en el desplazamiento por el centro e informando a la familia de la situación -lugar y estado- del convaliente. Por otro lado, también buscan optimizar los flujos, la seguridad y la gestión de los activos, incluyendo el control del equipamiento para optimizar su uso y reducir pérdidas.

Las soluciones dependen de las aplicaciones que se requieran y del centro en el que se utilicen, pudiendo aplicar otras opciones de valor como la monitorización ambiental, el control de las infecciones, la gestión del bloque quirúrgico y de los turnos y entradas de las enfermeras. Incluso pueden incluir la gestión de alertas para personas o para el equipo médico [30].

Algunos de los hospitales en los que se pueden encontrar algunas de estas soluciones son: La Fe (Valencia), Francesc de Borja (Gandía), Provincial de Castellón, De la Vega Lorenzo Guirao (Cieza), Hospital de Llíria, Hospital General de Valencia, Arnau de Vilanova (Lleida), Intermutual de Levante (Valencia), Campus de Salud (Granada), Clínica Alemana (Santiago de Chile), Mutual de Seguridad (Santiago de Chile), Washington Hospital Center, Boston Children's Hospital, University Hospital Basel, Hospital Álvaro Cunqueiro (Vigo) y el Hospital Universitario Lucus Augusti (Lugo). Existiendo veintiún más en proceso de implantación [31], [18], [E10], [E1]-[E4].

Otro centro en el que se ha implantado una solución de este tipo es el de la sede central de Ibermutuamur en Madrid que dispone de un sistema para la optimización del tiempo de espera de los pacientes. Enfocada en la seguridad, se encuentra ya implantada en el Hospital Asepeyo en Coslada (Madrid), una solución de localización en interiores para la protección del personal ante posibles agresiones [E12].

Para el caso de mejorar la asistencia a pacientes en estado crítico, un ejemplo existente es la solución implantada en el Hospital de La Fuenfría (Madrid). Otras de las soluciones implantadas en este sector son con el objetivo de optimizar los recursos humanos y prevenir robos, como es en el caso del St. Mary's Hospital (Connecticut, USA); o simplemente buscando optimizar los procesos en las áreas de quirófano como en el Hospital de Terrassa (Cataluña, España) y en el Hospital de Alta Especialidad (Tabasco, México) [E12].

Por otro lado, para las soluciones de asistencia a mayores se encuentra el caso del Grupo Limcasa (Salamanca, España) o la aplicación del Proyecto Highway 2 Help desarrollada en Francia para ayudar a la gente con Alzheimer [E13]. Por último, otro caso relacionado y que aplica la gestión de enfermería es el de NuVista Living's Wellington Green [E33].

El grado de implantación en el que se encuentra este sector respecto a los demás es el siguiente:



2.2.4. Servicios profesionales (actividades oficina, publicidad y seguridad)

Para este sector las aplicaciones son múltiples pudiéndose orientar a: mejorar la seguridad de los usuarios en espacios grandes y con aglomeraciones (optimi-

zando el tiempo de respuesta y anticipándose a posibles situaciones críticas), facilitar el recorrido o el acceso de las visitas de clientes, o complementar funcionalidades propiamente administrativas en los edificios.

Las aplicaciones con mayor presencia, en este sector, son las de seguridad orientadas al control de activos. En este ámbito se encuentran soluciones ya implantadas como las de Prosegur (iTRACK) o como la Securitas [E10]. También se puede encontrar estas soluciones en estadios, para el control del personal de seguridad, de forma que se pueden verificar sus posiciones y mejorar la gestión del campo [32]. Por otro lado, también, se encuentran aplicaciones de este tipo implementadas en entornos portuarios para mejorar la seguridad y optimizar la logística.

Dentro del ámbito de la seguridad, otra aplicación existente es la de monitorización a niños en los centros comerciales. Estas aplicaciones permiten avisar al personal de seguridad ante cualquier riesgo (caídas, acceso a áreas restringidas o alertas de pánico) así como de posibles alertas a través de botones de pánico móviles. En concreto, en Estados Unidos, aprovechan estos sistemas para el control de la seguridad en diferentes casos, para grandes edificios, incluyendo centros académicos, cubriendo incluso situaciones con armas de fuego [33]- [35].

Como ejemplo en las actividades administrativas, se encuentra el caso de la Consellería de Sanidade (Santiago de Compostela) que aprovechó estos sistemas para implantar una aplicación para sus visitantes que funciona como guía además de que complementa algunas de sus funcionalidades [E10].

Por último, otra de las utilidades para estos sistemas en los edificios, es en las entidades bancarias, como son Citibank, Barclays, DenizBank (Estambul) o US Bank [14], [36]. Estos sistemas buscan facilitar la accesibilidad y experiencia de sus clientes, ya sea permitiéndoles acceder a los cajeros sin necesidad de introducir la tarjeta de crédito, avisando a los empleados del acceso de un visitante con discapacidad para ser más eficientes, con mensajes de atención o proporcionándoles su número en la cola de atención al cliente [37], [38].

En este sector, existen diferentes casos de éxito con proyectos hechos a medida por lo que se establece su grado de implantación como:



2.2.5. Turismo, viajes y ocio

Este sector es también uno de los más afectados por estos sistemas con soluciones que permiten mejorar la experiencia del usuario y obtener un mayor control sobre su localización y sobre las opciones existentes en su entorno [39], [40]. Dentro de este sector se encuentran las soluciones desarrolladas para ferias, even-

tos y exposiciones; en museos, hoteles, equipos de diferentes deportes y bibliotecas. También se incluyen las aplicaciones de entretenimiento, ya sean en centros, redes sociales o para el móvil.

Con la finalidad de ayudar en la localización y navegación en cualquier evento existen algunas aplicaciones como la implementada en el Mobile World Congress (MWC) 2016 para Telefónica (Barcelona) en la que se realizó una demostración en tiempo real a los usuarios del stand, así como las desplegadas en Web Summit 2016 (Lisboa), SPIN 2016 (Santiago de Compostela), Viva Technology (Paris), Utmessan (Islandia), Mahatma Mandir Convention Centre (MMCC) o Copenhagen International Fashion Trade Show. También existen productos específicos con esta finalidad ya conocidos por Reed Exhibitions US, Penton, Emerald Informa, HIMSS, American Thoracic Society, ISTE, CEDIA y Brewers Association. Así como en otras 90 exposiciones realizadas en ocho países diferentes [14], [41]- [46], [E10].

Otra aplicación de este tipo fue la desarrollada para Science World, British Columbia, en la que los visitantes pudieron interactuar con la exposición «Zoom into Nano» buscando elementos invisibles a la vista. Estos sistemas están teniendo una gran entrada en aplicaciones de entretenimiento y gamificación, como se puede ver en la solución desarrollada para los participantes de Geotrail GO que gamifica su visita al centro comercial Lyngby Storcenter, así como en aplicaciones en las redes sociales, permitiendo compartir información sobre tu localización y comentar tu estado y situación (Foursquare, Google Local, Yelp, Twitter, Sensewhere o Facebook entre otras) [41], [47]- [50].

Otras soluciones en este sector son, por ejemplo, la adopción de *beacons* para aumentar el compromiso móvil de los visitantes, como es el ejemplo del BMW World en Alemania, o en el caso del FC Barcelona, The International Speedway Corporation y Daytona International Speedway, con una aplicación para ejecutar mensajes de llegada y guiar a los usuarios de smartphone en sus estadios. Otro caso de este tipo es el de Porsche que también ofrece a los usuarios una aplicación con contenido enriquecido para navegar en el Customer Center de Leipzig [35].

Dentro de los deportes, además de utilizarse como guía de recorrido a los puntos de interés en los estadios, se están adoptando en el seguimiento de los jugadores con el objetivo de conseguir un mayor control de su rendimiento en el juego. Ejemplo de ello son: el equipo de University of Kentucky, Houston Rockets, Argentina Hockey, University Of Oregon, fútbol femenino de Shanghai, Newcastle United FC, Jacksonville Jaguars, Cronulla Sharks, Seattle Sounders FC, Melbourne Football Club, Hammarby If, St. Kilda FC o la NFL entre otros [14], [51]- [57], [E19], [E21]-[E23], [E35].

Con el objetivo de mejorar las experiencias de los visitantes en los museos, aeropuertos o bibliotecas, también se han desarrollado diferentes aplicaciones

que agregan interactividad y contenidos, a veces personalizados, a la experiencia. Se encuentran entre los museos que poseen esta tecnología: Guggenheim Museum en Nueva York, Palazzo Madama—Museo Civico d’Arte Antica (Italia), Icelandic Wartime Museum, Hali Museum (Iceland) o el American Museum of Natural History [12], [41], [58], [50], [59]. Entre los aeropuertos que poseen estos sistemas se encuentran el Aeropuerto Internacional de Hamad en Doha Qatar Airlines, Frankfurt Airport, el aeropuerto de Río de Janeiro, Portland International Airport, Hong Kong International Airport, Heathrow Airport, Nice Côte de Azur Airport o John F. Kennedy Airport. Aena también dispone de una aplicación en los aeropuertos de Madrid y Barcelona que envía información personalizada a los pasajeros. En el caso de las bibliotecas, se dispone del piloto y caso de estudio realizado en la Universitat Jaume I [60]. Gigantes como Google o Apple ya han desarrollado aplicaciones propias para que los usuarios puedan encontrar fácilmente la ubicación de los servicios en centros comerciales o aeropuertos [14], [18], [35], [61].

Al igual que con los museos o bibliotecas estos sistemas se utilizan para la ubicación en edificios públicos o privados para guiar a los visitantes y mejorar su experiencia facilitando su recorrido e indicando datos de interés. Algunos de los ejemplos son: DBS Changi (Asia), OUE Downtown o Duo Towers(Singapur) [E10].

A partir de lo visto, se puede determinar que este sector se encuentra en el siguiente grado de implantación:



2.2.6. Industria

Se agrupan los sectores que involucren cualquier proceso de transformación de la materia (textil, roca, automoción, químicos, madera, naval, etc.) en el sector Industria debido a que unifican las soluciones con el propósito de mejorar los procesos de fabricación y optimizar los flujos de trabajo en planta. Este es uno de los sectores con mayor margen de desarrollo ya que los beneficios que presentan estas tecnologías al sector son múltiples.

El primer caso para comentar es el de Hardis Group que ha creado un dron, ya probado en la empresa FM Logistic, para automatizar el control y el seguimiento de los productos al realizar el inventario en almacén. El propósito es reducir tiempos y aumentar la productividad y seguridad [62]. Otra aplicación a considerar es la desarrollada por Pointr, para una gran empresa manufacturera, que permite la localización y trazabilidad de los trabajadores creando estadísticas sobre el tiempo dedicado a sus diferentes tareas [15]. También existe otro sistema desarrolla-

do por Nebusens para monitorizar a los trabajadores dentro de las grandes instalaciones, así como a la maquinaria pesada, permitiendo encenderlas y apagarlas en caso de que los trabajadores pudiesen ser heridos [E13]. Con este propósito, también existe el caso en el que Zebra implementó una solución en una planta de fabricación de acero en Linz, Austria (Voestalpine) que permitió automatizar sus procesos para una evacuación más segura y eficiente [E20].

Por otro lado, en el campo aeroespacial, existe la aplicación desarrollada para Tobyhanna Army Depot que le permitió, a través de estos sistemas, procesar las piezas y materiales a reparar [E17].

En el campo de la automoción, se encuentra a BMW, que implementó en su planta de Regensburg una solución para automatizar el control de herramientas y eliminar el escaneado manual de códigos de barras. Consiguiendo aumentar la eficiencia y eliminar los errores humanos [E30].

Por último, destacar que hay registro de otro tipo de desarrollados, pero buscando aplicaciones muy específicas y a nivel usuario, como puede ser el despliegue de tags para el vuelo de un dron en un entorno industrial, él mismo se localizaba y conocía su siguiente posición. O también un sistema para la localización de herramientas en un entorno con muchas superficies metálicas Otro ejemplo es la implementación de estos sistemas en robots (AGV y acuático) para controlar su posición y realizar un mapeo de la superficie [E35].

Como sector aún emergente en la aplicación de estas tecnologías se establece su grado de implantación como:



2.3. TENDENCIAS Y OPORTUNIDADES FUTURAS

En la actualidad los modelos de negocio se están transformando para adaptarse a todos los cambios disruptivos que están ocurriendo gracias a la interconectividad y comunicaciones de los dispositivos. El cliente se está volviendo el centro y el principal elemento de la cadena de valor, los negocios se centran en cubrir las necesidades del cliente y conseguir así su fidelización.

Además, con la aparición de nuevas tecnologías que permiten facilitar el desempeño de las funciones, automatizar el trabajo, y mejorar las actividades diarias también se está transformando la forma de vivir de la sociedad haciendo nuevas tendencias socioculturales.

Esto ha hecho que para que los negocios consigan sobrevivir a esta transformación necesiten responder de forma rápida a las posibles necesidades que estos

cambios socioculturales provocan y puedan provocar. Internet será imprescindible para las empresas y organizaciones, así como los smartphones u otras tecnologías que permitan mejorar la experiencia de los consumidores y cubrir lo mejor posible todas sus necesidades. Por otro lado, en un mundo conectado será preciso realizar posibles acuerdos con proveedores o clientes de otros países persiguiendo un negocio más global y competitivo [63].

El usuario actual no concibe su rutina diaria sin su dispositivo móvil, según el Informe de Ericsson [64] el tráfico total en las redes móviles ha aumentado en un 70% entre finales del Q1 de 2016 y el Q1 de 2017, y es que ya no sólo se navega, sino que también se realizan compras y se paga a través de ellos. Las oportunidades que brindan estos dispositivos son inmensas, con su rápida evolución, la llegada de móviles más grandes, rápidos, potentes y seguros y con muchas más funcionalidades es inminente. Los sistemas de posicionamiento en interior deben valerse de esta situación y convertir este elemento en un componente esencial y aprovechar la información que éste obtiene del usuario gracias al número de sensores que incorporan [9], [65].

Hasta ahora el propósito buscado para estos sistemas era encontrar la tecnología más adecuada para localizar objetos o personas en entornos de interior con mayor exactitud y rentabilidad sin que el precio o la infraestructura fuesen una restricción. Pero hoy en día, ya es necesario pensar en soluciones prácticas para el usuario, las cuales mejoren su actividad y que, a la vez, sean asequibles en precio. Para ello es necesario ir adaptándose a sus necesidades diarias y reducir los costes [66].

A través de las tendencias sociales que los smartphones están ocasionando, los sistemas de posicionamiento en interiores podrán obtener grandes oportunidades mediante el social commerce mobile o la interacción social (crowdsourcing). En concreto, la tendencia del crowdsourcing podrá ser utilizada para establecer mapas de interiores. A través de la colaboración de los usuarios, se pueden aprovechar sus datos (señales de los sensores, señales Bluetooth o WiFi) para realizar los mapeados internos de los edificios. Claramente es una opción con grandes ventajas para estos sistemas [68].

Otro punto que considerar, a corto plazo, es el aprovechamiento de las infraestructuras existentes (puntos de acceso, lámparas, transmisores y sistemas de sonido) para realizar la localización de activos, de esta forma conseguirán mayores beneficios y se reducirán los costes de implantación.

Del artículo «Evolution of Indoor Positioning Technologies» elaborado por el Tecnológico de Monterrey [68], la facultad de Ingeniería - MyDCI, de la Universidad Autónoma de Baja California, y el Programa de Ingeniería de Software, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, se extrae que la hibridación de las tecnologías así como el avance y la gran acogida de los sistemas de geolocalización

Sin embargo, cabe señalar que las diferentes tipologías y tecnologías pueden ser complementarias en sus múltiples aplicaciones. Por ello, el futuro de los sistemas de posicionamiento pasa por el diseño de sistemas híbridos.

Los avances en las tecnologías de materiales, electrónica y comunicación facilitan la mejora continua en el rendimiento de los sistemas sensoriales, y por tanto de las diferentes estrategias para la localización. La continua evolución de los sistemas de posicionamiento en interiores justifica la sucesiva aparición de publicaciones orientadas a su revisión del estado del arte [2], [6]–[9]. Aun siendo conscientes de la caducidad de los valores mostrados, en la Tabla 1 y en la Figura 4 se apuntan algunos aspectos cuantitativos y cualitativos que ayudan a comparar diferentes tecnologías usadas en sistemas de posicionamiento.

Tecnología	Fortalezas	Debilidades
Infrarrojos	Bajo coste	Luz solar fuente de interferencia. Multicamino
Comunicación por luz visible (VLC)	No intrusivo	Coste de instalación
Ultrasonidos	Buena precisión	Eliminación de interferencias. Multicamino
Sonido audible	Bajo coste	Baja exactitud y precisión
Wi-Fi	Bajo coste	Vulnerable a cambio de puntos de acceso
Bluetooth / ZigBee	Bajo coste	Especial equipamiento de usuario
RFID	Muy bajo coste	Muy baja exactitud y precisión
UWB	Alta exactitud	Alto coste
Campo geomagnético	No requiere infraestructura	Requiere mapeado
Inercial	Bajo coste	Error acumulativo
Visión por computador	Bajo coste	Sensible a condiciones luminosas

TABLA 1: Comparación entre tecnologías de posicionamiento en interiores [2].

La elección de una u otra tecnología sensorial es claramente dependiente de la aplicación y de los requisitos exigidos por parte del usuario. En las siguientes secciones de este capítulo se van a presentar brevemente tanto algunos de principales requisitos de usuario como algunas de las tecnologías más utilizadas en el desarrollo de sistemas de posicionamiento en espacios de interior.

Por otro lado, se espera que con el lanzamiento del Bluetooth 5 se refuerce aún más el mercado de proximidad. Se prevé que pueda transformar potencialmente las interacciones con el *internet de las cosas* (IoT) a través de su mayor alcance, velocidad y capacidad de difusión [72].

Pero las oportunidades de los beacons no sólo están limitadas al retail en el sector de consumo, sino que, tal y como muestra la siguiente imagen, presentan múltiples ventajas en otros sectores como el de ocio y turismo.

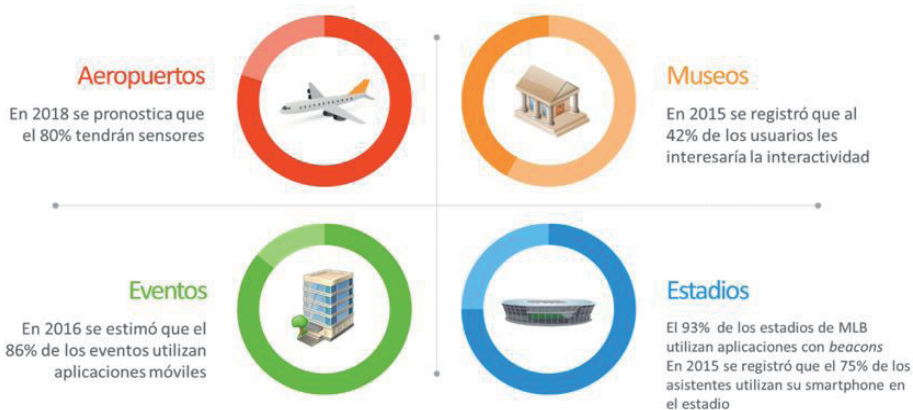


FIGURA 3: Características de la situación según sector (modificado [73], [59], [74],[57])

Dentro de las aplicaciones de ocio, destacan por su potencial las bibliotecas y es que a través de servicios como:

- Notificaciones de libros por proximidad a las estanterías
- Notificaciones para el miembro de la biblioteca sobre disponibilidad de libros solicitados o fechas de renovación
- Avisos de eventos en la biblioteca
- Soporte a la navegación dentro del lugar
- Identificación de salas de estudio libres para su reserva

Las bibliotecas pueden obtener grandes ventajas para sus usuarios y conseguir mayor control y un mejor funcionamiento [75].

Otro sector con oportunidades de mejora y desarrollo para los beacons u otras tecnologías de posicionamiento en interiores es el sector industrial. Al poseer grandes espacios interiores con múltiples posibilidades de interacciones y datos para capturar se convierten en lugares perfectos para dispositivos de esta índole.

Además, con la amplia gama de equipos, actividades de entregas y diferentes equipos de personas, los edificios industriales encajan perfectamente para el uso de las tecnologías de posicionamiento y navegación en entornos de interior.

Por otro lado, teniendo presente el valor del IoT para este sector, la necesidad de una integración sin fisuras e inalámbricas impulsará la aparición de nuevas tecnologías, y dispositivos como los beacons serán clave para lograr una verdadera automatización y obtener entornos inteligentes [76]. A través de ellos se podrán recopilar los datos necesarios para impulsar el cloud computing siendo capaz de obtener la imagen virtual de los procesos para la optimización y eficiencia de los mismos. De un Informe de Proximity Studio [15] se obtiene que las estimaciones muestran que el impacto económico de las aplicaciones de IoT en las fábricas podría alcanzar entre 1,2 billones y 3,7 billones de euros al año para 2025.

Conectando lo físico con lo digital, las empresas podrán mejorar la eficiencia y la automatización del trabajo, optimizando al mismo tiempo el espacio y las técnicas de almacenamiento. A través de estos sistemas, podrán realizar diferentes actividades, entre las que se encuentran [6], [7], [34], [15]:

- Monitorización del estado de los equipos y espacios (por ejemplo, control de temperatura para áreas de alto riesgo)
- Gestión de equipos y habitaciones (por ejemplo, apagado/encendido de luces o calefacción al salir/entrar a una habitación)
- Asistencia de los empleados y seguimiento del flujo de trabajo (por ejemplo, para el control del horario o las tareas realizadas)
- Gestión de dispositivos móviles (por ejemplo, para deshabilitar funcionalidades en áreas confidenciales)
- Seguimiento de activos (por ejemplo, para asegurar la localización de maquinaria pesada)
- Gestión de inventarios (por ejemplo, con el control de llegadas/salidas de los camiones)
- Mejora de la eficiencia en seguridad, mantenimiento o control de calidad (por ejemplo, para el control de presencia en la ruta del personal de seguridad)
- Localización en casos de emergencia (por ejemplo, en situaciones de pánico)
- Guiado de las visitas por la fábrica
- Optimización de procesos. Al tener la información sobre empleados, el inventario y los activos, es posible visualizarlo para proporcionar información útil.

Todo ello, les permitirá a las empresas lograr una mejor localización de activos, una mayor efectividad de la fuerza de trabajo y una toma de decisiones más orientada a los datos.

También se estima, según McKinsey [76], que el IoT puede disminuir el coste de la clasificación en el almacén hasta un 30% para 2025, lo que presenta una gran oportunidad para estos sistemas dentro del sector de Logística y transporte. La tecnología *Bluetooth Low Energy* (BLE) puede mejorar drásticamente la forma en que las empresas de logística trabajan en la trazabilidad de activos, lo que lleva a mejoras en la capacidad de detección, planificación, notificación y detección de fallos. Y lo que incluso es más importante, estos sistemas son fácilmente escalables. Gracias a ellos se podrá realizar un almacenamiento más fácil y efectivo, generar información útil y reducir errores.

Por otro lado, cabe destacar la oportunidad de desarrollo que presentan los entornos subterráneos y en concreto las estaciones de metro para los sistemas de posicionamiento y navegación en entornos de interior. El rediseño y la digitalización de estas instalaciones incluyen cada vez más conexiones WiFi, puertos USB, pantallas digitales de información y cámaras de seguridad. En concreto, se resalta el caso de Nueva York, en el que las inversiones necesarias del proyecto forman parte de un programa de 27.000 millones de dólares en cinco años. Otro estado que está optando por invertir en esta transformación es Japón, preparando la acogida de las olimpiadas y paraolimpiadas de 2020 [77]- [78].

Por último, comentar dos tecnologías por las que apuestan Google y Philips para el desarrollo de sistemas de posicionamiento en interiores que causarán un nuevo enfoque y abrirán las puertas a nuevas aplicaciones para estos sistemas:

- Cámaras con *Visual Positioning Services* (VPS). El VPS determina la ubicación de un dispositivo basándose en imágenes en lugar de en señales GPS. VPS primero crea un mapa tomando una serie de imágenes que tienen una ubicación conocida y analizándolas en busca de características visuales clave, como el contorno de edificios o puentes, para crear un índice de búsqueda rápido y a gran escala de esas características visuales. Para localizar el dispositivo, VPS compara las características de las imágenes del teléfono con las del índice VPS. Sin embargo, la precisión de la localización a través de VPS se ve muy afectada por la calidad tanto de las imágenes como de la ubicación asociada a ellas. Y eso plantea otra pregunta: ¿dónde se encuentra una fuente extensa de imágenes globales de alta calidad?

Para Google, ese índice VPS son datos de Street View de 93 países de todo el mundo con «billones de puntos de referencia fuertes para aplicar la triangulación». A medida que el teléfono de un usuario explora el mundo, primero «filtra las partes temporales de la escena y se centra en una estructura permanente que no cambia con el tiempo» antes de hacer coincidencias. El aprendizaje automático se utiliza para eliminar árboles que pueden tener

un aspecto diferente según la estación del año, el movimiento dinámico de la luz y la construcción [79], [10].

Otro aspecto del modo de navegación a pie es ARCore para superponer direcciones y otros puntos de interés como cafés y tiendas. Esta es otra forma en que Google está usando la cámara para añadir contexto a lo que estás viendo en el mundo.

Utilizando la cámara del smartphone como sensor, esta tecnología permite una forma más potente e intuitiva de ayudar a las personas a determinar rápidamente el camino a seguir.

- VLC de Philips. Cada luminaria LED de Philips en el espacio, transmite su ubicación a través de una modulación de la luz que es imperceptible al ojo humano, pero es detectado por la cámara del smartphone del usuario. Se ha empezado a utilizar, como hemos visto, en el sector del consumo con gran acogida [19], [20]. Se prevé un crecimiento considerable de estas tecnologías, y es que se espera un crecimiento del 79% (Tasa Anual Compuesta de Crecimiento) de 2016 a 2023. Esto en gran parte es debido a la creciente aparición de iniciativas reguladoras sobre la eficiencia energética que provocan mayor demanda de LED. Además, esta tecnología se podrá integrar con los paneles solares creando un receptor autoalimentado lo que abre nuevos caminos de aplicación en el ancho de banda rural, backhaul («red de retorno»), beacons de bajo coste o IoT [80].

3. TECNOLOGÍAS DE POSICIONAMIENTO EN ENTORNOS DE INTERIOR

3.1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de posicionamiento en interiores utilizan una amplia gama de tecnologías que presentan diferentes características. Y, para cada una de ellas, se han desarrollado diferentes técnicas de localización en función de qué información utiliza, cómo se recoge y de las diferentes configuraciones de la infraestructura empleada.

Sin duda, una gran parte de sistemas IPS están basados en el intercambio de señales inalámbricas entre una serie de receptores y emisores. Con independencia de la tecnología utilizada, los problemas más comunes a los que se enfrenta un IPS de este tipo están relacionados con la calidad de la señal, la estrategia de despliegue de antenas, receptores, transmisores, etc., las situaciones sin visión directa, la localización dinámica, la interferencia de otros dispositivos y, de forma muy particular los efectos de multitrayecto de señal que pueden contribuir significativamente al error del posicionamiento en muchos entornos interiores, especialmente en tecnologías diseñadas para obtener posicionamiento de alta precisión. En lo que se refiere a las estrategias utilizadas para llevar a cabo este tipo de sistemas IPS, estas se basan en: tiempo de llegada/tiempo de vuelo (ToA/ToF) que mide el tiempo necesario para llegar desde la emisión de la señal hasta la recepción; tiempo de llegada diferencial (TDoA) que mide la diferencia entre los tiempos de llegada a diferentes receptores (una alternativa a esta es la medida de la fase de la señal de llegada o la fase diferencial –PoA y PDoA–); ángulo de llegada (AoA) que mide los ángulos de llegada a cada receptor desde cada emisor; e intensidad de la señal recibida (RSS) que extrae la distancia entre el emisor y el receptor en función de la intensidad de la señal que llega a cada receptor.

Otro importante tipo de sistema de posicionamiento son aquellos basados en navegación inercial mediante la instalación de acelerómetros y giróscopos en el objeto móvil. La principal limitación de esta tipología de sistemas de posicionamiento es la acumulación de error a lo largo del tiempo.

Sin embargo, cabe señalar que las diferentes tipologías y tecnologías pueden ser complementarias en sus múltiples aplicaciones. Por ello, el futuro de los sistemas de posicionamiento pasa por el diseño de sistemas híbridos.

Los avances en las tecnologías de materiales, electrónica y comunicación facilitan la mejora continua en el rendimiento de los sistemas sensoriales, y por tanto de las diferentes estrategias para la localización. La continua evolución de los sistemas de posicionamiento en interiores justifica la sucesiva aparición de publicaciones orientadas a su revisión del estado del arte [2], [6]–[9]. Aun siendo conscientes de la caducidad de los valores mostrados, en la Tabla 1 y en la Figura 4 se apuntan algunos aspectos cuantitativos y cualitativos que ayudan a comparar diferentes tecnologías usadas en sistemas de posicionamiento.

Tecnología	Fortalezas	Debilidades
Infrarrojos	Bajo coste	Luz solar fuente de interferencia. Multicamino
Comunicación por luz visible (VLC)	No intrusivo	Coste de instalación
Ultrasonidos	Buena precisión	Eliminación de interferencias. Multicamino
Sonido audible	Bajo coste	Baja exactitud y precisión
Wi-Fi	Bajo coste	Vulnerable a cambio de puntos de acceso
Bluetooth / ZigBee	Bajo coste	Especial equipamiento de usuario
RFID	Muy bajo coste	Muy baja exactitud y precisión
UWB	Alta exactitud	Alto coste
Campo geomagnético	No requiere infraestructura	Requiere mapeado
Inercial	Bajo coste	Error acumulativo
Visión por computador	Bajo coste	Sensible a condiciones luminosas

TABLA 1: Comparación entre tecnologías de posicionamiento en interiores [2].

La elección de una u otra tecnología sensorial es claramente dependiente de la aplicación y de los requisitos exigidos por parte del usuario. En las siguientes secciones de este capítulo se van a presentar brevemente tanto algunos de principales requisitos de usuario como algunas de las tecnologías más utilizadas en el desarrollo de sistemas de posicionamiento en espacios de interior.

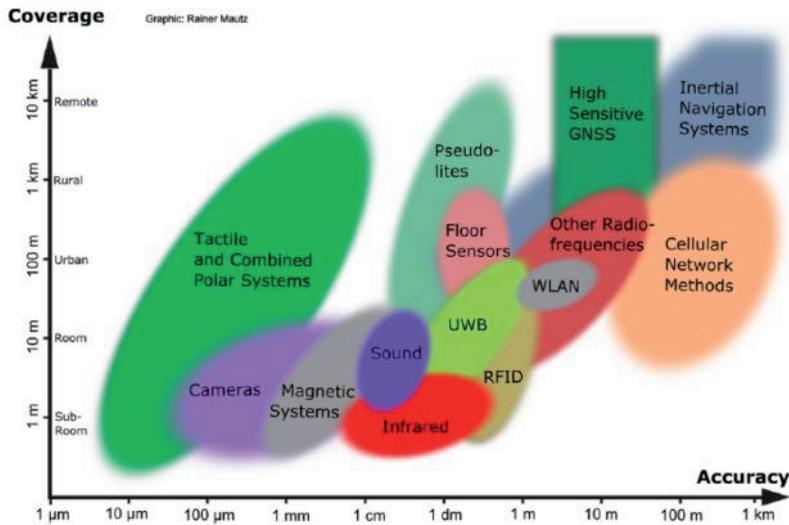


FIGURA 4: Comparativa entre tecnologías de posicionamiento en interiores atendiendo a criterios de cobertura y exactitud en la medida [9]

3.2. PRINCIPALES REQUISITOS DE LAS TECNOLOGÍAS DE POSICIONAMIENTO

Todo trabajo de investigación, desarrollo e innovación pasa por establecer unos requisitos de funcionamiento generales y/o específicos para determinadas aplicaciones. Estos requisitos se han de cuantificar mediante parámetros o índices de comportamiento de forma que permitan comparar entre sí las diferentes tecnologías. En el caso de los sistemas de posicionamiento en interiores este proceso es de suma importancia.

En general, el usuario de estas tecnologías prima aspectos como bajo costo, bajo consumo, baja latencia, miniaturización, bajo mantenimiento, una cantidad mínima de infraestructura dedicada, e índices altos de exactitud, seguridad, privacidad y fiabilidad.

Realmente son múltiples los requisitos a tener en cuenta a la hora de elegir la tecnología adecuada para una aplicación de posicionamiento en interiores. En [1] se incluyen: exactitud, área de cobertura, infraestructura requerida, madurez de mercado, presentación de datos de salida, privacidad, tasa de actualización, interfaz con el usuario, integridad del sistema, robustez mecánica, disponibilidad, escalabilidad, número de potenciales usuarios, grado de intrusión, y cobertura legal. Adicionalmente, en [2] se proporciona una perspectiva tecnológica de los

sistemas de posicionamiento en interiores, incluyendo un amplio abanico de tecnologías y enfoques y presenta la evolución y las tendencias que se prevén.

A continuación, se da una breve descripción de los principales requisitos y, en función de algunos de ellos se muestran datos comparativos de tecnologías de posicionamiento en interiores.

3.2.1. Exactitud

Según el Vocabulario Internacional de Metrología, el término exactitud (accuracy) se define como la proximidad entre el valor verdadero y el valor medido de una magnitud o mesurando. Así, una medida es más exacta cuanto menor sea el error de medida.

Un término relacionado es el de precisión o proximidad entre los valores obtenidos en mediciones repetidas de una misma magnitud en condiciones de repetibilidad. Por tanto, está asociado a la dispersión de las medidas reiteradas.

Un concepto más amplio que el de precisión es el de incertidumbre ya que esta tiene en cuenta, además de las fuentes de desviación aleatorias, las sistemáticas.

Admitiendo una distribución normal de medidas, habitualmente se utilizan dos métricas para cuantificar la calidad de las medidas: la raíz cuadrada de la media de las desviaciones al cuadrado (*Root Mean Square Deviation —RMSD—*) y el valor medio del valor absoluto de las desviaciones (*Average Absolute Position Deviation*).

3.2.2. Cobertura y continuidad

La cobertura de un sistema de posicionamiento indica el espacio donde el sistema debe garantizar las prestaciones exigidas. Se puede hablar de: a) Cobertura Local si el espacio de funcionamiento está bien definido en un área delimitada y no extensible (una habitación, una planta de un edificio, un edificio completo, etc.); b) Cobertura Escalable cuando los sistemas son capaces de incrementar el espacio cubierto, por ejemplo añadiendo nuevos subsistemas incluso con tecnologías diferentes (en principio no tiene por qué suponer pérdida de prestaciones); y c) Cobertura Global cuando los sistemas funcionan en todo el mundo (o en una zona extensa especificada), como es el caso del GNSS.

La continuidad es la propiedad de operación del sistema a lo largo del período de tiempo necesario para realizar su función específica (en caso de cortes en el funcionamiento debería establecerse una estimación de la frecuencia de aparición de estos). También se establece el concepto de continuidad espacial, en el caso de que diversos subsistemas (de la misma o distinta tecnología) coexistan para cubrir zonas extensas: en las zonas de cambio de unos subsistemas a otros el

posicionamiento deberá estar garantizado. Un caso típico es cuando se cambia de sistemas de posicionamiento en interiores a exteriores, o viceversa.

3.2.3. Tasa de actualización

Atendiendo a la tasa de actualización de la información aportada por la tecnología sensorial, las medidas pueden ser periódicas, bajo demanda o basadas en eventos.

Se habla de medidas periódicas cuando el usuario dispone de estas de forma regular, equiespaciadas en el tiempo (periodo de muestreo). Las medidas son bajo demanda cuando es el usuario el que establece el momento de actualización de las mismas. Las medidas basadas en eventos son aquellas en las que el mecanismo de disparo o actualización de la información depende de magnitudes asociadas a la propia medida, por ejemplo, el cambio de nivel experimentado en el propio sensor o el nivel de incertidumbre alcanzado en el estimador remoto [3]–[5].

Como es sabido, el concepto de tiempo real es relativo y está ligado a la aplicación. Así, para la detección de elementos intrusos en una habitación, obtener medidas cada segundo puede ser suficiente para disponer de información en tiempo real. Sin embargo, este periodo sería inaceptable para estimar la posición de un robot de limpieza en la misma habitación desplazándose a 1m/s. Por tanto, la cuantificación del requisito de tiempo real depende de la aplicación: detección de intrusos, ubicación de mobiliario, seguimiento de robot industrial, asistencia en entornos domésticos, etc.

En general, se dice que un sistema es de tiempo real cuando responde a un estímulo externo en un tiempo finito, lo suficientemente pequeño para que no altere el valor de la respuesta.

Un concepto temporal asociado a la respuesta de los sensores es el de latencia, entendida como el retardo con que la información detectada solicitada está disponible para el usuario. Obviamente, en sistemas sensoriales de tiempo real, esta latencia ha de ser despreciable.

3.2.4. Disponibilidad

Disponibilidad es el porcentaje de tiempo durante el cual el servicio de posicionamiento está disponible para su uso con la exactitud/precisión e integridad requeridas. Puede estar limitada por factores aleatorios (fallos de los sistemas o medidas erróneas, congestión de comunicaciones), así como por factores programados (mantenimiento rutinario). Aunque dependerá de la aplicación particular, en general, podrían especificarse tres niveles de disponibilidad: a) baja disponi-

bilidad si se cubre menos del 95% del tiempo; b) disponibilidad frecuente con tiempos mayores del 99%; y c) alta disponibilidad para tiempos de más del 99.9%. Suelen ser los usuarios quienes imponen unas especificaciones de disponibilidad, y menos común que las indiquen los desarrolladores.

