



TESIS DOCTORAL

Arquitectura Sostenible de Comunicación Oportunista para el Despliegue de Aplicaciones Edge-Fog-Cloud en Zonas Rurales Aisladas

MANUEL JESÚS AZABAL

PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INFORMÁTICAS
(TIN)

Con la conformidad de los directores

Dr. José Manuel García Alonso y Dr. Jaime Galán Jiménez

Esta tesis cuenta con la autorización del director/a y codirector/a de la misma y de la Comisión Académica del programa. Dichas autorizaciones constan en el Servicio de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Extremadura.

2023



TESIS DOCTORAL

Arquitectura Sostenible de Comunicación Oportunista para el Despliegue de Aplicaciones Edge-Fog-Cloud en Zonas Rurales Aisladas

MANUEL JESÚS AZABAL

PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INFORMÁTICAS
(TIN)

2023

*A mi padre Manuel, que lamentablemente nos dejó hace tan solo unos meses
pero toda su sabiduría y valores nos acompañarán siempre.*

*A mi madre Santa, por ser una incondicional fuente de apoyo.
Gracias por enseñarme a tener los pies en el suelo
pero la mirada en las estrellas.*

*A mi hermano José Ignacio, por su nobleza, compañía y amistad infinita.
Camarada, esta victoria tiene tus apellidos.*

*A mi esposa Rosa María, porque, además de ser una más de la familia,
eres mi hogar.*

Agradecimientos

Imagino que cualquier trabajo de doctorado tiene como resultado dos libros diferentes: la tesis y la historia de cómo se concibió esa tesis. En mi caso particular, puedo asegurar que ha sido una carrera donde ha habido hueco para todo, desde momentos muy buenos a momentos no tan buenos. Sin embargo, como en todo buen relato, lo más memorable siempre son los personajes que pueblan la historia. En este caso, son personas con nombres y apellidos las que han hecho que esta aventura haya sido posible.

Personas como **Jaime Galán Jiménez**, que hace ya casi cinco años vio potencial en un alumno de cuarto, con amagos de consultor y con una visión a largo plazo muy diferente de la actual. Aún guardo con mucho cariño el trabajo final de grado y no puedo evitar verlo como el primer paso de todo este camino. Gracias por haberme dirigido hasta aquí con infinita paciencia, dándome los mejores consejos y trasladándome esa rigurosidad con la que siempre trabajas. A veces, cambiar una vida es cuestión de pequeñas decisiones y, en este caso, podemos afirmar con plena seguridad que comenzar a trabajar contigo fue un perfecto ejemplo de ello. Gracias de todo corazón.

Junto con Jaime, **José Manuel García Alonso** ha sido el otro pilar fundamental en la dirección de este trabajo de tesis. Recuerdo con perfecta nitidez mi etapa en el Proyecto 4IE y 4IE+, junto con todo lo que he podido aprender gracias a ti. Fueron muchos viajes en coche a Portugal, Valladolid o Madrid, con infinitas conversaciones que evidenciaban el talento y esfuerzo que pones en cada cosa que haces. Gracias por depositar tu plena confianza en mí desde el principio, ser un verdadero mentor y trasladarme una sabiduría que no aparece en los *papers*. Me enseñaste el valor que tiene

el rechazo en la investigación y a perseverar cuando la motivación cae. Eres el líder con el que espero seguir trabajando, investigando y emprendiendo.

Por supuesto, es imposible hacer balance de esta etapa sin acordarme de compañeros como **Marino Linaje**, capaz de poner la creatividad en el centro de todo; o **Enrique Moguel**, quien en más de una ocasión, incluso sin saberlo, me ha proporcionado la motivación que necesitaba para seguir adelante. Debo agradecer también el importante papel de **Vasco N. G. J. Soares**, quien ha sido un verdadero benefactor en los trabajos de investigación realizados, aportando excelentes ideas y contribuyendo enormemente con su conocimiento. Imposible olvidarme de **Sara Chimento**, incansable compañera de fatigas, o de **Luís López Lago**, cuya alegría, positivismo y sabiduría lo convierten en una persona extraordinaria y de la que siempre me encanta aprender. Al mismo tiempo, no puedo evitar mencionar a **Manuel Jiménez**, **Borja Rivero**, **Sara Arroyo**, **Lorenzo Juárez** y **David Conde**: sois absolutamente brillantes. En definitiva, infinitas gracias a todos mis compañeros de laboratorio, quienes, de una forma u otra, han sido una fuente de inspiración para seguir mejorando.

Durante el transcurso de esta tesis, he tenido la oportunidad de impartir clases de múltiples asignaturas a largo de tres años y en dos universidades diferentes, lo que ha supuesto una de las mejores experiencias de mi vida. En este periodo, es imposible no mencionar la inestimable ayuda de **Miriam Salas**, quien, desde que me uní a su despacho, ha tenido que soportar infinitas jornadas de pizarras borrosas y maratónicas sesiones de teclado. Muchas gracias por haber sido una inagotable fuente de ánimos y por darme tan valiosísimos consejos. Quisiera agradecer a **Pedro Clemente** su inestimable labor como director del departamento, y la fundamental guía que brinda siempre que se le necesita. También, a **Fernando Sánchez**, **Álvaro Rubio**, **Marisa Durán**, **Elena Jurado** y **Adolfo Lozano**, por haber sido excelentes compañeros de docencia, capaces de enseñarme tantísimo en tan poco tiempo. De la misma forma, compañeros como **Pedro Aguilar** han sabido sacarme una sonrisa, aunque fuese en fugaces conversaciones a través de la ventana del despacho. Por supuesto, no puedo olvidar a los que fueron mis compañeros durante mi docencia en la Universidad de Málaga, especialmente a los profesores del **Despacho 3.3.11**. Jamás había visto una sala tan llena de buenas personas, ambiciosas y enérgicas. Ojalá siempre, allá donde vaya, me encuentre con gente como vosotros.

Resulta muy curioso este “otro lado” de la universidad cuando pienso en mis años como estudiante. Recuerdo con especial lucidez las extensas tutorías que pasé con **Cristina Chicote**, aún en mi primer año. Nunca te agradecí lo suficiente que fueses capaz de darme la energía necesaria para enfrentarme a aquel temible primer cuatrimestre. Más adelante, profesores como **Pedro Clemente**, el propio **Jaime Galán** o **Rafael Martín**, acabaron por conseguir que me enamorase incondicionalmente de la ingeniería informática. En los años más recientes, he tenido la oportunidad de ser alumno de otros grandes profesores que emanan pasión por su trabajo, como **José Carlos Sancho**, que desinteresadamente siempre ha estado dispuesto a ayudar y aconsejar.

Sin embargo, ya desde aquella época, nada hubiese sido igual sin la amistad de muchas personas que me han acompañado durante años en este camino y en otros, estando tanto en los mejores como en los peores momentos. Amigos como **Eduardo Maguiña**, **Lucas Durán**, **Daniel García**, **Inés Rodríguez**, **Alberto Bravo**, **Borja Tirado**, **Isaac Sosa**, **José Ángel Barriga**, **Fran González**, **Luíçao Díaz**, **Manuel Saavedra**, **Nacho Quintana**, **Javi Durán**, **Juan Carlos Arias**, **Sheila Sánchez** y todos los que nos acompañaron cuando éramos los *Kingsman*, soy muy afortunado de poder compartir todo esto con vosotros. Agradecimientos también a **Irene Carrasco**, **Joaquín León**, **José Agustín Medina**, **Rebeca García** y **Gema Gaspar**, quienes durante años amenizaron las horas de clase y de estudio.

Quisiera agradecer también a **Guillermo López** su valiosa compañía durante momentos críticos de esta tesis, así como su amistad, posiblemente lo mejor que me llevo de toda la costa del sol. También, agradezco particularmente a **Sébastien Béland** los invaluable consejos que me diste sobre la tesis, la investigación y la vida en sí. Por supuesto, infinitas gracias a **Maite Serrat** y **Víctor Terrasa**, con quienes hemos podido compartir innumerables aventuras y vacaciones de verano dignas de anuncio; y a todos los compañeros del grupo de **teatro**, que, aparte de ostentar un talento increíble, son amistades que guardo con especial cariño. Gracias también a **Pablo Collar**, quien con su humor y simpatía hace que las visitas por la planta baja de la facultad siempre se prolonguen más de la cuenta.

Aprovechando la detallada lista de alusiones, me gustaría pedir humildemente a todos perdón por los *WhatsApp* sin leer, las llamadas sin

responder, los planes cancelados y las visitas eternamente pendientes. Muchas gracias por la paciencia que habéis tenido conmigo y por darme una amistad que ni la distancia ni el tiempo es capaz de erosionar.

Finalmente, y no por ello menos importante, toda esta historia nunca hubiese tenido lugar sin el incansable apoyo de toda mi familia. Digamos que, de una forma u otra, la familia no la elige uno, pero si encima te toca la mejor del mundo, pues se dice y punto. Gracias a mi primo **Julián López**, quien, aún en la época del *Windows 98*, me contagió su afán por la tecnología a base de calurosos veranos reparando equipos antiguos de 512 Mb de RAM. Muchas gracias a mi **padre Manuel** por haber sido un excelente profesor de vida, que durante 26 años ha sido capaz de darme siempre los mejores consejos y transmitirme los valores del esfuerzo, sacrificio, respeto y humildad. Sé que estarías orgulloso. A mi **madre Santa**, que es una de las personas más fuertes que conozco y que siempre nos ha educado con un apoyo incondicional, una ambición desmedida y con un cariño y afecto monumental. A mi hermano **José Ignacio**, por su infinita amistad y apoyo, por vivir todos los pasos como si fuesen tuyos, porque, de una forma u otra, lo son también. Gracias por estar ahí siempre. A **Rosa María Rodríguez**, con quien tengo la suerte de compartir mi vida y que es un apoyo desmesurado en todo lo que hago. Eres particularmente quien ha podido vivir más de cerca los sacrificios de un trabajo como este y todo lo que inevitablemente implica. Ahora toca recuperar el tiempo perdido y desapilar ese millón de cosas de la lista de pendientes. Gracias por tu paciencia, por haber contribuido a que el camino haya sido más llevadero y por llenar mi día a día de ilusión, amor, humor, energía y proyectos. Sois el motor que mueve mi vida.

Para terminar estos agradecimientos, me gustaría citar al personaje que interpreta Toni Servillo en *La Gran Belleza* (2013, dir. **Paolo Sorrentino**) cuando le preguntan por qué dejó de escribir libros: “*Buscaba la gran belleza. Pero... no la he encontrado*”. Que, al igual que en la película, sirva como catalizador de la inspiración.

Resumen

El acceso a Internet ha supuesto una auténtica disrupción en la sociedad moderna. Las posibilidades de la comunicación entre dispositivos, la transmisión de información y las capacidades de difusión han iniciado una verdadera revolución económica, social y cultural. Entre las disciplinas emergentes a raíz de esta evolución, el denominado Internet of Things (IoT) ha planteado un nuevo paradigma en los sistemas distribuidos, innovando en la manera en la que la información es obtenida, transmitida y procesada. La capacidad de captación y comunicación de estos equipos ha motivado la concepción de nuevas abstracciones, como el modelo Edge-Fog-Cloud. Este paradigma pretende distribuir los diferentes actores que intervienen en la comunicación de dispositivos en tres capas principales: Edge, aquella formada por los dispositivos que generan y reciben la información; Fog, compuesta por los elementos capaces de transmitir la información hacia Internet; y Cloud, capa que agrupa los componentes y procesos llevados a cabo de manera remota. La inclusión de este modelo pretende reducir la carga de trabajo que tradicionalmente se desempeña en la nube, distribuyendo las tareas entre los dispositivos que intervienen en la comunicación. Como resultado, es posible equilibrar la labor de cada componente y aprovechar en mayor medida los recursos involucrados. Sin embargo, existen sistemas que no pueden explotar este modelo debido a la alta exigencia en la disponibilidad de conexión a Internet.

Algunas zonas rurales aisladas carecen de la infraestructura de comunicación necesaria para desplegar aplicaciones distribuidas o sistemas IoT. Factores como las limitaciones geográficas o el alto coste de inversión motivan la falta de acceso a Internet en estas regiones, impidiendo así la digitalización de su población e industria. Considerando el contexto de estos

territorios, el presente trabajo de tesis propone una arquitectura sostenible de comunicación oportunista que aplica el modelo Edge-Fog-Cloud para el despliegue de aplicaciones distribuidas en entornos que carecen de conexión a Internet. Para ello, se compone una capa Edge conformada por los dispositivos finales que reciben y emiten información, los cuales son empleados para emprender comunicaciones oportunistas mediante interfaces de corto alcance. Esta estrategia de transmisión aprovecha los desplazamientos y encuentros físicos de los dispositivos para acercar la información hasta los nodos Fog, equipados con acceso a Internet y capaces de comunicarse con los nodos Cloud. Como resultado, es posible establecer comunicaciones a través de una arquitectura que no precisa de un alto coste de despliegue, mitigando así las potenciales limitaciones de conexión de las áreas rurales aisladas.

La propuesta de tesis detalla las entidades y procesos involucrados en la arquitectura, identificando las principales necesidades y la adaptación del modelo Edge-Fog-Cloud a un esquema de comunicación oportunista. Del mismo modo, se definen diferentes algoritmos de encaminamiento que aplican un conjunto de métricas basadas en el comportamiento individual de los nodos para optimizar la transmisión de información en la red. Con el objetivo de analizar el rendimiento de la solución, se plantea un conjunto de potenciales aplicaciones y escenarios, estudiando la calidad de servicio en las comunicaciones y comparando los resultados con alternativas del estado del arte. Del mismo modo, se determina el consumo energético de la propuesta, así como la viabilidad en el uso de energía solar para suministrar corriente a elementos de la red. Como conclusión, la propuesta denota resultados positivos en los escenarios implementados, con un consumo energético viable y sostenible, alcanzando unas métricas de calidad de servicio superiores a las alternativas.

Abstract

Access to the Internet has led to a genuine disruption in modern society. The possibilities of communication between devices, information transmission, and broadcasting capabilities have ignited a real economic, social, and cultural revolution. Among the emerging disciplines stemming from this evolution, the so-called Internet of Things (IoT) has established a new paradigm in distributed systems, innovating the way information is captured, transmitted, and processed. The sensing and communication abilities of these systems have inspired new abstractions, such as the Edge-Fog-Cloud model. This paradigm aims to distribute the various actors involved in device communication across three main layers: Edge, formed by devices that generate and receive information; Fog, composed of elements capable of transmitting information to the Internet; and Cloud, a layer encompassing remote components and processes. The inclusion of this model seeks to alleviate the workload traditionally performed in the cloud, distributing tasks among the devices involved in communication. As a result, it is possible to balance each component's labour and better leverage the resources involved. However, some systems cannot exploit this model due to the high demand for Internet connectivity.

Some isolated rural areas lack the necessary communication infrastructure to deploy distributed applications or IoT systems. Factors such as geographical limitations or high investment costs drive the lack of Internet access in these regions, thus preventing the digitization of their population and industry. Considering the context of these territories, this thesis proposes a sustainable architecture for opportunistic communication that applies the Edge-Fog-Cloud model for the deployment of distributed applications in environments lacking Internet connectivity. For this, an Edge layer is

composed of end devices that receive and emit information, which is used to initiate opportunistic communications through short-range interfaces. This transmission strategy leverages the physical movements and encounters of devices to bring information closer to the Fog nodes, equipped with Internet access and able to communicate with Cloud nodes. As a result, it is possible to establish communications through an architecture that does not require high deployment costs, thus mitigating potential connection limitations of isolated rural areas.

The thesis proposal details the entities and processes involved in the architecture, identifying the main needs identified and adapting the Edge-Fog-Cloud model to an opportunistic communication scheme. Similarly, various routing algorithms are defined that apply a set of metrics based on the individual behaviour of the nodes to optimize information transmission in the network. To analyze the performance of the solution, a set of potential applications and scenarios are proposed, studying the quality of service in communications and comparing results with state-of-the-art alternatives. Likewise, the energy consumption of the proposal is determined, as well as the feasibility of using solar power to supply current to network elements. As a conclusion, the proposal denotes positive results in the implemented scenarios, with viable and sustainable energy consumption, achieving quality of service metrics superior to alternatives.

Índice general

Resumen	IX
Abstract	XI
Índice de figuras	XVII
Índice de tablas	XXI
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Motivación	7
1.2.1. La brecha digital en la España rural	8
1.2.2. Arquitectura Edge-Fog-Cloud Oportunista	12
1.2.3. Transmisión oportunista de la información entre nodos Edge	16
1.3. Objetivos	18
1.4. Contribuciones	19
1.5. Publicaciones relacionadas	22
1.6. Estructura de la Tesis	29
2. Antecedentes	33
2.1. Radiografía de las Zonas Rurales Aisladas	34
2.1.1. Causas de la Brecha Digital	35

2.1.2.	Las Consecuencias de la Brecha Digital en las Zonas Rurales Aisladas	40
2.1.3.	Alternativas para el Acceso a Internet en Zonas Rurales Aisladas	43
2.2.	Las características de las redes oportunistas y su papel en entornos sin conexión a Internet	53
2.2.1.	Características y Retos de las Redes Ad-hoc	54
2.2.2.	Taxonomía de las Redes Ad-hoc	57
2.2.3.	Redes Tolerantes al Retardo	59
2.3.	Conclusiones	66
3.	Arquitectura Oportunista para el Despliegue de Aplicaciones Edge-Fog-Cloud	69
3.1.	Arquitectura	70
3.1.1.	Capa Edge	71
3.1.2.	Capa Fog	77
3.1.3.	Capa Cloud	77
3.2.	Encaminamiento oportunista de la información	78
3.2.1.	Perfil Virtual	79
3.2.2.	Situational Adaptative Contextual Router	79
3.2.3.	Refined Social Broadcast	87
4.	Contextos de Aplicación de la Arquitectura	95
4.1.	Sistema de detección de emergencias en hogares de adultos mayores que residen solos	96
4.1.1.	Estado del Arte	97
4.1.2.	Aplicación de detección remota de emergencias mediante la arquitectura oportunista	100
4.2.	Sistema de monitorización para la mejora de productividad en industrias de zonas rurales	102
4.2.1.	Estado del arte	103
4.2.2.	Aplicación de sensorización de industrias mediante la arquitectura oportunista	105

4.3.	Detección de la soledad en población adulta de zonas rurales	108
4.3.1.	Estado del Arte	109
4.3.2.	Aplicación de detección de la soledad mediante encuentros	110
4.4.	Asistente de voz <i>offline</i> para la gestión de tratamientos farmacológicos	112
4.4.1.	Estado del Arte	114
4.4.2.	Aplicación <i>Assistant on Care and Health (ACHO)</i>	114
4.5.	Adaptación automática del contexto utilizando perfiles virtuales	121
4.5.1.	Estado del arte	122
4.5.2.	Aplicación de adaptación del contexto mediante redes oportunistas	125
4.6.	Perfiles virtuales para el gobierno de la información personal	131
4.6.1.	Estado del arte	132
4.6.2.	Aplicación de integración de SOLID POD en <i>Smartphones</i>	135
5.	Validación y Resultados de la Arquitectura	143
5.1.	Despliegue de aplicaciones distribuidas en entornos rurales aislados	144
5.1.1.	Configuración del escenario	145
5.1.2.	Análisis del Rendimiento	148
5.1.3.	Análisis del Consumo de Energía	153
5.1.4.	Discusión	157
5.1.5.	Conclusiones	158
5.2.	Evaluación de la detección de la soledad en adultos mayores	159
5.2.1.	Configuración del Escenario	160
5.2.2.	Evaluación del Rendimiento	164
5.2.3.	Conclusiones	171
5.3.	Evaluación de la comunicación entre dispositivos en entornos inteligentes	172

5.3.1.	Análisis del Consumo de Recursos	173
5.3.2.	Descripción de los Escenarios	176
5.3.3.	Algoritmos Alternativos para la Comparativa	181
5.3.4.	Evaluación de Resultados	182
5.3.5.	Conclusiones	193
5.4.	Viabilidad técnica del perfil virtual en dispositivos móviles .	193
5.4.1.	Tests de Usabilidad	195
5.4.2.	Rendimiento Técnico	200
5.4.3.	Consideraciones a la validez	207
5.4.4.	Conclusiones	208
6.	Conclusión y Trabajos Futuros	211
6.1.	Trabajos futuros	217
	Referencias	221

