



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL EN  
AERONAVEGACIÓN

**TRABAJO FIN DE GRADO**

SISTEMAS DE NAVEGACIÓN EN INTERIORES APLICADO A  
MICRO-VEHÍCULOS AÉREOS (MAVs): APROXIMACIÓN A UN  
DISEÑO CONCEPTUAL

**Autor:** Pedro Arias Pérez  
**Co-tutor:** Raúl de Celis Fernández  
**Co-tutor:** Hodei Urrutxua Cereijo



*Aos meus pais,  
que dedicaron a súa vida á miña educación.*



## Resumen

Este trabajo proporciona una visión global del estado del arte de los sistemas de posicionamiento en interiores. Para ello, se recoge una descripción general de los sistemas y se aplica un división en tres clasificaciones ortogonales para una mejor representación del espectro. La taxonomía propuesta para los sistemas distingue entre técnicas, y a su vez métricas y algoritmos, y tecnologías. Las técnicas engloban al conjunto de herramientas abstractas que pueden usarse en varias tecnologías, es decir, en las diferentes formas específicas de usar señales físicas.

Esta distinción entre diferentes clasificaciones trata de presentar de forma sencilla los sistemas existentes y de forma independiente a la aplicación concreta del sistema de posicionamiento. Durante la primera mitad del trabajo se mantiene un nivel de abstracción elevado, obviando en todo momento el uso final del sistema, para presentar una clasificación y comparativa general a cualquier finalidad.

Además, se desarrolla un método comparativo que permite evaluar y seleccionar uno o varios sistemas de posicionamiento para una aplicación específica. Para ello, una serie de propiedades intrínsecas a los sistemas son explicadas y analizadas. Seguidamente, se establece un modelo con estos criterios que permita evaluar las diferentes tecnologías y que permita hallar el sistema que mejor se adapte a un servicio concreto.

Por último, se selecciona una aplicación para el estudio, MAVs de uso recreativo. Sobre este uso, se aplica la taxonomía presentada, y sobre los resultados obtenidos, se aporta un posible sistema solución al problema definido. Esta solución, basada en un sistema híbrido con tecnologías de radio-frecuencia y iniciales, es una aproximación sencilla e introducatoria. El sistema no se concreta un sistema-solución real e implementable, simplemente se formulan una serie de esquemas que explican su funcionamiento básico.

**Palabras clave**— Posicionamiento interiores, IPS, métricas señal, algoritmos posicionamiento, tecnologías posicionamiento, taxonomía, drones, MAVs.



# Agradecimientos

Tras cinco años, finalizo, con esta memoria, mi etapa universitaria como estudiante de grado. Ha sido un trayecto emocionante en el que me he cruzado con grandes profesores, compañeros y amigos. Es por eso, por lo que me gustaría agradecer a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, a la Universidad Rey Juan Carlos y a todos sus profesionales por la atención y formación ofrecida.

Además, en concreto, me gustaría dar las gracias a...

A Hodei y a Raúl, por lanzar una idea que me ha entusiasmado y agotado a partes iguales.

A toda mi familia, en especial a mis padres y a mi hermana Raquel, por abrazarme y empujarme durante estos cinco años.

A Carme, por todo el cariño y la ayuda que siempre me prestas, y en particular, por ayudarme con las figuras que esta memoria contiene.

A los compañeros con los que más cerca he vivido esta etapa, Andrés, Juan, Raquel, Irene y Vladi, por lo sufrido y por lo disfrutado por parte doble. También a los que se han convertido en grandes amigos durante estos años, Paula, Carmen, Álvaro, Paula, Muffin y Anaïs.

A Luci, Silvi, Alejandro, Castell, Javi, Miranda, Carlos y Dani, descubrir Madrid a vuestro lado ha sido un privilegio del que espero seguir disfrutando.

A Juan, Dani, Sunil, Verto y Ana, porque a pesar de que pasen los años, seguimos en contacto.

¡Gracias a todos!

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Índice general</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>x</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xi</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>xiii</b>
<b>Símbolos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	1
1.2. Problema y motivación . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.4. Estructura de la memoria . . . . .	3
<b>2 Técnicas de posicionamiento en interiores</b>	<b>5</b>
2.1. Métricas de la señal . . . . .	5
2.2. Algoritmos de posicionamiento . . . . .	11
<b>3 Tecnologías para posicionamiento en interiores</b>	<b>15</b>
3.1. Óptica . . . . .	15
3.2. Acústica . . . . .	20
3.3. Magnética . . . . .	21
3.4. Radio frecuencia . . . . .	22
3.5. Híbridas . . . . .	26
<b>4 Comparativa de sistemas</b>	<b>29</b>
4.1. Metodología . . . . .	29
4.2. Propiedades . . . . .	31
4.3. Retos . . . . .	33
4.4. Taxonomía de las tecnologías de los IPS . . . . .	35
4.5. Modelo y baremo . . . . .	38
<b>5 Caso de estudio</b>	<b>41</b>
5.1. Aplicación . . . . .	41

5.2. Solución . . . . .	43
5.3. Sistema propuesto . . . . .	47
<b>6 Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>53</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	53
6.2. Líneas futuras . . . . .	54
<b>Bibliografía</b>	<b>55</b>

# Índice de figuras

1.1. Esquema que muestra la clasificación de los sistemas IPS seguida. . . . .	3
1.2. Estructura típica de un IPS [59]. . . . .	4
2.1. Clasificación de técnicas en IPS. . . . .	6
2.2. Posicionamiento 2D basado en la medida del AoA [36]. . . . .	7
2.3. Posicionamiento 2D basado en la medida del ToA [69, 42]. . . . .	8
2.4. Posicionamiento 2D basado en la medida del TDoA [69, 42]. . . . .	9
2.5. Posicionamiento 2D mediante el calculo de la RSSI [42]. . . . .	10
2.6. Esquema de detección por proximidad con sensores de diferente alcance [28]. . . . .	12
2.7. Análisis de una imagen visual como técnica <i>fingerprinting</i> [28]. . . . .	13
3.1. Clasificación de tecnologías en IPS. . . . .	16
3.2. Configuración de los sistemas <i>motion tracking</i> [78]. . . . .	18
3.3. Diferentes marcadores usados en la navegación basada en marcadores. . . . .	19
3.4. Balizas utilizadas en sistemas de ultrasonidos. . . . .	21
3.5. Esquema de funcionamiento de un sistema RFID pasivo [80]. . . . .	24
3.6. Espectro regulado de UWB [49]. . . . .	24
4.1. Secuencia de fases de la metodología. . . . .	30
4.2. Precisión frente a exactitud. . . . .	32
5.1. MAVs propuestos para la aplicación. . . . .	41
5.2. Resultados obtenidos en función del modelo aplicado. . . . .	47
5.3. Motivación de la hibridación en la solución. . . . .	48
5.4. Integración de sensores. . . . .	49
5.5. Esquema hardware del sistema propuesto. . . . .	50
5.6. Componentes propuestos para la solución. . . . .	50
5.7. Esquema software del sistema propuesto. . . . .	51

# Índice de tablas

2.1. Resumen de las propiedades de la señal [67]. . . . .	11
2.2. Resumen de los algoritmos de posicionamiento [67]. . . . .	14
3.1. Resumen de las tecnologías de posicionamiento en interiores. . . . .	27
4.1. Clasificación de las tecnologías en los IPS. . . . .	36
4.2. Valores y su correspondiente rango para las propiedades de las tecnologías. . . . .	38
4.3. Baremo para las propiedades de las tecnologías. . . . .	40
5.1. Propiedades de los MAVs propuestos para la aplicación. . . . .	42
5.2. Resumen de las soluciones obtenidas para las tecnologías IPS. . . . .	43
5.3. Soluciones obtenidas para las tecnologías IPS. . . . .	44
5.4. Resumen de las soluciones obtenidas aplicando los tres modelos. . . . .	46
5.5. Resumen de las soluciones obtenidas aplicando los tres modelos. . . . .	48



# Acrónimos

<b>Entrada</b>	<b>Descripción</b>
<b>2D</b>	Two Dimensions.
<b>3D</b>	Three Dimensions.
<b>AoA</b>	Angle of Arrival.
<b>BDS</b>	BeiDou System.
<b>BLE</b>	Bluetooth Low Energy.
<b>BLPA</b>	Bluetooh Local Positioning Application.
<b>DOLPHIN</b>	Distributed Object Locating System for Physical-space Internetworking.
<b>EKF</b>	Extended Kalman Filter.
<b>EPM</b>	Ellipse Propagation Model.
<b>FIS</b>	Fuzzy Inference System.
<b>GLONASS</b>	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema.
<b>GNC</b>	Guidance, Navigation and Control.
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System.
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit.
<b>INS</b>	Inertial Navigation System.
<b>IPS</b>	Indoor Positioning System.
<b>IR</b>	Infrared.
<b>IRNSS</b>	Indian Regional Navigation Satellite System.
<b>k-NN</b>	k-Nearest Neighbor.
<b>KF</b>	Kalman Filter.
<b>LAN</b>	Local Area Network.

<b>Entrada</b>	<b>Descripción</b>
<b>LANDMARC</b>	Location Identification based on Dynamic Active RFID Calibration.
<b>LED</b>	Light Emitting Diode.
<b>LiDAR</b>	Light Detection and Ranging / Laser Imaging Detection and Ranging.
<b>LORAN</b>	LOng RAnge Navigation.
<b>LoS</b>	Line of Sight.
<b>MAV</b>	Micro Aerial Vehicle.
<b>MPC</b>	Model Predictive Control.
<b>NAVSTAR-GPS</b>	Navigation System Time And Ranging-Global Positioning System.
<b>NFC</b>	Near Field Communication.
<b>PDoA</b>	Phase Difference of Arrival.
<b>PID</b>	Proportional–Integral–Derivative.
<b>PL</b>	Path Loss.
<b>PoA</b>	Phase of Arrival.
<b>QZSS</b>	Quasi-Zenith Satellite System.
<b>RF</b>	Radio Frequency.
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification.
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator.
<b>RTLS</b>	Real Time Location System.
<b>RTToF</b>	Roundtrip Time of Flight.
<b>SLAM</b>	Simultaneous Location and Mapping.
<b>SMP</b>	Smallest M-vertex Polygon.
<b>SSID</b>	Service Set Identifier.
<b>SVM</b>	Support Vector Machine.
<b>TDoA</b>	Time Difference of Arrival.
<b>ToA</b>	Time of Arrival.
<b>ToF</b>	Time of Flight.
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle.
<b>UKF</b>	Unscented Kalman Filter.
<b>URJC</b>	Universidad Rey Juan Carlos.
<b>UWB</b>	Ultra-wideband.
<b>VCL</b>	Visible Light Communication.

<b>Entrada</b>	<b>Descripción</b>
<b>VO</b>	Visual Odometry.
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity.
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network.
<b>WSN</b>	Wireless Sensor Network.



# Símbolos

<b>Entrada</b>	<b>Descripción</b>
$P_i$	Punto de referencia.
$x_i, y_i$	Coordenadas de un punto de referencia.
$S$	Punto solución.
$\hat{x}, \hat{y}$	Coordenadas de punto solución.
$\theta_i$	Ángulo de llegada.
$r_i$	Rango, distancia entre dos puntos.
$c$	Velocidad de la luz en el vacío.
$t_i$	Tiempo de llegada, ToA.
$t$	Tiempo.
$N$	Número de referencias conocidas.
$P_R$	Potencia o intensidad de señal recibida, RSSI.
$P_T$	Potencia de señal transmitida.
$G_T$	Ganancia de señal transmitida.
$G_R$	Ganancia de señal recibida.
$\lambda$	Longitud de onda de la señal.
$d$	Distancia.
$n$	Constante de propagación de Friis.
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \mu, \nu, \omega$	Coeficientes del modelo propuesto.
$CP$	Carga de pago.
$IM$	Costes de infraestructura y mantenimiento.
$UF$	Costes de usuario final.
$RAN$	Rango, cobertura.
$POS$	Posicionamiento.
$ACT$	Actitud, orientación.
$OBS$	Obstáculos.



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto

La navegación y posicionamiento en tierra se ha practicado durante mucho tiempo. Los primeros sistemas radio surgen en los años 40, cuando el sistema LORAN (*LOng-RANge navigation system*) fue introducido. Este sistema permitía a los barcos triangular su posición usando señales radio desde estaciones LORAN terrestres. El primer satélite, Sputnik [30], fue lanzado en 1957 y no mucho después los científicos contemplaron por primera vez la opción de trabajar desde una órbita satelital conocida para determinar una posición en la tierra. El primer sistema satelital fue el sistema Transit [30], en los años 1960, que no se considera un sistema de navegación global por satélite, (GNSS, *Global Navigation Satellite System*), pues no ofrecía cobertura global las 24 horas.

El concepto GNSS surge posteriormente en los años 70, con el desarrollo del sistema estadounidense NAVSTAR-GPS (*Navigation System Time And Ranging-Global Positioning System*) [30]. Sin embargo, a pesar de tener cobertura mundial, no era “global” como indica su nombre, ya que era un sistema exclusivamente de uso militar. Así pues, es en los noventa cuando se permite su uso civil y múltiples países alcanzan acuerdos con el Gobierno estadounidense para adherirse al uso del sistema.

Surge así la necesidad para las demás potencias de tener su propio sistema de navegación por satélite. Europa desarrolla Galileo y Rusia lanza GLONASS como sistemas globales, mientras China plantea Beidou, la India IRNSS y Japón QZSS como sistemas regionales [30].

Son muchas y muy diversas las aplicaciones de los GNSS: industria cartográfica y topográfica, minería, navegación autónoma, etc. En la actualidad, vehículos, ya sea en tierra, mar o en aire, utilizan a diario el posicionamiento proporcionado por los sistemas GNSS.

Los drones o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) se han popularizado en los últimos años hasta el punto de formar parte de nuestro día a día con aplicaciones en muchos ámbitos de nuestra vida. Un UAV es un vehículo sin tripulación, reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción.

Los sistemas GNSS, predominantes en el posicionamiento y localización en exteriores, tiene un mal funcionamiento en interiores debido al bajo nivel de señal disponible. Las señales satelitales no están diseñadas para alcanzar interiores de construcciones, pues las frecuencias utilizadas no pueden penetrar en la mayoría de los materiales de construcción [74]. Debido a esto, el posicionamiento en interiores (IPS, *Indoor Positioning System*) ha sido un ámbito de mucho interés en investigación y muchos sistemas han sido propuestos en las últimas décadas como solución al problema existente.

## 1.2. Problema y motivación

Este estudio se centra en el estudio de los sistemas de posicionamiento en interiores, con especial atención, pero no en exclusiva, al posicionamiento de drones en interiores. Como ya se ha mencionado anteriormente, los drones son cada vez más usados y las posibilidades existentes para su posicionamiento son muy amplias. En concreto, son los drones de pequeño tamaño (MAVs, *Micro Aerial Vehicles*) los que interesa posicionar.

Esta aplicación surge debido a una necesidad para posicionar MAVs de forma no intrusiva y económicamente viable para el público general. Esto viene motivado por el interés de cierto grupo de profesores de la URJC para un posible proyecto y aplicación comercial futura, la cual trataremos en detalle durante el trabajo. Sobre este proyecto surge la duda de que sistema de posicionamiento es el más adecuado utilizar. De esta forma, se plantea realizar un estudio general sobre los sistemas de posicionamiento y una comparativa que permita seleccionar un sistema-solución en función de la aplicación específica.

En resumen, lo que se persigue es realizar un estudio de la ciencia de posicionamiento en interiores que permita proponer una solución que posibilite el correcto posicionamiento del problema concreto tratado en este texto. Para ello, se busca desarrollar un modelo comparativo que se pueda aplicar, no solo a la aplicación aquí formulada, sino para cualquier aplicación que necesite un posicionamiento en interiores.

## 1.3. Objetivos

Este estudio presenta múltiples objetivos. En primer lugar, se quiere reflejar el estado del arte de los sistemas de posicionamiento en interiores y su taxonomía. El primer objetivo se abordará desarrollando un espectro abstracto de sistemas que se adapte a las tendencias y a las necesidades actuales, representando de una forma sencilla pero completa los sistemas existentes. Para ello, una clasificación será propuesta que permita un correcto análisis de los componentes de un sistema.

En segundo lugar, se quiere exponer un método comparativo que permita evaluar diferentes sistemas en función de la aplicación concreta del problema a resolver. Beneficiándose de la taxonomía expuesta previamente, un modelo y un baremo serán sugeridos que permitan confrontar los sistemas valorados como resolución del problema.

Por último, sirviéndose de lo desarrollado hasta el momento, se recomendará un sistema solución para el problema contemplado en este trabajo (ver Sección 1.2). La solución sugerida será una primera aproximación al sistema completo, pues una solución íntegra escapa al alcance de este trabajo.

Así pues, los objetivos principales contemplados en este trabajo son:

1. Representación y clasificación de los sistemas de posicionamiento en interiores actuales.
2. Desarrollo de un método comparativo que permita seleccionar un sistema según los requisitos de una aplicación concreta.
3. Aproximación a un sistema solución para la aplicación propuesta.

## 1.4. Estructura de la memoria

A continuación, se introduce la estructura de la memoria de este estudio, al igual que los diferentes temas tratados en cada capítulo.

En primer lugar, se propone una descripción general con una clasificación de los IPS. Durante el trabajo, se hará distinción entre técnicas y tecnologías (Fig. 1.1), donde el término “técnica” se refiere a una herramienta abstracta básica, no necesariamente vinculada a los medios físicos, que podría usarse en varias “tecnologías” mientras que las “tecnologías” son formas específicas de usar señales físicas, registradas a través de sensores, como ondas de radio o campos magnéticos, para cumplir los objetivos de un IPS. En un ejercicio de abstracción, se ha obviado la aplicación concreta para el sistema. De esta forma, se ha propuesto un método de división y clasificación independiente a la aplicación del sistema.

La clasificación propuesta no es, ni mucho menos, una gran innovación. Muchos autores han propuestos sus propias clasificaciones a lo largo de los años, entre los que queremos destacar a autores como *Hightower y Borriello* [28], *Liu et al.* [42], *Mautz* [49], *Brena et al.* [5] y *Sakpere et al.* [67]. Estos estudios pese a diferir en diversos aspectos de la clasificación propuesta han sentado la base para tendencia actual en la clasificación de sistemas IPS, y sirven para hacerse con una visión global del estado de la ciencia que nos compete. A estos artículos nos referiremos en repetidas ocasiones a lo largo de la memoria.

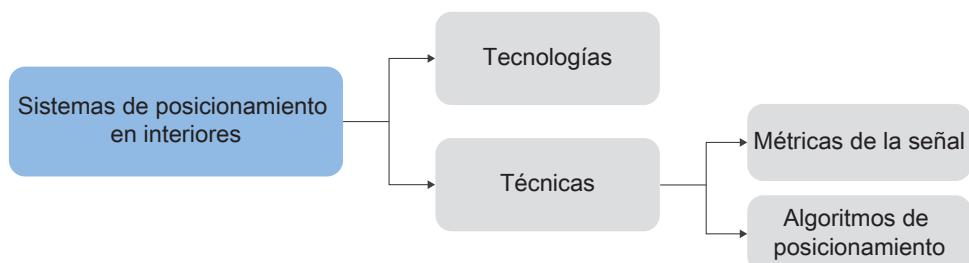


Figura 1.1: Esquema que muestra la clasificación de los sistemas IPS seguida.

En primer lugar, el criterio seguido para esta división ha sido las diferentes herramientas abstractas básicas (*técnicas*) (Cap. 2). Se han utilizado las propiedades físicas de la señal durante la Sección 2.1 y los algoritmos o métodos de posicionamiento durante la Sección 2.2 para diferenciar los sistemas entre sí. Las métricas más relevantes son la directa o física, el ángulo de llegada (AoA), el tiempo de llegada (ToA), el tiempo diferencial de llegada (TDoA) y la intensidad de señal recibida (RSSI). Por otro lado, los algoritmos de posicionamiento más destacables son la multilateración (lateración y angulación), el análisis por proximidad (o detección directa), el análisis del entorno (*fingerprinting*) y la navegación por estima (o navegación inercial, INS).

