



UNIVERSIDAD DE MURCIA
ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

TESIS DOCTORAL

Avances en sistemas de movilidad personal conectados y
aumentados por aprendizaje automático

D. Luis Bernal Escobedo
2024



UNIVERSIDAD DE MURCIA
ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
TESIS DOCTORAL

Avances en sistemas de movilidad personal conectados y
aumentados por aprendizaje automático

Autor: D. Luis Bernal Escobedo

Directores: Dr. Ramón J. Sánchez Iborra y
Dr. Antonio F. Skarmeta Gómez



**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD
DE LA TESIS PRESENTADA EN MODALIDAD DE COMPENDIO O ARTÍCULOS PARA
OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

Aprobado por la Comisión General de Doctorado el 19-10-2022

D./Dña. Luis Bernal Escobedo

doctorando del Programa de Doctorado en

Programa de Doctorado en Informática

de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Murcia, como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor y titulada:

Avances en sistemas de movilidad personal conectados y aumentados por aprendizaje automático

y dirigida por,

D./Dña. Ramón J. Sánchez Iborra

D./Dña. Antonio F. Skármeta Gómez

D./Dña.

DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Además, al haber sido autorizada como compendio de publicaciones o, tal y como prevé el artículo 29.8 del reglamento, cuenta con:

- *La aceptación por escrito de los coautores de las publicaciones de que el doctorando las presente como parte de la tesis.*
- *En su caso, la renuncia por escrito de los coautores no doctores de dichos trabajos a presentarlos como parte de otras tesis doctorales en la Universidad de Murcia o en cualquier otra universidad.*

Del mismo modo, asumo ante la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada, en caso de plagio, de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

En Murcia, a 8 de Julio de 2024

Firma: LUIS BERNAL ESCOBEDO -
NIF:***4746** el día 20/09/2024 con un
certificado emitido por ACCVCA-120

Fdo.: Luis Bernal Escobedo

A mi madre y mi familia, que me hacen sentir afortunado de tenerlos, a la familia que se elige y acompaña siempre incluso en los peores momentos, a mis tutores, por su paciencia. Y a las musarañas.

“Eso desean quienes viven éstos tiempos. Pero no les toca a ellos decidir. Lo único que podemos decidir es qué hacer con el tiempo que se nos ha dado” - Olórin

Índice general

1. Resumen	ix
1.1. Motivación	IX
1.2. Objetivos y Metodología	XII
1.2.1. Objetivos	XII
1.2.2. Metodología	XII
1.3. Resultados	XV
1.3.1. <i>Eco-Efficient Mobility in Smart City Scenarios</i>	XV
1.3.2. <i>Machine Learning-Based Radio Access Technology Selection in the Internet of Moving Things</i>	XVI
1.3.3. <i>TinyML-Based Fall Detection for Connected Personal Mobility Vehicles</i>	XVI
1.4. Conclusiones y Trabajos Futuros	XVIII
1.4.1. Conclusiones	XVIII
1.4.2. Trabajo futuro	XIX
2. Estado del arte	xxiii
2.1. Introducción	XXIII
2.2. Movilidad cooperativa, conectada, inteligente y eficiente	XXIII
2.3. Vehículos ligeros equipados	XXV
2.4. Inteligencia artificial embebida	XXV
2.4.1. Coordinación de múltiples tecnologías de acceso radio	XXVI
2.4.2. Detección de actividad humana	XXVII
2.5. Análisis	XXVIII
3. Publicaciones que componen la Tesis	1
3.1. Eco-Efficient Mobility in Smart City Scenarios	2
3.1.1. Abstract	2
3.2. Machine Learning-Based Radio Access Technology Selection in the Internet of Moving Things	4
3.2.1. Abstract	4
3.3. TinyML-Based Fall Detection for Connected Personal Mobility Vehicles	6
3.3.1. Abstract	6
4. Bibliografía	9
Publicaciones asociadas a esta tesis doctoral	9
Bibliografía	9

Resumen

1.1. Motivación

Durante los últimos años, hemos presenciado el nacimiento y firme establecimiento del paradigma de la movilidad vehicular personal. Son muchas las motivaciones que han llevado al desarrollo de esta industria, pero la principal es la demanda de vehículos que den un servicio ágil a sus usuarios, al tiempo que permitan una reducción drástica de las emisiones asociadas al sector del transporte. Esto viene condicionado por una creciente concienciación con los problemas de emisiones de vehículos de combustión interna entre la población y, en general, con el cambio climático. Este tipo de vehículos son responsables del 24% de emisiones de CO₂ a la atmósfera [4]; es por ello que hoy en día está surgiendo una amplia gama de vehículos eléctricos que tratan de suplir a los alimentados por petróleo y sus derivados. No únicamente coches, si no también motocicletas o incluso vehículos más orientados a entornos urbanos como patinetes, bicicletas, *segway*, *e-scooters* etc. A este segmento de vehículos es lo que denominamos vehículos de movilidad personal, ya que suelen estar preparados para transportar a una única persona, siendo dispositivos cómodos, baratos y alimentados por una batería que puede ser cargada desde la red eléctrica, sin necesidad de equipamiento adicional. En la actualidad, es muy habitual encontrar este tipo de vehículo en nuestras ciudades. Una de sus principales características es su ligereza comparado con otros vehículos rodados, con las consiguientes limitaciones estructurales en sus componentes: chasis, motor, alimentación, etc. Es por ello que este conjunto de vehículos requiere de un especial cuidado a la hora de ser enriquecidos con tecnologías de última generación, como las relacionadas con las comunicaciones y la computación, ya que tanto la carga que pueden transportar como el consumo energético de posibles periféricos deben ser comedidos.

En esta línea, se ha realizado un importante esfuerzo por parte del mundo académico y la industria por proponer soluciones que permitan integrar estos nuevos vehículos en los paradigmas de ciudades inteligentes y transportes inteligentes cooperativos (CCAM). CCAM es una iniciativa europea [5] que tiene un gran potencial para mejorar la gestión del tráfico, la seguridad vial, la habitabilidad y el confort. Por ello, en toda Europa, empresas y gobiernos se están preparando para la implantación del ecosistema CCAM, que es una transición fundamental y compleja de nuestro sistema de movilidad, siendo plenamente conscientes de que la integración de los vehículos de movilidad personal ha de partir de las limitaciones propias de los mismos. Éstas están referidas a un consumo de energía muy controlado, un peso de carga reducido y un coste contenido, tanto en la inversión inicial de la unidad de a bordo usada, como en las posibles cuotas de los servicios de comunicaciones utilizados. Pese

a estas limitaciones, los servicios asociados a los entornos vehiculares, demandan comunicaciones fiables y características de procesamiento inteligente y ubicuo. Esto supone un reto y ha requerido el amalgamamiento de diferentes avances recientes, como los nuevos sistemas de comunicaciones de Internet de las Cosas (Internet of Things - IoT) y vehiculares, adaptaciones de técnicas de aprendizaje automático a entornos de procesamiento limitados y la realización de pruebas de concepto para validar la viabilidad de estas soluciones dentro del paradigma de la movilidad inteligente y comunicada aplicado a vehículos ligeros de movilidad personal.

Considerando el dominio de las comunicaciones en el segmento de vehículos ligeros, las tendencias de investigación actuales apuestan por utilizar tecnologías de comunicación cuyo desempeño en relación con la energía consumida y el coste de los dispositivos radio puedan ser optimizados a su máximo exponente. Si bien no se renuncian a soluciones basadas en tecnologías de comunicación habituales, por ejemplo WiFi u otras basadas en tecnologías móviles, como NB-IoT (de la familia de las comunicaciones celulares 3GPP), la tecnología que ha captado mayor atención es la denominada LPWAN. Ésta permite el envío de datos a muy largas distancias (decenas de kilómetros) con un consumo energético muy bajo. Además, el coste de los equipos radio para dicha tecnología también es muy controlado, por lo que LPWAN se erige como una alternativa muy interesante a considerar para dotar con conectividad ubicua a los vehículos de movilidad personal. Sin embargo, esta tecnología, si bien aporta comunicaciones con un consumo de energía ínfimo, está diseñada para la transmisión de unos pocos mensajes por hora. Esto conlleva que si se busca mantener esta eficiencia en el funcionamiento del dispositivo, éste ha de ser autosuficiente para las tareas más comunes, es decir tomar sus propias decisiones, no pudiendo depender en todo momento de un servicio externo que le indique las acciones a realizar mediante el envío o recepción de mensajes radio.

En este contexto, se hace necesaria la integración de mecanismos inteligentes en los vehículos de movilidad personal, de modo que puedan procesar de forma local todos los datos que recogen del entorno y, así, poder tomar decisiones sin depender de la infraestructura, tal y cómo se explicó anteriormente. La solución más extendida en este sentido es el aprendizaje automático (ML), que permite a los sistemas ser capaces de tomar decisiones y detectar situaciones de manera autónoma sin necesidad de realizar constantemente comunicaciones con servicios externos, lo que significa una dependencia de comunicaciones intensas a través tecnologías radio costosas y con un alto consumo de energía. Sin embargo, dadas las reducidas capacidades a nivel de cómputo y memoria de los dispositivos de procesado que pueden ser integrados en los vehículos ligeros, no se puede recurrir a algoritmos de ML o IA tradicionales, normalmente ejecutados en poderosos procesadores o unidades de procesamiento de gráficos GPU, ya que éstos requieren de consumos de energía equivalentes al del propio vehículo al hacer uso de un sistema completo de procesamiento tradicional, el cual, además, añade una carga excesiva al vehículo. Es aquí donde el paradigma de aprendizaje automático para entornos reducidos, *TinyML*, se presenta como una solución adecuada para poder integrar inteligencia en entornos de procesamiento limitados. Éste permite ejecutar algoritmos de ML utilizando recursos cuyo coste económico resulta despreciable y, además, reduciendo sobremanera el consumo energético de estas actividades de cómputo, por lo que el paradigma *TinyML* se presenta como una alternativa muy válida para dotar con inteligencia a los dispositivos de movilidad personal.

Considerando estas tecnologías de comunicaciones y computación avanzada, las ventajas que aporta la integración de los vehículos de movilidad personal dentro del ecosistema CCAM son múltiples [6]. En primer lugar, éstos se consideran los vehículos del futuro para la movilidad urbana, demostrable por el hecho de que están teniendo una gran acogida durante los últimos años, lo que ha suscitado un gran interés por la comunidad científica para evaluar sus capacidades y usos futuros [7]. Esto hace que integrar estos sistemas de movilidad emergente en el paradigma de las ciudades inteligentes sea algo muy interesante y estudiado durante los últimos años. Esta integración se puede realizar bajo el paraguas de las Vehicular Sensor Network (VSN), es decir redes de sensores vehiculares que realizan tomas de datos por todo su recorrido, realizando una sensorización adicional a la desplegada en la propia ciudad inteligente [8]. También resulta interesante el uso de este tipo de vehículos como servicio extra al usuario, ya que el propio vehículo puede informar de problemas en la ruta actual, rutas alternativas o detección de anomalías en el entorno, como niveles de polución elevados o defectos en la calzada

[9]. El vehículo también puede autodiagnosticarse de manera automatizada para encontrar fallos en el hardware o en su uso, por ejemplo detección de caídas del usuario. De este modo, resulta de gran interés el desarrollo de nuevas técnicas para habilitar estas capacidades autónomas añadidas a estos vehículos de manera eficiente y transparente para el usuario. Tal y cómo se ha discutido anteriormente, esto se debe realizar integrando soluciones de sistemas de comunicación eficiente (por ejemplo, IoT), sistemas de procesamiento embebidos de muy bajo consumo y algoritmos de aprendizaje automático adaptados a estos entornos. La convergencia de estos avances habilitará un salto tecnológico en los vehículos ligeros de modo que se podrán realizar e integrar desarrollos complejos que mejoren la calidad de vida del usuario.

A la vista de los retos mencionados, así como para atender la creciente congestión del tráfico en entornos urbanos y la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, es importante buscar soluciones de movilidad más sostenibles y eficientes. Los dispositivos dentro del segmento definido anteriormente como vehículos de movilidad personal, como patinetes eléctricos, *segways*, etc., representan una alternativa sostenible y cada vez más popular a los medios de transporte tradicionales [10] y pueden contribuir a mejorar la seguridad vial, la eficiencia del tráfico y la experiencia del usuario en entornos urbanos. Sin embargo, para que estos dispositivos puedan ser plenamente integrados en entornos CCAM y proporcionar servicios avanzados de movilidad, es necesario abordar desafíos relacionados con su conectividad, capacidad de procesamiento y soporte de dispositivos periféricos. Es por ello, que esta tesis doctoral tiene como foco principal el proponer soluciones reales para dar respuesta a estos retos. De esta forma, se han analizado distintos paradigmas de comunicación, tanto aquellos dedicados a los entornos vehiculares, como las más modernas tecnologías de red del ecosistema IoT e incluso redes celulares, para proveer conectividad ubicua y de alta fiabilidad a vehículos de movilidad personal. Además, se han estudiado distintos paradigmas de Inteligencia Artificial (IA) para poder introducir algoritmos de procesamiento inteligente en estos dispositivos para hacerlos más autónomos; todo ello considerando las restricciones de base que éstos presentan. Además, se han dedicado importantes esfuerzos en el diseño, implementación y evaluación de dispositivos embarcados (On-board Unit, OBU) ligeros [11] que soporten las tecnologías anteriormente citadas para demostrar la integración de los vehículos de movilidad personal en el paradigma CCAM [12].