Índice de figuras

1.1. Evolución de los usuarios de Internet durante la última década.	2
1.2. Capas involucradas en el modelo Edge-Fog-Cloud.	4
1.3. Evolución del porcentaje medio de cobertura de alta velocidad a nivel nacional y rural.	9
1.4. Cobertura a velocidades mayores a 100 Mbps por genotipos de población [1].	10
1.5. Comunicación oportunista en el modelo Edge-Fog-Cloud. . .	13
1.6. Comunicaciones unicast, multicast y broadcast.	17
2.1. Pasos en el proceso store-carry-forward.	61
2.2. Capas de comunicación involucradas en la arquitectura DTN.	61
2.3. Agrupamiento de las redes oportunistas en el contexto de la comunicación ad-hoc.	64
2.4. Taxonomía de los algoritmos de encaminamiento oportunista.	64
3.1. Arquitectura y componentes de la propuesta.	71
3.2. Formato en JSON de la información transmitida.	73
3.3. Ejemplo de enrutamiento con nodos intermedios.	74
3.4. Proceso de reconocimiento entre nodos con SACAR OCVN.	81
3.5. Componentes de SACAR OCVN.	81
3.6. Comportamiento de los algoritmos SACAR.	84
3.7. Escenario inicial antes de que el emisor transmita información.	89
3.8. Encuentros entre nodos.	90

3.9.	Emisión basada en intereses e influencia.	92
4.1.	Contextos de aplicación y los componentes involucrados en la arquitectura.	96
4.2.	Mapa de sensores situados en el hogar del adulto mayor. . .	101
4.3.	Sensores situados en una explotación industrial.	106
4.4.	Escenario con la aplicación desplegada.	112
4.5.	Apariencia del asistente de voz.	116
4.6.	Funcionamiento de ACHO.	117
4.7.	Procesos de interacción con la aplicación de sincronización.	118
4.8.	Diagrama de comunicación para la comprobación de la toma de dosis.	120
4.9.	Ejemplo del contexto situacional.	127
4.10.	Ejemplo de 3 OCVNs en un contexto de 7 nodos.	129
4.11.	Arquitectura de Pushed SOLID	136
4.12.	Ejemplo de servicio de datos desde un <i>smartphone</i> ejecutando un PODS.	139
4.13.	Streaming de música aplicando la propuesta (ω_2) y sin aplicarla (ω_1).	141
5.1.	Mapas implementados en las simulaciones.	147
5.2.	Resultados de SACAR OCVN en el escenario rural.	150
5.3.	Comparación de rendimiento con otras soluciones.	153
5.4.	Análisis del consumo de energía.	154
5.5.	Energía consumida (C), energía capturada (E_c) y nivel de batería (B) en el <i>throwbox</i>	157
5.6.	Modelo de movilidad basado en clusters integrado en The ONE.	161
5.7.	Modelos de movilidad (M) basados en clusters en la simulación del escenario.	165
5.8.	Probabilidad de Entrega (d_{prob}) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).	167

5.9. Latencia media (τ) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).	168
5.10. <i>Overhead</i> (θ) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).	169
5.11. Número de saltos medio (σ) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).	170
5.12. Coste energético (E_g) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).	171
5.13. Consumo de recursos de los algoritmos SACAR.	174
5.14. Almacenamiento requerido para los algoritmos SACAR.	175
5.15. Escenario de oficina inteligente.	177
5.16. Escenario del centro comercial.	180
5.17. Probabilidad de entrega medio (d_{prob}) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de oficina inteligente.	183
5.18. Latencia media (τ) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de oficina inteligente.	185
5.19. Ratio de <i>Overhead</i> (θ) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de oficina inteligente.	186
5.20. Número de saltos medio (γ) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de oficina inteligente.	187
5.21. Probabilidad de entrega media (d_{prob}) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de centro comercial inteligente.	189
5.22. Tiempo medio de buffer (δ) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de centro comercial inteligente.	190
5.23. Distribución de respuestas (S_p) de las cuestiones (Q_n) sobre la percepción del proyecto.	197
5.24. Distribución de respuestas (S_x) sobre las preguntas (Q_n) de experiencia de usuario.	199
5.25. Escenario de evaluación.	201
5.26. Evolución de la batería en el <i>smartphone</i> (α) en función del número de mensajes generados (M_{gen}).	205
5.27. Tiempo de respuesta del <i>smartphone</i> (γ) en función del número de mensajes generados (M_{gen}).	206

Índice de tablas

1.1. Resumen de las publicaciones y sus asociaciones con las contribuciones y objetivos de la tesis.	29
3.1. Características de los nodos intermedios.	75
5.1. Variables y distribución del escenario de Detección de Soledad.	166
5.2. Configuración de parámetros para el escenario de la oficina inteligente.	179
5.3. Configuración de Parámetros para el escenario del centro comercial.	181
5.4. Valores y variables usadas en el análisis multivariante.	191
5.5. Coeficientes de regresión OLS con Ng como variable independiente.	191
5.6. Coeficientes de regresión OLS con Ns como variable independiente.	193
5.7. Información personal almacenada en el PODS	195
5.8. Encuesta de percepción del usuario sobre la idea.	196
5.9. Encuesta de percepción del usuario sobre el prototipo.	198
5.10. Especificaciones técnicas de los equipos usados durante el experimento (C_A and C_B)	202
5.11. Especificaciones técnicas de los <i>smartphones</i> usados en el experimento (S_A and S_B)	202

List of Algorithms

1.	SACAR-OCVN pseudocódigo	83
2.	SACAR-IR pseudocódigo	85
3.	SACAR-HC pseudo code	86
4.	SACAR-Hybrid pseudocódigo	87
5.	Pseudocódigo usado para generar peticiones aleatorias. Ejecutado en C_B	203

Capítulo 1

Introducción

“Que yo recuerde, desde que
tuve uso de razón, siempre quise
ser un gangster.”

Uno de los Nuestros (1990)
Dir. Martin Scorsese

1.1. Contexto

Internet ha supuesto una de las revoluciones más significativas en la historia de la humanidad. Desde hace más de dos décadas, hogares de todo el mundo han adoptado Internet como una herramienta fundamental en su día a día (Figura 1.1) [2]. Desde entonces, las mejoras en las telecomunicaciones y la evolución de los equipos informáticos no han parado de ofrecer nuevas posibilidades que han atraído la atención de todos los públicos.

Hoy en día, millones de personas se comunican diariamente a través de Internet. Las crecientes capacidades de los dispositivos móviles, así como de las redes celulares, han resultado en una presencia transversal de Internet en todos los ámbitos de la vida cotidiana: desde las relaciones personales hasta el desarrollo de labores profesionales, pasando por su incipiente revolución cultural y social. En definitiva, la era actual está siendo especialmente marcada por la innovación tecnológica y por la llegada de nuevas

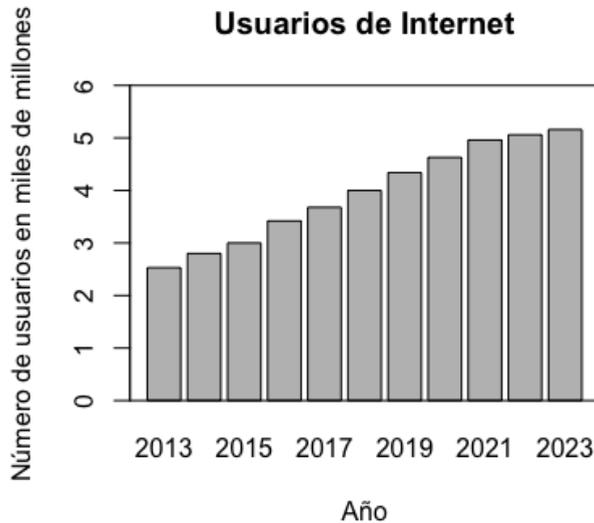


Figura 1.1: Evolución de los usuarios de Internet durante la última década.

disciplinas apoyadas en las posibilidades de estos avances. Entre ellas, el Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) [3] ha plantado las bases para un nuevo modelo de operación dentro de las aplicaciones distribuidas, proporcionando una digitalización sin precedentes.

El concepto de IoT se refiere al conjunto de objetos, dispositivos inteligentes, sensores, actuadores, software y componentes que, equipados con conexión a una red, son capaces de desempeñar labores específicas [3]. Entre el año 2008 y 2009, por primera vez en la historia, el número de dispositivos conectados a Internet superó al de habitantes de la tierra, evidenciando una nueva tendencia en la manera en la que se relacionan los usuarios con la tecnología. En este marco, las aplicaciones distribuidas, caracterizadas por emplear diferentes dispositivos y entidades para desempeñar tareas específicas, han experimentado una notable relevancia dentro del mercado, comenzando así una nueva era de *wearables*, *smartphones* y elementos integrados en entornos inteligentes. Como resultado, han surgido nuevas formas de comunicación entre los dispositivos, impulsando significativos

avances en sistemas tradicionalmente distribuidos como la sensorización y la monitorización [3].

Las redes de dispositivos IoT han permitido importantes avances en las aplicaciones distribuidas, especialmente en el sector industrial, donde se precisa de una gran captación de datos, así como un posterior procesamiento. Existen numerosos ejemplos de estas industrias, especialmente en el sector ganadero y agrario, donde la cooperación de dispositivos permite establecer mediciones de producción. Del mismo modo, el IoT ha facilitado la llegada de sistemas domóticos, favoreciendo la proliferación de soluciones que equipan los hogares con sensores y actuadores que adaptan su comportamiento según las preferencias del usuario. Estos avances, a su vez, han conducido a sistemas cada vez más complejos, donde un gran número de dispositivos independientes cooperan y se comunican con entidades centralizadas. No obstante, aspectos como la escalabilidad y la orquestación de estos entornos ha motivado el planteamiento de esquemas de comunicación alternativos como Edge-Fog-Cloud [4].

Tradicionalmente, la comunicación entre dispositivos en los sistemas distribuidos ha tenido lugar siguiendo una lógica que distribuye los actores del proceso en dos capas diferentes [5]: los dispositivos, encargados de transmitir o recibir la información; y el servidor, encargado de procesar los datos y orquestar las comunicaciones. Sin embargo, este modelo encuentra importantes limitaciones en su aplicación para sistemas distribuidos, especialmente en aquellos orientados a la sensorización. La baja capacidad de escalabilidad y adaptabilidad en entornos complejos limita los potenciales procesos de transmisión, restringiendo los flujos a comunicaciones entre extremos. Un ejemplo de este efecto sucede cuando dos sensores cercanos necesitan comunicarse, pero, para ello, requieren establecer contacto con una entidad remota. Como resultado, estas limitaciones han motivado la concepción de nuevas abstracciones que pretenden agrupar los componentes de la arquitectura para optimizar las comunicaciones y mejorar el rendimiento global a través del aprovechamiento de la cercanía física entre los componentes [4]. Con esta premisa nace el esquema Edge-Fog-Cloud, el cual pretende acercar parte del procesamiento de las aplicaciones a los dispositivos finales mediante una capa intermedia entre estos y el servidor. Para ello, se propone el uso de los componentes que conectan los dispositivos con Internet para desempeñar la ejecución de tareas, agilizando los

procesos de respuesta y limitando la costosa comunicación con los servidores remotos [4]. De esta forma, el esquema consta de tres capas (Figura 1.5): Edge, Fog y Cloud.

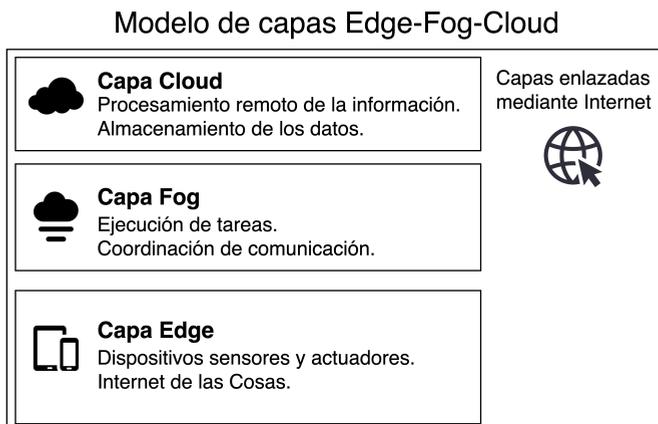


Figura 1.2: Capas involucradas en el modelo Edge-Fog-Cloud.

La capa Edge [4] está formada por el conjunto de dispositivos finales que componen el sistema. De esta forma, elementos como sensores y actuadores forman parte de este nivel, encargándose de recopilar información, así como emprender acciones concretas. Estos dispositivos suelen precisar de un procesamiento externo para analizar los datos recabados, tomar decisiones o registrar las mediciones. De esta manera, los dispositivos finales proporcionan sus resultados a los nodos de la capa Fog.

La capa Fog [4] se compone de aquellos nodos que reciben directamente la información de los dispositivos finales. Estos elementos cuentan con conexión a Internet, por lo que sirven de enlace con la capa final de Cloud. Sin embargo, su papel va más allá de proporcionar conexión con la red, ya que la cercanía física a los dispositivos finales convierte a los nodos Fog en potenciales herramientas para procesar tareas de una forma óptima. Como resultado, su papel en las aplicaciones distribuidas favorece el aprovechamiento de la cercanía física, permitiendo delegar tareas en dispositivos que, tradicionalmente, se limitaban a actuar como enlaces con los nodos remotos.

Finalmente, la capa Cloud [4] comprende los recursos y entidades involucradas en el procesamiento remoto de la información. Estos componentes, que tradicionalmente actuaban como servidor único, cuentan con un papel centrado en aquellas acciones más pesadas, así como el almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de información.

En definitiva, la cooperación de estas tres capas consolida un modelo que agrupa y ordena los componentes de la arquitectura, facilitando la integración de nuevos elementos en la solución y optimizando los procesos de comunicación y orquestación. Consecuentemente, su funcionamiento está íntimamente ligado a la conexión de Internet, empleada para comunicar las diferentes capas. Sin embargo, estas características impiden el despliegue de soluciones basadas en Edge-Fog-Cloud en entornos donde la conexión a Internet no resulta estable o carecen de las infraestructuras necesarias para contar con acceso a la red. Este es el caso particular al que se enfrentan las zonas rurales aisladas alrededor de todo el mundo, las cuales cuentan con significativos obstáculos para el despliegue de sistemas distribuidos que contribuyan a su digitalización [6]. Como resultado, la falta de medios impide el despliegue de soluciones basadas en la colaboración y comunicación de dispositivos.

Aunque el acceso a Internet está gozando de una extensa presencia en hogares de todo el mundo, existen aún zonas que carecen de la infraestructura necesaria para acceder [7, 8]. Se estima que alrededor de un 30 % de la población mundial carece de acceso a banda ancha móvil, como 3G o superior. Este porcentaje se agrupa esencialmente en zonas rurales aisladas como África subsahariana o el sur de Asia, donde el 40 % de sus habitantes no tienen acceso a la red. Las características geográficas y demográficas obstaculizan la implantación de los recursos necesarios para ofrecer conexión a Internet, aunque el principal factor limitante son los altos costes de despliegue y mantenimiento que requieren dichas infraestructuras [9]. Esta inversión resulta, de media, el doble que en las zonas urbanas, mientras que, al mismo tiempo, los ingresos en las zonas rurales resultan diez veces inferiores a los obtenidos en las ciudades. Como consecuencia, la población, así como las industrias situadas en estas áreas, experimentan importantes limitaciones en su digitalización, así como en el uso y despliegue de soluciones tecnológicas. Esta falta de recursos técnicos alimenta el desinterés y la falta de inversión, perpetuando el aislamiento de estas zonas. Consideran-

do el contexto de estas regiones, es fácil deducir su incompatibilidad con soluciones Edge-Fog-Cloud. Sin embargo, los fundamentos de este esquema pueden ser adaptados para proporcionar un modelo de transmisión que adecúe las dinámicas de comunicación a contextos donde existan periodos de desconexión. De esta manera, resulta posible dotar a las aplicaciones con tolerancia al retardo y minimizar el impacto ocasionado por la ausencia de las infraestructuras de Internet.

En respuesta a la necesidad de proporcionar mecanismos para comunicar aplicaciones distribuidas en entornos aislados, el presente trabajo de tesis propone una arquitectura de comunicación basada en el modelo Edge-Fog-Cloud que emplea redes tolerantes al retardo para mitigar la falta de conexión. Como resultado, es posible desplegar soluciones distribuidas que requieren la comunicación y colaboración entre dispositivos en zonas que no cuentan con conexión a Internet. Para ello, se adapta el modelo Edge-Fog-Cloud asumiendo que el conjunto de dispositivos Edge carece de una comunicación estable con los nodos Fog, existiendo periodos de desconexión y distancia física. Así, se propone enlazar estas dos capas mediante técnicas de encaminamiento oportunista, modelo de comunicación que se fundamenta en la transmisión asíncrona de la información, aprovechando los desplazamientos y encuentros físicos de los dispositivos [10]. Así, esta mecánica permite la conexión entre los nodos Edge y los nodos Fog. Finalmente, estas entidades podrán emprender el procesamiento de los datos, así como culminar las tareas con transmisiones a la nube.

El trabajo ofrece un conjunto de contribuciones centradas en la definición de la arquitectura y en sus procesos de comunicación, incluyendo mecanismos para alcanzar un funcionamiento sostenible. Para ello, se emprende el diseño e implementación de algoritmos de encaminamiento adaptativos a factores contextuales de la red. Así, se especifican dos familias de protocolos que fundamentan el proceso de comunicación basándose en los intereses que manifiestan los nodos respecto la información que portan, así como los encuentros previos que han experimentado. Con el objetivo de estudiar el rendimiento que proporcionan, se plantea un conjunto de potenciales aplicaciones simuladas en diferentes escenarios y contextos, analizando y comparando su rendimiento con algoritmos de referencia en el estado del arte. Como resultado, se comprueba que las propuestas imple-

mentadas mejoran a las alternativas en probabilidad de entrega, logrando una latencia, *overhead* y número de saltos óptimo para la red.

Respecto la vertiente de sostenibilidad, la solución propone el despliegue de *throwboxes* autónomos, dispositivos fijos que permiten intercambiar información entre nodos. Estos elementos son alimentados mediante energía solar, factor que motiva el estudio del consumo que requieren, demostrando finalmente su viabilidad técnica en condiciones realistas.

En definitiva, la propuesta se sustenta en la tolerancia a potenciales retrasos en la comunicación, así como latencia en la transmisión de los datos. Como consecuencia, su aplicación responde a la necesidad de proporcionar una arquitectura de transferencia de datos para aplicaciones distribuidas e implementaciones de sensorización en zonas rurales aisladas. En el siguiente apartado se profundiza en los pilares que motivan el trabajo, así como en el contexto rural y el papel que juegan las tecnologías de comunicación oportunista en estos escenarios.

1.2. Motivación

Hace tan solo unas décadas, antes de que las tecnologías de comunicación inalámbricas y celulares se asentasen, la problemática de la brecha digital englobaba un porcentaje significativo de la superficie de países como España [11]. De esta manera, existió una proliferación de soluciones que pretendían servir como alternativa para el acceso a Internet en zonas desconectadas [12]. Sin embargo, los avances de los últimos años en materia de infraestructuras han permitido el acceso a Internet de alta velocidad, sustituyendo por completo las soluciones previas. Como resultado, el interés general por proporcionar alternativas a las redes actuales ha disminuido, concentrando los esfuerzos en equipar con redes móviles estas ubicaciones [11]. No obstante, existen zonas que, debido a sus condiciones geográficas y demográficas, no resultan aptas para acoger estas infraestructuras. Limitaciones como el aislamiento físico, propiciado por accidentes geográficos, y la baja densidad de población, conducen a que instituciones y empresas no manifiesten interés particular por emprender inversiones en estas regiones [11]. Como consecuencia, las poblaciones aisladas permanecen alienadas de los avances tecnológicos, así como de la digitalización

y las posibilidades proporcionadas por Internet. Por ello, resulta esencial explorar propuestas que ofrezcan alternativas para estas zonas.