A continuación, el criterio de clasificación se establece en el modo específico de utilizar estas herramientas (*tecnologías*) (Cap. 3). A su vez, se han ligado estas tecnologías con las diferentes técnicas previamente, estableciendo diferentes conexiones entre ambas, pues no son conceptos aislados. Dentro las tecnologías existentes usadas en IPS se incluyen tecnologías como; óptica (infrarrojos (IR), luz visible (VCL) o dispositivos), acústica (ultrasonidos o audible), magnética, de radio-frecuencia (RF) e híbridas. Algunas tecnologías de RF son Bluetooth, banda ultra-ancha (UWB), red de sensores inalámbricos (WSN), red inalámbrica local (WLAN, IEEE 802.11), identificación por radio-frecuencia (RFID) y comunicación por campo cercano (NFC).

En la Figura 1.2 se representa la estructura básica de un sistema de posicionamiento en interiores. En ella se integran las diferentes técnicas y tecnologías para formar un sistema concreto. Con esta figura se intenta esclarecer la función que lleva a cabo cada elemento dentro de un IPS.

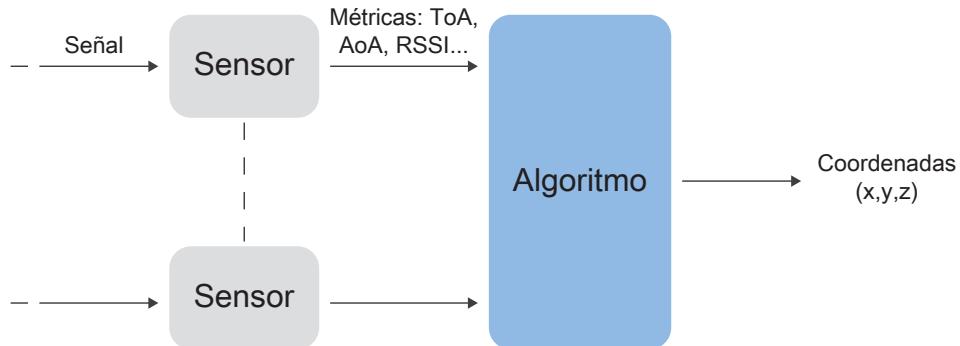


Figura 1.2: Estructura típica de un IPS [59].

La mayoría de sistemas existentes consisten en una solución híbrida, tanto de tecnologías como de técnicas, con el objetivo de cumplir requisitos más elevados de exactitud, precisión, complejidad, escalabilidad, privacidad, seguridad, usabilidad o coste. Estos requisitos son revisados durante el Capítulo 4 con el objetivo de plantear un marco común de comparación. Seguidamente, se ha establecido un modelo con estos criterios que permite evaluar las diferentes tecnologías y hallar el sistema que mejor se adapte a un servicio concreto. La metodología seguida durante la comparativa, y en general durante este estudio, también es explicada en este capítulo.

Por último, durante el Capítulo 5 se ha aplicado la taxonomía presentada, y sobre los resultados obtenidos, se ha aportado un posible sistema solución al problema concreto. La aplicación seleccionada también es explicada durante este capítulo (Sec. 5.1). Sobre la solución aportada hay que decir que no se pretende aportar un sistema íntegro con todo lo necesario para su implementación, sino una primera aproximación que permita también entender la metodología aplicada a la comparativa.

Finalmente, en el Capítulo 6 se exponen las conclusiones extraídas a lo largo del desarrollo del trabajo y se evalúan los objetivos iniciales propuestos. A mayores, se exponen una serie de posibles líneas futuras de trabajo que pueden surgir de este estudio.

# Capítulo 2

## Técnicas de posicionamiento en interiores

En los sistemas de posicionamiento en interiores, las “técnicas de posicionamiento” son utilizadas para determinar y estimar la posición de un objeto. Los sistemas de posicionamiento utilizan algoritmos que traducen las propiedades de señales recibidas a distancias y ángulos, y calculan la posición del objeto (ver Fig. 1.2.).

A pesar de que la mayoría de técnicas, algoritmos y elementos de los sistemas de posicionamiento en interiores no son nuevos, ya que fueron implementados con anterioridad en exteriores, su comportamiento es diferente en ambos entornos. Esto ha servido de estímulo para descubrir formas de aplicar de manera óptima las técnicas de posicionamiento en la determinación de la posición. Las dos técnicas de posicionamiento utilizadas son las **propiedades o métricas de la señal** y los **algoritmos o métodos de posicionamiento**, que se muestran en la Figura 2.1.

Sin embargo, debido a que las técnicas y tecnologías de posicionamiento pueden ser de diversa índole, solo aquellas innovaciones más relevantes para el propósito de este trabajo serán expuestas y exploradas en esta sección.

### 2.1. Métricas de la señal

Los sistemas de posicionamiento se pueden clasificar mediante las técnicas de medición de la señal que utilizan. Las propiedades de la señal son parámetros geométricos basados en métricas como el ángulo, la distancia o la intensidad para obtener la posición del objeto. Existen varias técnicas de medición de la señal, pero en esta sección nos centraremos en las preponderantes:

- Medición directa o física.
- Ángulo de llegada (AoA, *Angle of Arrival*).
- Tiempo de llegada (ToA, *Time of Arrival*).
- Diferencia de tiempos de llegada (TDoA, *Time Difference of Arrival*).
- Intensidad de señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indication*).

La precisión en el posicionamiento depende, en muchas ocasiones, de la precisión de la información recopilada, es decir, de la exactitud del valor de la propiedad de la señal medida.

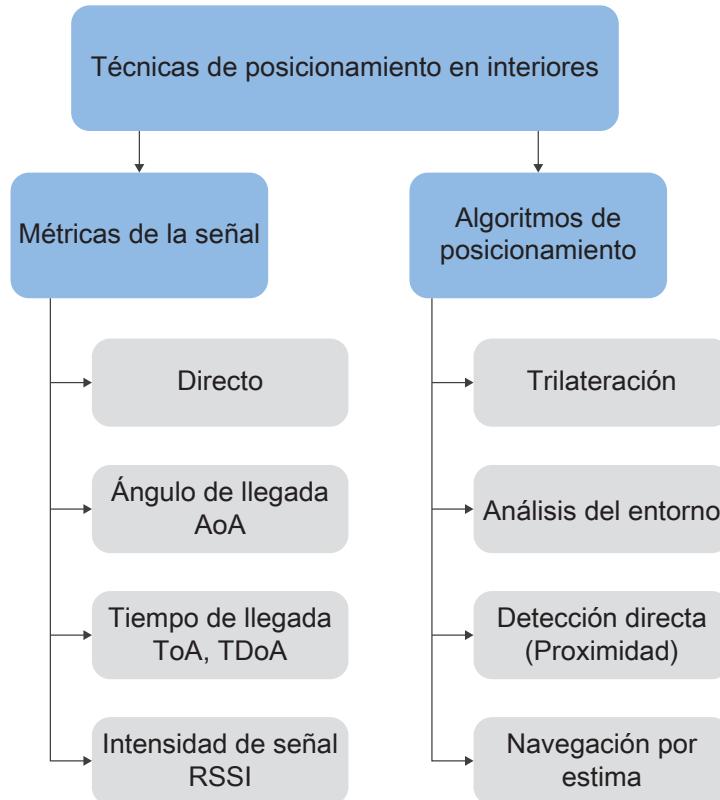


Figura 2.1: Clasificación de técnicas en IPS.

## Medición directa

La medición directa es una técnica sencilla de obtención de distancias utilizando una acción física o movimiento, a saber: un robot que extienda una sonda hasta tocar algo sólido o que tome medidas con una cinta métrica. Las mediciones de distancia directa son fáciles de entender pero difíciles de obtener automáticamente debido a las complejidades involucradas en la coordinación del movimiento físico autónomo.

## Ángulo de llegada

El ángulo de llegada (AoA) proporciona una medida del ángulo en el que se recibe una señal en un dispositivo de referencia. El dispositivo de referencia define una línea que parte desde su posición hasta la posición donde se supone que está el objeto, con tal ángulo medido. La combinación de varias líneas de diversos dispositivos de referencia permite ubicar al objeto en la intersección de tales líneas. Al menos dos puntos de referencia ( $P_1$  y  $P_2$ ) y dos ángulos ( $\theta_1$  y  $\theta_2$ ) son necesarios para posicionar un punto en el plano (ver Figura 2.2). La estimación de la posición sería la siguiente:

$$\begin{aligned}\hat{y} - y_1 &= (\hat{x} - x_1) \tan \theta_1 \\ \hat{y} - y_2 &= (\hat{x} - x_2) \tan \theta_2\end{aligned}\tag{2.1}$$

siendo  $x_1$  y  $y_1$  las coordenadas del punto de referencia  $P_1$ ,  $x_2$  y  $y_2$  las coordenadas del punto de referencia  $P_2$  y,  $\hat{x}$  y  $\hat{y}$  las coordenadas del punto desconocido  $S$ . Resolviendo las ecuaciones de 2.1, obtendríamos la posición del punto  $S(\hat{x}, \hat{y})$  [36].

$$\begin{cases} \hat{x} = \frac{x_1 \tan \theta_1 - x_2 \tan \theta_2 + y_2 - y_1}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \\ \hat{y} = \frac{(x_1 - x_2) \tan \theta_1 \tan \theta_2 + y_2 \tan \theta_1 - \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - y_1 \tan \theta_2} \end{cases} \quad (2.2)$$

La precisión del posicionamiento depende directamente de la calidad de la medición de los ángulos y las posiciones conocidas de los puntos de referencia.

La ventaja de esta técnica es que no es necesaria una sincronización en el tiempo entre las distintas referencias. Sin embargo, requiere un hardware complejo para determinar el AoA de manera precisa.

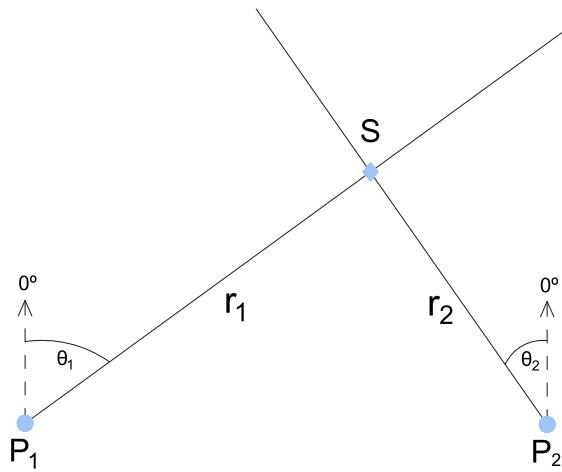


Figura 2.2: Posicionamiento 2D basado en la medida del AoA [36].

## Tiempo de llegada

El tiempo de llegada (ToA), también denominado tiempo de vuelo (ToF), es el tiempo que tarda la señal en ir desde el transmisor hasta el receptor. Si el receptor es capaz de obtener el ToA,  $t_i$ , será capaz de estimar su rango  $r_i$  haciendo uso de la velocidad de la luz en el vacío  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  [69] según:

$$r_i = ct_i \quad (2.3)$$

De esta forma, con distintos dispositivos de referencia combinando sus respectivos rangos es posible determinar la posición. El ToA describe círculos alrededor de los dispositivos de referencia y aunque dos círculos son suficientes para resolver las coordenadas en el plano, se necesita un tercero para deshacerse de la ambigüedad (ver Fig. 2.3).

En dos dimensiones, con  $N$  referencias conocidas,  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , con coordenadas cartesianas  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , la posición  $(\hat{x}, \hat{y})$  de  $S$ , un punto cualquiera, se puede determinar utilizando los rangos  $r_i$  [69, 39], calculados mediante la Ecuación 2.3, como:

$$\begin{aligned} (x_1 - \hat{x})^2 + (y_1 - \hat{y})^2 &= r_1^2 \\ (x_2 - \hat{x})^2 + (y_2 - \hat{y})^2 &= r_2^2 \\ &\vdots \\ (x_n - \hat{x})^2 + (y_n - \hat{y})^2 &= r_n^2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

En dos dimensiones para  $N \geq 2$ , el sistema de ecuaciones anterior está determinado, y resolviendo el mismo se podría hallar la posición del punto  $S$  [69, 22].

Debido a los errores en las medidas de ToA, ya sean pequeños debido al ruido y la precisión de la medición o grandes debido a los reflejos, las rutas múltiples o la dispersión de la señal, no podremos determinar un punto único como la solución, sino una región, dentro de la cual normalmente seleccionamos el punto considerado como la mejor conjetura.

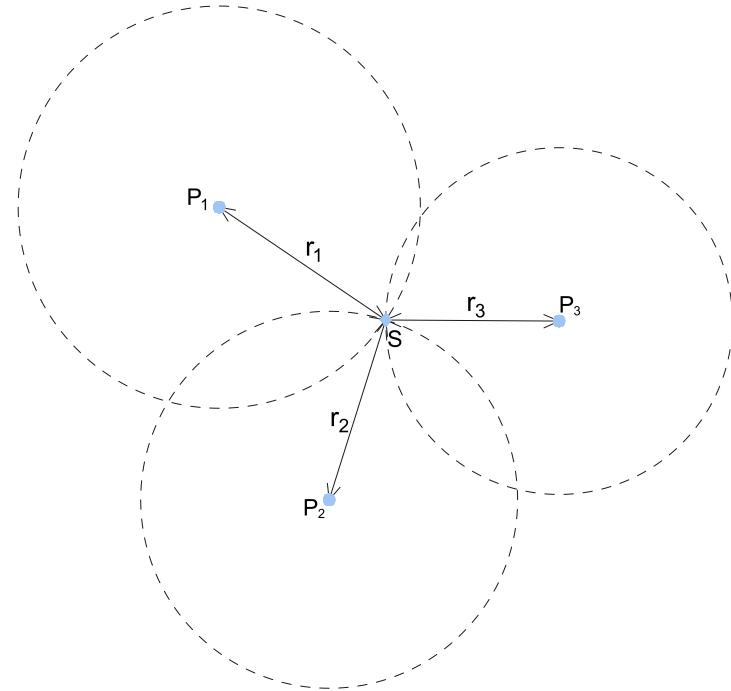


Figura 2.3: Posicionamiento 2D basado en la medida del ToA [69, 42].

Cabe destacar que para poder calcular la posición a través del tiempo de llegada, es necesario tener sincronía entre los emisores, pues es necesario conocer el tiempo inicial al transmitir. Además, en el contexto de los IPS, algunos de los problemas con ToA se agravan: primero, mientras que en GPS las posiciones de los satélites se conocen de antemano por sus parámetros orbitales, en IPS, este no es el caso, porque no hay una referencia general acordada. Segundo, para distancias muy cortas como las de interiores, las diferencias de tiempo serán extremadamente pequeñas para las señales de RF, por lo que se necesita una gran precisión.

## Tiempo diferencial de llegada

La diferencia de tiempos de llegada (TDoA) se relaciona con la ToA porque utiliza el tiempo de viaje desde el transmisor al receptor para estimar las distancias, pero a veces el tiempo de emisión es desconocido. De esta forma, la diferencia de tiempos entre cada receptor es utilizada para estimar la distancia a cada uno de ellos. El cálculo de la diferencia de tiempos elimina la necesidad de conocer el tiempo de transmisión. Así pues, en métodos ToA o cualquier otro método basado en el tiempo, los dispositivos deben estar sincronizados para alcanzar medidas precisas. Sin embargo, como TDoA no utiliza la distancia entre transmisor y receptor, el transmisor no tiene porque estar sincronizado con el receptor. La sincronización solo se requiere entre todos los receptores, dado que la distancia se calcula gracias a la diferencia entre tiempo-distancia.

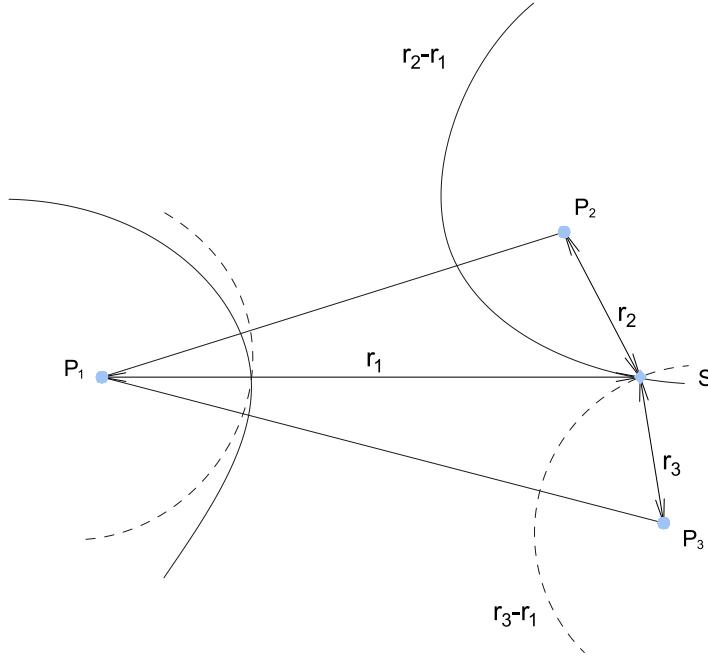


Figura 2.4: Posicionamiento 2D basado en la medida del TDoA [69, 42].

El posicionamiento en el plano de un objeto se puede estimar a partir de la intersección de dos o más mediciones de TDoA, como se muestra en la Figura 2.4. Dos hipérbolas se forman a partir de mediciones de TDoA en tres unidades de medición fijas ( $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$ ) para proporcionar un punto de intersección, que ubica el objeto  $S$ .

De forma similar a como sucedía con el ToA en la Ecuación 2.3, el rango de TDoA ( $r_{i1}$ ) se puede calcular siguiendo la siguiente expresión:

$$r_{i1} = r_i - r_1 = c(t_i - t_1) \quad (2.5)$$

donde  $t_i - t_1$  es el TDoA asociado al punto  $P_i$ . En dos dimensiones, con  $N$  referencias conocidas  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , con coordenadas cartesianas  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , la posición  $(\hat{x}, \hat{y})$  de un punto cualquiera  $S$ , se puede determinar utilizando los rangos  $r_i$  [69], calculados mediante la Ecuación 2.6:

$$\begin{aligned} (r_{21} + r_1)^2 &= x_2^2 + y_2^2 - 2x_2\hat{x} - 2y_2\hat{y} + r_1^2 \\ (r_{31} + r_1)^2 &= x_3^2 + y_3^2 - 2x_3\hat{x} - 2y_3\hat{y} + r_1^2 \\ &\vdots \\ (r_{n1} + r_1)^2 &= x_n^2 + y_n^2 - 2x_n\hat{x} - 2y_n\hat{y} + r_1^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Reorganizando términos, se obtiene:

$$\begin{aligned} -2x_2\hat{x} - 2y_2\hat{y} &= r_{21}r_1 + \frac{1}{2}(r_{21}^2 - x_2^2 - y_2^2) \\ -2x_3\hat{x} - 2y_3\hat{y} &= r_{31}r_1 + \frac{1}{2}(r_{31}^2 - x_3^2 - y_3^2) \\ &\vdots \\ -2x_n\hat{x} - 2y_n\hat{y} &= r_{n1}r_1 + \frac{1}{2}(r_{n1}^2 - x_n^2 - y_n^2) \end{aligned} \quad (2.7)$$

y sabiendo que:

$$r_1^2 = \hat{x}^2 + \hat{y}^2 \quad (2.8)$$

En dos dimensiones para  $N \geq 2$ , el sistema de ecuaciones anterior está determinado, y resolviendo el mismo con la Ecuación 2.8 se podría hallar la posición del punto  $S$  [69].

Como una mejora en ToA, TDoA elimina la sincronización del transmisor para el tiempo de llegada y, por tanto, reduce su complejidad. Además, TDoA también proporciona una mejora en la precisión.

## Intensidad de señal recibida

La intensidad de la señal recibida (RSSI) es la intensidad de campo de una señal en el punto de recepción. RSSI se mide en el receptor, y con este dato la distancia puede ser estimada mediante modelos de propagación de la señal u otros métodos (ver Fig. 2.5). En particular, modelos como la ecuación de propagación de Friis (Ec. 2.9 [17]) es utilizada con frecuencia [23]. En otras ocasiones, modelos más complejos (Modelo de Propagación Elíptico [91], EPM, o *Fuzzy Inference System* [75], FIS) son necesarios para determinar las pérdidas por propagación (PL, Path Loss).

$$P_R = P_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^n} \quad (2.9)$$

Donde  $P_R$  es la potencia de señal recibida o RSSI (en vatios, W),  $P_T$  la potencia de señal transmitida (en vatios, W),  $G_R$  la ganancia de antena recibida,  $G_T$  la ganancia de antena transmitida,  $\lambda$  la longitud de onda de la señal, la distancia  $d$  (en metros, m) y la constante de propagación de Friis  $n$ . De esta ecuación, la distancia es fácilmente obtenible conociendo el resto de términos, que son fijos (salvo el RSSI) según la tecnología utilizada por el sistema.