De esta forma, considerando que la integración de soluciones tecnológicas tradicionales en vehículos ligeros es difícilmente asumible por coste, complejidad y consumo energético de las mismas, la línea de investigación troncal de esta tesis doctoral se ha centrado en el diseño, desarrollo y evaluación sobre dispositivos reales de soluciones de sensorización embebidas, sistemas de comunicaciones optimizados y algoritmos de aprendizaje automático (ML) adaptados para afrontar los desafíos que se presentan en la integración de los vehículos de movilidad personal en el ecosistema CCAM y, en general, en el paradigma de las ciudades inteligentes. En concreto, durante el desarrollo de esta tesis, se han propuesto soluciones para estos retos de manera holística considerando los principales pilares identificados anteriormente. Se aborda la integración de servicios CCAM utilizando comunicaciones ultra eficientes LPWAN a través del uso inteligente y optimizado de estos sistemas de comunicaciones. Se ha demostrado la competencia del paradigma *TinyML* como tecnología para desarrollar comportamientos inteligentes y autónomos de manera eficiente y sencilla, dotando al vehículo ligero de independencia con respecto a servicios externos, adoptando una estrategia alineada con los paradigmas de computación *edge* y *fog*. Finalmente, se ha desarrollado e implementado una unidad de a bordo OBU que, cumpliendo la premisa de la eficiencia energética y el bajo coste, sea capaz de funcionar como una plataforma modular de desarrollo de sistemas CCAM y sensorica para habilitar la toma de datos reales en vehículos reales, así como validar pruebas de concepto de un modo fidedigno.

Esta tesis doctoral ha sido financiada por el proyecto PID2020-112675RB-C44 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033; por la Comisión Europea, a través del proyecto 5G-MOBIX (ref. 825496); Por el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, bajo el proyecto MECANO (ref. PGE-MOVES-SING-2019000104) y ONOFRE 3 (ref. PID2020-112675RB), por la fundación BBVA bajo el programa de becas Leonardo de 2018 para investigadores y creadores de cultura y por el ministerio de ciencia, innovación y universidades, con fondos de desarrollo europeo bajo el proyecto 5G Huerta (ref. EQC2019-006364-P).

1.2. Objetivos y Metodología

1.2.1. Objetivos

La idea de mejorar la experiencia así como la seguridad vial de los usuarios cuando hacen uso de vehículos personales representa el eje central de esta tesis doctoral. Para ello, tal y como se ha comentado anteriormente, diferentes tecnologías, tanto desde la perspectiva de las comunicaciones como de los sistemas de computación, deben converger y cooperar de forma adecuada en estos dispositivos. De este modo, el fin último de la investigación de esta tesis doctoral es explorar las posibilidades que ofrecen los dispositivos de movilidad urbana enriquecidos con (i) técnicas de comunicación avanzadas para ser incluidos dentro del paradigma CCAM, así como con (ii) algoritmos de ML adaptados a estos entornos, para abordar el diseño e implementación de una unidad embarcada totalmente funcional para estos vehículos. Esto permitirá que los vehículos ligeros queden conectados de forma ubicua y constante, además de poder tomar decisiones autónomas para la evaluación del entorno y disparar alarmas o comportamientos inteligentes en el dispositivo sin interacción alguna por parte del usuario. De este modo, los objetivos definidos en esta tesis doctoral son los siguientes:

1. Comprender y examinar el estado actual del paradigma de la movilidad personal, así como sus requisitos y necesidades desde un punto de vista tecnológico y de servicios a desarrollar.
2. Estudiar en detalle las propuestas existentes que tratan de dar respuesta a los retos y necesidades identificadas en el objetivo anterior, con foco en tecnologías de comunicación así como en técnicas avanzadas de procesamiento adaptadas al ecosistema bajo estudio.
3. Analizar y programar modelos de procesado de datos basados en ML y, concretamente, siguiendo el paradigma *TinyML* que agrupa a un conjunto de tecnologías de aprendizaje automático embebidas.
4. Evaluar y seleccionar las tecnologías de comunicación más adecuadas para ser empleadas dentro del paradigma de la movilidad personal.
5. Desarrollar e implementar un dispositivo embarcado real completamente funcional, incluyendo las tecnologías de computación y comunicación analizadas anteriormente.
6. Proponer y desarrollar servicios que puedan ser integrados en el dispositivo diseñado, haciendo uso de técnicas avanzadas de procesamiento y las tecnologías de comunicaciones identificadas.
7. Validar y evaluar el desempeño de la solución propuesta en escenarios reales.

1.2.2. Metodología

Para conseguir los objetivos anteriormente mencionados, se ha tomado como eje central de la investigación desarrollada el estudio detallado de las últimas técnicas de procesamiento basadas en ML embebido, así como de las soluciones de comunicación de última generación para el diseño, desarrollo e implementación de una unidad embarcada (OBU) que pueda ser integrada de forma ágil y segura en vehículos ligeros.

De este modo, la metodología adoptada en esta tesis doctoral ha seguido un proceso iterativo en el que, partiendo de un estudio exhaustivo del estado de arte en relación con el campo de estudio tratado, se han ido realizando desarrollos e implementaciones que se han ido validando y refinando gracias a pruebas y evaluaciones de desempeño llevadas a cabo en entornos reales.

Las fases que han compuesto esta tesis doctoral son las siguientes:

- Análisis del estado del arte de diferentes paradigmas y tecnologías, como son las unidades embarcadas y sensores aplicados en sistemas de movilidad personal, los algoritmos de ML eficientes para su integración en dispositivos embebidos y de bajo consumo, la evolución de las

tecnologías de comunicación de bajo consumo LPWAN y las nuevas tendencias en movilidad urbana sostenible. Los resultados de este análisis han quedado reflejados en el primer artículo que compone el compendio de publicaciones de esta tesis doctoral [1]. Esta fase aborda los Objetivos 1 y 2.

- Estudio y análisis detallado del paradigma *TinyML*, que propone la adaptación de complejos modelos de ML para que puedan ser integrados en dispositivos con baja capacidad de memoria y procesamiento. En esta fase, se han analizado y probado distintas librerías y soluciones encontradas en la literatura relacionada, gracias a la revisión llevada a cabo en la fase anterior. Este estudio ha resultado la base que ha permitido los desarrollos llevados a cabo en las fases siguientes y ha quedado reflejado en el segundo y tercer artículo que componen el compendio de publicaciones de esta tesis doctoral [2], [3]. Esta fase aborda los Objetivos 2 y 3.
- Revisión del ecosistema de tecnologías de comunicación inalámbricas, centradas en el paradigma IoT así como en soluciones para entornos vehiculares. Gracias a la revisión bibliográfica llevada a cabo en la primera fase, se han escogido un abanico de tecnologías de comunicación inalámbricas, sobre todo aquellas siguiendo el paradigma LPWAN, y se ha analizado la viabilidad de su empleo en los entornos estudiados en esta tesis doctoral. Los resultados de esta fase han quedado plasmados en el segundo artículo que compone el compendio de publicaciones que forman esta tesis doctoral [2]. Esta fase aborda los Objetivos 2 y 4.
- Diseño, desarrollo y evaluación de un dispositivo embarcado (OBU) de referencia con diferentes opciones de comunicación y procesamiento investigadas en las fases anteriores, así como sensores para la conectividad de dispositivos de movilidad personal. Los resultados de esta fase han quedado plasmados en los tres artículos que componen el compendio de publicaciones de esta tesis doctoral [1]-[3]. Esta fase aborda los Objetivos 3, 4 y 5.
- Propuesta de servicios que resulten novedosos y útiles para los usuarios de los vehículos de movilidad personal y que exploten las posibilidades de la unidad embarcada desarrollada. Estas propuestas y su implementación han quedado reflejadas en el segundo y tercer artículo que componen el compendio de publicaciones de esta tesis doctoral [2], [3]. Esta fase aborda el Objetivo 6.
- Evaluación en entornos reales y mejora tanto de la unidad embarcada implementada, como de los servicios integrados en ella, haciendo uso de modelos *TinyML* y tecnologías de comunicación varias, sobre todo aquellas provenientes del ámbito del IoT. Los resultados de esta fase han quedado plasmados en los tres artículos que componen el compendio de publicaciones de esta tesis doctoral [1]-[3]. Esta fase aborda los Objetivos 4, 5 y 7.

Campos de estudio

Uniendo los ámbitos de investigación anteriormente mencionados se han explorado las posibilidades que ofrece la combinación de estas nuevas tecnologías y paradigmas en el sector de la movilidad personal. A continuación se aporta un contexto más detallado de los distintos campos de estudio tratados.

Las tecnologías de aprendizaje automático embebidas (*embedded ML*) son aquellas que se integran directamente en dispositivos embebidos y pueden realizar tareas de aprendizaje automático muy eficientemente sin necesidad de conectarse a un servidor o nube. Esto las hace ideales para aplicaciones que requieren tomar decisiones rápidamente, en sistemas con poca o nula conectividad a Internet. Esto habilita novedosos paradigmas de computación como el *fog computing* [13] o el *Multi-access Edge Computing* (MEC) [14], donde las tareas de cómputo son delegadas (*offloaded*) a diferentes capas entre el dispositivo final, la infraestructura de comunicaciones y el *cloud*, según los requisitos de cómputo de cada tarea y la necesidad de velocidad de respuesta de las mismas. La tecnología que propone la adaptación de complejos modelos de ML para ser ejecutados por dispositivos con capacidad de cómputo limitada se denomina *TinyML* [15], [16]. Esta tecnología se caracteriza por permitir el desarrollo

de modelos con un consumo de energía y recursos muy bajo, lo que los hace muy adecuados para dispositivos embebidos con recursos limitados. Además, pueden proporcionar resultados de aprendizaje automático precisos en tiempo real y pueden ser utilizados en una amplia variedad de aplicaciones, como el análisis de sensor de datos o la detección de eventos. De este modo, se han estudiado varios algoritmos de ML embebidos (*TinyML*) y se han evaluado en términos de eficiencia, especialmente en el ámbito de consumo de recursos y velocidad de toma de decisiones.

Además, se han explorado tecnologías de comunicación inalámbricas de muy bajo consumo destinadas a comunicaciones de embebidos, tanto basadas en la pila de comunicaciones celulares de la asociación de estándares para comunicaciones móviles 3GPP, como es NB-IoT como una tecnología puramente LPWAN, como es LoRaWAN. El paradigma LPWAN permite proporcionar conectividad de larga distancia con un consumo energético muy reducido. En concreto, las tecnologías LPWAN [17], [18] son unas tecnologías de red de área amplia de bajo consumo de energía diseñada para proporcionar conectividad de baja velocidad a dispositivos embebidos y sensores con requisitos limitados de ancho de banda, coste y un consumo de energía mínimo. Estas tecnologías se utilizan a menudo en aplicaciones de IoT para proporcionar conectividad a dispositivos por su muy bajo consumo de energía, coste y largo alcance, como dispositivos de monitorización ambiental o de control de agricultura. Algunos ejemplos de tecnologías LPWAN incluyen LoRaWAN, Sigfox, LTE-CAT M1 o Narrow-Band IoT (NB-IoT) [19], [20], [21], estas últimas basadas en la pila de comunicaciones móviles LTE definida por el 3GPP, como se ha mencionado anteriormente. Estas tecnologías se caracterizan por tener un consumo de energía muy bajo, un alcance de hasta varios kilómetros y un ancho de banda de entre unos cientos de kilobits por segundo a unos cientos de bits por segundo [18]. Aunque tienen un rendimiento de velocidad y capacidad inferior a otras tecnologías de red, como 4G, 5G o WiFi, son ideales para aplicaciones de IoT que necesitan una conectividad de bajo coste y un bajo consumo de energía con unos requisitos de ancho de banda limitados, de modo que habilitan el sensado móvil urbano en dispositivos de recursos limitados, con un presupuesto de energía mínimo.

Finalmente, para conseguir la integración de ambos paradigmas y con la motivación de mejorar la calidad de experiencia del usuario de vehículos de movilidad personal, se ha diseñado e implementado una unidad embarcada (OBU) altamente flexible, sensorizada y de bajo consumo, en la que se han probado distintos modelos de aprendizaje automático ML y configuraciones de comunicación para habilitar dos servicios concretos: la detección de caídas y la selección dinámica de la interfaz de red inalámbrica a utilizar en comunicaciones de entornos CCAM [5]. En el primer caso, se ha implementado dicho servicio con la inspiración de los sistemas de detección de caída y llamada de socorro para personas dependientes y se ha aplicado a los usuarios más vulnerables de los entornos de movilidad urbano, es decir, los conductores de vehículos personales, como *e-scooters*, bicicletas, etc., haciendo una aproximación a la integración de los mismos en el ecosistema CCAM. Con este caso de uso, ha quedado demostrado como las tecnologías de ML embebido y de comunicaciones IoT pueden aportar seguridad y fiabilidad en el día a día de los usuarios aún estando funcionando en entornos de muy bajo consumo y limitados a nivel computacional. También, se ha desarrollado un algoritmo inteligente de selección de radio que coordina las interfaces de red inalámbricas integradas en la unidad embarcada. De esta manera se pretende demostrar una gestión autónoma e inteligente de las capacidades de comunicación del embebido atendiendo a su estado de operación, considerando su nivel de cobertura, batería restante, urgencia y tipología del mensaje a enviar, etc.

Para evaluar el rendimiento del dispositivo implementado y los algoritmos desarrollados, se han llevado a cabo experimentos en entornos reales y se han recogido y analizado datos de sensores y de las comunicaciones empleadas. Los resultados de estos experimentos se han utilizado para evaluar la viabilidad de integrar dispositivos de movilidad personal y algoritmos ML en entornos urbanos inteligentes y para identificar las oportunidades y desafíos futuros en el campo de la movilidad sostenible y eficiente.

1.3. Resultados

Los objetivos planteados al inicio de esta tesis doctoral, los cuales han sido alcanzados a través de la metodología anteriormente descrita, han dado lugar a una serie de resultados concretos que han quedado plasmados en los diferentes artículos científicos que componen el compendio de publicaciones que forman esta tesis doctoral. Se ha tratado que estos resultados tengan implicaciones directas para los distintos campos de investigación abordados bajo el paraguas de la movilidad sostenible y eficiente en entornos urbanos con enfoque a contribuir a la creación de ciudades inteligentes más conectadas y sostenibles. Cabe la pena remarcar que el trabajo desarrollado en esta tesis doctoral y, por tanto, los resultados obtenidos, han quedado enmarcados y han sido explotados dentro de varios proyectos de investigación tanto nacionales como internacionales (ver final de Capítulo 1.1).