3.2.5. Integridad

La integridad se refiere al grado de confianza con que un sistema ofrece un valor de medida. Para delimitar el riesgo de integridad los sistemas de medida suelen establecer un límite de alarma para detectar los casos en que un malfuncionamiento del sistema conduce a un valor inaceptable de la magnitud evaluada.

En el contexto de posicionamiento en interiores, este parámetro es poco relevante y, en la mayoría de los casos, no es tenido en cuenta.

3.2.6. Interfaz de usuario

El requisito de interfaz de usuario o interfaz hombre-máquina está relacionado con el modo en que el dispositivo de posicionamiento presenta la información registrada. Algunos aspectos a tener en cuenta son: información gráfica o en modo texto, 2D o 3D, información topológica o cartográfica, etc.

3.2.7. Seguridad y privacidad

La seguridad de un sistema es el grado de protección contra efectos no deseados como invasión de la privacidad, robo de datos, corrupción de información o daño físico. Un sistema sensorial seguro debiera ofrecer protección contra el acceso no autorizado, pérdida o efectos incontrolados de la información del sistema.

En general, se han de tener en cuenta los aspectos legales relativos a la captura, procesamiento y disponibilidad de los datos registrados. Aspectos que son más críticos dependiendo del campo de aplicación: registros de audio o vídeo de ciudadanos en plazas, calles o centros públicos; seguimiento de pacientes en centro hospitalario o geriátrico, etc.

3.3. CÁMARAS

Una de las alternativas para la estimación de la localización de objetos en un espacio es a partir de la energía luminosa recibida o reflejada de emisiones en el

espectro visible o infrarrojo, siendo una solución frecuente la utilización de cámaras (visión artificial) para la adquisición de la energía luminosa. Esta tecnología destaca por proporcionar una cantidad de información muy superior a otras tecnologías (UWB, acústica o infrarrojos), y su uso no está limitado únicamente a la localización sino también al reconocimiento de objetos, gestos etc. El uso de cámaras posibilita disponer de un sistema sensorial transparente al usuario, y la precisión alcanzada es del orden de centímetros, lo que permite su uso en diferentes aplicaciones. No obstante, la solución basada en cámaras presenta algunos inconvenientes, entre los que se pueden destacar la necesidad de tratamiento de una cantidad elevada de información ambigua y compleja que hace que las necesidades de hardware aumenten y que el tiempo real requiera de un uso «óptimo» de la información proporcionada. En general el coste de un sistema basado en visión artificial es superior al de soluciones comerciales basadas en otras tecnologías. Y a todo ello hay que unirle el hecho de que la información suministrada por cámaras genera en muchos casos problemas de protección de privacidad, sobre todo en su aplicación en espacios públicos. Dentro de las cámaras se puede distinguir dos grandes grupos: cámaras de color (RGB) y de Tiempo de Vuelo (Time-Of-Flight- cameras). Las primeras aportan información sobre el color de la escena y las segundas proporcionan imagen de distancia, además de nivel de grises (imagen de amplitud).

En el ámbito de los «Espacios Inteligentes y Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interior», el objetivo es el diseño de algoritmos de procesamiento que permitan la obtención de toda la información necesaria para conseguir, a partir de la información adquirida por las cámaras, la localización de los objetos de interés. Dentro del concepto de «localización» se pueden incluir, por tanto, la medida métrica de la posición y en algunos casos la orientación, así como la capacidad de discernir la identidad de los diferentes elementos percibidos por las cámaras. En todos los casos, tras la fase de adquisición se contempla una fase de procesamiento que incluye, generalmente, etapas tales como procesos de segmentación y extracción de características relevantes, matching de las características detectadas con las entradas de una base de datos de características, obtención de la pose de las cámaras, eliminación de medidas falsas, etc.

Para la obtención de la localización de los objetos a partir de la información captada por las cámaras, se suelen utilizar diferentes alternativas, que se pueden resumir según se muestra en la Figura 5. Una primera clasificación se puede hacer atendiendo a la ubicación de las cámaras: cámaras estáticas ubicadas en puntos fijos del entorno que localizan objetos o personas que se mueven en el entorno, o cámaras ubicadas sobre el propio objeto a localizar (cámaras embarcadas). Otra posible clasificación es atendiendo al tipo de características a detectar, para obtener la localización: características naturales (marcas naturales) o marcas artificia-

les (patrones sintéticos predefinidos), ubicadas, en ambos casos, en el entorno o en los objetos a localizar.

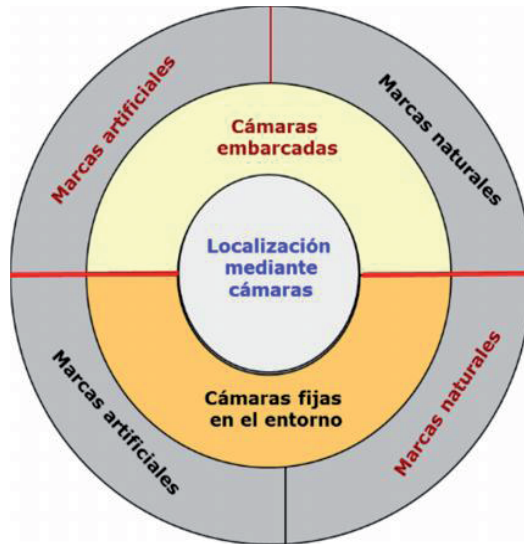


FIGURA 5: Diferentes alternativas para la localización utilizando cámaras

Cuando las cámaras están ubicadas en lugares fijos del entorno el objetivo es localizar objetos en movimiento (robots, personas, etc.) dentro de él, a partir de la extracción de características de los objetos de las imágenes capturadas por una o varias cámaras. Si dichas características aparecen en el campo de visión de las cámaras, se puede calcular la localización del objeto con respecto a las cámaras [10], [11]. En este caso las características estructurales del entorno no pueden ser utilizadas, lógicamente, para fines de localización.

En el caso de cámaras embarcadas en el agente a localizar, el objetivo principal es determinar la posición de la cámara móvil (ego-motion) a partir de la detección de las marcas artificiales ubicadas en posiciones conocidas del entorno, o extrayendo características naturales del entorno. En el caso de características naturales el procedimiento incluye, en general, dos fases: una off-line y otra on-line. En la fase off-line se capturan imágenes del entorno en localizaciones predefinidas, se procesa cada imagen y se extraen características que son almacenadas en una base de datos. En el proceso on-line la cámara captura imágenes y se extraen características que son comparadas con las de la base de datos, para estimar la posición de la cámara.

En el caso de cámaras de color (RGB) las técnicas a utilizar se pueden clasificar tal como se muestra en la Figura 6. En general todo proceso de localización implica la solución de tres grandes aspectos: extracción de información en cada imagen disponible, correspondencia (matching) de la información entre diferentes cámaras y/o diferentes instantes de tiempo, y obtención de la localización mediante recuperación geométrica. Y todo ello teniendo en cuenta que la distancia relativa entre cámaras puede ser equivalente a la distancia a la que los objetos de interés se encuentran dispuestos con respecto a las cámaras (esquema «wide-baseline»), lo que dificulta el proceso de correspondencia entre puntos.

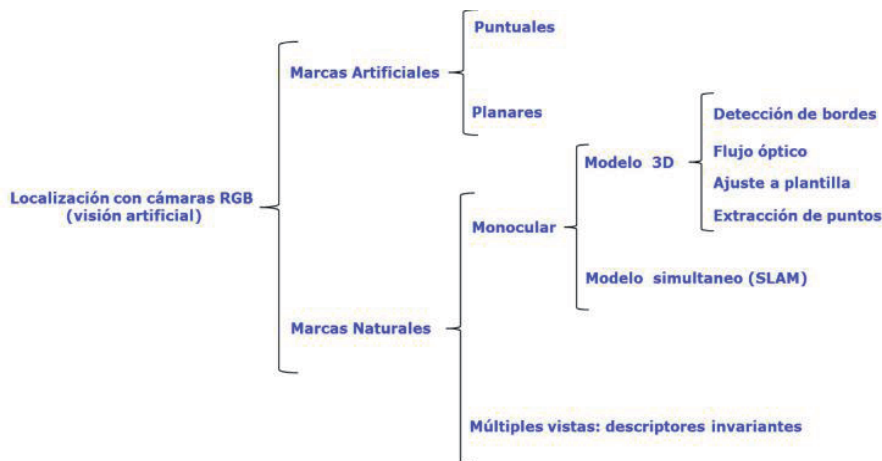


FIGURA 6: Organización de las técnicas de localización mediante visión artificial (información de color)

3.3.1. Localización con cámaras RGB

Siguiendo el organigrama mostrado en la Figura 6, a continuación, se realiza una breve descripción de cada una de las alternativas.

3.3.1.1. Localización basada en marcas artificiales

Los sistemas de localización basados en la detección de marcas artificiales (patrones sintéticos predefinidos o marcas «fiduciales»), ubicadas en el entorno o en el objeto a detectar, están muy extendidos en aplicaciones de visión artificial,

especialmente en trabajos relacionados con realidad aumentada y calibración, existiendo una amplia bibliografía en la que se proponen diferentes soluciones. El uso de marcas artificiales aporta al sistema varios grados de información según su naturaleza y diseño de las marcas; así, por ejemplo, los procesos de correspondencia se nutren directamente de la información aportada por dichas marcas, reduciendo en gran medida la complejidad algorítmica de las soluciones. Por otro lado, también es posible el diseño de marcas artificiales que ofrezcan una imagen reconocible y unívoca en el proceso de extracción de información. El conocimiento previo aportado al agente del que se realiza la localización tiene como recompensa un método robusto y rápido, aplicable a cualquier configuración de cámaras. Sin embargo, no tiene interpretación del entorno y se convierte en un proceso fotométrico.

En general se asume que la posición tridimensional o la distancia relativa entre las marcas artificiales utilizadas son conocidas. Además, a la hora de diseñar las marcas artificiales es importante que estas cumplan una serie de condiciones en aras de conseguir que puedan ser unívocamente determinadas por su proyección en el plano imagen de las cámaras. La identificación de cada marca artificial se puede codificar dentro de la misma mediante un código de barras o QR, por ejemplo, que represente una identificación numérica.

Sobre las marcas artificiales se han propuesto diferentes tipos de soluciones que se pueden clasificar en marcas puntuales y marcas planas. Las marcas puntuales consisten generalmente en regiones circulares o esféricas de alto contraste y fácilmente identificables (materiales retro-reflectante o luminosos), cuya apariencia es relativamente invariante ante deformaciones proyectivas; su centroide proporciona una posición estable que se puede obtener con precisión subpíxelica. Todo ello permite discriminar, mediante sencillos algoritmos de umbralización o incluso filtros ópticos en el rango visible, aquellos puntos que representan una marca del resto de elementos de la escena. Ejemplos de soluciones de marcas artificiales puntuales son círculos concéntricos de contraste [12], marcas artificiales codificadas mediante color [13] y marcas artificiales de diferentes tamaños en el objeto a localizar [14]. Con el objetivo de expandir las posibilidades y el número posible de marcas identificables en la imagen, se han propuesto, también, métodos que añaden información codificada dentro del propio esquema de marca artificial.

Dentro del campo de la localización de objetos se han propuesto soluciones con marcas artificiales ubicadas en puntos fijos del entorno y el sistema de captación a bordo de los robots (ello permite obtener la posición absoluta del robot respecto al entorno), o bien marcas artificiales a bordo de los robots y el sistema de captación en puntos fijos del entorno.

3.3.1.1.1. Marcas artificiales ubicadas en puntos fijos del entorno

En la literatura son bastantes los trabajos de localización a partir de marcas artificiales ubicadas en puntos fijos del entorno, donde las marcas están formadas por figuras que incluye información codificada asociada a cada una de ellas. En [15] se emplean marcas artificiales en color, formadas por un conjunto de rectángulos simétricos y dos números definidos por 7 segmentos (Figura 7(a)). En [16] las marcas se realizan de un material que refleja la radiación infrarroja, de forma que sea sencillo detectarlas cuando la escena se ilumina con este tipo de luz. Las marcas empleadas tienen forma de triángulo equilátero como el mostrado en la Figura 7(b). La detección de los tres triángulos azules permite determinar la orientación, mientras que el resto de sectores permiten realizar la identificación de las marcas. En [17] se hace uso de códigos MR (Mobile Robot codes) formados por un pentágono equilátero dentro del cual se incluye un código BCH (Figura 7(c)). Estas marcas presentan características invariantes frente a cambios en la iluminación. En [18] la marca artificial (Figura 7 (d)) está formada por cuatro círculos negros, situados en posiciones calibradas próximos a las esquinas, un patrón vertical de identificación (barras gruesas, grupo central-izquierdo), único para todas las marcas, que permite la detección y segmentación de la misma en cada imagen, y un código de barras de n dígitos (barras finas, grupo central-derecho), propio y distinto para cada marca, el cual se lee en dirección vertical, en sentido descendente. De esta forma, se conjuntan en una sola marca características geométricas (los cuatro puntos) y codificadas (el código de barras derecho) lo que permite aunar precisión en la localización con una identificación unívoca de la marca por el código impreso en ella.

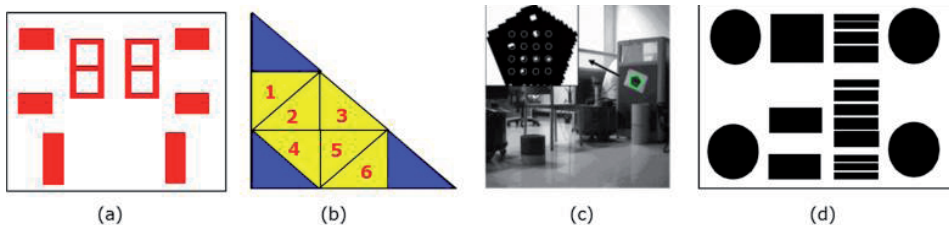


FIGURA 7: Ejemplos de las marcas artificiales ubicadas en puntos fijos del entorno utilizadas para la localización. (a) marca formada por rectángulos simétricos y dos números de 7 segmentos [15] (b) marca triangular empleada el trabajo de [16] (c) Código MR (Mobile Robot) definido en [17], y (d) marca utilizada en el trabajo de [18].

3.3.1.1.2. Marcas artificiales ubicadas a bordo del objeto

Dentro de esta segunda alternativa, en [19] se propone el uso de barras que incluyen un código de color en las esquinas de los robots a localizar, de forma que la detección e identificación de estas barras permite determinar tanto la posición como la orientación de los robots. En [20] las marcas empleadas son círculos en color, mientras que en [21] la identificación de los robots se realiza tras la detección de una marca formada por un conjunto de líneas y un triángulo, tal como se muestra en la Figura 8(a). La marca empleada en [22] para la identificación de los robots está compuesta por dos elementos de diferentes colores: un rectángulo que identifica el robot y un cuadrado que define la orientación del mismo (Figura 8(b)). En [23] el balizamiento del robot se realiza empleando una estructura en forma de T, que consta de cuatro elementos circulares de 2 centímetros de diámetro formados por diodos de infrarrojos (IR) (Figura 8(c)). Esta marca puede ser detectada con facilidad, por las cámaras ubicadas en el entorno, incluso en situaciones adversas de iluminación. Además, la distribución de los elementos permite recuperar de forma sencilla tanto la posición como la orientación del robot.

Como conclusión se puede decir que los sistemas de localización basados en marcas artificiales presentan ventajas frente a los de marcas naturales en lo que se refiere a capacidad de procesamiento, precisión en la obtención de la localización y en la robustez frente a fuentes de ruido.

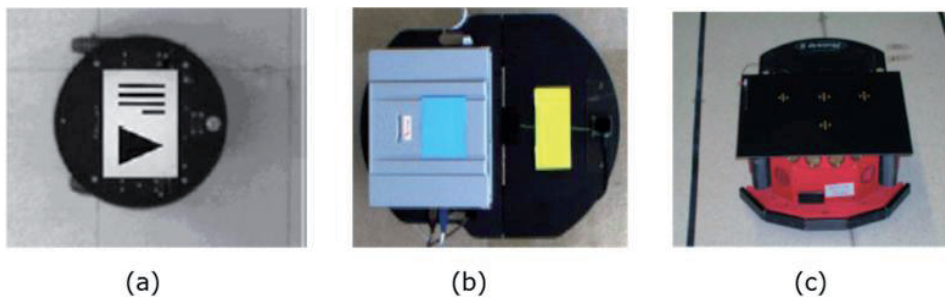


FIGURA 8: Marcas artificiales empleadas sobre un robot móvil para su localización e identificación (a) marca utilizada en [21]. (b) marca utilizada en [22], y (c) marca utilizada en [23].

3.3.1.2. Localización basada en marcas naturales

La localización basada en marcas naturales pretende suplir las deficiencias que presentan las soluciones basadas en marcas artificiales. El uso de marcas artifi-

ciales requiere aportar un grado de intervención «a priori», e incluye procesos de calibración previos y no hace uso de la información que de manera natural aparece en la imagen de un objeto en movimiento. Los procesos basados en el uso de marcas naturales aprovechan la información intrínseca que todo objeto rígido en movimiento presenta ante una transformación proyectiva. Su uso implica trasladar la dificultad al algoritmo, que ahora deberá discriminar la correspondencia de puntos en múltiples imágenes y elegir aquellos que muestran un buen comportamiento en el proceso de seguimiento de los objetos. El reto, por tanto, es realizar el seguimiento de objetos mediante información visual debida a la propia geometría y movimiento de la escena, tratando de extraer la máxima información posible de las mismas.

Las soluciones propuestas varían dependiendo de la aplicación concreta, las condiciones iniciales y las restricciones de funcionamiento. La organización de los métodos basados en marcas naturales se puede realizar teniendo en cuenta diversos factores, entre los que se destacan:

3.3.1.2.1. Grado de conocimiento previo que se aporta al sistema

En general está correlado con la cantidad de información geométrica que el propio sistema visual es capaz de obtener. En el caso de sistemas que cuentan con una sola cámara la aportación de conocimiento «a priori» es indispensable, ya sea en forma de modelo tridimensional previo o como referencias métricas en la imagen. Si el sistema es capaz de aportar información tridimensional directamente el grado de conocimiento previo no se convierte en una tarea crucial para el funcionamiento del sistema. En este caso, el proceso de correspondencia que relaciona información en las diferentes cámaras soporta el peso del algoritmo. No obstante, dependiendo de la configuración del sistema la tarea puede conllevar excesiva dificultad y, por tanto, el sistema de múltiples cámaras no puede explotar las capacidades que posee.

3.3.1.2.2. Método de extracción de características de la imagen

Este método es compartido en el caso de una o múltiples vistas. Su misión es extraer características de la imagen que puedan ser identificadas unívocamente en distintas poses y que representen conceptos geométricos reconocibles mediante su proyección.

3.3.1.2.3. Métodos de correspondencia

Se incluyen correspondencia temporal y correspondencia espacial. En el primer caso, las marcas obtenidas en el plano imagen deben garantizar que son detectadas a lo largo de la evolución temporal que se observa en la imagen. Este tipo de procesos se ayudan de modelos de movimiento del objeto y de información previa existente en ese momento del tiempo. En el caso de correspondencia espacial, si se utilizan múltiples cámaras, se requieren métodos que aporten correspondencia entre cámaras alejadas, por lo que el problema es análogo al anterior si se suponen desplazamientos entre cada «frame» suficientemente alejados. Las técnicas usadas se especializan en aportar conocimiento de la calibración de cámaras y aprovechan las restricciones geométricas resultantes del esquema de múltiples vistas.

Siguiendo con la clasificación mostrada en la figura 2, a continuación, se presentan algunos ejemplos de trabajos realizados dentro de las diferentes alternativas.

3.3.1.2.4. Marcas naturales en visión monocular y métodos basados en modelo previo

Supuesto un modelo 3D conocido previamente, lo que se busca es encontrar puntos en la imagen y asociarlos a las primitivas (puntos, líneas, volúmenes) que definen el modelo. Una vez asociados, se debe calcular la correspondencia en imágenes sucesivas, de tal modo que, aunando la información métrica del modelo con la correspondencia en imágenes consecutivas y conocida la calibración de las cámaras, se obtenga la posición y orientación del objeto a localizar. Dentro de esta alternativa se puede hacer una clasificación atendiendo a las características que se buscan en la imagen: detección de bordes, flujo óptico, ajuste a plantilla y extracción de puntos.

Los métodos basados en la detección de bordes permiten definir la imagen mediante un conjunto de primitivas geométricas (en general segmentos de rectas y curvas) que posteriormente se ajustan al modelo dado. Algunos trabajos en esta línea pueden encontrarse en [24] o [25]. En la actualidad, este tipo de técnicas apenas se emplean debido a las restricciones geométricas que imponen al objeto a detectar.

El flujo óptico define el movimiento aparente en el plano imagen resultado de la proyección de un punto físico en movimiento. Los métodos basados en el flujo óptico parten de la suposición de que la intensidad de la proyección del punto permanece constante [26]. Dentro de esta técnica el método más utilizado es el propuesto por Lucas y Kanade [27], en el cual se adopta un enfoque multiescala para

evitar el problema de apertura. En este método se supone suavidad en la variación del flujo óptico. Algunos autores combinan el flujo óptico de puntos con información de pertenencia a contornos. Así, por ejemplo, en [28] se propone un Filtro de Kalman como elemento de fusión de información. Los métodos basados en flujo óptico no permiten movimientos bruscos y los cambios de iluminación destruyen la suposición de constancia del brillo. Sin embargo, tienen muy buenas propiedades en la asignación de correspondencias.

A pesar de que el método de Lucas-Kanade [27], [29] fue diseñado para el cálculo de flujo óptico, puede ser reformulado para el «tracking» de una plantilla bidimensional genérica ante una familia afín de deformaciones. Permite evitar centrarse en características locales, y utiliza toda la imagen correspondiente a la plantilla como fuente de información en el proceso de seguimiento. En [30]–[32] se proponen soluciones para el seguimiento de objetos tridimensionales.

Finalmente, los métodos basados en la extracción de puntos surgen con el objeto de reducir las restricciones que aparecen en la detección de bordes. Se basan en la detección de puntos individuales, lo cual permite dotar de inmunidad al algoritmo ante cambios de iluminación, oclusiones o errores de correspondencia. Este tipo de enfoque aprovecha más la información contenida en el plano imagen, permitiendo reducir las restricciones «a priori» en la apariencia del objeto. Los métodos basados en extracción de puntos deben resolver dos problemas fundamentales, identificación de aquellos puntos de la imagen que poseen buenas cualidades para ser seguidos en la imagen [33], [34] y proponer un método de correspondencia temporal que relacione un punto en una imagen con el correspondiente en otra resultado del movimiento [35], [36] Los trabajos mostrados en [37], [38] están basados en el uso de puntos característicos sobre el plano imagen, en lugar de rectas o curvas.

3.3.1.2.5. Marcas naturales en visión monocular y métodos simultáneos de obtención del modelo

Frente a los métodos que, para estimar la localización, necesitan de un modelo tridimensional a priori, existen soluciones capaces de realizar la estimación simultánea del movimiento de la cámara y la geometría de la escena sin ningún modelo previo. La trayectoria recuperada y la posición de la cámara se referencian a un origen común, que por lo general corresponde a la posición inicial que ocupa la cámara. Este proceso, conocido como *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), surge ante la necesidad de posicionar un robot móvil mediante sensores a bordo, en un entorno estructurado. Dentro de esta disciplina, utilizando la visión artificial como sensor base para completar el

algoritmo SLAM, se encuentran los trabajos de [39]–[41]. En [42] se muestra un sistema SLAM mediante una cámara calibrada y su implementación en tiempo real. La aplicación clásica trata de resolver el problema de posicionar una cámara mediante identificación de marcas en la imagen. Sin embargo, también es posible su uso en el problema inverso, esto es, realizar tracking de objetos tridimensionales mediante una cámara. En [43] se muestra una aplicación de este tipo de enfoque para el posicionamiento de un robot móvil mediante un conjunto de cámaras externas. El sistema planteado se divide en dos fases: en la primera de ellas se obtiene un modelo tridimensional del robot, así como su pose inicial para, en la segunda fase, actualizar la pose cada vez que se adquiere una nueva imagen.

3.3.2.2.6. Marcas naturales en visión de múltiples vistas: descriptores invariantes

En este caso, lo que se plantea es obtener la localización de un objeto utilizando múltiples cámaras ubicadas en el entorno donde la disposición de las cámaras atienda a un esquema «wide-baseline», esto es, las cámaras presentan centros de proyección alejados. En este esquema el proceso de correspondencia se complica debido a la poca correlación que tienen las distintas imágenes de un mismo objeto. Pero si el modelo de correspondencia se resuelve de manera satisfactoria, el modelo se obtiene de manera automática. El origen de los métodos de extracción de marcas naturales que sean reconocibles ante deformaciones proyectivas fuertes proviene de la disciplina de detección de objetos en la imagen basándose en su apariencia. Este tipo de enfoque propone la detección de objetos en imágenes, empleando una base de datos de características obtenidas a partir de un conjunto de imágenes de entrenamiento [44], [45].

El objetivo es encontrar una descripción del objeto que sea invariante a cambios proyectivos y fácilmente formulable e identificable en el plano imagen. A su vez debe ser estable ante cambios de iluminación. Un descriptor local busca extraer información de un área localizada de la imagen, como puede ser la textura alrededor de un punto de interés, y define un método de codificación que sea invariante a cambios de iluminación y transformaciones afines. Los descriptores deben ser definidos de tal modo que permitan separar de manera apreciable dos áreas que no pertenecen al mismo punto. La literatura es extensa en el número de descriptores que se proponen [46]–[49]. Los métodos con mejores resultados hasta la fecha son SIFT (Scale-Invariant Keypoint Transform) propuesto originalmente por Lowe [50] y mejorado en [51], y SIFT en tracking 3D monocular [52] para realizar el tracking de objetos 3D. Como conclusión se puede decir que el detector SIFT ha demostrado ser una herramienta indispensable para solucio-

nar el problema de correspondencia, incluyendo aquellos casos con una sola cámara en los que el objeto se ha desplazado lo suficiente.

3.3.2. Cámaras de tiempo de vuelo (ToF)

Las cámaras de tiempo de vuelo (Time-Of-Flight-cameras, ToF cameras) [53], [54] son sensores que proporcionan, por cada píxel, la distancia entre la cámara y la escena 3D en una dirección concreta. Como consecuencia, la cámara genera una imagen de distancias de la escena. Su funcionamiento se basa en la emisión de una fuente de luz modulada, normalmente en el espectro infrarrojo (IR), que ilumina la escena. La obtención de la distancia en las cámaras ToF se consigue midiendo el tiempo de vuelo de una señal que viaja desde la fuente de luz, colisiona en la escena y retorna al elemento sensor (en la práctica el elemento sensor y la fuente de luz están muy próximos). Existen fundamentalmente tres alternativas para la obtención de la distancia:

- Modulación de onda continua (CWM). La distancia se obtiene a partir del desplazamiento de fase entre dos señales, una señal periódica (en muchos casos cuadrada) utilizada para modular la fuente de luz infrarroja y la señal obtenida en los píxeles de la luz reflejada en la escena. [55], [56].
- Modulación pulsada (PM). En este caso la medida de la distancia a un objeto 3D se obtiene midiendo el tiempo absoluto que un pulso de luz infrarroja necesita para viajar desde la fuente a la escena 3D y viceversa, después de la reflexión [57], [58]. En [57] se aporta información sobre el proceso de medida de distancia para este tipo de modulación de la luz IR.
- Modulación por pseudo-ruido (PN). Esta solución consiste en modular en intensidad la luz infrarroja mediante un código PN (pseudonoise), obteniéndose el tiempo de vuelo (y en consecuencia la distancia) mediante la correlación de la intensidad de la luz incidente con dos versiones desplazadas en el tiempo de la secuencia PN. Aprovechando las propiedades ortogonales de las secuencias PN para la medida de la distancia [59]. La modulación PN facilita la utilización de varias cámaras al mismo tiempo y en un mismo entorno.

Las cámaras comerciales, además de permitir obtener información sobre la distancia, también permite obtener información sobre la amplitud de la señal recibida y que representa la imagen de nivel de grises. Las cámaras actuales permiten obtener las imágenes de distancia y nivel de grises, cancelando, entre otros, el efecto de la iluminación ambiental. Tanto en modulación pulsada como continua existe una distancia máxima de medida (d_{max}) sin ambigüedad.

La característica distintiva de las cámaras ToF es su capacidad para proporcionar un mapa de distancias (de resoluciones que pueden llegar a 1280x1024 píxeles y distancia máxima de medida de hasta 15 m) de una escena a alta velocidad (hasta 90 fps), sin necesidad de partes móviles y con independencia de la textura e iluminación, lo que las convierte en una alternativa interesante frente a otras soluciones (sistemas de cámaras estéreo, escáneres laser 3D, etc.). Además, la segmentación del fondo, basada en información de profundidad, es más sencilla y las invariantes geométricas, así como las restricciones métricas, se pueden utilizar de forma natural con las imágenes de profundidad proporcionadas por las cámaras ToF. Todo ello hace que este tipo de cámaras presenten importantes ventajas en varios campos de aplicación [60]. Entre los ámbitos de aplicación se pueden citar la robótica, industria del automóvil, medicina, multimedia, etc., para desarrollar tareas relacionadas con: a) escenas, que generalmente incluye robots móviles, muebles, paredes, etc., y grandes desplazamientos; b) objetos, que incluyen generalmente brazos robóticos o robots de tipo humanoide y pequeñas distancias; y c) aplicaciones que incluyen seres humanos, tales como reconocimiento de caras, manos y cuerpo, para aplicaciones a interfaces hombre-máquina. Encontrando aplicaciones en robótica, industria del automóvil, medicina, multimedia, etc.

En el ámbito de los «Espacios Inteligentes y Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interior» se han desarrollado algunos trabajos haciendo uso de cámaras ToF. En algunos casos la información de profundidad proporcionada por las cámaras de ToF se combina con información de RGB. Como ejemplo se puede citar [61] donde se propone el uso de cámaras ToF para la localización en espacios interiores de objetos móviles sobre los que se embarcan las cámaras (ego-motion), demostrando el interés de la utilización de cámaras ToF en procesos SLAM o en la detección y localización de objetos. En este caso se hace uso de las imágenes de amplitud para la identificación de objetos y de las imágenes de distancia para la generación de mapas 3D del entorno de la cámara. En [62] se muestra un sistema SLAM utilizando una única cámara ToF y múltiples espejos planos, con lo que se consigue navegar de manera fiable en ambientes interiores para crear mapas geoméricamente consistentes. En [63] se presenta un método para la obtención de mapas 3D en entornos interiores utilizando únicamente cámaras ToF. Se obtiene un mapa métrico en forma de nube de puntos 3D que permite localizar la cámara con respecto a la nube de puntos, sin ningún sistema de posicionamiento externo. Para ello proponen un algoritmo que incluye un proceso de calibración para eliminar algunos errores sistemáticos que presentan las imágenes de profundidad, varios filtros para eliminar errores causados por la iluminación u oclusiones, y la generación del mapa basándose en el algoritmo Iterative Closest Point (ICP). En [64] se hace uso de cámaras ToF para

realizar el tracking de objetos en movimiento y la reconstrucción del entorno. Para la reconstrucción de fondo estático del entorno utilizan una combinación de tracking de objetos dinámicos y la reconstrucción de las partes estáticas, utilizando cámaras ToF para adquirir una nube de puntos 3D que representan el entorno. El proceso incluye diferentes etapas como son: un proceso de filtrado para eliminar puntos 3D no válidos, obtención de las componentes de velocidad 3D (que calculan a partir del flujo óptico) para detectar las partes móviles en la escena, detección de las partes dinámicas en la escena (utilizando un criterio de homogeneidad 6D considerando la distancia y la velocidad, para la agrupación de puntos), etc.

3.4. SEÑALES ÓPTICAS

Una de las tecnologías menos utilizadas, hasta la actualidad, como alternativa para el desarrollo de ILPS (Sistema de Posicionamiento Local en Interiores –Indoor Location Positioning System-) y estimación de la localización de agentes es la emisión/recepción activa de señales ópticas, ya sean visibles o de infrarrojos. El uso de técnicas basadas en detección de señal óptica para localización de agentes destaca, frente a algunas otras, por su sencillez y rapidez del procesamiento de los datos ya que es muy fácil aislar la señal de interés del resto de información, y se confina en el entorno de trabajo. Por lo general son sistemas poco costosos, de reducido tamaño y fáciles de implantar. La precisión en la determinación de la posición depende de la técnica utilizada, pero es del orden de milímetros, lo que la hace viable para una gran cantidad de aplicaciones. Los principales inconvenientes que presentan vienen impuestos por las limitaciones tecnológicas de emisores y detectores y por la propia naturaleza de las señales, pudiéndose citar: sincronismos dada la velocidad de propagación, efectos de multicaminos (MP) y posible saturación de los sensores en exteriores.

Las diferentes técnicas utilizadas para la determinación de la pose se basan en la medida de distancias y de orientación. En algunos casos se puede determinar con un solo sensor, pero en otros es necesario disponer de varios perfectamente sincronizados entre sí. Las configuraciones de medida también ofrecen varias alternativas, pudiendo existir algunas basadas en varios emisores (con localización relativa conocida) y un solo detector, o varios detectores (con localización relativa conocida) y un solo emisor. Estas dos alternativas se combinan, además, con la posibilidad de que el emisor(es) esté en el agente móvil y el detector(es) estén localizado en el entorno, o viceversa. La opción final va a venir establecida por las limitaciones del sistema móvil y por los requerimientos de sincronismo y precisión, pero en cualquier caso se trata de sistemas sencillos.

Las formas más generales de estimar medidas, en unos y otros casos, es utilizando técnicas de Time of Arrival (ToA), Phase of Arrival (PoA), Time Differential of Arrival (TDoA), Phase Differential of Arrival (PDoA), Angle of Arrival (AoA) y Received Signal Strength (RSS). Dada la dificultad e incluso imposibilidad de conocer desde los detectores el tiempo o fase de referencia, y dada la velocidad de propagación de la señal, las técnicas más se implementan están basadas bien en PDoA o AoA, combinada en este caso con RSS o con el conocimiento de la geometría de la superficie de movimiento de los agentes.

En la actualidad ha irrumpido otra alternativa para el desarrollo de ILPS basada en señal visible a partir de la iluminación con LED; estos pueden trabajar a altas frecuencias permitiendo simultáneamente iluminar y enviar información que puede usarse para comunicaciones inalámbricas en entornos interiores (VLC –Visible Light Communication–), y pueden servir, además, para implantar Sistemas de Posicionamiento Local en Interiores mediante la determinación de AoA o RSS a partir de las señales emitidas por los LED. Los IPS desarrollados a partir de las infraestructuras de iluminación se están denominando VLP (Visible Light Positioning). El paradigma de VLP permite la reutilización de las infraestructuras de iluminación existentes para proporcionar comunicación de datos y también para el posicionamiento en ambientes interiores con alta precisión potencial y bajos costes. Sin embargo, existen algunos obstáculos por el alto nivel de ruido ambiental y las multitrayectorias que han de ser superadas.

3.4.1. Posicionamiento mediante desfase diferencial (PDoA)

En este apartado es importante resaltar las condiciones de medida. La situación de partida es que desde los puntos de recepción no se conocen (no se tiene sincronizado) las temporizaciones o fases de los puntos de emisión (son sistemas separados) y por tanto no se pueden llevar a cabo medidas de distancias absolutas. Otra condición importante es que se trata de una señal electromagnética y como tal se propaga a una velocidad de «c».

El planteamiento para realizar medidas de posición 3-D se basa en medir la diferencia de fase con que llega la señal a varios detectores respecto de otro tomado como referencia; esas diferencias de fase se convierten en diferencias de distancia, y con un mínimo de 3 diferencias, mediante trilateración, se obtiene el punto 3-D en el espacio del que procede la señal [65]. Nótese que esta explicación se ha realizado bajo la base de la existencia de un emisor en el agente y varios detectores en el entorno. Aunque la base de esta teoría es relativamente sencilla, su implementación práctica acarrea algunos desafíos. Para que el sistema funcione correctamente todos los receptores han de estar perfectamente sincronizados o trabajar con el

mismo sistema de reloj para poder realizar correctamente la diferencia entre las fases. Esto que desde el punto de vista teórico es bastante sencillo presenta complicaciones en la práctica dado que pequeños errores de sincronismos de fase, jitter o derivas, generan errores en las medidas realizadas. Para obtener precisiones altas las frecuencias de modulación han de ser elevadas (o tiempos de chirp pequeños trabajando con secuencias) para que en la propagación de la señal electromagnética hasta los diferentes detectores se puedan distinguir diferencias de fase debidas a pequeñas diferencias de distancia; los dispositivos existentes actualmente para realizar enlaces no guiados restringen este aspecto enormemente.