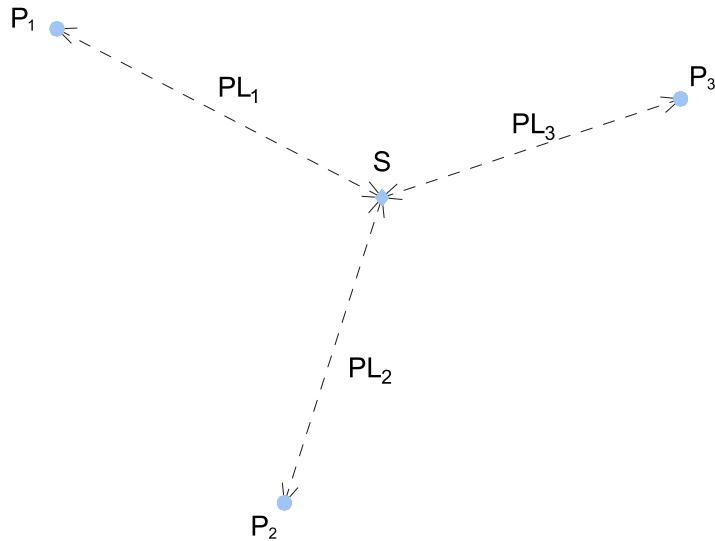


Figura 2.5: Posicionamiento 2D mediante el calculo de la RSSI [42].

Sin embargo, en entornos interiores donde es difícil obtener línea de visión directa (LoS), el RSSI y el posicionamiento pueden verse afectados por el multirayecto y las occlusiones, lo que disminuye la precisión.

Existen otras muchas métricas que no son descritas en este trabajo (RToF, PoA, PDoA, etc. [42]), pues la intención de este capítulo es introducir las técnicas más relevantes y utilizadas.

Propiedad	Métrica	Precisión	Coste	Complejidad
Directa	Distancia	Alta	Medio	Alta
AoA	Ángulo	Alta <sup>1</sup>	Alto	Alta
ToA	Distancia	Alta	Alto	Alta
TDoA	Distancia	Alta	Alto	Baja
RSSI	Atenuación	Media	Bajo	Baja

<sup>1</sup> A pequeña escala (*room level*). Para mayor cobertura la precisión decae.

Tabla 2.1: Resumen de las propiedades de la señal [67].

En resumen, las propiedades de la señal son un elemento importante para determinar la posición, ya que son necesarias en el cálculo y estimación de una posición. De estas propiedades dependen en parte parámetros importantes como la precisión, el coste o la complejidad del sistema resultante. En la Tabla 2.1, se resumen las características de las propiedades de la señal exploradas.

La propiedad de la señal utilizada con un algoritmo de posicionamiento determinará en gran medida la fuerza de la técnica de posicionamiento. Por ello, para usar la propiedad más apropiada, es importante entender los algoritmos de posicionamiento, que se presentan a continuación.

## 2.2. Algoritmos de posicionamiento

Los algoritmos de posicionamiento cómo calcular la posición de un objeto. En otras palabras, estos algoritmos traducen las propiedades de la señal grabada en distancias y ángulos, y luego calculan la posición real de un objeto. Por ejemplo, cuando se estima la distancia entre un objeto y los puntos de referencia, el algoritmo calcula y determina la posición del objeto (ver Figura 1.2). Tanto la propiedad de la señal como el algoritmo de posicionamiento trabajan juntos para determinar la posición de un objeto. El algoritmo de posicionamiento procesa la propiedad de la señal y genera una posición.

Los algoritmos de posicionamiento tienen ventajas y desventajas únicas, por lo que utilizar más de un tipo de algoritmo de posicionamiento al mismo tiempo mejorará la precisión y el rendimiento de la posición. Por lo tanto, existen varias métodos para determinar la posición utilizando información de orientación, rango o proximidad basada en la medición de señal. Las principales técnicas algorítmicas utilizadas en el posicionamiento son:

- Multilateración.
- Análisis por proximidad.
- Análisis del entorno (*fingerprinting*).
- Navegación por estima (navegación inercial, INS).

Las diversas propiedades de la señal se aplican dentro de los algoritmos de posicionamiento correspondientes.

## Multilateración

La multilateración utiliza la geometría para combinar las estimaciones de rango de diferentes dispositivos de referencia. Las estimaciones de rango podrían provenir de diferentes medidas, como RSSI, ToA, TDoA y AoA. Si se usan tres dispositivos de referencia en la combinación, entonces se llama trilateración o triangulación, en función de si se han utilizado distancias o ángulos. En concreto, estos métodos se han desarrollado en las Secciones 2.1 AoA (triangulación) y 2.1 ToA (trilateración) al introducir las métricas de la señal.

## Detección directa

Las técnicas por proximidad o detección directa consisten en determinar cuándo un objeto está “cerca” de una ubicación conocida, según lo registrado por un sensor dirigido específicamente a la detección por proximidad [28]. Hay dos principales enfoques para detectar la proximidad:

- Detectar un objeto con contacto físico a través de sensores táctiles, sensores de capacidad, y así sucesivamente, mediante medición directa.
- Detectar un objeto en un área de alcance de uno o más sistemas de identificación remota como Bluetooth o RFID, los cuales se introducirán más adelante (ver Fig. 2.6).

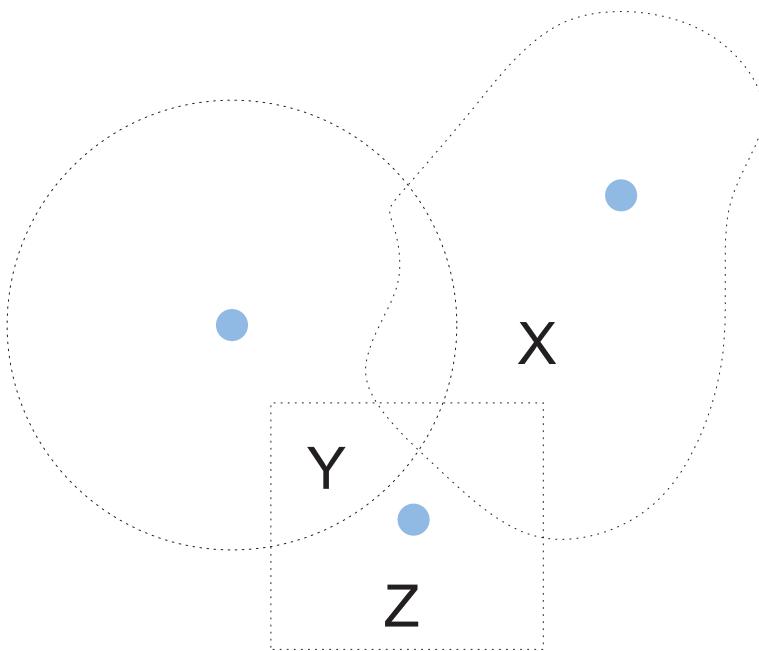


Figura 2.6: Esquema de detección por proximidad con sensores de diferente alcance [28].

## Análisis del entorno

El *fingerprinting* o análisis del entorno es un método utilizado para calcular ubicaciones aproximadas. El “entorno” puede ser de diferente naturaleza, desde cualquier fenómeno fisi-

co medible como señales Wi-Fi, Bluetooth o magnéticas, entre otras, hasta imágenes visuales capturadas con una cámara (Fig. 2.7).

Se compone de dos fases: entrenamiento y determinación de posición. En la fase de entrenamiento, se graba un mapa de valores de intensidad de señal observados desde diferentes ubicaciones. Luego, en la fase de determinación de posición, los valores de intensidad de la señal observados en un dispositivo de usuario se comparan con los valores del mapa utilizando algoritmos de reconocimiento de patrones para inferir la ubicación actual del usuario.

Los algoritmos más comunes son métodos probabilísticos [37], *k-nearest neighbor* ( $k - NN$ ) [34], redes neuronales [3], máquinas de vectores de soporte (SVM, *Support Vector Machine*) [6], [88] y polígono de M-vértices más pequeño (SMP, *smallest M-vertex polygon*) [62].



Figura 2.7: Análisis de una imagen visual como técnica *fingerprinting* [28].

Por último, es importante mencionar una técnica ampliamente utilizada en robótica conocida como localización y mapeo simultáneo (SLAM, *Simultaneous Localization and Mapping*) [14], [7]. SLAM comprende la capacidad de colocar un vehículo autónomo en una ubicación desconocida con un entorno desconocido, la construcción de un modelo (el mapa) utilizando solo las observaciones relativas del entorno, y el uso este mapa simultáneamente para navegar. La necesidad de utilizar un mapa del entorno es doble. Primero, el mapa a menudo se requiere para soportar otras tareas; por ejemplo, un mapa puede informar la planificación de la ruta o proporcionar una visualización intuitiva para un operador humano. En segundo lugar, el mapa permite limitar el error cometido al estimar el estado del robot; por ejemplo, el robot puede “restablecer” su error de localización al volver a visitar áreas conocidas.

La principal ventaja de SLAM es que elimina la necesidad de infraestructuras artificiales o un conocimiento topológico del entorno a priori. Una solución al problema de SLAM sería de un valor inestimable en una gama de aplicaciones en las que no se puede obtener una posición absoluta o información precisa del mapa, incluidos, entre otros, la exploración planetaria autónoma, los vehículos submarinos autónomos, los vehículos autónomos aéreos y los todo-terreno autónomos.

## Navegación por estima

La estimación de una posición futura dada una inicial y una velocidad y dirección es, de hecho, uno de los métodos más antiguos para la navegación, a menudo llamado *dead reckoning*

o navegación inercial. Un problema obvio con la navegación por estima es la acumulación progresiva de errores, ya que un pequeño error en la dirección podría significar un gran error a medida que se viaja una gran distancia.

En los sistemas modernos, los métodos iniciales utilizan acelerómetros y giróscopos y, en general, combinan su información con otros sensores para lograr un buen rendimiento. Los acelerómetros se pueden usar para determinar las modificaciones en la posición del objeto cuando se detecta una aceleración en una dirección determinada. Por supuesto, esta es una estimación muy aproximada, que puede mejorarse utilizando un giróscopo para cambios de dirección.

En la Tabla 2.2 se resumen las características principales de los algoritmos presentados previamente.

<b>Algoritmo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Precisión</b>	<b>Coste</b>	<b>Complejidad</b>	<b>Otros</b>
Triangulación	AoA	Alta <sup>a</sup>	Bajo	Baja	
Trilateración	ToA/TDoA	Alta	Alto	Alta	Sincronización requerida
Detección directa	RSSI	Alta	Alto	Alta	Alta densidad de readers
Análisis del entorno	RSSI	Media	Alto	Alta	Alto rendimiento y baja velocidad
Navegación por estima	-	Alto	Bajo	Baja	Sensible a errores

<sup>a</sup> A pequeña escala (*room level*). Baja precisión, alto coste y alta complejidad según ampliamos el área de cobertura.

Tabla 2.2: Resumen de los algoritmos de posicionamiento [67].

# Capítulo 3

## Tecnologías para posicionamiento en interiores

En la siguiente sección, presentamos una descripción de las tecnologías IPS siguiendo los esquemas presentados (Fig. 3.1), acompañados de fortalezas y debilidades destacables de cada tecnología.

Para abordar de forma coherente las tecnologías IPS, procedemos a clasificarlas previamente. Dicha clasificación se puede hacer utilizando varios criterios, uno de los cuales es el tipo de señal utilizada para el posicionamiento. De esta forma, distinguimos señales **ópticas, acústicas, magnéticas, de radio frecuencia o híbridas**.

Además, para cada tecnología abordada en este capítulo, se tratarán las diferentes configuraciones que puede tener una misma tecnología (activa, pasiva, etc.), las fortalezas y debilidades destacables y se presentarán una serie de sistemas, de diferente grado de madurez (estudios, patentes, soluciones comerciales, etc.) que se consideran relevantes para los IPS.

### 3.1. Óptica

Aunque las señales ópticas son de hecho solo una forma de radiación electromagnética, se han separado de las ondas de radio, porque las tecnologías específicas son diferentes, así como sus ventajas y desafíos; por ejemplo, las señales ópticas utilizadas en tecnologías de localización están restringidas por línea de visión.

Como tecnologías ópticas se distinguen los infrarrojos y la luz visible. Además, se ha aprovechado esta clasificación para tratar en este apartado las tecnologías ópticas no basadas en características radio de la señal sino en dispositivos ópticos, es decir, cámaras y sensores láser.

#### Infrarroja

La tecnología de infrarrojos (IR) para IPS utiliza radiación electromagnética con longitudes de onda superiores al espectro de luz visible. Un sistema simple de infrarrojos está compuesto por un diodo emisor de luz infrarroja, que emite una señal infrarroja como ráfagas de luz no visible, y un receptor fotodiodo para detectar y capturar los pulsos de luz, que luego se procesan para recuperar la información. El posicionamiento infrarrojo se puede utilizar en configuraciones activas o pasivas.

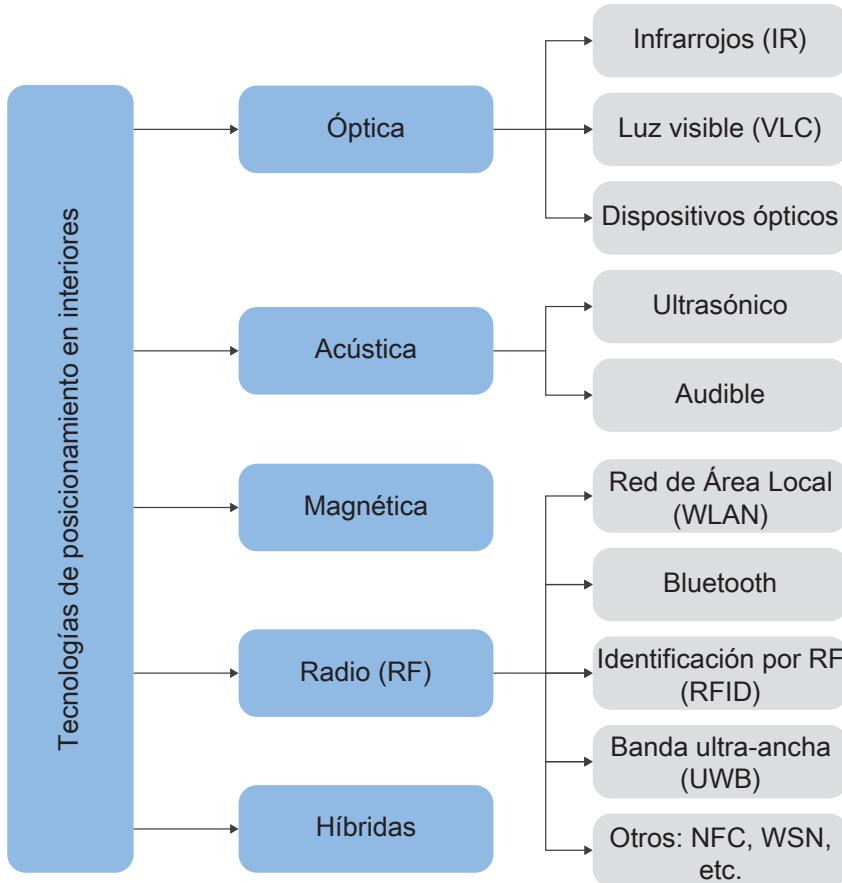


Figura 3.1: Clasificación de tecnologías en IPS.

Cabe destacar que uno de los primeros sistemas de posicionamiento en interiores fue un sistema basado en tecnología IR con una configuración activa, *Active Badge* desarrollado por *Want et al.* [85]. Este es un sistema ampliamente utilizado para la ubicación de objetos o personas que lleven una etiqueta, en una red de sensores IR conectados a un servidor centralizado [85]. Existen sistemas más modernos basados en esta tecnología como el propuesto por *Gorostiza et al.* [25].

Los sistemas con configuración pasiva prescinden del uso de etiquetas y en su lugar utilizan sensores térmicos para detectar radiación infrarroja por proximidad. Estos sensores no alcanzan los niveles de precisión y rendimiento de la configuración activa.

La fiabilidad del sistema IR se ve afectada por muchas características de la señal óptica emitida, como su directividad, así como su forma de reaccionar a los obstáculos, como la reflectividad y la dispersión. La mayoría de los sistemas de IR requieren una línea de visión directa (*LoS, line of sight*) desde el emisor hasta el sensor. Por supuesto, en el contexto de los sistemas IR IPS, el requisito de la eliminación de LoS es una gran desventaja, ya que carece de áreas de no detección que están ocultas por el transmisor o el sensor, lo que disminuye la usabilidad del sistema.

Para un rango a nivel de sala el coste asociado es muy bajo. Sin embargo, conforme escalamos en la cobertura del sistema, son necesarios mas receptores para mantener la precisión. Como resultado, la complejidad y el coste de la infraestructura se verían aumentados.

## Luz visible

La comunicación por luz visible (VLC, *Visible Light Communication*) es una tecnología que utiliza luz visible para transmitir datos. La transmisión de datos mediante luz visible es posible debido a la capacidad de la fuente de luz para encenderse y apagarse en intervalos muy cortos. Este parpadeo puede ser tan rápido que no puede ser percibido por los ojos humanos y puede usar una variedad de métodos de modulación.

Todos los sistemas basados en VLC mantienen una configuración pasiva, debido a que las lámparas son pesadas y tienen un consumo elevado [44, 90]. La configuración consiste en que cada una de las lámparas fijas tiene una codificación de parpadeo diferente, por lo que el fotosensor recibe la luz y compara la modulación con los esquemas de codificación conocidos. Finalmente, determina cuál es el dominante, asociando la ubicación del sensor con la proximidad de la lámpara correspondiente.

Una ventaja de tal disposición es la no intrusividad. Se ha considerado VLC para IPS debido a que permite la reutilización de la infraestructura de luz artificial ya disponible, por lo que el coste de implementación sería bajo para coberturas bajas. Conforme la cobertura aumenta, la complejidad y el coste aumentaría. Aunque se puede usar cualquier tipo de lámpara, las luces LED son las más apropiadas. Muchas de las soluciones comerciales (p.e., *Philips* [57]) usan bombillas dedicadas, lo que aumenta el coste del sistema.

## Dispositivos ópticos

Entendemos por dispositivos tecnológicos ópticos a aquellos sistemas ópticos que, valiéndose de cualidades ópticas de la señal, permiten capturar información del entorno. Distinguimos dos dispositivos, cámaras y láser.

## Cámara

Existen multitud de cámaras; estáticas, dinámicas, fotográfica, infrarroja, etc. A continuación, se presenta una clasificación según la metodología utilizada en la obtención de la posición [50], mencionando brevemente aquellas que resultan más relevantes para este estudio:

### Cámaras de flujo óptico

Las cámaras de flujo óptico (*optical flow*) se utilizan para la detección de velocidad, acimut e incremento de posición al comparar un conjunto de imágenes consecutivas. Los rendimientos en precisión están relacionados con el sensor y el algoritmo considerados. Las cámaras de flujo óptico se caracterizan por su tamaño pequeño y peso ligero, con requisitos limitados de capacidades computacionales y un coste aceptable (generalmente dentro de los 100€ [41]). Existen algoritmos ampliamente extendidos para extraer la posición gracias mediante *optical flow*, la implementación de estos métodos puede comprobarse en los estudios realizados por *Gageik et al.* [20], por *McGuire et al.* [51], o por *Moshe et al.* [53].

### Seguimiento de movimiento

Los sistemas de seguimiento de movimiento (*motion tracking*) consisten en observar un objeto móvil con una o varias cámaras estáticas en tiempo real para determinar la posición del objeto haciendo uso de marcadores reflejados para detectar datos de posición, velocidad y

orientación [47, 55].

A pesar de sus altos rendimientos, los sistemas de movimiento de la cámara necesitan una infraestructura personalizada y una calibración periódica, que implican un alto coste (30.000€ aprox. [41]).