En respuesta a este contexto, el presente trabajo de tesis propone una arquitectura de comunicación sostenible que explota el modelo Edge-Fog-Cloud a través de una filosofía oportunista. De esta forma, la propuesta persigue proporcionar el despliegue de aplicaciones distribuidas en entornos desconectados. Considerando el contexto que rodea el trabajo, los siguientes subapartados acercan la visión de brecha digital en las zonas rurales, así como el papel que puede jugar el modelo Edge-Fog-Cloud para proporcionar conexión en estas regiones.

1.2.1. La brecha digital en la España rural

Desde finales de la década de los noventa, Internet ha experimentado un masivo crecimiento en todo el mundo [13]. Desde el comienzo, el avance de las comunicaciones ha sido guiado por importantes inversiones en infraestructuras, generalmente afrontadas por las compañías de telecomunicaciones, pero también apoyadas por los gobiernos [14]. Como resultado, existe un interés económico inherente al desarrollo e implantación de estas tecnologías.

El carácter privado y el alto coste de inversión que supone el despliegue de las infraestructuras de telecomunicaciones han motivado que su presencia haya sido prioritariamente realizada en zonas propensas a una adopción masiva por parte de los usuarios [15]. Dentro de los potenciales contextos que favorecen este hecho, destacan las zonas urbanas, las cuales permiten alcanzar una cuota de usuarios mayor que en los territorios con menor densidad de población, como las zonas rurales.

Durante los últimos años, países como España han destinado una gran cantidad de recursos para ampliar el porcentaje de territorios que cuentan con los equipamientos técnicos para acceder a Internet [1]. Servicios como las redes celulares de alta velocidad, así como la fibra óptica, se han convertido en recurrentes a lo largo de toda la geografía. En términos estadísticos, la media de hogares con acceso a Internet de alta velocidad supera el 89 %, una cifra que se reduce hasta el 70 % en los entornos rurales. Sin embargo, se trata de un hito remarcable si se consideran los bajos índices de penetración de estas tecnologías hace tan solo unos años [1] (Figura 1.3). Como

resultado, estas inversiones han reducido la brecha digital de una forma generosa, acercando las posibilidades de Internet a las zonas rurales, así como a los negocios que las habitan. Sin embargo, los núcleos de población más pequeños aún se enfrentan a la falta de infraestructuras (Figura 1.4).

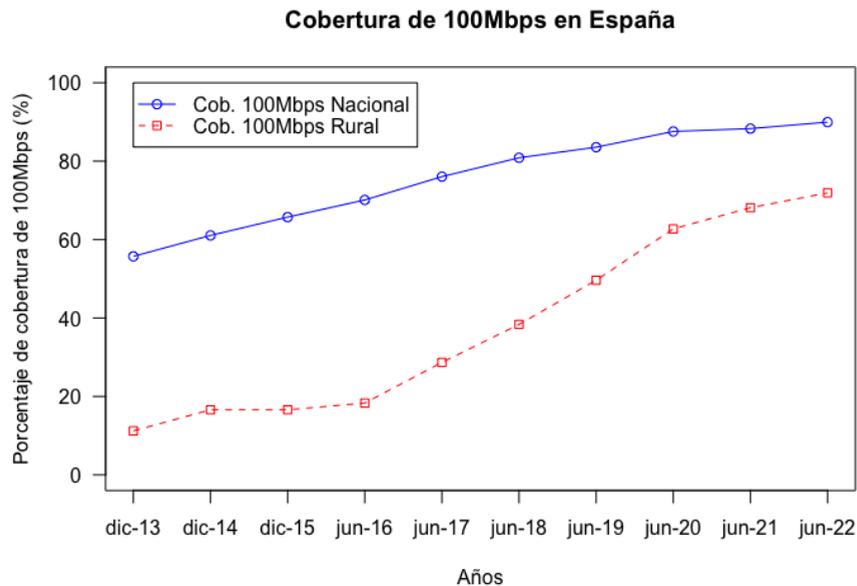


Figura 1.3: Evolución del porcentaje medio de cobertura de alta velocidad a nivel nacional y rural.

Las zonas rurales aisladas se han caracterizado tradicionalmente por contar con un conjunto de particularidades geográficas, demográficas y políticas que han obstaculizado los avances en materia de telecomunicaciones y tecnología. Estos territorios suelen situarse en parajes con una geografía muy marcada, ya sean zonas montañosas o inmensas llanuras [16]. Estos condicionantes suponen obstáculos para las comunicaciones, así como para la disponibilidad de infraestructuras que acerquen avances en la movilidad [15, 8]. Del mismo modo, la población que reside en estos territorios suele ser reducida, con una tendencia clara a la despoblación y con una proporción significativa de habitantes que superan los sesenta y cinco años de edad [17]. Además, a estas características se les unen unos índices

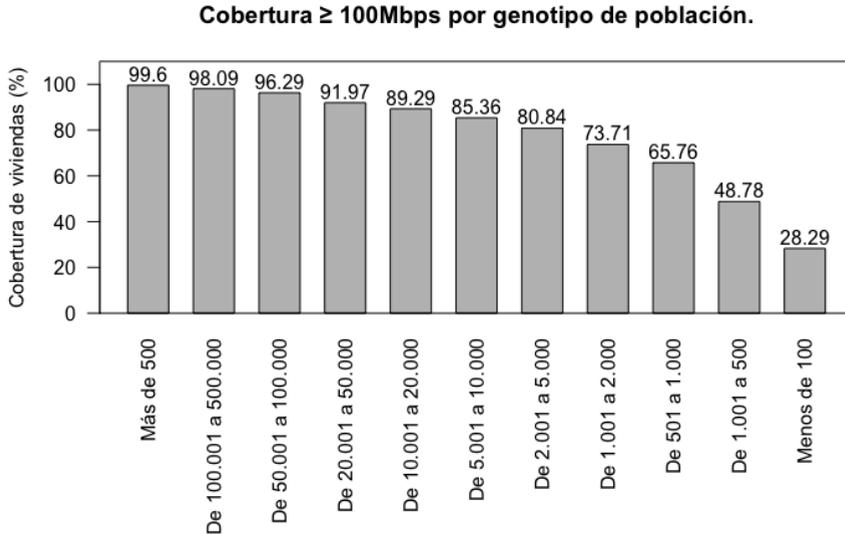


Figura 1.4: Cobertura a velocidades mayores a 100 Mbps por genotipos de población [1].

de renta per cápita bajos, los cuales ilustran y ponen en evidencia muchas de las carencias de estas zonas [15]. Considerando estos datos, junto con las condiciones territoriales, se comprende el fenómeno de la denominada “España vaciada”, concepto que resume estas condiciones que tanta dicotomía plantean frente a los avances e inversiones de las zonas urbanas [18].

Los elementos geográficos y sociales que condicionan los territorios aislados suelen conducir a una distribución política y gubernamental que reduce estas localidades a aldeas dispersas [18]. De esta forma, los órganos de gobierno local como ayuntamientos, así como los servicios de atención sanitaria o las entidades bancarias, suelen localizarse en núcleos rurales próximos que atienden a todo un conjunto de localidades cercanas. Esta distribución política también limita el peso gubernamental, así como las potenciales inversiones que se realizan, encontrando como obstáculo la dificultad para satisfacer las carencias individuales de los pequeños núcleos que integran estas regiones.

Las consecuencias de la brecha digital en los territorios rurales aislados alimentan, a su vez, los factores que intervienen en la falta de inversión. Consecuencias directas de esta ausencia de infraestructuras son la falta de interés de la población ante los avances y recursos tecnológicos [19], las dificultades de la industria local para escalar sus procesos de producción o los obstáculos para desplegar sistemas de salud y cuidados. Estas consecuencias definen las principales carencias que la propuesta de tesis pretende abordar.

Las zonas rurales cuentan con una economía local que explota líneas de negocio compatibles con las características de estos territorios. Generalmente, estos negocios pertenecen al sector primario, en industrias como la ganadería, la agricultura y la extracción de recursos naturales. Sin embargo, también destaca el sector secundario, con los procesos de refinamiento de las materias primas, así como el terciario a través del turismo rural [20]. Muchas de estas empresas, afincadas en zonas rurales, gozan de relevancia nacional, con productos derivados de la apicultura y las granjas sostenibles.

A pesar de la naturaleza artesana de muchos de los productos de las industrias rurales, la digitalización se alza como una potencial herramienta para escalar su productividad [21]. De esta manera, variables como el rendimiento y la optimización de los procesos de negocio pueden beneficiarse de estos recursos. Sin embargo, la brecha digital propicia que, en algunos casos, las técnicas de explotación que se aplican sigan metodologías obsoletas. Así, la capacidad competitiva del tejido productivo resulta mermada, con dificultades para alcanzar los medios de los se dispone en las áreas urbanas. Como resultado, existe una necesidad real de mejorar la productividad de estos negocios a través de la tecnología [21].

En el plano social, la brecha digital implica unas limitaciones más severas. La población rural de estos entornos consolida un porcentaje de adultos mayores bastante significativo, planteando importantes desafíos en materia de cuidados y bienestar [22]. En este contexto, la infraestructura sanitaria debe prevenir, detectar y actuar ante potenciales situaciones de riesgo para los habitantes, especialmente en aquellos adultos mayores que residen solos. Durante la última década, se han implementado múltiples alternativas tecnológicas para apoyar estas tareas, desde sistemas de telemedicina [23] hasta aplicaciones de monitorización [24]. Sin embargo, la carencia de infraestructuras para su funcionamiento plantea, en ocasiones,

la imposibilidad de su despliegue. Como resultado, se precisan de mecanismos de comunicación que permitan equipar estas localidades con sistemas de salud y cuidados [7].

A pesar del escenario propiciado por la brecha digital, los últimos años han denotado una tendencia diferente en la evolución demográfica de muchas zonas rurales. Este fenómeno se ha debido especialmente a la crisis sanitaria provocada por la pandemia del virus SARS-CoV-2 en el año 2020, la cual condujo a la aplicación de severas medidas de cuarentena y restricciones sobre la movilidad de los ciudadanos, así como en el contacto social [25]. De esta manera, muchos habitantes de núcleos urbanos, apoyados en tendencias como el teletrabajo, iniciaron un éxodo a zonas rurales que contribuyó a una revitalización de estos territorios [26]. Sin embargo, aunque existe un respaldo estadístico de este impulso, tres años más tarde, las promesas de una eventual repoblación han resultado infructuosas. Las dinámicas de emigración hacia los grandes núcleos urbanos siguen avanzando, fortaleciendo el músculo empresarial e industrial de las ciudades y conduciendo al empobrecimiento general de las regiones con menor densidad poblacional [27].

La situación que se prevé en las zonas rurales se extiende más allá de las localidades aisladas y plantea una tendencia pesimista en la población de las ciudades medianas, así como las capitales de provincia [28]. Considerando los factores descritos, las zonas rurales requieren de infraestructuras y equipamientos que les permitan ofrecer mayores posibilidades profesionales, así como condiciones de vida que sirvan como alternativa real a los núcleos urbanos. Para alcanzar este objetivo se precisa de la aplicación de políticas públicas por parte de las instituciones. Sin embargo, el desarrollo de soluciones tecnológicas contribuye a reducir la brecha digital de la “España vaciada” y a proporcionar servicios que aporten calidad de vida a estas poblaciones. El siguiente apartado ofrece una visión general de la propuesta tecnológica de este trabajo de tesis para proporcionar una arquitectura de comunicación sostenible en entornos rurales.

1.2.2. Arquitectura Edge-Fog-Cloud Oportunista

El modelo Edge-Fog-Cloud ha puesto en valor el papel de los esquemas de comunicación para optimizar el funcionamiento de sistemas distribuidos.

El aprovechamiento de los elementos que intervienen en la comunicación para colaborar en la ejecución de tareas ha posibilitado significativas mejoras en el rendimiento [4]. Sin embargo, a pesar de que la propuesta se enfoca en la concepción de arquitecturas ágiles y rápidas, la heterogeneidad de las capas puede servir como base para definir modelos de comunicación que permitan conectar dispositivos en entornos donde se carece de conexión a Internet. Así, técnicas como la comunicación oportunista [10], la cual se fundamenta en la colaboración asíncrona de los nodos de la red para transmitir la información, resulta compatible con el modelo (Figura 1.5). De esta forma, el presente trabajo de tesis propone una arquitectura de comunicación oportunista que permite el despliegue de aplicaciones distribuidas bajo un modelo Edge-Fog-Cloud en entornos sin conexión.

Comunicación en Edge-Fog-Cloud Oportunista

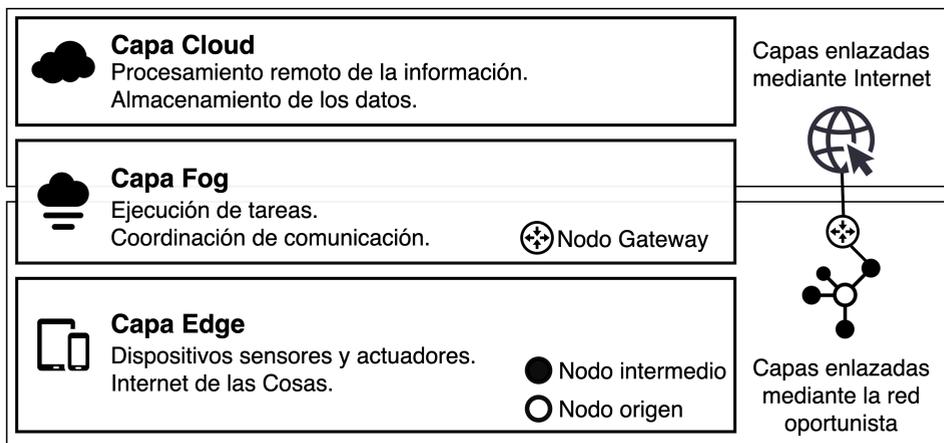


Figura 1.5: Comunicación oportunista en el modelo Edge-Fog-Cloud.

La comunicación oportunista se corresponde con un modelo de transmisión de información basado en las redes oportunistas, un subtipo de las Redes Tolerantes al Retardo (DTN) [10]. A su vez, este tipo de soluciones se enmarcan como una tipología perteneciente a las redes ad-hoc [29], las cuales proponen un modelo de transmisión de información que no requiere una infraestructura fija para comunicar dispositivos. Estas soluciones, denominadas *infrastructure-less*, prescinden de una entidad principal dentro

de la red, de manera que no existe un nodo orquestador que gestione las comunicaciones. Así, las redes ad-hoc se caracterizan por componerse únicamente de los dispositivos que intervienen en la red, los cuales cuentan con un comportamiento dinámico y cambiante. La naturaleza circunstancial y temporal de esta tecnología, favorece su aplicación en entornos donde se carecen de infraestructuras de comunicación, así como en contextos donde el acceso a Internet experimenta interrupciones o limitantes periodos de latencia.

Las redes ad-hoc emprenden los procesos de transmisión a través de la comunicación directa entre los nodos que conforman la topología. Dependiendo de los requisitos que se definan, se conciben dos mecánicas generales para transmitir información [29]: la comunicación basada en un solo salto, o “one-hop”; y la comunicación basada en multisaltos, “multi-hop”. En el caso del primer tipo, tal y como su nombre indica, la red limita los envíos de información entre las entidades que están en un contacto directo. De esta forma, se precisa que los extremos involucrados estén conectados mediante una interfaz de red, ya sea inalámbrico o cableado. Un ejemplo de este tipo de infraestructuras son las redes locales. Por otro lado, la lógica “multi-hop” permite que los nodos que integran la red reciban información que no está dirigido a ellos, de manera que pueden retransmitir los datos a otros nodos de la red que resulten más cercanos para el destino. Como resultado, se emprende un proceso de enrutamiento que traslada la información a través de la red. Dentro de este grupo se identifican a las redes oportunistas, las cuales proponen emplear la naturaleza dinámica de los nodos, así como su autonomía, para transmitir información entre dispositivos, asumiendo potenciales desconexiones entre ellos.

Las redes oportunistas se caracterizan por proporcionar comunicación entre dispositivos a través del envío y replicación de la información a transmitir. Para ello, los nodos actúan como elementos intermedios que colaboran para trasladar los datos a la entidad destino. La naturaleza de los nodos de la red se asume como arbitraria y difícil de predecir, de forma que los encuentros físicos entre componentes son aprovechados para realizar la transmisión de información, dotando así a la solución de una significativa condición oportunista [10]. El uso de interfaces de comunicación, generalmente inalámbricas y con un rango de alcance limitado, motiva la formación

de redes heterogéneas, de manera que se emprenden colaboraciones entre dispositivos de diferentes tipos.

El despliegue de redes oportunistas plantea un significativo reto para las comunicaciones. Su funcionamiento, orientado a la colaboración asíncrona de los nodos de la red, puede conducir a periodos de latencia extensos, así como desconexiones prolongadas entre los nodos [30]. De esta manera, resulta esencial equipar la red con procesos de encaminamiento efectivos que permitan alcanzar métricas de calidad de servicio óptimas para los requisitos particulares de las aplicaciones desplegadas. Parámetros como la latencia, la probabilidad de entrega o la carga de la red resultan variables fundamentales para alcanzar procesos de comunicación eficaces y óptimos [31]. Al mismo tiempo, los recursos limitados de los dispositivos que integran la red precisan de un consumo de energía sostenible y reducido por parte del proceso de encaminamiento.

El consumo de energía comprende otra de las principales limitaciones de las redes oportunistas. Considerando que la comunicación se sustenta en la colaboración de dispositivos autónomos e independientes, resulta esencial que las baterías individuales permitan atender los procesos de transmisión e interacción. De esta manera, es preciso que la infraestructura empleada manifieste un consumo de energía óptimo, con una viabilidad técnica sostenible.

Considerando estos factores, la arquitectura de comunicación que se propone en esta tesis emplea como base las premisas de las redes oportunistas con el fin de desplegar aplicaciones distribuidas. Para ello, se plantea un modelo Edge-Fog-Cloud en el que los nodos de la red oportunista se agrupan entre las capas Edge y Fog. Así, los dispositivos finales que generan y reciben la información se identifican como nodos Edge oportunistas que transmiten los datos de la red a través de procesos de encaminamiento hasta alcanzar los nodos Fog, los cuales cuentan con conexión a Internet. Finalmente, tras la recepción de la información por parte de esta capa, se emprenden las comunicaciones con los nodos Cloud, permitiendo así la transmisión integral de datos entre dispositivos que no cuentan con conexión a Internet y servidores remotos. Al mismo tiempo, este esquema de funcionamiento resulta también operativo en entornos conectados a la red, facilitando el establecimiento de comunicaciones entre dispositivos mediante su proximidad física, aligerando el tráfico requerido y optimizando

las interacciones a través del contexto local. Esta característica permite mantener la arquitectura incluso en el caso de que el área aislada sea eventualmente equipada con acceso a Internet. Como resultado, la naturaleza oportunista de la arquitectura consolida un modelo de comunicación que otorga múltiples posibilidades a las aplicaciones distribuidas.

1.2.3. Transmisión oportunista de la información entre nodos Edge

Los procesos de comunicación en una red se caracterizan por realizarse entre dos extremos: uno de origen y otro de destino. Sin embargo, en ocasiones, el número de nodos involucrados en cada extremo puede variar. Como resultado, se identifican tres tipos de comunicación en las redes según el número de nodos involucrados como destino [32] (Figura 1.6): *unicast*, *multicast* y *broadcast*. El primer tipo representa las comunicaciones que tienen lugar entre un origen y un elemento destino en particular. En el caso de *multicast*, la entidad destino se conforma por un conjunto de nodos, de manera que la información debe ser proporcionada a varios dispositivos. Finalmente, la comunicación de tipo *broadcast* involucra a todos los nodos de la red, consistiendo en comunicar la información a todos los integrantes de la arquitectura. Este proceso de transmisión se lleva a cabo en cada nodo, recorriendo la red mediante los enlaces que la conforman, dando lugar al denominado enrutamiento.

El proceso de comunicación en las redes se conoce como enrutamiento. Esta tarea se desempeña en cada nodo, el cual debe decidir la conexión de la red a la que transmitirá la información para acercarla eventualmente al destino. Como resultado, este conjunto de decisiones conforma la ruta entre el origen y el receptor, buscando un equilibrio entre la eficacia y eficiencia [33]. Así, el enrutamiento juega un papel fundamental en las redes, incluyendo las tipologías ad-hoc *multihop* y su subtipo oportunista.