Con este tipo de señales los sincronismos han de realizarse cableados (mismo sistema de relojes) para alcanzar precisión suficiente. En entornos que precisen de un número de detectores elevado este hecho puede entorpecer el despliegue. En la práctica se diseñan celdas estáticas basadas en 4 o 5 receptores cableados entre sí que miden posiciones relativas respecto de ella. Para poder cubrir un entorno grande han de colocarse varias de estas celdas y conocer la posición absoluta de sus referencias. En esta configuración aumentar la distancia entre los detectores y el de referencia aumenta la precisión. Para obtener la mejor precisión posible, se han desarrollado técnicas [66], [67] para la colocación óptima de los diferentes detectores que cubren un entorno completo formando celdas (mayoritariamente basadas en algoritmos genéticos) que optimizan varios objetivos como pueden ser precisión, número de señores, etc.

Con todo, el problema de la existencia de MP puede significar la limitación del sistema descrito. Dada la naturaleza y velocidad de propagación de la señal estos efectos indeseados hacen que los errores que se comenten sean de varias decenas de centímetros. Se han desarrollado técnicas basadas en DLLs, fundamentalmente, para mitigar los MP [68]. Para poder mitigar lo suficiente las señales utilizadas deben ser de una frecuencia alta (no se puede mitigar efectos por debajo de un tiempo de chirp) o los espacios en los que se está midiendo deben ser de gran altura (equiparable al desplazamiento de la luz en medio tiempo de chirp) [69].

Existen otras configuraciones viables además de la descrita, pero que presentan y plantean los mismos retos, ventajas e inconvenientes. Así, se pueden colocar en el entorno, con localizaciones relativas perfectamente conocida, varios emisores que emitan sincronamente señales o secuencias. Estas se captarán en un solo detector en el agente, y mediante desfase diferencial de las señales recibidas se obtiene la posición 3-D del agente. Al igual que en la configuración descrita anteriormente, separaciones mayores son mejores para aplicar trilateración. Otra posible configuración es que el agente emita desde 3 o más emisores sincronizados, y a partir de las señales recibidas en cada uno de los detectores colocados en el entorno obtener la posición 3-D; si las señales son detectadas por varios detectores se puede realizar fusión de datos para mejorar las medidas realizadas independientemente por cada uno.

Esta configuración es muy atractiva desde el punto de vista que simplifica muchísimo las tareas de realización de sincronismo, pero si la separación entre emisores de un mismo agente es pequeña, limitará la precisión.

3.4.2. Posicionamiento mediante determinación de la orientación (AoA)

La opción descrita en este epígrafe se basa en la detección de la orientación de llegada de la señal óptica a un detector (emisión activa de una señal), para determinar la orientación del emisor, y combinarla con otro método que permita estimar la distancia para obtener posicionamiento 3-D.

En primer término, se podrían utilizar cámaras en el entorno incorporados IREDs a los agentes, pero este método con sus ventajas e inconvenientes estaría englobado dentro de los de visión computacional. Aquí nos centraremos en sistemas de emisión recepción con LEDS y fotodiodos, de señales moduladas, o de secuencias, de longitud de onda visible o infrarroja.

El elemento más utilizado para el desarrollo de sistemas de detección de orientación es el fotodiodo PSD (Positioning Sensitive Device) que consta de 4 ánodos y un cátodo. Para que este dispositivo pueda abarcar espacios amplios mediante su FoV va a ser necesario que trabaje con una lente acoplada que canalice la dirección y la energía de la señal procedente del entorno sobre su superficie. Una vez que la imagen de la señal alcanza la superficie del sensor, este genera una corriente por cada uno de los ánodos (de microamperios en el mejor de los casos) que guardan una relación con la distancia existente entre ese punto y los electrodos de los 4 ánodos. A partir de las corrientes obtenidas de los diferentes electrodos del sensor PSD (convenientemente amplificadas) se puede deducir la posición (x,y) del impacto de un haz luminoso en su superficie sensora, y a partir de esta y de la focal del sistema óptico se puede determinar el ángulo de incidencia [70].

A la hora de desarrollar sistemas basados en PSD hay que considerar Dos aspectos; el sensor PSD y el sistema óptico acoplado no son ideales y el acople de ambos tampoco, por lo que se deberá realizar un proceso de calibración para estimar con precisión los parámetros intrínsecos del sistema que permitan medir geoméricamente. Dado que para ese paso vamos a necesitar utilizar las posiciones (x,y) en el sensor, obtenidas a partir de las corrientes, previamente se van a medir y compensar los desequilibrios que se comenten en la obtención y medida de corrientes por los 4 canales del PSD, dado que no son ideales (comportamiento real del PSD, tolerancias de resistores y capacitores, comportamiento de los amplificadores) [71], [72].

Una vez que se dispone de un sistema detector basado en PSD y del que se han obtenido los parámetros intrínsecos (centro óptico del sensor y distancia focal en

particular) la técnica de obtención de AoA es muy sencilla y extraordinariamente rápida. Se emite una señal que puede ser un tono senoidal o una secuencia, se filtra y calcula el valor «rms», o se calcula la correlación en cada canal, y mediante los valores obtenidos se determina el punto (x-y) de impacto en el sensor. Con el punto de impacto el centro óptico y la distancia focal, se calcula la orientación en la que se encuentra la fuente [70]. Si se ha sido mínimamente cuidadoso en los procesos descritos anteriormente para el desarrollo del sistema, la precisión obtenida en distancias cortas e intermedias es extraordinaria. Este sistema tiene además la virtud de poder trabajar con múltiples agentes simultáneamente. Si cada uno de ellos emite un tono o una secuencia conocidos, bastará con filtrar o correlar adecuadamente las señales obtenidas por cada uno de los electrodos para determinar independiente y simultáneamente la orientación de las diferentes fuentes de señal.

Resuelto el problema de determinación de la orientación faltaría determinar la posición 3-D de la fuente. Aquí son varias las estrategias que se vienen utilizando [73]. En primer lugar, se puede considerar que los agentes se mueven en un plano, con lo que obtener la posición 3-D es sencillo y rápido de calcular: se calcula la intersección de la recta que define la orientación con dicho plano. Otras dos alternativas se basan en la medida de la potencia de señal recibida en el detector (RSS); si la potencia y el patrón de emisión son conocidos, y dado que se conoce la orientación, determinar la distancia es aplicar una sencilla ecuación del modelo de propagación de la señal (con la distancia y la orientación se obtiene la medida 3-D). El patrón de emisión se suele conocer con bastante precisión, pero la potencia emitida suele variar con diferentes parámetros y será necesario estimarla. Para calibrar la potencia emitida se emplean 2 técnicas: la primera es medir la potencia recibida cada vez que el agente pase por un punto con coordenadas conocidas (suele denominarse marca), con lo que se puede deducir la potencia total emitida y considerarla durante un tiempo (la potencia emitida varía, pero son variaciones que se producen muy lentamente); el otro método es forzar a que el agente pase por una zona que es captada por el FoV de dos sistemas y medir la potencia recibida en cada uno de ellos. Al obtenerse la orientación respecto de dos sistemas, mediante un proceso de estereopsis se determina la posición 3-D y posteriormente se deduce la potencia total emitida.

Como indicación final hay que dejar constancia que en esta alternativa de determinación de la posición se pueden despreciar los efectos debidos a MP, cuestión muy importante a la hora de decidirse por un sistema u otro.

3.4.3. Posicionamiento mediante VLC

En la actualidad la utilización de dispositivos LED para iluminación ha abierto un campo muy interesante para poder utilizar las propias luminarias como ele-

mentos de comunicación mediante luz visible (VLC, -Visible Light Communication-) y a su vez utilizar las señales que emiten para desarrollar sistemas ILPS basados en PDoA, AoA o RSS. En este caso los emisores se encontrarían siempre en el entorno (no se necesitaría de ninguna infraestructura para generar la emisión) y el detector se encontraría en el agente. Las técnicas para posicionar serían similares a las descritas en los dos epígrafes anteriores; aquí de nuevo los PSDs se muestran como una alternativa interesante, aunque el uso de fotodiodos PIN y APD, y Smart Phones también tienen cabida y están siendo muy utilizados.

En los últimos años han crecido de forma exponencial los trabajos dedicados a posicionar en interiores a partir de la iluminación LED, desarrollando VLP como variante de VLC. Además de trabajos sobre técnicas de posicionamiento con esta tecnología, han aparecido también algunos que tratan de modelar las características del canal, que es necesario conocer para tener en cuenta efectos de la propagación de las señales. En [74] se presenta una revisión de trabajos dedicados a dicho modelado y e [75]–[78] algunos trabajos recientes específicos de dicho modelado. El trabajo desarrollado en [79] muestra un aspecto muy importante en posicionamiento, como es caracterizar el efecto de los multicaminos de señal óptica.

Algunos de los sistemas ensayados parten de la emisión de una señal continua desde LEDs desplegados en el entorno y un sensor de iluminancia en el agente. A partir de un modelo de iluminancia-distancia se estima la distancia a cada una de las fuentes LED y, mediante trilateración, se obtiene la posición. Los inconvenientes de esta alternativa son la dificultad de mantener un comportamiento estable, que afectan los ruidos de fondo y los multicaminos y que la potencia emitida por las fuentes varía con el tiempo, haciendo impreciso el modelo de iluminación. Como ventaja se presenta la sencillez del sistema portable.

Por lo general, los sistemas basados en LED de iluminación para realizar ILPS aprovechan la posibilidad de poder modularse a altas frecuencias, lo que no es observable desde el punto de vista del ojo humano que tiene la sensación de iluminación continua, pero que permite emitir datos y/o códigos de identificación. Así, en el caso de utilizarlos para posicionamiento, cada LED, colocado en un emplazamiento conocido, emite una secuencia o un código que lo identifica. El sistema detector determinará la posición a partir de la información de la posición conocida a priori de las balizas (LED) y con la orientación de la señal recibida. En el caso de que el detector sea un sensor PSD la detección de la orientación es sencilla y es aplicable todo lo expuesto en el punto anterior. En el caso de que el detector se trate de una cámara (incluso las incorporadas en Smart Phones) la detección del código de la baliza se basa en un sobre muestreo de la imagen durante una secuencia de imágenes para obtener la señal modulada. En este caso el inconveniente es el tiempo necesario para poder detectar el código y determinar la posición.

Los sistemas de posicionamiento basados VLP tienen un amplio espectro de aplicaciones y formas de utilización, que no siempre tienen que ser muy sofisticadas, pero que cumplen su función a la perfección. Así, por ejemplo, se pueden desarrollar sistemas muy elementales que, a partir de los códigos emitidos por los LED, detecten grosso modo la zona donde se localiza el agente. De igual modo y con sistemas sencillos pueden desarrollarse sistemas de seguridad para detectar la entrada en zonas peligrosas como escalera, etc. Mediante el uso de sistemas basados en PSD se pueden obtener muy buenas precisiones en espacios extensos: si se detectan simultáneamente 3 o más emisores se puede obtener posicionamiento 3-D total con gran precisión y si el desplazamiento se produce en un plano incluso detectando un solo emisor se pueden obtener precisiones de milímetros.

Como hemos comentado anteriormente, en los últimos tiempos se están desarrollando una gran cantidad de trabajos y se publican trabajos al respecto todas las semanas. Para ilustrar sucintamente el estado del arte, vamos a citar a continuación algunas propuestas concretas para posicionamiento VLP. En [80] los autores proponen el diseño de un protocolo para posicionamiento en interiores a partir de los sistemas de iluminación LEDs, y lo desarrollan para su uso. En [81] se muestra un método basado en la calibración del modelo de propagación de la señal óptica como técnica para el posicionamiento de agentes que incluyen los detectores. En [82] se presenta un trabajo que, además de las señales luminosas, utiliza acelerómetros para detectar la ubicación del receptor; también, combinando los mismos elementos, en [83] se utilizan estrategias que fusionan la información de acelerómetros con sensores de imagen. En [84] y [85] los autores consideran que el entorno de propagación de la señal óptica va a ser ruidoso; la propuesta se basa en medir los ruidos ambientales y compensar sus efectos sobre los resultados obtenidos por un sistema basado en VLC. [86] y [87] presentan propuestas basadas en la utilización cámaras de Smartphone para alcanzar precisión centimétrica.

En el trabajo presentado en [88] los autores combinan un receptor QADA (Quadrant Angular Diversity Aperture) con la cámara de un teléfono móvil, y estudian sus limitaciones prácticas. El trabajo presentado en [89] utiliza una modulación de la luz multinivel, para proponer un sistema de posicionamiento en interiores de precisión. En [90] se presentan diferentes resultados experimentales de posicionamiento mediante VLP utilizando un sistema basado en OFDMA. En [91] se desarrolla un estimador de ángulo de llegada omnidireccional con fotodiodos complementarios, donde el FOV del estimador puede ser 2π rad. Su utilización se enfoca en sistemas de posicionamiento AOA que necesiten baja complejidad, FOV grande, bajo costo, bajo consumo de energía y alta velocidad de respuesta. En [92] proponen una técnica de posicionamiento VLP que se combina con una red neural basada en regularización bayesiana (BR-DNN) que se

entrena tan solo con 20 puntos, en un área de localización de $1,8\text{ m}\times 1,8\text{ m}\times 2,1\text{ m}$, obteniendo una precisión media de localización de 4,58 cm.

3.5. ACÚSTICO

En esta sección se mostrará una de las tecnologías consideradas clásicas en el desarrollo de sistemas de posicionamiento local para interiores: la tecnología acústica, que se basa en la emisión de ondas mecánicas a través del aire. Para ello, se emplea un conjunto de balizas que actúan como emisores y receptores, distribuidos por el espacio donde se quiere llevar a cabo el posicionamiento.

Las principales ventajas de la tecnología acústica son: robustez, sencillez de implementación, bajo coste relativo, y precisión de varios centímetros en los sistemas más avanzados. Además, aunque las balizas requieren de una sincronización, ésta no es tan estricta como en otras tecnologías debido a dos motivos: 1) la velocidad de propagación del sonido en el aire, que es relativamente baja (alrededor de 343 m/s a 20°C); y 2) se utilizan sistemas de cómputo en tiempo real que trabajan con tasas de muestreo de algunos cientos de miles de muestras por segundo, o varios millones de muestras por segundo en el peor de los casos.

Por otro lado, los principales inconvenientes de la tecnología acústica son: una baja cobertura, que se debe tanto a la alta direccionalidad de la mayoría de los transductores acústicos disponibles en el mercado y a la gran atenuación que experimentan este tipo de ondas en el aire; la necesidad de disponer de un camino de propagación a lo largo de la línea de visión (LOS, line of sight) que une emisores y receptores; las limitaciones derivadas de su gran sensibilidad al desplazamiento Doppler y los efectos del multicamino, es decir, los diversos rebotes que pueda sufrir la señal acústica en paredes y objetos.

Para lograr el posicionamiento con ondas acústicas, el proceso básico la emisión y recepción de una señal acústica y el sistema compara la señal emitida con la recibida. La combinación de esta información entre varios emisores-receptores es lo que permite obtener la posición. Más concretamente, las técnicas que se utilizan son:

- Time of Arrival (ToA, tiempo de llegada): se obtiene la posición a partir del tiempo de propagación de las señales, es decir se mide el tiempo desde el momento en que se emiten las señales hasta que son detectadas por el receptor. Se transforman en distancia multiplicando la velocidad de propagación de la señal por ese tiempo.
- Time Differential of Arrival (TDoA, tiempos de propagación diferenciales de llegada): se obtiene la posición a partir de los tiempos de llegada dife-

renciales, que se transforman en distancias diferenciales multiplicando la velocidad de propagación de la señal por ese tiempo.

- Amplitud de la señal recibida: es una técnica poco común para lograr el posicionamiento con señales acústicas. Sería una técnica equivalente al posicionamiento mediante la intensidad de la señal WiFi que se verá en la sección dedicada a radiofrecuencia.
- Angle of Arrival (AoA, ángulo de llegada): se consigue el posicionamiento mediante una batería de sensores en el receptor que miden el ángulo de llegada.

De las cuatro técnicas mencionadas, las dos primeras, ToA y TdoA son las que se suelen utilizar. Las otras dos no pasan de ser algunas pruebas.

Al igual que ocurre en otras tecnologías, los sistemas acústicos pueden ser centralizados, con el emisor instalado en el agente a localizar y un conjunto de balizas receptoras distribuidas por el entorno; o bien orientados a la privacidad, donde el papel de emisores y receptores se intercambia para que el agente a localizar sea el encargado de determinar su propia posición. Este segundo caso, que es el más habitual, requiere la sincronización de las balizas emisoras que deben operar con una base de tiempos común, aunque, como ya se ha comentado anteriormente, esta sincronización no es tan crítica como en los sistemas basados en señales electromagnéticas. Este sincronismo se consigue, generalmente, mediante el cableado de las distintas balizas, aunque también se puede obtener con una señal RF siempre que los tiempos de latencia del proceso de comunicación basado en esta señal sean conocidos.

3.5.1. Codificación de señal

Un punto clave en el posicionamiento acústico es la codificación de la señal. Respecto a las señales emitidas, actualmente pueden distinguirse dos grandes grupos de sistema:

- Emisión de pulsos ultrasónicos de corta duración y frecuencia constante: corresponde a los primeros sistemas acústicos, surgidos a finales de los años 90 del siglo XX. La llegada del pulso se detectaba siguiendo un simple proceso de umbralización de amplitud o energía. Este enfoque tiene la ventaja de reducir de una manera muy notable la complejidad tanto del módulo emisor como del módulo detector; sin embargo, tiene dos inconvenientes, por un lado una precisión limitada a varias decenas de centímetros, y por el otro una gran sensibilidad al ruido acústico dentro del rango

de frecuencias de la señal emitida. La frecuencia de estos pulsos ultrasónicos se encontraba en el rango de los 40 a 50 kHz, que es lo suficientemente elevada como para no ser detectada por el oído humano (ni la mayoría de los animales), y lo suficientemente baja como para poder alcanzar rangos de varias decenas de metros antes de que la potencia de la señal se haya atenuado por debajo del nivel de ruido. Las duraciones típicas de los pulsos van desde las varias decenas de microsegundo hasta un milisegundo, lo que permite que se puedan generar fácilmente con transductores piezoeléctricos comerciales de tamaño y coste reducidos. Además de la baja precisión ya comentada, el principal problema que presentan estos sistemas es el de la interferencia entre distintos emisores, que es generalmente eliminada haciendo uso de estrategias de multiplexado temporal, lo que reduce de una manera muy importante la tasa de actualización de la posición.

- Sistemas de banda ancha: surgen para superar las limitaciones comentadas anteriormente. Están inspirados en los sistemas de radar avanzados y aparecieron en la primera década de este siglo. Tienen la ventaja que mejoran de una manera muy notable la precisión en la localización del sistema mediante la modulación de las señales emitidas para ampliar su ancho de banda sin alterar su energía. La detección de la llegada se realiza en este caso mediante un filtro acoplado a la señal emitida lo que, además de la ya comentada mejora de precisión, permite maximizar la relación señal-a-ruido a la salida y resolver el problema de sensibilidad al ruido de los sistemas de banda estrecha. A la hora de modular las señales acústicas de un sistema de posicionamiento de banda ancha se han explorado dos alternativas.
 - El uso de modulación lineal en frecuencia (LFM), que consiste en variar linealmente la frecuencia del pulso ultrasónico emitido desde un valor inicial f_1 a un valor final f_2 , imitando así el chillido (chirp) de ciertas especies de murciélagos. En este caso, la interferencia entre distintos emisores también se controlada haciendo uso de estrategias de multiplexado temporal.
 - El uso de la codificación binaria de fase, que consiste en dividir un pulso ultrasónico de larga duración en N subpulsos más pequeños cuya fase se escoge como 0 o π según el valor de los bits de un código determinado. Si este código es una secuencia pseudo-aleatoria (PR), la forma de onda emitida se asemeja a una señal de ruido blanco con una función de autocorrelación tipo delta. La principal ventaja de este segundo enfoque es que pueden utilizarse distintas secuencias de una misma familia con correlaciones cruzadas entre ellas prácticamente nulas, permitiendo así la emisión simultánea de varias balizas con una interferencia mínima entre ellas. Este método de compartir un único canal entre varios

usuarios mediante la asignación a cada uno de ellos de una secuencia de espectro expandido que modula su señal emitida y lo identifica de forma unívoca, es lo que se denomina en Teoría de la Comunicación como acceso múltiple al canal por división de código (CDMA). Hoy en día, los sistemas acústicos de posicionamiento local basados en CDMA hacen uso de una variedad de secuencias PR, entre las que se encuentran los códigos Gold, secuencias de Kasami, conjuntos de secuencias complementarias o las secuencias LS. En estos sistemas el filtro acoplado del receptor puede diseñarse como un filtro directo o bien como una arquitectura de correlación eficiente que reduce de forma notable el consumo de recursos hardware necesarios para su implementación, facilitando así esta implementación sobre una plataforma portable.

El uso de emisiones simultáneas y de mayor duración que proponen los sistemas de banda ancha descritos en la sección anterior provoca la aparición de nuevos problemas cuyo efecto no es tan relevante en los sistemas de banda estrecha. El primero de estos problemas es el desplazamiento en frecuencia Doppler provocado por el movimiento del agente a localizar. Dada la relativamente baja velocidad de propagación de las ondas acústicas en el aire ya comentada, este efecto es mucho más importante en los sistemas acústicos que basan la detección de la señal en el reconocimiento de un patrón, ya que velocidades del agente de unos pocos metros por segundo pueden hacer las señales emitidas completamente irreconocibles para el detector, un problema que no existe en los sistemas basados en la umbralización de amplitud o energía. Para solucionar este problema, que también está presente en los sistemas acústicos de comunicación subacuática, pueden diseñarse receptores basados en un banco de correladores acoplados a distintas versiones desplazadas en frecuencia de los patrones emitidos, lo que supone aumentar la complejidad de este receptor. En ambientes poco ruidosos o donde no es necesario una gran cobertura pueden emplearse secuencias de menor duración para minimizar el efecto de este fenómeno. Una alternativa interesante consiste en utilizar códigos polifásicos de mayor resiliencia al efecto Doppler, aunque para ello es necesario disponer de emisores y receptores acústicos con un gran ancho de banda.

El multicamino es también un problema importante cuando se utilizan emisiones de larga duración, cuyos ecos pueden solaparse con las emisiones directas y alterar de forma importante el pico de correlación que señala el instante de llegada de la emisión directa. Para cancelar este efecto pueden utilizarse algoritmos recursivos de estimación de la respuesta impulsiva del canal acústico, como el algoritmo de Matching Pursuit que aproxima la solución proporcionada por máxima verosimilitud para canales de baja densidad de coeficientes (sparse channel).

La interferencia de acceso múltiple está causada por el valor no ideal de las correlaciones cruzadas entre las distintas emisiones simultáneas. Una consecuencia directa de este fenómeno es que las señales de mayor potencia pueden enmascarar los picos de correlación de las señales más débiles, dificultando así su detección. Este efecto puede mitigarse utilizando métodos paralelos de cancelación de interferencia (PIC), en los que las amplitudes y retardos de las señales emitidas por cada baliza se estiman de forma conjunta y sustraídos de las señales recibidas. Otra alternativa es utilizar un esquema mixto de acceso al canal por división de tiempo y código (T-CDMA) que reduce el nivel de interferencia al eliminar la emisión simultánea, aunque permite cierto solapamiento entre las señales recibidas por el camino directo y los ecos de las otras emisiones.

3.5.2. Sistemas basados en dispositivos portables

Hasta aquí se han mostrado los sistemas para posicionamiento acústico basados en balizas dedicadas. Sin embargo, el posicionamiento local en interiores tiene cada vez una mayor relevancia en aplicaciones y servicios implementados sobre dispositivos móviles como smartphones o tablets. Los servicios basados en localización (LBS), proporcionan información relevante al usuario a través del dispositivo móvil, en virtud de su posición. Estos dispositivos comerciales, ofrecen gran variedad de sensores (giróscopos, acelerómetros, magnetómetros, cámaras, micrófonos, etc) y una solvente capacidad de procesamiento, lo que permite implementar en ellos gran variedad de sistemas de posicionamiento local basados en este tipo de plataformas. Por tanto, es importante explorar las posibilidades que ofrecen para el posicionamiento acústico.

Los altavoces y micrófonos que poseen estos dispositivos están diseñados para trabajar en el rango audible, sin embargo, se ha podido comprobar que son capaces de trabajar a frecuencias ultrasónicas bajas (<22 kHz) y que poseen además sistemas de adquisición de audio que permiten frecuencias de trabajo de hasta 96 kHz. Estas dos circunstancias sumadas a su capacidad de cómputo posibilitan la utilización de estos dispositivos no sólo como balizas emisoras o receptoras, sino que además se pueden utilizar para determinar la posición del propio dispositivo, utilizando para ello técnicas de posicionamiento propias de los sistemas de posicionamiento local ultrasónico genéricos como las basadas en CDMA.

Por tanto, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por el hardware de estos dispositivos, será necesario acotar el rango de frecuencias de las señales emitidas entre el audible alto (>16 kHz) y el ultrasónico bajo (<22 kHz) para que estas emisiones, además, no resulten molestas al usuario. Por otro lado, dado que la frecuencia de adquisición de los sistemas de audio y la capacidad de procesa-

miento de estos dispositivos son limitadas, hay que ser cuidadoso tanto en la elección del muestreo de las portadoras utilizadas como en la longitud de las secuencias elegidas con el fin de conseguir frecuencias de actualización de la posición del dispositivo que resulten aceptables.

A pesar de estas restricciones de frecuencias, lograr el posicionamiento acústico mediante dispositivos móviles presenta varias ventajas sobre los sistemas de posicionamiento ultrasónicos tradicionales: 1) permite la implementación de un sistema de posicionamiento privado con una unidad de procesamiento portátil que el usuario puede transportar con facilidad; 2) dada la implementación en estos dispositivos de otras tecnologías como son las redes WLAN, WPAN y sus sensores inerciales, es posible la implementación de sistemas de posicionamientos híbridos que trabajen de forma colaborativa y mejorar así la cobertura y la precisión del posicionamiento; y 3) se pueden implementar en dispositivos comerciales estándar donde el usuario final no necesita añadir ningún hardware adicional, sino simplemente instalar una aplicación que será la encargada tanto de la adquisición, como del procesamiento de la señal y la determinación de la ubicación del dispositivo. Además, desde el punto de vista del usuario, el hecho de disponer del sistema de posicionamiento local en su dispositivo móvil permite su aprovechamiento para ofrecer al usuario LBS.

Finalmente, hay que tener en cuenta que la rápida evolución tecnológica de este tipo de dispositivos prevén mejoras en las prestaciones hardware que van a tener una incidencia importante sobre el rendimiento que puedan tener en un futuro cercano. De esta forma la incorporación de procesadores y sistemas de adquisición más rápidos y eficientes reducirán el tiempo de ejecución de los algoritmos y mejorarán la experiencia de usuario. Por último, la inclusión de micrófonos con mayor respuesta en frecuencia (destinados al reconocimiento gestual mediante el análisis de ecos de señales ultrasónicas) permitirá su utilización para el diseño de sistemas de posicionamiento ultrasónicos de mayor frecuencia.

3.6. RADIOFRECUENCIA

En esta sección se mostrarán las tecnologías que utilizan las ondas electromagnéticas de la zona de la radiofrecuencia. En particular, se mostrarán los sistemas de posicionamiento basados en WiFi, RFID, ZigBee, UWB, Bluetooth, la propia red celular/LTE, y las señales de radio y televisión.

3.6.1. WiFi

WiFi es una tecnología para el envío y recepción datos en redes inalámbricas a través de ondas de radio. Se basa en las definiciones del estándar

IEEE802.11, que dispone de varias versiones, aunque las más extendidas son las versiones a, b, g y n. Las versiones b y g, que operan en la banda de 2.4 GHz son compatibles entre sí, mientras que la versión a opera en la banda de 5 GHz y no es compatible con las anteriores. La versión más reciente de las cuatro, el estándar IEEE802.11n, es compatible con las otras tres, y permite operar tanto en la banda de 2.4 GHz como en la banda de 5 GHz. Además, esta especificación permite la comunicación a tasas superiores a los 100 Mbps.

Aunque WiFi no se ha creado como un sistema de posicionamiento en interiores, es posible utilizarlo con este fin. Para ello se suele utilizar como métrica el nivel de potencia recibido, (RSS, Received Signal Strength, intensidad de la señal recibida); y con este valor se puede conseguir la posición mediante varias técnicas:

- Time of Arrival (TOA, tiempo de llegada): se obtiene la posición a partir de la pérdida de intensidad de la señal desde el nodo WiFi hasta el receptor. Tiene la ventaja que no necesita calibración previa, pero presenta el inconveniente que es necesario conocer la posición de los emisores. Dado que los emisores WiFi se colocan con fines distintos al del posicionamiento, a menudo su posición exacta es desconocida. Cabe decir, sin embargo, que ya hay soluciones orientadas al uso de balizas dedicadas al posicionamiento [93], pero aun así es necesario conocer el tiempo de procesamiento, así como la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas por el medio, que suponen nuevas fuentes de error en el sistema. Entre los sistemas que utilizan TOA están PlaceLab [94]o Redpin [95].
- Time Difference of Arrival (TDOA, diferencia de tiempo de llegada): se obtiene la posición a partir de la diferencia de tiempos de llegada de la señal desde un emisor a dos balizas distintas [96]. En [97] se propone un sistema basado en TDOA para IEEE802.11 que consigue precisiones en la estimación de la posición de 2.4 m. Para ello, necesita 10 nodos baliza colocados en las mejores posiciones posibles de una habitación, de forma que en general los nodos tengan visión directa entre ellos, es decir, que no haya muchas columnas que entorpezcan esta visión; por otro lado, el sistema requiere la sincronización entre los nodos baliza y tres antenas en el nodo a localizar.
- Fingerprinting: se obtiene la posición en dos fases: en una fase previa o de calibración (offline) se toman medidas de RSS asociadas a unas coordenadas; en la fase de localización (online) se toman las medidas de RSS y, comparándolas con las obtenidas previamente en la fase offline, se obtiene la posición [98], [99]. Es quizás la técnica más popular para lograr el posicionamiento en interiores, ya que se puede implementar sin conocer la

infraestructura presente y permite llegar a precisiones de entre los 4 y los 10 m. Además, existen bases de datos de calibraciones de edificios con las que probar los propios algoritmos [100]. El principal inconveniente de este sistema es que la fase de calibración puede llegar a ser muy costosa, y es muy sensible a cambios en el entorno (como mover o cambiar un punto WiFi), por lo que se han propuesto mecanismos para obviar esta fase [101]; o bien para genera un mapa de RSS automáticamente a partir de la posición de los emisores WiFi [102].

A pesar del potencial de esta tecnología inalámbrica, lo cierto es que son sistemas con una precisión que raramente baja de los 2 m y necesitan importantes inversiones en infraestructuras y/o una ardua etapa previa de calibración del entorno. Además, es una tecnología que es muy dependiente del entorno y los datos pueden variar, simplemente, variando el número de personas presentes ya que es una radiación que el cuerpo humano absorbe y, por tanto, los datos de RSS dependen de la densidad de personas en el edificio [103]. Por otro lado, normalmente se usan dispositivos móviles como receptores, que presentan importantes diferencias entre sus sensores dependiendo del fabricante, por lo que se pierde precisión cuando el dispositivo de calibración y el de localización son diferentes.

Es importante destacar que las técnicas que se han presentado aquí se pueden extender a otro tipo de campos electromagnéticos, como Bluetooth y, en el caso del fingerprinting, incluso a la señal del GPS o del campo magnético.

3.6.2. Bluetooth

Bluetooth es una tecnología diseñada para redes de comunicación inalámbrica de acceso personal que nació para sustituir al cable en los usuarios finales. Desde su estandarización, millones de dispositivos incorporan esta tecnología: impresoras, altavoces, teléfonos celulares, PDA (Personal Digital Assistant), ordenadores portátiles, etc. Opera en torno a la frecuencia de 2.4 GHz. Las ventajas de esta tecnología, además de su amplia presencia en los dispositivos, son: 1) su bajo coste; y 2) el bajo consumo de energía que necesita. Esto es debido a su menor potencia de transmisión y a que, desde la versión v1.2, no es necesario establecer una conexión para comunicar dos dispositivos. Sin embargo, aunque el alcance está entre los 10 m y los 100 m, según la clase de dispositivo Bluetooth utilizado, presenta el inconveniente de que habitualmente es menor que el de otras tecnologías inalámbricas RF, como la tecnología WiFi.

Para conseguir la posición mediante dispositivos Bluetooth, en general se pueden utilizar varias técnicas:

- Las mismas técnicas que se usan para WiFi.
 - Proximidad [104]: son las más comunes y dan como resultado un área donde se encuentra el nodo a localizar.
 - Nivel de potencia de la señal: se estima la distancia al nodo a partir del nivel de potencia recibido y posteriormente se obtiene la posición del nodo a localizar mediante trilateración [105], [106]. El principal inconveniente de esta técnica es que se ve muy afectada por el NLOS (non line of sight, falta de línea de visión) y el multicamino (es decir, los diversos rebotes que sufre la señal en paredes y obstáculos entre el emisor y el receptor).
 - Fingerprinting: consiguen precisiones de 2.5 m [107], aunque requieren una ardua tarea de calibración y son poco robustas a cambios en el entorno, como en el caso de WiFi. Además, son necesarios al menos 10 s para detectar un dispositivo Bluetooth [107], lo que disminuye en gran medida el rendimiento y el tiempo de actualización.
- La tasa de error de bit: se obtiene la posición mediante la tasa de error de bit medida durante la comunicación de los dispositivos entre el nodo a localizar y varios nodos baliza [108], aunque en [109] se demuestra que en entornos de interior esta tasa es difícilmente utilizable para estimar distancias.

3.6.3. RFID

RFID o identificación por radiofrecuencia es la tecnología inalámbrica por excelencia para la identificación de personas u objetos, aunque también se utiliza para la localización de estos. RFID puede operar en diversas bandas, en torno a 868 MHz o 2.4 GHz. Existen aproximadamente 140 estándares ISO diferentes para RFID diseñados para una amplia gama de aplicaciones. Entre las que destaca el control de inventario y la automatización en los procesos industriales.

RFID se utiliza principalmente para la identificación de objetos y personas. Un tag pasivo (una etiqueta) se puede alimentar a distancia por un lector. Éste extrae la información del tag, que ha de encontrarse a unos pocos metros, para posteriormente buscarlo en una base de datos. Alternativamente, existen tags activos que se pueden leer desde distancias mayores. Los lectores RFID disponen de dos interfaces, una es la que se comunica con los tags, y otra es la que se emplea para la comunicación con los servidores, generalmente implementando los estándares de comunicación IEEE802.11 o IEEE802.3.

En cuanto a la localización de personas u objetos, se han propuesto soluciones con este tipo de tecnología para gran parte de los métodos de localización existentes:

- Nivel de potencia recibido con tags activos [110], [111]: consiguen una precisión de 1 m en la localización.
- TDOA con tags pasivos [112]
- Tags activos con la necesidad de sincronización entre ciertos tags de referencia [113];
- Tags pasivos y el Angle of Arrival (AOA, ángulo de llegada): se obtiene la posición a partir del ángulo de donde viene la señal respecto a, al menos, dos lectores RFID, que requieren el diseño de varias antenas y arrays de antenas [114].
- Mallas de tags de referencia distribuidos regularmente a lo largo y ancho del área de cobertura [115].

Aunque RFID es una alternativa bastante rentable para el desarrollo de sistemas de localización dedicados, esta tecnología inalámbrica sólo se suele utilizar como solución específica para otras aplicaciones. Además, los lectores RFID tienen un coste elevado y es necesario disponer de un gran número de ellos para ofrecer una buena cobertura en el sistema de comunicación y precisión en el sistema de localización. Por todo ello, RFID suele ser una opción poco rentable.

3.6.4. Zigbee

ZigBee, es un sistema diseñado para ser el estándar de comunicación inalámbrica para el control remoto en el sector industrial. Su especificación fue aprobada en 2004 y se basa en el estándar IEEE802.15.4. Opera en torno a la frecuencia de 2.4 GHz. Pretende captar el control de las aplicaciones industriales que no requieren grandes tasas de datos, pero deben tener bajo consumo de potencia, bajo coste, así como sencillez en el uso. En una red ZigBee se distinguen tres tipos de nodos: el coordinador, que es el único nodo capaz de comunicarse con otras redes; los routers, que puede enviar datos provenientes de otros dispositivos; y los end devices, que pueden transmitir datos locales a los dos anteriores permaneciendo inactivos el resto del tiempo.

Recientemente se están proponiendo varios sistemas de localización inalámbrica basados en esta tecnología, cuya base es similar a las técnicas con el mismo nombre que se usan para WiFi:

- TDOA: se utiliza un método multifase para realizar medidas exactas de tiempo, aunque este sistema necesita implementar algún protocolo de sincronización entre los lectores de la red [116].

- Nivel de potencia recibido: se obtiene la posición mediante un algoritmo de estimación de máxima verosimilitud del nivel de potencia recibido a partir de modelos de propagación log-normales. [117].
- TOA: para esta técnica se requiere añadir pequeños cambios en el hardware [118].

Algunos estudios están orientados al diseño de antenas impresas para diferentes entornos que mejoren las prestaciones de los sistemas de localización inalámbrica anteriores [119].

Uno de los puntos débiles de este tipo de dispositivos es que actualmente existen problemas de compatibilidad e interoperabilidad entre los diferentes módulos de RF que trabajan con los protocolos IEEE802.15.4 y ZigBee, por lo que actualmente la elección del módulo de comunicación es un detonante a la hora de crear la red. Además, la frecuencia de operación de las señales digitales que controlan este tipo de dispositivos, habitualmente 16 MHz [118], suele ser inferior a la empleada por otras tecnologías como WiFi, lo que influirá directamente en la resolución de las mediciones de la métrica de localización RTT.