Los principales resultados de esta tesis doctoral, así como su relación con los objetivos anteriormente identificados y las publicaciones que los cubren, se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Principales resultados de la tesis

Resultado	Objetivos	Publicaciones
R1. Análisis detallado sobre la viabilidad de algoritmos de ML en embebidos, en concreto sobre consumo de recursos (CPU, memoria y flash) y velocidad de toma de decisiones de los mismos.	3, 5, 7	[2], [3]
R2. Comparación y exploración de una coexistencia inteligente entre múltiples tecnologías LPWAN para proporcionar conectividad de vehículos ligeros y habilitar el sensado móvil urbano.	1, 2, 4	[1], [2]
R3. Análisis de la viabilidad de utilizar técnicas de ML para la selección dinámica de la radio a utilizar en comunicaciones de CCAM.	2, 3, 4	[2]
R4. Diseño de un sistema embebido On-Board Unit (OBU) con diferentes opciones de comunicación basadas en el paradigma Low Power Wide Area Network (LPWAN) para la conectividad de dispositivos de movilidad personal en entornos urbanos.	1, 4, 5	[1], [3]
R5. Implementación y evaluación de algoritmos de aprendizaje automático (ML) embebidos en dispositivos de movilidad personal para aplicaciones como la detección de caídas y la selección dinámica de interfaz radio.	3, 4, 5, 6	[2], [3]
R6. Realización de experimentos en entornos reales para evaluar el rendimiento de los algoritmos de ML en dispositivos embebidos para procesamiento de datos de sensores y comunicaciones.	4, 5, 7	[1], [2], [3]
R7. Identificación de las oportunidades y desafíos futuros en el campo de la movilidad sostenible y eficiente y la proporción de una visión de cómo integrar dispositivos de movilidad personal en entornos urbanos inteligentes.	1, 2, 4	[1], [2], [3]

En el Capítulo 3 se adjuntan los artículos completos que forman el compendio de esta tesis doctoral. Sin embargo, a continuación se destacan y discuten sus aportaciones y resultados más relevantes para ponerlos todos en contexto.

1.3.1. *Eco-Efficient Mobility in Smart City Scenarios*

Esta primera publicación [1] identifica las carencias actuales y las oportunidades de la integración de los vehículos de movilidad personal eléctrica dentro del entorno de ciudades inteligentes (**Objetivo 1**) y los sistemas CCAM. Se analizan los beneficios potenciales y los retos que hay que abordar en relación con la integración de estos elementos en los futuros espacios hiperconectados (**O. 2**). Además,

se presenta un novedoso prototipo de OBU (**Resultado 4 y Objetivo 5**) para dotar de conectividad a los vehículos personales y habilitar la integración de servicios para sus usuarios. Con este dispositivo se realiza la evaluación comparativa (**O. 4**) de dos sistemas de comunicación enfocados a entornos IoT como son LoRaWAN y NB-IoT. Obteniendo interesantes resultados (**R. 6**) que indican que la solución de comunicación debe ser cuidadosamente seleccionada en función de las características de la aplicación a implementar (**R. 7**). Este trabajo demuestra la validez de la propuesta para la deseada digitalización de esta nueva ola de vehículos personales ecoeficientes mediante un dispositivo de a bordo conectado con un tamaño y consumos muy contenidos.

1.3.2. *Machine Learning-Based Radio Access Technology Selection in the Internet of Moving Things*

Esta segunda publicación [2] realiza un estudio de diferentes sistemas de comunicación (**O. 4**), añadiendo a las tecnologías de comunicación anteriormente contempladas el caso del WiFi vehicular como tecnología interesante para el paradigma ITS. Sobre esta combinación de tecnologías de comunicación se demuestra el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la selección de radio en un entorno multi-protocolo, teniendo en cuenta diferentes parámetros del entorno y la comunicación a la hora de realizar la selección de interfaz (**O. 6**). Considerando una arquitectura arquitectura multi-radio para OBU, se desarrolla un mecanismo inteligente para resolver dicho problema de selección de la interfaz más adecuada en base a una serie de parámetros objetivo. Para ello, se han utilizado una serie de algoritmos de ML supervisado (**R. 5**), a saber, Naive Bayes, perceptrón multicapa, árbol de decisión y k-NN. A partir de este estudio comparativo, el algoritmo de árbol de decisión se selecciona como el más eficiente en términos de calidad de servicio, complejidad y consumo de energía, por lo que se implementa en un microcontrolador real (**O. 7**). A partir de los resultados obtenidos (**R. 7**), se ha demostrado el buen funcionamiento del modelo desarrollado, que permite ahorrar energía, así como hacer frente a la urgencia que requieren ciertos tipos de transmisiones (**R. 3**). En concreto, se muestra que utilizando técnicas de aprendizaje embebidas, el algoritmo es lo suficientemente eficiente como para ejecutarse en un microcontrolador de la serie de 8 bits de bajo consumo y rendimiento del fabricante Atmega usado en una placa *Arduino Uno*, requiriendo escasa memoria de programa y pudiendo ejecutarse en tiempos muy reducidos (**R. 7**).

1.3.3. *TinyML-Based Fall Detection for Connected Personal Mobility Vehicles*

La tercera publicación [3] explora la mejora de la seguridad del conductor de patinetes eléctricos ante caídas o accidentes en este segmento de vehículos proponiendo un sistema de detección de caídas basado en ML (**O. 3**). Concretamente, se explota el paradigma *TinyML* para desarrollar un sistema de detección de caídas eficiente pero de alta precisión (**O. 6**). Con este fin, se ha elaborado (y hecho público) un conjunto de datos de conducción/caída para construir una serie de modelos *TinyML* considerando diferentes algoritmos como bosques aleatorios, árboles de decisión, máquinas de vector de soporte, perceptrón multicapa y Naive Bayes, aplicando una serie de configuraciones para cada uno de ellos. Este banco de datos se ha obtenido a partir de pruebas reales con un patinete eléctrico en la ciudad de Cartagena (España) (**R. 6**), y se han utilizado para el entrenamiento, la validación y las pruebas de los algoritmos analizados en el artículo.

Los modelos considerados se han desplegado en un prototipo de OBU ligero y conectado (**O. 5, R. 4**) con el fin de demostrar su comportamiento y aplicación en un entorno de procesamiento limitado realista, realizando en el mismo entorno una batería de pruebas de rendimiento, y recursos consumidos para evaluar, además de la precisión de los modelos, su consumo de recursos en la unidad de procesamiento (**R. 5**). Los resultados validan (**O. 7**) el buen funcionamiento de la propuesta, ya que el rendimiento de los clasificadores permite detectar caídas con rapidez y precisión, mientras que los requisitos de memoria y el consumo de energía de los modelos producidos son muy limitados. Esto

garantiza la integración de los modelos desarrollados en una plétora de unidades de procesamiento de bajo coste y consumo, y por lo tanto con altas restricciones de cómputo (**R. 7**).

1.4. Conclusiones y Trabajos Futuros

1.4.1. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado en profundidad el estado actual del paradigma de la movilidad personal urbana, analizando sus requisitos y necesidades desde un punto de vista tecnológico, con enfoque en la implementación de soluciones de conectividad y seguridad del usuario para esta familia de vehículos ecoeficientes. Se ha explorado el uso de tecnologías emergentes como el IoT y ML dentro de este ámbito, especialmente en el contexto de dispositivos embebidos utilizando el paradigma TinyML para desarrollar sistemas inteligentes de bajo consumo que pueden mejorar significativamente la experiencia del usuario. Estos avances representan un paso importante hacia una movilidad más eficiente, segura y sostenible, reforzando la idea de que la integración de sistemas inteligentes en la movilidad personal no solo es viable, sino también habilitante de nuevas soluciones integradas para avanzar hacia un futuro más conectado y seguro, donde la interacción entre tecnología y usuario se vuelve cada vez más natural y transversal, ayudando en la prevención de accidentes y en la mejora en los servicios y confort ofrecidos al usuario.

Como contribución remarcable de esta tesis doctoral, se ha desarrollado y prototipado una OBU (Unidad de a bordo) modular de referencia, diseñada como una plataforma abierta y versátil para la realización realista de pruebas de concepto en distintos escenarios y con diversos fines. Esta OBU facilita el desarrollo y la implementación de aplicaciones en un entorno de procesamiento eficiente y de muy bajo consumo, lo que la hace ideal para experimentar con diversas soluciones en el campo del IoT y *TinyML*, dentro del paraguas del paradigma CCAM. Haciendo uso de la misma, se han realizado varias pruebas de concepto en el ámbito de la movilidad personal urbana, donde integrando sistemas de decisión habilitados por *TinyML* e hiperconectados gracias a distintas clases de tecnologías de comunicación, se han podido desarrollar varios casos de uso, destacando especialmente la detección de caídas y la selección inteligente de tecnologías de acceso de radio.

Los resultados obtenidos en los distintos experimentos realizados evidencian la validez de la propuesta. En primer lugar, el propio dispositivo se ha mostrado muy adecuado para poder ser integrado en un vehículo de escasas dimensiones y fuertes restricciones de carga, consumo energético, etc. Además, desde el punto de vista de los algoritmos desarrollados, éstos han mostrado un comportamiento muy efectivo, tanto al seleccionar la interfaz radio más adecuada en cada momento, así como para detectar caídas el conducir uno dispositivo de movilidad personal real. Ambas aplicaciones demuestran la practicidad y la relevancia de *TinyML* y la hiperconectividad en contextos reales, ofreciendo soluciones innovadoras y eficientes para los desafíos de la movilidad urbana y la seguridad personal, abriendo camino para futuras investigaciones y desarrollos en este campo.

En concreto, durante esta tesis se han desarrollado los siguientes trabajos, detallando los resultados obtenidos en las publicaciones que la componen [1][2][3]

- Estudio del ecosistema de ciudad inteligente y transporte conectado enfocado a vehículos de movilidad ligera
- Exploración de tecnologías de comunicaciones habilitantes en torno al ecosistema CCAM
- Desarrollo y prototipado de una unidad de a bordo integrable en un sistema de movilidad personal de bajo coste integrando las comunicaciones evaluadas como oportunas
- Desarrollo del software necesario para la evaluación del desempeño de la OBU y pruebas en entornos reales con la misma
- Implementación y prueba del rendimiento y requisitos mínimos por un lote de algoritmos de ML utilizando el paradigma *TinyML*
- Desarrollo de un sistema automatizado de entrenamiento y evaluación de algoritmos de ML para dispositivos embebidos

- Generación de un dataset novedoso utilizando entornos y sensores reales en un vehículo de movilidad personal
- Prototipado y demostración de la viabilidad de varios casos de uso novedosos en torno a comunicaciones, movilidad y sistemas embebidos

1.4.2. Trabajo futuro

La línea de investigación abordada en esta tesis doctoral ha contribuido significativamente al desarrollo de tecnologías para la movilidad personal urbana, con especial énfasis en la aplicación de ML usando el paradigma *TinyML* y de sistemas de comunicación IoT en vehículos ligeros para su integración en entornos de comunicaciones vehiculares y movilidad cooperativa CCAM. El trabajo desarrollado de integración de estos vehículos en sistemas de movilidad inteligente abre nuevas líneas con respecto a la entrada de los sistemas de movilidad personal en este ecosistema, donde se puede continuar con el trabajo realizado explorando cómo los avances en ML y conectividad pueden ser aplicados de manera más eficiente y efectiva para mejorar la seguridad, eficiencia y experiencia del usuario en entornos urbanos dinámicos.

Comunicaciones 5G

Actualmente, 5G es una tecnología de comunicaciones celular en auge y que habilitará servicios diferenciadores con respecto a las actuales tecnologías de comunicaciones. 5G supone un salto evolutivo, principalmente, al traer los paradigmas de redes autogestionadas, reconfigurables y dinámicas al core y el despliegue automatizado de servicios en redes de telefonía celular. Sin embargo, durante el desarrollo de esta tesis, la implantación disponible de 5G ha sido bastante limitada, siendo meramente un salto cuantitativo y no cualitativo sobre las posibilidades que actualmente ofrecen los servicios de comunicaciones móviles 4G.

Si bien, desde un punto de vista del usuario y desde la parte que atañen a los desarrollos aquí expuestos, la mayor evolución de las redes 5G consiste en el cambio de la capa de acceso radio del usuario. Esta nueva radio 5G NR (5G New Radio (5G NR)) supone un salto en eficiencia y capacidades sobre la radio UTRAN y E-UTRAN, del estándar 4G y sus evoluciones, predecesores de las tecnologías 5G, pero si bien durante la realización del trabajo aquí presentado se ha llevado a cabo un estrecho seguimiento de todas estas tecnologías y la integración de la solución vertical propuesta en 5G para comunicaciones masivas de máquinas conectadas (MMTC - *massive Machine Type Communications*), así como el nuevo concepto de módems 5G *RedCap* (reduced capabilities), que si bien viene a evolucionar el estándar integrado en este trabajo, NB-IoT y LTE CAT-M1, estas tecnologías aún no está desarrolladas ni integradas en ninguna solución disponible y acaban de salir de la fase de estandarización, además de que la primera generación de módems *RedCap* tiene consumos aún muy superiores a las tecnologías integradas en esta tesis. Esto hace que quede como trabajo futuro la integración de tecnologías 5G de acceso a la red en las soluciones propuestas. Por ello, durante los trabajos llevados a cabo en esta tesis se han integrado módems NB-IoT, al ser la tecnología de la familia 3GPP que más se adecua a nuestro ecosistema.