El enrutamiento en las redes oportunistas resulta un reto significativo. El carácter dinámico, inestable y cambiante de estas tipologías contribuye a la dificultad de establecer un camino estable entre el nodo origen y el nodo destino. De esta forma, es preciso que los elementos de la red que cuentan con información almacenada sean capaces de aprovechar los encuentros oportunistas que puede experimentar con otros dispositivos [33].

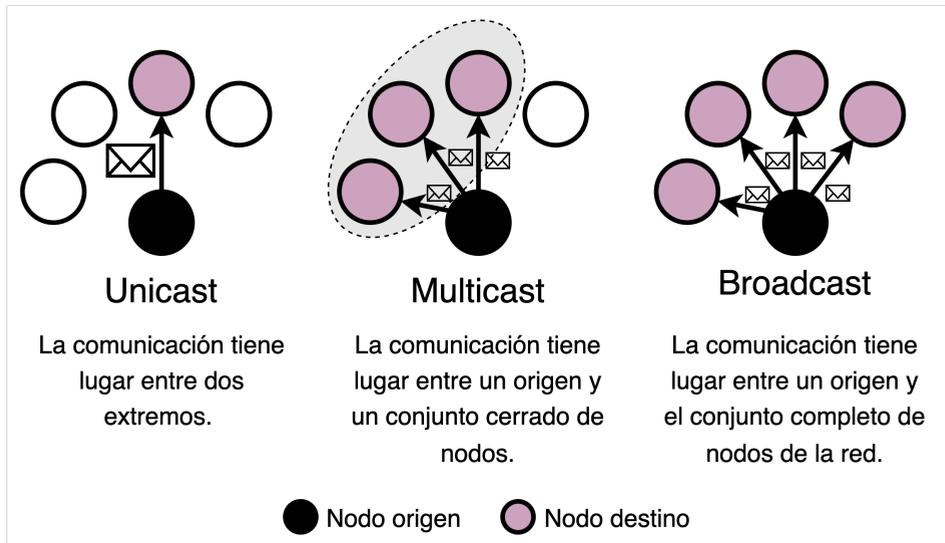


Figura 1.6: Comunicaciones unicast, multicast y broadcast.

Sin embargo, es importante considerar que las operaciones de comunicación conllevan un coste de energía al nodo, así como un consumo en su almacenamiento. Además, en ocasiones, resulta prioritario hacer llegar la información al nodo destino, por lo que se deben emprender aquellas transmisiones que encaminen los datos hacia el dispositivo receptor, buscando reducir al máximo la latencia. Considerando esto, es necesario adoptar una estrategia de enrutamiento que optimice las transmisiones mientras se logran comunicaciones eficaces.

Existen múltiples tipos de estrategias de enrutamiento en las redes oportunistas. Todas ellas se pueden agrupar en dos grandes conjuntos: enrutamiento basado en la retransmisión de la información y enrutamiento mediante replicación de la información [33]. En el primer grupo, las soluciones buscan reducir la redundancia de los datos, así como las réplicas presentes en la red. De esta forma, los nodos eliminan el dato de su *buffer* tras retransmitir la información hacia una conexión. Por el contrario, el enrutamiento basado en réplicas permite transmitir múltiples copias de la información. Así, cuando un nodo almacena un dato y se establece una nue-

va conexión, la información es duplicada, permaneciendo en el *buffer* del emisor. Las variables que se involucran en estos procesos de comunicación varían dependiendo de la estrategia que se aplique. Como resultado, el criterio para seleccionar el siguiente salto de la ruta hacia el destino, así como el tiempo de espera antes de eliminar el contenido del *buffer* o el número de copias permitidas dentro de la red, serán definidos por el mecanismo de enrutamiento.

En definitiva, el enrutamiento consolida una de las partes fundamentales en la transmisión oportunista, conformando un elemento esencial dentro de la arquitectura. De esta manera, la solución aplica estas mecánicas para conectar dispositivos aislados con nodos accesibles desde la red. Con el objetivo de comprender con mayor detalle el alcance del trabajo, el siguiente apartado define los objetivos del trabajo de tesis, así como los subobjetivos asociados a cada uno.

1.3. Objetivos

Tomando como referencia el contexto detallado en el apartado anterior, el presente trabajo de tesis propone dos objetivos principales, los cuales se complementan con subobjetivos. A continuación, se detalla el conjunto correspondiente de cada uno, identificando los objetivos con la sigla O y los subobjetivos como SO, acompañando la nomenclatura con el número que ocupa en la lista.

- **O1.** Diseñar, definir y simular una arquitectura de comunicación que permita el despliegue de aplicaciones distribuidas en entornos aislados.
 - SO1.1.** Especificar procesos de comunicación que proporcionen transmisión de información en entornos tanto sin acceso a Internet como en aquellos que cuenten con conexión.
 - SO1.2.** Equipar la arquitectura de comunicación con los recursos necesarios para que la infraestructura de red opere de manera sostenible, garantizando la autonomía de los nodos y sin precisar del suministro de una red eléctrica permanente.
 - SO1.3.** Alcanzar un rendimiento general de la arquitectura que pro-

porcione unas métricas de calidad de servicio óptimas para el intercambio de información en aplicaciones distribuidas.

- **O2.** Definir y evaluar el despliegue de aplicaciones distribuidas en entornos rurales, ajustando su cometido a las necesidades e idiosincrasia de dichos territorios.

Este conjunto de objetivos y subobjetivos permite establecer una guía para detallar los cometidos de la propuesta. Además, estos fundamentos motivan las contribuciones que se asocian con el trabajo, consolidando las principales aportaciones de la tesis. En el siguiente apartado se profundiza en los avances proporcionados por la investigación, identificando punto por punto los progresos alcanzados.

1.4. Contribuciones

El trabajo de tesis propuesto en este documento proporciona un conjunto de contribuciones al estado del arte en el ámbito de las redes oportunistas, así como en el de las arquitecturas de aplicaciones distribuidas. En esta sección, se ponen en valor los principales avances de la propuesta, relacionando cada contribución al objetivo con el que se corresponde. Del mismo modo, se incluye un apartado con las publicaciones generadas durante el desarrollo del trabajo, incluyendo un breve resumen de la contribución y detallando el medio que recoge el artículo. Con el objetivo de proporcionar un resumen completo de las asociaciones y facilitar su interpretación, cada contribución y publicación se identifica con la sigla C y P, correspondientemente. Finalmente, esta nomenclatura se incluye en la Tabla 1.1, que refleja las relaciones entre objetivos, contribuciones y trabajos publicados.

- **C1.** La principal contribución del trabajo se fundamenta en la definición y simulación de una arquitectura de comunicación oportunista basada en el modelo Edge-Fog-Cloud. Esta solución permite el despliegue y ejecución de aplicaciones distribuidas en entornos donde

la conexión a Internet resulta intermitente o inaccesible, permitiendo dotar a las zonas rurales con aplicaciones y servicios tecnológicos basados en la transmisión de información. Como resultado, esta contribución se corresponde con el O1 de la tesis, materializándose en los trabajos publicados [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41].

- **C2.** La arquitectura propuesta permite establecer procesos de comunicación en entornos donde el acceso a Internet resulta intermitente o inaccesible. Para ello, la transmisión de información desde los dispositivos aislados o desconectados de Internet se realiza utilizando un modelo de comunicación oportunista. De esta forma, los desplazamientos y encuentros físicos entre los dispositivos son aprovechados para transmitir la información. Al mismo tiempo, esta técnica permite emprender comunicaciones en contextos que sí cuentan con acceso a la red, permitiendo agilizar las comunicaciones remotas a través de la cercanía física de los dispositivos. Como resultado, esta contribución satisface el subobjetivo SO1.1 y ha sido detallada en las contribuciones publicadas [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40].
- **C3.** La propuesta de arquitectura de comunicación se fundamenta en la aplicación sostenible de redes oportunistas para proporcionar conexión entre dispositivos. De esta manera, se hace uso de equipos autónomos e independientes para actuar como nodos de la red, por lo que se reduce significativamente la presencia de infraestructuras estáticas. Estos recursos fijos de la red suelen depender activamente de una conexión eléctrica que les permita intervenir en las comunicaciones. Sin embargo, la arquitectura propone emplear sistemas de alimentación solar sostenible para independizar los equipos de infraestructuras adicionales. Como resultado, se logra una solución ágil y sostenible. Esta contribución se corresponde con el SO1.2, publicada y analizada en la contribución [34, 38, 39].
- **C4.** La arquitectura de comunicación aplica un conjunto de algoritmos de encaminamiento que permiten transmitir de una forma óptima la información entre las diferentes capas de las aplicaciones distribuidas. Para ello, se definen diferentes protocolos que proporcionan calidad de servicio en las comunicaciones, centrándose en ofrecer un

rendimiento óptimo a lo largo de diferentes métricas. Con el objetivo de medir su rendimiento, los resultados ofrecidos son comparados con algoritmos alternativos del estado del arte. Esta contribución se alinea con el SO1.3 y se trata de una aportación transversal a las diferentes publicaciones realizadas [34, 35, 36, 42, 37, 38, 39].

- **C5.** La arquitectura es empleada para evaluar el despliegue de diferentes aplicaciones distribuidas tanto en contextos desconectados como en entornos con acceso a Internet. Para ello, se lleva a cabo un análisis de las potenciales necesidades de ambos entornos y el papel que puede desempeñar la propuesta. Como resultado, se define un conjunto de casos de uso que abarcan propuestas que mitigan necesidades particulares de las zonas rurales, como la detección de emergencias en adultos mayores que residen solos, ayuda en la gestión de fármacos y la digitalización de los negocios locales. Por otro lado, se estudia el papel de la propuesta en entornos IoT conectados, evaluando las posibilidades de comunicación que ofrece. Esta contribución se alinea de manera directa con el O2 y está recogida en el conjunto de artículos publicados [34, 35, 43, 36, 42, 37, 44, 38, 40, 39, 45, 41].
- **C6.** Definición de un perfil virtual para los nodos. Con el objetivo de facilitar la interacción de los nodos de la red con el resto de dispositivos, así como con el entorno, se ha propuesto la especificación de un perfil virtual. Esta herramienta permite a los nodos gestionar de una forma sencilla y óptima la información necesaria para emprender los procesos de enrutamiento. Al mismo tiempo, el perfil virtual ha sido extendido para ofrecer un mecanismo de gestión de la información personal de los usuarios. Para ello, se han seguido las directrices de la iniciativa SOLID [46] para implementar un almacén individual de datos ofrecidos como servicio. De esta forma, se propone un modelo alternativo de gestión de la información en la que las aplicaciones externas, así como las empresas, no almacenen de manera privada los datos de los usuarios, sino que los consulten directamente del dispositivo y bajo el permiso del individuo. Esta contribución se alinea con el O2 y ha sido desarrollado en las publicaciones [34, 35, 47, 36, 42, 37, 48, 38, 39, 40, 41].

Las contribuciones detalladas justifican el trabajo de tesis, así como las aportaciones logradas, identificando el objetivo con el que se asocian. Cada uno de estos avances se recoge en los artículos científicos publicados durante el desarrollo de la tesis y permiten conocer con detalle el avance de la línea de investigación, así como de su impacto. El siguiente apartado detalla cada uno de los resultados, incluyendo la manera en la que se relacionan con cada contribución y objetivo.

1.5. Publicaciones relacionadas

El trabajo de tesis propuesto se compone de un conjunto de contribuciones científicas que respaldan la propuesta y los avances expuestos. La línea de investigación ha sido recogida a lo largo de cuatro categorías de evidencias: artículo científico, conferencia, *workshop* y modelo de utilidad. En este apartado, se enumera y detalla cada trabajo, junto con la referencia a la revista de publicación, así como su relación con las contribuciones y objetivos de la tesis.

El primer grupo se compone de seis contribuciones publicadas en revistas de alto impacto, incluidas en el índice *Journal Citation Reports* (JCR): dos de ellos en el cuartil Q1, tres en el cuartil Q3 y uno en el cuartil Q4. A continuación, se detalla cada una de ellas.

- **P1** Jesús-Azabal, M., Berrocal, J., Soares, V. N., García-Alonso, J., & Galán-Jiménez, J. (2023). A self-sustainable opportunistic solution for emergency detection in ageing people living in rural areas. *Wireless Networks*, 1-18. JCR Q3. [34]

Este trabajo ofrece un estudio detallado sobre la utilización de una arquitectura de red oportunista enfocada en proporcionar transmisión sostenible de información en entornos rurales. Para ello, se consideran dos tipos diferentes de fuentes de datos: hogares de adultos mayores sensorizados para la detección de potenciales emergencias y la monitorización de la producción en entornos industriales rurales. Del mismo modo, la solución hace uso de componentes fijos alimentados por paneles solares. Como resultado, se evalúa la calidad de servicio en la comunicación y el consumo energético implicado en los nodos.

Este trabajo se asocia con las contribuciones C1, C2, C3, C4, C5 y C6.

- **P2** Jesús-Azabal, M., García-Alonso, J., Soares, V. N., & Galán-Jiménez, J. (2022). Improving Delivery Probability in Mobile Opportunistic Networks with Social-Based Routing. *Electronics*, 11(13), 2084. JCR Q3. [35]

Esta contribución se centra en proponer un algoritmo de enrutamiento para una arquitectura de comunicación oportunista. La propuesta de valor se centra en mejorar la probabilidad de entrega a través de considerar los intereses de los nodos, así como su influencia dentro de la red. Para ello, los nodos intermedios recurren a un perfil virtual para definir sus preferencias, así como sus encuentros previos. Como resultado, es posible identificar aquellos contactos que alcanzan una mayor influencia y aportar una mayor probabilidad en la entrega. Esta propuesta es evaluada mediante un caso de uso enfocado en la detección de la soledad en adultos mayores de zonas rurales. La idea comprende una aplicación de la arquitectura y permite alinear el funcionamiento del protocolo de encaminamiento con la finalidad de estudiar de una manera cuantitativa la soledad. Considerando los avances propuestos, el trabajo se asocia con las contribuciones C1, C2, C4, C5 y C6.

- **P3** Jesús-Azabal, M., Moguel, E., Laso, S., Murillo, J. M., Galán-Jiménez, J., & García-Alonso, J. (2021). Pushed SOLID: deploying SOLID in smartphones. *Mobile Information Systems*, 2021, 1-13. JCR Q4. [47]

El concepto de perfil virtual descrito en la arquitectura conforma una entidad que provee a los nodos de la red oportunista de un almacén individual e independiente de información y datos. Sin embargo, fuera del ámbito de la comunicación oportunista, esta herramienta constituye una implementación firme para un modelo de gobierno de la información personal alternativo al imperante en la actualidad. Con el objetivo de definir una solución que permita a los usuarios de Internet almacenar sus datos personales en un punto exclusivo y centralizado, el trabajo propone la utilización de los *smartphones* para esta tarea. Como resultado, se evalúa la viabilidad técnica y se proporcionan

los mecanismos necesarios para que los usuarios puedan controlar los accesos a su información personal. Esta propuesta se alinea con la contribución C6 del presente trabajo de tesis.

- **P4** Conde-Caballero, D., Rivero-Jiménez, B., Cipriano-Crespo, C., Jesus-Azabal, M., Garcia-Alonso, J., & Mariano-Juárez, L. (2021). Treatment adherence in chronic conditions during ageing: uses, functionalities, and cultural adaptation of the assistant on care and health offline (acho) in rural areas. *Journal of Personalized Medicine*, 11(3), 173. JCR Q1. [43]

Este artículo se centra en la propuesta, definición y evaluación de un asistente de voz que opera sin necesidad de conexión a Internet. El enfoque de la solución es ayudar a los adultos mayores a la hora de gestionar el consumo de fármacos, teniendo como objetivo mejorar la adherencia terapéutica de los pacientes a sus tratamientos médicos. Para ello, se analiza el contexto social de la disciplina, identificando las principales necesidades de los usuarios polimedicados. De esta forma, se detalla la implementación del asistente, así como sus potenciales funciones. Esta herramienta está ideada para ser desplegada en entornos rurales sin conexión a Internet. Por ello, puede combinarse fácilmente con la arquitectura de esta tesis y actuar como un nodo de origen y destino para la información de los tratamientos. Como resultado, el trabajo se corresponde con la contribución C5.

- **P5** Jesús-Azabal, M., Herrera, J. L., Laso, S., & Galán-Jiménez, J. (2021). OPPNets and rural areas: an opportunistic solution for remote communications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 1-11. JCR Q3. [36]

Esta propuesta define las bases y fundamentos de la arquitectura de comunicación oportunista detallada en el presente trabajo de tesis. El artículo se centra en explorar las posibilidades comunicativas que proporciona el encaminamiento oportunista dentro de un contexto rural aislado. Para ello, se define un conjunto de nodos de origen que generan información sobre la presencia de adultos mayores en sus hogares. Estos datos pueden ser utilizados para detectar y prevenir potenciales emergencias en las casas de usuarios que residen solos. De esta forma, se recurren a nodos intermedios que comunican los

datos con nodos destino que son capaces de procesar la información. El artículo se alinea en gran medida con las contribuciones de la tesis, correspondiéndose con C1, C2, C4, C5 y C6.

- **P6** Galán-Jiménez, J., Berrocal, J., Garcia-Alonso, J., & Azabal, M. J. (2019). A novel routing scheme for creating opportunistic context-virtual networks in IoT scenarios. *Sensors*, 19(8), 1875. JCR Q1. [42] Se trata del trabajo que cimentó las bases de las posteriores publicaciones. Esta contribución estudia la utilización de una arquitectura oportunista para la comunicación de dispositivos dentro de un contexto inteligente local. El objetivo de las transmisiones es adecuar las características del entorno a los gustos y preferencias de los usuarios. Para ello, se recurre al concepto de perfil virtual para permitir representar a los individuos mediante su teléfono móvil, recopilando también sus gustos referentes a diferentes variables contextuales como la iluminación o la temperatura. Finalmente, los dispositivos capaces de cambiar aspectos del contexto son identificados mediante su perfil virtual, el cual define las acciones que pueden emprender. De esta manera, se evalúan las comunicaciones que tienen lugar en estos escenarios, analizando la calidad de servicio y comparando los resultados con alternativas del estado del arte. La contribución descrita especifica el trabajo que asentó los fundamentos de la línea de investigación, asociándose con las contribuciones C4, C5 y C6.

Durante el desarrollo del trabajo de tesis, se han difundido avances en diferentes conferencias:

- **P7** Jesús-Azabal, M., Herrera, J., Laso, S. & Galán-Jiménez, J. (2021). OPPNets and rural areas: an opportunistic solution for remote communications. *Jornadas de Ingeniería Telemática 2021 (JITEL)*. [49] Este trabajo de conferencia extiende la propuesta de la publicación P5. De esta manera, se corresponde con las contribuciones C1, C2, C4, C5 y C6.
- **P8** Jesús-Azabal, M., Berrocal, J., Juárez, L. M., Galán-Jiménez, J., & Garcia-Alonso, J. (2021). Detectando la Soledad en Ancianos de Zonas Rurales. *Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos*

(JISBD). [37]

Este trabajo resume las propuestas descritas en la publicación P2. De esta manera, las contribuciones que aporta se corresponden con C1, C2, C4, C5 y C6.

- **P9** Jesús-Azabal, M., Berrocal, J., Laso, S., Murillo, J. M., & Garcia-Alonso, J. (2020). SOLID and PeaaS: Your Phone as a Store for Personal Data. In Current Trends in Web Engineering: ICWE 2020 International Workshops, KDWEB, Sem4Tra, and WoT4H, Helsinki, Finland, June 9–12, 2020, Revised Selected Papers 20 (pp. 5-10). Springer International Publishing. [48]

Se trata de un primer acercamiento a la propuesta de modelo de gobierno posteriormente desarrollado en la publicación P3. Consecuentemente, el trabajo se alinea con la contribución C6.

- **P10** Moguel, E., Azabal, M. J., Flores-Martin, D., Berrocal, J., Garcia-Alonso, J., & Murillo, J. M. (2019). Asistente de voz para el recordatorio de tratamiento farmacológico. Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos (JISBD). [44]

Este trabajo posicionó los primeros avances de la línea de desarrollo de aplicaciones para mejorar la vida de los adultos mayores en zonas rurales aisladas. De esta forma, la publicación inició los primeros pasos de P4, P13 y P15. Del mismo modo, se asocia con la contribución C5 del presente trabajo de tesis.