Debido a la limitación asociada al coste han surgido versiones de bajo precio y con precisión reducida como los propuestos por *Mustafah et al.* [54], o por *Tisse et al.* [79].



Figura 3.2: Configuración de los sistemas *motion tracking* [78].

### Navegación basado en visión

El enfoque de navegación basado en visión (*vision-based navigation*) consiste en una secuencia de imágenes tomadas por una cámara a lo largo de una determinada ruta. En una fase inicial, se captura la ruta, creando una base de datos con las imágenes tomadas en la ejecución. Tras analizar la secuencia de visualización, un usuario puede estimar su propia posición al tomar una imagen de su entorno y comparar haciendo coincidir con las imágenes almacenadas en la secuencia de visualización.

Se conoce como odometría visual (VO, *visual odometry*) el proceso de estimar el movimiento de un agente utilizando solo la entrada de una o varias cámaras conectadas a él [70]. La VO tiene muchas variantes: podría involucrar 6 grados de libertad o movimientos más restringidos (como en el caso de un vehículo con ruedas en un piso plano) y podría hacerse con la ayuda de un modelo como un mapa, ya sea disponible previamente ([84], [11]) o construida cuando la cámara se está moviendo (también conocida como SLAM, *Simultaneous Location and Mapping* [21], [92]).

### Navegación basada en marcadores

Los sistemas de posicionamiento óptico que dependen completamente de las características naturales de las imágenes carecen de robustez, en particular en condiciones con iluminación variable. Con el fin de aumentar la robustez y mejorar la precisión de los puntos de referencia, se utilizan marcadores codificados dedicados para sistemas con exigentes requisitos de posicionamiento.

Existen diferentes tipos de marcadores en forma de anillos concéntricos, códigos de barras o patrones que consisten en puntos de colores (ver Fig. 3.3). Existen versiones reflectantes y no reflectantes.



Figura 3.3: Diferentes marcadores usados en la navegación basada en marcadores.

Los sistemas de navegación basada en marcadores (*marked-based navigation*) utilizan marcadores ya que proporcionan tres propósitos para el desarrollo algorítmico:

- Simplificación de la detección automática de puntos correspondientes.
- Introducción de la escala del sistema.
- Distinción e identificación de objetivos mediante el uso de un código único para cada marcador.

Este tipo de sistemas disponen de dos configuraciones. Si los marcadores se encuentran en el entorno y el objeto a posicionar lleva el dispositivo óptico, el sistema se considera “pasivo”. En cambio, si el objeto lleva la cámara y en el entorno se encuentran los marcadores el sistema sería “activo”.

Con el objetivo de ejemplificar este tipo de posicionamiento, se agrega el estudio realizado por *Benini et al.*, un sistema híbrido que utiliza marcadores para parte de su posicionamiento [4].

## Láser

Los sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*), se pueden clasificar en dos categorías: distanciómetro y escáner. El primero se caracteriza por un único rayo láser, proporcionado por el emisor del sensor y reflejado por obstáculos. El tiempo de llegada (ToA) se utiliza para medir una distancia de un solo punto. Los costes del distanciómetro varían según el rendimiento considerado, pero se mantienen dentro del rango de 100€ a 1000€ [41]. Por el contrario, los escáneres permiten adquirir información de la nube de puntos gracias a los sistemas de dirección controlada o sistemas de espejo. Los datos de la nube de puntos incluyen la distancia de los obstáculos, según el ToA, los ángulos de orientación, el nivel de reflexión de la superficie y las coordenadas del GPS (solo para los sensores georreferenciados). Además, la gestión de la nube de puntos requiere capacidades computacionales adecuadas. Finalmente, los escáneres son más caros que el distanciómetro: el coste varía desde 1,000€ hasta 30,000€ [41]. *Fröhlich y Mettenleiter* proponen en su estudio los principales escáneres en el mercado [18], entre los que destacan *Velodyne* [81] y *Hokuyo* [31].

Entre las soluciones en el mercado se destaca la desarrollada por *Nikon Metrology* [58], conocida como iGPS (*indoor Global Positioning System*) [71]. El nombre del sistema es engañoso, pues el funcionamiento del mismo es diferente a su contraparte en exteriores (GPS).

El láser infrarrojo o LED son las principales tecnologías utilizadas por los sensores LiDAR. El alto precio de estos sistemas viene justificado por las muy elevadas precisiones conseguidas, normalmente inferior al milímetro [49]. Si bien los láseres permiten un rango de medición largo de un solo punto, hasta 100 m, las dimensiones y el peso hacen que el sensor LiDAR láser no sea adecuado para aplicaciones de UAV ligeras. Los LED infrarrojos, en cambio, suelen ser más ligeros, más pequeños y más baratos que el láser; experimentan menos consumo de energía, sin embargo, sus prestaciones también son limitadas debido a un alcance más reducido del sensor.

## 3.2. Acústica

Las señales de sonido, que consisten en ondas de presión que se propagan en el aire, se benefician del hecho de que el sonido viaja a una velocidad mucho más lenta que las señales electromagnéticas, lo que permite la medición del tiempo entre la emisión y la llegada de una señal mucho más fácilmente.

El tiempo de emisión a menudo se mide transmitiendo simultáneamente una señal de radio y una señal de sonido, ya que la señal de radio llega al sensor casi instantáneamente y la señal de sonido llega al sensor más tarde, por lo que la diferencia entre estos dos tiempos se puede utilizar para calcular la distancia. Por supuesto, también existe la opción de usar ToA o TDoA, también con las ventajas de una señal lenta.

Dentro de las tecnologías acústicas, se distinguen los ultrasonidos y las señales audibles:

### Ultrasónica

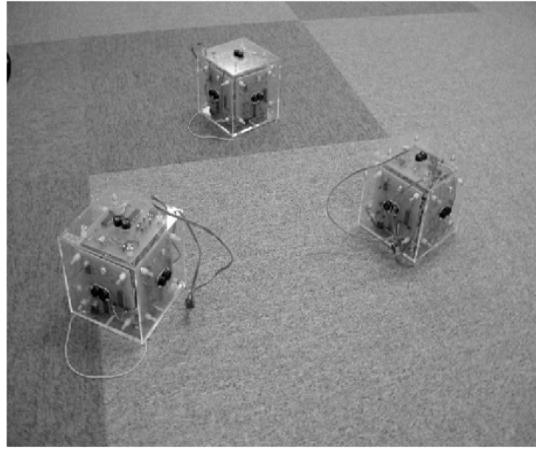
Los sistemas basados en el posicionamiento ultrasónico utilizan frecuencias de sonido superiores al rango audible (más allá de 20 KHz) para determinar la posición del usuario utilizando el tiempo necesario para que una señal ultrasónica viaje desde un transmisor a un receptor. Una ventaja evidente de las señales de ultrasonido contra señales audibles es que los primeros no son detectables por los humanos, mientras que los últimos serían molestos. Muchos son los sistemas IPS consolidados que utilizan esta tecnología entre los que destacan *Active Bat* [86], *Cricket* [63] y *DOLPHIN* [19, 52].

Los sistemas de ultrasonido, como muchos otros IPS, pueden ser “activos” o “pasivos”. Sistemas como *Active Bat* poseen una configuración activa, en el que se utiliza una serie de micrófonos fijos en el entorno y una etiqueta que lleva el objeto. En cambio, la configuración pasiva consiste en una serie de transmisores (etiquetas) en el entorno y un receptor (micrófono) llevado por el objeto. Esta estructura es la utilizada por los sistemas *Cricket* y *DOLPHIN*.

En ambos casos, la ubicación del usuario se calcula principalmente mediante multilateración, se necesitan al menos 3 micrófonos o balizas para encontrar la posición del objeto. *Cricket* utiliza también métodos por proximidad para estimar la localización.

Un sistema comercial actual utilizado en robótica es *Marvelmind* [65] que obtiene una gran precisión mediante una configuración pasiva y multilateración.

En general, los sistemas pasivos consiguen mejores resultados en relación a la escalabilidad y la precisión debido a que al aumentar el número de etiquetas se producen colisiones entre las señales transmitidas.



(a) Balizas DOLPHIN [19, 52].



(b) Balizas Marvelmind [65].

Figura 3.4: Balizas utilizadas en sistemas de ultrasonidos.

## Audible

También es posible utilizar señales de sonido audibles para codificar información para sistemas de localización. Por supuesto, la ingenua idea de solo emitir un sonido audible artificial tiene demasiados inconvenientes, principalmente que molestaría a los humanos cercanos. Pero existen esquemas más sofisticados, como la marca de agua sobre un sonido ya disponible, como la música en centros comerciales y otros lugares públicos de una manera no detectable para el oído humano.

La totalidad de estos sistemas utilizan configuración pasiva y la posición es obtenida mediante multilateración. Beep [48], BeepBeep [61] o GuoGuo [43] son un ejemplo de sistemas que utilizan esta tecnología.

## 3.3. Magnética

Si bien existen algunos enfoques para la localización en interiores utilizando campos magnéticos generados artificialmente, la mayoría de los sistemas modernos utilizan la fuerza y/o la orientación del campo magnético natural de la Tierra para realizar el posicionamiento. Debido a esto, durante este trabajo solo vamos a considerar los sistemas basados en los recursos naturales de la Tierra y su campo magnético.

Los IPS magnéticos utilizan magnetómetros para medir las variaciones del campo magnético, que se utilizará para determinar la posición del objeto. La estimación de la posición se realiza comúnmente a través de métodos tales como *fingerprinting* [27] aunque también existen sistemas que usan técnicas de multilateración con campos magnéticos artificiales, los cuales no abordaremos en este estudio.

Aunque pueda parecer una técnica actual, el posicionamiento mediante campos magnéticos es una práctica que se lleva realizando desde hace años [64]. Existen sistemas comerciales que utilizan esta tecnología, como *IndoorAtlas* [45] que utiliza *fingerprinting* magnético junto con otras tecnologías para extraer la localización.

Aunque estos sistemas carezcan de una estructura costosa y no sufren por errores por línea de visión directa, tienen otras desventajas. Los sistemas se ven limitados en su cobertura, la cual aumentar supone incrementar en gran medida la complejidad y el coste del sistema. Además, el *fingerprinting* magnético se ve afectado por las estructuras metálicas de los edificios que

reduce la precisión obtenida.

### 3.4. Radio frecuencia

Las tecnologías de radio frecuencia (RF) son aquellas que utilizan señales RF para determinar la posición del objeto. El término RF, que está relacionado con la frecuencia de las señales de radio, tiene los beneficios de que su señal puede penetrar paredes y obstáculos que conducen a un área de cobertura más amplia, así como también reutiliza las infraestructuras de RF existentes, lo que resulta en una reducción de costes.

Estos sistemas hacen uso de las técnicas de multilateración, *fingerprinting* y de detección por proximidad. En esta sección se abordan:

- Red inalámbrica de área local (WLAN).
- Bluetooth.
- Identificación por radio-frecuencia (RFID).
- Banda ultra-ancha (UWB).
- Comunicación por campo cercano (NFC).
- Red de sensores inalámbricos (WSN).

Las diversas tecnologías de posicionamiento RF tienen fortalezas y limitaciones únicas, que las siguientes subsecciones resaltan.

#### Red inalámbrica de área local

La red inalámbrica de área local (WLAN, *Wireless Local Area Network*), también conocida como Wi-Fi, es una tecnología para la transmisión y recepción de datos mediante ondas electromagnéticas, lo que proporciona conectividad inalámbrica dentro de un área de cobertura. Fue definido por el estándar IEEE 802.11 como sustituto al par trenzado, la fibra coaxial o fibra óptica utilizada para transmitir datos en una LAN convencional.

Mientras que para el posicionamiento en el exterior es suficiente para obtener la identificación de una estación base detectable (es decir, el nombre simbólico o SSID de un punto de acceso), en la ubicación en el interior es necesario ir más allá de la mera identificación del punto de acceso para lograr una mejor precisión. Normalmente se utilizan dos enfoques para localizar a un objeto que utiliza la tecnología WLAN:

- Multilateración: mediante el RSSI de varias bases Wi-Fi conocidas se puede resolver la posición [50].
- *Fingerprinting*: un patrón de bases de Wi-Fi conocidas con sus RSSI se compara con una base de datos de patrones conocidos asociados con ubicaciones [2, 89]. Otra opción, es usar el modelo de propagación de una o varias antenas conocidas, calculando la distancia a la base conocida.

Por supuesto, esto requiere una actividad de mapeo previa extensa y almacenar patrones de Wi-Fi para cada punto mapeado para construir la base de datos.

Una de las primeras propuestas con esta tecnología fue la desarrollada por *Bahl et al.*, conocida como RADAR [2]. Esta propuesta utiliza el *fingerprinting* junto con los patrones de RSSI y la ayuda del algoritmo *k-NN*. Existen otros muchos sistemas inspirados en este con variaciones del algoritmo, de los patrones registrados, etc., pero con resultados similares [89]. Existen también soluciones que utilizan multilateración para determinar la posición [50]. Sin embargo, debido a la precisión obtenida mediante RSSI, son más comunes los sistemas híbridos que utilizan una combinación de ambos enfoques [32].

## Bluetooth

Bluetooth es una tecnología de comunicación inalámbrica que utiliza información incorporada digitalmente en las señales de radiofrecuencia. Originalmente pensado para el intercambio de datos en distancias cortas, fue definido por el estándar IEEE 802.15.1. Los principales objetivos de la tecnología son facilitar la comunicación entre dispositivos móviles y fijos o dos móviles, para eliminar cables y conectores entre dispositivos y para facilitar la sincronización de datos entre dispositivos personales.

La tecnología Bluetooth se ha considerado para los sistemas de posicionamiento en interiores como un competidor de Wi-Fi, en particular desde la adopción generalizada de Bluetooth Low Energy (BLE) [24], debido a su disponibilidad, de bajo coste y muy bajo consumo de energía, lo que permite que los emisores fijos funcionen con baterías durante varios meses o incluso años.

Los sistemas de posicionamiento basados en Bluetooth también son llamados *Bluetooth Local Positioning Application* (BLPA) [38]. Al igual que la tecnología anterior, existen dos enfoques para posicionar un objeto. Por un lado, la ubicación se puede estimar mediante multilateración y RSSI. Por otro lado, mediante *fingerprinting* puedo extraer la posición [38, 26].

Entre las soluciones comerciales encontradas destaca *Apple's iBeacon* [33], una propuesta muy madura en el mercado, basada en BLE [24].

## Identificación por radio-frecuencia

La identificación por radiofrecuencia (RFID) es una tecnología que utiliza ondas de radio para hacer que un circuito especializado produzca una respuesta que contenga un identificador único. Un sistema RFID consta de lectores RFID y etiquetas RFID. Las etiquetas se pueden clasificar según la forma en que obtienen energía para responder a un lector RFID: pueden ser “pasivas” si responden a un lector utilizando solo la pequeña energía emitida por el lector, recolectada por medio de una pequeña antena, o “activas” si tienen su propia fuente de alimentación y transmiten periódicamente su señal de identificación. Algunas etiquetas RFID son “semipasivas”, utilizan una pequeña batería y transmiten solo cuando se detecta una señal del lector.

Los sistemas RFID se han utilizado para el posicionamiento, especialmente cuando la ubicación del usuario no se necesita saber todo el tiempo, solo cuando se pasa por importantes lugares de control. En estos casos, la ubicación del objeto a menudo se da en forma de una ubicación lógica, como, por ejemplo, en el arco, dentro de la sala, etc., y no en un sistema de coordenadas.

Son posibles dos variantes de posicionamiento del objeto: en una de ellas, el objeto lleva la etiqueta, y la etiqueta es leída por los lectores en la infraestructura. La otra opción es que el usuario lleve un lector, y muchas etiquetas están incrustadas en lugares clave de un área de-

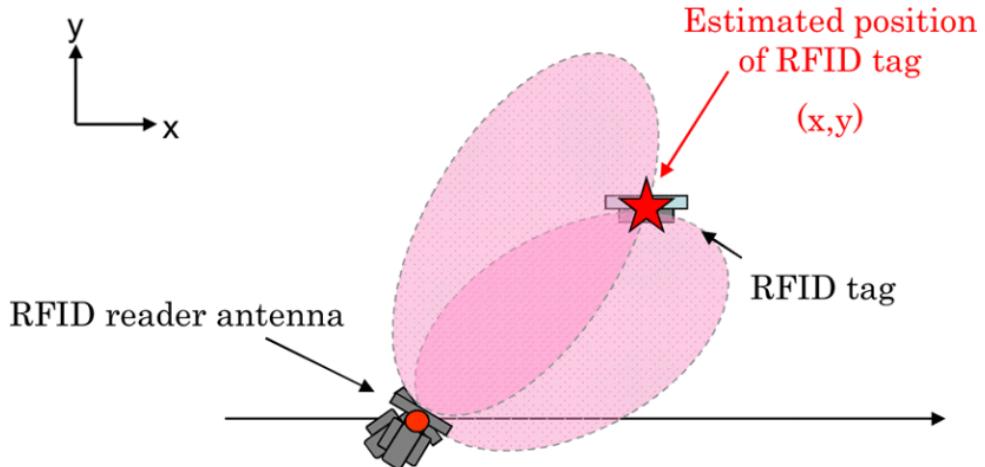


Figura 3.5: Esquema de funcionamiento de un sistema RFID pasivo [80].

terminada. La primera opción ha sido la más popular por una buena razón: las etiquetas son baratas y muy ligeras, mientras que los lectores son voluminosos y muy caros.

Algunos sistemas populares de localización RFID son Spot ON [29] y LANDMARC [56]. LANDMARC calcula la posición mediante detección por proximidad (RSSI) y *fingerprinting* haciendo uso del algoritmo *k-NN*. En cambio, Spot ON obtiene la posición mediante multilateración RSSI.

## Banda ultra-ancha

La tecnología de banda ultra-ancha (UWB, *Ultra-wide band*) se basa en la transmisión de formas de ondas electromagnéticas formadas por una secuencia de pulsos muy cortos que utilizan un ancho de banda muy grande (ver Fig. 3.6).

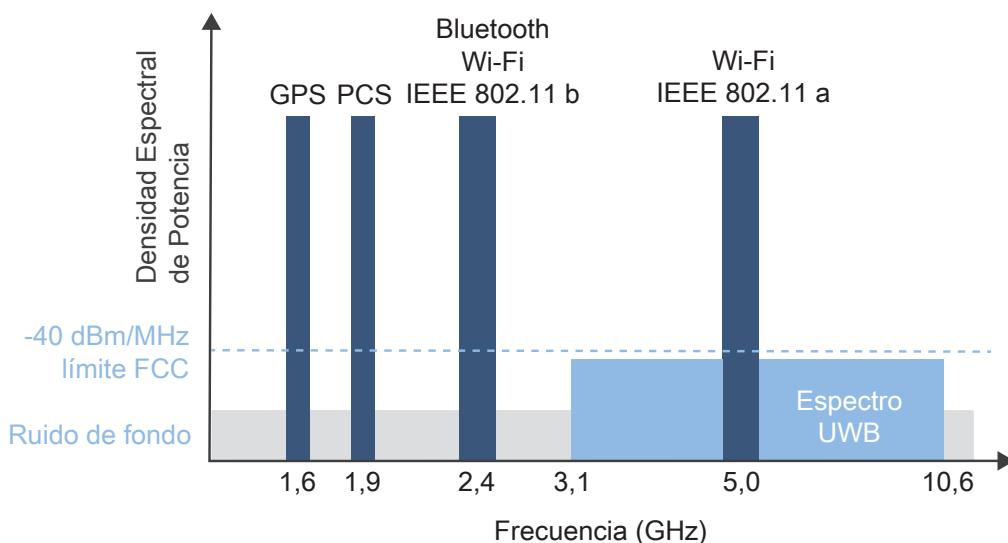


Figura 3.6: Espectro regulado de UWB [49].

Se ha considerado la tecnología UWB para los sistemas de posicionamiento en interiores porque las técnicas UWB ofrecen distintas ventajas en la precisión de la medición del tiempo de vuelo, la no necesidad de linea de visión directa (LoS), la inmunidad de múltiples rutas y los requisitos de baja potencia para una operación prolongada. En la gran mayora de sistemas, el posicionamiento se realiza mediante multilateración con ToA, TDoA y/o AoA, aunque también existen sistemas que realizan el posicionamiento mediante *fingerprinting*.