Paralelamente a las tecnologías convencionales de conectividad, se ha venido siguiendo durante el desarrollo de la línea de investigación la tecnología DECT-NR, un nuevo sistema de comunicaciones IoT de muy bajo consumo, tasa de transferencia similar a NB-IoT y nativamente mallado. DECT-NR es un sistema de comunicaciones IoT, evolucionado del sistema de telefonía inalámbrica fija de uso casero e industrial DECT, centrado en comunicaciones IP para sistemas embebidos e IoT, así como redes de sensores, vivienda domotizada y ciudades inteligentes. Este sistema podría alinearse perfectamente con los trabajos aquí desarrollados y sería un firme candidato para su integración en las soluciones propuestas, pero a fecha del desarrollo de este trabajo, no existe ninguna implementación real de dicha tecnología y aún se encuentra en fase de desarrollo de la pila de comunicaciones. esta tecnología estaría entre las capacidades de WiFi y LoRa en términos de consumo, capacidades y alcance, por lo que sería un añadido muy interesante al sistema de selección de radio por ML desarrollado en esta tesis.

Optimizaciones de ML

La implantación de los algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático en los últimos años está suponiendo una revolución en cómo el usuario interactúa con la tecnología y los servicios que esta ofrece, y los sistemas embebidos no están siendo una excepción a esto. En esta tesis doctoral se exponen unos casos de uso prototipados para demostrar las capacidades que esta tecnología tiene y se desarrolla una prueba de concepto para cada uno de ellos, pero las posibilidades de integración de esta tecnología son muy amplias gracias a los avances que van surgiendo prácticamente a diario. En futuros trabajos se podrían desarrollar nuevos casos de uso, como la detección de fallos de hardware del propio sistema de movilidad, por ejemplo, aplicando técnicas de detección de patrones se podría analizar el comportamiento del vehículo y detectar fallos de manera prematura; o realizar una adaptación del control del sistema de movilidad, en la que aprenda del comportamiento del usuario y regule los perfiles de aceleración y frenada para adaptarse a su estilo de conducción.

Además, otra vía de futuros desarrollos se centra en los algoritmos en sí mismos, en los cuales se puede seguir profundizando en el paradigma del ML embebido y adaptar los algoritmos para ejecutarse de manera más optimizada en equipos de recursos limitados, reduciendo aún más el uso de recursos computacionales y el tiempo de respuesta del sistema. Además, en la última década se han introducido microcontroladores y microprocesadores equivalentes a los utilizados en las pruebas de concepto realizadas que integran aceleradores específicos para algoritmos de IA y ML, lo que abre nuevas posibilidades al desarrollo de estos algoritmos utilizando unidades de procesamiento específicas para los mismos.

También se puede desarrollar estas tecnologías poniendo especial atención en la seguridad y privacidad, siendo estos ámbitos muy vastos, se pueden realizar implementaciones, tanto de sistemas de a bordo, como de algoritmos de IA y ML que sean conscientes de la seguridad de los mismos o de la privacidad del usuario. De esta manera, se contempla que sería interesante realizar un estudio sobre la ciberseguridad de las implementaciones realizadas, la generación de baterías de ataques contra las mismas y el estudio de contramedidas para evitar los posibles fallos que se detecten. Además, en el ámbito algorítmico se pueden desarrollar técnicas de aprendizaje federado para compartir la inteligencia recogida en los dispositivos, y por ejemplo, ampliar el sistema de detección de fallos predictivo utilizando patrones recogidos en unidades que ya han fallado, de esta manera el sistema no sólo tendría a disposición la inteligencia recabada localmente, sino que se podría ampliar a grupos de vehículos, beneficiándose todos ellos de las mejoras en los datos procesados por las distintas instancias del algoritmo de forma distribuida.

Integración de otras tecnologías

Las tecnologías desarrolladas durante la realización de esta tesis se han visto puestas en práctica, si bien, basándose en pilas de comunicaciones 5G y para vehículos tanto personales tradicionales, como son coches, tanto autónomos, como no autónomos, pero conectados, en proyectos, tanto de financiación Europea, como 5G Mobix, donde se evaluaron las capacidades de la red móvil comercial actual y los avances hacia la implementación completa de redes 5G enfocadas a sistemas CCAM completos, englobando casos de uso de *remote sensing*, conducción autónoma o *platooning*, en el que el sistema CCAM es capaz de coordinar múltiples vehículos como si consistiera en un solo ente habilitado por la comunicación tanto V2V como 5G NR.

También se han seguido desarrollando e implementando dichas tecnologías en otros proyectos CCAM de ámbito nacional, como R3CAV (*Research on technologies and architectures for the development of new autonomous, connected, robust, reliable, and resilient vehicles*) o HERMES. En el proyecto R3CAV, utilizando el paradigma CCAM se demuestran casos de uso de vehículos autónomos donde se implementan sistemas de *remote sensing*, donde los sensores del vehículo se ven complementados con los sensores de la infraestructura fija, habilitando, por ejemplo, el auto-estacionamiento y auto-recogida de vehículos. En este caso específico, se puede utilizar el sistema CCAM tanto como para complementar los datos del vehículo, como para integrar dichos vehículos con un sistema de gestión de flotas, optimizando así el espacio de almacenamiento de los vehículos y reduciendo sobremanera

el tiempo de gestión de estos procesos. El segundo proyecto nacional mencionado, HERMES, hace uso de las comunicaciones vehiculares y las tecnologías CCAM y *remote sensing* para desarrollar comunicaciones de sensórica de polución y emisiones en la infraestructura, dotando a la misma de sensores fijos con capacidad de medición de las emisiones del vehículo que transita por la zona habilitada. Con las mediciones del vehículo se pueden establecer puntos libres de contaminación, desviando a los vehículos más contaminantes, una vez detectados por otras rutas que eviten dichos puntos utilizando las comunicaciones entre la infraestructura habilitada CCAM y el vehículo. Dichos proyectos son solo una muestra del potencial que ofrecen los entornos CCAM y que se podrían contemplar como desarrollos futuros que demuestren el potencial de integración de las tecnologías IoT en la movilidad personal urbana. Esta integración no solo ampliará la funcionalidad de los vehículos de movilidad personal, sino que también mejorará la interconectividad entre estos dispositivos y los sistemas inteligentes de gestión urbana. Por ejemplo, la combinación de sensores avanzados y algoritmos de aprendizaje automático puede llevar a una mejor gestión del tráfico, una mayor seguridad vial y una experiencia más personalizada para el usuario.

Este enfoque integrador de las tecnologías CCAM como parte del mundo IoT, compone la base para construir ciudades inteligentes y también puede facilitar la recopilación de datos en tiempo real, crucial para el análisis urbano y la toma de decisiones bajo este paradigma utilizando los vehículos habilitados con estas tecnologías como un sensor distribuido y móvil dentro de la propia ciudad. Si bien una versión actual de esta idea ya se puede intuir viendo las características que nos ofrecen las aplicaciones de guiado conectadas, como pueden ser *Google Maps* o *Waze*, que utilizando estadísticas de tráfico son capaces de alertar a sus usuarios de problemas en la carretera o tráfico denso, con una integración real del vehículo en estos algoritmos de *crowdsensing* se podría llegar mucho más allá. Por ejemplo, utilizando el vehículo como sensor de condiciones ambientales móvil o a través de la detección del estado físico de la calzada mediante la detección automática de baches utilizando algoritmos de ML. Otro ejemplo es la construcción de mapas de ocupación de entornos controlados en tiempo real mediante una infraestructura no centralizada de ciudad inteligente y que no dependa de una aplicación o plataforma específica como los navegadores GPS anteriormente mencionados.

Además, ampliar el rango tecnologías consideradas podría habilitar la adaptación de los desarrollos realizados a diferentes tipos de vehículos y entornos, así como la incorporación de capacidades más avanzadas como el procesamiento de voz y el reconocimiento de imágenes. Esto no solo aumentaría la accesibilidad y comodidad para los usuarios, sino que también abriría oportunidades para aplicaciones innovadoras en áreas como la salud, la logística y la gestión de emergencias. Este enfoque holístico en la integración de los sistemas de movilidad personal en la movilidad conectada representa un paso significativo hacia ciudades más inteligentes, conectadas y cohesionadas.

También resaltar que durante el trabajo realizado en la unidad de a bordo se han encontrado grandes paralelismos con los sistemas de gestión de flotas de vehículos de alquiler, siendo esta unidad de a bordo muy superior técnicamente a las desplegadas por empresas de alquiler de flotas. Esto daría lugar a una vía de colaboración con la industria en la que se podrían utilizar los desarrollos aquí presentados para ser aplicados directamente en sus sistemas de gestión de flotas. Por último, se pueden desarrollar otros casos de uso para estas integraciones utilizando pruebas de concepto de ciudad inteligente o de vehículos de conducción autónoma y añadir los desarrollos presentados en esta tesis doctoral para establecer escenarios más completo, donde se puedan enriquecer las investigaciones en estos ámbitos añadiendo el factor de los vehículos de movilidad personal. De este modo, se vislumbra una línea de continuidad en el trabajo desarrollado a través de la integración de vehículos de movilidad personal en estos escenarios emergentes de amplio con alcance y recorrido

Estado del arte

2.1. Introducción

El ecosistema de la movilidad sostenible está atrayendo una gran atención desde distintos sectores académicos e industriales, así como de la sociedad en general. Durante los últimos tiempos, muchas propuestas tecnológicas han ido surgiendo con el objetivo de integrar los vehículos de movilidad personal dentro del mundo CCAM, aportando nuevas soluciones para múltiples casos de uso donde la coordinación entre medios de transporte urbano es un habilitante básico. Es por ello, que esta sección presenta una revisión del estado del arte dentro del amplio ámbito de temáticas que abarca esta tesis. Con el objetivo de organizar dicha revisión de una forma coherente, en las siguientes secciones se analizan de forma diferenciada los últimos avances dentro de las distintas líneas de investigación que conforman el proyecto de investigación que vertebra esta tesis doctoral.

2.2. Movilidad cooperativa, conectada, inteligente y eficiente

Dentro del ecosistema de las ciudades inteligentes, resulta de gran interés la recopilación de datos de forma masiva y desde una gran variedad de dispositivos, con el objetivo de obtener grandes bancos de datos variados y ricos que puedan ayudar a la gobernanza de la ciudad. En este sentido, la capacidad para poder captar en tiempo real datos de distinta naturaleza de los dispositivos móviles relacionados con redes vehiculares o con el campo de las redes de sensores vehiculares resulta de fundamental importancia. Dicha importancia, así como su integración en redes cooperativas de monitorización Vehicular Sensor Network (VSN) es descrita con alto nivel de detalle en [8]. Este trabajo describe el concepto de red de cooperación de sensores fijos y a bordo de vehículos como generador de datos para las ciudades inteligentes del futuro. En esta línea, en [22] los autores describen el potencial de estos desarrollos, como monitorización de tráfico o vigilancia de entornos urbanos. Sin embargo, dada la novedad de esta clase de dispositivos, hay escasa literatura abordando las posibilidades que abren los vehículos ligeros como bicicletas, patinetes o *e-scooter* en este área. Además, existen pocos trabajos que aborden el potencial del nuevo ecosistema de movilidad personal en su conjunto. Sin embargo, sí que se han dedicado algunos esfuerzos específicos en el campo de la recopilación de datos vehiculares para permitir la cooperación entre dispositivos móviles de diferente naturaleza; en [7] se realiza una revisión del estado del arte sobre estos conceptos, además de otras áreas sobre movilidad urbana en la que podemos apreciar la necesidad de mayores esfuerzos de investigación en esta línea.

Abordando esta problemática desde la perspectiva del área del Internet de las Cosas - Internet of Things (IoT) y evolucionando el concepto hacia el Internet de los Vehículos - Internet of Vehicles (IoV), el trabajo presentado en [23] propone una plataforma de recolección de datos general para ciudades inteligentes que incluye usuarios con teléfonos móviles, sensores en estaciones fijas de sensorización, además de sensores móviles en forma de OBU transportados por autobuses. Para ello, la propuesta hace uso de redes celulares y el protocolo de la familia WiFi (IEEE 802.11) en modo “fuera de contexto” - Outside of Context of a Basic set (OCB), definido en el estándar dedicado a comunicaciones vehiculares IEEE 802.11p. Las nuevas redes de luz visible han sido también utilizadas en un sistema equivalente simulado en [24], aunque, dadas las limitaciones de alcance e interferencia de esta tecnología de comunicaciones, se utilizó principalmente como una conexión de datos complementaria.

Es importante remarcar que las soluciones que pueden encontrarse en la literatura relacionada que tratan la integración de diferentes OBU con capacidades de comunicación en dispositivos de movilidad personal son limitadas. Los autores de [25] proponen OBUs con comunicaciones Zigbee para reportar datos y crear convoyes de bicicletas. Una solución similar se propone en [26], pero usando Bluetooth, en ambos casos sufriendo el inconveniente del rango de comunicación limitado que presentan ambas tecnologías. En [27] se propone un sistema de ayuda a la navegación para ciclistas a través de una banda vibratoria y un enlace de comunicación 3G con un servidor. En [28] los autores presentan una OBU para motos compatible con WiFi OCB. En el trabajo presentado en [29] se menciona que esta tecnología es propensa a interferencias en entornos de *scooters*, por lo que se apuesta por un enlace IEEE 802.15.4 mejorado para comunicaciones vehículo a vehículo. En [30] se utiliza la conexión de un casco a una OBU basada en un teléfono inteligente con conectividad celular. Se han diseñado algunas plataformas de detección cooperativas (*crowdsensing*) específicas para ciclistas. Los autores de [31] utilizan una plataforma *Arduino* para recopilar y transmitir datos de contaminación mediante GPRS. En [32] se despliega una plataforma de sensores para recopilar también registros ambientales y los autores emplean un teléfono inteligente para transmitir datos mediante la conexión que éste provee. En [33] se propone una solución más ambiciosa en la plataforma presentada, incluso combinando la tecnología *Long Range* (LoRa) junto con WiFi para recopilar y transmitir datos.