Las conferencias en *workshops* relacionadas con el trabajo de tesis han permitido establecer las bases de los avances más significativos. De esta manera, se detallan a continuación:

- **P11** Jesús-Azabal, M., García-Alonso, J., & Galán-Jiménez, J. (2023, March). Communication in Isolated Rural Areas: A Comprehensive Review of the Alternatives to the Internet. In Gerontechnology V: Contributions to the Fifth International Workshop on Gerontechnology, IWoG 2022, November 17–18, 2022, Évora, Portugal, and Cáceres, Spain (pp. 11-21). Cham: Springer Nature Switzerland. [38]

La propuesta emprende un análisis detallado sobre las técnicas de comunicación alternativas a Internet para zonas rurales aisladas. Este

trabajo engloba parte del contenido del Capítulo 2, proporcionando avances en las contribuciones C1, C2 y C3.

- **P12** Jesús-Azabal, M., Berrocal-Olmeda, J., García-Alonso, J., & Galán-Jiménez, J. (2021). A Self-sustainable DTN Solution for Isolation Monitoring in Remote Areas. In Gerontechnology III: Contributions to the Third International Workshop on Gerontechnology, IWoG 2020, October 5-6, 2020, Évora, Portugal (pp. 57-68). Springer International Publishing. [38]

Este trabajo supone una aproximación a los avances descritos en la publicación P1. Como resultado, sus contribuciones se alinean con C1, C2, C3, C4, C5 y C6.

- **P13** Jesús-Azabal, M., Rojo, J., Moguel, E., Flores-Martin, D., Berrocal, J., García-Alonso, J., & Murillo, J. M. (2020). Voice assistant to remind pharmacologic treatment in elders. In Gerontechnology: Second International Workshop, IWoG 2019, Cáceres, Spain, September 4-5, 2019, Revised Selected Papers 2 (pp. 123-133). Springer International Publishing. [40]

Esta contribución plantea un primer acercamiento a la solución de asistente conversacional *offline* para la ayuda en la gestión de tratamientos farmacológicos, sirviendo como continuación de P10 y complemento de P14. Como resultado, se asocia la contribución C5.

- **P14** Jesús-Azabal, M., Berrocal, J., García-Alonso, J., Soares, V. N., & Galán-Jiménez, J. (2020). An opportunistic routing solution to monitor isolated elderly people in rural areas. In Gerontechnology: Second International Workshop, IWoG 2019, Cáceres, Spain, September 4-5, 2019, Revised Selected Papers 2 (pp. 195-203). Springer International Publishing. [39]

Dicha contribución motivó posteriores avances en la investigación, materializando las publicaciones P1, P2, P5, P7 y P8. De esta manera, el trabajo presenta una afinidad plena con el trabajo de tesis, asociándose a los avances C1, C2, C3, C4, C5 y C6.

- **P15** Jesús-Azabal, M., Medina-Rodríguez, J. A., Durán-García, J., & García-Pérez, D. (2020). Remembrance pills: Using alexa to remind

the daily medicine doses to elderly. In *Gerontechnology: Second International Workshop, IWoG 2019*, Cáceres, Spain, September 4–5, 2019, Revised Selected Papers 2 (pp. 151-159). Springer International Publishing. [45]

Propuesta sobre una arquitectura software orientada en proporcionar seguimiento a tratamientos farmacológicos a través del uso del asistente de voz Alexa. Este trabajo se enmarca en el ámbito de la contribución C5.

Los modelos de utilidad consolidan un mecanismo de protección para contribuciones que proponen nuevas funcionalidades a soluciones ya existentes. Durante el transcurso del presente trabajo de tesis, se ha publicado un modelo de utilidad:

- **P16** García-Alonso, J., Moguel, E., Berrocal, J., Murillo, J. M., Jesús-Azabal, M., Rivero, B., Mariano, L. & Conde, D. (2022). Sistema electrónico asistido por voz para la gestión farmacológica y de citas médicas (número de publicación U202230195). Oficina Española de Patentes y Marcas. [41]

Este modelo de utilidad recoge la contribución de la aplicación de asistente de voz que funciona sin conexión a Internet. Las operaciones del dispositivo se centran en proporcionar asistencia a adultos mayores a través de recordatorios programables e interactivos sobre tratamientos farmacológicos y citas médicas.

Con el fin de proporcionar un resumen ordenado de las publicaciones (P), la Tabla 1.1 enumera los trabajos realizados, asociando cada uno a sus contribuciones y objetivos.

Considerando el compendio de objetivos, contribuciones y publicaciones, la presente tesis doctoral ofrece un recorrido profundo sobre la línea de investigación planteada, detallando los principales avances y analizando los resultados obtenidos. Para comprender con mayor precisión la estructura del documento, el siguiente apartado expone la distribución del contenido de la tesis.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

P	Revista	Año	Cuartil	Contribuciones						Objetivos			
				C1	C2	C3	C4	C5	C6	O1	O1.1	O1.2	O2
Publicaciones en Journals JCR (6)													
P1	Wireless Networks	2023	Q3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
P2	Electronics	2022	Q3	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
P3	Mobile Information Systems	2021	Q4						✓	✓		✓	✓
P4	Journal of Personalized Medicine	2021	Q1					✓			✓		✓
P5	Wireless Communications and ...	2021	Q3	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
P6	Sensors	2019	Q1				✓	✓	✓	✓	✓		✓
Publicaciones en Conferencias (4)													
P7	JITEL	2021		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
P8	JISBD	2021		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
P9	ICWE 2020 Workshops	2020							✓	✓	✓		✓
P10	JISBD	2019						✓			✓		✓
Publicaciones en Workshops Internacionales (5)													
P11	IWoG V	2022		✓	✓	✓				✓	✓	✓	
P12	IWoG III	2021		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
P13	IWoG	2019						✓			✓		✓
P14	IWoG	2019		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
P15	IWoG	2019						✓			✓		✓
Modelos de Utilidad (1)													
P16	Oficina Española de Patentes y Marcas	2022						✓			✓		✓

Tabla 1.1: Resumen de las publicaciones y sus asociaciones con las contribuciones y objetivos de la tesis.

1.6. Estructura de la Tesis

La presente tesis doctoral sigue una estructura que recoge de manera ordenada las contribuciones derivadas del trabajo de investigación. Para ello, el documento se compone de un total de cinco capítulos que recorren la contribución, así como el contexto y resultados de la propuesta. A continuación, se detallan los capítulos de la tesis que conforman el proyecto de tesis.

- En este Capítulo 1 se desarrolla el contexto y trasfondo que rodea al trabajo. Para ello, se proporciona una visión global de las aportaciones, detallando conceptos como las aplicaciones distribuidas y las soluciones Edge-Fog-Cloud. Del mismo modo, se aborda el funcionamiento de la comunicación oportunista y se concluye con un resumen de los objetivos y aportaciones.
- En el Capítulo 2 se detallan los antecedentes en el que se enmarca la propuesta. Para ello, se emprende un proceso de análisis sobre las principales motivaciones del trabajo, estudiando la problemática de

la brecha digital y evaluando las causas y consecuencias asociadas. Del mismo modo, se detallan contribuciones técnicas que pretenden servir como alternativa al acceso a Internet. Finalmente, se profundiza en las características de las redes oportunistas, enmarcando la taxonomía asociada a este modelo de comunicación y analizando los retos y principales características. Cabe resaltar que no se incluye un capítulo particular para el estado del arte debido a que el estudio y comparación con alternativas se ha realizado directamente en el desarrollo y explicación de las aplicaciones desplegadas sobre la arquitectura, en el Capítulo 4. Esta distribución responde a la necesidad de profundizar con un mayor detalle en las particularidades de cada uno de los despliegues que se proponen sobre la solución. Al mismo tiempo, no se ha considerado una comparación global de la propuesta debido a la variedad de técnicas y disciplinas que engloba. Como resultado, se ha optado por abordar de manera independiente el contexto general de la arquitectura, incluyendo sus motivaciones y detalles técnicos detrás de su filosofía. De esta forma, se ha estudiado de manera individual el contexto de cada una de las aplicaciones.

- El Capítulo 3 desarrolla el proceso de análisis y definición de la propuesta principal de la tesis. De esta manera, se detalla el funcionamiento de una arquitectura sostenible de comunicación oportunista para el despliegue de aplicaciones distribuidas en zonas rurales aisladas. Para ello, el capítulo especifica tres procesos clave de la propuesta: la captación de la información, la transmisión oportunista de los datos y la eventual recepción y análisis de la información. Finalmente, se detallan los protocolos de encaminamiento oportunistas propuestos para la arquitectura,
- En el Capítulo 4 se detalla un conjunto de contextos de aplicación que exploran potenciales despliegues sobre la arquitectura oportunista. Los servicios propuestos responden a necesidades identificadas en las zonas rurales, así como en contextos inteligentes, de manera que emplean los mecanismos de comunicación de la arquitectura para funcionar. Estas aplicaciones proporcionan una visión práctica de la propuesta y ponen de manifiesto las posibilidades de la solución y su

papel en los entornos rurales, pero también en sistemas IoT conectados a Internet.

- En el Capítulo 5, la arquitectura es sometida a un proceso de evaluación basada en ejecuciones de las aplicaciones descritas en el Capítulo 4 en entornos realistas simulados. Para ello, se diseña un conjunto de escenarios completos de las diferentes redes, emprendiendo procesos de medición de la calidad de servicio de las comunicaciones. Finalmente, los resultados obtenidos son analizados y comparados con alternativas de encaminamiento de la literatura, estudiando la potencial satisfacción respecto los objetivos planteados. Del mismo modo, se incluye un análisis del consumo energético de los nodos, verificando su viabilidad técnica y el rendimiento de los elementos alimentados con energía sostenible.
- El Capítulo 6 ofrece las conclusiones del trabajo, poniendo en valor la aportación y ofreciendo una contextualización final de los resultados. Del mismo modo, se identifican las líneas de trabajos futuros derivados de la tesis, así como su eventual impacto en la investigación.

Capítulo 2

Antecedentes

“Cuando era joven, creía que eran los pintores los que pintaban casas, ¿qué iba a saber yo?”

El Irlandés (2019)
Dir. Martin Scorsese

El presente trabajo de tesis propone una arquitectura sostenible de comunicación oportunista para aplicaciones distribuidas en entornos rurales aislados. Para ello, aplica un modelo Edge-Fog-Cloud oportunista que agrupa los elementos que intervienen en el sistema según el rol que desempeñan. La propuesta aúna diferentes disciplinas técnicas con las que se busca proporcionar un conjunto de servicios que responden a necesidades presentes en las zonas rurales. De esta manera, resulta necesario emprender un proceso de estudio y análisis sobre el contexto de las poblaciones y regiones que carecen de conexión a Internet, tanto a un nivel tecnológico como a un nivel social.

Resulta relevante aclarar que el presente apartado no incluye un estudio del estado del arte. Esta decisión se debe principalmente a la amplitud y variedad de la propuesta, así como al compendio de procesos, técnicas y tecnologías que la solución agrupa. Estos factores comprenden sólidos obstáculos que dificultan la identificación de alternativas similares en la

literatura, conduciendo a comparaciones abstractas e imprecisas de la arquitectura. Por este motivo, el apartado se centra en detallar la justificación del trabajo, así como del contexto que rodea la propuesta. En adición a esta consideración, el Capítulo 4 ofrece un estudio detallado sobre potenciales aplicaciones desplegadas en la arquitectura. Estas contribuciones materializan de una forma pragmática y concreta el papel técnico de la arquitectura, facilitando la realización de un análisis del estado del arte para cada solución y comparando sus avances particulares con los trabajos previos del ámbito. Como resultado, el presente capítulo comprende dos apartados principales: la radiografía del contexto rural y el análisis de las características de las redes oportunistas.

El primer apartado lleva a cabo un profundo estudio sobre la brecha digital en el ámbito rural. Para ello, se parte del análisis de las causas que están detrás de la falta de acceso a Internet desde una perspectiva global, evidenciando las consideraciones más relevantes a la hora de medir la digitalización de un país, y destacando los factores ambientales que condicionan el acceso a las TIC. Del mismo modo, se emprende un análisis de las consecuencias de la brecha digital en la sociedad rural, identificando las principales implicaciones y dificultades que condicionan el bienestar en estas regiones. Por último, ampliando la visión al punto de vista técnico, se clasifican y evalúan las diferentes alternativas que existen para acercar la conexión a Internet a las zonas rurales. Para ello, se estudian las aplicaciones, así como limitaciones asociadas a los trabajos disponibles en la literatura.

El segundo apartado estudia la naturaleza de las redes ad-hoc, así como su taxonomía y características. De esta manera, las redes oportunistas son enmarcadas dentro de esta tecnología, analizando su potencial impacto en las comunicaciones de las zonas rurales y definiendo las diferentes variables que intervienen en su funcionamiento. Finalmente, se extraen unas conclusiones que se relacionan con la propuesta de valor de la tesis.

2.1. Radiografía de las Zonas Rurales Aisladas

Desde hace años, el acceso a Internet está considerado un derecho humano básico según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) [50]. Es-

ta definición, junto con los intereses económicos subyacentes, ha motivado que, a nivel global, gobiernos y compañías hayan emprendido importantes esfuerzos para dotar con acceso a Internet a la mayor cantidad posible de territorios. Sin embargo, la problemática de la brecha digital se mantiene como uno de los retos más significativos de nuestros tiempos [51]. Dado que se trata de un fenómeno presente a lo largo de todo el mundo, sus causas y consecuencias dependen de variables particulares de los territorios, así como de las características sociales y políticas. De esta forma, el presente apartado analiza la brecha digital bajo tres prismas: las causas globales de la problemática, las consecuencias en la sociedad y, finalmente, las tecnologías de acceso a Internet que pretenden mitigarla.

2.1.1. Causas de la Brecha Digital

Es lógico deducir cómo la brecha digital está íntimamente ligada con el desarrollo económico e industrial de los países. Según informes como Digital Report 2023 de Datareportal [52] o plataformas web como Internet World Stats [53], el porcentaje de penetración de Internet a nivel mundial ha alcanzado el 67.9%. Esta cifra supone que casi un tercio de la población mundial, 2.7 mil millones de personas, se mantienen a la sombra de la tecnología. Las regiones más afectadas por la falta de conexión se sitúan en África, donde únicamente un 43.2% de sus habitantes hace uso de Internet [53]. Por otro lado, continentes como Europa y América consolidan una penetración superior al 89% [53]. Estas cifras son el resultado de una evolución positiva durante los últimos años en materia de conectividad, encontrando importantes alicientes en el abaratamiento de las tecnologías móviles y en el especial interés por parte de los usuarios. No obstante, la falta de conexión a Internet no adolece únicamente a los países menos desarrollados, sino que está presente de una forma vertical también en las economías más asentadas [51]. Este es el caso particular de las zonas rurales, las cuales consolidan territorios vulnerables desde la perspectiva digital, implicando retos específicos e inherentes a su situación.

El 80% de la superficie total de la Unión Europea está conformado por zonas rurales [54]. Esta imponente cifra contrasta con la distribución de la población, concentrada en un 40% en los núcleos urbanos. De esta forma, las zonas rurales y los territorios intermedios conforman el 28% y 32% res-

pectivamente. Estas tendencias demográficas resultan una evidencia de las dicotomías presentes entre las ciudades y los entornos rurales, prometiendo una tendencia que asentará la predominancia de las zonas urbanas, en detrimento de la despoblación de las regiones más aisladas. Como resultado, esta evolución plantea múltiples consecuencias y retos, encontrando en la digitalización uno de los más significativos.

Las cifras de penetración y alcance de Internet en los países miembros de la Unión Europea resultan ampliamente alentadores. Se estima que el 80% de la población europea utiliza Internet regularmente, gozando de la amplia presencia de redes de comunicación [52]. Sin embargo, es importante destacar que, en ocasiones, estas cifras ocultan una importante desigualdad detrás de los números, ya que no todos los territorios gozan de la misma capacidad de acceso a Internet. Menos del 40% de las zonas rurales cuentan con comunicaciones de alta velocidad, contexto que empeora en los territorios más aislados. Estas regiones apartadas consolidan casi un 10% de los hogares, los cuales carecen por completo de infraestructuras de Internet [55]. Sin embargo, la brecha digital define un problema que abarca más allá de ser un fenómeno tecnológico, implicando factores sociales, económicos y políticos. Como resultado, surge la necesidad de identificar mecanismos que permitan medir de una forma más precisa el acceso a las tecnologías y, a su vez, ser capaz de poner en evidencia los factores que intervienen como obstáculos en este proceso.

Hace décadas, el mecanismo que se aplicaba para medir la brecha analógica global consistía en cuantificar el número de abonados a la red de telefonía [56]. Este valor, denominado teledensidad, permitía identificar regiones donde la penetración de las comunicaciones era reducida. En el contexto actual, esta simplificación no satisface las múltiples variables que intervienen en el acceso a las TIC. Hoy en día, las redes fijas y el abono a los servicios han evolucionado, dejando espacio a las redes móviles y abriendo un nuevo patrón en el consumo de estos servicios: múltiples dispositivos, líneas de conexión independientes, formas alternativas de acceso a Internet... En definitiva, se precisan nuevos indicadores para determinar la penetración de las redes en el día a día [57]. En respuesta a este contexto, múltiples instituciones han propuesto índices y criterios que facilitan la cuantificación de la digitalización y prosperidad de los países, siendo algunos de los más significativos el Índice de Desarrollo Humano

(IDH) [58], el Índice de Acceso Digital (IAD) [59] o el Índice de Acceso Inclusivo (IAI) [60]. Detrás de estos informes, existe cierto consenso en los patrones que se consideran para representar la brecha digital, observando no únicamente las cifras objetivas de usuarios, sino también la capacidad que tienen los ciudadanos de un país para acceder y hacer uso de las TIC. Para ello, se recurre a un conjunto de criterios que dibujan las principales causas que impiden el acceso a Internet y, por lo tanto, suponen obstáculos para la eliminación de la brecha digital a nivel global. Las categorías más destacadas, presentes en estos índices, permiten agrupar las consideraciones bajo cuatro grupos: Infraestructura, Asequibilidad, Conocimiento y Calidad [58, 59, 60]. A continuación, se detalla cada uno de ellos.

1. Disponibilidad de infraestructura. La disponibilidad de infraestructura define uno de los principales factores que intervienen en el acceso a Internet. Resulta lógico que el acceso a las TIC depende activamente de la presencia de equipos y herramientas para dotar los territorios con acceso a Internet. Así, este criterio puede ser cuantificable a través del número de abonados y de líneas de Internet que existen en un país [59]. Como resultado, este factor define uno de los pilares esenciales de la brecha digital, encontrando en los gobiernos y en las compañías proveedoras de servicios los principales actores para mitigar la ausencia de estas tecnologías [60]. Históricamente, este factor ha supuesto la mayor segregación entre países, planteando una importante brecha entre aquellas naciones con presencia de estas instalaciones y las que carecen de ellas. Sin embargo, incluso dentro de los países desarrollados, la disponibilidad de infraestructura ha demostrado diferencias, especialmente entre los núcleos urbanos y los rurales. Los prohibitivos costes de inversión en el despliegue y mantenimiento de estos recursos conducen a una eventual falta de interés por parte de las compañías en aquellos territorios en los que las características demográficas no resulten atractivas. Del mismo modo, factores externos como las condiciones geográficas plantean obstáculos para las inversiones. El alto coste asociado a la explotación de una infraestructura de red celular es el resultado de tres áreas principales: el despliegue de las estaciones base celulares, las tecnologías involucradas en el *backhaul* que enlaza usuarios con la red y el consumo de

energía requerido para operar dichos elementos. Estos factores conforman las prohibitivas cifras de inversión que impiden el despegue de Internet en las áreas rurales [9].