Un ejemplo de un sistema comercial basado en UWB es Ubisense Real-Time Location System (RTLS) [73, 46], el cual utiliza TDoA y AoA mediante multilateración para posicionar la posición. Otras alternativas serían BeSpoon [68], Decawave [12, 8] y ATLAS [76, 77]. Las dos primeras proponen otras soluciones comerciales, mientras que la última, ATLAS, propone una solución de código abierto.

## Comunicación por campo cercano

La tecnología de posicionamiento por comunicación por campo cercano (NFC, *Near Field Communication*) es como un sistema de posicionamiento basado en RFID. La diferencia radica principalmente en la distancia de comunicación, el uso de dispositivos móviles por NFC y el cálculo de la posición en un servidor por el sistema RFID. La principal desventaja con el sistema de posicionamiento NFC es que no hay una actualización automática de la posición del usuario. En otras palabras, no hay posicionamiento en tiempo real durante la navegación.

El sistema de posicionamiento NFC consta de tres componentes principales, una etiqueta pasiva, un lector y una base de datos. Mientras que el lector, que es un dispositivo móvil NFC, lee el contenido de la etiqueta pasiva, la base de datos es una ubicación centralizada donde se almacenan los datos del mapa interior de un edificio. El sistema de posicionamiento NFC es un área novedosa en IPS que está ganando terreno gradualmente.

El sistema de posicionamiento NFC involucra un dispositivo móvil NFC que toca a las diversas etiquetas NFC distribuidas dentro de un edificio para determinar la posición actual. En el punto donde el usuario toca una etiqueta, la ubicación de la etiqueta se toma como la ubicación del usuario en ese momento. Esta es una manera simple, efectiva y precisa de determinar una ubicación. Además, la reducción de costes, así como la mejora de la velocidad, la precisión y la eficacia, son los objetivos del desarrollo de un sistema de posicionamiento.

## Red de sensores inalámbricos

Otra tecnología empleada en los sistemas de posicionamiento de RF es la red de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Network*). Una WSN está compuesta por un grupo de sensores colaborativos con infraestructuras de comunicación para el monitoreo y registro de condiciones físicas o ambientales, como temperatura, sonido, presión, humedad, luz y viento, para la organización y transmisión de datos a una ubicación central o servidor a través de una WLAN. Una WSN consta de pocos o varios nodos de sensores que son pequeños, livianos y portátiles. El coste del sensor es variable y depende de su consumo de energía, velocidad computacional, ancho de banda y memoria.

El sistema WSN determina y rastrea la posición de una persona o un objeto utilizando señales de las mediciones tomadas por nodos de sensores conectados en red en posiciones conocidas en un edificio. Los sistemas de posicionamiento basados en WSN se pueden implementar de tres maneras, basados en distancia (multilateración), basados en proximidad y basados en *fingerprinting*.

En general, los sistemas basados en distancia tienen una mayor precisión de posición. Sin embargo, estos sistemas tiene una configuración compleja, lo que resulta en un alto coste. Por lo tanto, un despliegue a gran escala no es práctico.

En general, los algoritmos de posicionamiento que utilizan WSN determinan la posición de los nodos del sensor utilizando el conocimiento de las posiciones absolutas de unos pocos sensores y mediciones entre sensores. Además, los sistemas de posicionamiento basados en WSN son difíciles de implementar debido a las limitaciones experimentadas con el sensor con respecto al rango de comunicación, la potencia de procesamiento, la eficiencia energética, la capacidad de respuesta, la robustez, la autoconfiguración y los recursos informáticos.

ZigBee, un protocolo estándar de comunicación inalámbrica IEEE 802.15.4, es un dispositivo de radio implementado como un sensor en una WSN, conectado en red a través de una WLAN [87].

Además, ZigBee se ha utilizado para desarrollar sistemas de posicionamiento en interiores [87] porque es una tecnología de bajo coste y bajo consumo de energía y porque es fácil obtener niveles RSSI ya que estos se incorporan en cada uno de los paquetes enviados, sin necesidad de hardware adicional.

Un sistema de posicionamiento en interiores basado en ZigBee está compuesto por una red de sensores y algoritmos de red de sensores inalámbricos. La mayoría de los algoritmos utilizados en estos sistemas utilizan los valores de RSSI junto con las características de propagación para estimar la ubicación. Por ejemplo, *Larranaga et al.* utilizan ZigBee junto a *fingerprinting* para obtener el posicionamiento [40]. *Alhmiedat y Yang* obtienen la localización mediante proximidad [1]. *Y Fang et al.* proponen un sistema híbrido en el que predomina la ubicación mediante multilateración [16].

### 3.5. Híbridas

Los sistemas que se basan en la fusión de tecnologías se denominan “híbridos”. En otros estudios, el término “híbrido” se refiere a la combinación de diferentes técnicas como AoA, TDoA, etc. En este documento, “híbrido” se refiere a la combinación de diferentes tecnologías y/o técnicas indistintamente. En un sistema híbrido, una de las tecnologías suele considerarse más relevante para estimar la ubicación del usuario, mientras que el resto de las tecnologías se consideran complementarias y se utilizan para mejorar las características del sistema, como la precisión y el área de cobertura.

Para concluir el capítulo, se presenta la Tabla 3.1 con las tecnologías tratadas, los métodos de posicionamiento asociados y las diferentes alternativas comentadas durante esta sección. La comparativa de tecnologías se hará en la siguiente sección, pues su análisis es más complejo y es necesario introducir ciertos conceptos previos para una correcta descripción de los mismos.

	<b>Tecnología</b>	<b>Algoritmo</b>	<b>Referencia</b>
Óptica	Infrarrojos	Multilateración	Active Badge [85], [25]
		Proximidad	IR Pasivo
	VCL	Multilateración	Philips [57], [44, 90]
		Proximidad	[44, 90]
Dispositivos	Multilateración	<i>Motion tracking</i> [47, 55], [54, 79]	
		LiDAR [71, 58]	
	Proximidad	<i>Marked-based</i> [4]	
		<i>Optical Flow</i> [20, 51, 53], <i>Vision-based</i> [84, 11, 21, 92], <i>Marked-based</i> [4]	
Acústica	Audible	Multilateración	Beep [48], BeepBeep [61], GuoGuo [43]
		Multilateración	Active Bat [86], Cricket [63],
	Ultrasonidos	Proximidad	DOLPHIN [19, 52], Marvelmind [65]
		Cricket [63]	
Magnética	Multilateración	Campos artificiales	
		IndoorAtlas [45], [27]	
	Fingerprinting	Multilateración	RADAR [2]
		Fingerprinting	RADAR [2]
Radio Frecuencia	WLAN	Multilateración	iBeacon [33]
		Fingerprinting	iBeacon [33]
	Bluetooth	Multilateración	Spot ON [29]
		Fingerprinting	LANDMARC [56]
RFID	Proximidad	LANDMARC [56]	
		Fingerprinting	-
	UWB	Multilateración	Ubisense [46, 73], BeSpoon [68],
		Fingerprinting	Decawave [12, 8], ATLAS [76, 77]
WSN	NFC	Proximidad	-
		Multilateración	ZigBee [16]
	Proximidad	ZigBee [1]	
		Fingerprinting	ZigBee [40]

Tabla 3.1: Resumen de las tecnologías de posicionamiento en interiores.



# **Capítulo 4**

## **Comparativa de sistemas**

Iniciando este capítulo, se explica la metodología empleada a lo largo del estudio, pero seguida con más énfasis en la comparativa y resultados, es por ello por lo que se presenta durante este capítulo y no con anterioridad.

A continuación, se introducen propiedades relevantes de los IPS para poder evaluar en una comparativa posterior los diferentes sistemas y soluciones. Para un IPS no es suficiente hablar solo de la precisión del sistema, sino que otras características como la exactitud, la cobertura, la complejidad, el coste, etc., son también de gran relevancia.

Además, se presentan los retos que debe afrontar un IPS para cumplir con su propósito.

Posteriormente, se presentará la comparativa en sí de las diferentes soluciones encontradas, acompañada por el modelo seguido para realizar la misma. La taxonomía valora las diferentes tecnologías según sus propiedades y establece las mejores soluciones según el modelo aplicado. Tanto el modelo como el rango de valores de las propiedades variará entre diferentes aplicaciones. En este capítulo, se presentan de forma genérica la comparativa, será en el próximo capítulo cuando se concretará una aplicación y se aplicará la comparativa explicada para la misma.

### **4.1. Metodología**

La metodología aplicada en el estudio para el análisis de soluciones se conoce como *trade-offs*. Es un procedimiento típico en ingeniería a la hora de comparar soluciones que trata de analizar las fortalezas y debilidades de las alternativas para encontrar una solución de compromiso.

En este estudio, la metodología seguida consiste en los siguientes pasos:

- Entender el contexto.
- Definir opciones existentes.
- Definir el criterio.
- Fijar pesos del criterio.
- Extraer puntuación y resultados.
- Análisis de resultados y toma de decisiones.

La figura 4.1 presenta de forma esquemática la secuencia con las diferentes fases seguidas en la metodología.

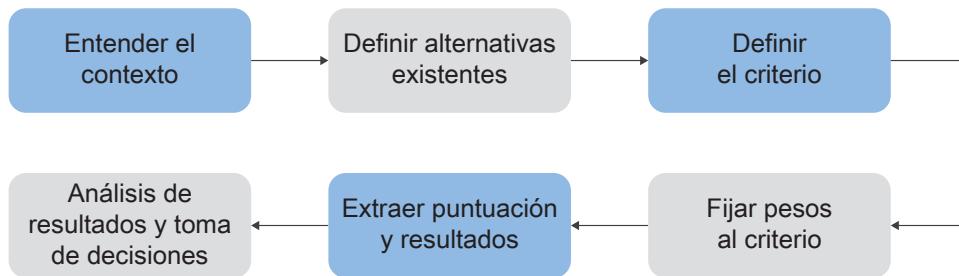


Figura 4.1: Secuencia de fases de la metodología.

A continuación, se aportará una breve explicación de cada uno de los pasos y se enmarcarán estos en el trabajo.

## Entender el contexto

En primer lugar, es necesario entender la definición del problema y el marco en el que se encuadra el mismo. Comprender los motivos, las causas, los objetivos o los requisitos es imprescindible para llevar a cabo los siguientes pasos. También es esencial identificar todos los factores (internos o externos) que puedan afectar a la toma de decisiones.

Discernir las opciones existentes suele considerarse como parte necesaria del contexto, y para su desarrollo es común realizar una lluvia de ideas o *brainstorming*.

Durante este estudio, el contexto se ha definido y explicado a lo largo de los Capítulos 1, 2 e incluso una sección de este capítulo (4.2)..

## Definir opciones existentes

Tras analizar y entender el contexto, el siguiente paso es definir las diferentes opciones existentes. Estas alternativas pueden haber surgido mediante una lluvia de ideas, un estudio del mercado u otro origen.

Las alternativas existentes se han desarrollado a lo largo de los Capítulos 2 y 3.

## Definir el criterio

En este punto, tanto el contexto como las opciones existentes ya están dominadas. Es el momento de definir el método de elección entre las alternativas, es decir, la forma de evaluar las opciones existentes. El modelo tiene que responder a las preguntas “¿cuáles son las cualidades más relevantes?” o “¿que restricciones existen?”.

Existen diversos métodos a seguir para definir el criterio, el seguido en este estudio (durante la Sección 4.5) es uno muy básico. El modelo presentado se reduce en enumerar y agrupar una serie de valores derivados de las propiedades, previamente explicadas en el contexto, acompañadas por su correspondiente coeficiente o peso.

## Fijar pesos del criterio

Probablemente, el paso más importante y delicado dentro de la metodología. El propósito a la hora de fijar los pesos es elegir aquellos que mejor representen las necesidades descritas

para obtener los resultados deseados. Sin embargo, esto no es tarea sencilla pues la selección de los pesos puede variar drásticamente en los resultados obtenidos.

En este trabajo, los pesos se fijan durante el Capítulo 5. Con el objetivo de aumentar la robustez de la solución, los pesos considerados inicialmente son modificados y los resultados alterados son comparados entre sí.

## Extraer puntuación y resultados

Tras agregar los pesos para cada criterio, se debe asociar una puntuación a cada valor del criterio para cada opción. Este proceso puede conllevar varias iteraciones pues la puntuación de un valor puede variar al considerar otro posterior.

Una vez se hayan valorado todas las opciones, se puede extraer una clasificación con los mejores resultados. En esta memoria, las valoraciones y los resultados se realizan durante el Capítulo 5.

## Análisis de resultados y toma de decisiones

Finalmente, sobre la clasificación de soluciones obtenidas es necesario un análisis. Habitualmente, la solución con mayor puntuación suele ser la seleccionada, pero no siempre. En ingeniería puede darse el caso que una combinación de soluciones pueda solucionar también el problema. En este caso, la toma de decisiones no es directa. Una posibilidad es repetir la metodología con la combinación de opciones con mayor puntuación.

De una forma u otra, es necesario tomar una decisión y seleccionar una solución que resuelva el problema que esté respaldada por la metodología desarrollada. Al igual que sucedía con los dos pasos anteriores, esta fase final se realiza durante el Capítulo 5.

## 4.2. Propiedades

### Precisión y exactitud

La exactitud es el requisito más importante de los sistemas de posicionamiento. Se refiere a la distancia euclíadiana promedio entre la ubicación estimada y la ubicación verdadera, es decir a cuán cerca del valor real se encuentra el valor medido (ver Fig. 4.2). Por lo general, la exactitud se adopta como la métrica de rendimiento, cuanto mayor sea la exactitud, mejor será el sistema. Sin embargo, a menudo existe una compensación entre la exactitud y otras características, ya que se necesita cierto compromiso entre la exactitud adecuada y las otras características.

La precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión (Fig. 4.2). Es una medida de la robustez del sistema de posicionamiento, ya que revela la variación en su rendimiento durante muchas pruebas. Una medida común de la variabilidad es la desviación estándar de las mediciones y la precisión se puede estimar como una función de ella.

### Cobertura

La cobertura, el rango o la escala se refieren a la extensión o área en la cual el sistema puede ubicar un usuario u objeto. Aunque algunas tecnologías pueden ofrecer una amplia cobertura

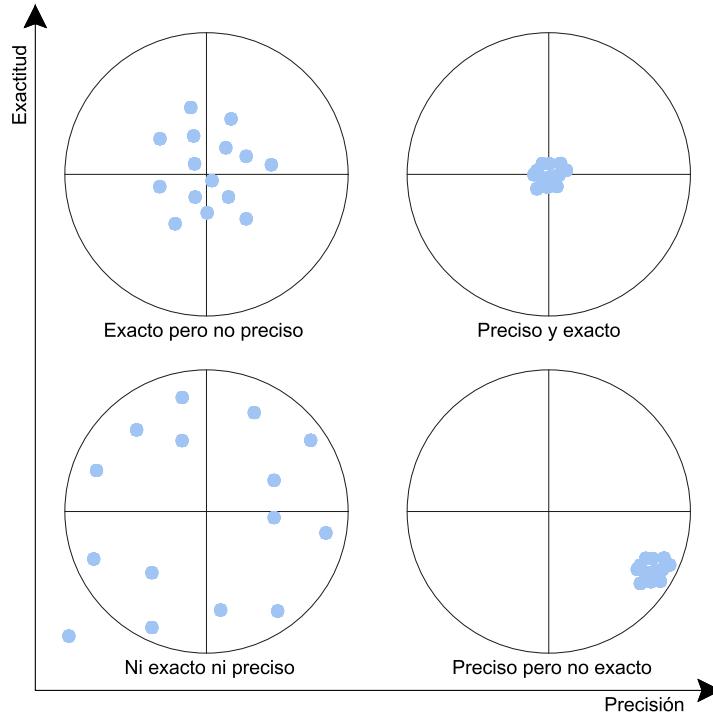


Figura 4.2: Precisión frente a exactitud.

en un entorno ideal, cuando se usan en interiores, su cobertura puede estar limitada por factores ambientales. Ciertos autores como *Mautz* [49] distinguen la cobertura en las siguientes categorías:

- Local: cobertura para una pequeña extensión bien definida, como una habitación o un estadio.
- Global: cobertura mundial o internacional para una zona específica. Son los sistemas GNSS los que ofrecen tal cobertura, y como ya se ha mencionado previamente tienen una mal funcionamiento en interiores.
- Escalable: sistemas que ofrecen una cobertura incremental mediante la adición de hardware al sistema. Es importante aclarar que la escalabilidad del sistema no puede afectar a la exactitud del posicionamiento.

De esta forma, se han integrado dos características muy cercanas y de gran relevancia para un sistema IPS.

## Coste

El coste de un sistema de posicionamiento depende de muchos factores. Se considera el coste como la cantidad de recursos invertidos para la instalación y operación de un IPS. Estos recursos pueden ser de diversa naturaleza e incluyen dinero, tiempo, espacio, peso, energía, memoria, etc.

Autores como *Brena et al.* [5] distinguen dos tipos de coste. En primer lugar, un coste de instalación y mantenimiento, el cual, suele ser un coste incremental y a tener en cuenta con la escalabilidad del sistema. Cabe destacar la existencia de sistemas que carecen de una infraestructura propia y que hacen uso de infraestructuras existentes como la iluminación, el sonido

ambiental o redes de puntos de acceso Wi-Fi.

En segundo lugar, un coste para el usuario final. En este tipo cabe destacar los sistemas pasivos para el usuario. El término “pasivo” puede ser confuso, ya que existen diversos enfoques que hacen uso de tal expresión. Esta pasividad para el usuario final se puede trasladar al peso y consumo, si el sistema no está a bordo del usuario final, a memoria y procesamiento, si el posicionamiento se obtiene en la infraestructura, entre otros.

## Complejidad

La complejidad de un sistema puede atribuirse al hardware, software o procesos computacionales. El coste está muy relacionado con la complejidad, ya que la mayoría de los sistemas de posicionamiento y navegación existentes son complejos en su diseño e implementación, lo que a su vez resulta en un sistema costoso.

En concreto, esta comparativa se centra en la complejidad de los procesos computacionales, es decir, la complejidad informática del algoritmo de posicionamiento. Es importante destacar que el cálculo del posicionamiento y el procesamiento del algoritmo puede realizarse en local (unidad móvil) o en remoto (servidor central). Esto conlleva diferentes complejidades asociadas, pues la mayoría de las unidades móviles carecen de gran potencia de procesamiento y de gran batería.

## Carga de pago

En aplicaciones donde la unidad móvil es un robot autónomo, como los vehículos autónomos no tripulados los cuales son el objeto a posicionar en este trabajo, la carga de pago puede ser crucial para el sistema. En concreto, el tipo de carga de pago puede ser muy diverso, con tamaños, pesos y consumos muy diferentes.

En este estudio, se considera ventajosa aquella carga de pago que interfiera o modifique al mínimo a la unidad móvil. Una carga de pago ideal sería aquella inexistente, pues no alteraría la configuración de la unidad móvil.

## Otros

Existen otros muchos parámetros para comparar los IPS, y dado que es imposible explicarlos todos, se mencionan a continuación los más utilizados en artículos de referencia en este campo. Bien es cierto que varias propiedades ya han sido introducidas en los parámetros desarrollados. De esta forma, destacamos: privacidad, robustez, usabilidad, escalabilidad, identificación, latencia, tasa de refresco, necesidad de infraestructura, cálculo de posicionamiento en local, interferencias o limitaciones.

## 4.3. Retos

La rama de la ingeniería que se encarga del diseño de sistemas para controlar el movimiento de vehículos es el GNC (Guiado, Navegación y Control). Este trabajo abarca la función de navegación.

La definición de navegación es tan diversa como su actividad. Muchos autores han definido este término a lo largo de la historia. Bien es cierto que existen puntos comunes en estas definiciones. De ellos se puede extraer, la navegación aérea es el proceso de dirigir una aeronave en vuelo desde una posición inicial hasta una posición final, siguiendo una ruta determinada

y cumpliendo además con ciertos requisitos de seguridad y eficiencia. Es sencillo inferir de la definición anterior los tres elementos principales en la navegación, posición inicial, posición de destino y la ruta a seguir, o la información necesaria para determinar la ruta. Estos tres elementos, no son más que el vector de estado propio.

Para determinar el vector de estado es necesario conocer la posición, la orientación y la velocidad, entre otros. En este punto entra en escena los IPS, pues son estos sistemas los que deben determinar la posición y la orientación.