Como se puede observar, existe un reducido abanico de soluciones propuestas específicas para interconectar dispositivos de movilidad personal que, sin embargo, están creciendo de forma exponencial en escenarios urbanos. Si bien la comisión europea en su informe final sobre entornos CCAM [5] habla en específico de comunicaciones basadas en sistemas móviles como 5G, PC5 o ITS-G5/DSRC, estos estándares de comunicaciones son costosos en términos energéticos o en la implementación y el hardware requerido, lo que hace que no sean candidatos idóneos para la integración en sistemas de bajo consumo o coste, como los vehículos de movilidad personal. Por lo tanto, surge la necesidad de soluciones más eficientes que permitan la conexión de estos dispositivos en movimiento en las ciudades inteligentes. Es importante tener en cuenta el desafío clave de limitar la huella energética de las OBU en este campo. Las soluciones en [31], [32], [33] abren el camino para la exploración de tecnologías LPWAN en el área, pero carecen del uso de protocolos de comunicación IoT y emplean OBUs con alta demandas de energía.

Esta tesis doctoral trata de cubrir este vacío con el desarrollo de una OBU diseñada para vehículos personales que se adaptan a las demandas de integración de hardware y consumo de energía para escenarios de detección urbana. Incluye comunicaciones usando LoRaWAN y el emergente NB-IoT, que tiene un gran potencial en escenarios de ciudades inteligentes [21] y presenta capacidades clave para ser analizadas en profundidad en condiciones de movilidad [19]. Se considera que el diseño y desarrollo de esta OBU resulta clave como requisito previo para poder equipar objetos en movimiento, como vehículos de factor pequeño, y dotarlos de capacidades de sensorización, comunicación y procesamiento que los haga integrarse dentro del ecosistema de las ciudades inteligentes.

2.3. Vehículos ligeros equipados

Como se ha mencionado anteriormente, aunque muchos trabajos han explorado el campo de las redes vehiculares [8] y sus servicios relacionados [22], los estudios que han tratado la recopilación de datos en redes de sensores vehiculares (VSN) han abordado parcialmente el problema de ahorrar costes de comunicación, lo cual es fundamental para los vehículos sobre los que se enfoca esta tesis doctoral. El trabajo en [34] trata de reducir la tasa de datos al considerar un compromiso entre la reducción del uso de ancho de banda y la tasa de refresco de las lecturas del sensor dependiendo de los requisitos de la aplicación específica bajo estudio. En [35], la comunicación 4G se combina con el *offloading* a redes WiFi y un enfoque de detección cooperativo (*crowdsensing*) utilizando teléfonos inteligentes al uso como plataforma de comunicaciones. Se adopta un enfoque equivalente, también con teléfonos inteligentes en [36] para monitorizar las emisiones de los vehículos y [37] emplea la tecnología Bluetooth para interconectar sensores a bordo. Otras propuestas como [38] aprovechan la malla creada por redes vehiculares (*ad-hoc*) para distribuir agentes móviles encargados de recopilar datos de un área objetivo.

Con respecto al desarrollo de OBUs considerando las limitaciones de los vehículos personales, se pueden encontrar pocas contribuciones en la literatura. Los autores de [39] proponen el uso de conectividad basada en ZigBee en OBUs para bicicletas. El objetivo de esta solución es distribuir datos obtenidos por sensores y crear convoyes de bicicletas para mejorar su seguridad. En [26] se emplea Bluetooth con un propósito similar, evidenciando el limitado alcance de comunicación de este tipo de tecnologías. Los autores de [28] desarrollan una OBU para motocicleta usando WiFi OCB, una tecnología que también es investigada en [29]. Además, este último también hace uso de un enlace IEEE 802.15.4 mejorado para transmisiones V2V.

Es notable que las contribuciones a la adaptación de OBUs al campo de la movilidad personal sostenible son limitadas. Sin embargo, estos vehículos son cada vez más comunes en nuestras ciudades. Por esa razón, en esta tesis doctoral, se presenta una discusión que aborda las oportunidades y desafíos potenciales que plantea este segmento vehicular específico. Se exploran los servicios futuros, las tecnologías de la comunicación y las brechas actuales dentro de este nuevo ecosistema. Además, se propone una arquitectura y prototipo novedosos de OBU teniendo en cuenta los estrictos requisitos de estos vehículos y se presentan una serie de pruebas de validación que muestran el rendimiento de la solución utilizando tecnologías de comunicación LPWAN.

2.4. Inteligencia artificial embebida

El aprendizaje automático (ML, Machine Learning) es un área de gran importancia hoy en día, incluso para el ecosistema de IoT, dado que muchas aplicaciones para usuarios finales pueden beneficiarse de las capacidades informáticas avanzadas integradas, ya que permiten procesar datos de sensores directamente en el dispositivo final. Esto conlleva un ahorro energético en las comunicaciones y una mejora en la velocidad de respuesta de muchas aplicaciones [16]. La integración de algoritmos de ML dentro de elementos embebidos o IoT implica extender el concepto de computación en el *Edge* (MEC) al propio dispositivo final, lo que evoluciona como el paradigma de computación *FOG* (del inglés, niebla) [13]. Sin embargo, los mecanismos basados en ML generalmente implican un uso de recursos de computación intensivo, normalmente realizados en computadoras o clústeres de alto rendimiento, a veces con la ayuda de GPUs de alto rendimiento o circuitos integrados específicos para una aplicación (ASIC - Application Specific Integrated Circuit) o, más recientemente integrados en muchas CPUs y GPUs de consumo general, aceleradores TPU (Tensor Processing Unit) [40],[41],[42]. La reciente aparición del paradigma *TinyML* [15],[16] ha permitido la integración de complejos algoritmos de ML en dispositivos de procesamiento limitado, como los basados en microcontroladores [43].

El paradigma *TinyML* permite incorporar inteligencia (algoritmos ML) en dispositivos finales con recursos muy limitados, lo que abre una gran cantidad de oportunidades para desarrollar unidades IoT verdaderamente inteligentes, como se estudia en [44] y se desarrolla y se realiza una taxonomía de implementaciones y aproximaciones al problema en [45]. Dada la novedad de este concepto exista una

literatura limitada que aborde la aplicación de modelos *TinyML* a los problemas de reconocimiento de actividad humana, detección de caídas o movilidad inteligente. Sin embargo, se han realizado algunos esfuerzos para proponer soluciones basadas en ML embebido para abordar estos problemas, como en [46], donde aplicando una solución *TinyML* se demuestra que usando un microcontrolador con capacidad de cómputo limitada se puede ejecutar un algoritmo completo para detección de actividad humana a una frecuencia a alta velocidad. A continuación, se hace una revisión de los trabajos relacionados en estos ámbitos.

2.4.1. Coordinación de múltiples tecnologías de acceso radio

Dadas las múltiples tecnologías de comunicación disponibles en espacios hiperconectados, así como la capacidad de los dispositivos móviles de última generación para soportar varias de ellas de forma simultánea, se hace crucial la disponibilidad de algoritmos de decisión para elegir la interfaz de transmisión a utilizar por el dispositivo en cada momento. Sin embargo, existe un número muy reducido de trabajos que aborden el problema de la selección de múltiples tecnologías de acceso radio (Radio Access Technology - RAT) en el campo del transporte inteligente y sostenible. En esta línea, se han realizado algunos esfuerzos relacionados en el área de IoT. El trabajo en [20] proporciona una amplia visión general de la gestión de múltiples RAT en entornos masivos de comunicaciones tipo máquina (MMTC - Massive Machine-Type Communications). Los autores se centran exclusivamente en la gama de tecnologías basadas en LPWAN, concretamente en Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) y Narrow band Internet of Things (NB-IoT). Se implementa un prototipo que incorpora un transceptor para cada una de las RAT consideradas y se caracteriza el consumo energético del módulo. Sin embargo, en este trabajo no se presenta ningún procedimiento de selección de RAT, sino que los resultados sólo analizan el consumo de energía de cada RAT dependiendo de la longitud de los mensajes. Desde una perspectiva de sistema global, los autores de [47] estudian el escenario de múltiples dispositivos que se comunican simultáneamente a través de varios canales independientes. Se formula un problema de minimización de potencia total de acuerdo con el teorema de capacidad de Shannon con restricciones de potencia y relación señal interferencia-ruido (SINR). Los resultados en esta publicación, obtenidos por simulación, muestran una clara mejora en la eficiencia energética general del sistema.

El trabajo en [48] presenta un enfoque basado en el aprendizaje por refuerzo para decidir la RAT que se emplea en un dispositivo IoT multi-RAT. Los autores consideran 5G y LoRa como las RAT disponibles y proponen la recompensa del algoritmo de refuerzo el maximizar el rendimiento en las transmisiones. Los resultados de la simulación revelan un buen desempeño del mecanismo, aunque no se llega a implementar sobre hardware real embebido. En [49], se presenta otro algoritmo basado en el aprendizaje por refuerzo para resolver el problema de la selección de la estación base de manera inteligente. Específicamente, los autores se centran en los dispositivos MMTC para permitirles cooperar para minimizar la congestión de la red. Trabajos adicionales también han considerado el uso de mecanismos ML para decidir cuál es la mejor RAT a emplear, pero orientados a escenarios 5G puros [50],[51], ignorando así las limitaciones de los sistemas basados en IoT.

Además del problema de selección de múltiples RAT, la integración de inteligencia basada en ML dentro de los dispositivos embebidos de IoT y el ámbito vehicular está cobrando un gran impulso gracias a la llegada del paradigma *TinyML* [15]. Como se comentó anteriormente, éste propone adaptar los modelos ML generados en arquitecturas convencionales sin las limitaciones de los dispositivos embebidos para que luego sean ejecutables por estos dispositivos finales IoT. Además, la integración de *TinyML* con esquemas *edge computing* facilita el desarrollo de nuevos servicios dedicados a implementaciones de IoT, por ejemplo, gestión de acceso de radio, almacenamiento en caché de datos, descarga de tareas (*offloading*) o gemelos digitales, entre muchos otros [52]. Dada la reciente creación del ecosistema *TinyML*, pocos trabajos han explotado sus prometedoras posibilidades en escenarios de vehículos ligeros. El trabajo en [53] presenta un mecanismo basado en una red neuronal convolucional (CNN - Convolutional Neural Network) para mejorar el rendimiento de la conducción autónoma de mini vehículos mediante la clasificación precisa de imágenes en el dispositivo. A su vez, el trabajo en [54]

presenta un sensor de alcohol que utiliza *TinyML* para realizar una calibración del dispositivo portátil teniendo en cuenta las condiciones cambiantes de temperatura y humedad. Con este enfoque, los autores intentan reducir la dependencia de la conectividad de la red, que generalmente consume ancho de banda y energía, lo que también genera mayores latencias. Además, el enfoque de *TinyML* permite preservar la confidencialidad de los datos/usuario ya que los datos se procesan en el propio dispositivo. Otro trabajo interesante es el desarrollado en [55], en el que se presenta una solución basada en el sensorización de la red inalámbrica usando *TinyML* para inferir datos como el uso de la misma y el posicionamiento del sensor de manera autónoma.

A diferencia de trabajos anteriores, esta tesis doctoral da respuesta al problema específico de la selección de múltiples RATs para dispositivos embebidos altamente restringidos, concretamente para el caso de vehículos de movilidad personal. Este es un tema relevante dada la alta movilidad de estos elementos, lo que puede ocasionar regiones de cobertura intermitentes para RATs específicas que deben ser complementadas con el uso de otras. Para ello, evaluamos la precisión de una serie de algoritmos de clasificación basados en ML y, finalmente, se realiza una implementación real sobre una placa con microcontrolador bien conocida como es *Arduino Uno*. La visión y los desarrollos de este trabajo pueden tener un impacto en varias áreas de estudio con el objetivo de fomentar el diseño, la implementación y el despliegue de futuras soluciones de procesamiento restringidas considerando múltiples RAT.

2.4.2. Detección de actividad humana

El reconocimiento automático de actividad humana ha sido un tema de investigación de gran auge desde la llegada del IoT, propiciada además por la proliferación de la integración de diferentes tipos de sensores en teléfonos inteligentes y otros dispositivos cotidianos, incluidos aquellos conocidos como *wearables*. El trabajo en [56], enfocado en la monitorización de personas mayores, propone usar las vibraciones del suelo y el sonido para detectar caídas. El sistema presentado utiliza procesamiento de señales con un algoritmo de reconocimiento de patrones para discriminar entre caídas y otros eventos, recopilando los datos de entrenamiento imitando caídas usando muñecos humanos. A su vez, trabajos más recientes hacen uso de sensores integrados en teléfonos inteligentes. Por ejemplo, los autores de [57] emplean un algoritmo simple que utiliza acelerómetros para detectar caídas, combinadas con mediciones de períodos de reposo para reducir los falsos positivos. En [58], se presenta un método de detección más sofisticado basado en diferentes modelos ML que también emplea datos de acelerómetros, demostrando así la utilidad de estos sensores, presentes en todos los teléfonos inteligentes y de muy bajo coste para las aplicaciones de detección de caídas y detección de actividad humana. Otro enfoque, utilizando dos dispositivos independientes para la detección de caídas, se puede encontrar en [59]. En este caso, los autores utilizan un teléfono y un reloj inteligentes para rastrear simultáneamente el estado del usuario por medio de sus acelerómetros y giroscopios integrados. Los resultados muestran una clara disminución de falsos positivos, manteniendo la efectividad de las decisiones de detección. En [60], el autor presenta el uso de mecanismos basados en *TinyML* para reconocer al usuario que porta un dispositivo *wearable*, haciendo uso de las medidas registradas al caminar mediante un acelerómetro integrado. Así, se propone la personalización automática de las configuraciones del dispositivo en base al usuario que está haciendo uso de él, de modo que se mejore su usabilidad y calidad de experiencia. Otros trabajos en este campo centrados en el procesamiento de imágenes y vídeos se pueden encontrar en el trabajo de revisión presentado en [61].