2. Asequibilidad de los servicios. Además de contar con las infraestructuras de acceso a Internet, el coste económico que supone su contratación y uso también define una parte clave de la brecha digital. Este factor se mide a nivel nacional a partir de la relación entre el precio de acceso a Internet y los ingresos per cápita del país [59, 60]. Como resultado, la proporción obtenida evidencia el esfuerzo económico necesario que emprenden los ciudadanos para conectarse a la red. Otro elemento fundamental en este apartado es el contexto de competitividad de las compañías proveedoras de servicios, así como las tendencias monopolistas. De esta manera, cuando un país cuenta con múltiples empresas que compiten por la cuota de mercado, se alcanza una mayor capacidad de elección por parte de los usuarios, facilitando la asequibilidad de los servicios [60]. La ausencia de estos factores conduce a la proliferación de áreas y zonas donde los habitantes no pueden permitirse el coste económico que suponen las tarifas, conduciendo, a su vez, a que las compañías proveedoras de servicios limiten sus inversiones.
3. Conocimiento y cultura digital. Siguiendo una evolución natural de los dos puntos anteriores, los conocimientos y competencias digitales plantean el siguiente conjunto de factores más relevantes en la existencia de la brecha digital. De esta forma, además de proporcionar las herramientas necesarias, es importante que los usuarios cuenten con formación y conocimientos sobre las nuevas tecnologías, así como sobre las posibilidades de Internet [59, 60]. Así, es relevante la existencia de una cultura digital que involucre la confianza y el conocimiento de los riesgos del uso de las redes, así como el papel del gobierno en su promoción y formación. De lo contrario, la brecha digital seguirá manteniendo un difícil muro entre sociedades. Del mismo modo, esta categoría también incluye la presencia de Internet en instituciones, concretamente en las educativas, poniendo en valor el significativo papel que juega la educación en las competencias digitales.

4. Calidad. Los países desarrollados han emprendido importantes avances en la última década para difundir una amplia infraestructura de acceso a Internet con un coste asequible [59, 60]. Sin embargo, una de las facetas que intervienen en mayor medida en estos territorios es la significativa diferencia en la calidad de servicios existente entre los núcleos rurales y las zonas urbanas. Esta limitación plantea importantes dicotomías que suponen un firme freno para los avances en materia tecnológica a nivel global, encontrando en la difusión de la fibra óptica la oportunidad de reducir estas consecuencias.

Estos factores permiten identificar los elementos que mayor incidencia tienen sobre el acceso a las TIC, considerando los principales condicionantes de la brecha digital desde un punto de vista macroscópico. Sin embargo, es relevante tener en cuenta otras evidencias que resultan obstáculos para el acceso a Internet, especialmente ligadas a las características geográficas y a las políticas [61].

- La superficie de un país. Este factor consolida un condicionante relevante a la hora de proporcionar una red estable y fija de conexión a Internet. Como resulta lógico, cuanto mayor es la dimensión de un país, mayores dificultades existen para desplegar una infraestructura, así como se precisa de una mayor inversión. Se trata de una condición que involucra no únicamente a países en desarrollo como Brasil, sino también a economías asentadas como Canadá, Australia o Rusia.
- Exposición a factores externos. Existen territorios que, debido a sus condiciones geográficas, las arquitecturas de comunicación se enfrentan a importantes inclemencias externas. Este contexto resulta especialmente significativo en las regiones de gran altitud, donde las instalaciones de telecomunicaciones se exponen a fuertes vientos, nieves y tormentas. Este marco involucra países como Nepal, cuyas condiciones geográficas complican el asentamiento de una infraestructura rápida y estable [62]. Del mismo modo, las regiones insulares también plantean un importante reto, ya que su comunicación suele conllevar a la aplicación de complejas técnicas de soterramiento de cables submarinos [63]. Estos escenarios implican unos importantes costes de

instalación y mantenimiento para las infraestructuras, ya que la exposición recurrente a sucesos de fuerza mayor puede ocasionar cortes y retrasos en el suministro de Internet. Durante los últimos años, han tenido lugar diferentes eventos que han afectado a la integridad de las comunicaciones de países completos. Un caso reciente puede ser el de Tonga, nación compuesta por 76 islas que quedaron aisladas de comunicación debido a la erupción de un volcán submarino que afectó a las redes submarinas que enlazaban las islas [64].

- Restricciones gubernamentales. Al margen de las condiciones geográficas, existen países cuyas principales limitaciones en el acceso a Internet están derivadas de las políticas restrictivas de sus gobiernos [65]. Esto implica que las autoridades establecen filtros a los contenidos accesibles, así como a las comunicaciones, a través de un férreo control centralizado de las infraestructuras. El ejemplo más recurrente de esta situación es el de Corea del Norte, país que permanece absolutamente aislado del Internet global, con únicamente 1.024 direcciones IP asignadas [66]. Otros ejemplos del control gubernamental sobre acceso a Internet han sucedido en diferentes ocasiones en Irán donde, debido a tensiones sociales, el gobierno ha restringido las comunicaciones a través de la red mediante apagados masivos de los servicios de los ISP [67].

Como resultado, los factores generales que condicionan la disponibilidad de Internet se ven limitados por las características contextuales de cada región. De esta forma, tras estudiar detalladamente los factores que intervienen en la brecha digital desde una perspectiva global, el siguiente apartado reduce el zoom del análisis para centrarse en las consecuencias de la falta de conexión. De esta manera, se ahonda en el impacto de la ausencia de Internet en la sociedad actual.

2.1.2. Las Consecuencias de la Brecha Digital en las Zonas Rurales Aisladas

Las necesidades específicas de las zonas rurales en materia económica, social y sanitaria encuentran en la falta de Internet un exponente que mitiga las oportunidades de abordar estas problemáticas desde una perspectiva

tecnológica [68]. De esta manera, se pueden identificar tres claves esenciales entre estas consecuencias: el estancamiento económico de la industria local; la despoblación y el impacto social; y la atención digital sanitaria.

La actividad económica de las zonas rurales supone un motor esencial dentro de la economía nacional de los países [69]. En España, la producción de industrias ligadas al territorio rural como la agricultura comprende un porcentaje significativo del Producto Interior Bruto (PIB) [70]. Este sector consolida uno de los principales músculos de las zonas rurales aisladas, con industrias como la ganadería extensiva o la apicultura, que definen una de las principales fuentes de ingresos, además de marcar especiales referentes de calidad a nivel nacional [21]. Sin embargo, a pesar de su carácter artesano y su imagen íntimamente ligada con su zona, estos negocios rurales se enfrentan a importantes desafíos, a raíz de la brecha digital, que comprometen su capacidad para escalar sus modelos económicos y enfrentarse a la dura competencia [21].

Factores como la evolución en los patrones de consumo de los clientes, el auge de las ventas *online* y la aplicación de técnicas de rendimiento punteras han consolidado algunos de los principales avances motivados por la digitalización [21]. Estos recursos dotan de una mayor capacidad competitiva a aquellos negocios que adopten soluciones tecnológicas. Como resultado, la ausencia de estas herramientas supone un significativo obstáculo para escalar modelos de negocio, así como optimizar y mejorar la productividad real de las empresas. De esta manera, no existirá un desarrollo industrial pleno en las zonas rurales aisladas hasta que no se equipen con la tecnología que permita optimizar y mejorar su funcionamiento [21].

Desde el punto de vista social, las consecuencias de la brecha digital han resultado especialmente evidentes en la falta de interés de la población respecto la tecnología. Este factor resulta un condicionante significativo en la digitalización de estos territorios, ya que conduce a que las compañías de telecomunicaciones identifiquen estas regiones como áreas donde el número de potenciales clientes es reducido. El desinterés por Internet y sus posibilidades encuentra, entre otros factores, a la demografía como uno de sus potenciales antecedentes. La despoblación y el predominante porcentaje de adultos mayores que conforma la población de estos territorios se ajusta a un bajo índice de penetración de Internet [19], conduciendo así a que las consecuencias de la brecha digital retroalimenten a su vez una de las

2.1. RADIOGRAFÍA DE LAS ZONAS RURALES AISLADAS

principales causas. Sin embargo, esta situación impacta también en la calidad de vida que ofrecen estos territorios a sus habitantes, frenando en muchos casos el crecimiento de su población debido a la incompatibilidad para desempeñar labores profesionales que dependen activamente de Internet, así como limitando las experiencias y servicios que ofrece la red. De esta manera, asumiendo los factores económicos y sociales, la despoblación puede concebirse como una de las potenciales consecuencias de la ausencia de Internet en las áreas rurales [19]. De manera paralela a este hecho, la situación demográfica pone de relieve otras significativas necesidades, como la atención sanitaria a los adultos mayores que residen solos.

Los núcleos rurales con una población inferior a mil habitantes cuentan con un porcentaje superior al 40 % de personas que superan los sesenta y cinco años de edad [17]. Esta condición plantea un conjunto de necesidades específicas alineadas con la materia de salud y cuidados, especialmente evidente en aquellos adultos mayores que residen solos. Uniéndose a los factores adicionales ya expuestos, tales como el aislamiento geográfico, la baja densidad de población y la dificultad para el acceso a los servicios; las estrictas necesidades de cuidados en la población mayor pueden resultar condicionantes de su calidad de vida. Sin embargo, se identifican tres principales factores sanitarios comunes en adultos mayores: el sentimiento de soledad, la dificultad para gestionar medicamentos y la desprotección ante la potencial necesidad de atención médica en el hogar [22]. En los tres casos, la tecnología podría jugar un papel fundamental para su mitigación. Sin embargo, la gran mayoría de soluciones digitales precisan de conexión a Internet para su funcionamiento. De esta manera, la brecha digital resulta un obstáculo significativo en el cuidado de la salud, especialmente de aquellos que residen solos en áreas rurales aisladas.

En definitiva, la falta de infraestructuras de comunicación para el acceso a Internet en las zonas rurales aisladas conduce a un conjunto de consecuencias que impactan de manera directa en la forma de vida y el bienestar de sus habitantes. La falta de digitalización e industrialización en muchos negocios conlleva a una pérdida en sus capacidades competitivas, mientras la ausencia directa de Internet limita la atracción de nuevos habitantes a los municipios. En el caso de los adultos mayores, que comprenden la población más significativa de estos territorios, experimentan las consecuencias de la falta de herramientas tecnológicas en los cuidados de salud. Sin em-

bargo, a pesar de esta realidad, presente en muchos territorios a lo largo del mundo, existen soluciones y alternativas que pretenden acercar el acceso a Internet a pesar de la falta de recursos e infraestructuras. De esta manera, el siguiente apartado profundiza en las propuestas más relevantes de la literatura que proponen sólidas alternativas para el acceso a Internet y la transmisión de información en contextos aislados.

2.1.3. Alternativas para el Acceso a Internet en Zonas Rurales Aisladas

A raíz de la problemática de la brecha digital en las zonas rurales, han surgido diferentes propuestas que pretenden acercar a estos territorios el acceso a Internet, así como proporcionar comunicación telemática [51, 71]. Sin embargo, no siempre el problema reside en la falta de infraestructuras, reduciendo la solución a la instalación del equipamiento apropiado. En ocasiones, las características físicas de las localidades plantean un imponente reto para el funcionamiento óptimo de Internet.

Internet se fundamenta en gran medida en el papel que juega el protocolo TCP/IP en las comunicaciones [72]. Esta técnica se basa principalmente en la fragmentación de la información en paquetes, los cuales son transmitidos por una red de nodos que enlazan los extremos de manera estable. Este proceso resulta especialmente exigente, ya que una parte esencial de TCP/IP es la elección de un camino de enrutamiento fijo, duradero y eficaz que favorezca el intercambio de datos entre los elementos de la red [73]. Como resultado, este protocolo encuentra especiales dificultades en su aplicación en entornos de alta latencia, donde puntuales periodos de desconexión conducen a tiempos de espera y, eventualmente, a la pérdida de la comunicación. Como resultado, es relevante considerar también alternativas que exploren la aplicación de mecanismos que respondan ante estos escenarios.

La literatura científica proporciona un significativo conjunto de alternativas que ofrecen transmisión de información entre puntos, ya sea adaptando Internet a infraestructuras particulares o dotando los territorios con mecanismos alternativos [74]. De esta manera, se identifican dos tipos diferentes de soluciones: aquellas propuestas que plantean el despliegue de una arquitectura propia, y los trabajos que aprovechan infraestructuras ya

desplegadas. En este apartado se estudiarán las soluciones más relevantes de la literatura clasificadas en estos dos tipos.

2.1.3.1. Soluciones basadas en una infraestructura propia

Las propuestas agrupadas en este criterio proponen el despliegue y explotación de una infraestructura propia para proporcionar conexión a Internet. A continuación, se detallarán aquellas propuestas más relevantes.

Telefonía Móvil 4G.

Las redes de comunicación 4G suponen una de las arquitecturas más disruptivas en cuanto a alcance y presencia en la actualidad. Esta infraestructura permite el acceso a Internet a través de una conexión celular proporcionada por una red de torretas instaladas y distribuidas localmente [75]. Como resultado, la alta velocidad de conexión y la estable resiliencia de estas soluciones han consolidado una experiencia de comunicación sin precedentes. El acceso al 4G está ligado a la suscripción del usuario a una tarifa de acceso de datos a través de una tarjeta de abonado (*Subscriber Identity Module*, SIM). Como resultado, el acceso a Internet tiene lugar al equipar esta tarjeta en un dispositivo inteligente capaz de conectarse a la red, como un teléfono móvil, tablet u ordenador portátil. Del mismo modo, es posible su utilización en routers 4G que ofrecen una experiencia similar a la red de Internet convencional, pero con la ventaja de operar sin las limitaciones físicas de un cable que enlace el enrutador con la acometida de la infraestructura. Considerando la difundida presencia de esta solución, las redes 4G han marcado un importante punto de inflexión en la lucha contra la brecha digital, acercando Internet a áreas rurales de todo el mundo y acercando los servicios TIC más exigentes [76]. Sin embargo, las redes celulares todavía se enfrentan a relevantes desafíos en algunas zonas.

La aplicación de las tecnologías 4G requieren el despliegue y explotación de una amplia densidad de infraestructuras para cubrir la cobertura de áreas grandes [77]. Esta condición implica una alta inversión para instalar las torres de comunicación, las cuales pueden resultar ineficaces en geografías como valles, montañas o bosques profundos. Del mismo modo, los requisitos de acceso implican que los usuarios deben permanecer bajo la suscripción de los servicios que, en ocasiones, pueden resultar inasequibles,

además de plantear severas limitaciones sobre la cantidad de datos que se pueden consumir. Como resultado, la difusión del 4G depende activamente de la inversión de las compañías proveedoras de servicios, pero también de los gobiernos y de los propios usuarios, factores que pueden resultar difíciles de garantizar en entornos con dificultades físicas de acceso o de baja renta [78]. Por lo tanto, aunque la evolución positiva de los últimos años en materia de redes celulares resulta muy prometedora, es importante seguir explorando alternativas y tecnologías para lograr un rendimiento similar con un coste de inversión y explotación menor.

Internet Satelital.

El Internet satelital propone la aplicación de satélites orbitales para proporcionar conexión a Internet en zonas remotas. Considerando las barreras físicas descritas, como las condiciones geográficas, que limitan el despliegue de nodos de Internet estables en las zonas aisladas, esta propuesta pretende proporcionar comunicación empleando satélites como infraestructura [79]. Para ello, se propone la aplicación de estos elementos para cubrir la comunicación entre largas distancias, recurriendo a los satélites para recibir y replicar la información entre los extremos. Así, se identifican tres elementos fundamentales: la estación base de la red, los satélites de la infraestructura y, finalmente, el receptor de la conexión en el área remota.

- La estación base se trata de la infraestructura fija que sirve como emisor de la conexión a Internet. Este equipamiento actúa como salida para la red satelital, enlazando las comunicaciones que se establecen dentro del sistema con el servicio global de Internet. Para ello, se hace uso de un conjunto de antenas que sirven de interfaz con el conjunto de satélites situados en órbita y con enrutadores que transmiten la información hacia la red.
- Satélites de Órbita Baja (*Low Earth Orbit*, LEO). Estos equipos sirven como enlace entre la estación base de la red satelital y los usuarios que hacen uso de la conexión. Para ello, los satélites orbitan a unos 550 kilómetros de altura, manteniendo una trayectoria que busca maximizar la comunicación con ambos extremos.

- **Usuarios.** El tercer elemento del esquema de funcionamiento de las redes satelitales son los usuarios, situados generalmente en entornos aislados. Este extremo precisa de la instalación del equipamiento que permita conectar los hogares con la infraestructura. Generalmente, estos dispositivos constan de una antena y un router, capaz de proporcionar comunicación a dispositivos situados dentro de su rango de alcance.

Durante los últimos años, el interés en la aplicación de las infraestructuras satelitales para ofrecer conexión a Internet en entornos aislados ha cobrado especial relevancia [80, 81]. Desde la concepción de estas soluciones, el principal obstáculo que se ha detectado para ofrecer un servicio de calidad ha sido la latencia. La transmisión de información entre grandes distancias físicas ha sido la razón detrás de los tiempos de retraso. Sin embargo, la investigación en el ámbito ha conducido a considerables mejoras en los servicios, logrando conexiones de baja latencia y alta velocidad [82]. Sin embargo, estas propuestas encuentran como principal obstáculo la gran inversión que supone su despliegue y explotación, ya que involucra el posicionamiento de satélites en la órbita terrestre, así como su posterior mantenimiento [74]. La magnitud en el coste operativo de estas infraestructuras de gran escala ha conducido a que las compañías que ofrecen estos servicios hayan establecido unos altos costes de suscripción para los usuarios, así como una tarificación por uso [83]. Como resultado, el Internet satelital conforma una sólida alternativa para los entornos aislados, sin embargo, su alto coste limita ampliamente su potencial papel en la reducción de la brecha digital.

Red de Globos de Comunicación.

Siguiendo una lógica similar al Internet satelital, las redes de globos de comunicación proporcionan acceso a Internet en áreas donde las infraestructuras de comunicación no resultan aplicables o efectivas. Para ello, la arquitectura hace uso de globos estacionarios desplegados en la troposfera, a unos veinte kilómetros de altitud [84]. De esta manera, los globos conforman una red de malla que actúa como nodo intermedio entre los usuarios y la estación base. De esta manera, por un lado, la estación base consiste en una antena que actúa como salida de la red al Internet global, mientras

que los usuarios cuentan con otra antena capaz de recibir y transmitir la información. Este modelo resulta en un funcionamiento alineado con la red satelital, sin embargo, no se enfoca en proporcionar conexión global. Por el contrario, las redes de globos de comunicación enfocan su operabilidad en áreas geográficas particulares, subsanando la falta de conexión de estas zonas en concreto.

A lo largo de los últimos años, han surgido propuestas y soluciones que aplican esta metodología para cubrir áreas con conexión 4G, alcanzando resultados positivos [85]. Los últimos avances en esta materia afianzan las redes de globos como una opción fiable para proporcionar acceso a Internet. Sin embargo, existen significativas carencias en la operabilidad de estas soluciones que resultan difíciles de solucionar.

El coste de despliegue y mantenimiento de estas infraestructuras requiere una significativa inversión para alcanzar un rendimiento estable [86]. La exposición a las inclemencias meteorológicas, así como su rango de alcance, plantean potenciales riesgos para su consolidación. Del mismo modo, tal y como sucede con otras alternativas, características geográficas como valles, montañas o bosques, junto con los costes económicos, pueden conformar obstáculos para su utilización.

Este mismo esquema ha servido como base para implementaciones que sustituyen la malla de red de los globos por otros dispositivos intermedios. Este es el caso particular de los drones, los cuales pueden ser desplegados a alturas más bajas, gozando de un mayor dinamismo en su funcionamiento [87]. No obstante, estas alternativas se enfrentan a las limitaciones detalladas, tanto en su despliegue como en su mantenimiento.

Long Range Technologies.

La necesidad de transmitir información entre puntos alejados físicamente ha sido ampliamente abordado antes de la era de Internet. Este es el caso particular de las tecnologías de radiofrecuencias de gran alcance. Estas soluciones proporcionan comunicación a través del uso de antenas tanto en el extremo emisor como en el receptor, permitiendo compartir datos a través de largas distancias. Siguiendo esta filosofía, hay múltiples protocolos y especificaciones que han servido como base para estas aplicaciones, destacando especialmente *Long Range Wide Area Network* (LoraWAN), *Symphony Link* y *ZigBee*.