Por último, en entornos en interiores es importante la detección de obstáculos, ya que la densidad de obstáculos es mucho mayor debido a la masa de objetos estáticos. Además, el entorno puede ser dinámico, cambiante. Por ejemplo, abrir una ventana podría afectar el ambiente al cambiar la ubicación de los obstáculos, la intensidad de la iluminación y la distribución de la presión.

A modo de resumen, los retos a los que tiene que hacer frente un IPS son la determinación de la *posición*, la determinación de la *orientación* y la detección de *obstáculos*.

## Posicionamiento

Entendemos por posicionamiento como la determinación de la posición de un objeto o una persona. Siendo la *posición* como la localización de un objeto en el espacio o en el espacio y en el tiempo.

Autores como Hightower *et al.* [28] o Mautz [49] distinguen dos tipos de posicionamiento. Por un lado, diferencian en función de la información aportada por el sistema entre posicionamiento simbólico y físico. El posicionamiento físico aporta algún tipo de magnitud para posicionar el objeto, mientras que el posicionamiento simbólico aporta ideas abstractas de donde se encuentra algo, por ejemplo, en el laboratorio, en frente del aulario, etc. Por otro lado, en relación del sistema de referencia usado se distingue entre posicionamiento absoluto y relativo. En el posicionamiento absoluto se utiliza un único sistema de referencia global para todos los objetos, mientras que en el posicionamiento relativo cada objeto tiene su propio marco de referencia local.

Para representar la posición (*física*) es común utilizar una magnitud vectorial mediante el vector de posición. Este vector puede tener dos, tres o cuatro variables en función de lo que queramos representar; el plano ( $x, y$ ), el espacio ( $x, y, z$ ) y el espacio-tiempo ( $x, y, z, t$ ) respectivamente.

La calidad del posicionamiento suele expresarse en la resolución de metros  $m$  medida mediante las propiedades de precisión y exactitud ya mencionadas.

## Orientación

La orientación o actitud es la diferencia angular medida entre el eje de un objeto móvil y la línea de horizonte de la Tierra, la dirección de movimiento, otros objetos, etc. En la aeronevación, debido a que el objeto es capaz de rotar alrededor de tres ejes perpendiculares entre sí, se distinguen tres medidas. Estas rotaciones son cabeceo, guiñada y alabeo.

La calidad de la orientación suele expresarse en la resolución de grados ( $^{\circ}$ ) medida mediante las propiedades de precisión y exactitud ya mencionadas.

## Obstáculos

Por último, la detección y evasión de obstáculo es desafío más complejo al que se enfrenta un IPS. Son múltiples y muy diversas la naturaleza de los obstáculos con los que un objeto

móvil se puede encontrar, desde paredes hasta otros objetos móviles. Como ya se ha adelantado, los entornos en interiores poseen una densidad de obstáculos mayor que en exteriores, a la par de que el entorno es dinámico y puede sufrir modificaciones. El problema de evasión de colisiones puede ser unidimensional, bidimensional o tridimensional, aumentando la complejidad del mismo.

## 4.4. Taxonomía de las tecnologías de los IPS

Una vez introducidos los criterios de evaluación de los sistemas, se presenta una tabla comparativa (Tab. 4.1) con las diferentes tecnologías tratadas durante el Capítulo 3. Los valores mostrados en la tabla se justifican en las diferentes citas añadidas.

Cabe destacar que se ha hecho una distinción previa en alguna tecnología presentada en la Tabla 4.1, las cuales se explicarán a continuación.

En primer lugar, debido a la gran variedad de sistemas con diferentes características dentro del *motion tracking*, se ha dividido en dos categorías (*optical marked motion tracking* y *optical motion tracking*), de mayor exactitud con alto coste asociado y otra de coste y exactitud reducido. Por un lado, los sistemas con mayores prestaciones suelen utilizar tecnologías híbridas y con marcadores reflectantes, de ahí el nombre que se le ha otorgado en este trabajo. Por otro lado, dentro de las tecnologías con menores prestaciones el abanico de opciones sigue siendo enorme debido a la gran variedad de cámaras disponibles. Para este trabajo, se ha seleccionado una que cumple con los requisitos de exactitud con un coste asociado moderado.

En segundo lugar, se ha distinguido entre la navegación basada en marcadores en función de su configuración, activa o pasiva. Las diferencias son claras, mientras la configuración activa lleva un dispositivo óptico a bordo y los marcadores se encuentran en el entorno, en la configuración pasiva sucede al contrario. Las principales diferencias entre ambos son la carga de pago y el rango, como se puede observar en la tabla.

En tercer lugar, se ha hecho distinción entre los sistemas de identificación por radio-frecuencia en función de su configuración, activa o pasiva. Al igual que sucedía con el caso anterior, la configuración activa lleva el lector RFID a bordo y las etiquetas se encuentran en el entorno, mientras que en la configuración pasiva sucede a la inversa, los lectores se encuentran en el entorno. Las principales diferencias vuelven a ser la carga de pago y el rango asociado a cada configuración.

Además, en la Tabla 4.1 no se han incluido dos tecnologías tratadas en la Sección 3.4, NFC y WSN. Ambas tecnologías se han considerado prescindibles debido a su similitud con RFID y WLAN, respectivamente, y sus menores prestaciones con respecto a estas.

Tabla 4.1: Clasificación de las tecnologías en los IPS.

Tecnología	Carga de pago	IM	Coste	Rango	Complejidad	Posicionamiento	Actitud (Si/no)	Obstáculos
			UF			(Exactitud)		
Infrarrojos	Medio (5-10g)	-	Medio (20€)	Local	-	1D, Media (10cm) [25]	No	No
Luz visible	Ligero (0,39g)	Alto	Bajo (5€)	Local	Alto computo	3D, Media (20cm) [44, 90]	No	No
<i>Optical flow</i>	Pesado (17g)	-	Alto (100€)	Escalable	-	2D, Alta (1mm) [41, 51]	Si	No
<i>Optical motion tracking</i>	-	Medio (20€/cam)	-	Local	-	3D, Alta (cm) [54, 79]	No	No
<i>Optical marked motion tracking</i>	-	Alto (3000€/cam)	Bajo	Local	-	3D, Alta (20 $\mu$ m) [47, 55]	Si	Si
<i>Marked-based (Activo)</i>	Medio (10g)	Bajo	Alto (80€)	Escalable	-	3D, Alta (cm) [49]	Si	No
<i>Marked-based (Pasivo)</i>	-	Alto (80€/cam)	Bajo	Local	-	3D, Alta (cm) [49]	Si	No
<i>Vision-based</i>	Pesado (15g)	-	Medio (20€)	Escalable	Alto computo	3D, Alta (cm) [49, 51]	Si	Si
LiDAR	Inviable (830g)	-	Muy Alto (5000€)	Escalable	Alto computo	3D, Alta (1mm) [71]	No	Si

—continua en la siguiente hoja

Tabla 4.1 – continuación de la hoja anterior

Tecnología	Carga	Coste				Complejidad	Posicionamiento (Exactitud)	Actitud (Si/no)	Obstáculos (Si/No)
	de pago	IM	UF	Rango					
Ultrasonidos	Medio (5g)	Bajo	Medio (30€)	Escalable	-		3D, Alta (1cm) [63, 19, 52]	No	No
Audible	Medio (5g)	Bajo	Medio (30€)	Local	-		3D, Media (50cm) [48, 61, 43]	No	No
Magnética	-	Alto (300€)	-	Local	-		3D, Baja (2m) [45]	No	No
WLAN	Medio (10g)	Bajo	Alto (100€)	Escalable	-		3D, Baja (1-5m) [2]	No	No
Bluetooth	Medio (13g)	Medio (20€/ant)	Medio (20€)	Escalable	-		3D, Baja (1-5m) [33]	No	No
RFID activo	Pesado (22g)	Bajo (2€/etiqueta)	Alto (200€)	Escalable	-		3D, Baja (1-2m) [28, 56]	No	No
RFID pasivo	Ligero (5g)	Alto (200€/lector)	Bajo (2€)	Local	-		3D, Baja (1-2m) [28, 56]	No	No
UWB	Ligero (1,4g)	Medio (30-100€/ant)	Medio (30-100€)	Escalable	-		3D, Media (10cm) [66, 12]	No	No
IMU	Medio (10g)	-	Medio (20€)	Escalable	-		3D, Alta <sup>a</sup>	Si	No

<sup>a</sup> Sensible a errores. Los errores se acumularán e irán en aumento.

Con el objetivo de aclarar los posibles valores con los que se han clasificado las diferentes tecnologías, se presenta una segunda tabla (Tab. 4.2) que recoge los niveles existentes para cada atributo examinado.

Propiedad	Valores	Rango de valores
Carga de pago	Inviable	>50g
	Pesado	15-50g
	Medio	5-15g
	Ligero	0-5g
	Nulo	0g
Coste	Alto	>50€
	Medio	10-50€
	Bajo	0-10€
	Nulo	0€
Rango	Local	
	Escalable	Ver sección 4.2
	Global	
Complejidad	Software	
	Hardware	Ver sección 4.2
	Computo	
Exactitud	Baja	Metros o superior
	Media	De decímetros a metros
	Alta	Centímetros o inferior
Actitud	No	Detección de la orientación
	Si	de la aeronave
Obstáculos	No	Detección y evasión
	Si	de obstáculos

Tabla 4.2: Valores y su correspondiente rango para las propiedades de las tecnologías.

Es importante mencionar que, de forma intencionada, se han obviado ciertos aspectos sobre las tablas presentadas hasta ahora en la sección. Pues los rango de valores asociados a las propiedades de carga de pago, coste y exactitud pueden variar en función de la aplicación específica. Por el momento, sin una aplicación específica sobre la que trabajar, se ha presentado unos valores que pueden resultar contradictorios, pero que se justificarán en la siguiente sección cuando se presente la aplicación seleccionada en este trabajo. La decisión de presentar las tablas en esta sección y no en la siguiente radica en el intento de crear una comparativa general sin tener en cuenta la aplicación específica.

## 4.5. Modelo y baremo

En esta sección, se aportará un modelo y baremación a la Tabla 4.1 con el objetivo de exponer de forma más sencilla sistema de evaluación a las tecnologías presentadas y poder extraer de estas soluciones las que mejor se adapten al problema particular. Para ello, es necesario definir el modelo y la baremación, que se presentan a continuación.

Son el modelo y el baremo lo que variará de una aplicación a otra. En función de la utilidad

del sistema, será necesario dar más importancia a ciertas propiedades pues su uso será más limitante.

## Modelo

Antes de iniciar el proceso de evaluación, es importante marcar los requisitos a los que el sistema se enfrentará. De esta forma, se ha decidido simplificar el sistema en dos aspectos. En primer lugar, dentro de los tres desafíos que se han presentado en la Sección 4.3, se ha decidido abordar solamente el posicionamiento y actitud, obviando en primera instancia la detección y evasión de obstáculos. En segundo lugar, se ha eliminado la complejidad de los requisitos a valorar. El motivo principal de esta decisión es que no se considera un requisito limitante para las tecnologías debido a los avances existentes en computación.

El hecho de eliminar tales requisitos es, como ya se ha mencionado, simplemente con el objetivo facilitar un análisis inicial de las tecnologías. En ningún momento se descarta la posibilidad de rescatar estos u otros requisitos para un estudio posterior con más profundidad, o para un segundo análisis de las mejores tecnologías obtenidas de esta primera comparación.

Tras presentar los objetivos a los que se hará frente en este estudio, se puede dar paso al modelo de evaluación o puntuación que se aplicará a las diferentes tecnologías ya presentadas. El modelo matemático es el siguiente:

$$\alpha CP + \beta IM + \gamma UF + \delta RAN + \mu POS + \nu ACT + \omega OBS \quad (4.1)$$

, siendo  $CP$  la carga de pago,  $IM$  el coste de instalación y mantenimiento,  $UF$  el coste para el usuario final,  $RAN$  el rango,  $POS$  el posicionamiento,  $ACT$  la actitud y  $OBS$  los obstáculos, todos estos con los valores normalizados sobre uno. Y siendo  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \mu, \nu$  y  $\omega$  coeficientes asociados al modelo, con un valor variable en función de los requerimientos específicos de la aplicación.

## Baremo

Para presentar de forma más clara el baremo establecido, se ha recuperado la Tabla 4.2 sobre la cual se han realizado unas pequeñas modificaciones para obtener la nueva Tabla 4.3.

Esta tabla no se puede entender sin tener en cuenta el rango de valores de la Tabla 4.2 pues una modificación en estos afecta de forma directa al baremo establecido. Así pues, aunque el rango de valores no se muestre en esta tabla por razones de simplificar la misma, forma también parte del baremo.

Como es obvio pensar, los valores superiores representan mejores propiedades que los inferiores. Así pues, una carga de pago nula (4) es preferible a una carga inviable (0).

<b>Propiedad</b>	<b>Valores</b>	<b>Baremo</b>
Carga de pago	Inviable	0
	Pesado	1
	Medio	2
	Ligero	3
	Nulo	4
Coste	Alto	0
	Medio	1
	Bajo	2
	Nulo	3
Rango	Local	0
	Escalable	1
	Global	2
Exactitud	Baja	0
	Media	1
	Alta	2
Actitud	No	0
	Si	1
Obstáculos	No	0
	Si	1

Tabla 4.3: Baremo para las propiedades de las tecnologías.

# Capítulo 5

## Caso de estudio

Durante este capítulo, se presentará el caso de estudio en su conjunto. Empezando por la aplicación específica y la motivación de la misma, además del modelo utilizado para dicha aplicación. Siguiendo con la solución obtenida y la discusión de esta. Por último, se propondrá una aproximación a un sistema concreto, haciendo uso de las soluciones obtenidas previamente, como resolución al problema presentado.

### 5.1. Aplicación

En este estudio se han seleccionado los micro-vehículos aéreos, de ahora en adelante MAVs (*Micro Aerial Vehicles*), como aplicación concreta sobre la que realizar la taxonomía. Un MAV es aquel vehículo aéreo autónomo con un peso inferior a 50g [51]. También son conocidos como drones de bolsillo o *pocket drones*.



(a) JJRC H36 [35].



(b) Eachine E010 [15].

Figura 5.1: MAVs propuestos para la aplicación.

Esta decisión viene motivada debido a un posible proyecto futuro en la Universidad Rey Juan Carlos (URJC). El proyecto en cuestión trata sobre el desarrollo de un circuito de MAVs recreativo con un solo grado de libertad, la velocidad. El circuito trataría de simular al ya existente circuito en tierra (*scalextric* [72]). Aunque tenga sus similitudes, el desafío es mucho mayor, pues no existen guías que puedan seguir los vehículos y por la necesidad de un sistema de posicionamiento ligero, preciso y de bajo coste. Ligero pues un MAV no puede tener

una carga elevada sin que limite su autonomía o su maniobrabilidad. Barato pues con un uso recreativo, se busca que sea accesible también en coste. Y preciso pues al ser vehículos de pequeño tamaño, el error admisible debe ser también reducido.

En concreto, un ejemplo de un MAV utilizado para esta aplicación sería el Eachine E010 (Fig. 5.1b) o el JJRC H36 (Fig. 5.1a).

Es el momento de recuperar la Tabla 4.2 y justificar el rango de valores asociado a cada propiedad. Los drones propuestos tienen unas características concretas que condicionan su vuelo. Poseen una masa de 19g (E010) y de 22g (H36) lo que limita la carga de pago. Además, su pequeño tamaño 9,5x9,5x5cm (E010) y 8,5x8,5x3cm (H36) no permite errores en el posicionamiento elevados. En la siguiente Tabla 5.1 se resumen las características comentadas:

	Eachine E010	JJRC H36
Masa (g)	19	22
Tamaño (cm)	9,5x9,5x5	8,5x8,5x3

Tabla 5.1: Propiedades de los MAVs propuestos para la aplicación.

## Modelo utilizado

A la hora de definir el modelo utilizado, se han fijado los correspondientes coeficientes con los siguientes valores:

$$\begin{array}{llll} \alpha = 3 & \gamma = 1 & \mu = 1 & \omega = 0 \\ \beta = 1 & \delta = 1 & \nu = 3 & \end{array} \quad (5.1)$$

Partiendo de la Ecuación 4.1 y aplicando los coeficientes anteriores 5.1, se obtiene el siguiente modelo final:

$$3CP + IM + UF + RAN + 3POS + ACT \quad (5.2)$$

El añadir pesos a los diferentes requisitos permite valorar con distinta relevancia las cualidades llevadas al análisis. De esta forma, es fácil observar que las propiedades más relevantes para este estudio son la carga de pago y la exactitud en el posicionamiento con un coeficiente de valor *tres*. En segundo lugar, estaría el coste con un peso de valor *dos*, pues este está dividido en el coste de infraestructura y de usuario. Por último, se encuentran el rango y la actitud con peso igual a la *unidad*.

Los pesos aplicados a cada requisito concuerda con lo introducido en la sección anterior (5.1), donde se mencionó la importancia de la carga de pago y de la precisión debido al tamaño y peso limitado de los drones seleccionados. El coeficiente asociado al coste recibe dicha relevancia debido a que su aplicación se ubica en un mercado de uso recreativo donde el objetivo es alcanzar el mayor público con coste reducido. Además, el precio de estos drones tampoco es elevado y se busca una solución acorde al precio de los mismos.

## 5.2. Solución

Para concluir esta sección se presenta una nueva Tabla 5.3 como solución a esta aplicación concreta. Teniendo como origen la Tabla 4.1, sustituyendo sobre esta las valoraciones por sus valores numéricos asociados (Tabla 4.3) y aplicando el modelo establecido en la Ecuación 5.2, se obtiene la nueva Tabla 5.3.

Para una mejor visualización de los datos, se añade una nueva tabla (Tab. 5.2) con las mejores soluciones ordenadas por la nota obtenida. Es importante mencionar que la puntuación máxima es diez, pues se tuvo en consideración a la hora de construir el modelo para evitar posibles confusiones.

Tecnología	Total
IMU	7,83
<i>Marked motion tracking</i>	7,67
<i>Marked-based</i> (Pasivo)	7,67
<i>Motion tracking</i>	7,33
<i>Marked-based</i> (Activo)	7,17
<i>Vision-based</i>	7,08
<i>Optical flow</i>	6,75
Ultrasonidos	6,50
UWB	5,42

Tabla 5.2: Resumen de las soluciones obtenidas para las tecnologías IPS.

La tecnología con mayor puntuación es la IMU, núcleo de muchos sistemas de posicionamiento [41], pero que raramente se utiliza en solitario, pues suele integrarse en sistemas híbridos [4, 92, 20]. Las siguientes tecnologías son todas dispositivos ópticos, finalizando con dos tecnologías de RF, ultrasonidos y UWB. El resultado obtenido concuerda con las tendencias actuales en los IPS, pues la mayoría de productos [41], tanto en fase de desarrollo como en fase comercial, utilizan tecnologías ópticas (híbridas) para determinar el posicionamiento. Sobre las soluciones obtenidas, es necesario realizar un filtrado previo, pues alguna solución es inviable. Por un lado, debido a un coste asociado inasequible, se excluye *Marked motion tracking*. Por otro lado, debido a una carga de pago excesiva, se excluyen *Optical flow*, la navegación basada en marcadores (activo) y la navegación basada en visión, donde el drone no podría actuar debido al peso de la carga.

Este filtrado no se ha realizado previo al análisis debido a la intención del estudio de ser lo más general posible, y es ahora en última instancia cuando descartamos estas soluciones obtenidas para nuestra aplicación aunque hayan obtenido puntuaciones destacadas.

Entre las tecnologías restantes, se propone una solución concreta y se estudian sus alternativas en la siguiente Sección 5.3.

Tabla 5.3: Soluciones obtenidas para las tecnologías IPS.