3.6.5. Ultra Wide Band

Ultra Wide Band (UWB) se define como aquella señal que posee un ancho de banda absoluto de al menos 500 MHz o un ancho de banda relativo superior al 20%. La principal característica de las señales UWB es que pueden coexistir con sistemas de comunicación que transmitan en el mismo rango de frecuencias debido a su elevado factor de ensanchamiento y a su baja densidad espectral [120].

Los sistemas de localización inalámbrica basados en UWB presentan un gran potencial para conseguir estimaciones de la posición del nodo a localizar con errores inferiores a 1 m, además de estar caracterizados por su bajo consumo. Estos sistemas son muy adecuados para la localización inalámbrica puesto que el uso de anchos de banda extremadamente grandes ofrece capacidades deseables como una elevada resolución temporal. Las técnicas para lograr la posición son esencialmente las mismas que se han visto ya en los puntos anteriores:

- TOA: explota la elevada resolución temporal que se consigue con las señales UWB y así se puede estimar el TOA de la primera señal que alcanza el receptor de forma precisa. Ello permite conseguir precisiones muy elevadas con esta [121]–[123].
- Combinación de TDOA y AOA: la combinación de estas dos técnicas consigue precisiones centimétricas [124]. Esto es debido al gran ancho de

banda de las señales empleadas, a su capacidad de propagación a través de obstáculos y paredes, y a la inmunidad al multicamino [125].

Pese a las ventajas de UWB, no se trata de una tecnología inalámbrica de uso común en la actualidad. En consecuencia, los sistemas desarrollados presentan un coste elevado.

3.6.6. Redes celulares

Las redes celulares son la base de las redes de comunicación inalámbrica de área extensa. Dado que su arquitectura está basada también en estaciones base y móviles, es posible utilizar las mismas técnicas de posicionamiento que para las tecnologías anteriores: estimación de distancia mediante RSS, RSS fingerprinting, AOA, TOA, TDOA, etc.

Sin embargo, dado el grado de penetración de esta tecnología en el mercado y la gran cobertura del territorio que ofrecen, existe una gran demanda para que esta tecnología de comunicación pueda servir como base para desarrollar servicios basados en la posición. Entre dichos posibles servicios, son especialmente importantes aquellos relacionados con las emergencias y seguridad de los usuarios.

Dado que estas tecnologías de comunicación celulares operan en bandas licenciadas, desde los órganos reguladores se exigen ciertos requisitos de calidad de servicio. Por ejemplo, para las llamadas al teléfono de emergencias 911 en Estados Unidos (112 en Europa), el requisito solicitado por el regulador FCC (Federal Communications Commission, Comisión Federal de Comunicaciones) para la nueva versión mejorada (conocida como E911) es localizar al llamante con un error menor a 50 metros en el 67% de las veces y menor a 150 metros en el 95% de las ocasiones. En respuesta a estas necesidades, las redes de 2ª y 3ª generación (GSM, UMTS, HSDPA) han añadido soporte a diferentes técnicas de posicionamiento, las cuales varían en precisión y en tiempo de respuesta.

Con la llegada de la cuarta generación de redes celulares de comunicación (LTE) se ha puesto especial foco en poder proveer dichas llamadas de emergencia mejoradas, así como otros futuros servicios basados en la localización, al mismo tiempo que ofrecen una transición sin interrupciones con los servicios de posicionamiento ofrecidos por las redes de anteriores generaciones. El actual estándar LTE soporta tres técnicas de posicionamiento independientes: Assisted Global Navigation Satellite Systems (A-GNSS), Observed Time Difference of Arrival (OTDOA) y Enhanced Cell ID (ECID). Además, se ha desarrollado un nuevo protocolo dentro del estándar LTE llamado LPP (LTE Positioning Protocol) que se encarga de gestionar dichas técnicas de localización y gestionar y pro-

ver los servicios de llamadas de emergencia y resto de servicios basados en la localización.

3.6.7. Señales de radio y TV

Las señales de radio y TV provienen de una red de estaciones terrestres que, habitualmente, cubre prácticamente la totalidad del territorio de un país, por lo que han sido también estudiadas con el objetivo de utilizarlas con propósitos de posicionamiento.

En el caso de la televisión digital terrestre, el nivel de potencia de las señales permite que estas penetren en entornos de interiores y, además, las estaciones emisoras suelen estar sincronizadas con tiempo GPS, lo que permite marcar los paquetes de datos y así determinar pseudorángos de TOA. Sin embargo, la baja densidad de estaciones emisoras hace que las señales suelen recibirse con muy poca elevación sobre el horizonte, lo que hace que sólo sea posible posicionamiento en 2 dimensiones y que las señales puedan sufrir de multicamino [126].

En el caso de las señales de radio FM, dado que éstas carecen de información temporal, es imposible aplicar técnicas de TOA y TDOA. Sin embargo, sí se pueden aplicar técnicas basadas en fingerprinting con la potencia de la señal. De nuevo, el posicionamiento basado en señales de radio FM se beneficia de la existencia de una infraestructura ya instalada de forma casi ubicua, con suficiente potencia para abarcar entornos de interiores y de la posibilidad de utilizar dispositivos receptores de bajo coste y consumo. Debido a la naturaleza pasiva de los receptores, las señales FM pueden ser utilizadas en áreas donde otras señales RF estén prohibidas por razones de seguridad [126], [127].

3.7. GNSS DE ALTA SENSIBILIDAD

En este apartado se mostrarán los sistemas de navegación global por satélite (GNSS, Global Navigation Satellite Systems). Es importante notar que, una de las razones más comúnmente esgrimidas para justificar el desarrollo de sistemas de posicionamiento en interiores es, precisamente, que la señal GNSS no penetra en el interior de edificios con la energía suficiente. Sin embargo, el posicionamiento por satélite se puede considerar actualmente el posicionamiento estándar en exteriores y es fundamental hacer una transición fluida entre exterior e interior; además, en este apartado se mostrarán técnicas que permiten utilizar los GNSS también en el posicionamiento en interiores.

El uso de GNSS para localización en exteriores ha experimentado un auge sin precedentes en los últimos años, y actualmente se considera que más de cinco mil millones de receptores de GNSS en uso, con perspectivas de llegar a los ocho mil millones en 2020 [128]. Una de las principales razones de este éxito se debió, inicialmente, al establecimiento de normativas legales que obligan, ante situaciones de emergencia, a que las redes de telefonía móvil localicen los terminales de usuario con precisiones inferiores a los 50 m. Aunque la localización de dichos terminales podría llevarse a cabo a través de la propia red móvil, en la práctica resulta una tarea difícil ya que la red no fue diseñada a tal efecto, y las modificaciones necesarias serían muy costosas. Como alternativa, se optó gradualmente por el uso de GNSS como solución de posicionamiento global, sin necesidad de infraestructura adicional y con precisiones del orden de pocos metros, que era suficientes para cumplir con los requisitos impuestos.

La implantación del servicio de GNSS asistido (A-GNSS) a finales de los 90 contribuyó a la expansión de GNSS, ya que este servicio facilita a los terminales de la red móvil datos de asistencia como la lista de satélites visibles, sus parámetros orbitales, y valores aproximados de la frecuencia Doppler y del tiempo de propagación hasta una zona cercana al terminal móvil. Esta información es de gran ayuda para reducir lo que se conoce como *time-to-first-fix* (TTFF) o tiempo necesario para calcular la posición de usuario, y ha servido de estímulo para el despliegue de servicios basados en la localización (LBS, Location Based Services). Actualmente, más del 90% de los receptores de GNSS en uso corresponden a terminales de telefonía móvil (smartphones), y los ingresos que generan los LBS son la mitad del total de ingresos generados por GNSS a nivel global [128].

El éxito en la implantación de GNSS en terminales de telefonía móvil ha dado lugar a que un sistema inicialmente concebido para su uso en entornos exteriores con cielo abierto pase a ser utilizado en entornos habituales para los usuarios de telefonía móvil, pero menos favorables para GNSS. Este es el caso de entornos urbanos con grandes edificios y poca visibilidad del cielo (i.e., los llamados cañones urbanos) o entornos interiores.

En estos escenarios los efectos que sufre la señal de GNSS distan mucho del caso ideal para la cual estos sistemas han sido diseñados. En concreto, la señal recibida suele sufrir tres efectos adversos [129]: 1) una severa atenuación al atravesar paredes y techos de edificios hasta llegar al terminal de usuario; 2) la presencia de efecto multicamino debido a la reflexión en objetos o edificios cercanos; y 3) interferencias debidas al efecto near-far que surge al recibir señales de diferentes satélites GNSS con valores de potencia muy dispares. Este último efecto ocurre, por ejemplo, cuando la señal de un satélite de GNSS se recibe a través del techo de un edificio mientras que, simultáneamente, la señal de otro satélite se recibe a través de una ventana y por tanto con mucha menos atenuación. La

Figura 9 muestra una representación gráfica de los diferentes entornos de trabajo que suele encontrarse un receptor GNSS, donde pueden apreciarse los diferentes efectos adversos de propagación que se han comentado.

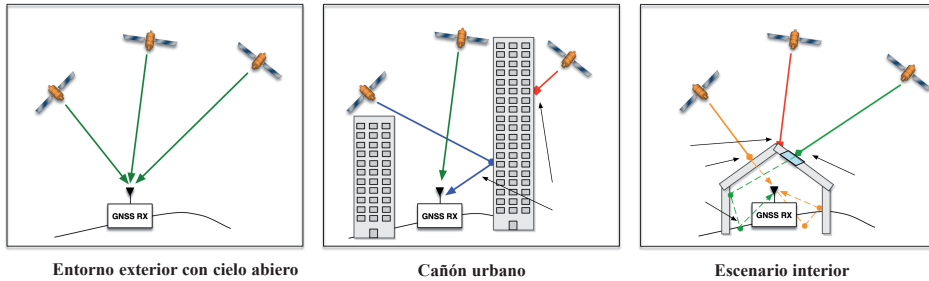


FIGURA 9: Representación de los diferentes entornos de trabajo en los que se suele encontrar un receptor de GNSS, desde el caso de exteriores con cielo abierto y visión directa, al caso de entornos urbanos con visibilidad limitada del cielo y al caso de entornos urbanos con visibilidad limitada del cielo y al caso de entornos interiores.

La presencia de condiciones de propagación tan adversas hace que los receptores de GNSS convencionales presenten problemas para operar en entornos urbanos, pero sobre todo en entornos interiores. En estas circunstancias se hace necesaria la implementación de técnicas avanzadas de procesamiento de señal para extender el uso de los receptores de GNSS más allá de los límites de su diseño original. Este conjunto de técnicas es lo que da lugar a lo que se conoce como técnicas de GNSS de alta sensibilidad, ya que en general, se basan en procesar la señal recibida y aprovechar la energía recibida de la mejor manera posible para detectar la presencia de satélites de GNSS [129], [130]. En la práctica se consiguen resultados satisfactorios aun cuando la potencia recibida está del orden de 30 dB por debajo de su valor nominal.

3.7.1. GNSS de alta sensibilidad

Para entender los fundamentos de las técnicas de GNSS de alta sensibilidad es necesario conocer primero la arquitectura de un receptor de GNSS, la cual se muestra de forma ilustrativa en la Figura 10.

Como puede verse, un receptor de GNSS contiene cuatro módulos elementales:

- El cabezal de radiofrecuencia: se encarga de acondicionar la señal captada por la antena, eliminar la portadora, y ofrecer a la salida las muestras digitalizadas de la señal.
- El módulo de adquisición: es el encargado de detectar los satélites presentes en la señal recibida y determinar de a grandes rasgos sus parámetros de sincronización.
- Módulo de tracking: lleva a cabo la estimación fina de los parámetros de sincronización.
- Módulo de navegación: con los observables suministrados por el módulo de tracking, calcula la posición del usuario, así como el offset del reloj local y, dependiendo del tipo de receptor, también el tiempo de transmisión, lo cual permite sincronizarse con el tiempo GNSS.

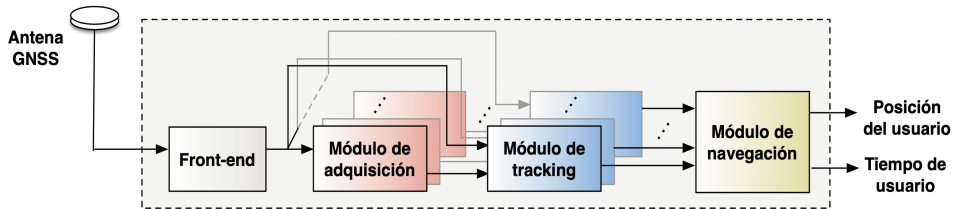


FIGURA 10: Ilustración de los módulos básicos que componen un receptor de GNSS convencional.

La recepción de la señal GNSS en entornos interiores o urbanos a menudo se ve sometida a discontinuidades ocasionadas por la presencia de objetos que bloquean momentáneamente la recepción de la señal. Esta falta de continuidad en la señal recibida hace que los receptores de GNSS de alta sensibilidad prescindan del módulo de tracking y se basen únicamente en calcular la posición del usuario ‘a demanda’, para lo que usan la salida del módulo de adquisición. Este tipo de operación se conoce como modo snapshot ya que el receptor funciona procesando fragmentos de señal recibida (i.e. snapshots) que no necesariamente son consecutivos. Es decir, entre un fragmento de señal y otro puede haber un periodo de tiempo en que no haya señal recibida debido a causas diversas: una obstrucción o bloqueo del camino directo; o bien, simplemente, porque el receptor no coge muestras de la señal para ahorrar batería, por ejemplo. El núcleo de los receptores GNSS de alta sensibilidad es pues el módulo de adquisición, cuya estructura interna se muestra en la Figura 11.

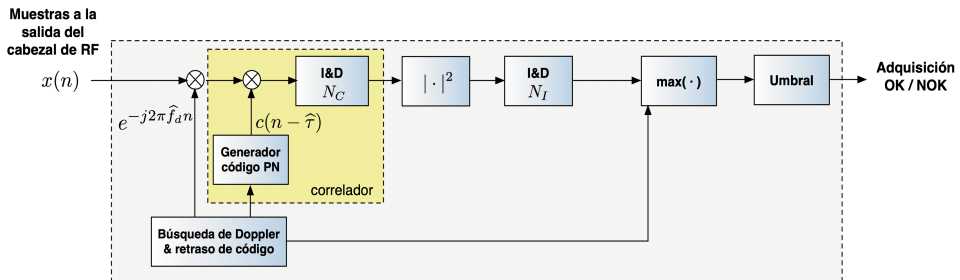


FIGURA 11: Arquitectura interna del módulo de adquisición de un receptor GNSS de alta sensibilidad.

3.7.2. Prestaciones

Una vez se ha presentado los fundamentos de los receptores GNSS de alta sensibilidad, basados principalmente en el uso de tiempos de integración largos, es interesante analizar las prestaciones que pueden obtenerse. En primer lugar, la Figura 12 muestra la sensibilidad de un receptor de GNSS en términos de la mínima relación de potencia de señal a densidad espectral de ruido (C/N_0) necesaria para detectar señales de GPS con una cierta probabilidad de detección. Dicha sensibilidad depende principalmente del tiempo de integración total y de cómo se alcanza este tiempo combinando N_I integraciones coherentes de duración T_{coh} cada una. Es interesante mencionar que la integración coherente tiene una mayor capacidad de extraer energía y de filtrar el ruido que la integración no coherente. Por ello siempre es preferible configurar el tiempo de integración total utilizando el máximo posible de integración coherente. Por ejemplo, en la Figura 12 se puede ver cómo para un mismo tiempo de integración total de $T_{\text{tot}} = 20$ ms, la sensibilidad puede ser de 31 dBHz o de 34 dBHz. La diferencia está en si esta integración total se configura mediante una única integración coherente de 20 ms (i.e. $N_I = 1$, $T_{\text{coh}} = 20$ ms) o bien mediante una integración coherente de 1 ms que es acumulada 20 veces de forma no coherente (i.e. $N_I = 20$, $T_{\text{coh}} = 1$ ms). Por otro lado, la Figura 12 muestra en el margen derecho los rangos de valores de C/N_0 que suelen encontrarse en diferentes escenarios de trabajo, desde exteriores hasta interiores profundos. Los valores de tiempo de integración coherente que se muestran en la Figura 12 cubren el rango de 1 ms hasta 1000 ms, que suele ser el valor máximo que puede integrarse en la práctica utilizando un reloj de calidad media-alta como un OCXO.

De la Figura 12 se deduce que los sistemas GNSS de alta sensibilidad son útiles para entornos *soft-indoor*, ciertos niveles de indoor, pero en ningún caso podrían ofrecer la posición en entornos *Deep indoor*.

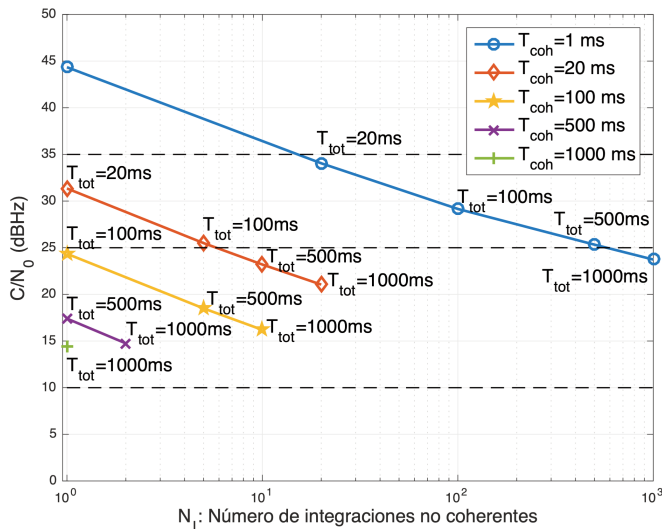


FIGURA 12: Ejemplo de sensibilidad de un receptor de GNSS en términos de la mínima C/N0 necesaria para detectar señales de GPS L1 C/A con una probabilidad del 90%.

La Figura 13 muestra, para los valores de sensibilidad obtenidos en la Figura 12, la precisión que se obtiene de la distancia a los satélites. Como se puede ver, la precisión que se obtiene es de entre 10 y 20 metros, debido a que la C/N0 que se está considerando es la mínima posible y por tanto fuerza al receptor a trabajar al límite de su umbral de detección. Se trata sin embargo de un caso extremo, puesto que habitualmente el receptor estará trabajando por encima de esta C/N0 mínima en la mayoría de los escenarios. En ese caso, la Figura 13 muestra también la precisión que se obtendría al trabajar 5, 10 o 20 dB por encima de la C/N0 mínima. Cabe mencionar que los valores de precisión que aquí se muestran corresponden a las distancias medidas a los satélites de GNSS, y se ha supuesto que no hay otros efectos de propagación adversos más que el propio ruido. La precisión trasladada a nivel de posición de usuario depende de la geometría de los satélites visibles y puede estar degradada en general un factor entre 1.2 y 3 respecto los valores de precisión en distancia.

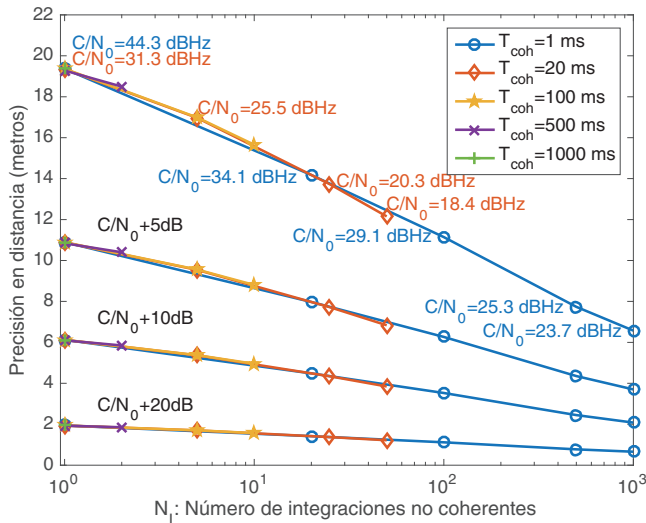


FIGURA 13: Precisión en la medida de distancia a los satélites, para los valores de C/N_0 mínima presentados en la Figura 12, y para el caso en que dichos valores se incrementan en 5, 10 y 15 dB. Se ha considerado que el ancho de banda del front-end del receptor es de 4 MHz y GPS L1 C/A como señal de interés.

3.8. NAVEGACIÓN INERCIAL

En los apartados anteriores se han visto tecnologías que dependen de una infraestructura desplegada en el entorno, como balizas bluetooth, puntos de acceso WiFi, cámaras, etc. En este apartado se mostrarán tecnologías que no necesitan la instalación de dichas balizas ni modificar el entorno mediante la instalación de sensores. Tienen la ventaja de ser independientes de una infraestructura preinstalada, lo que supone una disminución importante de costes y mantenimiento, especialmente en entornos grandes.

Estas tecnologías que no dependen de señales del entorno normalmente utilizan sensores inerciales. El uso personal de sensores inerciales para mejorar la localización puede considerarse perteneciente a la categoría más amplia de tecnología ponible (wearable technology) y entraría dentro del ámbito del IoT (Internet of Things, Internet de las cosas). Se trata de tecnología que cumple dos requisitos principales:

- El usuario puede llevar los sensores inerciales de forma más o menos natural, es decir, sin que interfiera con su modo de vida cotidiano y que incluso pase desapercibida

- Los sensores deben facilitar tareas de comunicación, navegación, monitorización o proveer cualquier servicio que sea necesario o aumente la calidad de vida del usuario.

Los dispositivos *wearables* incluso se pueden ofrecer al público general como un estilo de moda, lo que facilita su aceptación y distribución entre el gran público.

Los sensores inerciales pueden ir separados, o combinados en un único aparato. Para la localización de personas, las unidades de medición inercial (IMU, *Inertial Measurement Unit*) son los aparatos que más se han utilizado las dos últimas décadas. Un IMU puede ser un teléfono móvil, un reloj de muñeca o incluso un objeto incorporados a la vestimenta del usuario. Las señales que se pueden registrar son auto-contenidas (aceleraciones o giros), que no dependen en absoluto del entorno, sino del movimiento que realice la persona, como se muestra en la Figura 1 [131], [132].

Estas soluciones son de una extraordinaria utilidad en múltiples casos de uso, donde se quiera obtener un posicionamiento continuo y preciso, libre de interferencias o *spoofing*. Tiene múltiples aplicaciones en seguridad, defensa y en misiones de rescate por su robustez en entornos agresivos o peligrosos. En el entorno más cotidiano, también son muy útiles para proporcionar monitorización de la actividad de las personas en residencias o vida independiente.

Para lograr el posicionamiento mediante un IMU, se utilizan dos soluciones principales: *Pedestrian Dead-Reckoning* y *Pedestrian Navigation*, que complementa el posicionamiento con IMU con otras soluciones.

3.8.1. Pedestrian Dead-Reckoning (PDR)

PDR es una solución integrativa o acumulativa. Para obtener la posición se integran las longitudes de los pasos y las estimaciones de los cambios de orientación en cada paso detectado [133]. Alternativamente, también es posible integrar directamente lecturas de acelerómetro y giroscopio, mediante algoritmos de navegación inercial (INS), para calcular la posición y la orientación de la persona en movimiento [134], [135]. Las principales ventajas de estas soluciones PDR basadas en IMU son que proporcionan altas tasas de actualización (estimación continua sin zonas muertas o sin cobertura) y una estimación precisa de la posición y la trayectoria a corto plazo.

El principal inconveniente de la navegación inercial, o PDR, es la acumulación de errores de posicionamiento durante la integración de señales IMU. Esta deriva se podría evitar utilizando dispositivos IMU más sofisticados como los que se utilizan en la aviónica, pero el peso, el tamaño y la potencia requerida por estos

sensores hacen imposible su uso en aplicaciones con personas. De hecho, a finales del siglo XX se pensó de forma generalizada que el seguimiento de la posición de las personas utilizando IMU de bajo costo no era posible debido al gran crecimiento de los errores causados por la deriva del sensor durante la integración de las aceleraciones y los giróscopos [136]. Sin embargo, actualmente existen IMU con tecnología micro-electro-mecánica (MEMS), que a pesar de su bajo rendimiento, ofrece soluciones ligeras y de volumen contenido. Así, estos IMU basados en tecnología MEMS son muy adecuados para implementar soluciones prácticas de navegación para personas.



FIGURA 14: Concepto de PDR: una o varias IMU están unidas al cuerpo de una persona para estimar su posición, velocidad y orientación

Actualmente, se pueden obtener soluciones eficaces de PDR utilizando IMU de bajo coste con un crecimiento de acumulación de error de aproximadamente 1% de la distancia total recorrida. Por ejemplo, un error típico es el de unos 10 m para una prueba de caminado a lo largo de 1000 m [134], [135].

La clave para lograr estos resultados de posicionamiento en PDR con IMU de tipo MEMS, se aplican varias técnicas para compensar la deriva del sensor:

- *Zero Velocity Update (ZUPT*, actualización por velocidad nula) [132]: para corregir la deriva, el IMU se debe colocar en el pie, o en la suela del zapato de la persona. Esto descarta el uso del móvil o el reloj, pero actualmente existen soluciones *wearables* que permiten contar con redes de sensores de diferentes tipos, incluidos IMU, en el cuerpo de las personas (*body sensor networks*). La técnica del ZUPT se basa en que la mayoría de los tipos

de movimiento humano, incluyendo caminar y correr, incluyen periodos reconocibles repetidos durante los cuales la velocidad del pie es cero. Estos breves períodos se producen durante el ciclo de la marcha humana, cada vez que el pie entra en contacto con el suelo. El reconocimiento de estos periodos *ZERO-Velocity* se puede usar para estimar y compensar la deriva del sensor.

- Otros enfoques de PDR, de propósito más genérico incluso que son válidos cuando se fija la IMU en otras posiciones del cuerpo distinta a la del pie, que se basan en la estimación de longitudes de la zancada en cada paso detectado. Estas técnicas son útiles para corregir la deriva con dispositivos como el móvil o relojes inteligentes.

3.8.2. Pedestrian Navigation System (PNS)

A pesar de estas correcciones, aún existe deriva en las soluciones basadas en sensores inerciales y PDR. Por ello, estas técnicas se suelen complementar con algún tipo de referencia de posicionamiento absoluta para corregir el error. Tales correcciones pueden ser proporcionadas por:

- 1) Otros sensores independientes *embarcados* en el usuario, como magnetómetros o barómetros).
- 2) Restricciones de movimiento conocidas, como mapas, tipo de accesos, formas de caminar, etc.
- 3) Sensores externos como GPS o LPS.

Estas soluciones en que el PDR se complementa con sensores adicionales es lo que se conoce con el término más general de *Pedestrian Navigation System* (PNS, sistema de navegación peatonal). Por lo tanto, una solución PNS es básicamente tecnología PDR que se ha mejorado con sensores adicionales, información o suposiciones para limitar su deriva, es decir, ya no son métodos puramente *Dead-Reckoning*.

Actualmente la explotación de las técnicas PDR a partir de la IMU disponible en los móviles inteligentes, permite aplicaciones de guiado, juegos, realidad virtual y aumentada, así como aplicaciones de publicidad a medida basada en tu ubicación

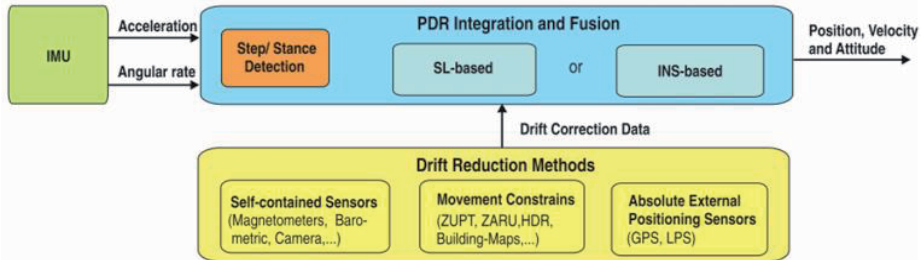


FIGURA 15: Diagrama de bloques general para un sistema de navegación peatonal basado en IMU (PNS). La mayoría de las realizaciones inerciales de PNS en la literatura encajan en este esquema.

3.9. CAMPO MAGNÉTICO

Desde hace algunos años, está ganando fuerza el posicionamiento en interiores basado en el campo magnético [137]. Este tipo de posicionamiento se enmarcaría en el grupo de los sistemas que no necesitan de ningún tipo de infraestructura.

La base de este sistema de posicionamiento es el campo magnético que rodea la Tierra por un campo magnético que está rodeada y, por tanto, está presente en todos y cada uno de los puntos del planeta. Tiene una magnitud que varía entre los 25 y los 65 μT (0,25-0,65 G). En la Figura 16 y en la Figura 17 se pueden apreciar, respectivamente, la intensidad y la inclinación del campo magnético terrestre.

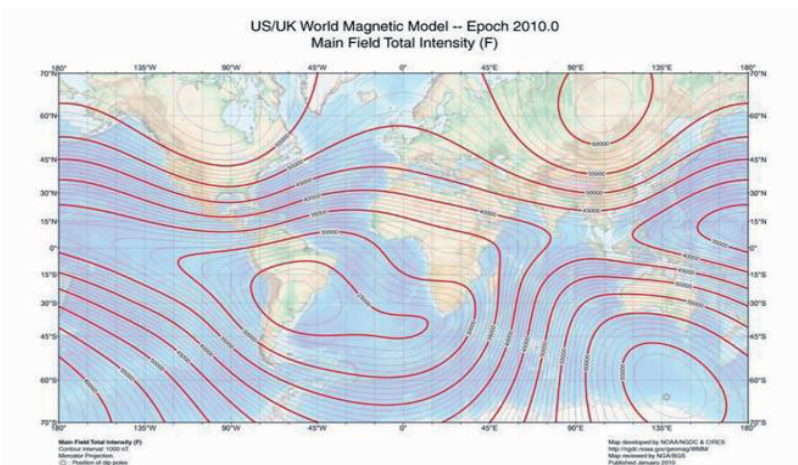


FIGURA 16: Intensidad del campo magnético terrestre (nT) en 2010. Fuente: http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/WMM2010_F_MERC.pdf

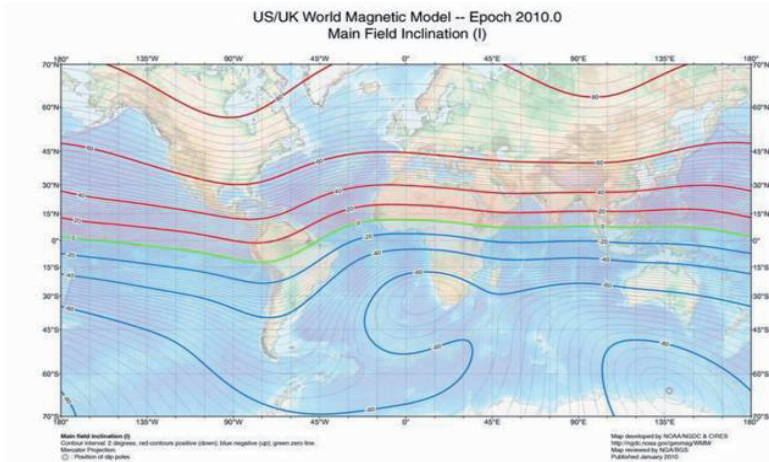


FIGURA 17: Inclínación del campo magnético terrestre en 2010. Fuente: http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/WMM2010_I_MERC.pdf

Hay tres hechos que hacen el campo magnético especialmente atractivo para su uso en posicionamiento en interiores:

- Está presente en toda la Tierra.
- La mayoría de los dispositivos móviles tienen sensores de campo magnético.
- El campo magnético sí que penetra en los edificios, a diferencia de la señal del GPS.

De esta manera, sabiendo el valor del campo magnético en cada punto, debería ser posible encontrar la ubicación del dispositivo. Lo cierto es que el campo magnético terrestre es bastante uniforme en el interior de un edificio. Sin embargo, las estructuras metálicas de los edificios, objetos ferromagnéticos, así como aparatos enchufados, entre otros elementos, distorsionan el campo magnético lo suficiente como para producir anomalías locales, que sí son características del punto interior en que se producen. Por tanto, aunque no es necesario disponer de ningún tipo de infraestructura, el posicionamiento con campo magnético es fuertemente dependiente del espacio interior en que se utiliza, ya que será posible sólo si hay suficientes elementos distorsionadores.

Es importante hacer notar que en la literatura se habla a menudo de posicionamiento por campo geomagnético. Sin embargo, los sensores no distinguen si el origen del campo es la Tierra u otro generador de campo, por lo que las anomalías detectadas pueden tener un origen diferente al terrestre. Por tanto, lo correcto

es hablar, simplemente, de posicionamiento por campo magnético. Por otro lado, cabe decir que el nombre de geomagnético ayuda a identificar que es un método que no necesita ningún tipo de infraestructura. De hecho, una alternativa es crear un campo magnético artificial, y detectar la dirección de llegada mediante un sensor (método del *Angle Of Arrival*, AOA). Ahora bien, esta es una opción útil sólo en áreas pequeñas y de coste elevado.

Otro elemento importante a tener en cuenta a la hora de proponer un sistema de posicionamiento basado en campo magnético es que las medidas de los sensores de dispositivos móviles muestran unas fuertes fluctuaciones del valor del campo en un punto dado. Sin embargo, las medidas relativas entre puntos son más estables. Así, el campo magnético es útil para posicionamiento dinámico, es decir, podemos obtener la ruta por la que se mueve el dispositivo, pero será poco útil para obtener la posición si el dispositivo está inmóvil.

El posicionamiento mediante campo magnético se lleva a cabo, principalmente, mediante fingerprinting. Es decir, en una primera fase (fase offline) se toman las medidas del campo magnético en la zona de estudio, con lo que se elabora un mapa de huellas o fingerprints; y en una segunda fase (fase online) se toman las mismas medidas con el dispositivo a posicionar, y se comparan con el mapa de huellas.

Dadas las características comentadas anteriormente, cada fingerprint corresponderá, no a un punto, sino a una ruta llevada a cabo por el usuario. Así, se obtiene una curva con el valor del campo magnético en función de la posición, como se puede ver en la Figura 18. En ella se muestran los valores de las tres componentes del campo y el módulo.

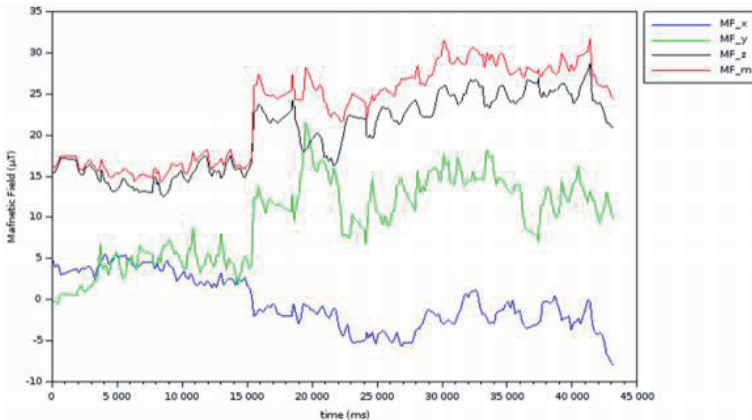


FIGURA 18: Ejemplo de captura de campo magnético. Fuente: [138]

Este tipo de gráficas se toman como huella para el recorrido, y normalmente se toma la media de varios valores del sensor en cada instante.

Dado que la magnitud de cada componente depende de la orientación del sensor, normalmente se usa el módulo del campo magnético como fingerprint. Es importante tener en cuenta que, a la hora de comparar las líneas, difícilmente ambas líneas se habrán recorrido en el mismo tiempo, por lo que no será posible una comparación punto a punto. Para comparar las gráficas de la fase online con las huellas, se pueden usar varios métodos: bag of words, que lleva a cabo una segmentación de la gráfica y a cada segmento le asigna una letra según la forma [139]; otro ejemplo sería el dynamic time warping [138], [140] que calcula la distancia entre dos gráficas como el coste de transformar una gráfica en la otra. La precisión obtenida es similar a la que ofrece el WiFi fingerprinting, es decir, entre los 2 y los 10 m.

Otras soluciones utilizan el campo magnético con el único fin de identificar la habitación en que se encuentra el dispositivo a localizar [141]. En este caso la huella, el fingerprint, se genera a partir de moverse de forma aleatoria en cada habitación a localizar.

A pesar de que el módulo es el elemento de medida más común, se están empezando a usar las tres componentes del vector campo magnético [142], ya que ofrecen una mayor variabilidad local que el módulo y, además, permiten obtener la dirección y el sentido. Es importante tener en cuenta, sin embargo, que estas técnicas aumentan el coste computacional.

3.10. INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA

Tal como se ha descrito hasta ahora la selección de una u otra tecnología de posicionamiento viene condicionada, además de por requerimientos como precisión, resolución o privacidad, por otros como la facilidad de despliegue de infraestructura, como cámaras o sensores bluetooth; o la presencia de infraestructura existente, como las señales WiFi. Este último grupo se conoce también como infraestructura de oportunidad, ya que no está dedicada al posicionamiento, pero puede utilizarse para tal fin. A él pertenecen también los sistemas de posicionamiento basados la red eléctrica existente. Dicha red eléctrica se usa para su función primaria, que es alimentar los dispositivos eléctricos, pero también se puede utilizar para funciones alternativas como la transmisión de datos (*Power Line Communication*, PLC) o, cada vez más, para la localización en interiores.