LoraWAN [88] y Symphony Link [89] son ambas especificaciones de redes basadas en la modulación LoRa [90]. En el caso de ZigBee, esta hace uso de IEEE 802.15.4 [91], especificación enfocada principalmente en la comunicación de Redes Inalámbricas Personales (*Wireless Personal Area Networks*, *WPAN*). Estas tecnologías proporcionan transmisión de datos entre extremos, permitiendo la aplicación de Internet sobre su infraestructura. Para ello, haciendo uso de *gateways* que actúan como salida a la conexión global, estas especificaciones pueden servir de enlace entre Internet y dispositivos situados en su área de cobertura. Actualmente, existen propuestas comerciales como SigFox [92] o Z-Wave [93], las cuales aplican esta lógica para proporcionar comunicación entre equipos. Sin embargo, existen limitaciones específicas en la aplicación de estas tecnologías como puentes de Internet.

LoraWAN, Symphony y ZigBee se tratan de implementaciones que no están centradas en proporcionar acceso a Internet a usuarios finales. En su lugar, estas soluciones pretenden comunicar dispositivos IoT a través de una lógica *Machine-to-Machine* (M2M), es decir, transmisiones que tienen lugar entre dispositivos sin intervención humana [90]. Como resultado, la aplicación de estos servicios no satisface por completo los requisitos inherentes a la conexión a Internet. Esto es particularmente apreciable en procesos como la fragmentación de los paquetes. La comunicación mediante radiofrecuencias recurre a un tamaño de paquete inferior que TCP/IP, buscando optimizar la comunicación de los sensores [86]. De esta forma, las tecnologías de frecuencias de alto alcance encuentran limitaciones en su utilización como puente de Internet. Sin embargo, conforman recursos apropiados para contextos donde la latencia no resulta un factor indispensable. De esta manera, su utilización en entornos rurales para comunicar puntos aislados puede resultar apropiada. Una de las potenciales opciones de este planteamiento es su aplicación en las Redes Tolerantes al Retardo.

Redes Tolerantes al Retardo.

Las redes DTN conforman una disciplina centrada en proporcionar transmisión de información entre dispositivos en contextos donde la latencia es alta [86]. En estos escenarios, donde la comunicación experimenta recurrentes interrupciones o periodos de desconexión, protocolos como TCP/IP no son aplicables. Sin embargo, las redes DTN plantean una al-

ternativa sólida para estas situaciones, ya que su propia concepción asume la latencia como un componente inevitable en las comunicaciones. Para ello, los nodos que conforman la red tienen la capacidad de almacenar la información que transmiten si no son capaces de enviarla a otro nodo. Así, reducen los procesos de comunicación a los momentos en los que resulta posible la comunicación, buscando encaminar la información hacia los nodos destinos.

La arquitectura DTN es aplicable con múltiples tecnologías de comunicación. El modelo de transmisión que se propone resulta compatible con interfaces de corto y largo alcance, permitiendo la composición de redes heterogéneas que se adaptan a las características del contexto donde operan [10]. Esta versatilidad hace que su despliegue sea apropiado para entornos donde la aplicación de telecomunicaciones resulta compleja, apoyándose en el dinamismo de sus nodos y las amplias posibilidades de adaptación.

Uno de los modelos de comunicación más comunes en las redes DTN es aquel basado en nodos dinámicos. De esta manera, la red puede formarse por dispositivos que transportan la información y la envían a otros dispositivos cuando tiene lugar un encuentro físico. Esta estrategia se conoce como redes oportunistas y supone una potencial opción para acercar la comunicación a las áreas rurales aisladas. Los reducidos costes de inversión, así como de equipamiento de su infraestructura, compatibilizan su despliegue a través de dispositivos autónomos e independientes que pueden actuar como nodos [36]. Así, la información que se genera en la red puede ser transmitida mediante saltos hacia el elemento destino.

Actualmente, existen propuestas que exploran la utilidad de estas tecnologías en el panorama rural, investigando su potencial aplicación para servicios específicos de una manera asequible y sostenible [36, 35, 94, 39, 95, 42]. En estas propuestas, se estudia y evalúa el despliegue de implementaciones técnicas sobre una arquitectura DTN, alcanzando resultados favorables en términos de latencia y probabilidad de entrega. Como resultado, las redes DTN consolidan una técnica que favorece su utilidad en entornos complejos, implicando una inversión económica reducida y aprovechando las posibilidades de las topologías dinámicas en estos contextos.

2.1.3.2. Soluciones basadas en infraestructuras desplegadas

Existen propuestas que proporcionan acceso a Internet en entornos rurales haciendo uso de redes y recursos contextuales desplegados previamente en el contexto. Este es el caso particular de trabajos que proponen aplicar los protocolos de Internet sobre líneas de teléfono, el tendido eléctrico o las frecuencias vacías de la televisión. En este apartado se detallan las principales características y retos de cada uno de estos servicios.

Conexión por Línea Conmutada.

La red de telefonía fija se trata de una infraestructura ampliamente extendida a nivel global, incluyendo en las zonas rurales. Durante décadas, la utilización del canal de voz para transmitir información ha sido estudiado por las compañías de telecomunicaciones, buscando proporcionar acceso a Internet a través de la red de teléfonos [86]. Así, a pesar de las bajas velocidades que implica, algunas compañías todavía ofrecen estos servicios en zonas donde Internet no está disponible.

El funcionamiento de Internet por línea conmutada requiere la utilización de un módem que, conectado a un equipo, actúa como interfaz entre el dispositivo y el canal de voz. De esta manera, las instrucciones son transmitidas, así como recibidas e interpretadas, por el módem, que se comunica con el nodo remoto de Internet a través de la infraestructura de telefonía. Como resultado, resulta posible proveer de conexión aprovechando recursos ya equipados, conllevando a un importante ahorro económico en materia de inversión [77]. A pesar de que aún existen regiones que cuentan con estos servicios, la consolidación de las tecnologías móviles ha supuesto una reducción considerable en la presencia de estas alternativas. Del mismo modo, la baja velocidad de transmisión y los recurrentes periodos de latencia constituyen obstáculos difíciles de solventar [86]. No obstante, considerando el aprovechamiento de los recursos de esta técnica, puede tratarse de una alternativa válida para emprender comunicaciones simples y puntuales.

En las últimas décadas, surgieron alternativas como *Global System for Mobile Communication* (GSM) [96], conocido como la conexión 2G, o *General Packet Radio Service* (GPRS) [97], popularmente difundido como 2.5G. Estas tecnologías acercaban el acceso a Internet a los dispositivos móviles, ahorrando la presencia de un módem que actúa sobre el canal de

voz. Sin embargo, además de las limitaciones inherentes a su tecnología, especialmente contrastables en la calidad de servicio, las redes 2G, 2.5G e incluso 3G están siendo apagadas en muchos territorios, en detrimento de las nuevas redes 4G y 5G.

Internet sobre la Corriente Eléctrica.

El despliegue de Internet sobre la Corriente Eléctrica (*Power Lines Communications*, PLC) consiste en una solución que proporciona acceso a la red en áreas donde no existe una infraestructura dedicada para estas comunicaciones, pero sí que existe una red de suministro eléctrico [86]. Para ello, estas propuestas proponen el aprovechamiento de la ampliamente difundida red eléctrica para conectar los hogares con las estaciones de servicio y, posteriormente, a Internet. Así, la arquitectura consta de tres elementos principales: un router situado en el hogar del usuario, repetidores instalados en el tendido eléctrico y los nodos alojados en las subestaciones de transformación de la corriente eléctrica. Como resultado, esta solución permite altas velocidades en el acceso a Internet, aprovechando el camino conformado entre la red eléctrica y las poblaciones. Así, resulta una estrategia compatible con muchas regiones rurales que, a pesar de las características geográficas, cuentan con suministro de electricidad. Durante años, la propuesta ha permitido emprender múltiples proyectos piloto de esta tecnología. Sin embargo, existen diferentes obstáculos que complican su utilización, especialmente derivados de las restricciones legales.

Estudios recientes han demostrado que el uso de PLC genera fuentes de interferencias sobre frecuencias de comunicación externas [86]. Este es el caso particular de la red militar de radio, la cual, durante la producción de pruebas piloto, experimentó problemas de comunicación debido a la actividad de la red. Por otro lado, informes denotan que la velocidad de comunicación converge al alcanzar el gigabyte por segundo, situando el rendimiento por debajo del esperado [86]. Otra de las principales limitaciones es el coste de inversión. Aunque la red aprovecha una infraestructura consolidada para su funcionamiento, la explotación del PLC requiere adaptar la red con un conjunto de repetidores y equipamientos que encarecen notablemente el despliegue. Sin embargo, debido a la reciente relevancia que está gozando esta técnica, es posible que si las limitaciones legales se solucionasen, PLC se consolide como una alternativa óptima para los en-

tornos rurales.

Internet sobre las Bandas Blancas de la Señal de Televisión.

La señal de televisión se transmite a través de un conjunto de bandas de frecuencia que permiten la transmisión de ondas físicas desde torres de emisión hasta los hogares [98]. Con el objetivo de evitar interferencias en la señal, el espectro de la onda se completa con bandas de frecuencias sin utilizar. Estas bandas se conocen como espacios en blanco y pueden ser empleados para transmitir paquetes de Internet. Aprovechando que las frecuencias vacías cuentan con un amplio alcance y una significativa capacidad para propagarse a pesar de los obstáculos, estos recursos se convierten en una alternativa sólida para proporcionar conexión a Internet, conformando las conocidas como Bandas Blancas de la Señal de Televisión (*TV White Spaces*, TVWS) [86].

La arquitectura de las TVWS propone emplear una antena, con capacidad de conexión a Internet, que actúa como elemento intermedio entre la red global y los hogares. Para ello, este dispositivo emplea los espacios en blancos en la frecuencia de televisión para transmitir Internet de banda ancha a los hogares suscritos que, mediante otra antena, son capaces de emitir y recibir los paquetes de Internet. La propuesta ha sido explorada durante años, estudiando su potencial aplicación para las zonas rurales [99]. El aprovechamiento de una infraestructura consolidada supone un acercamiento sólido para reducir la brecha digital, logrando un rendimiento óptimo, con velocidades de transmisión altas [98]. No obstante, tal y como sucede con otras alternativas, existen limitaciones que están frenando la difusión de estas soluciones.

Estudios han demostrado que la aplicación de TVWS provoca interferencias con frecuencias cercanas, como los micrófonos inalámbricos [86]. También, las estrictas restricciones legales que existen sobre la explotación de las frecuencias de televisión plantean un complejo obstáculo. Como resultado, las limitaciones legales y las interferencias han conducido a la pérdida de relevancia de estas alternativas. Sin embargo, actualmente, existen múltiples proyectos piloto que están explorando sus utilidades en conexiones locales, así como en el acceso a Internet [98].

Tras recorrer detalladamente las alternativas principales de la literatura para ofrecer conexión a Internet en zonas aisladas, las redes DTN confor-

man una de las opciones más sólidas y viables entre las técnicas estudiadas. De esta forma, el siguiente apartado detalla las principales características de este modelo de comunicación, así como la potencial aplicabilidad para comunicar dispositivos en terrenos desconectados.

2.2. Las características de las redes oportunistas y su papel en entornos sin conexión a Internet

Las tecnologías inalámbricas estuvieron presentes desde los primeros pasos de las redes de comunicación. En la década de los años 1970, la reducción en el tamaño de los equipos motivó la investigación sobre el dinamismo dentro de las redes. La transmisión de información entre el extremo emisor y el receptor requiere establecer una ruta previa de nodos. Sin embargo, este periodo inauguró el planteamiento de que esta ruta podría ser dinámica, adaptándose a las condiciones de la red y evitando mantener un comportamiento fijo. Aunque estos avances han tenido un impacto en todas las tipologías de redes, consolidó un primer acercamiento hacia la concepción de las tecnologías ad-hoc. Como sucede en muchas otras materias científicas, los propósitos militares aceleraron especialmente la disponibilidad de recursos en la investigación de este tipo de redes. Con la intención de interconectar áreas tácticas sin la necesidad de una infraestructura de comunicación fija, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos concibió la Red de Radio Paquetes (*Packet Radio Network*, PRNET) [100]. Esta solución se basaba ampliamente en el protocolo ALOHAnet [101], aplicando *Carrier sense multiple access* (CSMA) para coordinar el acceso al canal de comunicación [100] y recurriendo a un enrutamiento basado en distancia para trasladar la información. Posteriormente, en los años 1990, las tecnologías inalámbricas terminaron de culminar un modelo de comunicación que permitía aprovechar los recursos de la red de una forma óptima mientras los nodos jugaban un papel protagonista en cada transmisión. Durante esta etapa surgieron soluciones que proponían la utilización de dispositivos móviles e independientes para formar una red de comunicaciones inalámbrica, sin precisar de una infraestructura previa y de una manera ágil [102]. Estos avances terminaron de asentar la concepción actual

2.2. LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES OPORTUNISTAS Y SU PAPEL EN ENTORNOS SIN CONEXIÓN A INTERNET

de estas redes, sirviendo como fundamento para otras múltiples filosofías de comunicación, caracterizadas siempre por una capacidad de operación dinámica y descentralizada. En el presente apartado se estudian en detalle las redes ad-hoc, así como su taxonomía, hasta llegar a las redes DTN y a su subtipo oportunista.

2.2.1. Características y Retos de las Redes Ad-hoc

En contraposición a la comunicación basada en una infraestructura fija, existen redes que proponen una topología autónoma. De esta forma, las comunicaciones entre dispositivos tienen lugar a través de una red distribuida, soportada exclusivamente por los participantes activos en las transmisiones [103]. Este tipo de arquitecturas se agrupan bajo el concepto de redes sin infraestructura, o *infrastructure-less networks*, encontrando su máxima expresión en las redes ad-hoc. Este modelo de comunicación basa su funcionamiento en un conjunto de nodos de naturaleza dinámica y cambiante, planteando una solución sólida para la comunicación de dispositivos dentro de un área concreta.

Las redes ad-hoc se componen de un conjunto de dispositivos que actúan como nodos independientes, enviando y recibiendo información sin precisar de un elemento central que actúe como servidor o coordinador [103]. Esta característica permite un despliegue ágil de los recursos, precisando únicamente de dispositivos capaces de enlazarse mediante una interfaz inalámbrica o cableada. El carácter dinámico y autónomo de estas soluciones las convierte en recursos eficaces para necesidades de comunicación puntuales y específicas. Como resultado, las características más relevantes de estas redes se pueden concentrar en cinco puntos [104, 103].

- La organización de los nodos sigue una Topología Dinámica. Los nodos que comprenden la red consolidan dispositivos autónomos e independientes. De esta forma, cada uno cuenta con un comportamiento individual que puede involucrar desplazamientos físicos y cambios que no dependen de otros componentes de la red, consolidando así su naturaleza dinámica y cambiante.
- Comunicación multisalto. La comunicación entre los extremos de la comunicación, emisor-receptor, tiene lugar a través de enlaces entre

los nodos, de manera que la información se extiende a través de los componentes de la red. Esta propagación se adecúa a las características de comunicación de cada nodo, así como a su rango de alcance y velocidad.

- No existe una infraestructura de red. Las redes ad-hoc no precisan de una infraestructura fija de red. Por el contrario, la colaboración de los nodos autónomos permite la implantación de comunicaciones heterogéneas en las que conviven múltiples protocolos, interfaces y procesos.
- Ancho de banda limitado. La utilización de enlaces inalámbricos puede conducir a un ancho de banda limitado para las comunicaciones, tanto en factores de velocidad como de alcance. La ausencia de una infraestructura fija delega la responsabilidad de las transmisiones a los propios nodos, los cuales pueden resultar propensos a interferencias, retrasos o desconexiones.
- Uso de Baterías. La naturaleza autónoma de los nodos que conforman las redes ad-hoc motiva el uso de baterías para alimentar su funcionamiento. De esta manera, es posible satisfacer las necesidades de independencia y dinamismo de los componentes de la red, planteando, a su vez, la necesidad de optimizar el consumo de energía.

Las características detrás del funcionamiento de las redes ad-hoc conducen, en muchos casos, a un conjunto de desafíos que resultan inherentes a su aplicación. De esta manera, existen diferentes aspectos críticos que condicionan su funcionamiento. A continuación, se detallan los retos más relevantes [104, 103].

- Enrutamiento efectivo. Las redes ad-hoc siguen una filosofía multisalto para trasladar la información entre nodos que no están en contacto directo. De esta manera, existe la necesidad de aplicar una estrategia de enrutamiento que comunique los extremos de una forma eficaz y eficiente. Así, la técnica de transmisión de la información debe satisfacer las necesidades de entrega de la información, así como de latencia, mientras se ajusta al ancho de banda disponible y a la batería de los nodos.

2.2. LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES OPORTUNISTAS Y SU PAPEL EN ENTORNOS SIN CONEXIÓN A INTERNET

- Consumo de energía. El comportamiento independiente de los nodos de la red hace que la utilización de baterías sea un requisito. Sin embargo, este factor exige una gestión eficaz del consumo, ya que el agotamiento completo de la batería significaría la inutilización del nodo dentro de la red. Para ello, deben existir mecanismos que consideren el consumo como una variable relevante dentro del enrutamiento. Actualmente, la mejoría en la independencia de los dispositivos móviles ha conducido a asentar la viabilidad técnica de estas implementaciones.
- Seguridad. Las comunicaciones inalámbricas resultan recurrentes en las implementaciones ad-hoc. De esta manera, su potencial vulneración con ataques activos o pasivos es una realidad. Sin embargo, el asentamiento de las redes celulares ha motivado importantes avances en materia de seguridad que favorecen la implementación de comunicaciones seguras.
- Calidad de Servicio (*Quality of Service*, QoS). La calidad de servicio es una de las dimensiones de la comunicación más relevantes para los usuarios de las redes, ya que resume el conjunto de características que dotan a las transmisiones de un rendimiento satisfactorio. En el caso de las redes ad-hoc, garantizar un ratio de pérdida de mensajes bajo, así como unos niveles de latencia reducidos, constituyen algunos de sus principales retos. Sin embargo, las características dinámicas y cambiantes en la topología y en los nodos implican especiales dificultades para garantizar QoS.
- Escalabilidad. Adaptar el rendimiento de la red al número de usuarios que intervienen puede resultar un reto, ya que los incrementos en el tráfico, sin aumentar los recursos de la red, pueden conducir a la inestabilidad de los nodos.

Las redes ad-hoc proponen un modelo de comunicación que, a pesar de los retos inherentes a su aplicación, proporcionan un elevado nivel de adaptación y heterogeneidad que motiva su despliegue en múltiples contextos y escenarios. Este factor conduce a que esta filosofía de comunicación haya dado pie a numerosos tipos diferentes de redes. Atendiendo a una

taxonomía general de estas soluciones, el siguiente subapartado detalla los diferentes tipos de redes ad-hoc, incluyendo las aplicadas en el presente trabajo de tesis.

2.2.2. Taxonomía de las Redes Ad-hoc

Las características de adaptación, dinamismo y variabilidad han conducido a que las redes ad-hoc se hayan consolidado como la base de múltiples modelos de comunicación. Su adaptación a las necesidades del escenario donde se despliegan sigue siendo, a día de hoy, su principal característica. A continuación, se detallan las tipologías de redes ad-hoc más relevantes, atendiendo a una taxonomía general [103].

- Red Móvil Ad-Hoc. Popularmente conocidas como *Mobile Ad-Hoc Networks* (MANETs), este tipo de redes se caracterizan por estar formadas por dispositivos móviles. Su historia está íntimamente ligada al propio desarrollo de las comunicaciones ad-hoc y consolidan uno de sus referentes. Los dispositivos móviles que componen la red operan de manera independiente y autoorganizada, conformando un esquema dinámico en el que los elementos pueden desplazarse o desconectarse. Como resultado, se convierten en arquitecturas óptimas para aplicaciones destinadas a comunicaciones en espacios concretos, así como para servicios ubicuos que pretendan pasar desapercibidos para el usuario. De esta forma, destacan las *Personal Area Network* (PAN), subtipos de MANET que mantienen un rango de alcance limitado [105].
- Redes Vehiculares Ad-Hoc. Tal y como se describe en el término en inglés, *Vehicular Ad-Hoc Networks* (VANETs), los nodos de este tipo de redes se corresponden con vehículos. La arquitectura de comunicación mantiene los principios de descentralización y dinamismo de las redes ad-hoc, permitiendo la interacción entre automóviles y elementos fijos en las proximidades de las carreteras. Para emprender las comunicaciones se emplea el protocolo 802.11p [106], alcanzando un rango de distancias que oscilan entre los 100 y los 900 metros. Como resultado, las redes VANET permiten el despliegue de diferentes aplicaciones, ya estén orientadas a la seguridad o al entretenimiento.