Tecnología	Carga de pago	Coste IM	UF	Rango	Posicionamiento (Exactitud)	Actitud (Si/no)	Obstáculos (Si/No)	TOTAL
Infrarrojos	2	3	1	0	1	0	0	4,33
Luz visible	3	0	2	0	1	0	0	4,42
<i>Optical flow</i>	1	3	0	1	2	1	0	6,75
<i>Optical motion tracking</i>	4	1	3	0	2	0	0	7,33
<i>Optical marked motion tracking</i>	4	0	2	0	2	1	1	7,67
<i>Marked-based</i> (Activo)	2	2	0	1	2	1	0	7,17
<i>Marked-based</i> (Pasivo)	4	0	2	0	2	1	0	7,67
<i>Vision-based</i>	1	3	1	1	2	1	1	7,08
LiDAR	0	3	0	1	2	0	1	5,00
Ultrasonidos	2	2	1	1	2	0	0	6,50
Audible	2	2	1	0	1	0	0	4,00

—continua en la siguiente hoja

Tabla 5.3 – continuación de la hoja anterior

Tecnología	Carga de pago	Coste IM	UF	Rango	Posicionamiento (Exactitud)	Actitud (Si/no)	Obstáculos (Si/No)	TOTAL
Magnética	4	0	3	0	0	0	0	4,00
WLAN	2	2	0	1	0	0	0	3,17
Bluetooth	2	1	1	1	0	0	0	3,17
RFID activo	1	2	0	1	0	0	0	2,42
RFID pasivo	3	0	2	0	0	0	0	2,92
UWB	3	1	1	1	1	0	0	5,42
IMU	2	3	1	1	2	1	0	7,83

## Discusión

Previo a desarrollar el sistema-solución, sobre los resultados obtenidos se quiere realizar un análisis que permita entender la validez y el porqué de los mismos.

Buscando robustez sobre las soluciones obtenidas, se plantean otros modelos con diferentes coeficientes para contrastar resultados. Los nuevos modelos propuestos sobre los que aplicaremos la misma comparativa son los formulados en las Ecuaciones 5.3 y 5.4.

$$4CP + 3IM + 3UF + 2RAN + 2POS + ACT \quad (5.3)$$

El primer modelo (Ecuación 5.3) puede parecer extraño por los coeficientes utilizados, pero es el resultante si los valores de las propiedades no estuvieran normalizados. Es un modelo muy sencillo pues es producto de la suma de los valores del baremo asociados a cada propiedad.

$$CP + IM + UF + RAN + POS + ACT \quad (5.4)$$

El segundo modelo (Ecuación 5.4) es también muy simple. Todos los coeficientes son iguales, es decir, todas las propiedades tienen la misma relevancia.

El tercer modelo es el utilizado para construir la Tabla 5.3 y con el que se han obtenido los resultados aquí discutidos. La ecuación del modelo se puede rescatar de la Ecuación 5.2.

La siguiente gráfica (Fig. 5.2) muestra la puntuación obtenida de cada tecnología en función del modelo utilizado. Los resultados están organizados según su puntuación obtenida para facilitar su comprensión.

Se puede observar como las mejores soluciones coinciden con las presentadas en la Tabla 5.2, lo cual era esperado, pues son un reflejo de las tendencias actuales. En ambos casos, la solución que reina la clasificación es la IMU, seguido por soluciones basadas en dispositivos ópticos que varían en su orden pero con una puntuación muy próxima entre ellos. En los siguientes puestos se encuentran los sistemas de ultrasonidos y UWB, seguidos por el resto de sistemas.

Al igual que hicimos anteriormente, a modo de resumen se presenta una tabla (Tab. 5.4 que recoge los mejores resultados con su puntuación obtenida. Esta puntuación es la resultante de la suma de puntuaciones obtenidas en cada uno de los modelos y dividida entre el numero de modelos, para que la puntuación máxima siga siendo diez. Como ya se ha avanzado, los resultados son muy similares a los obtenidos en la anterior tabla resumen (Tab. 5.2).

Tecnología	Total
IMU	7,56
<i>Motion tracking</i>	6,89
<i>Vision-based</i>	6,89
<i>Marked motion tracking</i>	6,78
<i>Marked-based</i> (Pasivo)	6,78
<i>Marked-based</i> (Activo)	6,44
<i>Optical flow</i>	6,33
Ultrasonidos	6,00
UWB	5,11

Tabla 5.4: Resumen de las soluciones obtenidas aplicando los tres modelos.

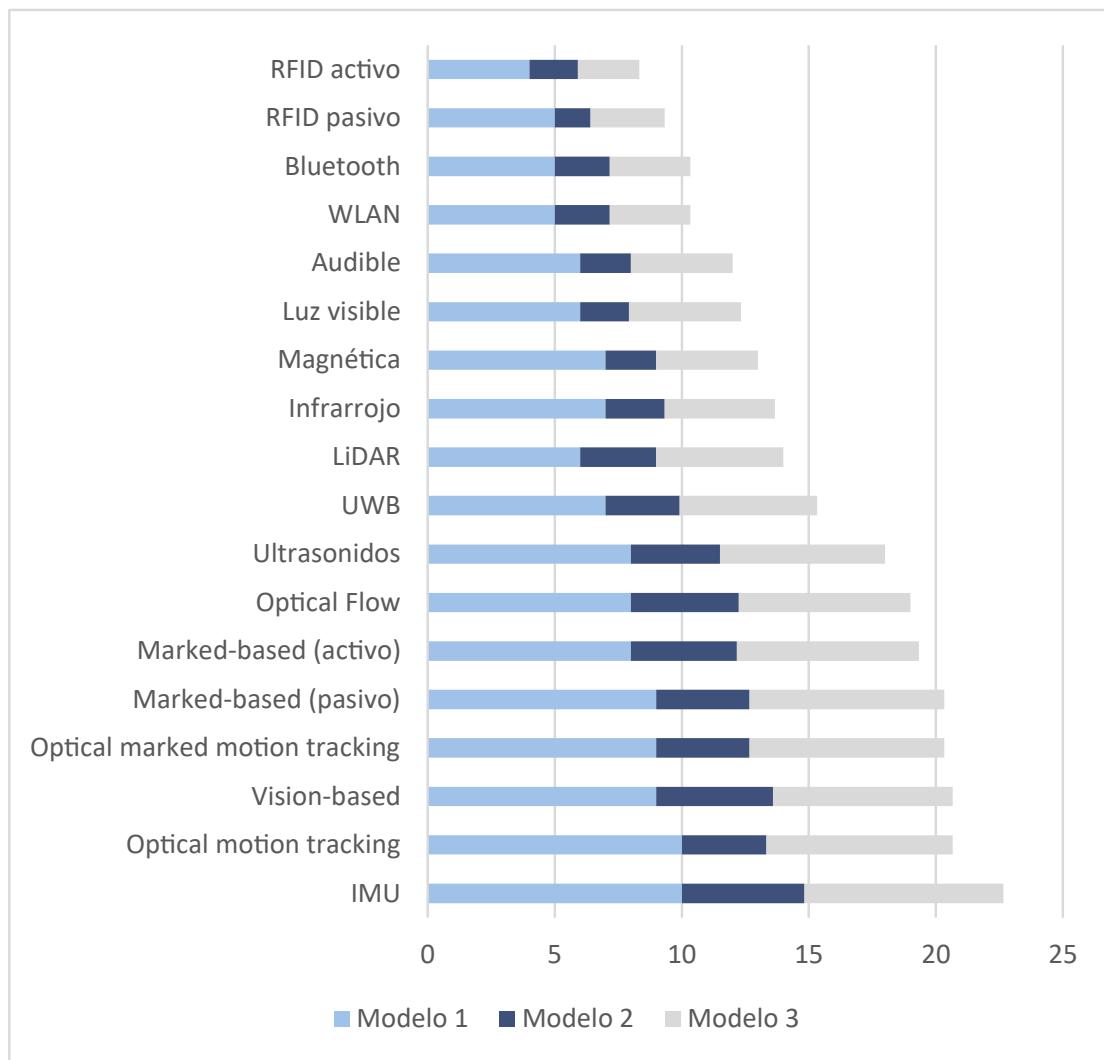


Figura 5.2: Resultados obtenidos en función del modelo aplicado.

Tras esta breve discusión, se da paso a presentar la solución final que trata de dar solución al problema.

### 5.3. Sistema propuesto

El sistema que se propone es una solución híbrida que utiliza las tecnologías IMU y UWB. Por un lado, los sistemas inerciales aportan una buena robustez con una alta precisión, pero son muy sensibles a errores, los cuales se acumularán e incrementarán progresivamente. Por otro lado, los sistemas basados en UWB poseen una precisión intermedia pero una posición absoluta discontinua que permite corregir la acumulación de errores de la IMU. Es decir, mediante la hibridación de sistemas conseguimos un sistema robusto, de alta precisión y menos sensible a los errores. En la Figura 5.3 se trata de representar los motivos que han conducido a esta solución.

Además, el coste seguiría siendo moderado, con escalabilidad en la cobertura y con detección de la orientación. Sin embargo, la carga de pago aumenta, al estar embarcando dos sistemas. Se estima que el peso final, pese a ser mayor, seguiría estando dentro del rango aceptable descrito.

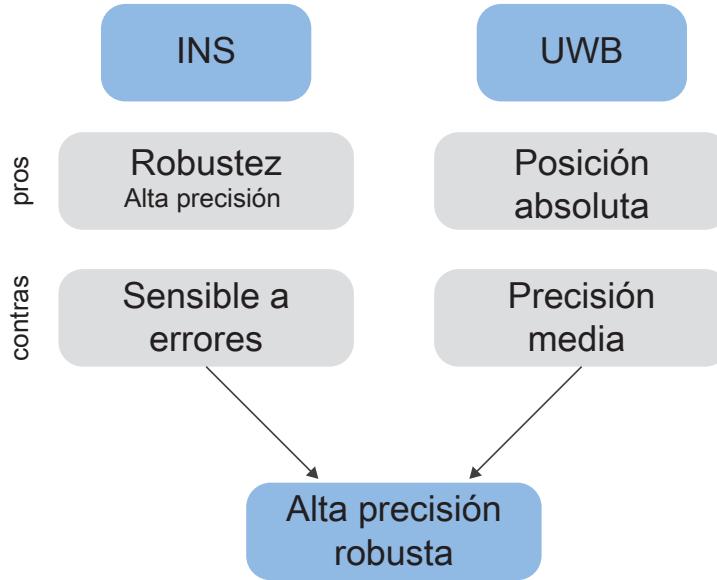


Figura 5.3: Motivación de la hibridación en la solución.

Durante el proceso de búsqueda de la solución, se han valorado otras posibles soluciones, las cuales se presentan a continuación:

- Ultrasonidos + IMU
- *Motion tracking* + IMU
- *Marked-based* (Pasivo) + IMU
- *Motion tracking*

Si sometemos las soluciones híbridas al modelo para compararlas entre sí podremos observar si la decisión tomada es correcta. Se aporta la Tabla 5.5 con los resultados obtenidos.

Como se puede observar la solución elegida obtiene la mejor posición, a continuación se explicarán los principales motivos de la elección. Previamente se quiere aclarar que aunque la solución híbrida haya obtenido una puntuación inferior a un sistema no híbrido, la solución propuesta aporta una robustez inexistente en el resto de alternativas sin sacrificar precisión.

Sistema	Total
UWB + IMU	7,17
Ultrasonidos + IMU	6,75
<i>Motion tracking</i> + IUM	6,17
<i>Marked-based</i> (Pasivo) + IMU	5,83

Tabla 5.5: Resumen de las soluciones obtenidas aplicando los tres modelos.

Antes de desarrollar el sistema elegido, es necesario explicar el porqué de la decisión y los motivos que han conducido a la misma.

En primer lugar, se ha descartado la solución híbrida compuesta por ultrasonidos e IMU debido a que la carga de pago asociada a un equipo de ultrasonidos es ligeramente superior a la de UWB, mientras que la mejoría en precisión no es suficientemente superior para justificar su elección. Las siguientes dos opciones basadas en sistemas híbridos constituidos por dispositivos ópticos (*motion tracking* o *marked-based* pasivo) e IMU, se han descartado debido al coste asociado a los dispositivos ópticos de los sistemas, el cual excede en gran medida al coste de UWB. Por último, la cuarta opción formada *motion tracking* únicamente, pese a aportar una carga de pago y una precisión reseñables, carecen de la robustez que aportan los sistemas iniciales y sufren en situaciones de poca visibilidad debido a la iluminación o a posibles occlusiones parciales o totales.

Por estos motivos, se ha decidido apostar por la solución ya presentada, en la cual se profundizará en la siguiente sección (Sec. 5.3). Otras soluciones con estos sistemas han sido presentadas por otros autores, entre las que destacan las propuestas por Paredes *et al.* [60] y Wang *et al.* [83]. La primera solución propone un sistema compuesto por ultrasonidos y *motion tracking*, mientras que el segundo está compuesto por un escáner láser y UWB.

## Fusión de sensores

Como se ha explicado en la sección anterior, la estrategia a seguir será la fusión de dos tecnologías. Por ello, la posición es determinada mediante dos sensores, tal como se muestra en la Figura 5.4.

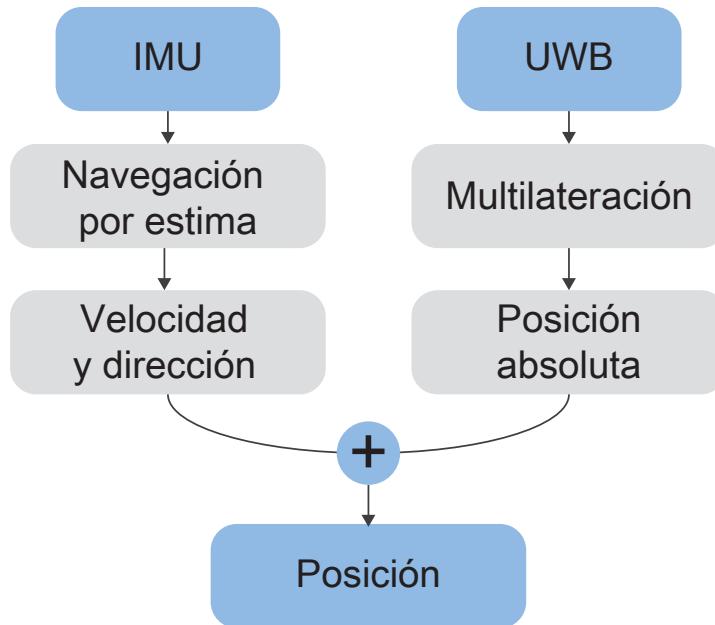


Figura 5.4: Integración de sensores.

Al integrar las dos tecnologías para la obtención de la posición, también se está fusionando dos algoritmos de posicionamiento diferentes. Por un lado, la IMU utiliza la navegación inercial para obtener la velocidad y dirección en cada instante, con el que podemos integrar la posición en cada momento. Por otro lado, UWB hace uso de la multilateración para calcular la posición absoluta. La resolución de esta posición depende de la frecuencia de transmisión del sistema, que influye de forma directa en el consumo del mismo. El método de fusión de ambas posiciones se explicará más adelante.

Con el objetivo de introducir el proceso de integración, en las siguientes secciones se muestran

sendos esquemas con una introducción a las arquitecturas hardware y software propuestas. Debido la extensión de este trabajo no se presentan esquemas completos, sino una primera aproximación que debe ser completada para una correcta resolución del problema.

## Hardware

El hardware consistiría en un equipo a bordo compuesto por una IMU, un emisor UWB, un pequeño procesador y una antena para la transmisión. En el entorno se situarían varios puntos UWB con antenas receptoras que triangularían la posición del drone [9]. Además, el drone establecería una conexión con una estación en tierra (PC), la cual realizaría los cálculos del posicionamiento y recibiría instrucciones de vuelo. En la Figura 5.5 se muestra un esquema que trata de representar el sistema físico propuesto.

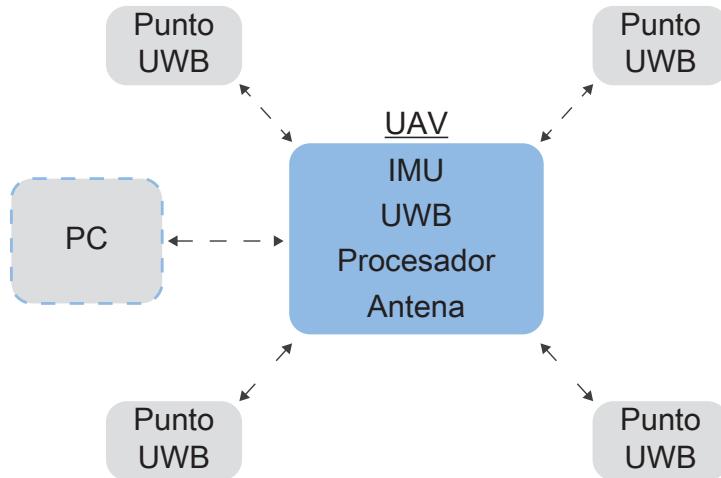


Figura 5.5: Esquema hardware del sistema propuesto.

Es en la estación en tierra donde se ejecutaría el software de integración de datos de ambos sensores. La información de la IMU sería transmitida a través de la antena de abordo del drone, mientras que la triangulación de la posición UWB se realizaría en la misma estación. En la siguiente sección se presenta un esquema para esclarecer el proceso de fusión de datos en sí.



(a) MiniIMU-9 v5 [10].

(b) DWM1000 Module [13].

Figura 5.6: Componentes propuestos para la solución.

Con respecto a los componentes necesarios se propone utilizar una *MiniIMU-9 v5* [10] y un transceptor UWB *DWM1000 Module* [13]. La IMU propuesta posee un giróscopo de tres ejes, un acelerómetro de tres ejes y un compás magnético de tres ejes integrados en una placa pequeña. Ambos elementos respetan el tamaño, el peso y el precio establecidos en la tabla 4.1. En la Figura 5.6 se muestran ambos componentes.

## Software

La integración de posiciones para obtener una única posición mejorada se realizaría mediante un algoritmo de fusión. Con el objetivo de ilustrar este proceso, se aporta la Figura 5.7.

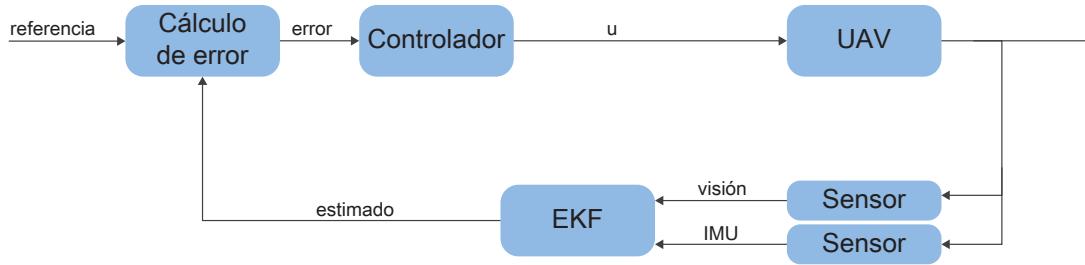


Figura 5.7: Esquema software del sistema propuesto.

El proceso estaría compuesto por un bucle retro-alimentado por la información de ambos sensores, IMU e UWB. Para fusión de estos datos se propone utilizar un filtro de Kalman extendido (EKF). Se propone utilizar un filtro de Kalman extendido en lugar de un filtro de Kalman básico debido a la no linealidades asociadas al problema. Por otro lado, al estar los modelos de transición bien definidos, no es necesario precisar de un UKF (*Unscented Kalman Filter*). Además, este tipo de filtros (EKF) son ampliamente utilizados en los sistemas de navegación y sistemas GPS [82]. Gracias al filtro de Kalman se obtendría una posición estimada del dron, que junto a una posición de referencia, es posible estimar el error en el seguimiento de la trayectoria. A través de un controlador, se trataría de eliminar este error transmitiendo al dron las instrucciones necesarias para ello. Existen diversas opciones a la hora de seleccionar el controlador a utilizar, un PID podría ser utilizado como propone Wang *et al.* en su estudio [83] u otros controladores más complejos como MPC entre otros.



# **Capítulo 6**

## **Conclusiones y líneas futuras**

Este capítulo reúne las conclusiones extraídas tras la realización del proyecto y describe posibles líneas futuras de trabajo que surgen a partir del mismo.

### **6.1. Conclusiones**

Los objetivos propuestos en la Sección 1.3 se han visto ampliamente satisfechos. En concreto, se ha plasmado una base común de clasificación para los sistemas de posicionamiento en interiores durante los Capítulos 2 y 3. En todo momento ha estado presente hacer un ejercicio de abstracción para entender mejor el espectro de sistemas, y de esta forma, hacer una representación sencilla y fácilmente entendible del mismo. Como ya se ha explicado, el espectro se ha dividido en tres sub-espectros ortogonales, métricas, algoritmos y tecnologías. Con el término “ortogonal” se quiere indicar que no existe solapamiento entre los sub-espectros y que una combinación de los tres da como resultado un sistema particular.