En [62], se evalúa un conjunto de algoritmos de clasificación de Machine Learning (ML), a saber, k-Nearest Neighbors (k-NN), Naive-Bayes, Artificial Neural Network Perceptron (ANN), Support Vector Machine (SVM) y Least Squares Method (LSM), para la tarea de detección de caídas. Se logra una buena precisión superior al 85% al distinguir entre las actividades diarias y los eventos de caída, pero los autores no presentan ningún resultado evaluando la eficiencia computacional o la huella de memoria, al igual que en el modelo y dataset presentado en [63], donde se alcanza el 99.25% de precisión utilizando sensores inerciales en las piernas. Otro enfoque se puede encontrar en [64] donde se utilizan los sensores de un teléfono inteligente para detectar y clasificar accidentes de tráfico. Aquí se implementan y evalúan un conjunto de algoritmos ML ejecutándose en el teléfono inteligente, con una

buena precisión, haciendo uso de la potencia de procesamiento dicho teléfono, normalmente bastante superior a las capacidades de cómputo de dispositivos IoT.

Dada la gran variedad de opciones disponibles para abordar el problema de detección de caídas con soluciones basadas en ML, los trabajos en [65],[66] exploran profundamente el rendimiento de diferentes algoritmos, configuraciones de los mismos y modelos en términos de precisión, pero obvian una evaluación exhaustiva en términos de necesidades de potencia de cálculo, de uso de memoria de los modelos considerados y de velocidad de decisión en un entorno de uso realista. En el trabajo presentado en [67], los autores demuestran que la personalización de modelos, por ejemplo mediante el uso de similitudes entre personas con similares aspectos físicos, mejora notablemente la precisión de los sistemas de reconocimiento de actividad humana. Por lo tanto, una selección de los datos utilizados en el algoritmo acorde a las características del usuario es crucial para obtener resultados satisfactorios. Lo que demuestra que el conjunto de datos utilizado para entrenar el algoritmo resulta crucial para la precisión del sistema.

Publicaciones más recientes han seguido una aproximación similar a la desarrollada durante esta tesis, como en [46], donde se propone el uso de *TinyML* en un microcontrolador alojado en una banda con sensores inerciales para detectar caídas del usuario. O en [68], donde se propone un procesado de los modelos de reconocimiento de actividad humana para hacerlos más eficientes y con menores necesidades de memoria para su uso en el paradigma *TinyML*. También es interesante en este aspecto el trabajo desarrollado en [63], donde se demuestra el uso de sensores inerciales y modelos de ML embebidos aplicados a realizar un estudio del andar de personas en el desarrollo de sistemas de locomoción de robots bípedos en el contexto de la ayuda a pacientes que han sufrido una lesión en el sistema nervioso y se encuentran en rehabilitación.

Para el caso de uso que se estudia en esta tesis doctoral dentro del campo del reconocimiento de la actividad humana, es decir, la detección de caídas durante la marcha de un vehículo de movilidad personal, la obtención de un conjunto de datos realista puede ser peligroso o difícilmente reproducible en condiciones de laboratorio. Aunque se pueden encontrar diferentes conjuntos de datos para detección de caídas publicados, por ejemplo [69], éstos se centran en los datos de movimiento de la vida diaria, no contemplan el uso de sistemas de movilidad urbana y no se aplican al caso de uso desarrollado en esta tesis. De este modo, se realizó un trabajo de captura de datos propia utilizando acelerómetros integrados en el sistema de movilidad de estudio tanto en entornos urbanos (marcha normal) como en un entorno controlado (caídas). Este dataset, puesto a disposición de la comunidad científica, ha servido para el desarrollo del modelo *TinyML* que permite la detección de caídas en este tipo de vehículos, algo no estudiado hasta la fecha por la novedad de estos sistemas de transporte.

2.5. Análisis

La Comisión Europea, a través de su iniciativa por la movilidad cooperativa, conectada y automatizada (CCAM), resalta en su documento guía principal [5] la importancia de prestar especial atención a los usuarios vulnerables de las vías públicas, como peatones y ciclistas, dentro del nuevo paradigma de movilidad urbana ecosostenible. Este enfoque subraya la necesidad de integrar soluciones de movilidad que no solo mejoren la eficiencia y seguridad del tráfico rodado, sino que también protejan a aquellos más expuestos en el entorno urbano. En línea con este marco, esta tesis doctoral se adentra en el ámbito de las soluciones de comunicaciones y computación dentro del espectro CCAM, concentrándose particularmente en la interacción Vehículo a Infraestructura (V2I), así como en el procesado local de los datos recogidos por el vehículo. A diferencia de las comunicaciones específicas para entornos vehiculares, que son ampliamente reconocidas en el contexto CCAM, este trabajo se centra particularmente en vehículos ligeros y tecnologías de comunicación de muy bajo consumo, explorando como las interacciones V2I pueden contribuir a un entorno urbano más seguro y sostenible, especialmente para los usuarios vulnerables.

De este modo, las comunicaciones V2I representan una tecnología crucial de la movilidad conectada, cooperativa y automatizada, permitiendo el intercambio dinámico de información entre vehículos y

elementos de la infraestructura vial, como semáforos, señales de tráfico, y sistemas de gestión de tráfico, o más genéricamente, sistemas de ciudad inteligente. Esta integración no solo ofrece una potencial mejora en la eficiencia del tráfico, reduciendo la congestión y los tiempos de viaje, sino que también juega un papel fundamental en la mejora de la seguridad vial [70], con estudios que resaltan potenciales retornos de inversión de 10 veces la inversión en dos años [71]. Al facilitar una comunicación efectiva y en tiempo real, los sistemas avanzados de comunicación vehicular pueden prevenir accidentes, alertar a los conductores sobre condiciones peligrosas y coordinar de manera más eficiente el flujo de tráfico. En consecuencia, la implementación de tecnologías V2I, como parte de la familia CCAM se considera esencial para el desarrollo de ciudades inteligentes y sistemas de transporte más seguros, sostenibles y eficientes.

Esta tesis doctoral propone avances en un área poco estudiada en la literatura científica, pero que presenta un gran potencial y capacidad de crecimiento. La contribución de este trabajo se centra en la exploración, diseño e implementación de tecnologías y técnicas en diferentes ámbitos siempre en torno al paradigma de la movilidad ecoeficiente lo que sería el primer objetivo de la misma en su análisis del estado actual del paradigma de la movilidad personal. De esta manera, esta tesis abre oportunidades para la integración de los vehículos de movilidad ligeros en infraestructuras hiperconectadas, dotándolos de capacidades de sensado, comunicaciones e inteligencia propia y el aprovechamiento de estas oportunidades detectadas vertebraría el sexto objetivo de esta tesis, el proponer y desarrollar nuevos servicios integrando las técnicas exploradas durante el desarrollo de la misma. Todo ello alineado con el paradigma de ciudad inteligente, así como con los sistemas de conducción conectados CCAM, contemplando todas las limitaciones tecnológicas de este segmento vehicular y explotando al máximo sus capacidades, lo que sería el principal incentivo del desarrollo de la unidad de a bordo prototipada para poder realizar pruebas en entornos reales, motivaciones para los objetivos quinto (desarrollo de la unidad) y séptimo (pruebas en escenarios reales).

Para ello, en primer lugar se analiza el amplio espectro de tecnologías de comunicaciones inalámbricas disponibles en el mercado, estudio que define otro objetivo de esta tesis, necesario para establecer una comprensión profunda y caracterización de dichas tecnologías, para trabajar sobre aquellas que cumplen con los requisitos iniciales de bajo coste y consumo, propios de este ecosistema de movilidad. Dichos requisitos son limitantes en cuanto a la integración de cualquier tecnología en los vehículos de movilidad personal dadas las restringidas capacidades de estos dispositivos, limitación definida durante el desarrollo del segundo objetivo de esta tesis, el estudio del ecosistema concreto y sus necesidades. Además, con el fin de aumentar las capacidades de procesamiento local de estos elementos móviles, se considera un abanico de mecanismos de IA, a través de la evaluación de diversos algoritmos de ML haciendo uso del paradigma *TinyML*. Esta aproximación, la cual vertebra otro objetivo de esta tesis, evaluar las capacidades de dicho paradigma, habilita que en estos dispositivos de capacidades muy reducidas se pueda integrar procesado inteligente, llevando a estos vehículos a un siguiente nivel de autonomía e independencia de la red, con todos los beneficios que esto conlleva ligados a la reducción de consumo energético, mejora en la privacidad de los datos, mejora en la velocidad de respuesta, independencia de la cobertura de red, etc.

Para hacer realidad esta integración, esta tesis doctoral propone el diseño y prototipado de una unidad de a bordo OBU propia (uno de los objetivos de esta tesis), con un coste y consumo energético muy contenido, teniendo así un escenario realista sobre el que se han realizado pruebas de concepto de integración de diversas tecnologías de comunicaciones y computación, así como varios casos de uso, lo que sería otro objetivo fundamental de esta tesis, el llevar todo el desarrollo a escenarios reales. En concreto, se analizan servicios de distinta naturaleza, como son la coordinación de diferentes interfaces de radio o la detección de actividad humana aplicada a la seguridad en el transporte. De este modo, los resultados presentados son extensos y abarcan distintos enfoques, considerando tanto problemas de bajo nivel como servicios directamente ofrecidos al usuario final. De estos resultados se analizan las capacidades de comunicaciones, rendimiento, eficiencia y velocidad de procesamiento automatizado para algoritmos de ML en dispositivos embarcados para vehículos de movilidad personal. Finalmente, destacar la generación de un novedoso conjunto de datos, inexistente hasta la fecha, que permite analizar las métricas y el comportamiento de vehículos tipo *e-scooter* en eventos de caídas, generado

mediante pruebas con dispositivos reales en entornos urbanos. Con todo, esta tesis doctoral abre el camino para conseguir la integración del paradigma de la movilidad urbana ecoeficiente en los sistemas hiperconectados e inteligentes del futuro.

Publicaciones que componen la Tesis

3.1. Eco-Efficient Mobility in Smart City Scenarios

Título	Eco-Efficient Mobility in Smart City Scenarios
Autores	Ramon Sanchez-Iborra, Luis Bernal-Escobedo y Jose Santa
Tipo	Artículo de revista académica
Publicación	Sustainability
Factor de impacto	3.9
Editorial	MDPI
Páginas	8443
Volumen	12
Número	20
Año	2020
Mes	Octubre
ISSN	2071-1050
DOI	10.3390/su12208443
URL	https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8443
Estado	Publicado

Detalles de los Autores	
Nombre	Dr. Ramón J. Sanchez Iborra
Puesto	Profesor Permanente Laboral
Departamento	Ingeniería de la Información y las Comunicaciones
Universidad	Universidad de Murcia
Nombre	Luis Bernal Escobedo
Puesto	Estudiante de Doctorado
Departamento	Ingeniería de la Información y las Comunicaciones
Universidad	Universidad de Murcia
Nombre	Dr. José Santa Lozano
Puesto	Profesor Titular
Departamento	Electrónica, Tecnología de Computadores y Proyectos
Universidad	Universidad Politécnica de Cartagena

3.1.1. Abstract

Los sistemas de transporte inteligentes y cooperativos (C-ITS) han supuesto una revolución tecnológica, especialmente para los vehículos terrestres, en términos de seguridad vial, eficiencia del tráfico, así como en la experiencia de conductores y pasajeros. Hasta ahora, estos avances se han centrado en los medios de transporte tradicionales, dejando de lado la nueva generación de vehículos personales que hoy inundan nuestras calles. Junto con las bicicletas y las motocicletas, los dispositivos de movilidad personal como los segways o los patinetes eléctricos son firmes alternativas sostenibles que representan el futuro para conseguir una movilidad personal respetuosa con el medio ambiente en entornos urbanos. En un futuro próximo, las ciudades inteligentes se convertirán en espacios hiperconectados en los que estos vehículos deberán integrarse dentro del ecosistema C-ITS existente. En este artículo, ofrecemos una amplia panorámica de las oportunidades y retos relacionados con esta necesaria integración, así como de las soluciones de comunicación que ya existen en el mercado para dotar a estos dispositivos móviles de una conectividad eficiente y de bajo coste. También presentamos un prototipo de unidad a bordo (OBU) con diferentes opciones de comunicación basadas en el paradigma de la red de área extensa de baja potencia (LPWAN) y varios sensores para recopilar información medioambiental que habiliten los servicios de ecoeficiencia. Como sugieren los resultados obtenidos,

este módulo permite que los vehículos personales se integren plenamente en entornos de ciudades inteligentes, presentando las posibilidades de comunicaciones usando las tecnologías LoRaWAN y Narrow Band-Internet of Things (NB-IoT) para proporcionar conectividad a los vehículos y permitir el sensado en entornos urbanos móvil y los servicios conectados.

3.2. Machine Learning-Based Radio Access Technology Selection in the Internet of Moving Things

Título	Machine Learning-Based Radio Access Technology Selection in the Internet of Moving Things
Autores	Ramon Sanchez-Iborra, Luis Bernal-Escobedo y Jose Santa
Tipo	Artículo de revista académica
Publicación	China Communications
Factor de impacto	3.1
Editorial	IEEE
Páginas	13-24
Volumen	18
Número	7
Año	2021
Mes	Julio
ISSN	1673-5447
DOI	10.23919/JCC.2021.07.002
URL	https://ieeexplore.ieee.org/document/9495351/
Estado	Publicado

Detalles de los Autores	
Nombre	Dr. Ramón J. Sanchez Iborra
Puesto	Profesor Permanente Laboral
Departamento	Ingeniería de la Información y las Comunicaciones
Universidad	Universidad de Murcia
Nombre	Luis Bernal Escobedo
Puesto	Estudiante de Doctorado
Departamento	Ingeniería de la Información y las Comunicaciones
Universidad	Universidad de Murcia
Nombre	Dr. José Santa Lozano
Puesto	Profesor Titular
Departamento	Electrónica, Tecnología de Computadores y Proyectos
Universidad	Universidad Politécnica de Cartagena

3.2.1. Abstract

El Internet de las Cosas en Movimiento (IoMT) da un paso más allá con respecto a los despliegues estáticos tradicionales del IoT. En esta línea, la integración de nuevos dispositivos de movilidad respetuosos con el medio ambiente, como patinetes o bicicletas, dentro de los sistemas de transporte cooperativo inteligente (C-ITS) y los ecosistemas de ciudades inteligentes es crucial para ofrecer servicios novedosos. Para ello, se dispone de una serie de tecnologías de comunicación, como la telefonía móvil, el WiFi vehicular o las redes de área extensa de baja potencia (LPWAN); sin embargo, ninguna de ellas puede cubrir completamente los requisitos de consumo energético y calidad del servicio (QoS). Por lo tanto, proponemos un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS), basado en la clasificación supervisada de aprendizaje automático (ML), para seleccionar la interfaz de transmisión más adecuada para enviar un determinado mensaje en una configuración multi-Radio Access Technology (RAT). Se han explorado diferentes algoritmos de ML teniendo en cuenta las limitaciones de computación y energía de los enddevices IoMT y el tipo de tráfico. Además, se presenta y evalúa una implementación real de un DSS basado en árboles de decisión para unidades microcontroladoras. Los resultados

obtenidos demuestran la validez de la propuesta, ahorrando energía en las tareas de comunicación, así como satisfaciendo los requisitos de calidad de servicio de ciertos mensajes urgentes. El tamaño de la implementación real en un Arduino Uno es de 444 bytes y puede ejecutarse en unos 50 μ s.