Aunque el uso de la red eléctrica en su desarrollo actual proporciona sólo localización simbólica (reducida a una habitación o a una zona de esta), puede ser suficiente para muchas aplicaciones muy demandadas como detección de presen-

cia, seguimiento de personas, evaluación de rutinas de comportamiento de los usuarios, etc.

El posicionamiento mediante la red eléctrica está inspirado en la técnica del *fingerprinting*, que ya se ha introducido en la localización mediante señales WiFi y, como en el caso del WiFi, minimiza la incorporación de nuevos elementos al entorno. Para obtener la posición, las tendencias actuales se podrían resumir en dos grupos:

- La inyección de nuevas señales a través de la red eléctrica, conocidas como *Powerline Positioning* (PLP), lo que requiere la instalación de una mínima infraestructura.
- El análisis de la huella eléctrica (el *fingerprint*) que generan los dispositivos eléctricos cuando se encuentran en funcionamiento. Esta señal se puede medir gracias a los contadores inteligentes que actualmente están desplegados en la mayor parte de los hogares españoles. La principal característica de este sistema es que para el posicionamiento se utilizan técnicas no intrusivas, también conocidas como técnicas NILM (*Non-Intrusive Load Monitoring*, monitorización de carga no intrusiva).

3.10.1. Powerline Positioning (PLP)

Existen varias propuestas de uso de PLP como alternativa de posicionamiento, con un mínimo coste de despliegue, adecuada para funcionar en cualquier hogar y que permite el seguimiento simultáneo de múltiples objetos. El trabajo pionero en este sentido es el de [143] en el que se propone el sistema PLP, que aprovecha la red eléctrica para generar un campo magnético a través del cual es posible extraer información de localización.

El sistema PLP necesita dos módulos conectados directamente a dos enchufes de la red eléctrica en cada uno de los extremos del espacio a cubrir. Cada módulo inyecta una señal codificada a una frecuencia diferente en la red eléctrica, que se atenúa a lo largo de la misma. Además, la densidad del cableado en la estancia también afecta el nivel de potencia de la señal. Unos receptores, que pueden ser móviles o *tags* fijos, captan esta señal, que será diferente en diferentes posiciones, lo que proporciona un mapa de *fingerprints*. El proceso para obtener la posición mediante esta técnica es el mismo que el que se ha mostrado para WiFi *fingerprint*.

Según las pruebas llevadas a cabo en múltiples entornos, la localización tiene una precisión que alcanza entre un 87 y un 95% de clasificación con una precisión de tres metros, y un 67% con una precisión de un metro.

El principal inconveniente de este sistema es la inestabilidad temporal que sufre el mapa de potencias en distintos entornos, lo que requiere re-calibraciones cada pocos meses, como de hecho sucede con la técnica del WiFi *fingerprinting* [143]. Para paliar esta deficiencia, [143] incrementa el número de señales de distinta frecuencia inyectadas en la red, y pasa de 2 a 44 frecuencias distintas en el rango de 447 kHz a 20 MHz. Esta tecnología se conoce como WPLP (*Wideband PLP*, PLP de banda ancha). Según las pruebas prácticas realizadas, con esta alternativa se mejora la consistencia temporal del mapa de potencias, y se consigue mantener una exactitud para localización simbólica superior al 90% en medidas realizadas con dos meses de diferencia.

3.10.2. Otras alternativas de posicionamiento usando la red eléctrica

Además de las indicadas, existen otras alternativas que requieren la incorporación de nueva infraestructura a la red eléctrica. Una de ellas consiste en el uso de unos interruptores inteligentes con un sensor embebido, que pueden recopilar información del consumo eléctrico, el estado de la iluminación, la temperatura, la luz exterior, etc. Además, estos interruptores pueden intercambiar información entre ellos de forma inalámbrica y ejecutar comandos para atenuar o apagar las luces, o bien para interactuar con el usuario. Estos dispositivos permiten realizar un seguimiento de los usuarios con el fin de aplicar algoritmos inteligentes para adaptarse y predecir sus próximos recorridos.

Por su parte, en otras técnicas se propone una codificación de las emisiones lumínicas de lámparas fluorescentes para introducir información de posicionamiento en un rango no visible para el ojo humano, es decir, hacer oscilar la iluminación a una frecuencia imperceptible para el ojo humano. Esta técnica proporcionaría finalmente un posicionamiento presencial.

Otros estudios arrojan posibilidades nuevas e innovadoras para la localización presencial en edificios. La interacción del cuerpo humano con el campo electromagnético que proviene de la red eléctrica puede ofrecer una idea de la proximidad del usuario y reconocer gestos del mismo [144]. En la misma línea, también se puede analizar este efecto con la luz de los tubos fluorescentes para obtener detección de presencia.

3.10.3. Monitorización de actividad humana a través del consumo eléctrico

Algunas aplicaciones persiguen la monitorización de la actividad humana, más que la posición propiamente dicha. Un aspecto importante que hay que tener

en cuenta en un despliegue masivo de sistemas de monitorización de actividad humana es buscar el equilibrio entre precisión y escalabilidad. Además, en este tipo de sistemas adquieren una gran importancia aspectos como el grado de aceptación por la persona, es decir, que sea poco intrusivo, y los futuros costes de instalación y mantenimiento.

Existen una gran variedad de aproximaciones, que se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Métodos directos: miden variables de cada persona directamente relacionadas con su actividad, como el ritmo respiratorio.
- Métodos indirectos: miden una variable ajena al usuario pero que da idea de lo que realiza.

En el grupo de los métodos indirectos, recientemente han surgido trabajos relevantes que tratan de estimar la actividad humana a partir de la desagregación del consumo eléctrico en una vivienda o, en general, en un determinado entorno. Para ello se emplean las técnicas NILM comentadas anteriormente que permiten, mediante el uso único del contador inteligente, la estimación del número de dispositivos conectados en una vivienda, y el consumo correspondiente a cada uno de ellos [145]. Estas técnicas se han visto favorecidas por el desarrollo e instalación sistemática en la mayoría de los hogares de contadores eléctricos inteligentes (*smart meters*). Así, la monitorización de la actividad humana en personas mayores que viven solas y que pretenden mantener una vida independiente, se puede obtener de modo poco intrusivo por la desagregación del consumo eléctrico en sus viviendas. Con estos sistemas se puede rastrear el uso de determinados electrodomésticos, lo que permite conocer la localización y actividad del usuario. El seguimiento de unas determinadas rutinas preestablecidas (diarias, semanales, etc.) da idea de cómo se desenvuelve en general la persona mayor. En caso de necesidad se pueden derivar alarmas a los sistemas de prevención y atención (sistemas sociales, familia, etc.) [146].

Las técnicas NILM desagregan la energía consumida por las distintas cargas en un hogar a partir de una medida general de la corriente y tensión eléctrica a la entrada de este, que puede ser la realizada por el contador inteligente. A partir de estas variables, las propuestas de desagregación existentes pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Algoritmos basados en detección de eventos: detectan los estados transitorios de consumo de potencia para monitorizar las cargas, lo que permite identificar conmutaciones on/off o cambios en el estado del dispositivo que realiza el consumo

- Algoritmos no basados en eventos: estiman el estado de la carga a partir de la muestra de consumo actual y haciendo uso del histórico de las precedentes.

Un factor determinante en una propuesta NILM es la frecuencia de muestreo de las señales de entrada. En general, se puede afirmar que, a mayor frecuencia de muestreo, mayor precisión en la desagregación del consumo. Sin embargo, en este punto, debe valorarse también un compromiso con el grado de integración de la solución, entendiendo ésta como la posibilidad de instalar la propuesta sobre un contador comercial sin modificaciones adicionales, para facilitar el despliegue masivo. Siempre será deseable una integración alta, sin elementos adicionales más allá de los ya existentes en la red eléctrica, lo cual suele además redundar en sistemas menos intrusivos. De esta forma, las frecuencias de muestreo bajas/medias (hasta algunos kHz) suelen facilitar dicha integración en los contadores actuales.

En el extremo de baja frecuencia, se encuentran sistemas con intervalos de muestreos entre 15 y 30 minutos [147]. En estas propuestas la integración es máxima, pero no así la precisión alcanzada en la desagregación, donde apenas se consigue identificar los dispositivos de mayor consumo. Por encima de ellos, se encuentran alternativas entre 1 s y 10 s por muestra. Este rango resulta ya suficiente para detectar regímenes permanentes, y desagregar los principales dispositivos, normalmente mediante métodos probabilísticos. Cabe mencionar que una gran parte de los trabajos se centran en este bloque, debido a una cierta fiabilidad en la identificación de las cargas principales sin que ello suponga una carga computacional excesiva para el sistema.

Por encima de estos valores, se encuentran aquellas técnicas NILM basadas en elevadas frecuencias de muestreo [148], que permiten un análisis y desagregación del consumo eléctrico mucho más minuciosos, lo que permite caracterizar eventos y estados transitorios, incluso de aquellos dispositivos de menor consumo. Cabe destacar que, desde el punto de vista de la monitorización humana, estos dispositivos de bajo consumo son muchas veces los más interesantes, puesto que su activación depende de la interacción con la persona en cuestión a monitorizar. Como contrapartida, el flujo de información supera habitualmente las dimensiones de contadores inteligentes y *smart grids*, lo que deriva en mayores dificultades para su posterior integración.

4. PRINCIPALES DESAFÍOS

Este capítulo describe los mayores desafíos actuales, o problemas técnicos que hay que resolver o mejorar en los próximos años. Podemos clasificar estos desafíos en:

1. La mejora tecnológica relacionada con dificultades técnicas en el mundo de la sensorización y tratamiento de la información para conseguir las mejores estimaciones posibles y la mejor calidad del servicio, lo cual es ya actualmente un proceso en continua evolución. Se incluyen aquí nuevos paradigmas de localización o técnicas colaborativas, necesarias en los entornos de interior del futuro como la «industria 4.0».
2. La definición de estándares que ayuden en el desarrollo y avance de esta tecnología de la forma más interoperable y eficiente posible. Se incluyen en este apartado la estandarización de mapas de interiores, métricas de desempeño, y protocolos lógicos para descubrir y proporcionar servicios de localización.
3. El desarrollo legislativo que permita garantizar el cumplimiento de derechos fundamentales, como el de la privacidad de las personas, o el acceso consentido o restringido a cierta información de interés general para garantizar la máxima seguridad del entorno. Se incluyen aquí también la normativa para la gestión del acceso a recursos para evitar el espionaje o el ciberacoso por acceso no lícito a información geoespacial.

En los siguientes apartados veremos con mayor detalle estos desafíos y las actuaciones que se están desarrollando o se debería priorizar para resolverlo, como por ejemplo en la mejora de calidad tecnológica (el uso de radio UWB, la fusión sensorial masiva, crowdsourcing ..), en el desarrollo legislativo y la privacidad (las nuevas directivas, o gestión de permisos móviles en Android/iOS, restricciones a detalles de mapas indoor, etc.), y en la parte de definición de estándares (openstreetmap indoor indoorGML, etc.) [1].

4.1. DESAFÍOS TECNOLÓGICOS

En este apartado recogemos diversos aspectos importantes a la hora de aumentar la calidad del servicio de localización ofrecido, tanto a nivel técnico, como a nivel de requisitos de usabilidad que demanda el usuario final.

- Uso del terminal móvil para comunicarnos y al mismo tiempo como sensor. Los sistemas PDR de estimación de posición basados en teléfonos inteligentes son muy atractivos, pero introducen nuevas dificultades al relajar las restricciones de que el sensor esté colocado de una forma conocida respecto al cuerpo humano. La mayoría de los trabajos asumen que el móvil se mantiene de una forma determinada respecto a la posición de la persona (frente a la cara, en el bolsillo, etc.) sin embargo, esto no es muy realista y es una simplificación del problema. A menudo hay un desfase (desconocido y variable) de la orientación de un teléfono inteligente y la dirección en la que el usuario se está moviendo. Este problema es sin duda un gran desafío que aún no está resuelto.
- Calibración de sensores. En el caso de los sensores inerciales, la calidad de las medidas es crucial, ya que cualquier variación en las condiciones ambientales, i.e. temperatura, puede afectar a los sesgos y linealidad en la escala de las estimaciones. Cuando se usan sensores IMU montados en el pie, mediante el uso de técnicas ZUPTs es posible realizar la medición y adaptación al sesgo actual de forma más precisa, sin embargo, para los IMUs ubicados en smartphones es más difícil realizar estas calibraciones en línea, y actualmente se suele requerir la intervención del usuario, reorientando su móvil antes de realizar su actividad, para asistir de forma voluntaria en el calibrado de parte de sus sensores. Esta labor, aunque sencilla, disminuye la usabilidad y transparencia de la tecnología utilizada desde el punto de vista del usuario, con lo cual es deseable mejorarlo con estrategias imperceptibles o desatendidas por el usuario.
- Reducción de consumos de energía. Cada vez se utilizan más sensores y algoritmos más sofisticados para obtener mejores desempeños. De hecho, aunque parte del procesamiento ocurre en la nube, otra buena parte del cómputo/comunicaciones ocurre en móviles o wearables, lo cual puede influir de una forma drástica en una reducción de la carga de la batería haciendo difícil que el dispositivo dure con carga las horas necesarias para un usuario normal en un día.
- Potencia de cómputo. Los requisitos de potencia de procesamiento son cada vez mayores. Si bien es cierto que muchos algoritmos (los más estandarizados) se procesan en circuitos integrados dedicados, permitiendo rea-

lizar operaciones avanzadas, hay que tener en cuenta que otros algoritmos son difíciles de paralelizar o que requieren una lógica muy flexible de procesamiento. Es el caso de diferentes algoritmos de procesamiento de señal, y fusión sensorial con filtros bayesianos con ecuaciones no lineales. En estos casos es muy común estrategias basadas en filtros de partículas, que por su flexibilidad dan solución a un gran número de problemas, sin embargo, requieren una intensa labor de cálculo. Con filtros de partículas existen oportunidades de paralelización que podrían aprovechar la actual tendencia de usos de GPU en paralelos o de nuevos procesadores específicos.

- Avances en radio UWB. Se esperan mejoras y miniaturización de soluciones de medida UWB de rango por debajo del metro, de bajo consumo y largo alcance, con gestión bajo condiciones de ausencia de visión directa en la comunicación entre dispositivos. Así mismo, sería deseable extender los rangos prácticos alcanzables en interiores, mediante el cálculo distribuido de rangos entre nodos y su compartición, todo ello de una forma escalable y siguiendo protocolos avanzados. Lamentablemente, la tecnología UWB no ha conseguido salir de su nicho de mercado (sistemas de posicionamiento, radar o comunicaciones de alta velocidad), y alcanzar una implantación masiva. Durante la década pasada se pensó en UWB como el protocolo óptimo para las futuras PANs y LANs, sin embargo, ha declinado al decantarse la industria por mejorar los más veteranos protocolos Bluetooth (con BLE), WLAN o radio de 60 GHz.
- Adaptación dinámica a entornos cambiantes. Especialmente en técnicas de localización basadas en RSSI, es de vital importancia tener un modelo de propagación de las señales que sea lo más parecido a la realidad. Este entorno puede cambiar esporádicamente cuando cambia el mobiliario, pero sobre todo puede cambiar con mucha frecuencia e intensidad, cuando el número de personas que se mueve por el espacio varía mucho, especialmente cuando hay visitas, reuniones o movimientos agrupados. El cuerpo de una persona puede atenuar las señales de radio en la banda del WiFi y BLE del orden de 20 dB [2]. En estos casos los modelos de potencia de la señal no son válidos y deben adaptarse automática y dinámicamente al entorno cambiante. El efecto de la presencia del cuerpo humano en entornos con densidad apreciable de personas y técnicas de localización cooperativa también debe ser estudiado en más profundidad [3].
- Auto despliegue de balizas en entornos y auto-calibrado colaborativo. En los casos en los que es necesario instalar una red de balizas emisoras o sensores, es una labor muy intensa, que además se convierte en una labor que requiere un esfuerzo adicional cuando se deben georeferenciar las balizas y modelar su interacción con el entorno. Sin duda el autocalibrado colabo-

rativo que puedan proporcionar cantidades grandes de datos registrados mientras diversas personas se mueven por el entorno de forma natural es una estrategia muy prometedora que permite reducir costes de autocalibrado, al distribuirlo en el esfuerzo desatendido de la gente que colabora, y que permite además que este calibrado sea continuo adaptándose a los cambios del entorno. En este sentido, existen iniciativas colaborativas a nivel mundial, de las cuales la más importante se conoce como wardriving: la generación automática de un mapa actualizado de puntos de acceso wifi (con su SSID y una estimación de su localización geográfica), y su subida a un repositorio para uso general. Un ejemplo de este tipo de iniciativas sería WiGLE (<http://wagle.net>), que registra más de 300 millones de puntos de acceso wifi por el mundo.

- Aprovechamiento de las señales de oportunidad. En el futuro cercano, sólo un número limitado de edificios contarán con una infraestructura dedicada al posicionamiento (normalmente entornos con un gran tránsito de personas o un interés especial: museos, hospitales y estaciones de transporte), mientras que en la inmensa mayoría no existirá cobertura de ningún sistema LPS como tal. Una tendencia en la investigación en localización en interiores es el empleo de señales de oportunidad, disponibles de forma natural en el entorno en el que se encuentra el usuario, para poder estimar (o mejorar) su posicionamiento. Pueden considerarse señales de oportunidad la RF no específicamente diseñada para posicionamiento en interiores (señales GSM, radio de FM o AM, televisión digital terrestre, DTV, etc) [4], pero también otras magnitudes medibles con los sensores de un teléfono móvil: el nivel de intensidad luminosa o de sonido, el campo magnético, la presión atmosférica y la humedad. Estas señales pueden aprovecharse para producir una estimación de la localización del usuario en los entornos arriba mencionados. Una de las que está experimentando un fuerte auge es la señal luminosa procedente de iluminación en edificios basada en LED, que puede ser modulada y captada por los sensores de luminosidad de los smartphones o por dispositivos diseñados ad-hoc
- Adaptación dinámica de algoritmos a diferentes usuarios y actividades. Especialmente en técnicas de localización basadas en navegación inercial, es importante que los algoritmos utilizados para detectar pasos y estimar zancadas sean robustos ante diferentes usuarios y tipos de actividades. Dado que cada persona posee diferentes características anatómicas y diferentes maneras de caminar, los sistemas de navegación inercial deberán ser capaces de ofrecer un rendimiento similar para cualquier usuario. De igual manera sucede con las diferentes posibles maneras existentes de desplazarse: caminar a diferentes velocidades, correr, subir y bajar escaleras, uti-

lizar ascensores, etc. Dado que la diversidad de usuarios y actividades es enorme, el diseño de métodos de calibración sencillos que permitan al usuario ajustar el rendimiento del sistema de navegación a sus características, o de métodos dinámicos que se adapten a la anatomía o forma particular de desplazarse del usuario, serán de gran utilidad.

- Seguridad e integridad de la localización. Aunque se está investigando intensamente en los diferentes sistemas de localización, la mayoría de los aspectos relacionados con la seguridad de la localización están siendo ignorados por el momento. En los inicios de los sistemas de localización, la seguridad no fue una gran preocupación debido a que estos sistemas eran diseñados especialmente para aplicaciones militares, por lo que, sistemas como el radar o el GPS, suelen estar físicamente protegidos o cifrados. Sin embargo, los sistemas de posicionamiento civiles son altamente vulnerables debido a estar diseñados generalmente bajo los principios de sistemas abiertos y disponibilidad pública. Dentro del concepto de seguridad de la localización se incluyen conceptos tanto de acceso, uso o modificación no autorizados, como conceptos más relacionados con la calidad del servicio de localización (QoS): integridad, disponibilidad, fiabilidad o confidencialidad.
- Interfaces hombre-máquina para navegación. Las interfaces utilizadas actualmente para interactuar con los sistemas de localización suelen basarse en los mismos sentidos que utilizamos principalmente los humanos para navegar por el entorno, como por ejemplo mirar la pantalla de un dispositivo móvil o escuchar una serie de indicaciones. Este hecho, además de poder excluir de su uso a personas con discapacidades sensoriales, puede interferir en las propias capacidades de navegación humanas. Por tanto, nuevas propuestas de interfaces pueden mejorar la eficiencia y experiencia de localización y navegación.
- Otros...añadir tantos puntos se os ocurran (desafíos tecnológicos ópticos, pseudolitos, ultrasonidos, fingerprinting, etc...)

4.2. DESAFÍOS DE ESTANDARIZACIÓN

En este apartado recogemos la necesidad de definir estándares que ayuden en el desarrollo y avance de la tecnología de localización y navegación en interiores de la forma más interoperable y eficiente posible.

- Integración de electrónica de localización en los dispositivos móviles. La industria electrónica propulsó la integración masiva entre las tecnologías GSM y GPS hacia el año 2009, mediante el diseño y comercialización de

chips que combinaban ambas capacidades. Esto ha permitido disponer de posicionamiento en exteriores en cada dispositivo móvil. Esta integración aún no está prevista para sistemas LPS, debido principalmente a la falta de un estándar aceptado para tecnologías de posicionamiento en interiores. Un pionero de esta tecnología es la empresa SiRF, actualmente propiedad de Qualcomm.

- Estandarización de librerías (SDK) para proporcionar la funcionalidad básica de localización en interiores dentro de sistemas operativos para dispositivos móviles (Android, iOS, etc)
- Estandarización de mapas de interior. Hoy en día cada desarrollador, tanto a nivel de investigación, como a nivel de solución comercial implantada por compañías, desarrollan mapas de interior a medida al problema particular a solventar. Hay ciertos intentos desarrollados apoyándose en soluciones colaborativas existentes para entornos exteriores, como es el caso de la base de datos openstreetmap (OSM). Ciertas propuestas como indoor-OSM han tratado de definir un estándar para modelar los espacios interiores de los edificios, definiendo las paredes, las ventanas, puertas o zonas restringidas. La propuesta ha sido utilizada en pocos casos, pero necesita el impulso de algún consorcio de estandarización que le de soporte [5]. Otro intento de estandarización apoyado en este caso por el «Open Geospatial Consortium» o OGC, es el indoorGML. Este estándar OGC® IndoorGML especifica un modelo de datos abierto y un esquema XML para la información espacial interior. Mientras que existen varios estándares de modelación de edificios 3D como CityGML, KML e IFC, que tratan el espacio interior de edificios desde puntos de vista geométricos, cartográficos y semánticos, IndoorGML se centra intencionadamente en el modelado de espacios interiores para fines de navegación. La última especificación es de agosto de 2015, y sigue siendo un desafío que el mercado adopte estos intentos de estandarización. Más aun sabiendo que cada gran compañía que trabaja con la localización indoor, por ejemplo, Google o Apple, usa su propio esquema de representación de los entornos.
- Estándares para garantizar la escalabilidad de las soluciones. Al igual que vemos mucho trabajo pendiente en estandarización de mapas, es igualmente importante que estos estándares incluyan la jerarquía necesaria para hacer escalable el problema. Igualmente, los estándares no deben solo modelar el espacio interior, sino que también deben crear las estructuras de datos (grafos, árboles, etc.) necesarios para garantizar una navegación y ruteado óptimo, continuado, y que se adapte a las necesidades de navegación o movilidad del usuario (rampas, ascensores, escaleras, tránsitos indoor/outdoor, etc.).

- Métricas de evaluación de desempeño consistentes. Hay actualmente poco consenso sobre cómo evaluar los sistemas de posicionamiento, lo que dificulta su comparación. Las salidas de un sistema pueden verse afectadas por las características de los objetos de ensayo, por el tamaño de la edificación, el diseño y los materiales de construcción, o por el procedimiento de prueba seguido (incluida la duración y el grado de actividad «natural»). Es común reportar resultados para un solo usuario a través de una serie de pruebas de caminar artificiales. Estas pruebas sirven como prueba de concepto, pero hay una creciente necesidad de evaluaciones exhaustivas del sistema durante periodos sostenidos con un conjunto diverso de sujetos de prueba, o con diferentes arreglos de sensores colocados en diferentes ubicaciones. Se está haciendo un esfuerzo en la definición de métricas y la comparación de soluciones de localización mediante la creación de diversas competiciones de localización (EvAAL, Microsoft, IPIN del IEEE [6], PerfLoc del Nist, etc) las cuales están teniendo un impacto importante, pero las métricas utilizadas no son un estándar, sino que se basan en propuestas razonables, y en algunos casos no son comparables. De igual manera, la disponibilidad de conjuntos de datos públicos que posean un nivel de calidad aceptado como bueno por la comunidad, puede ser clave a la hora de comparar diferentes sistemas de localización.
- Protocolos lógicos para descubrir y proporcionar servicios de localización. Hay mucho interés en proporcionar información personalizada sensible al contexto para poder mejorar la ejecución de tareas o acciones, sin embargo, la implementación aún no está estandarizada ni madura. Hoy en día, la utilización de información de contexto es muy básica en aplicaciones web. Probablemente, los datos de contexto más frecuentes sobre el usuario sea el idioma, pero también se utiliza la ubicación geográfica, para proporcionar información útil al usuario; por ejemplo, el motor de búsqueda de Google puede acceder a tu ubicación para producir resultados relevantes para el área. Hay muchos casos de uso en el interior de un edificio donde la información de contexto podría ser muy útil, por ejemplo: 1) Navegación interior, donde el contexto es la posición real y la tarea, el lugar al que queremos llegar, mientras que la información proporcionada podría ser un mapa, un texto con instrucciones de navegación o imágenes para mostrar el camino. 2) Mantenimiento, donde el contexto será la cercanía a una máquina dada, y la tarea sería el hacer un mantenimiento y la información proporcionada podría ser el manual de mantenimiento. 3) Solicitud de material, donde el contexto será la posición, en un taller de un operario, la tarea, alcanzar una herramienta, y la información proporcionada podría ser la indicación de dónde se encuentra esa herramienta. Para alcanzar todas

estas funcionalidades, los datos del contexto deben ser muy flexibles en su definición, y la información solicitada por el usuario debe ser estar basada en el contexto. Hoy en día, las aplicaciones web son la forma más importante de proporcionar información. De hecho, HTML 5, el nuevo estándar para el formato de páginas web incluye una API para Georreferencia del usuario (la Geolocalización API). La georreferenciación podría agregarse a una solicitud HTTP POST por medio de una Script JavaScript y podría ser procesado por el servidor web para seguir un enlace o seleccionar datos relevantes. Es por todo esto que sería necesario definir un protocolo web y los medios asociados para proporcionar servicios basados en localización, de una forma abierta donde de forma transparente nuestros dispositivos puedan descubrir los servicios de localización y navegación en el entorno sin tener que descargarse aplicaciones móviles o mapas específicos, todo se haría de forma natural.

- Incluir nuevas definiciones de estandarización en marcha (Fernando de UEX está al día) o cualquier otro aspecto de interés.

Sin una adecuada estandarización de la tecnología de localización y navegación es difícil avanzar con eficiencia y confiabilidad en el ejercicio de soluciones útiles y a la vez rentables, que sean de dominio público.

4.3. DESAFÍOS LEGISLATIVOS

En este apartado queremos resaltar la necesidad de realizar desarrollos legislativos que permitan garantizar la privacidad sobre la información de las personas, pero a la vez el acceso legítimo a datos privados como información de interés general para garantizar la máxima seguridad de la ciudadanía. La preocupación por la privacidad y la seguridad no concierne únicamente a los sistemas de localización, sino que está principalmente relacionada con la alta penetración de las nuevas tecnologías (especialmente wifi) en nuestro entorno cotidiano. Dicha penetración es cercana al 100 % en el hogar (en los países avanzados), y la demanda de los usuarios la impulsa hacia otros entornos como las ciudades al completo, o carreteras. Las regulaciones deben incluir ambos aspectos, pero en un contexto donde también se gestionen o minimicen los riesgos asociados con el espionaje o el ciber acoso que surgen por el acceso a datos privados de ubicación, hábitos de movimiento, o descubrimiento de con quién nos relacionamos.

- Privacidad del usuario: A nivel de privacidad de datos del usuario existen diferentes actuaciones posibles a nivel legislativo o normativo para garantizar la

privacidad por ley. El Reglamento (CE) nº 45/2001 es la contrapartida de la Directiva 46/95/CE relativa a la protección de datos, que se aplica a los actos de la Unión Europea. El desarrollo legislativo es muy necesario, pero hay que ser conscientes que habitualmente este tipo de actuaciones normativas son muy lentas en sus implantaciones, y frecuentemente van por detrás del estado del arte de las nuevas tecnologías que van apareciendo [7] [8]. Es por ello por lo que otro tipo de soluciones de mayor velocidad de implantación son necesarias, como la pseudo-anonimización [9] [10] o de ofuscación, que consiste en degradar a propósito la calidad del posicionamiento. En cualquiera de los casos se debiera garantizar por ley y de forma práctica en el uso de aplicaciones web o móvil, la configuración sencilla para que el usuario pueda elegir qué información está dispuesto a revelar, con qué propósito y durante cuánto tiempo esa información estará almacenada para su uso [11].

- Privacidad de los entornos: A nivel de privacidad de datos del entorno existen claras reticencias a que, entidades privadas o sensibles, revelen información detallada de mapas de interior. Para una mejor localización y una correcta navegación por los edificios es necesario tener un nivel de detalle relativamente alto, con identificación de las estancias, los límites físicos y las posibles rutas accesibles. En otros entornos públicos o de acceso libre a la gente, como es el caso de centros comerciales, museos, universidades, hospitales y estaciones de transporte es más admisible la publicación abierta de estos modelos de interior. De hecho, hoy en día hay mapas de interior (no muy detallados), pero aceptables para muchos de los casos de uso, como es el caso de GoogleMaps con detalles de indoor de cada vez más edificios públicos. En este sentido es necesario diseñar bien y gestionar los permisos, o niveles de detalle con los que, a determinadas personas, en función de su identidad o propósito, se les puede dar acceso.
- Seguridad de datos personales. A pesar de los esfuerzos legislativos en garantizar la privacidad del usuario o de los entornos, es fundamental un desarrollo tecnológico que trate de proteger al usuario o las plataformas de ataques, o usos no legítimos de los permisos concedidos a las aplicaciones. Es conocido el interés por las empresas o Estados, por conocer nuestros intereses, gustos y pautas personales. La motivación puede ser legítima, con la idea de proporcionarnos información que nos haga la vida más fácil, o por el contrario puede tener el objetivo de espiarnos, con fines loables como detectar amenazas, o simplemente pueden usarse para obtener información personal sensible que se pueda usar para acciones de chantajes, acosos, o en beneficio lucrativo y no lícito. La tecnología avanza en todos los sentidos, permitiendo una mejor encriptación de tus datos personales, o anonimizándoles. Sin embargo, son cada vez más sofisticadas las técnicas para romper o revelar la

información privada. Como ejemplo cabe citar el reciente descubrimiento de que se están enviando secuencias acústicas codificadas, embebidas en las señales de música o anuncios publicitarios, y que junto a la existencia de varias aplicaciones que permiten espiar las señales ultrasónicas captadas por nuestro móvil, es posible averiguar nuestra ubicación, nuestras rutas o incluso con quién nos relacionamos. Y todo ello incluso teniendo desconectados los datos, el GPS o el wifi. En el trabajo [12] los investigadores de seguridad dijeron que descubrieron 234 aplicaciones de Android que piden permiso para acceder al micrófono de tu teléfono inteligente para rastrear a los consumidores. Por otra parte, los investigadores encontraron que 4 de las 35 tiendas que visitaron en Alemania tienen balizas ultrasónicas instaladas en la entrada. Según los investigadores, SilverPush, Lisnr y Shopkick son tres SDKs incluidas en varias Apps que «escuchan» ultrasonidos para realizar un seguimiento de los usuarios. Esta escucha puede tener fines loables, pero también ilegítimos, y todo esto hay que regularlo.

- Privacidad y protección de datos en vigilancia participativa. Como los dispositivos móviles están cada vez más equipados con cámaras, módulos GPS y otros sensores, como sensores de brillo y proximidad, acelerómetros o giroscopios, esta tecnología permite la acumulación de numerosos conjuntos de datos para la vigilancia del entorno de las personas. En los últimos años, se han identificado varios casos de uso, que se centran en palabras clave como la vigilancia participativa y la detección móvil. En estos casos, los ciudadanos comparten voluntariamente los datos brutos de los datos de los sensores de sus teléfonos celulares con las autoridades públicas o los proveedores de servicios. Las implicaciones de estos avances en materia de privacidad y protección de datos, todavía no se han evaluado desde una perspectiva legal en profundidad. Sin embargo, ya hay estudios e informes sobre vigilancia participativa del Centro Común de Investigación (CCI) de la Comisión Europea, la cual realizó un experimento en el que se simuló una evacuación de emergencia y se utilizaron los datos de los sensores de los teléfonos celulares de los participantes para recopilar información sobre el progreso de evacuación y amenazas potenciales para la salud de los participantes [13]. Pero no se evaluaron las consecuencias jurídicas de la acumulación de esos datos, sin embargo, el Supervisor Europeo de Protección de Datos (SEPD) publicó un dictamen sobre los aspectos jurídicos del experimento [14], señalando los criterios generales para el tratamiento de datos personales. El SEPD llegó a la conclusión de que los datos recogidos satisfacían estas exigencias de privacidad, sin embargo, se señaló que, para evitar el rastreo de los participantes después y fuera del experimento, la aplicación móvil utilizada para recopilar los datos debería

suprimirse. Además, el SEPD hizo hincapié en que los datos sólo podían mantenerse mientras fuera necesario para los fines del experimento, lo que llevaría a la supresión de los datos biométricos y personales después de 30 días. En 2011 y 2013 Christin et al. identificaron varias aplicaciones de la detección participativa móvil [15] [16], que finalmente llevó al desarrollo de una interfaz de usuario amigable con la privacidad [17]. En el documento se analizaron aplicaciones que van desde la salud del usuario, los medios sociales, la contaminación del aire y las condiciones de las carreteras. Se identificaron amenazas a la privacidad de los usuarios con respecto a la divulgación incontrolada de datos personales, tales como datos de localización, muestras de sonido y video o información sobre las actividades de los usuarios basadas en datos de acelerómetro, a las partes no confiables. Estas amenazas se abordaron a través de diferentes soluciones técnicas persiguiendo la privacidad: Por el lado del usuario, la capacidad de establecer preferencias específicas, por ejemplo, activar o desactivar ciertos sensores, o registrando solo datos anónimos o seudónimos. En el lado de la aplicación, la gestión descentralizada de tareas para permitir el procesamiento anónimo, perturbar intencionalmente los datos recopilados e implementar controles de acceso y auditoría.

- **Transparencia de datos de dominio público.** Hay que regular que haya más transparencia en el sector respecto a los datos, no sólo en términos de privacidad, sino también en cuanto a poder tener consciencia de qué datos se venden sobre nosotros, y además qué beneficio puede reportar. Se debería también poder regular el poder hacer al usuario dueño de sus datos. Tecnologías como blockchain sientan las bases para poder implementar este enfoque de futuro, además de aportar una veracidad que beneficiaría a todas las partes, evitando que los operadores o empresas dominantes que recojan nuestros datos actúen como garantes de estos. Sería una buena iniciativa declarar ciertos datos como de interés público, a fin de fomentar la competencia y la innovación, y que sea lo elaborado por cada empresa a partir de esos datos de interés público, lo que pueda ser privado y propietario de cada corporación. Los datos en crudo que proveemos los usuarios no es justo que sean propiedad de una empresa tan sólo por haber utilizado una app gratuita, modelo de negocio del gigante Google, estos datos realmente no le pertenecen a la compañía sino al usuario.

Como se ha podido ver existen muchos desafíos pendientes de ser tratados en el área de privacidad y seguridad, especialmente ahora que todo es grabable o fotografiable, y puede ser compartido y procesado de forma inmediata. Por estos motivos la regulación es muy necesaria, para poder construir un futuro mejor.

5. ANÁLISIS ESTRATÉGICO

5.1. INTRODUCCIÓN

La temporalidad prevista de los actuales planes de financiación, tanto a nivel nacional como europeos, están llegando a su fin. Tanto el *Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación* para el período 2017-2020 [1], que recoge las ayudas estatales destinadas a la I+D+I. como los *programas de trabajo* 2018-2020 del *Horizon 2020* [2], el mayor programa de investigación e innovación de la UE, se encuentran en pleno proceso de consulta pública para el nuevo período de aplicación.

Esto provoca un efecto dominó en las agendas estratégicas de las Plataformas Tecnológicas, tanto nacionales [3] como europeas [4], las cuales se encuentran también en estado de revisión a la espera de alinear sus objetivos estratégicos con los objetivos de I+D+I de dichos programas.

Sin embargo, gracias al estado actual de estas consultas públicas, se dispone de documentos que, si bien son preliminares, permiten vislumbrar las temáticas de interés en estos programas con un horizonte temporal 2020.

El presente apartado recoge los principales puntos a destacar en la situación actual y futura de los Espacios Inteligentes y las Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interior, las líneas estratégicas que se proponen para que estas tecnologías puedan desarrollarse y encontrar un mercado para sus servicios y productos en el horizonte 2025, así como la financiación pública de I+D+I y las temáticas de interés destacadas en los mismos de cara a 2020. Finalmente, se analiza la transferencia de tecnologías al mercado a través de la creación de startups y la participación en aceleradoras.