En segundo lugar, un método comparativo ha sido expuesto durante el Capítulo 4 y parte del Capítulo 5. Durante esta parte del trabajo, ha sido necesario extraer una serie de propiedades intrínsecas a los sistemas, los cuales no se pueden entender sin un correcto análisis de las mismas. A partir de las características propias de los sistemas un modelo matemático ha sido formulado, que permite puntuar tales propiedades y así extraer el sistema más valorado.

Por último, una solución al problema introducido durante las Secciones 1.2 y 5.1 ha sido sugerida durante el Capítulo 5. Como se han mencionado en diversas ocasiones a lo largo de esta memoria, la solución recomendada es una simple aproximación a la solución real, pues simplemente se busca una introducción a la resolución del problema. Esta solución es obtenida mediante la comparativa previamente explicada y su elección es discutida durante el capítulo. Sobre la solución se ha aportado unos esquemas que proponen una arquitectura hardware y software.

En resumen, las conclusiones sobre los objetivos enumerados en la Sección 1.3 son:

1. Se ha propuesto una representación y clasificación para los sistemas de posicionamiento en interiores durante los capítulos 2 y 3.
2. Se ha desarrollado un método comparativo en el capítulo 4.
3. Un sistema ha sido propuesto como solución a la aplicación seleccionada gracias a la comparativa desarrollada (cap. 5).

## 6.2. Líneas futuras

Este trabajo quiere sentar las bases en la selección de sistemas para aplicaciones que necesiten un posicionamiento en interiores. Un posible trabajo futuro será concretar y desarrollar la aproximación a la solución propuesta. No solo esta solución podría ser explorada, este estudio abre un abanico de soluciones posibles, tanto para la aplicación tratada como cualquier otra aplicación.

Por otro lado, también se propone el desarrollo e investigación de nuevos sistemas, bien sea mediante nuevas métricas, algoritmos o tecnologías. Posiblemente la línea más viable será el estudio de nuevos algoritmos que propongan alternativas en el posicionamiento mediante el análisis del entorno (*fingerprinting*). Esto abarca desde nuevos métodos probabilísticos a nuevos métodos en el tratamiento de imagen.

En resumen, las potenciales líneas futuras de trabajo propuestas son:

- Continuidad del proyecto y concretar la solución para la solución propuesta. Debe materializarse los esquemas de hardware y software propuestos, y comprobar, bien mediante simulación o pruebas reales, si los supuestos se corresponden con los resultados obtenidos.
- Explorar y comparar las soluciones propuestas para la aplicación, pues varias alternativas fueron introducidas antes de seleccionar la utilizada en este trabajo.
- Uso de la clasificación y comparativa en cualquier otra aplicación que necesite el posicionamiento en interiores. Esta línea de trabajo no se limita a desarrollos en el ámbito de la robótica.
- Nuevos sistemas de posicionamiento. En concreto, nuevos algoritmos basados en el análisis de imagen.

# Bibliografía

- [1] Tareq Ali Alhmiedat and Shuang-Hua Yang. A zigbee-based mobile tracking system through wireless sensor networks. 2008.
- [2] Paramvir Bahl, Venkata N Padmanabhan, Victor Bahl, and Venkat Padmanabhan. Radar: An in-building rf-based user location and tracking system. 2000.
- [3] Roberto Battiti, Nhat Thang Le, and Alessandro Villani. Location-aware computing: a neural network model for determining location in wireless lans. Technical report, University of Trento, 2002.
- [4] Alessandro Benini, Adriano Mancini, and Sauro Longhi. An imu/uwb/vision-based extended kalman filter for mini-uav localization in indoor environment using 802.15. 4a wireless sensor network. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 70(1-4):461–476, 2013.
- [5] Ramon F Brena, Juan Pablo García-Vázquez, Carlos E Galván-Tejada, David Muñoz-Rodríguez, Cesar Vargas-Rosales, and James Fangmeyer. Evolution of indoor positioning technologies: A survey. *Journal of Sensors*, 2017, 2017.
- [6] Mauro Brunato and Roberto Battiti. Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless lans. *Computer Networks*, 47(6):825–845, 2005.
- [7] Cesar Cadena, Luca Carlone, Henry Carrillo, Yasir Latif, Davide Scaramuzza, José Neira, Ian Reid, and John J Leonard. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on robotics*, 32(6):1309–1332, 2016.
- [8] Bradford Campbell, Prabal Dutta, Benjamin Kempke, Ye-Sheng Kuo, and Pat Pannuto. Decawave: Exploring state of the art commercial localization. *Ann Arbor*, 1001(4):48109, 2015.
- [9] Krzysztof Cisek, Artur Zolich, Kristian Klausen, and Tor Arne Johansen. Ultra-wide band real time location systems: Practical implementation and uav performance evaluation. In *2017 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*, pages 204–209. IEEE, 2017.
- [10] Pololu Corporation. Miniimu-9 v5. <https://www.pololu.com/product/2738>. Último acceso: 04-11-2019.
- [11] Christophe De Wagter, Sjoerd Tijmons, Bart DW Remes, and Guido CHE de Croon. Autonomous flight of a 20-gram flapping wing mav with a 4-gram onboard stereo vision system. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4982–4987. IEEE, 2014.

- [12] DecaWave. Decawave. <https://www.decawave.com/>. Último acceso: 08-10-2019.
- [13] DecaWave. Dwm1000-module. <https://www.decawave.com/product/dwm1000-module/>. Último acceso: 04-11-2019.
- [14] MWM Gamini Dissanayake, Paul Newman, Steve Clark, Hugh F Durrant-Whyte, and Michael Csorba. A solution to the simultaneous localization and map building (slam) problem. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 17(3):229–241, 2001.
- [15] Eachine. Eachine e010. <https://www.eachine.com>. Último acceso: 02-10-2019.
- [16] Shih-Hau Fang, Chu-Hsuan Wang, Ting-Yu Huang, Chin-Huang Yang, and Yung-Sheng Chen. An enhanced zigbee indoor positioning system with an ensemble approach. *IEEE Communications Letters*, 16(4):564–567, 2012.
- [17] Harald T Friis. A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5):254–256, 1946.
- [18] Christofer Fröhlich, Markus Mettenleiter, et al. Terrestrial laser scanning—new perspectives in 3d surveying. *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 36(Part 8):W2, 2004.
- [19] Yasuhiro Fukuhara, Masateru Minami, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. Dolphinhin: An autonomous indoor positioning system in ubiquitous computing environment. *WSTFES*, 3:53, 2003.
- [20] Nils Gageik, Michael Strohmeier, and Sergio Montenegro. An autonomous uav with an optical flow sensor for positioning and navigation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(10):341, 2013.
- [21] Sergio García, M Elena López, Rafael Barea, Luis M Bergasa, Alejandro Gómez, and Eduardo J Molinos. Indoor slam for micro aerial vehicles control using monocular camera and sensor fusion. In *2016 International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, pages 205–210. IEEE, 2016.
- [22] Peter Gober, Artur Ziviani, Petia Todorova, Marcelo Dias de Amorim, Philipp Hünerberg, and Serge Fdida. Topology control and localization in wireless ad hoc and sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 1(4):301–321, 2005.
- [23] Emanuele Goldoni, Alberto Savioli, Marco Risi, and Paolo Gamba. Experimental analysis of rss-based indoor localization with ieee 802.15. 4. In *2010 European Wireless Conference (EW)*, pages 71–77. IEEE, 2010.
- [24] Carles Gomez, Joaquim Oller, and Josep Paradells. Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *Sensors*, 12(9):11734–11753, 2012.
- [25] Ernesto Martín Gorostiza, Lázaro Galilea, José Luis, Francisco Javier Meca Meca, David Salido Monzú, Felipe Espinosa Zapata, and Luis Pallarés Puerto. Infrared sensor system for mobile-robot positioning in intelligent spaces. *Sensors*, 11(5):5416–5438, 2011.

- [26] Josef Hallberg, Marcus Nilsson, and Kåre Synnes. Positioning with bluetooth. In *International Conference on Telecommunications: Special Session on IoT Emerging Technologies: Design and Security (ITEMS'16) 16/05/2016-18/05/2016*, pages 954–958. IEEE Communications Society, 2003.
- [27] Janne Haverinen and Anssi Kemppainen. Global indoor self-localization based on the ambient magnetic field. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(10):1028–1035, 2009.
- [28] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello. A survey and taxonomy of location sensing systems for ubiquitous computing. UW CSE 01-08-03, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA, August 2001.
- [29] Jeffrey Hightower, Roy Want, and Gaetano Borriello. Spoton: An indoor 3d location sensing technology based on rf signal strength. 2000.
- [30] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and Elmar Wasle. *GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [31] LTD. HOKUYO AUTOMATIC CO. Hokuyo lidar. <https://www.hokuyo-aut.jp/>. Último acceso: 11-10-2019.
- [32] WANG Hongpeng and Fei Jia. A hybrid modeling for wlan positioning system. In *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pages 2152–2155. IEEE, 2007.
- [33] Apple Inc. ibeacon. <https://developer.apple.com/ibeacon/>. Último acceso: 08-10-2019.
- [34] Pei Jiang, Yunzhou Zhang, Wenyan Fu, Huiyu Liu, and Xiaolin Su. Indoor mobile localization based on wi-fi fingerprint’s important access point. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(4):429104, 2015.
- [35] LTD. JIANJIAN TECHNOLOGY CO. Jjrc h36. <https://www.jjrc.com>. Último acceso: 02-10-2019.
- [36] Shun Kawakami and Tomoaki Ohtsuki. Localization using iterative angle of arrival method sharing snapshots of coherent subarrays. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011(1):1–7, 2011.
- [37] Petri Kontkanen, Petri Myllymaki, Teemu Roos, Henry Tirri, Kimmo Valtonen, and Hannes Wettig. Topics in probabilistic location estimation in wireless networks. In *2004 IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE Cat. No. 04TH8754)*, volume 2, pages 1052–1056. IEEE, 2004.
- [38] Antti Kotanen, Marko Hannikainen, Helena Leppakoski, and Timo D Hamalainen. Experiments on local positioning with bluetooth. In *Proceedings ITCC 2003. International Conference on Information Technology: Coding and Computing*, pages 297–303. IEEE, 2003.
- [39] Koen Langendoen and Niels Reijers. Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison. *Computer networks*, 43(4):499–518, 2003.

- [40] Janire Larranaga, Leire Muguira, Juan-Manuel Lopez-Garde, and Juan-Ignacio Vazquez. An environment adaptive zigbee-based indoor positioning algorithm. In *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pages 1–8. IEEE, 2010.
- [41] Yuntian Li, Matteo Scanavino, Elisa Capello, Fabrizio Dabbene, Giorgio Guglieri, and Andrea Vilardi. A novel distributed architecture for uav indoor navigation. *Transportation research procedia*, 35:13–22, 2018.
- [42] Hui Liu, Houshang Darabi, Pat Banerjee, and Jing Liu. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6):1067–1080, 2007.
- [43] Kaikai Liu, Xinxin Liu, and Xiaolin Li. Guoguo: Enabling fine-grained indoor localization via smartphone. In *Proceeding of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 235–248. ACM, 2013.
- [44] Xiaohan Liu, Hideo Makino, and Kenichi Mase. Improved indoor location estimation using fluorescent light communication system with a nine-channel receiver. *IEICE transactions on communications*, 93(11):2936–2944, 2010.
- [45] IndoorAtlas Ltd. Indooratlas. <https://www.indooratlas.com/>. Último acceso: 07-10-2019.
- [46] Ubisense Ltd. Ubisense rtls. <https://www.ubisense.net/>. Último acceso: 08-10-2019.
- [47] Vicon Motion Systems Ltd. Vicon. <https://www.vicon.com/>. Último acceso: 10-10-2019.
- [48] Atri Mandal, Cristina V Lopes, Tony Givargis, Amir Haghigat, Raja Jurdak, and Pierre Baldi. Beep: 3d indoor positioning using audible sound. In *Second IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2005. CCNC. 2005*, pages 348–353. IEEE, 2005.
- [49] Rainer Mautz. *Indoor positioning technologies*. PhD thesis, ETH Zurich, Zurich, 2012.
- [50] Santiago Mazuelas, Alfonso Bahillo, Ruben M Lorenzo, Patricia Fernandez, Francisco A Lago, Eduardo Garcia, Juan Blas, and Evaristo J Abril. Robust indoor positioning provided by real-time rssı values in unmodified wlan networks. *IEEE Journal of selected topics in signal processing*, 3(5):821–831, 2009.
- [51] Kimberly McGuire, Guido De Croon, Christophe De Wagter, Karl Tuyls, and Hilbert Kappen. Efficient optical flow and stereo vision for velocity estimation and obstacle avoidance on an autonomous pocket drone. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2):1070–1076, 2017.
- [52] Masateru Minami, Yasuhiro Fukuju, Kazuki Hirasawa, Shigeaki Yokoyama, Moriyuki Mizumachi, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. Dolphin: A practical approach for implementing a fully distributed indoor ultrasonic positioning system. In *International Conference on Ubiquitous Computing*, pages 347–365. Springer, 2004.
- [53] Boaz Ben Moshe, Nir Shvalb, Jonathan Baadani, Itay Nagar, and Harel Levy. Indoor positioning and navigation for micro uav drones—work in progress. In *2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, pages 1–5. IEEE, 2012.

- [54] Yasir Mohd Mustafah, Amelia Wong Azman, and Fajril Akbar. Indoor uav positioning using stereo vision sensor. *Procedia Engineering*, 41:575–579, 2012.
- [55] Inc. DBA OptiTrack NaturalPoint. Optitrack. <https://optitrack.com/>. Último acceso: 10-10-2019.
- [56] Lionel M Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau, and Abhishek 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)*., pages 407–415. IEEE, 2003.
- [57] Koninklijke Philips N.V. Solución comercial de philips para vlc. <https://www.lighting.philips.com/main/systems/lighting-systems/indoor-positioning>. Último acceso: 05-10-2019.
- [58] Nikon Metrology NV. Nikon metrology. <https://www.nikonmetrology.com/es/productos/metrologia-de-gran-volumen/igps>. Último acceso: 11-10-2019.
- [59] Kaveh Pahlavan, Xinrong Li, and Juha-Pekka Makela. Indoor geolocation science and technology. *IEEE Communications Magazine*, 40(2):112–118, 2002.
- [60] José Paredes, Fernando Álvarez, Teodoro Aguilera, and José Villadangos. 3d indoor positioning of uavs with spread spectrum ultrasound and time-of-flight cameras. *Sensors*, 18(1):89, 2018.
- [61] Chunyi Peng, Guobin Shen, and Yongguang Zhang. Beepbeep: A high-accuracy acoustic-based system for ranging and localization using cots devices. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 11(1):4, 2012.
- [62] Phongsak Prasithsangaree, Prashant Krishnamurthy, and Panos Chrysanthis. On indoor position location with wireless lans. In *The 13th IEEE international symposium on personal, indoor and mobile radio communications*, volume 2, pages 720–724. IEEE, 2002.
- [63] Nissanka B Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan. The cricket location-support system. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 32–43. ACM, 2000.
- [64] Frederick H Raab, Ernest B Blood, Terry O Steiner, and Herbert R Jones. Magnetic position and orientation tracking system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, (5):709–718, 1979.
- [65] Marvelmind Robotics. Marvelmind. <https://marvelmind.com/>. Último acceso: 3-11-2019.
- [66] Antonio Ramón Jiménez Ruiz and Fernando Seco Granja. Comparing ubisense, bespoon, and decawave uwb location systems: Indoor performance analysis. *IEEE Transactions on instrumentation and Measurement*, 66(8):2106–2117, 2017.
- [67] Wilson Sakpere, Michael Adeyeye Oshin, and Nhlanhla Bw Mlitwa. A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies. *South African Computer Journal*, 29(3), 2017.

- [68] BeSpoon SAS. Bespoon. <http://bespoon.com/>. Último acceso: 08-10-2019.
- [69] Ali H Sayed, Alireza Tarighat, and Nima Khajehnouri. Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information. *IEEE signal processing magazine*, 22(4):24–40, 2005.
- [70] Davide Scaramuzza and Friedrich Fraundorfer. Visual odometry [tutorial]. *IEEE robotics & automation magazine*, 18(4):80–92, 2011.
- [71] Robert Schmitt, S Nisch, A Schönberg, F Demeester, and S Renders. Performance evaluation of igps for industrial applications. In *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pages 1–8. IEEE, 2010.
- [72] Scale Competition Xtreme S.L. Scalextric. <https://scalextric.es>. Último acceso: 02-10-2019.
- [73] Pete Steggles and Stephan Gschwind. The ubisense smart space platform. 2005.
- [74] William C Stone. Electromagnetic signal attenuation in construction materials. Technical report, 1997.
- [75] Andreas Teuber, Bernd Eissfeller, and Thomas Pany. A two-stage fuzzy logic approach for wireless lan indoor positioning. In *Proc. IEEE/ION Position Location Navigat. Symp*, volume 4, pages 730–738, 2006.
- [76] Janis Tiemann, Fabian Eckermann, and Christian Wietfeld. Atlas-an open-source tdoa-based ultra-wideband localization system. In *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [77] Janis Tiemann, Lucas Koring, and Christian Wietfeld. Atlas: Tdoa-based uwb localization. 2018.
- [78] Sebastian Tilch and Rainer Mautz. Current investigations at the eth zurich in optical indoor positioning. In *2010 7th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pages 174–178. IEEE, 2010.
- [79] Christel-loic Tisse, Thomas Fauvel, and Hugh Durrant-Whyte. A micro aerial vehicle motion capture system. In *1st International Conference on Sensing Technology*, pages 533–538. Citeseer, 2005.
- [80] Norie Uchitomi, Atsuki Inada, Manato Fujimoto, Tomotaka Wada, Kouichi Matsuura, and Hiromi Okada. Accurate indoor position estimation by swift-communication range recognition (s-crr) method in passive rfid systems. In *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pages 1–7. IEEE, 2010.
- [81] Inc. Velodyne Lidar. Velodyne lidar. <https://velodynelidar.com/>. Último acceso: 11-10-2019.
- [82] Eric Wan. Sigma-point filters: an overview with applications to integrated navigation and vision assisted control. In *2006 IEEE Nonlinear Statistical Signal Processing Workshop*, pages 201–202. IEEE, 2006.

- [83] Can Wang, Kang Li, Guoyuan Liang, Haoyao Chen, Sheng Huang, and Xinyu Wu. A heterogeneous sensing system-based method for unmanned aerial vehicle indoor positioning. *Sensors*, 17(8):1842, 2017.
- [84] Fei Wang, Tao Wang, Ben M Chen, and Tong H Lee. An indoor unmanned coaxial rotorcraft system with vision positioning. In *IEEE ICCA 2010*, pages 291–296. IEEE, 2010.
- [85] Roy Want, Andy Hopper, Veronica Falcao, and Jonathan Gibbons. The active badge location system. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 10(1):91–102, 1992.
- [86] Andy Ward, Alan Jones, and Andy Hopper. A new location technique for the active office. *IEEE Personal communications*, 4(5):42–47, 1997.
- [87] Andrew Wheeler. Commercial applications of wireless sensor networks using zigbee. *IEEE Communications Magazine*, 45(4):70–77, 2007.
- [88] Chao-Lin Wu, Li-Chen Fu, and Feng-Li Lian. Wlan location determination in e-home via support vector classification. In *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2004*, volume 2, pages 1026–1031. IEEE, 2004.
- [89] Jaegeol Yim, Chansik Park, Jaehun Joo, and Seunghwan Jeong. Extended kalman filter for wireless lan based indoor positioning. *Decision support systems*, 45(4):960–971, 2008.
- [90] Weizhi Zhang, MI Sakib Chowdhury, and Mohsen Kavehrad. Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications. *Optical Engineering*, 53(4):045105, 2014.
- [91] Junyang Zhou, KM-K Chu, and JK-Y Ng. Providing location services within a radio cellular network using ellipse propagation model. In *19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05) Volume 1 (AINA papers)*, volume 1, pages 559–564. IEEE, 2005.
- [92] Qiang Zhou, Danping Zou, and Peilin Liu. Hybrid obstacle avoidance system with vision and ultrasonic sensors for multi-rotor mavs. *Industrial Robot: An International Journal*, 45(2):227–236, 2018.