3.3. TinyML-Based Fall Detection for Connected Personal Mobility Vehicles

Título	TinyML-Based Fall Detection for Connected Personal Mobility Vehicles
Autores	Ramon Sanchez-Iborra, Luis Bernal-Escobedo, Jose Santa y Antonio Skármeta
Tipo	Artículo de revista académica
Publicación	Computers, Materials & Continua
Factor de impacto	3.1
Editorial	Tech Science Press
Páginas	3869-3885
Volumen	71
Número	2
Año	2022
Mes	Septiembre
ISSN	1546-2218
DOI	10.32604/cmc.2022.022610
URL	https://www.techscience.com/cmc/v71n2/45829
Estado	Publicado

Detalles de los Autores	
Nombre	Dr. Ramón J. Sánchez Iborra
Puesto	Profesor Permanente Laboral
Departamento	Ingeniería de la Información y las Comunicaciones
Universidad	Universidad de Murcia
Nombre	Luis Bernal Escobedo
Puesto	Estudiante de Doctorado
Departamento	Ingeniería de la Información y las Comunicaciones
Universidad	Universidad de Murcia
Nombre	Dr. José Santa Lozano
Puesto	Profesor Titular
Departamento	Electrónica, Tecnología de Computadores y Proyectos
Universidad	Universidad Politécnica de Cartagena
Nombre	Dr. Antonio Skármeta Gómez
Puesto	Catedrático
Departamento	Ingeniería de la Información y las Comunicaciones
Universidad	Universidad de Murcia

3.3.1. Abstract

Una nueva oleada de vehículos eléctricos de movilidad personal inunda actualmente los espacios públicos. Ofrecen una forma sostenible y eficiente de desplazarse en entornos urbanos; sin embargo, estos dispositivos conllevan problemas de seguridad adicionales, como accidentes potencialmente graves para los conductores. Por ello, aprovechando las ventajas de un vehículo de movilidad personal conectado, presentamos un novedoso sistema de detección de caídas basado en Machine Learning (ML) que analiza los datos capturados por una serie de sensores integrados en un prototipo de unidad a bordo (OBU). Dadas las limitaciones de procesamiento típicas de estos elementos, explotamos el potencial del paradigma TinyML, que permite incluir potentes algoritmos de ML en unidades embebidas de

recursos limitados. Hemos generado y publicado un conjunto de datos que incluye mediciones reales de conducción y eventos de caída simulados de forma realista, el cual se ha empleado para producir diferentes modelos TinyML. Los resultados obtenidos muestran el buen funcionamiento del sistema para detectar caídas de forma eficiente utilizando OBUs embebidos. Los algoritmos considerados se han probado con éxito en unidades de bajo consumo comercialmente disponibles, lo que implica una reducción del consumo de energía, de las necesidades de almacenamiento y de los tiempos de ejecución, habilitando nuevas posibilidades integradas en este tipo de vehículos.

Bibliografía

Publicaciones asociadas a esta tesis doctoral

- [1] R. Sanchez-Iborra, L. Bernal-Escobedo y J. Santa, «Eco-efficient mobility in smart city escenarios», *Sustainability*, vol. 12, n.º 20, pág. 8443, 14 de oct. de 2020, ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su12208443.
- [2] R. Sanchez-Iborra, L. Bernal-Escobedo y J. Santa, «Machine learning-based radio access technology selection in the internet of moving things», *China Communications*, vol. 18, n.º 7, págs. 13-24, jul. de 2021, ISSN: 1673-5447. DOI: 10.23919/JCC.2021.07.002.
- [3] R. Sanchez-Iborra, L. Bernal-Escobedo, J. Santa y A. Skarmeta, «TinyML-based fall detection for connected personal mobility vehicles», *Computers, Materials & Continua*, vol. 71, n.º 2, págs. 3869-3885, 2022, Number: 2 Publisher: Tech Science Press, ISSN: 1546-2218, 1546-2218. DOI: 10.32604/cmc.2022.022610.

Bibliografía

- [4] J. Teter, J. Tattini y A. Petropoulos, «World Energy Outlook 2020», 2020.
- [5] Comisión Europea, *Final report of the Single Platform for Open Road Testing and Pre-deployment of Cooperative, Connected and Automated and Autonomous Mobility Platform (CCAM platform)*, 17 de nov. de 2021.
- [6] R. Daddanala, V. Mannava, L. Tawlbeh y M. Al-Ramahi, *Vehicle to Vehicle (V2V) Communication Protocol: Components, Benefits, Challenges, Safety and Machine Learning Applications*, feb. de 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2102.07306. arXiv: 2102.07306 [cs].
- [7] J. Vanus y P. Bilik, «Research on micro-mobility with a focus on electric scooters within smart cities», *World Electric Vehicle Journal*, vol. 13, n.º 10, pág. 176, 22 de sep. de 2022, Place: United States Publisher: MDPI AG, ISSN: 20326653. DOI: 10.3390/wevj13100176.
- [8] J. Wang, C. Jiang, K. Zhang, T. Q. S. Quek, Y. Ren y L. Hanzo, «Vehicular sensing networks in a smart city: Principles, technologies and applications», *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, n.º 1, págs. 122-132, feb. de 2018, ISSN: 1536-1284. DOI: 10.1109/MWC.2017.1600275.

- [9] A. Sharma, R. Chaki y U. Bhattacharya, «Applications of Wireless Sensor Network in Intelligent Traffic System: A Review», *ICECT 2011 - 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, vol. 5, abr. de 2011. DOI: 10.1109/ICECTECH.2011.5941955.
- [10] P. Brezovec y N. Hampl, «Electric Vehicles Ready for Breakthrough in MaaS? Consumer Adoption of E-Car Sharing and E-Scooter Sharing as a Part of Mobility-as-a-Service (MaaS)», *Energies*, vol. 14, n.º 4, pág. 1088, 4 ene. de 2021, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14041088.
- [11] J. Santa, L. Bernal-Escobedo y R. Sanchez-Iborra, «On-board unit to connect personal mobility vehicles to the IoT», *Procedia Computer Science*, vol. 175, págs. 173-180, 2020, ISSN: 18770509. DOI: 10.1016/j.procs.2020.07.027.
- [12] G. Dimitrakopoulos y P. Demestichas, «Intelligent Transportation Systems», *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 5, n.º 1, págs. 77-84, mar. de 2010, ISSN: 1556-6080. DOI: 10.1109/MVT.2009.935537.
- [13] M. Iorga, L. Feldman, R. Barton, M. J. Martin, N. S. Goren y C. Mahmoudi, «Fog Computing Conceptual Model», *NIST*, 14 de mar. de 2018. DOI: 10.6028/NIST.SP.500-325.
- [14] C. Mahmoudi, F. Mourlin y A. Battou, «Formal definition of edge computing: An emphasis on mobile cloud and IoT composition», en *2018 Third International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, Barcelona: IEEE, abr. de 2018, págs. 34-42, ISBN: 978-1-5386-5896-3. DOI: 10.1109/FMEC.2018.8364042.
- [15] P. Warden y D. Situnayake, *TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-low-power Microcontrollers*. O'Reilly, 2020, 484 págs., ISBN: 978-1-4920-5204-3. Google Books: sB3mxQEACAAJ.
- [16] R. Sanchez-Iborra y A. F. Skarmeta, «TinyML-Enabled Frugal Smart Objects: Challenges and Opportunities», *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 20, n.º 3, págs. 4-18, 2020, Conference Name: IEEE Circuits and Systems Magazine, ISSN: 1558-0830. DOI: 10.1109/MCAS.2020.3005467.
- [17] U. Raza, P. Kulkarni y M. Sooriyabandara, «Low Power Wide Area Networks: An Overview», *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, n.º 2, págs. 855-873, 2017, ISSN: 1553-877X. DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [18] J. Santa, R. Sanchez-Iborra, P. Rodriguez-Rey, L. Bernal-Escobedo y A. Skarmeta, «LPWAN-based vehicular monitoring platform with a generic IP network interface», *Sensors*, vol. 19, n.º 2, pág. 264, 11 de ene. de 2019, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19020264.
- [19] W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue y J.-C. Prévotet, «Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility», *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, n.º 2, págs. 1561-1581, 2019, Conference Name: IEEE Communications Surveys & Tutorials, ISSN: 1553-877X. DOI: 10.1109/COMST.2018.2877382.
- [20] K. Mikhaylov, M. Stusek, P. Masek et al., «Multi-RAT LPWAN in Smart Cities: Trial of LoRaWAN and NB-IoT Integration», en *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, ISSN: 1938-1883, mayo de 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2018.8422979.
- [21] J. Xu, J. Yao, L. Wang, Z. Ming, K. Wu y L. Chen, «Narrowband Internet of Things: Evolutions, Technologies, and Open Issues», *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, n.º 3, págs. 1449-1462, jun. de 2018, Conference Name: IEEE Internet of Things Journal, ISSN: 2327-4662. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2783374.
- [22] U. Lee y M. Gerla, «A survey of urban vehicular sensing platforms», *Computer Networks, Advances in Wireless and Mobile Networks*, vol. 54, n.º 4, págs. 527-544, 19 de mar. de 2010, ISSN: 1389-1286. DOI: 10.1016/j.comnet.2009.07.011.

- [23] P. M. Santos, J. G. P. Rodrigues, S. B. Cruz et al., «PortoLivingLab: An IoT-Based Sensing Platform for Smart Cities», *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, n.º 2, págs. 523-532, abr. de 2018, Conference Name: IEEE Internet of Things Journal, ISSN: 2327-4662. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2791522.
- [24] B. M. Masini, A. Bazzi y A. Zanella, «Vehicular visible light networks for urban mobile crowd sensing», *Sensors*, vol. 18, n.º 4, pág. 1177, abr. de 2018, Number: 4 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18041177.
- [25] J. Salamanca, S. Céspedes, D. Vinasco y A. Yañez, «Demo: A prototype for a platoon-based cyclist cooperative system», en *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, ISSN: 2157-9865, dic. de 2016, págs. 1-2. DOI: 10.1109/VNC.2016.7835985.
- [26] J. J. Anaya, E. Talavera, D. Gimenez, N. Gomez, F. Jimenez y J. E. Naranjo, «Vulnerable Road Users Detection Using V2X Communications», en *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, ISSN: 2153-0017, sep. de 2015, págs. 107-112. DOI: 10.1109/ITSC.2015.26.
- [27] H. Steltenpohl y A. Bouwer, «Vibrobelt: tactile navigation support for cyclists», en *Proceedings of the 2013 international conference on Intelligent user interfaces*, ép. IUI '13, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 19 de mar. de 2013, págs. 417-426, ISBN: 978-1-4503-1965-2. DOI: 10.1145/2449396.2449450.
- [28] R. Miucic, S. Rajab, S. Bai, J. Sayer y D. Funkhouser, «Improving Motorcycle Safety through DSRC Motorcycle-to-Vehicle Communication», **presented at** SAE 2015 World Congress & Exhibition, 14 de abr. de 2015, págs. 2015-01-0291. DOI: 10.4271/2015-01-0291.
- [29] P.-J. Chiu y H.-M. Tsai, «An intersection collision avoidance system for scooters utilizing non-line-of-sight links», en *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, ISSN: 1930-529X, dic. de 2012, págs. 49-55. DOI: 10.1109/GLOCOM.2012.6503089.
- [30] U. Hernandez-Jayo, I. De-la-Iglesia y J. Perez, «V-alert: Description and validation of a vulnerable road user alert system in the framework of a smart city», *Sensors*, vol. 15, n.º 8, págs. 18480-18505, ago. de 2015, Number: 8 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s150818480.
- [31] C. Vagnoli, F. Martelli, T. D. Filippis et al., «The SensorWebBike for air quality monitoring in a smart city», 2 (4.)-2 (4.) 1 de ene. de 2014, Publisher: IET Digital Library. DOI: 10.1049/ic.2014.0043.
- [32] D. Aguiari, G. Delnevo, L. Monti et al., «Canarin II: Designing a smart e-bike eco-system», en *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, ISSN: 2331-9860, ene. de 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/CCNC.2018.8319221.
- [33] R. Almeida, R. Oliveira, M. Luís, C. Senna y S. Sargento, «A multi-technology communication platform for urban mobile sensing», *Sensors*, vol. 18, n.º 4, pág. 1184, abr. de 2018, Number: 4 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18041184.
- [34] Y.-C. Wang y G.-W. Chen, «Efficient Data Gathering and Estimation for Metropolitan Air Quality Monitoring by Using Vehicular Sensor Networks», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, n.º 8, págs. 7234-7248, ago. de 2017, Conference Name: IEEE Transactions on Vehicular Technology, ISSN: 1939-9359. DOI: 10.1109/TVT.2017.2655084.
- [35] O. Briante, C. Campolo, A. Iera, A. Molinaro, S. Y. Paratore y G. Ruggeri, «Supporting augmented floating car data through smartphone-based crowd-sensing», *Vehicular Communications*, vol. 1, n.º 4, págs. 181-196, 1 de oct. de 2014, ISSN: 2214-2096. DOI: 10.1016/j.vehcom.2014.08.002.
- [36] M. Silva, G. Signoretti, J. Oliveira, I. Silva y D. G. Costa, «A Crowdsensing Platform for Monitoring of Vehicular Emissions: A Smart City Perspective», *Future Internet*, vol. 11, n.º 1, pág. 13, ene. de 2019, ISSN: 1999-5903. DOI: 10.3390/fi11010013.