5.2. DEMANDAS DE MERCADO, FORTALEZAS Y DEBILIDADES

Una vez analizada la situación actual de los Espacios Inteligentes y las Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interior, se recogen a

continuación los principales puntos a destacar en cuanto a niveles de desarrollo, usos y grado de implantación, y tendencias futuras de las dichas tecnologías:

DEBILIDADES <i>Carencias y limitaciones desfavorables propias</i>	FORTALEZAS <i>Características y habilidades favorables propias</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevado coste de implantación y mantenimiento de la infraestructura adicional (dispositivos y redes). ▪ Carencia en la adaptación dinámica a entornos cambiantes y a usuarios diferentes. ▪ Corta duración de las baterías, en el caso de cómputo/comunicaciones en móviles o wearables en lugar de en la nube. ▪ Falta de estandarización de librerías, mapas de interior y estructura de datos. ▪ Falta de métricas de evaluación de desempeño consistentes. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gran precisión de los sistemas actuales de localización. ▪ Alta utilidad en entornos industriales con alto contenido metálico. ▪ Despliegue de dispositivos de forma ágil y rápida. ▪ Posibilidad de integración de varias tecnologías para incrementar aún más la precisión de los EI y PNI. ▪ Múltiples casos de éxito de EI y PNI implantados en diversos sectores. Soluciones transversales. ▪ Tecnologías en auge y en constante desarrollo (I+D+I).
AMENAZAS <i>Factores externos desfavorables</i>	OPORTUNIDADES <i>Factores externos favorables</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carencias en la seguridad e integridad de sistemas de localización diseñados bajo los principios de sistemas abiertos y disponibilidad pública. ▪ Desconfianza por parte de los usuarios a compartir datos como su ubicación. ▪ Necesidad de realizar desarrollos legislativos que permitan garantizar la privacidad sobre la información de las personas, pero a la vez el acceso legítimo a datos privados como información de interés general para garantizar la máxima seguridad de la ciudadanía. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Posibilidad de integración de datos abiertos de los usuarios en redes sociales (contenidos y relaciones) con la información contextual y geográfica. ▪ Mejora de la capacidad de la red de próxima generación y de las tecnologías de comunicación. ▪ Disponibilidad de aplicaciones de posicionamiento sobre plataformas móviles (IOS– Android) e incremento del uso de las mismas por parte de usuarios. ▪ Técnicas de localización necesarias en los entornos de interior del futuro como la “industria 4.0”. ▪ Tendencia en aumento de la inclusión de dispositivos y sistemas de EI y PNI en infraestructuras públicas de nueva creación o en la rehabilitación de las mismas. ▪ Financiación pública I+D+I disponible. ▪ Incremento de programas y entidades (aceleradoras y otros) de apoyo al emprendedor de base tecnológica.

5.3. LÍNEAS ESTRATÉGICAS

Conforme a las conclusiones del análisis anterior y teniendo en cuenta las agendas estratégicas de las plataformas tecnológicas existentes a nivel nacional e internacional, esta sección propone una serie de líneas estratégicas¹ para que los Espacios Inteligentes y las Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interior puedan desarrollarse y encontrar un mercado para sus servicios y productos en el horizonte 2025.

Líneas estratégicas de I+D+	
Sistemas de localización	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Basados en PDoA y AoA utilizando señales IR, visibles o la iluminación LED (VLC) de la infraestructura: Algoritmos de posicionamiento 3-D basados en IR con diferentes estrategias. ▪ Basados en tecnologías acústicas. <ul style="list-style-type: none"> - Ultrasonidos (precisión centimétrica) a través de sistemas modulares de fácil instalación y mantenimiento: Algoritmos de fusión de datos, navegación de robots móviles, comunicaciones, etc. ▪ Localización de personas a través de la fusión de varias tecnologías: señales de RF (RFID, UWB, BLE, Wifi, etc.), Ultrasonidos, PDR (<i>dead reckoning</i>), <i>map-matching</i> (uso de planos de edificios), reconocimiento de acciones (rampas, escaleras, ...), tomografía de habitaciones, y señales de oportunidad (luces, perturbaciones magnéticas, etc.)
Sistemas de detección de pose y comportamiento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fusión de información de video (cámaras RGB), profundidad (cámaras ToF), y audio (micrófonos): Algoritmos de fusión de datos detección y conteo de personas a partir de la información de profundidad proporcionada por cámaras ToF, navegación de robots móviles, estimación robusta de pose y análisis de comportamiento humano, etc.
Control y navegación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Robots móviles en Espacios Inteligentes. <ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de Control en Red + Estimaciones basadas en eventos (<i>Event-based Estimation</i>) - Redes de sensores inalámbricos + Informes basados en eventos (<i>Event-based Report</i>)
Demostradores y prototipos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Demostradores de posicionamiento y navegación. ▪ Implementación de sistemas de ultrasonidos en sistemas hardware (FPGA, DSP, etc.) ▪ Demostradores en sistemas de detección de pose y comportamiento para comprender qué está pasando en una determinada escena. ▪ Desarrollo de prototipos de redes de sensores inalámbricos: Localización (audio, WiFi) y otras aplicaciones (p.e. sensores químicos).

¹ [1], [2], [3], [4], [5], [6].

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adaptación dinámica a entornos cambiantes. Desarrollo de modelos realistas de propagación de señales, especialmente en técnicas de localización basadas en RSSI.
Datos, señales y algoritmos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Data Science</i>. ▪ Bases de datos (de todo tipo, incluidas en el SQL). ▪ Aprendizaje automático. ▪ Desarrollo de algoritmos de identificación de patrones basados en IA. ▪ Algoritmos de sincronización temporal y técnicas de transmisión de datos. ▪ Adquisición y procesado de señal. ▪ Calibración de sensores. ▪ Analítica de datos en la nube. ▪ Requisitos de potencia de cómputo en algoritmos de procesamiento de señal, y fusión sensorial con filtros bayesianos con ecuaciones no lineales. ▪ Adaptación dinámica de algoritmos a diferentes usuarios y actividades, basadas en las características anatómicas y diferentes maneras de desplazarse (caminar, escaleras, ascensores, etc.). ▪ Métodos de integración de comunidades de datos abiertos de contenidos y relaciones de los usuarios en redes sociales con la información contextual y geográfica. ▪ Procesamiento de información lateral para mejorar el rendimiento de la red. Disponibilidad de la información secundaria significativa en la red de próxima generación, habilitada por la disponibilidad omnipresente de servicios de información geográfica y mediante la fusión de datos de sensores.
Tecnologías y dispositivos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ WiFi fingerprinting. ▪ Campo magnético. ▪ Comunicaciones de campo cercano (NFC) que permiten a las personas interactuar con infraestructuras. ▪ Análisis inteligente de vídeo. ▪ Mejoras y miniaturización de soluciones de medida en radio UWB. ▪ Nuevos paradigmas de localización o técnicas colaborativas, necesarias en los entornos de interior del futuro como la "industria 4.0". ▪ Sistemas de reconfiguración y planificación autónomos capaces de proporcionar la configuración óptima de los activos de producción. ▪ Sensores integrados que proporcionan información sobre la ubicación y el estado. ▪ Dispositivos móviles como el medio por el cual las personas pueden convertirse en un "sensor" dentro de los sistemas generales de infraestructura de la ciudad. ▪ Wearables y textiles inteligentes, que permiten la integración de sensores, interruptores, u otras funcionalidades. ▪ Soluciones en la duración de las baterías, para cómputo/comunicaciones en móviles o wearables en lugar de en la nube.

Aplicaciones y servicios	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplicaciones de posicionamiento sobre plataformas móviles (iOS – Android) y sistemas embebidos de PDS basados en μCs y FPGAs. ▪ Análisis de comportamiento y monitorización de la actividad en el hogar y ambientes hospitalarios para la ayuda al diagnóstico de enfermedades, la asistencia sanitaria (tanto en el ámbito hospitalario como domiciliario), el empoderamiento del paciente, y la investigación sobre el envejecimiento y el bienestar. ▪ Evaluación de influencias ambientales y exposición humana ante los mismos. ▪ Mejora y diversificación de las prácticas en la producción primaria, la organización de las industrias, los servicios y, en última instancia, involucrar a los consumidores en la cadena de valor. ▪ Aplicaciones de monitorización de actividad de trabajadores y análisis de movimientos ▪ Evaluación de impacto de soluciones y políticas de movilidad, demanda, necesidades y comportamientos, inclusión y acceso. ▪ Sistemas de simulación de rutas inteligentes para logística interna. ▪ Vulnerabilidades, resiliencia y capacidades relacionadas con identificación de amenazas, protecciones y contramedidas de alta prioridad, así como elaboración y validación de modelos y principios relativos a la respuesta cinética y la resiliencia ante los desastres en organizaciones, infraestructuras y la sociedad en general. Aplicaciones de localización y guiado de militares y en seguridad. ▪ Marketing digital en destinos y recursos turísticos, a través de líneas de actuación basadas en el geoposicionamiento y el contexto en el que se encuentra el usuario, de manera que los contenidos mostrados se adapten a estas circunstancias. ▪ Soluciones integradas, asequibles y amigables para el usuario (calefacción inteligente, refrigeración y ventilación, iluminación inteligente y carga de vehículos eléctricos). ▪ Sistemas para resolver los problemas de la industria proporcionando tecnología con un elevado nivel de desarrollo.
Personas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efectos colaterales de las personas en el posicionamiento de interiores. ▪ Interfaces hombre-máquina para navegación, con especial atención a las personas con discapacidades sensoriales. ▪ Interacción avanzada con las máquinas a través de la ubicuidad de dispositivos móviles y nuevos dispositivos de interacción natural.
Entorno	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Iniciativas de auto despliegue de balizas en entornos y auto-calibrado colaborativo. ▪ Aprovechamiento de las señales de oportunidad disponibles de forma natural en el entorno en el que se encuentra el usuario, para poder estimar (o mejorar) su posicionamiento. ▪ Seguridad e integridad de sistemas de localización diseñados

	generalmente bajo los principios de sistemas abiertos y disponibilidad pública.
Definición de estándares	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Integración de electrónica de localización (sistemas LPS) en los dispositivos móviles. ▪ Estandarización de bibliotecas (SDK) para proporcionar la funcionalidad de localización en interiores dentro de sistemas operativos para dispositivos móviles (Android, iOS, etc.) ▪ Estandarización de mapas de interior, a través de la definición de un estándar para modelar los espacios interiores de los edificios, y estándares de estructuras de datos (grafos, árboles, etc.) para garantizar la escalabilidad de las soluciones. ▪ Métricas de evaluación de desempeño consistentes para comparar diferentes sistemas de localización. ▪ Protocolos lógicos para descubrir y proporcionar servicios de localización, basados en la utilización de información de contexto.
Desarrollo legislativo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cumplimiento de derechos fundamentales, como el de la privacidad de las personas, o el acceso consentido o restringido a cierta información de interés general para garantizar la máxima seguridad del entorno. ▪ Gestión del acceso a recursos para evitar el espionaje o el ciber acoso por acceso no lícito a información geoespacial. ▪ Transparencia de datos de interés público.
Actividades y acciones estratégicas	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formación técnica en los aspectos mencionados en las líneas estratégicas de I+D+I. ▪ Transferencia de tecnología al mercado de forma ágil y efectiva: <ul style="list-style-type: none"> - Iniciativas empresariales innovadoras e industrias vinculadas a tecnologías futuras y emergentes. - Gestión optimizada de la propiedad intelectual. ▪ Promoción de la comunicación y la colaboración entre grupos de investigación: <ul style="list-style-type: none"> - Red de intercambio de conocimientos y experiencias. - Proyectos en colaboración. ▪ Promoción de la comunicación y la colaboración con la industria y la sociedad: <ul style="list-style-type: none"> - Nuevo ecosistema de innovación con participación de la industria y la sociedad. - Productos y soluciones adaptadas a las necesidades del mercado. - Demostradores y prototipos en entornos reales. 	

5.4. FINANCIACIÓN PÚBLICA AL I+D+I.

La situación actual de los EI y las tecnologías de PNI requiere llevar a cabo una serie de actividades de investigación, desarrollo e innovación para responder a los desafíos tecnológicos y a las tendencias y oportunidades futuras planteadas.

A continuación, se recogen los mecanismos de financiación públicos disponibles a nivel nacional y europeo para llevar a cabo proyectos de I+D+I en este ámbito.

5.4.1. Financiación nacional

El *Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación* constituye el marco de referencia plurianual para articular las actuaciones de la Administración General del Estado en el marco de la *Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación 2013-2020*. Es, por tanto, el principal instrumento que recoge las ayudas estatales destinadas a la I+D+I.

Una vez finalizado el Plan Estatal de Investigación Científica, Técnico y de Innovación para el período 2013-2016, la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad está inmersa en el proceso de consulta pública del *Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación* para el período 2017-2020. Esta información pública previa finalizó el 31 de julio de 2017.

A partir de este Plan de carácter plurianual, se fijarán los *Planes de actuación anuales*, que recogerán las convocatorias anuales en función de los recursos disponibles y de las prioridades marcadas para el período 2017-2020.

El documento *Avance del Plan estatal de investigación científica y técnica y de innovación 2017-2020. Consulta pública 11 de Julio de 2017*, recoge los siguientes programas estatales 2017-2020 [1]:

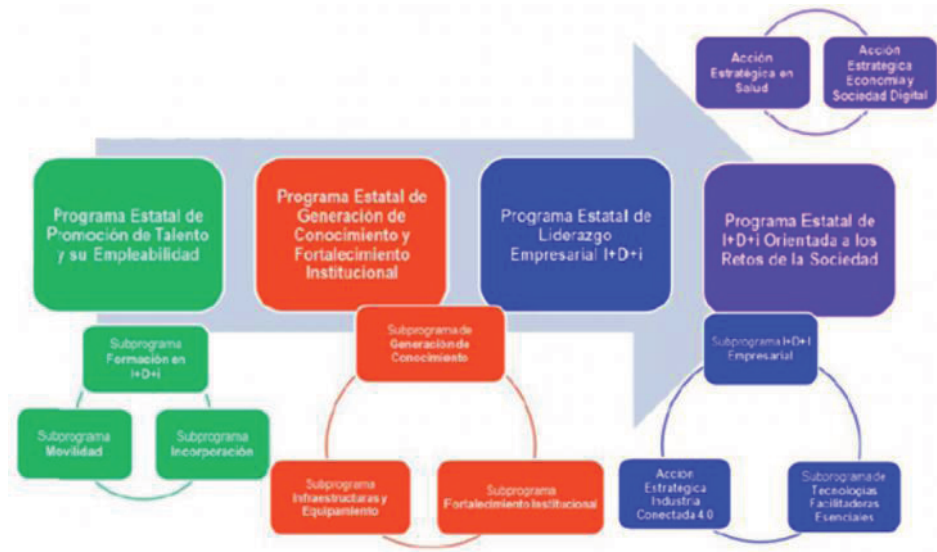


FIGURA 19: programas estatales 2017-2020

A continuación, se resumen los mecanismos de financiación cuyas prioridades son de interés para el ámbito del presente Libro Blanco:

5.4.1.1. Subprograma Estatal de Generación de Conocimiento

Mediante este Subprograma se financiarán, a través de la Agencia Estatal de Investigación, las siguientes tipologías de proyectos de I+D de investigadores y equipos del sistema público de I+D+I:

- PROYECTOS DE I+D DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO. Proyectos que no tienen una orientación temática previamente definida, motivados por la curiosidad científica (*curiosity driven research*), cuyo objetivo es el avance del conocimiento independientemente del horizonte temporal y ámbito en el que pueda ser utilizado. La duración de los proyectos podrá ser de tres a seis años.
- PROYECTOS «EXPLORA». Ayudas sin una temática previamente definida, incluyen propuestas altamente novedosas, resultados potenciales de carácter excepcional, así como el desarrollo de teorías, métodos y técnicas de investigación que suponen una transformación significativa en la comprensión de los fenómenos y problemas de estudio. Con una duración máxima de dos años, son proyectos de alto riesgo, cuyos resultados son difícilmente predecibles.

5.4.1.2. Subprograma Estatal de I+D+I Empresarial

Es el programa más importante del Plan, dedicado a la financiación directa de la I+D+I en las empresas, impulsado por la Administración General del Estado a través del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI).

- PROYECTOS DE I+D+I. No están dirigidos a ningún sector concreto y tienen una marcada componente tecnológica e industrial. Estos proyectos ejecutados por una o varias empresas incluyen la participación –mediante subcontratación– de otros agentes de I+D+I (universidades, organismos de investigación públicos y privados, así como centros tecnológicos, etc.).
- «INNOGLOBAL». El objetivo de estos proyectos de cooperación tecnológica internacional (bilaterales, multinacionales, etc.) es fortalecer las capacidades tecnológicas y de innovación de las empresas españolas facilitando el acceso a nuevos mercados o mejorando el posicionamiento en los mismos.

- «EUROSTARS» INTEREMPRESAS INTERNACIONAL. Con el objetivo de fomentar las actividades de I+D lideradas por PYMEs que representen una mejora tecnológica sustantiva, estos proyectos incluyen la financiación de actividades de investigación aplicada o desarrollo experimental presentadas al programa internacional EUROSTARS, que hayan sido positivamente evaluadas, y cuenten con financiación pública y/o privada en el resto de los países.
- «NEOTEC». Financia la creación de empresas de base tecnológica con vocación de crecimiento, contribuyendo al emprendimiento y a acelerar la transferencia de conocimiento desde el sistema público de investigación. Durante el período 2017-2020 se favorecerá la financiación de empresas de alto potencial de crecimiento (*scale ups*).
- «FEDER INTERCONECTA» CDTI. Las actuaciones de estos proyectos deben formar parte del Programa Operativo de Crecimiento Inteligente 2014-2020 y estarán cofinanciadas con Fondos FEDER en colaboración con las Comunidades Autónomas. El objetivo último es reducir la brecha tecnológica y fortalecer los sistemas regionales de innovación, contribuyendo, a través de la cooperación interregional entre empresas, al desarrollo de capacidades de innovación en las regiones menos favorecidas.
- LÍNEA DE INNOVACIÓN CDTI. Estas ayudas están dirigidas a la incorporación y/o adaptación de tecnologías novedosas para la empresa; la adquisición de nuevas tecnologías orientadas a la expansión en nuevos mercados internacionales, o la adquisición de nuevos activos fijos de vanguardia, especialmente por parte de PYMEs y empresas de mediana capitalización españolas. Estas actuaciones se diseñarán con el objetivo de generar sinergias con el resto de los instrumentos de ayudas, y especialmente con los incluidos en la **Acción Estratégica Industria Conectada 4.0** y en el **Subprograma Estatal de Impulso a las Tecnologías Habilitadoras**.
- PRUEBAS DE CONCEPTO EN TECNOLOGÍAS/INNOVACIONES DISRUPTIVAS. Su objetivo es contribuir a reducir el riesgo empresarial asociado a tecnologías e innovaciones de carácter disruptivo, y acelerar la innovación gracias al cribado de opciones tecnológicas reales en su estadio más temprano. Estos proyectos tienen un carácter experimental, una duración acotada y no superior a los dos años y permiten desarrollar la tecnología y los prototipos «de laboratorio» para demostrar la viabilidad técnica de resultados obtenidos en proyectos previos y que, como resultado del proyecto permitan avanzar hacia estadios tecnológicos más próximos al mercado (TRL4-TRL5).
- PROGRAMAS ESTRATÉGICOS SECTORIALES DE INNOVACIÓN EMPRESARIAL. Co-financiación de un número limitado de grandes ini-

ciativas estratégicas de I+D+I, que incorporen las tendencias, desarrollos y retos científico-técnicos más vanguardistas y disruptivos para identificar y resolver los desafíos a los que se enfrentarán, en un futuro próximo, sectores productivos críticos para la economía española y la generación de empleo.

- «HORIZONTE PYME». Estas ayudas están dirigidas a PYMEs que han sido evaluadas positivamente por la Comisión Europea en las correspondientes convocatorias del «Instrumento PYME» del programa Horizonte 2020 y que por razones presupuestarias no han podido ser financiadas.
- AYUDAS PARA FORTALECIMIENTO DE PYMES. El Plan Estatal contempla para el período 2017-2020 tres tipos de ayudas de dinamización:
 - CONTRATACIÓN DE ACTIVIDADES DE I+D+I CON CENTROS E INSTITUTOS TECNOLÓGICOS DE EXCELENCIA «CERVERA». Dirigidas a PYMEs, empresas de base tecnológica, así como empresas que conforman la denominada «industria de la ciencia», para la contratación de actividades de I+D+I con los centros e institutos tecnológicos acreditados y para la preparación de propuestas de proyectos de I+D+I, en colaboración con dichos centros e institutos.
 - CONTRATACIÓN DE ACTIVIDADES DE I+D+I CON CENTROS TECNOLÓGICOS. Su finalidad es incentivar la contratación de actividades de I+D+I, a ejecutar por los distintos centros tecnológicos existentes en España.
 - FORTALECIMIENTO EMPRESARIAL. Ayudas destinadas a PYMEs para la ejecución de proyectos de I+D+I próximos al mercado (TRL superiores a 8), y que hayan demostrado, a lo largo de los últimos cinco años previos: capacidad para realizar I+D+I con recursos propios; clara vocación internacional en sus actividades de I+D+I; haber desarrollado con éxito las fases previas de desarrollo e investigación experimental; y contar con un plan de desarrollo comercial y en su caso una cartera potencial de proveedores y usuarios interesados en los potenciales productos innovadores.

5.4.1.3. Subprograma Estatal de Impulso a las Tecnologías Habilitadoras

Su objetivo es la I+D+I de nuevas tecnologías prestando especial atención a las múltiples aplicaciones sectoriales de dichas tecnologías, incluyendo la fotónica, microelectrónica y nano electrónica, nanotecnologías, materiales avanzados, biotecnología, y las tecnologías de la información y las comunicaciones.

- PROYECTOS DE I+D+I (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial). Las ayudas se tramitarán en el marco de los PROYECTOS DE I+D+I incluidos en el **Subprograma Estatal de I+D+I Empresarial**. No obstante, una parte representativa de estas ayudas están destinadas al desarrollo y aplicación de tecnologías habilitadoras en distintos sectores de actividad que favorezcan la transición tecnológica de las empresas para mantener un alto valor añadido, contribuyan a la internacionalización de las mismas, y a la sostenibilidad económica, social y medioambiental.
- PROYECTOS DE I+D+I (Secretaría de Estado de Sociedad de la Información y Agenda Digital). Ejecutados por una o varias empresas (proyectos individuales y consorciados) incluyendo también los realizados por consorcios empresariales de carácter regional, así como los de colaboración tecnológica internacional tanto multilateral como bilateral. Estos proyectos estarán orientados al desarrollo y difusión de las tecnologías digitales habilitadoras incluyendo aquellos proyectos que, teniendo un carácter exploratorio, están cercanos al mercado.

En el ámbito de las tecnologías de la información y las comunicaciones, las ayudas incluidas en este subprograma se coordinarán y complementarán de forma sinérgica con:

- La Acción Estratégica Industria Conectada 4.0
- La Acción Estratégica en Economía y Sociedad Digital
- El Subprograma Estatal de I+D+I Empresarial y los PROYECTOS DE I+D+I del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial.

5.4.1.4. Acción Estratégica Industria Conectada 4.0

Gestionada por la Secretaría General de Industria y de la Pequeña y Mediana Empresa del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, incluye la financiación de PROYECTOS DE TRANSFORMACIÓN DIGITAL, que contemplan actividades de I+D+I aplicadas a procesos, así como a innovaciones organizativas en el ámbito de la «Industria 4.0». Se incluyen aquellos proyectos que, integrados en la «Estrategia Industria Conectada 4.0, tengan como objetivo: incrementar el valor añadido y el empleo en el sector industrial español; desarrollar la oferta local de soluciones digitales; y promover palancas competitivas diferenciales para favorecer la industria española e impulsar sus exportaciones.

5.4.1.5. Programa Estatal de I+D+I Orientada a los Retos de la Sociedad

Recoge los instrumentos comunes de financiación para la ejecución de actividades de I+D+I orientadas a los Retos de la Sociedad identificados, lo que implica la realización coordinada de las actuaciones de I+D+I en torno a los siguientes retos:

1. salud, cambio demográfico y bienestar
2. bioeconomía: sostenibilidad de los sistemas de producción primaria y forestales, seguridad y calidad alimentaria, investigación marina y marítima y bioproductos
3. energía segura, eficiente y limpia
4. transporte sostenible, inteligente e integrado
5. cambio climático, medioambiente y recursos naturales
6. ciencias sociales y humanidades y los retos de la sociedad española
7. economía, sociedad y cultura digitales
8. seguridad, protección y defensa

Las ayudas contempladas son las siguientes:

- PROYECTOS I+D «RETOS INVESTIGACIÓN» (Agencia Estatal de Investigación). Destinadas a financiar proyectos de I+D+I liderados por equipos de organismos públicos de investigación que incluyen la investigación fundamental orientada, así como sus aplicaciones en posteriores fases de desarrollo tecnológico y experimentación, dirigidos a la resolución de problemas complejos en el marco de los grandes retos de la sociedad. La duración de los proyectos podrá ser de tres a seis años.
- PROYECTOS I+D PARA LA REALIZACIÓN DE «PRUEBAS DE CONCEPTO» (Agencia Estatal de Investigación). Están destinadas a financiar proyectos de I+D, con una duración máxima de dos años, para demostrar la viabilidad (industrial y comercial) e interés potencial para las empresas y otros agentes sociales y económicos de resultados previamente obtenidos en proyectos de I+D+I financiados. La financiación cubrirá los pasos iniciales de un desarrollo precompetitivo incluyendo las actividades en los primeros inicios de la transformación y prototipado de los resultados de la investigación en propuestas de valor económico, comercial y social.
- PROYECTOS DE I+D+I «RETOS COLABORACIÓN» (Agencia Estatal de Investigación y Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial). Estos proyectos, con una duración máxima de tres años, tienen como finalidad avanzar en la validación y el desarrollo precompetitivo de nuevas tecnolo-

gías, productos y servicios a partir de la incorporación de conocimientos científico-técnicos creando el contexto adecuado para su aplicación y transferencia, y la generación de resultados tanto en las trayectorias tecnológicas y de innovación de las empresas como en el mercado.

- **CONSORCIOS DE INVESTIGACIÓN EMPRESARIAL NACIONAL («CIEN»)** (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial). Estas ayudas están dirigidas a fomentar la investigación, liderada por las empresas y realizada en colaboración público-privada, con el objetivo de movilizar la inversión privada en I+D+I y tener un efecto tractor en el tejido empresarial, especialmente PYMEs y empresas de base tecnológica, y en el conjunto de la economía, y con proyección internacional. Por su ambición, duración y organización las ayudas dirigidas a los Consorcios de Investigación Empresarial Nacional han de abordar problemas de largo alcance, asociadas a los retos de la sociedad o problemas transversales, y excepcionalmente sectoriales, estratégicos para la economía y la sociedad española.

5.4.1.6. *Acción Estratégica en Economía y Sociedad Digital*

Gestionada por la Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y Agenda Digital, incluye un conjunto de medidas que persiguen el desarrollo, impulso y adopción de tecnologías digitales posibilitando la transformación de la economía y la sociedad hacia un entorno digital que se implanta con carácter transversal en todos los sectores de actividad empresarial. Se incluyen dentro de esta Acción aquellas medidas que, integradas en la «Agenda Digital para España» tengan como objeto impulsar la investigación y la innovación en el ámbito de las tecnologías de la información, las comunicaciones y la sociedad de la información.

5.4.1.7. *Incentivos fiscales*

Entre los instrumentos con los que cuenta la administración nacional para el impulso de la innovación empresarial se encuentran los incentivos fiscales y las bonificaciones [7]. Estos instrumentos son de carácter horizontal, y su aplicación es libre y general (no existe concurrencia competitiva ni un presupuesto límite predefinido). Están orientados a incentivar la iniciativa del sector privado, sin condicionar el ámbito innovador al que se orienta la empresa (no están limitados a determinadas áreas, programas o iniciativas).

- Los incentivos fiscales están basados en deducciones en el impuesto de sociedades por la realización de proyectos de investigación y desarrollo y/o innovación tecnológica. El sistema español de deducciones fiscales por I+D+I es de los más favorables del mundo, pudiendo alcanzar hasta un 42% de los gastos directos. La deducción generada pero no aplicada puede aplicarse en ejercicios posteriores, e incluso existe un supuesto de adelanto monetario de la deducción pendiente de aplicar.
- Las bonificaciones en la cuota empresarial de la seguridad social del personal investigador adscrito en exclusiva a actividades de I+D+I. Se trata de un incentivo no tributario, ligado a la contratación y al mantenimiento del empleo con dedicación exclusiva a actividades de I+D+I. De forma general, se establece una bonificación del 40% en las aportaciones empresariales a las cuotas de la Seguridad Social para el personal investigador.

También existe la opción «*patent box*», que consiste en la reducción en la base imponible por ingresos derivados de la cesión (o transmisión en algunos casos) de determinados activos intangibles. Se trata de un incentivo para fomentar la valorización y transferencia de conocimiento y tecnología de ciertos activos intangibles, como: derecho de uso o de explotación de patentes, dibujos o modelos, planos, fórmulas o procedimientos secretos, o derechos sobre informaciones relativas a experiencias industriales, comerciales o científicas (incluye el *know-how*). La legislación española privilegia la cesión de activos intangibles para que la tecnología no se quede en la empresa que la ha desarrollado, permitiendo que se declare sólo el 40% de las rentas para fomentar la cesión o transferencia de la tecnología a otra empresa.

5.4.2. Financiación europea

Horizonte 2020 (H2020) es el mayor programa de investigación e innovación de la UE, con casi 80.000 millones de euros de financiación disponible durante 7 años (2014-2020), además de la inversión privada que atraerá este dinero.

Las oportunidades de financiación en el marco de Horizonte 2020 se establecen en programas de trabajo plurianuales, que cubren la gran mayoría del apoyo disponible. Los programas de trabajo son preparados por la Comisión Europea dentro del marco proporcionado por la legislación de Horizonte 2020 y mediante un proceso de programación estratégica que integra los objetivos políticos de la UE en el establecimiento de prioridades.

Los actuales programas de trabajo Horizonte 2020 (2018-2020) recogen las siguientes temáticas y orientaciones estratégicas que pueden ser de interés en el

ámbito de los Espacios Inteligentes y las Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interior:

5.4.2.1. *Future and Emerging Technologies (FET)*

Su misión es crear en Europa un terreno fértil para colaboraciones multidisciplinares responsables y dinámicas sobre tecnologías futuras y para poner en marcha nuevos ecosistemas europeos de investigación e innovación a su alrededor.

Calls de especial interés:

- *Call - FET Open – Novel ideas for radically new technologies.* Tiene como objetivo establecer un liderazgo europeo en la exploración temprana de tecnologías futuras a través de la movilización de los investigadores más creativos y progresistas de Europa de todas las disciplinas para trabajar juntos y explorar lo que pueden convertirse en los paradigmas tecnológicos más importantes del futuro.
 - *FETOPEN-01-2018-2019-2020: FET-Open Challenging Current Thinking.* El desafío es sentar las bases para tecnologías futuras radicalmente nuevas de cualquier tipo a partir de colaboraciones visionarias interdisciplinarias que disuelvan los límites tradicionales entre las ciencias y las disciplinas, incluidas las ciencias sociales y las humanidades.
 - *FETOPEN-03-2018-2019-2020: FET Innovation Launchpad.* Su objetivo es convertir los resultados de los proyectos financiados por FET en genuinas innovaciones sociales o económicas.
- *Call - FET Proactive – Boosting emerging technologies.* Su objetivo es identificar el futuro y los paradigmas tecnológicos emergentes con mayor potencial para la economía y la sociedad de Europa. Para cada uno de ellos, busca establecer una base europea amplia y sólida en términos de conocimiento, bloques de construcción tecnológicos clave y comunidades interdisciplinarias.
 - *FETPROACT-01-2018: FET Proactive: emerging paradigms and communities.* Los proyectos propuestos deben demostrar un nuevo paradigma tecnológico dentro del alcance de uno de los siguientes subtemas: órganos artificiales, tejidos, células y estructuras subcelulares; tiempo; tecnologías vivas (nuevos artefactos biológicos, tecnológicos o híbridos funcionales); tecnologías socialmente interactivas; microenergía disruptiva y tecnologías de almacenamiento; topología.
- *Call - FET FLAGSHIPS – Tackling grand interdisciplinary science and technology challenges.* Su objetivo es hacer frente a los grandes desafíos cientí-

ficos y tecnológicos que se espera que den lugar a un impacto «cambiante» en la economía y la sociedad, beneficiando a los ciudadanos europeos y allanando el camino para el liderazgo tecnológico e industrial mundial.

- *FETFLAG-01-2018: Preparatory Actions for new FET Flagships*. Esta convocatoria tiene como objetivo lanzar acciones de coordinación y apoyo para preparar los principales FET. Las propuestas deberán contener una descripción de un potencial FET clave y explicar cómo va a madurar a lo largo de la acción preparatoria en un plan más completo. Las propuestas para los FET principales deben apuntar a una meta unificadora visionaria dentro de una de las siguientes tres áreas: TIC y sociedad comunicada; Salud y Ciencias de la Vida; o Energía, Medio Ambiente y Cambio Climático.
- *FETFLAG-03-2018: FET Flagship on Quantum Technologies*. El objetivo es abordar una combinación de desafíos de tecnología cuántica en una o más áreas (Comunicación cuántica, sistemas de computación cuántica, simulación cuántica, metrología cuántica y detección, ciencia fundamental), integrando diferentes aspectos como física, ingeniería, informática, teoría, algoritmos, software, fabricación, control, infraestructuras, etc.

5.4.2.2. Information and Communication Technologies

El objetivo general de la Estrategia de Digitalización de la Industria Europea es garantizar que cualquier empresa de cualquier sector de Europa, grande o pequeña y situada en cualquier lugar, pueda beneficiarse plenamente de las innovaciones digitales para mejorar sus productos, mejorar sus procesos y adaptar sus modelos de negocio a la transformación digital.

Este programa de trabajo está muy enfocado a las tecnologías 4.0, en las que podrían encajar perfectamente las Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interior.

Calls de especial interés:

- *ICT-04-2018: Photonics based manufacturing, access to photonics, data-com photonics and connected lighting*. Incluye acciones de innovación centradas en la integración de la infraestructura de iluminación con el Internet de las cosas y la demostración de nuevas funcionalidades, como la comunicación de luz visible para el posicionamiento en interiores y la comunicación de datos de banda ancha.

5.4.2.3. *Societal Challenge 1: Health, demographic change and well-being.*

El principal objetivo de este reto es mejorar la salud y el bienestar de todos.

Calls de especial interés:

- *SCI-DTH-03-2018: Adaptive smart working and living environments supporting active and healthy ageing.* Su objetivo es desarrollar y validar servicios y soluciones adaptables digitalmente que conduzcan a entornos de trabajo inteligentes para adultos mayores, apoyarlos para que permanezcan activamente involucrados en la vida profesional, ayudándoles a mantener y renovar sus habilidades relacionadas con el trabajo y la vida personal y apoyar estilos de vida activos y saludables independientes, teniendo en cuenta capacidades reducidas debido a los riesgos y condiciones de salud relacionados con la edad.
- *SCI-DTH-10-2019-2020: Digital health and care services.* Los desafíos clave que pueden abordarse son la capacitación del paciente, la autogestión, la seguridad del paciente, la participación del paciente, el manejo de enfermedades crónicas, el diagnóstico, la logística del cuidado en el hogar, la logística hospitalaria, las habilidades y la vida independiente.
- *DT-TDS-01-2019: Smart and healthy living at home.* El desafío es fomentar el despliegue a gran escala de soluciones digitales integradas (TIC avanzadas que van desde la biofotónica hasta la robótica, desde la inteligencia artificial hasta los grandes datos y desde la IoT a los wearables inteligentes) que aportarán una mejor calidad de vida a los ciudadanos, al tiempo que demuestran un aumento significativo de la eficiencia en materia de salud y atención en toda Europa.

5.4.2.4. *Societal Challenge 4: Smart, Green and Integrated Transport*

Su misión es promover una estrategia de innovación integrada que tenga como objetivo la descarbonización, la digitalización y el sistema de transporte centrado en el ser humano.

Calls de especial interés:

- *MG-4-5-2019: An inclusive digitally interconnected transport system meeting citizens' needs.* El objetivo es comprender mejor las necesidades y las actitudes de diversos usuarios, en particular los ciudadanos vulnerables a la

exclusión, como, por ejemplo, las personas mayores, los de bajos ingresos, los discapacitados o los migrantes, en relación con los requisitos establecidos por el sistema de transporte digitalizado.

5.4.2.4. Societal Challenge 7: Secure societies – Protecting freedom and security of Europe and its citizens

Su objetivo es el desarrollo de la tecnología de seguridad, el fortalecimiento de las capacidades de los profesionales y el aumento de la competitividad de la industria europea de seguridad.

Calls de especial interés:

- *SU-INFRA02-2019: Security for smart and safe cities, including for public spaces.* Incluye la simulación, detección y análisis de las amenazas y riesgos de seguridad adicionales creados mediante la interconexión de sistemas inteligentes (por ejemplo, Internet de las cosas (IoT), en particular los objetos IoT utilizados por los profesionales de seguridad) e infraestructuras inteligentes (por ejemplo, edificios inteligentes (gubernamentales), ferrocarriles inteligentes, puertos inteligentes, fábricas inteligentes, puentes inteligentes, hospitales inteligentes, grandes concentraciones de personas en infraestructuras inteligentes) dentro de una ciudad inteligente.

5.5. TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

La transferencia de tecnologías al mercado se realiza principalmente a través de la creación de spin-off y startups creadas específicamente para ello. Si bien usualmente se adopta el término «startup» como genérico para ambas, las diferencias son las siguientes:

- Una spin-off es una empresa que surge para explotar comercialmente la investigación realizada dentro de otra organización, es decir, es una derivación que viene de la extensión de un proyecto anterior. La universidad o empresa «madre» la apoya en sus primeros meses de vida. La idea es que luego se desvincule y pueda funcionar por sí misma, creando un modelo de negocio viable.
- Una startup es una empresa que surge para explotar una idea de negocio innovadora. En la mayoría de los casos estas ideas están relacionadas con la tecnología y destacan por centrar su negocio en la innovación de pro-

ductos o servicios orientados al cliente, llenando un posible vacío en el mercado.

En el 2008 empezaron a surgir las primeras aceleradoras en España con el objetivo de impulsar el desarrollo y el crecimiento de startups y desde entonces, el sector de las startups españolas no cesa en su crecimiento.

Según el informe Startup Ecosystem Overview' elaborado por la fundación Mobile World Capital Barcelona (MWCBC) [8], las empresas emergentes (startup) españolas levantaron 502 millones de euros de inversión en 2016. Barcelona lideró las inversiones, con un 56% del total capturado en España con 282 millones de euros, seguida de Madrid con 173 millones.

Este informe destaca que la inversión media por startup se ha triplicado en los últimos tres años, pasando de 200.000 euros en 2014 a 710.000 en 2016, lo que demuestra un «mayor grado de madurez» del sector.

Con estos números, España se sitúa como el cuarto destino a nivel europeo para el talento tecnológico y se consolida como el segundo país de la Unión Europea en atracción de emprendedores internacionales para lanzar nuevas compañías; en cuanto a ciudades, Barcelona y Madrid están en quinta y sexta posición, respectivamente, por detrás de Londres, Berlín, París y Amsterdam.

Respecto a sectores, el sector que acumula más startups en España es el comercio electrónico, con un 24% del total, siendo junto con el software empresarial los sectores con el crecimiento más rápido (4%/año de media):

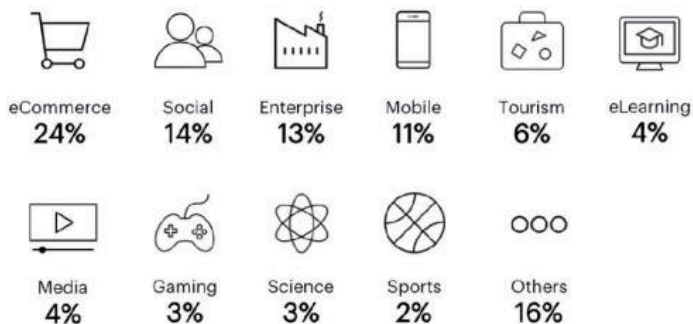


FIGURA 20: Distribución de startups en España por sectores

Según este informe, España cerró 2016 con 2.663 startup, un 1% más que el año anterior, y desde Startupxplore [9], la comunidad de inversión en startups que conecta a todos los actores del ecosistema startup creada por el Instituto Valen-

nombres de business angel reconocidos como Carlos Blanco, Yago Arbeloa o Jesús Monleón y aceleradoras como Conector o BBooster, entre otras.

- Por último, en la parte inferior de la tabla están los ‘exits’ españoles de los últimos años. Como son los casos de Privalia, La Nevera Roja, Idealista, El Tenedor, Infojobs o Rumbo.

Según datos de Startupxplore, actualmente en España hay más de 260 aceleradoras e incubadoras de origen español.

Las incubadoras proporcionan apoyo a los emprendedores desde el inicio del proyecto empresarial en forma de asesoría, capacitación e infraestructura administrativa (despachos, salas de reuniones, material de oficina, internet, atención telefónica, servicio de correspondencia, etc.).

A modo de resumen, a continuación, se muestran las aceleradoras más relevantes, las cuales pueden ser de interés para startups relacionadas con los Espacios Inteligentes y las Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interior:

BBOOSTER ACCELERATOR



Ámbito: Nacional e Internacional

Descripción: Fundada en 2010 por inversores y empresarios, Booster Ventures fundó la primera aceleradora española relacionada con nuevas ideas que basan su modelo de negocio en Internet y aplicaciones móviles. Actualmente cuenta con dos empresas de capital riesgo, a través de las cuales invierte en startups en diferentes etapas. Sinensis, cada año apoya entre 14 y 18 proyectos de nuevas tecnologías para saltar al mercado en cuatro meses como empresas viables, constituidas como sociedades y financiadas. Bbooster Dyrecto invierte hasta 400.000 € en empresas que se encuentran en etapas posteriores.

Preferencias de mercado: turismo, e-commerce, e-health, emprendimiento, aplicaciones web, TI-management, wifi, e-learning, móvil, calidad.

CONECTOR ACCELERATOR

STARTUP



Ámbito: Nacional
Barcelona

<http://conector.com>

Descripción: Aceleradora de startups de base tecnológica especializada en proyectos digitales listos para ser lanzados al mercado. Nacido a finales de 2013,

Conector selecciona una media de 10 proyectos para cada programa de aceleración, que reciben más de 95.000€ en servicios de colaboradores, un equipo de mentores que son emprendedores de éxito en Internet, soporte en servicios legales, cursos y sesiones de formación por parte de mentores y profesionales especializados, entrar en uno de los ecosistemas de emprendimiento más importantes de España, y la posibilidad de presentar su proyecto a inversores privados y empresas de venture capital al final del programa en el DemoDay.

Preferencias de mercado: telecomunicaciones, internet-tecnología, móvil, entretenimiento, media.

DEMIUM STARTUPS



Ámbito: Nacional
Valencia y Madrid

www.demiumstartups.com

Descripción: Incubadora de negocios en internet, anteriormente conocidos como Momentum. Crean las startups desde cero, cuando no existe la idea ni tampoco el equipo. Para ello, identifican oportunidades de negocio basadas en modelos de éxito en otros países y tendencias de mercado y las ponen a disposición de emprendedores motivados y con talento que quieran desarrollarlas siguiendo una metodología ágil propia con base Lean Startup. Participan en un 15% todas las sociedades creadas junto a los equipos emprendedores.

Preferencias de mercado: alimentación, e-commerce, hardware, Marketplace, web de consumidores, turismo, software b2b, marketing, videojuegos, entrenadores personales, SaaS, cuidado de la salud, fintech, redes sociales, internet.

Ámbito: Nacional
Madrid, Barcelona

www.seedrocket.com/

Descripción: Iniciativa privada para emprendedores con proyectos relacion con las Nuevas Tecnologías, a los que se proporciona formación, apoyo y financiación para acelerar al máximo el desarrollo de sus startups. Es la pri

Descripción: Apoyan a emprendedores para que puedan transformar sus proyectos en realidades empresariales. El Programa Lanzadera tiene una duración de 9 meses, durante los cuales muestran los fundamentos de un modelo de gestión contrastado, proporcionan espacio en sus instalaciones de Marina de Empresas, imparten formación en áreas fundamentales para el desarrollo de los proyectos, y proveen de asesoramiento, mentoring y financiación. El Programa Garaje es la incubadora de empresas que tiene Lanzadera para apoyar a emprendedores a des-

arrollar sus ideas y poder trabajar en crear una primera versión del producto, validar la propuesta de valor a través de primeras entrevistas con clientes y proveedores e implementar el modelo de negocio.

Preferencias de mercado: -

PLUG AND PLAY SPAIN



Ámbito: Nacional e Internacional
Valencia

Descripción: Aceleradora de negocios especializada en el crecimiento de nuevas empresas de tecnología. Fundada por Saeed Amidi y con sede en Sunnyvale, California, la red global de Plug and Play incluye más de 350 empresas tecnológicas, más de 180 inversionistas y una comunidad de universidades líderes y socios corporativos. Plug and Play España comenzó oficialmente las operaciones en 2012 con el objetivo de acelerar las empresas empresariales, aumentando su acceso a los recursos dinámicos de Silicon Valley y aumentando las posibilidades de éxito comercial. Co-invierte en el primer estadio de empresas de alta tecnología, acelera su crecimiento y les proporciona una ruta directa a Silicon Valley. También invierte en nuevas startups maduras y les ayuda a llegar al mercado internacional. **Preferencias de mercado:** fintech, internet, móvil, web de consumidores, aplicaciones móviles, e-commerce.

SEEDROCKET



Ámbito: Nacional
Madrid, Barcelona

www.seedrocket.com/

Descripción: Iniciativa privada para emprendedores con proyectos relacionados con las Nuevas Tecnologías, a los que se proporciona formación, apoyo y financiación, para acelerar al máximo el desarrollo de sus startups. Es la primera aceleradora que nació en España para startups TIC en fase inicial. Nace con el espíritu de ayudar a los emprendedores en las fases iniciales de los proyectos, y aportarles todo el know-how de profesionales, expertos y emprendedores que han pasado por su misma situación. Ofrece a las startups un espacio común de trabajo y conocimiento, potenciando las sinergias entre ellos y facilitando el traspaso de know-how entre los emprendedores.

Preferencias de mercado: finanzas, internet, aplicaciones web, tecnología, móvil, e-commerce, digital.

TOP SEEDS LAB



Ámbito: Nacional
Madrid,

www.topseedslab.com

Descripción: Proporcionan apoyo profesional de primer nivel y recursos para impulsar las startups, obteniendo la financiación necesaria por parte del inversor. A cambio del 10%-15% del patrimonio de la empresa, las startups reciben una financiación inicial de 50.000 €; mentorización vertical en 5 áreas (marketing, administración y finanzas, TIC, indicadores, desarrollo de negocio); mentorización corporativa proporcionada por miembros de la Junta Asesora, constituida por más de 40 de las mayores empresas de viajes y tecnología; asesoramiento para obtener financiación pública; presentación a la comunidad de inversión y viajes; redes y oportunidades de relaciones públicas, acceso a las ventajas proporcionadas por los socios de la aceleradora.

Preferencias de mercado: software, social-media, e-commerce, Marketplace, móvil.

WAYRA



Ámbito: Internacional
Madrid, Barcelona

<http://wayra.org>

Descripción: Wayra es una red de aceleradoras corporativas con presencia en Europa y Latinoamérica, que cuenta con 11 hubs ubicados en Brasil, Argentina, Colombia, Chile, Perú, México, Venezuela, España, UK y Alemania. En Wayra proporcionan financiación, mentoring, espacio de trabajo, conexión con la red global, networking entre emprendedores e inversores y la posibilidad de que los productos puedan llegar a clientes en todo el mundo. Cuenta con el apoyo financiero de Telefónica, y con la ayuda de una red global de mentores, inversores y socios comerciales. El programa de aceleración de Wayra España proporciona financiación de hasta 50 mil dólares, un espacio de trabajo en su academia de España, acceso a una red global de partners de negocio, mentores y expertos, y la oportunidad de trabajar con los negocios de Telefónica.

Preferencias de mercado: consumo colaborativo, TIC, web de consumidores, búsquedas.

VIAGALICIA



Ámbito: Regional
Nigrán, Pontevedra

<http://www.viagalicia.gal>

Descripción: Promovida conjuntamente por el Consorcio de la Zona Franca de Vigo y la Xunta de Galicia, dispone de un programa de alto rendimiento cuyo objetivo es la aceleración de proyectos innovadores, escalables e invertibles, a los que se acompaña en su validación y puesta en marcha bajo la supervisión de un equipo de expertos en metodología Lean Startup, ofreciendo servicios de formación, tutorización, mentoring, espacio de trabajo y aportaciones de capital semilla.

Cabe destacar que el Consorcio de la Zona Franca de Vigo, ha recibido el premio «*Best Public Administration for Startups Awards 2016*», por parte de la StartUp Europe Awards (SEUA) [10], iniciativa promovida por la Comisión Europea, con el apoyo del Presidente del Comité de las Regiones, varios miembros del Parlamento Europeo como Embajadores e implementada por la Fundación Finnova en colaboración con Startup Europe.

Preferencias de mercado: software, apps, realidad virtual, business intelligence, saas, ecommerce, big data, ingeniería, tic, cloud.

6. ECOSISTEMA EN ESPAÑA

A continuación, se muestra el listado de empresas más relevantes en el ámbito de las tecnologías de posicionamiento en interiores y de los espacios inteligentes en España. Se identifica su naturaleza, el sector en el que actúan y las tecnologías utilizadas.

Los sectores utilizados para realizar la clasificación de su actuación son los siguientes:



MYSOPHERA²



Ámbito: Nacional e Internacional

Descripción:

Empresa centrada en el sector de salud, en concreto está especializada en sistemas de localización en tiempo real (RTLS) en entornos hospitalarios. A través del uso de sistemas de IoT obtienen la información en tiempo real de la situación del paciente y de los procesos de sistemas de salud (localización y visibilidad) para las diferentes aplicaciones que desarrollan: *MyHospital*, *MyLocs* y *MyNursing*.

² En [1]-[9].

Sus productos están orientados a mejorar la eficiencia de gestión de los recursos hospitalarios, hogares y residencias de la tercera edad respectivamente. Entre las funcionalidades se encuentran la localización y trazabilidad de activos, identificación segura, información compartida, flujos, control y alertas.

Sus productos ya están en funcionamiento en nueve hospitales de España y en dos en Santiago de Chile. Actualmente, existen veintiuno en proceso de implantación. Además, también están inmersos en varios proyectos de innovación. Basándose en el uso de sistemas de localización en interiores se pueden destacar dos ya finalizados: Por un lado, el proyecto SPHERAbq que buscó desarrollar un sistema de información (planificación y actividad) para la gestión eficiente del bloque quirúrgico en un centro hospitalario. En su desarrollo se utilizaron pulseras con comunicación inalámbrica ZigBee. Y por otro, el programa MAGNET CDTI para el estudio de sistemas de localización posicional, para el sector médico, fabricados con materiales termoplásticos con propiedades de conductividad eléctrica. Permite obtener una nueva antena mejorada en circuito impreso y un nuevo *tag* o «etiqueta» anti-vandálico más pequeño y menos pesado, con posibilidad de utilización en neonatos.

Tecnologías: Radiofrecuencia (Bluetooth *Low Energy* (BLE))

Sectores de actuación:



SITUM³



Ámbito: Nacional e Internacional

Descripción:

Situm es una empresa especializada en el posicionamiento y navegación en interiores. Ha desarrollado un algoritmo para smartphones que utiliza las señales existentes en cualquier edificio (señales WiFi, Bluetooth, señales electromagnéticas o sensores inerciales) para obtener la ubicación del activo. Desarrollan y actúan como proveedores de su propia tecnología que permite no tener que utilizar ninguna infraestructura adicional.

El sistema, además de proporcionar la localización en interiores permite gestionar la cartografía del lugar. Permite crear espacios propios, subir mapas o marcar

³ [10]-[11].

puntos de interés. A partir de él se puede realizar el seguimiento en tiempo real de los usuarios, obtener mapas de calor, así como datos estadísticos de los que se pueden sacar informes. Es un sistema flexible que permite integrarse en otras aplicaciones además de generar nuevas a partir de él.

Actualmente tiene su tecnología instalada en más de 1600 edificios en todo el mundo, entre los que se encuentran hospitales, centros médicos, centros comerciales y sedes corporativas. Se ha utilizado en eventos y exhibiciones y tiene aplicación en aeropuertos, museos, estaciones de tren y entornos subterráneos.

Sectores de actuación:



Nebusens⁴



Ámbito: Nacional e Internacional

Web:

<http://www.nebusens.com/es/>

Oficinas Centrales - Salamanca, España. América -Norte, Cent Sur

Descripción:

Nebusens es una empresa, vinculada a la universidad, que se dedica al desarrollo y despliegue de soluciones y productos tecnológicos relacionados con redes inalámbricas de sensores y sistemas de localización en tiempo real. También proporcionan asesoramiento tecnológico y cursos relacionados con ellos. Sus principales productos son dos:

- *n-core*: plataforma que proporciona tanto la infraestructura, a través de dispositivos de radiofrecuencia (IEEE 802.15.4/ZigBee™), como el software (API) para obtener rápidamente sistemas de datos en tiempo real (desde monitorización y recogida de datos hasta de identificación y localización).
- *polaris*: sistema de localización basado en un conjunto de algoritmos innovadores que explota al máximo la plataforma n-core

Han implementado estas soluciones en diferentes escenarios de diferentes sectores, entre ellos se encuentran hospitales, residencias, viñas, puertos marítimos, centros comerciales, estadios e instalaciones industriales.

⁴ [12]-[13].

Tecnologías: Radiofrecuencia (ZigBee)

Sectores de actuación:



Zebra⁵



Ámbito: Nacional e Internacional
Madrid, España;
Europa, Norteamérica, Asia, Oriente medio, África y Pacífico

Web: <https://www.zebra.com/>

Descripción:

Zebra es una empresa globalmente conocida, especializada en virtualizar los activos, personas o las transacciones de las organizaciones. Actualmente tiene un gran porfolio de soluciones de marcado e impresión, que incluye tecnologías RFID y de localización en tiempo real, que permiten optimizar decisiones. Cada una de las soluciones forma una plataforma integrada que consta de *Tags*, sensores, inductores y aplicaciones software. Cada *tag* contiene un identificador único que los usuarios pueden asociar a un activo, pieza o estación de trabajo específica.

Las soluciones de localización de Zebra son: *Dart UWB*, *Wherenet*, *RTLS Software* y *MPACT*. Son soluciones aplicables a diferentes sectores y escenarios, en función del resultado que se busque (Logística, Fabricación (manufactura), Industria, gestión de almacén, transporte, marketing, ventas, retail y/o deportes). Algunos de las soluciones implantadas son: Fuerzas aéreas de Estados Unidos (Wherenet), Yusen Logistics (RTLS software), Tobyhanna Army Depot (Wherenet), Washington Hospital Center (Dart UWB), Equipo de fútbol femenino de Shanghai (Zebra MotionWorks sports solution), voestalpine (Zebra RTL, sistema UWB y RTL software) y NFL (Dart UWB más RTL Software).

⁵ [14]-[21].

Sectores de actuación:**Estimote**⁶

Ámbito: Nacional e Internacional **Web:** <http://estimote.com/>
 Nueva York, Estados Unidos y Polonia

Descripción:

Estimote es una empresa que se dedica a desarrollar soluciones de localización con sus propios dispositivos y software para conseguir espacios más interactivos e inteligentes. De esta forma, actualmente cuentan con los siguientes productos:

- *Beacons* o «balizas» de proximidad (computación con batería y Bluetooth): Los móviles cercanos pueden desencadenar acciones basadas en su proximidad a ellos.
- *Beacons* de localización (más avanzados, de mayor duración y con mayor sensorica): Están diseñados específicamente para aplicaciones de localización en interiores.
- Pegatinas de contexto (los más pequeños en el mercado): pueden estar sobre cualquier objeto e informan a los móviles cercanos sobre su proximidad, movimiento y temperatura.
- *Beacons* de video de espejo (los primeros en el mundo): Desencadena un contexto personalizado al conectarse a una televisión o monitor.
- Cloud & API: Los clientes no solo pueden configurar o gestionar remotamente sus dispositivos, sino que también pueden acceder a todos los datos a través de una aplicación RESTful.
- SDKs móviles: Consiste en un código sofisticado para escanear, configurar y/o asegurar los *beacons*. Es una parte esencial de cualquier desarrollo.

A través de esta tecnología desarrollan y permiten que se construyan aplicaciones para diferentes soluciones, presentes en 60000 clientes. Entre ellos se encuentran los siguientes casos: BMW, Qatar Airlines, FC Barcelona, Tesco Lotus, Harrods, Porsche y el museo Guggenheim (Nueva York).

⁶ [22]-[24].

Tecnologías: Radiofrecuencia (BLE y UWB)

Sectores de actuación:



Ubisense⁷



Ámbito: Nacional e Internacional **Web:** <https://ubisense.net/en>
 Europa (Reino Unido, Francia y Alemania), Norteamérica y Asia
 Socio español (integrador del sistema): Atlas Copo

Descripción:

Ubisense es una empresa con diferentes productos que integran la localización en las operaciones diarias buscando facilitar la toma de decisiones de las personas dotándolas de la visualización de los procesos.

Entre sus aplicaciones se encuentra la posibilidad de administrar e inyectar datos de localización de cualquier fuente (entorno IoT) al mundo virtual a través de su solución *Smart Space Platform*. También permite desarrollar soluciones geoespaciales (MyWorld) sencillas, inteligentes y rápidas que mejoran las operaciones y la eficiencia de ingeniería para gasolineras, empresas de servicios públicos, de telecomunicaciones, y/o de transporte. Ejemplo de ello es la implantación en Zayo Group, un operador de cable de USA o en Central Hudson, así como las aplicaciones de Gestión de la vegetación y análisis de interrupciones planificadas. Por otro lado, sus productos también permiten el modelado y el análisis espacial en tiempo real (*SmartFactory*) así como desenvolver un sistema de localización de automóviles automático más eficiente y optimizado. Ejemplos de estas aplicaciones son las implantaciones en BMW – Regensburg o en Metro Transit, Minneapolis/St Paul; Le Réseau de transport de Longueuil (RTL).

Por último, Ubisense cuenta con sistemas de sensores innovadores basados en RTLS y RFID que proporcionan detección en tiempo real de activos etiquetados (Angleid) y que además proporcionan datos de las interacciones entre las personas y objetos (Dimension4). Ejemplo de ellos son las aplicaciones de Monitorización de puertas de muelle y Gestión de elementos inalámbricos y la implementación en BMW - Regensburg.

⁷ [25]-[30].

Sectores de actuación:Decawave⁸

Ámbito: Nacional e Internacional **Web:** <https://www.decawave.com/>
 Estados Unidos, China, Irlanda y Corea del Sur
 Socio español (utiliza los dispositivos): Tracktio

Descripción:

DecaWave desarrolla circuitos integrados para la localización en interiores y la comunicación basada en su plataforma de UWB. Su tecnología permite la medición del tiempo y las comunicaciones de datos simultáneamente, permitiendo aplicaciones en una gama amplia de mercados.

- DecaWave ScenSor DW1000: Transceptor inalámbrico de chip único compatible con el estándar IEEE802.15.4-2011.
- DecaWave ScenSor DWM1000 Module: es un módulo basado en el DW1000. Está optimizado para una localización de precisión en interiores y comunicaciones de datos en tiempo real (RTLS) y redes de sensores inalámbricos (WSN).
- DecaWave ScenSor EVK1000 Evaluation Kit: está compuesto de dos tarjetas EVB1000 cada una preconfigurada para ejecutar una aplicación que controla el intercambio de mensajes del DW1000, calcula el tiempo de transferencia y estima la distancia entre ambas tarjetas.
- DecaWave ScenSor TREK1000 Evaluation kit: consiste en cuatro unidades que permite a los usuarios evaluar el rendimiento del DW1000 en casos de uso de aplicaciones RTLS.

Estos sistemas tienen aplicación en agricultura, automoción, ePOS o «punto de venta electrónicos» y minoristas, fabricación automática, salud, seguridad, edificios inteligentes, aplicaciones móviles, y logística.

⁸ [31]-[32].



Sonitor⁹



Ámbito: Nacional e Internacional **Web:** <http://www.sonitor.com>
 Estados Unidos y Noruega
 Socio español (RFID): Saident soluciones

Descripción:

Sonitor Technologies es una empresa proveedor de soluciones de localización en tiempo real. Es la primera y única empresa que utiliza la tecnología de ultrasonido (patentada) como tecnología primaria para sistemas de posicionamiento en interiores.

Su ámbito de aplicación es en la sanidad: hospitales, clínicas, centros de cirugía ambulatoria o complejos residenciales. En concreto, proporcionan aplicaciones para la gestión de: activos, flujo de pacientes, flujo de trabajo, control de infecciones, enfermeras, monitorización ambiental, el personal y la seguridad del paciente. Entre sus casos de éxito se encuentra el despliegue en NuVista Living's Wellington Green Campus.

Tecnologías: Radiofrecuencia(WiFi), Infrarrojo (LF) y Acústico (ultrasonidos de alta definición)

Sectores de actuación:



Bespoon¹⁰



Ámbito: Internacional **Web:** <http://bespoon.com/>
 Le Bourget du Lac, Francia

⁹ [33]-[34].

¹⁰ [35].

7. CONCLUSIONES

No es ajeno a nadie, y menos a las personas que trabajan o investigan en el ámbito tecnológico, lo vertiginoso y cambiante que resulta tanto el desarrollo como el consumo de soluciones aportadas por la tecnología. Cuando se desarrolló el sistema de posicionamiento global, posiblemente se tuvieron en mente algunos de los usos y aplicaciones a que iba a facilitar, pero sin duda quedaba lejos la variedad de aplicaciones e ideas que iban a surgir de su réplica, con tecnologías diferentes (obligadas por las restricciones), en sistemas de localización en interiores. Aún hoy, que creemos conocer la gran cantidad de aplicaciones y propuestas que pueden surgir y que se pueden desarrollar, no somos conscientes ni de las derivas a que llevará la implantación sistematizada de estos sistemas ni de aquello que se ocurrirá a la imaginación de quienes en un futuro próximo trabajen en estas líneas.

Por tanto, no nos queda sino continuar ampliando el abanico de desarrollos, combinaciones, alternativas e ideas, de manera que puedan seguir aflorando nuevos servicios y apoyos para posibilitar una vida más cómoda, aún sin saber que en un breve plazo de tiempo alguna nueva idea nos puede sobrepasar y que cambiará el modo de desarrollo de estos sistemas, las tecnologías e incluso su aplicación. Ya se está viendo hoy con la reutilización de las luminarias led de los edificios para diferentes funciones, y que, aunque estuviera en la mente de algunos desde hace tiempo no se imaginaba, el despegue de la utilización de las señales ópticas de forma masiva.

El Libro Blanco sobre Espacios Inteligentes y Tecnologías de Posicionamiento y Navegación en Entornos de Interiores ha intentado presentar un estudio serio y riguroso de las actuales líneas de investigación en el campo del posicionamiento en interiores. Con la colaboración de los miembros de la Red Nacional de Posicionamiento y Navegación en Interiores y las investigaciones de la comunidad científica se ha pretendido crear una imagen realista del estado de la técnica, así como responder a las preguntas básicas que se debe plantear cualquier sociedad que quiera avanzar, con independencia y sin pensar que posiblemente cualquier nuevo descubrimiento o propuesta nos sobrepase, porque seguro se apoyan lo

desarrollado previamente. La comunidad que trabaja en posicionamiento en interiores en España no es excesivamente numerosa, pero, sin embargo, ha sido organizada, muy activa y está bien situada, tanto a nivel nacional como internacional, con numerosos contactos empresariales e instituciones. Es una comunidad que mantiene un equilibrio entre la investigación básica, que se traduce en un alto nivel de publicaciones internacionales y patentes, y una investigación aplicada que genera numerosos proyectos nacionales e internacionales; y posee un alto potencial de transferencia de tecnología al mundo empresarial.

El posicionamiento de las líneas prioritarias a nivel nacional que incluyera un programa de posicionamiento en interiores y exteriores propiciaría, sin duda, unos retornos en términos de calidad de vida y económicos, etc., y ayudaría a situarlo en la vanguardia tecnológica de nuestro país.

Por parte de los investigadores y organismos de la investigación pública y privada deben entender que disponer de una tecnología propia en posicionamiento es importante para nuestra sociedad y economía. Esto permitiría investigar e implantar aplicaciones para servicios y/o negocios. Pero, además, es importante crear y adaptar mecanismos para su potenciación, focalizando y racionalizando la inversión a largo plazo.

8. REFERENCIAS

1. INTRODUCCIÓN

1. D. Miorandi, E. Jaupaj, C. Caprini, A. Zito, R. Bartolacelli, L. Carreras, A. Anagnostopoulos, A. Trypitsidis, M. Bonazountas, G. Conti, S. Pier, N. Dorigatti, T. Feng, J. Jesurun, and T. Arentze, «GuideMe: an outdoor/indoor navigation app based on the i-locate open toolkit» in Conference: Geomatics Workbooks n. 12 - «FOSS4G Europe Como 2015», At Como, Italy, Volume: 12.
2. S. Pier, N. Dorigatti, and G. Conti, «i-locate - Indoor/outdoor LOCATION and Asset management Through open gEoda-ta» in Conference: Geomatics Workbooks n. 12 - «FOSS4G Europe Como 2015», At Como, Italy, Volume: 12, 2015.
3. E. De Marinis, M. Uliana, F. Pucci, and F. Andreucci, «Contextual processing for pedestrian tracking in GPS-denied environments» in Conference: Geomatics Workbooks n. 12 - «FOSS4G Europe Como 2015», At Como, Italy, Volume: 12, (Como), 2015.
4. H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, «Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems» IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 37, pp. 1067-1080, nov 2007.

2. IMPACTO SOCIOECONÓMICO

1. http://geta.aalto.fi/en/courses/bringing_navigation_indoors.pdf
2. Informe Global de 2016 de IndoorAtlas: <http://www.indooratlas.com/wp-content/uploads/2016/09/A-2016-Global-Research-Report-On-The-Indoor-Positioning-Market.pdf>
3. <https://singular.team/aplicaciones-y-soluciones-para-la-geolocalizacion-en-interiores/>
4. [https://web.wpi.edu/Images/CMS/ECE/WPI-Keynote-Ayman_Naguib\(1\).pdf](https://web.wpi.edu/Images/CMS/ECE/WPI-Keynote-Ayman_Naguib(1).pdf)
5. <http://360.here.com/2012/07/16/nokia-leads-the-way-with-indoor-mapping/>

6. <http://www. Kearneyevents.com/indoor-location-technology-market-emerging-trends/>
7. <https://www.1776.vc/insights/these-4-trends-in-location-technology-will-change-how-we-navigate/>
8. <http://implicatum.com/?p=1039>
9. Ramon F. Brena, Juan Pablo García-Vázquez, Carlos E. Galván-Tejada, David Muñoz-Rodríguez, Cesar Vargas-Rosales, and James Fangmeyer Jr., (2017). Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey (<https://doi.org/10.1155/2017/2630413>).
10. <http://www.sensewhere.com/types-indoor-positioning-approaches/>
11. http://www.fundacionorange.es/wp-content/uploads/2016/07/eE_La_transformacion_digital_del_sector_retail.pdf
12. <http://aunclidelastic.blogthinkbig.com/principales-aplicaciones-de-las-soluciones-de-localizacion-en-interiores/>
13. <http://america.efefuturo.com/noticia/los-sensores-dominaran-el-mundo-tecnologico-en-2020-segun-experto-del-sector/>
14. <https://www.uoc.edu/portal/es/news/actualitat/2016/099-beacons.html>
15. https://cdn2.hubspot.net/hubfs/556697/Industry_report_ll_2.pdf
16. <http://www.cintas.com/ready/the-workplace-today/beacon-technology-a-growing-retail-trend/>
17. <http://www.pointrlabs.com/technology/press-release-harrods-launches-new-navigation-tool-for-knightsbridge-store-just-in-time-for-christmas/>
18. <https://www.esmartcity.es/comunicaciones/i-congreso-ciudades-inteligentes-localizacion-indoor>
19. <http://www.lighting.philips.com.mx/compania/newsroom/comunicados-de-prensa/2017/20170424-los-clientes-de-mediemarkt-encuentran-productos-mas-rapido-con-el-posicionamiento-interior-de-philips-iluminacion>
20. <http://www.lighting.philips.com/main/cases/cases/food-and-large-retailers/carrefour-lille>
21. <http://www.lighting.philips.com/main/cases/cases/food-and-large-retailers/aswaaq>
22. http://www.fundacionorange.es/wp-content/uploads/2017/03/eE_Buenas_practicas_transformacion_digital_transporte.pdf
23. <http://www.skoda-auto.com/en/news/2013-11-25-logistics>
24. <http://www.handling-storage.com/sil-2017—proyectos-innovadores-aplicados-a-la-logistica-en-el-sil-2017.html>
25. <http://www.proxama.com/news/exterion-media-buses-proxama-technology/>
26. <https://navibeas.com/introduction-indoor-navigation-systems/>
27. <https://www.infsoft.com/company/media/articleid/104/indoor-navigation-at-zuerich-main-train-station>

28. <https://www.infsoft.com/industries/railway/features>
29. <http://oliverobotics.com/>
30. Maged N Kamel Boulos, Geoff Berry (2012). Real-time locating systems (RTLS) in healthcare: a condensed primer (<https://dx.doi.org/10.1186%2F1476-072X-11-25>).
31. <https://www.infsoft.com/industries/healthcare/success-story>
32. SIEMENS (2016). Indoor Positioning Systems (IPS) Enhancing Safety and Security in Buildings (<http://bit.ly/2uy5lBO>)
33. <http://www.guardly.com/solutions/industry/public-safety.html>
34. <http://futurelab.assaabloy.com/en/tracking-for-security-and-safety/>
35. <http://www.ibeaontrends.com/industrial-companies-beacons/>
36. <https://www.slideshare.net/DavidGyori/infuse-indoor-positioning-systems-for-banks>
37. <https://blog.beaconstac.com/2016/05/best-of-beacons-this-week-citibank-commits-to-beacons-and-more/>
38. <https://letstalkpayments.com/7-banks-trialing-beacons-for-in-branch-engagement/>
39. <https://blog.beaconstac.com/2014/08/how-beacons-can-transform-event-management-and-trade-shows/>
40. <http://www.sinergialabs.com/beacons-en-aeropuertos-espectaculos-deportivos-y-ferias-de-automoviles/>
41. <https://locatify.com/customers-and-products/customers/>
42. <https://indoo.rs/industries/events/>
43. <http://www.sherpa-solutions.com/index.html>
44. <http://expo-navigation.de/en/>
45. iNDEXTb Computer Centre (2017). Implementation of Mobile app based Indoor Positioning System using Bluetooth Low Energy Technology at Mahatma Mandir Convention Centre, Gandhinagar(<http://bit.ly/2vbECyH>).
46. <https://blog.beaconstac.com/2016/03/10-event-planners-that-are-using-beacons-to-engage-attendees-in-creative-ways/>
47. <https://www.goodrebels.com/es/la-geosocializacion-geolocalizacion-y-redes-sociales-i>
48. <https://hipertextual.com/archivo/2008/07/redes-sociales-localizacion/>
49. <http://www.sensewhere.com/solutions/indoor-positioning-system/>
50. <https://blooloo.com/features/9-trends-to-watch-in-the-visitor-attractions-industry/>
51. <http://www.sewio.net/rtls-in-sport/>
52. <http://www.catapultsports.com/es/clientela/estudios-de-caso/>
53. <https://www.sporttechie.com/new-indoor-location-technology-poised-to-transform-athlete-training/>

54. http://www.bocom.com/case06_en.html
55. <https://blog.beaconstac.com/2015/11/4-ways-beacons-can-augment-fan-experience-at-sports-events/>
56. <http://www.businessinsider.com/beacons-are-thriving-in-sports-arenas-2016-8>
57. <https://kontakt.io/blog/beacons-make-stadiums-interactive/>
58. The Center for the Future of Museums (CFM) (2008). Museums & Society 2034: Trends and potential futures (<http://xurl.es/nb8ws>)
59. Bess Benhamou & Ariana Jarvis, Thinkwell's 2014 Guest Experience Trend Report. Museums & the Digital Revolution, Consumer Trends in Mobile and Interactive Technology Integration in Museums (<http://bit.ly/2uhTGMn>).
60. Estefanía Aguilar-Moreno, Raúl Montoliu-Colás y Joaquín Torres-Sospedra, (2016). Tecnologías de posicionamiento en interiores al servicio de una biblioteca universitaria: hacia la smart library, Indoor positioning technologies for academic libraries: towards the smart library (<http://dx.doi.org/10.3145/epi.2016.mar.17>).
61. <https://www.nfcworld.com/2014/07/15/330395/japan-airlines-combines-beacons-smartwatches-improve-customer-service-airports/>
62. <http://www.todrone.com/empresa-testea-dron-inventarios-almacenes/>
63. <http://infoautonomos.economista.es/ideas-de-negocio/negocios-con-futuro/>
64. Informe de Ericsson: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2017/ericsson-mobility-report-june-2017.pdf>
65. <https://sngular.team/geolocalizacion-en-interiores-usando-dispositivos-moviles/>
66. https://motherboard.vice.com/en_us/article/53d3da/guoguo-is-a-new-indoor-smart-phone-localization-acoustic-gps
67. Universidad Politécnica de Madrid (2014). Crowdsourcing de información geográfica: proyectos OpenSource y desarrollo de una plataforma móvil para mantenimiento de infraestructura urbana (http://oa.upm.es/32966/1/TESIS_MASTER_JOSE_PABLO_GOMEZ_BARRON_SIERRA.pdf)
68. <https://www.hindawi.com/journals/js/2017/2630413/>
69. Comunicado de ABI Research: <https://www.abiresearch.com/press/ble-beacon-shipments-break-400-million-in-2020/>
70. <https://www.abiresearch.com/market-research/product/1021650-ble-tags-the-location-of-things-lot/>
71. Estudio de Localytics: <http://info.localytics.com/blog/52-percent-of-users-enable-push-messaging>
72. <https://blog.beaconstac.com/2016/08/top-ibeacon-trends-for-2016/>

73. <http://guardian.ng/business-services/airports-spend-8-7b-on-information-technology-in-2015/>
74. <https://www.crowdcompass.com/pdf/momentum-of-mobile-apps.pdf>
75. <https://blog.beaconstac.com/2016/02/creating-a-beacon-campaign-for-your-library-using-beaconstac/>
76. El potencial del IoT por Mckinsey: <http://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world> (<https://goo.gl/ZPNqqQ>)
77. <https://www.captchconsulting.com/blogs/indoor-positioning-underground-improving-the-customer-experience-in-a-complex-environment>
78. Naoya AOTO (2017). High-accuracy Indoor Positioning Project-Providing assistance for everyone to avoid stress to travel (http://cdnsite.eu-japan.eu/sites/default/files/imce/04_mlit.pdf)
79. <https://9to5google.com/2019/02/11/google-maps-ar-navigation-vps/>
<https://techcrunch.com/2017/05/17/google-has-an-indoor-positioning-tech-in-the-works-called-vps/>
80. <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/visible-light-communication-market2>

3. TECNOLOGÍAS DE POSICIONAMIENTO EN ENTORNOS DE INTERIOR

1. Z. Mautz, Rainer (ETH, «Indoor positioning technologies» ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Institute of Geodesy and Photogrammetry Subject, 2012.
2. R. F. Brena, J. P. García-Vázquez, C. E. Galván-Tejada, D. Muñoz-Rodríguez, C. Vargas-Rosales, and J. Fangmeyer, «Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey» *J. Sensors*, vol. 2017, pp. 1–21, 2017.
3. M. Martínez-Rey, F. Espinosa, and A. Gardel, «Analysis of the optimal sampling rate for state estimation in sensor networks with delays» *ISA Trans.*, vol. 68, pp. 293–301, May 2017.
4. M. Martínez Rey, «Contributions to event-based state estimation for intelligent spaces» Universidad de Alcalá, 2017.
5. Santos, M. Martínez-Rey, F. Espinosa, A. Gardel and E. Santiso, «Event-Based Sensing and Control for Remote Robot Guidance: An Experimental Case» *Sensors*, vol. 17, no. 9, p. 2034, Sep. 2017.
6. H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, «Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems» *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C (Applications Rev.)*, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, Nov. 2007.

7. Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, «A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks» *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13–32, 2009.
8. H. Koyuncu and S. Hua Yang, «A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems» *IJCSNS Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.*, vol. 10, no. 5, p. 121, 2010.
9. R. Mautz, «Indoor positioning technologies» ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2012.
10. D. P. Pérez, «Localización de Robots Móviles en Espacios Inteligentes utilizando Cámaras Externas y Marcas Naturales» Universidad de Alcalá, 2008.
11. C. L. Gutiérrez, «Segmentación y posicionamiento 3D de robots móviles en espacios inteligentes mediante redes de cámaras fijas» Universidad de Alcalá, 2010.
12. W. A. Hoff, K. Nguyen, and T. Lyon, «Computer-vision-based registration techniques for augmented reality» in *Intelligent Robots and Computer Vision XV: Algorithms, Techniques, Active Vision, and Materials Handling*, 1996, vol. 2904, pp. 538–549.
13. A. State, G. Hirota, D. T. Chen, W. F. Garrett, and M. A. Livingston, «Superior augmented reality registration by integrating landmark tracking and magnetic tracking» in *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '96*, 1996, pp. 429–438.
14. Youngkwan Cho and U. Neumann, «Multi-ring color fiducial systems for scalable fiducial tracking augmented reality» in *Proceedings. IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium (Cat. No.98CB36180)*, p. 212.
15. Y. Guo and X. Xu, «Color Landmark Design for Mobile Robot Localization» in *The Proceedings of the Multiconference on «Computational Engineering in Systems Applications» 2006*, pp. 1868–1874.
16. S. Lee and J.-B. Song, «Mobile robot localization using infrared light reflecting landmarks» in *2007 International Conference on Control, Automation and Systems*, 2007, pp. 674–677.
17. F. Wen, K. Yuan, W. Zou, X. Chai, and R. Zheng, «Visual navigation of an indoor mobile robot based on a novel artificial landmark system» in *2009 International Conference on Mechatronics and Automation*, 2009, pp. 3775–3780.
18. J. C. G. Garcia, M. M. Romera, M. M. Quintas, and J. U. Urena, «Positioning and localization system for autonomous wheelchairs» in *IEEE 2002*

- 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, 2002, vol. 2, pp. 1555–1560.
19. J.-H. Lee, N. Ando, T. Yakushi, K. Nakajima, T. Kagoshima, and H. Hashimoto, «Adaptive guidance for mobile robots in intelligent infrastructure» in Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180), 2001, vol. 1, pp. 90–95.
 20. T. Huabin, W. Lei, and S. Zengqi, «Accurate and stable vision in robot soccer» in ICARCV 2004 8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004., 2004, vol. 3, pp. 2314–2319.
 21. F. Wen, Z. Qu, C. Wang, and B. Hu, «Precise localization of indoor mobile robots in FMS based on distributed vision» in 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2008, pp. 2412–2416.
 22. X. Liang et al., «Multiple robots localization using large planar camera array for automated guided vehicle system» in 2008 International Conference on Information and Automation, 2008, pp. 984–990.
 23. I. Fernández et al., «Guidance of a mobile robot using an array of static cameras located in the environment» *Auton. Robots*, vol. 23, no. 4, pp. 305–324, 2007.
 24. D. G. Lowe, «Robust model-based motion tracking through the integration of search and estimation» *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 8, no. 2, pp. 113–122, 1992.
 25. D. Koller, K. Daniilidis, and H.-H. Nagel, «Model-based object tracking in monocular image sequences of road traffic scenes» *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 10, no. 3, pp. 257–281, 1993.
 26. B. K. P. Horn and B. G. Schunck, «Determining optical flow» *Artif. Intell.*, vol. 17, no. 1–3, pp. 185–203, 1981.
 27. B. D. Lucas, T. Kanade, and others, «An iterative image registration technique with an application to stereo vision» 1981.
 28. M. Haag and H.-H. Nagel, «Combination of edge element and optical flow estimates for 3D-model-based vehicle tracking in traffic image sequences» *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 35, no. 3, pp. 295–319, 1999.
 29. S. Baker and I. Matthews, «Lucas-Kanade 20 Years On: A Unifying Framework» *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 56, no. 3, pp. 221–255, Feb. 2004.
 30. M. La Cascia, S. Sclaroff, and V. Athitsos, «Fast, reliable head tracking under varying illumination: an approach based on registration of texture-mapped 3D models» *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 4, pp. 322–336, Apr. 2000.
 31. F. Jurie and M. Dhome, «A simple and efficient template matching algorithm» in Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001, 2001, vol. 2, pp. 544–549.

32. F. Jurie and M. Dhome, «Hyperplane approximation for template matching» *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 7, pp. 996–1000, 2002.
33. S. Ravela, B. Draper, J. Lim, and R. Weiss, «Adaptive tracking and model registration across distinct aspects» in *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995*, vol. 1, pp. 174–180.
34. M. Uenohara and T. Kanade, «Vision-based object registration for real-time image overlay» *Comput. Biol. Med.*, vol. 25, no. 2, pp. 249–260, 1995.
35. Z. Zhang, R. Deriche, O. Faugeras, and Q. T. Luong, «A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry» *Artif. Intell.*, vol. 78, no. 1–2, pp. 87–119, 1995.
36. L. Vacchetti, V. Lepetit, and P. Fua, «Stable real-time 3D tracking using online and offline information» *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 26, no. 10, pp. 1385–1391, Oct. 2004.
37. D. F. Dementhon and L. S. Davis, «Model-based object pose in 25 lines of code» *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 15, no. 1–2, pp. 123–141, 1995.
38. S. Christy and R. Horaud, «Iterative Pose Computation from Line Correspondences» *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 73, no. 1, pp. 137–144, Jan. 1999.
39. A. J. Davidson and D. W. Murray, «Simultaneous localization and map-building using active vision» *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 7, pp. 865–880, 2002.
40. A. J. Davidson, «Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera» *ICCV3*, vol. 3, pp. 1403–1410, 2003.
41. S. Se, D. Lowe, and J. Little, «Vision-based mobile robot localization and mapping using scale-invariant features» in *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164)*, 2001, vol. 2, pp. 2051–2058.
42. A. J. Davidson, «SLAM with a single camera» in *Workshop on Concurrent Mapping and Localization for Autonomous Mobile Robots*, in conjunction with ICRA, 2002.
43. D. Pizarro, M. Mazo, E. Santiso, M. Marron, and I. Fernandez, «Localization and geometric reconstruction of mobile robots using a camera ring» *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 8, pp. 2396–2409, 2009.
44. S. K. Nayar, S. A. Nene, and H. Murase, «Real-time 100 object recognition system» in *Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation, 1996*, vol. 3, pp. 2321–2325.
45. P. Viola and M. Jones, «Rapid object detection using a boosted cascade of simple features» 2001.

46. A. Baumberg, «Reliable feature matching across widely separated views» in Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No.PR00662), vol. 1, pp. 774–781.
47. T. Tuytelaars and L. van Gool, «Wide Baseline Stereo Matching based on Local, Affinely Invariant Regions» in Proceedings of the British Machine Vision Conference 2000, 2000, pp. 38.1-38.14.
48. K. Mikolajczyk and C. Schmid, «An affine invariant interest point detector» in European conference on computer vision, 2002, pp. 128–142.
49. F. Schaffalitzky and A. Zisserman, «Multi-view matching for unordered image sets, or ‘How do I organize my holiday snaps?’» in European conference on computer vision, 2002, pp. 414–431.
50. D. G. Lowe and others, «Object recognition from local scale-invariant features» in iccv, 1999, vol. 99, no. 2, pp. 1150–1157.
51. A. Stein and M. Hebert, «Incorporating Background Invariance into Feature-Based Object Recognition» in 2005 Seventh IEEE Workshops on Applications of Computer Vision (WACV/MOTION’05) - Volume 1, 2005, pp. 37–44.
52. I. Skrypnik and D. G. Lowe, «Scene modelling, recognition and tracking with invariant image features» in Third IEEE and ACM international symposium on mixed and augmented reality, 2004, pp. 110–119.
53. F. Remondino and D. Stoppa, TOF range-imaging cameras, vol. 68121. Springer, 2013.
54. M. Hansard, S. Lee, O. Choi, and R. P. Horaud, Time-of-flight cameras: principles, methods and applications. Springer Science & Business Media, 2012.
55. «mesa-imaging.ch» [Online]. Available: <http://www.mesa-imaging.ch/>. [Accessed: 19-May-2019].
56. «Powerful 3D depth sensing for every product.» [Online]. Available: <https://www.pmdtec.com/mwc/>. [Accessed: 19-May-2019].
57. «Basler Time-of-Flight tof640-20gm_850nm - 3D Camera.» [Online]. Available: https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/3d-cameras/time-of-flight-camera/tof640-20gm_850nm/. [Accessed: 19-May-2019].
58. «Home - Odos Imaging» [Online]. Available: <https://www.odos-imaging.com/>. [Accessed: 19-May-2019].
59. B. Buttgen, M.-A. El Mechat, F. Lustenberger, and P. Seitz, «Pseudonoise Optical Modulation for Real-Time 3-D Imaging With Minimum Interference» IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap., vol. 54, no. 10, pp. 2109–2119, Oct. 2007.
60. S. Foix Salmerón, G. Alenyà Ribas, and C. Torras, «Exploitation of time-of-flight (ToF) cameras» 2010.

61. T. K. Kohoutek, D. Droeschel, R. Mautz, and S. Behnke, «Indoor Positioning and Navigation Using Time-Of-Flight Cameras» in *TOF Range-Imaging Cameras*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 165–176.
62. K. Pirker, M. Rüther, H. Bischof, G. Schweighofer, and H. Mayer, «An omnidirectional Time-of-Flight camera and its application to indoor SLAM» in *2010 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision*, 2010, pp. 988–993.
63. S. May, D. Droeschel, S. Fuchs, D. Holz, and A. Nuchter, «Robust 3D-mapping with time-of-flight cameras» in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 1673–1678.
64. A. Swadzba, N. Beuter, J. Schmidt, and G. Sagerer, «Tracking objects in 6D for reconstructing static scenes» in *2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2008, pp. 1–7.
65. E. M. Gorostiza, J. L. Lázaro Galilea, F. J. Meca Meca, D. Salido Monzú, F. Espinosa Zapata, and L. Pallarés Puerto, «Infrared Sensor System for Mobile-Robot Positioning in Intelligent Spaces» *Sensors*, vol. 11, no. 5, pp. 5416–5438, May 2011.
66. F. Domingo-Perez, J. L. Lazaro-Galilea, A. Wieser, E. Martin-Gorostiza, D. Salido-Monzu, and A. de la Llana, «Sensor placement determination for range-difference positioning using evolutionary multi-objective optimization» *Expert Syst. Appl.*, vol. 47, pp. 95–105, Apr. 2016.
67. F. Domingo-Perez, J. Lazaro-Galilea, I. Bravo, A. Gardel, and D. Rodriguez, «Optimization of the Coverage and Accuracy of an Indoor Positioning System with a Variable Number of Sensors» *Sensors*, vol. 16, no. 6, p. 934, Jun. 2016.
68. D. Salido-Monzú, E. Martín-Gorostiza, J. Lázaro-Galilea, E. Martos-Naya, and A. Wieser, «Delay Tracking of Spread-Spectrum Signals for Indoor Optical Ranging» *Sensors*, vol. 14, no. 12, pp. 23176–23204, Dec. 2014.
69. D. Salido Monzú, «Infrared Ranging in Multipath Environments for Indoor Localization of Mobile Targets» *Universidad de Alcalá*, 2015.
70. D. Rodríguez-Navarro et al., «Indoor Positioning System Based on a PSD Detector, Precise Positioning of Agents in Motion Using AoA Techniques» *Sensors*, vol. 17, no. 9, p. 2124, Sep. 2017.
71. D. Rodríguez-Navarro, J. Lázaro-Galilea, I. Bravo-Muñoz, A. Gardel-Vicente, and G. Tsigotis, «Analysis and Calibration of Sources of Electronic Error in PSD Sensor Response» *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 619, Apr. 2016.
72. D. Rodríguez-Navarro, J. Lázaro-Galilea, I. Bravo-Muñoz, A. Gardel-Vicente, F. Domingo-Perez, and G. Tsigotis, «Mathematical Model and

- Calibration Procedure of a PSD Sensor Used in Local Positioning Systems» *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1484, Sep. 2016.
73. D. Rodríguez-Navarro, «Local Indoor Positioning System Based on PSD Doctoral» Universidad de Alcalá, 2017.
 74. A. M. Ramirez-Aguilera, J. M. Luna-Rivera, V. Guerra, J. Rabadan, R. Perez-Jimenez, and F. J. Lopez-Hernandez, «A Review of Indoor Channel Modeling Techniques for Visible Light Communications» in 2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), 2018, pp. 1–6.
 75. M. Kowalczyk and J. Siuzdak, «Channel modeling and characterization for VLC indoor transmission systems based on MMC ray tracing method» in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 2018, p. 4.
 76. L. Hua, Y. Zhuang, L. Qi, J. Yang, and L. Shi, «Noise Analysis and Modeling in Visible Light Communication Using Allan Variance» *IEEE Access*, vol. 6, pp. 74320–74327, 2018.
 77. M. Ajmani, S. Sinanović, and T. Boutaleb, «Optical Wireless Communication Based Indoor Positioning Algorithms: Performance Optimisation and Mathematical Modelling» *Computation*, vol. 7, no. 1, p. 1, Dec. 2018.
 78. H. Q. Tran and C. Ha, «Fingerprint-Based Indoor Positioning System Using Visible Light Communication—A Novel Method for Multipath Reflections» *Electronics*, vol. 8, no. 1, p. 63, Jan. 2019.
 79. W. Gu, M. Aminikashani, P. Deng, and M. Kavehrad, «Impact of Multipath Reflections on the Performance of Indoor Visible Light Positioning Systems» *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 10, pp. 2578–2587, May 2016.
 80. O. R. Popoola, W. O. Popoola, R. Ramirez-Iniguez, and S. Sinanovic, «Design of improved IR protocol for LED indoor positioning system» in 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017, pp. 882–887.
 81. F. Alam, B. Parr, and S. Mander, «Visible Light Positioning Based on Calibrated Propagation Model» *IEEE Sensors Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–4, Feb. 2019.
 82. M. Yasir, S.-W. Ho, and B. N. Vellambi, «Indoor Positioning System Using Visible Light and Accelerometer» *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 19, pp. 3306–3316, Oct. 2014.
 83. P. Huynh and M. Yoo, «VLC-Based Positioning System for an Indoor Environment Using an Image Sensor and an Accelerometer Sensor» *Sensors*, vol. 16, no. 6, p. 783, May 2016.
 84. A. Costanzo and V. Loscri, «Error compensation in indoor positioning systems based on software defined visible light communication» *Phys. Commun.*, vol. 34, pp. 235–245, Jun. 2019.

85. A. Costanzo and V. Loscri, «Visible Light Indoor Positioning in a Noise-aware Environment» in WCNC 2019 - IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2019.
86. J. Xu, C. Gong, and Z. Xu, «Indoor Visible Light Positioning with Centimeter Accuracy Based on a Commercial Smartphone Camera» in 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2018, pp. 1–6.
87. Masaki Yoshino, Shinichiro Haruyama, and Masao Nakagawa, «High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor» in 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, 2008, pp. 439–442.
88. S. Cincotta, C. He, A. Neild, and J. Armstrong, «Indoor Visible Light Positioning: Overcoming the Practical Limitations of the Quadrant Angular Diversity Aperture Receiver (QADA) by Using the Two-Stage QADA-Plus Receiver» *Sensors*, vol. 19, no. 4, p. 956, Feb. 2019.
89. N. Q. Pham, V. P. Rachim, and W.-Y. Chung, «High-accuracy VLC-based indoor positioning system using multi-level modulation» *Opt. Express*, vol. 27, no. 5, p. 7568, Mar. 2019.
90. B. Lin, X. Tang, Z. Ghassemlooy, C. Lin, and Y. Li, «Experimental Demonstration of an Indoor VLC Positioning System Based on OFDMA» *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–9, Apr. 2017.
91. B. Zhu, Z. Zhu, Y. Wang, and J. Cheng, «Optimal Optical Omnidirectional Angle-of-Arrival Estimator With Complementary Photodiodes» *J. Light. Technol.*, pp. 1–1, 2019.
92. H. Zhang et al., «High-Precision Indoor Visible Light Positioning Using Deep Neural Network Based on the Bayesian Regularization With Sparse Training Point» *IEEE Photonics J.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–10, Jun. 2019.
93. M. Ciurana, F. Barcelo-Arroyo, and F. Izquierdo, «A ranging system with IEEE 802.11 data frames» in 2007 IEEE Radio and Wireless Symposium, 2007, pp. 133–136.
94. T. Sohn et al., «Experiences with place lab» in *Proceeding of the 28th international conference on Software engineering - ICSE '06*, 2006, p. 462.
95. P. Bolliger, «Redpin - adaptive, zero-configuration indoor localization through user collaboration» in *Proceedings of the first ACM international workshop on Mobile entity localization and tracking in GPS-less environments - MELT '08*, 2008, p. 55.
96. Guowei Shen, R. Zetik, and R. S. Thoma, «Performance comparison of TOA and TDOA based location estimation algorithms in LOS environment» in 2008 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2008, pp. 71–78.
97. R. Yamasaki, A. Ogino, T. Tamaki, T. Uta, N. Matsuzawa, and T. Kato, «TDOA location system for IEEE 802.11b WLAN» in *IEEE Wireless Com-*

- munications and Networking Conference, 2005, 2005, vol. 4, pp. 2338–2343.
98. Shih-Hau Fang, Tsung-Nan Lin, and Kun-Chou Lee, «A Novel Algorithm for Multipath Fingerprinting in Indoor WLAN Environments» *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 7, no. 9, pp. 3579–3588, Sep. 2008.
 99. L. Descamps-Vila, A. Perez-Navarro, and J. Conesa, «RSS and Sensor Fusion Algorithms for Indoor Location Systems on Smartphones. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography» in *Connecting a Digital Europe Through Location and Place*, 1st ed., C. Huerta, Joaquín and Schade, Sven and Granell, Ed. Springer International Publishing, 2014, pp. 197–214.
 100. J. Torres-Sospedra et al., «UJIIndoorLoc: A new multi-building and multi-floor database for WLAN fingerprint-based indoor localization problems» in *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2014, pp. 261–270.
 101. S. Mazuelas et al., «Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks» *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 3, no. 5, pp. 821–831, Oct. 2009.
 102. S. Sosa-Sesma and A. Perez-Navarro, «Fusion system based on WiFi and ultrasounds for in-home positioning systems: The UTOPIA experiment» in *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN 2016*, 2016.
 103. S. Garcia-Villalonga and A. Perez-Navarro, «Influence of human absorption of Wi-Fi signal in indoor positioning with Wi-Fi fingerprinting» in *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2015, pp. 1–10.
 104. G. Anastasi, R. Bandelloni, M. Conti, F. Delmastro, E. Gregori, and G. Mainetto, «Experimenting an indoor bluetooth-based positioning service» in *23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 2003. *Proceedings.*, 2003, pp. 480–483.
 105. A. LaMarca et al., «Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild» Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, pp. 116–133.
 106. S. Feldmann, K. Kyamakya, A. Zapater, and Z. Lue, «An Indoor Bluetooth-Based Positioning System: Concept, Implementation and Experimental Evaluation» in *International Conference on Wireless Networks*, 2003, pp. 109–113.
 107. T. King, H. Lemelson, A. Farber, and W. Effelsberg, «BluePos: Positioning with Bluetooth» in *2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, 2009, pp. 55–60.
 108. K. Thapa and S. Case, «An Indoor Positioning Service for Bluetooth Ad Hoc Networks» in *Proceedings of the ISA Expo*, 2003.

109. A. Madhavapeddy and A. Tse, «A Study of Bluetooth Propagation Using Accurate Indoor Location Mapping» in Proceedings of the 7th {International} {Conference} on {Ubiquitous} {Computing}, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, pp. 105–122.
110. J. Hightower and G. Borriello, «SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength» 2000.
111. A. Ghahri and M. A. Nekoui, «Localization of Mobile Robots with RFID Technology and Expectation Maximization Algorithm» Int. J. Signal Syst. Control Eng. Appl., vol. 2, no. 1, pp. 8–14, 2009.
112. Y. Ota, T. Hori, T. Onishi, T. Wada, K. Mutsuura, and H. Okada, «Localization of passive {RFID} tags with robot using adaptive likelihood distribution algorithm» in 2007 {Australasian} {Telecommunication} {Networks} and {Applications} {Conference}, 2007, pp. 163–168.
113. A. Stelzer, K. Pourvoyeur, and A. Fischer, «Concept and Application of LPM—A Novel 3-D Local Position Measurement System» IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 52, no. 12, pp. 2664–2669, Dec. 2004.
114. Y. Zhang, M. G. Amin, and S. Kaushik, «Localization and Tracking of Passive RFID Tags Based on Direction Estimation» Int. J. Antennas Propag., vol. 2007, pp. 1–9, Oct. 2007.
115. L. M. Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau, and A. P. Patil, «LANDMARC: indoor location sensing using active RFID» in Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003)., 2003, pp. 407–415.
116. H. Cho, Y. Jung, H. Choi, H. Jang, S. Son, and Y. Baek, «Real Time Locating System for Wireless Networks using IEEE 802.15.4 Radio» in 2008 5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2008, pp. 578–580.
117. E. Cassano, F. Florio, F. De Rango, and S. Marano, «A performance comparison between ROC-RSSI and trilateration localization techniques for WPAN sensor networks in a real outdoor testbed.» in 2009 Wireless Telecommunications Symposium, 2009, pp. 1–8.
118. P. Corral, E. Peña, R. Garcia, V. Almenar, and A. C. d C. Lima, «Distance Estimation System based on ZigBee» in 2008 11th {IEEE} {International} {Conference} on {Computational} {Science} and {Engineering} - {Workshops}, 2008, pp. 405–411.
119. C. Cayuelas, B. Coll, J. Muñoz, P. Corral, and E. Ávila, «Antenas Impresas para Redes de Localización Zigbee» in Actas del XXIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, 2008.
120. S. Gezici et al., «Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks» IEEE Signal Process. Mag., vol. 22, no. 4, pp. 70–84, Jul. 2005.

121. C. Falsi, D. Dardari, L. Mucchi, and M. Z. Win, «Time of Arrival Estimation for UWB Localizers in Realistic Environments» *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2006, no. 1, p. 032082, Dec. 2006.
122. D. Jourdan, D. Dardari, and M. Win, «Position Error Bound for UWB Localization in Dense Cluttered Environments» in *2006 IEEE International Conference on Communications*, 2006, vol. 8, pp. 3705–3710.
123. D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, and M. Z. Win, «Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments» *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 404–426, Feb. 2009.
124. Z. Şahinoğlu, S. Gezici, and I. Güvenç, *Ultra-wideband positioning systems : theoretical limits, ranging algorithms, and protocols*. Cambridge University Press, 2008.
125. K. Siwiak and D. McKeown, *Ultra-wideband radio technology*. Chichester ; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.
126. R. Mautz, «Indoor positioning technologies» 2012.
127. A. Popleteev, «Indoor positioning using FM radio signals» 2011.
128. European GNSS Agency, «GNSS Market Report, Issue 5» 2017.
129. G. Seco-Granados, J. Lopez-Salcedo, D. Jimenez-Banos, and G. Lopez-Risueno, «Challenges in Indoor Global Navigation Satellite Systems: Unveiling its core features in signal processing» *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 29, no. 2, pp. 108–131, Mar. 2012.
130. T. Ren and M. G. Petovello, «A Stand-Alone Approach for High-Sensitivity GNSS Receivers in Signal-Challenged Environment» *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 53, no. 5, pp. 2438–2448, Oct. 2017.
131. Q. Ladetto, J. Van Seeters, S. Sokolowski, Z. Sagan, and B. Merminod, «Digital Magnetic Compass and Gyroscope for Dismounted Soldier Position and Navigation» *Sensors Electron. Technol. Panel, NATO Res. Technol. Agency Sensors*, pp. 1–15, 2002.
132. E. Foxlin, «Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors» *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 25, no. 6, pp. 38–46, Nov. 2005.
133. R. Stirling, «Development of a Pedestrian Navigation System Using Shoe Mounted Sensors» *University of Alberta*, 2004.
134. R. Feliz Alonso, E. Zalama Casanova, and J. Gómez García-Bermejo, «Pedestrian tracking using inertial sensors» *J. Phys. Agents*, vol. 3, no. 1, pp. 35–43, 2009.
135. A. R. Jimenez, F. Seco, J. C. Prieto, and J. Guevara, «Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for yaw drift reduction and a foot-mounted IMU» in *2010 7th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, 2010, pp. 135–143.

136. X. Yun, E. R. Bachmann, H. Moore, and J. Calusdian, «Self-contained Position Tracking of Human Movement Using Small Inertial/Magnetic Sensor Modules» in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, no. April, pp. 2526–2533.
137. A. Bilke and J. Sieck, «Using the Magnetic Field for Indoor Localization on a Mobile Phone» 2013, pp. 195–208.
138. A. Perez-Navarro, R. Montoliu, J. Torres-Sospedra, and J. Conesa, «Magnetic Field as a Characterization of Wide and Narrow Spaces in a Real Challenging Scenario Using Dynamic Time Warping» in *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2018, pp. 1–8.
139. R. Montoliu, J. Torres-Sospedra, and O. Belmonte, «Magnetic field based Indoor positioning using the Bag of Words paradigm» in *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2016, pp. 1–7.
140. S. Shahidi and S. Valaee, «GIPSY: Geomagnetic indoor positioning system for smartphones» in *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2015, pp. 1–7.
141. C. Galván-Tejada, J. García-Vázquez, and R. Brena, «Magnetic Field Feature Extraction and Selection for Indoor Location Estimation» *Sensors*, vol. 14, no. 6, pp. 11001–11015, Jun. 2014.
142. D. Carrillo, V. Moreno, B. Úbeda, and A. Skarmeta, «MagicFinger: 3D Magnetic Fingerprints for Indoor Location» *Sensors*, vol. 15, no. 7, pp. 17168–17194, Jul. 2015.
143. S. N. Patel, K. N. Truong, and G. D. Abowd, «PowerLine Positioning: A Practical Sub-Room-Level Indoor Location System for Domestic Use» in *UbiComp 2006: Ubiquitous Computing*, P. Dourish and A. Friday, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 441–458.
144. G. Cohn, D. Morris, S. N. Patel, and D. S. Tan, «Your noise is my command» in *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems - CHI '11*, 2011, p. 791.
145. G. C. Koutitas and L. Tassiulas, «Low Cost Disaggregation of Smart Meter Sensor Data» *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 6, pp. 1665–1673, Mar. 2016.
146. J. M. Alcalá, J. Urena, A. Hernandez, and D. Gualda, «Sustainable Home-care Monitoring System by Sensing Electricity Data» *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 23, pp. 7741–7749, Dec. 2017.
147. J. Z. Kolter, S. Batra, and A. Y. Ng, «Energy Disaggregation via Discriminative Sparse Coding.»
148. T. Hassan, F. Javed, and N. Arshad, «An Empirical Investigation of V-I Trajectory Based Load Signatures for Non-Intrusive Load Monitoring» *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 870–878, Mar. 2014.

4. PRINCIPALES DESAFÍOS

1. Basiri, A., Jackson, M., Amirian, P., Pourabdollah, A., Sester, M., Winstanley, A., Moore T. & Zhang, L. (2016). Quality assessment of OpenStreetMap data using trajectory mining. *Geo-spatial information science*, 19(1), 56-68.
2. A. Bahillo, J. Blas, P. Fernández, R.M. Lorenzo, S. Mazuelas, y E.J. Abril, «E-Field Assessment Errors Associated with RF Dosimeters for Different Angles of Arrival, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 132 (1), pp. 51-56, septiembre 2008. DOI:10.1093/rpd/ncn275
3. Della Rosa, Francescantonio, Mauro Pelosi, and Jari Nurmi. «Human-induced effects on rssi ranging measurements for cooperative positioning.» *International Journal of Navigation and Observation* 2012 (2012).
4. Yang, Chun, Thao Nguyen, and Erik Blasch. «Mobile positioning via fusion of mixed signals of opportunity.» *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 29.4 (2014): 34-46.
5. Basiri, A., Jackson, M., Amirian, P., Pourabdollah, A., Sester, M., Winstanley, A., Moore T. & Zhang, L. (2016). Quality assessment of OpenStreetMap data using trajectory mining. *Geo-spatial information science*, 19(1), 56-68.
6. Torres-Sospedra, J, Jiménez, A.R et al., «The smartphone-based offline indoor location competition at IPIN 2016: Analysis and future work» *Sensors (Switzerland)* Volume 17, Issue 3, 10 March 2017, Article number 557
7. Myles, G., Friday, A., and Davies, A., (2003). Preserving privacy in environments with location-based applications. *Pervasive Computing*, 2(1): 56–64.
8. Gorch, W. W., Terpstra, A. and Heinemann, A., (2004). Survey on location privacy in pervasive computing. In *Proc. First Workshop on Security and Privacy at the Conference on Pervasive Computing (SPPC)*.
9. Xu, H., Luo, X. R., Carroll, J. M., & Rosson, M. B. (2011). The personalization privacy paradox: An exploratory study of decision-making process for location-aware marketing. *Decision Support Systems*, 51(1).
10. Sweeney, L., (2002). K-anonymity: A model for protecting privacy. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems*, 10(5): 557-570.
11. Duckham, M., and Kulik, L., (2005). Simulation of obfuscation and negotiation for location privacy. In D.M. Mark and A.G.Cohn, editors, *COSIT 2005*, volume 3693 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 31–48. Springer
12. Daniel Arp, Erwin Quiring et al., *Privacy Threats through Ultrasonic Side Channels on Mobile Devices*, 2nd IEEE European Symposium on Security and Privacy, April 26-28, 2017 in Paris, France

13. European Commission Joint Research Centre, Participatory Surveillance feasibility: Report on data classification, analysis and prediction, 2013.
14. European Data Protection Supervisor, Opinion on a notification for prior checking received from the Data Protection Officer of the European Commission related to the «Participatory surveillance research project with evaluation exercise at the JRC/IPSC institute» of 5/2/2014 (Case 2012-0824).
15. D. Christin et al., A survey on privacy in mobile participatory sensing applications, *The Journal of Systems and Software*, Volume 84 (2011), 1928-1946.
16. D. Christin, M. Hollick, in: S. Gutwirth et al. (Eds.), *European Data Protection: Coming of Age*, Springer, Dordrecht, 2013, 203-222.
17. D. Christin, F. Engelmann, M. Hollick, *Usable Privacy for Mobile Sensing Applications*, in: D. Naccache and D. Sauveron (Eds.): *WISTP 2014*, LNCS 8501, 92-107, 2014.

5. ANÁLISIS ESTRATÉGICOS

1. Avance del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020. Consulta pública 11 de Julio de 2017: http://www.idi.mineco.gob.es/stfls/MICINN/Prensa/FICHEROS/2017/PlanEstatal_IDI_vB.pdf
2. Horizon 2020 - work programme 2018-2020: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-work-programme>
3. Plataformas Tecnológicas Españolas: <http://www.idi.mineco.gob.es/portal/site/MICINN/menuitem.6f2062042f6a5bc43b3f6810d14041a0/?vgnextoid=844cb292d3ff4410VgnVCM1000001d04140aRCRD>
4. Plataformas Tecnológicas Europeas: http://ec.europa.eu/research/innovation-union/index_en.cfm?pg=etp
5. Grandes Iniciativas del Horizon2020: <http://www.eshorizonte2020.es/mas-europa/grandes-iniciativas>
6. Propuesta Científica de REPIN: http://repin.es/ficha.php?id_categoria=33
7. Fiscalidad y bonificaciones por actividades de I+D+i: <http://www.idi.mineco.gob.es/portal/site/MICINN/menuitem.7eac5cd345b4f34f09dfd1001432ea0/?vgnextoid=45d1a8f3785b4410VgnVCM1000001d04140aRCRD>
8. Informe 'Startup Ecosystem Overview' elaborado por la fundación Mobile World Capital Barcelona (MWCB): http://mobileworldcapital.com/wp-content/uploads/2016/04/Spain_Startup_Ecosystem_Overview_2016_MWCapital_vf.compressed.pdf

9. Startupxplore, la comunidad de inversión en startups que conecta a todos los actores del ecosistema startup creada por el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial: <https://startupxplore.com>
10. StartUp Europe Awards (SEUA), promovido por la Comisión Europea: <http://startupeuropeawards.com/>

6. ECOSISTEMAS EN ESPAÑA

1. <http://mysphera.com>
2. <http://www.activageproject.eu/>
3. <http://www.fundacionvodafone.es/proyecto/proyecto-activage>
4. <https://guiademayores.com/2017/02/01/proyecto-activage-instrumento-mejorar-la-vida-los-mayores/>
5. <http://bigoprogram.eu/about-bigo/>
6. <http://www.sabien.upv.es/project/mysphera-bq/>
7. http://comunicacion.fenin.es/prensa/n37403_20_elmundo.pdf
8. <http://tsbtecnologias.es/spherahospital/en/company/research-development/>
9. <https://es.slideshare.net/Redites/20140523taller-plstico-qumico-y-materialeseduardo-montn>
10. <https://situm.es/blog>
11. https://economia.elpais.com/economia/2017/06/07/actualidad/1496855573_403734.html
12. <http://www.nebusens.com/es/>
13. <http://blog.nebusens.com/search/label/Success%20Stories>
14. <https://www.zebra.com/es/es.html>
15. <https://www.zebra.com/content/dam/zebra/success-stories/en-us/pdfs/usaf-en-us.pdf>
16. <https://www.zebra.com/content/dam/zebra/success-stories/en-us/pdfs/nyk-en-us.pdf>
17. <https://www.zebra.com/content/dam/zebra/success-stories/en-us/pdfs/tobyhanna-en-us.pdf>
18. <https://www.zebra.com/content/dam/zebra/success-stories/en-us/pdfs/washington-hospital-en-us.pdf>
19. <https://www.zebra.com/content/dam/zebra/success-stories/en-us/pdfs/shanghai-en-us.pdf>
20. <https://www.zebra.com/content/dam/zebra/success-stories/en-us/pdfs/voestalpine-en-us.pdf>
21. <https://www.zebra.com/gb/en/solutions/location-solutions/zebra-sport-solution.html>

22. <http://estimote.com/contact/>
23. <http://blog.estimote.com/post/157200820650/the-icon-of-modern-art-puts-estimote-beacons-on>
24. Estimote Sticker Beacons - Introducing Nearables – YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=JrRS8qRYXCQ>
25. <https://ubisense.net/en>
26. <http://www.angleid.net/Content/Home.htm>
27. https://ubisense.net/application/files/8114/6307/1048/Ubisense_AngleID_-_Use_Cases.pdf
28. <https://ubisense.net/en/information/resources/myworld-resources/ubisense-myworld-drives-productivity-improvements-zayo-group>
29. <https://ubisense.net/en/information/resources/myworld-resources/driving-network-visibility-customer-service-with-myworld>
30. <https://ubisense.net/en/information/resources/smart-factory-resources/automotive-rework>
31. <https://www.decawave.com/>
32. Decawave RTLS and ranging demo – YouTube, https://www.youtube.com/watch?v=Nt5x2_y8SAw
33. <http://www.sonitor.com/>
34. <https://sonitor.wordpress.com/>
35. <http://bespoon.com/>

Texto Pendiente



Universidad
de Alcalá