- [37] C. Zuo, K. Liang, Z. L. Jiang, J. Shao y J. Fang, «Cost-effective privacy-preserving vehicular urban sensing system», *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 21, n.º 5, págs. 893-901, 1 de oct. de 2017, ISSN: 1617-4917. DOI: 10.1007/s00779-017-1046-9.
- [38] O. Urrea y S. Ilarri, «Spatial crowdsourcing with mobile agents in vehicular networks», *Vehicular Communications*, vol. 17, págs. 10-34, 1 de jun. de 2019, ISSN: 2214-2096. DOI: 10.1016/j.vehcom.2019.03.004.
- [39] S. Céspedes, J. Salamanca, A. Yáñez y D. Vinasco, «Group Cycling Meets Technology: A Cooperative Cycling Cyber-Physical System», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, n.º 8, págs. 3178-3188, ago. de 2019, Conference Name: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, ISSN: 1558-0016. DOI: 10.1109/TITS.2018.2874394.
- [40] J. Li, M. Lakshminarasimhan, X. Wu, A. Li, C. Olschanowsky y K. Barker, «A Sparse Tensor Benchmark Suite for CPUs and GPUs», en *2020 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC)*, oct. de 2020, págs. 193-204. DOI: 10.1109/IISWC50251.2020.00027.
- [41] D. Ghimire, D. Kil y S.-h. Kim, «A Survey on Efficient Convolutional Neural Networks and Hardware Acceleration», *Electronics*, vol. 11, n.º 6, pág. 945, 6 ene. de 2022, ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics11060945.
- [42] A. Ravikumar, H. Sriraman, P. M. S. Saketh, S. Lokesh y A. Karanam, «Effect of neural network structure in accelerating performance and accuracy of a convolutional neural network with GPU/TPU for image analytics», *PeerJ Computer Science*, vol. 8, e909, 3 de mar. de 2022, ISSN: 2376-5992. DOI: 10.7717/peerj-cs.909.
- [43] C. Bormann, M. Ersue y A. Keränen, «Terminology for Constrained-Node Networks», Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 7228, mayo de 2014, 17 págs. DOI: 10.17487/RFC7228.
- [44] N. N. Alajlan y D. M. Ibrahim, «TinyML: Enabling of Inference Deep Learning Models on Ultra-Low-Power IoT Edge Devices for AI Applications», *Micromachines*, vol. 13, n.º 6, pág. 851, 6 jun. de 2022, ISSN: 2072-666X. DOI: 10.3390/mi13060851.
- [45] V. Rajapakse, I. Karunanayake y N. Ahmed, «Intelligence at the Extreme Edge: A Survey on Reformable TinyML», *ACM Computing Surveys*, pág. 3 583 683, 13 de feb. de 2023, ISSN: 0360-0300, 1557-7341. DOI: 10.1145/3583683.
- [46] B. Saha, R. Samanta, S. Ghosh y R. B. Roy, «BandX : An Intelligent IoT-band for Human Activity Recognition Based on TinyML», en *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing and Networking*, ép. ICDCN '23, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 4 de ene. de 2023, págs. 284-285, ISBN: 978-1-4503-9796-4. DOI: 10.1145/3571306.3571415.
- [47] X. Zhai, X. Guan, C. Zhu, L. Shu y J. Yuan, «Optimization Algorithms for Multiaccess Green Communications in Internet of Things», *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, n.º 3, págs. 1739-1748, jun. de 2018, Conference Name: IEEE Internet of Things Journal, ISSN: 2327-4662. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2792300.
- [48] R. M. Sandoval, S. Canovas-Carrasco, A.-J. Garcia-Sanchez y J. Garcia-Haro, «Smart Usage of Multiple RAT in IoT-oriented 5G Networks: A Reinforcement Learning Approach», en *2018 ITU Kaleidoscope: Machine Learning for a 5G Future (ITU K)*, nov. de 2018, págs. 1-8. DOI: 10.23919/ITU-WT.2018.8597940.
- [49] M. Hasan, E. Hossain y D. Niyato, «Random access for machine-to-machine communication in LTE-advanced networks: issues and approaches», *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, n.º 6, págs. 86-93, jun. de 2013, Conference Name: IEEE Communications Magazine, ISSN: 1558-1896. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6525600.
- [50] X. Wang, J. Li, L. Wang, C. Yang y Z. Han, «Intelligent User-Centric Network Selection: A Model-Driven Reinforcement Learning Framework», *IEEE Access*, vol. 7, págs. 21 645-21 661, 2019, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2898205.

- [51] J. S. Perez, S. K. Jayaweera y S. Lane, «Machine learning aided cognitive RAT selection for 5G heterogeneous networks», en *2017 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, jun. de 2017, págs. 1-5. DOI: 10.1109/BlackSeaCom.2017.8277675.
- [52] R. Sanchez-Iborra, J. Sanchez-Gomez y A. Skarmeta, «Evolving IoT networks by the confluence of MEC and LP-WAN paradigms», *Future Generation Computer Systems*, vol. 88, págs. 199-208, 1 de nov. de 2018, ISSN: 0167-739X. DOI: 10.1016/j.future.2018.05.057.
- [53] M. Prado, R. Donze, A. Capotondi et al., *Robust navigation with tinyML for autonomous mini-vehicles*. 1 de jul. de 2020.
- [54] S. V. Lahade, S. Namuduri, H. Upadhyay y S. Bhansali, «Alcohol Sensor Calibration on the Edge Using Tiny Machine Learning (Tiny-ML) Hardware», *ECS Meeting Abstracts*, vol. MA2020-01, n.º 26, pág. 1848, 1 de mayo de 2020, ISSN: 2151-2043. DOI: 10.1149/MA2020-01261848mtgabs.
- [55] A. M. Hayajneh, S. Aldalahmeh, S. A. R. Zaidi, D. McLernon, H. Obeidollah y R. Alsakarnah, «Channel State Information Based Device Free Wireless Sensing for IoT Devices Employing TinyML», en *2022 4th IEEE Middle East and North Africa COMMUNICATIONS Conference (MENACOMM)*, dic. de 2022, págs. 215-222. DOI: 10.1109/MENACOMM57252.2022.9998267.
- [56] Y. Zigel, D. Litvak e I. Gannot*, «A Method for Automatic Fall Detection of Elderly People Using Floor Vibrations and Sound—Proof of Concept on Human Mimicking Doll Falls», *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 56, n.º 12, págs. 2858-2867, dic. de 2009, ISSN: 1558-2531. DOI: 10.1109/TBME.2009.2030171.
- [57] T. Tri, H. Truong y T. Khanh, «Automatic Fall Detection using Smartphone Acceleration Sensor», *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7, n.º 12, 2016, ISSN: 21565570, 2158107X. DOI: 10.14569/IJACSA.2016.071216.
- [58] S. Wan, L. Qi, X. Xu, C. Tong y Z. Gu, «Deep Learning Models for Real-time Human Activity Recognition with Smartphones», *Mobile Networks and Applications*, vol. 25, n.º 2, págs. 743-755, 1 de abr. de 2020, ISSN: 1572-8153. DOI: 10.1007/s11036-019-01445-x.
- [59] E. Casilari y M. A. Oviedo-Jiménez, «Automatic Fall Detection System Based on the Combined Use of a Smartphone and a Smartwatch», *PLoS ONE*, vol. 10, n.º 11, e0140929, 11 de nov. de 2015, ISSN: 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0140929. pmid: 26560737.
- [60] R. Sanchez-Iborra, «LPWAN and Embedded Machine Learning as Enablers for the Next Generation of Wearable Devices», *Sensors*, vol. 21, n.º 15, pág. 5218, jul. de 2021, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21155218.
- [61] L. Minh Dang, K. Min, H. Wang, M. Jalil Piran, C. Hee Lee y H. Moon, «Sensor-based and vision-based human activity recognition: A comprehensive survey», *Pattern Recognition*, vol. 108, pág. 107561, 1 de dic. de 2020, ISSN: 0031-3203. DOI: 10.1016/j.patcog.2020.107561.
- [62] P. Vallabh, R. Malekian, N. Ye y D. Capeska Bogatinoska, «Fall Detection Using Machine Learning Algorithms», 22 de sep. de 2016. DOI: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772142.
- [63] R. Jain, V. B. Semwal y P. Kaushik, «Deep ensemble learning approach for lower extremity activities recognition using wearable sensors», *Expert Systems*, vol. 39, n.º 6, jul. de 2022, ISSN: 0266-4720, 1468-0394. DOI: 10.1111/exsy.12743.
- [64] N. Kumar, D. Acharya y D. Lohani, «An IoT-Based Vehicle Accident Detection and Classification System Using Sensor Fusion», *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, n.º 2, págs. 869-880, ene. de 2021, ISSN: 2327-4662. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3008896.
- [65] A. Chelli y M. Pätzold, «A Machine Learning Approach for Fall Detection and Daily Living Activity Recognition», *IEEE Access*, vol. 7, págs. 38670-38687, 2019, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2906693.

-
- [66] I. P. E. S. Putra, J. Brusey, E. Gaura y R. Vesilo, «An Event-Triggered Machine Learning Approach for Accelerometer-Based Fall Detection», *Sensors*, vol. 18, n.º 1, pág. 20, 1 ene. de 2018, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18010020.
- [67] A. Ferrari, D. Micucci, M. Mobilio y P. Napoletano, «On the Personalization of Classification Models for Human Activity Recognition», *IEEE Access*, vol. 8, págs. 32 066-32 079, 2020, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973425.
- [68] S. Gupta, D. Jain, B. Roy y A. Deb, «A TinyML Approach to Human Activity Recognition», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2273, pág. 012 025, 1 de mayo de 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2273/1/012025.
- [69] E. Casilari, J. A. Santoyo-Ramón y J. M. Cano-García, «UMAFall: A Multisensor Dataset for the Research on Automatic Fall Detection», *Procedia Computer Science*, 14th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC 2017) / 12th International Conference on Future Networks and Communications (FNC 2017) / Affiliated Workshops, vol. 110, págs. 32-39, 1 de ene. de 2017, ISSN: 1877-0509. DOI: 10.1016/j.procs.2017.06.110.
- [70] U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration., «Emergency Vehicle Alerts Boost Driver Awareness», *Innovator Newsletter*, vol. Issue 88, 20 de ene. de 2022. DOI: 10.21949/1521806.
- [71] Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission), ECORYS, VTT et al., *Study on the Feasibility, Costs and Benefits of Retrofitting Advanced Driver Assistance to Improve Road Safety: Final Report*. Publications Office of the European Union, 2020, A European Model Estimated That Mandatory Deployment of Vulnerable Road User Detection and Warning Systems on Buses And Coaches Can Have A Benefit-To-Cost Ratio of 10.2 Over Two Years (2026-2027), ISBN: 978-92-76-10627-2.

Glosario

3GPP 3rd Generation Partnership Project. x, XIV, XIX

5G 5th Generation. XX, XXIV, XXVI

5G NR 5G New Radio. XIX, XX

ASIC Application Specific Integrated Circuit. XXV

CCAM Cooperative, connected and automated mobility. IX–XII, XIV, XV, XVIII–XXI, XXIII, XXIV, XXVIII, XXIX

CNN Convolutional Neural Network. XXVI

CPU Central Processing Unit. XXV

DECT Digital Enhanced Cordless Telecommunications. XIX

DECT-NR Digital Enhanced Cordless Telecommunications - New Radio. XIX

DSRC Dedicated Short Range Communications. XXIV

E-UTRAN Evolved UTRAN. XIX

GPRS Global Packet Radio System. XXIV

GPU (Graphics Processing Unit) Procesador de gráficos. X, XXV

IA Inteligencia Artificial. x, XI, XX, XXIX

IEEE Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. XXIV

IoT Internet of Things. x, XI, XIII, XIV, XVI, XVIII, XIX, XXI, XXIV–XXVIII

IoV Internet of Vehicles. XXIV

LoRa Long Range (radio). XIX, XXIV, XXVI

LoRaWAN Long Range Wide Area Network. XIV, XVI, XXIV, XXVI

LPWAN Low-Power Wide-Area Network. x, XI, XIII–XV, XXIV, XXV

LTE Long Term Evolution. XIV, XIX

MEC Multi-Access Edge Computing. XIII, XXV

- ML** Machine Learning. x–xvi, xviii–xxi, xxv–xxix
- MMTC** Massive Machine-Type Communications. xix, xxvi
- NB-IoT** Narrow band Internet of Things. x, xiv, xvi, xix, xxiv, xxvi
- OBU** On-board Unit. xi–xvi, xviii, xxiv, xxv, xxix
- OCB** Outside of Context of a Basic set. xxiv, xxv
- RAT** Radio Access Technology. xxvi, xxvii
- SINR** Signal to Interference plus Noise Ratio. xxvi
- TPU** Tensor Processing Unit. xxv
- UTRAN** UMTS Terrestrial Radio Access Network. xix
- V2I** Vehicle to Infrastructure. xxviii, xxix
- V2V** Vehicle to Vehicle. xx, xxv
- VSAN** Vehicular Sensor Network. x, xxiii, xxv
- WiFi** Wireless Fidelity. xix, xxiv, xxv