2.2. LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES OPORTUNISTAS Y SU PAPEL EN ENTORNOS SIN CONEXIÓN A INTERNET

De esta forma, utilidades críticas como la detección precoz de colisiones, notificaciones de cambio de carril y avisos de proximidad a otros vehículos son algunas de las posibilidades que ofrecen en el ámbito de la seguridad vial [104]. Estas funciones exigen un procesamiento en tiempo real de los datos, así como un flujo de transmisiones entre los vehículos. Por otro lado, también sirve como soporte para comunicaciones enfocadas al pago de peajes o al infoentretenimiento [104].

- *Flying Ad-Hoc Networks* (FANETs). Pudiendo agruparse como un subtipo de las redes VANETs, las FANETs proponen el uso de dispositivos aéreos para construir una red dinámica de comunicación. Para ello, dispositivos como drones o Vehículos Aéreos sin Tripulación (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) pueden comportarse como nodos [87]. Las ventajas de este tipo de soluciones residen principalmente en la movilidad con la que cuentan, así como su potencial conexión con otros servicios y dispositivos como satélites que actúen como *gateways* de la información. Por un lado, la utilización de antenas de alto alcance facilita la comunicación entre los propios nodos y con las estaciones base, mientras que, por otro lado, las posibilidades de desplazamiento permiten la formación de topologías que maximicen los rangos de alcance. No obstante, este tipo de redes encuentra en el consumo de energía una de sus principales limitaciones, ya que los nodos se alimentan a través de una batería que debe satisfacer las altas exigencias de movilidad y transmisión.
- Redes de Sensores Inalámbricos Ad-Hoc. Conocidas como *Wireless Sensor Networks* (WSN), se trata de un subtipo de redes ad-hoc íntegramente compuesto por sensores y actuadores [103]. Estos dispositivos operan de manera autónoma, emprendiendo procesos de medición y transmitiendo la información a través de comunicaciones entre los propios dispositivos. La red puede emplear un elemento central como salida de la información, permitiendo conectar así el conjunto de nodos con otras redes. Estas soluciones tienen la particularidad de que los dispositivos que la componen pueden ser dispositivos IoT, los cuales operan de manera independiente. Como resultado, se trata de una potencial aplicación para entornos altamente digitalizados, heterogéneos y distribuidos.

La amplia capacidad de las redes ad-hoc para adaptar su funcionamiento al contexto favorece su implantación en escenarios donde las redes basadas en TCP/IP no resultan aplicables. Para proporcionar acceso a Internet en una zona concreta, se requiere del despliegue de un conjunto de infraestructuras que posibiliten las comunicaciones. En ocasiones, debido a las características y circunstancias de los territorios, existen obstáculos que impiden o complican la instalación y el equipamiento de estos recursos. Ante estas situaciones, existe una tipología de redes, subtipo de las ad-hoc, que precisamente se enfoca en proporcionar mecanismos para transmitir información en estos entornos. Dichas soluciones se conocen como Redes Tolerantes al Retardo, o DTN.

La relación entre las redes ad-hoc y las redes DTN resulta especialmente íntima, ya que mantienen los mismos principios de autonomía descentralizada, recurriendo a las tecnologías inalámbricas como el principal motor de las comunicaciones. Como resultado, es posible determinar una misma taxonomía para las redes DTN, ya que las soluciones basadas en MANETs, VANETs, FANETs o WSN, dependiendo de sus aplicaciones, pueden resultar compatibles con la tolerancia a la latencia. El siguiente apartado detalla la arquitectura y funcionamiento de las redes DTN, relacionando su funcionamiento con la propuesta de la tesis.

2.2.3. Redes Tolerantes al Retardo

Las redes DTN se fundamentan en asumir la desconexión de los nodos que integran la red [10]. Esta característica permite su despliegue en un gran número de entornos en los que las redes tradicionales no son aplicables, como zonas rurales aisladas, comunicaciones en el espacio, transmisión de datos en contextos subacuáticos, envío de información en zonas de conflictos bélicos o entornos en los que ha acontecido un desastre natural. En todos estos casos, la comunicación permanente entre nodos de una red no está garantizada, por lo que resulta imperativo asumir tiempos de espera y desconexión entre ellos. Esto se traduce en la necesidad de equipar los nodos de la red con la posibilidad de almacenar de manera persistente la información que deben transmitir. De esta forma, cuando un nodo de la red no es capaz de enviar los mensajes, los datos permanecen almacenados hasta que es posible entablar la comunicación. Como resultado, es posible

2.2. LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES OPORTUNISTAS Y SU PAPEL EN ENTORNOS SIN CONEXIÓN A INTERNET

mitigar las consecuencias de la falta de una infraestructura permanente y estable a través de la aplicación de redes DTN.

2.2.3.1. Arquitectura

Las redes DTN proponen un modelo asíncrono de comunicación para aquellas situaciones en las que no es posible redirigir el tráfico de datos de una forma fluida y constante. Para ello, se recurre a tres tipos diferentes de nodos [10, 107]: emisor, intermedio y destino. El primero de todos se encarga de generar nueva información dentro de la red hacia el destino, transmitiendo los datos a las entidades intermedias. Los nodos intermedios actúan como puente entre las transmisiones del emisor y el receptor, aplicando estrategias de enrutamiento. Finalmente, el nodo destino actúa como *gateway* de la red, emprendiendo conexiones con otras redes o directamente procesando la información recibida. Esta comunicación se fundamenta en la filosofía *store-carry-forward*, la cual da pie al funcionamiento de las redes DTN y se extiende a todos los integrantes de la red.

El proceso *store-carry-forward* se desarrolla cuando un nodo recibe o genera nueva información, la guarda (*store*) y carece de potenciales conexiones disponibles [107]. Como resultado, el dispositivo mantiene los datos almacenados (*carry*) hasta que se conecta con un potencial nodo y transfiere la información (*forward*). Este proceso, representado en la Figura 2.1, es posible a través de una arquitectura que posibilita el almacenamiento sistemático de los datos pendientes de transmitir. Para ello, los nodos de la red DTN, además de contar con las capas de aplicación, transporte, red, enlace y física (Figura 2.2); definen una capa adicional denominada *Bundle Protocol*, la cual actúa como *buffer* y gestor íntegro de los datos pendientes de transmitir.

La capa *Bundle* implementa los mecanismos para emprender la gestión completa del ciclo *store-carry-forward*. Su definición está descrita en las diferentes formalizaciones de las redes DTN [107] y vela por garantizar que la custodia y transferencia de la información sea correcta. Para ello, sus labores se centran en la gestión de la prioridad de los mensajes, así como su acomodamiento al espacio disponible, emprendiendo procesos de fragmentación si es preciso. También, se encarga de enrutar los datos, determinando su destino a través de los campos de control de los mensajes y

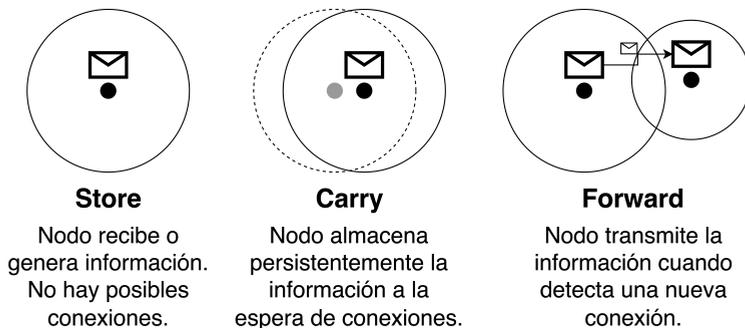


Figura 2.1: Pasos en el proceso store-carry-forward.

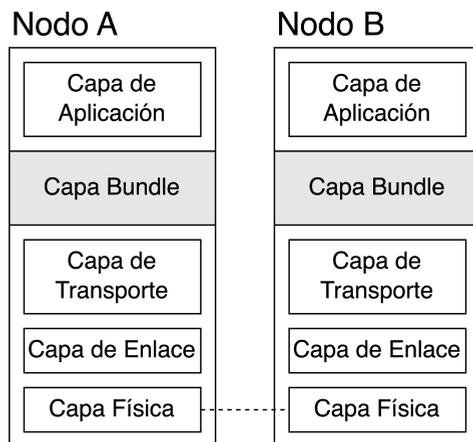


Figura 2.2: Capas de comunicación involucradas en la arquitectura DTN.

aplicando las políticas de comunicación definidas. Además, la capa *Bundle* se encarga de aplicar los mecanismos de seguridad que buscan garantizar la integridad, privacidad y confidencialidad de los datos. En definitiva, esta capa acapara la gestión íntegra de las decisiones de transmisión, así como de su ejecución efectiva durante los encuentros. De esta manera, las redes DTN dependen activamente de los contactos que sucedan durante la transmisión de la información. Así, los encuentros se identifican como el potencial motor de esta técnica.

2.2. LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES OPORTUNISTAS Y SU PAPEL EN ENTORNOS SIN CONEXIÓN A INTERNET

Las redes DTN dependen activamente de los potenciales encuentros que los nodos experimentan durante las transferencias de datos. Estos eventos se denominan “contactos” y se pueden definir como oportunidades de comunicación, debido a que constituyen el principal aliciente para hacer llegar la información originada por un emisor hacia un nodo de tipo *gateway* o destino. De esta forma, dependiendo de la manera en la que tienen lugar los contactos entre dispositivos, se pueden identificar diferentes tipos de comunicación [107].

- Encuentros persistentes. Son aquellos contactos que están disponibles siempre. La comunicación entre las entidades es fluida y favorece un entorno de baja latencia. Un ejemplo de este tipo de comunicación podría ser una conexión de banda ancha de Internet.
- Encuentros bajo demanda. Se tratan de contactos que se emprenden cuando se lleva a cabo una solicitud de estos, permaneciendo mientras tanto como no disponibles. Una posible solución de este tipo son las comunicaciones de Internet basadas en la línea telefónica de voz, dial-up, las cuales, desde el punto de vista del usuario, permanecen inactivas hasta que se solicitan.
- Encuentros intermitentes programados. Son aquellos contactos que suceden en un momento y duración programado. Un ejemplo de este tipo de transmisiones podría ser las conexiones con un satélite de órbita baja con trayectoria conocida.
- Encuentros intermitentes oportunistas. Este tipo de encuentros constituyen un subtipo en sí mismos de redes DTN debido a las particularidades de comunicación que implican. Los encuentros oportunistas se tratan de aquellos contactos de comunicación que tienen lugar de manera aleatoria e inesperada entre nodos de la red. Ejemplos de este tipo de transmisiones podrían darse entre un dispositivo que anuncia su presencia para establecer comunicación al recorrer una calle o la de un *Bluetooth Beacon* [108] esperando dispositivos a su alrededor.
- Encuentros intermitentes predichos. Se tratan de un conjunto de encuentros similares a los programados, pero con la particularidad de

que no existe una planificación previa para los contactos, sino que estos pueden ser predichos con base en un patrón de apariciones previo. De esta manera, se pueden emprender estimaciones para el momento y duración más propicio para establecer contacto.

Entre estos tipos, los encuentros oportunistas constituyen uno de los mecanismos más globales de todos. La filosofía de contactos oportunistas permite la implantación de redes DTN prácticamente en cualquier escenario. De esta manera, conforman una potencial posibilidad para comunicar sistemas distribuidos en entornos rurales, permitiendo el asentamiento de soluciones que responden ante las demandas de estos territorios.

2.2.3.2. Redes Oportunistas

Las redes oportunistas extienden la filosofía de comunicación de las redes DTN (Figura 2.3) a través de una dinámica que reduce las transferencias de información a los encuentros aleatorios que suceden entre los nodos dentro de la red [109]. Esto implica que las comunicaciones dependen activamente de factores como la movilidad, el número de nodos en la red, los contactos que tienen lugar entre ellos y su duración. En definitiva, las redes oportunistas constituyen una aproximación sólida para la transmisión de información en contextos donde no es posible desplegar soluciones de comunicación estables. Las redes oportunistas emplean la misma arquitectura que las redes DTN, incluyendo la capa de *Bundle*, destinada a la gestión de las operaciones store-carry-forward. Sin embargo, las limitaciones inherentes a la comunicación basada en encuentros puntuales implica una gestión más precisa de los recursos de los nodos, así como de las comunicaciones. De esta manera, los algoritmos de enrutamiento juegan un papel fundamental en las comunicaciones oportunistas, planteando un rol esencial que debe satisfacer las transmisiones requeridas mientras vela por la estabilidad de los nodos de la red [109]. En el siguiente apartado se detallan las características particulares de los algoritmos de enrutamiento oportunista, alineando su papel con las contribuciones propuestas en el trabajo de tesis.

2.2. LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES OPORTUNISTAS Y SU PAPEL EN ENTORNOS SIN CONEXIÓN A INTERNET



Figura 2.3: Agrupamiento de las redes oportunistas en el contexto de la comunicación ad-hoc.

2.2.3.3. Taxonomía de los Algoritmos de Enrutamiento Oportunistas

La transmisión de información en las redes oportunistas tiene lugar durante los contactos que los nodos experimentan. Estos encuentros responden a una naturaleza no determinista, de manera que constituyen eventos importantes para la comunicación en la red. Para ello, cada nodo cuenta con la responsabilidad de gestionar sus procesos de comunicación, aplicando una filosofía *store-carry-forward* a través de su capa *Bundle*. Como resultado, las transmisiones de información se restringen a los contactos que tengan lugar entre los nodos, por lo que la movilidad de los componentes, así como su colaboración, resultan elementos esenciales para el funcionamiento [110]. Sin embargo, la clave de la comunicación en las redes oportunistas es el algoritmo o estrategia de enrutamiento que se aplique. De esta manera, el presente apartado, siguiendo la especificación de la Figura 2.4, agrupa los protocolos de encaminamiento de la literatura en seis grupos diferentes según la técnica que aplican [110].

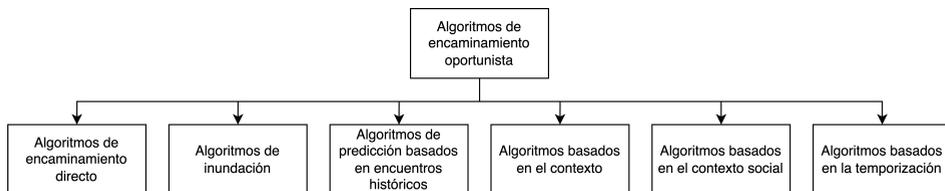


Figura 2.4: Taxonomía de los algoritmos de encaminamiento oportunista.

1. Algoritmos de encaminamiento directo. Conocidos popularmente como *Direct Protocols*, agrupan el conjunto de algoritmos que basan su funcionamiento en transmitir únicamente una copia de la información. De esta manera, destacan soluciones como *Direct Transmission* o *First Contact*, los cuales aplican esta filosofía junto con restricciones adicionales [110]. En el primer caso, la comunicación únicamente tiene lugar entre los nodos emisores y receptores, sin implicar elementos intermedios. Por otro lado, *First Contact* propone el envío directo de la información al primer nodo que sea contactado.
2. Algoritmos de inundación. Popularmente conocidos como *Flooding protocols*, estas soluciones proponen que los nodos que portan datos transmitan la información a todos los encuentros que detecten. Como resultado, estas soluciones implican una alta replicación de los mensajes y también un elevado uso del ancho de banda de la red.
3. Algoritmos de predicción basados en los encuentros históricos. Este conjunto de protocolos, *Historical-based Prediction Protocols*, calculan la probabilidad de que los nodos contactados alcancen el elemento destino. Para ello, se emplea un registro de los dispositivos previamente alcanzados. Como resultado, se pretende reducir la replicación en la red y mejorar la probabilidad de entrega.
4. Algoritmos basados en el contexto. Además de emplear el conjunto histórico de nodos conectados, algunos protocolos alimentan las decisiones de encaminamiento a través de información contextual que permite entender en mayor medida las dinámicas de la red. Para ello, datos como la localización de los nodos, la velocidad y otros factores son considerados para determinar la elegibilidad de los encuentros.
5. Algoritmos basados en el contexto social. *Social Awareness-Based Protocols* son aquellos algoritmos de encaminamiento que aplican información sobre factores sociales para determinar el siguiente salto en la red. Estos datos suelen involucrar comportamientos humanos como los intereses sociales, los contactos o la popularidad.
6. Algoritmos basados en la temporización. Las comunicaciones oportu-

nistas implican un conjunto de valores temporales como tiempos de espera de los nodos o el *time-to-live* (TTL) de los mensajes.

Entre estos grupos, los últimos avances en materia de encaminamiento se identifican principalmente como soluciones que emplean información contextual, así como social, en la toma de decisiones. Este escenario ha sido especialmente propiciado por la mejora en los dispositivos móviles y sus capacidades pervasivas, permitiendo la ejecución de algoritmos cada vez más complejos y profundos. Considerando estos factores y el potencial papel de las redes oportunistas en el presente trabajo, el siguiente apartado resume las principales conclusiones de los antecedentes de la propuesta.

2.3. Conclusiones

El acceso a Internet en zonas rurales ha motivado líneas de investigación que buscan acercar la disponibilidad de red a pesar de los potenciales obstáculos. Estas técnicas se corresponden con una taxonomía que clasifica las propuestas en dos grupos, dependiendo de si requieren la implantación de nuevas infraestructuras o, por el contrario, aprovechando recursos contextuales. De esta manera, es posible comprobar cómo las propuestas que hacen uso de su propia arquitectura resultan en alternativas más prometedoras, interoperables y adaptables. Este es el caso particular de las redes de telefonía móvil y el Internet satelital, propuestas que han demostrado una relevante evolución y trayectoria, acompañadas de un rendimiento notable en contextos rurales. Sin embargo, estas soluciones implican un coste económico alto que limita su aplicación, especialmente para aquellos usuarios que no puedan permitirse afrontar los costes de suscripción, además de experimentar limitaciones en el uso de los datos.

En el caso de las técnicas que proponen el despliegue de Internet sobre infraestructuras ya erigidas como TVWS o PLC, los resultados obtenidos no conforman conclusiones sólidas. Durante los últimos años, prototipos y servicios comerciales se han implantado con una relevancia irregular. Las interferencias recurrentes en estos sistemas han supuesto importantes obstáculos, especialmente cuando afectan otras comunicaciones. Además, las limitaciones legales de los gobiernos, muy estrictas en algunos países,

ante el uso de frecuencias pueden conducir a serias dificultades en su aplicación real.

Como resultado, no es posible identificar una tecnología aplicable para todos los contextos rurales aislados, principalmente debido a la variedad de características individuales que intervienen en los contextos. Sin embargo, asumiendo las limitaciones en materia de calidad de servicio, las redes DTN plantean una alternativa sólida para la transmisión de información. El bajo coste de despliegue y mantenimiento de su infraestructura, esencialmente basada en topologías dinámicas que se adaptan a las circunstancias de la red, favorecen su aplicación en los contextos rurales. Del mismo modo, la posibilidad de combinar y emplear diferentes interfaces de comunicación, así como múltiples técnicas y tecnologías, ponen en valor su capacidad de resiliencia y compatibilidad con los entornos más extremos. En definitiva, las redes DTN pueden considerarse como la técnica más apropiada para los contextos rurales aislados.

Las redes DTN se caracterizan por consolidar un modelo de transmisión de información fundamentado en la comunicación asíncrona de los nodos de la red. Esta característica permite su operabilidad en entornos donde no es posible mantener una conexión entre enlaces de manera prolongada, así como contextos aislados o con alta latencia. Para ello, los nodos de la red mantienen una topología dinámica que permite la propagación de los datos mediante el uso de entidades intermedias. De esta forma, no se precisa de una infraestructura de red fija, ya que delega la comunicación en la autonomía e independencia de los nodos. Sin embargo, esta característica implica restricciones como el ancho de banda limitado que exige un uso intensivo de las baterías y de las fuentes de alimentación individuales de los dispositivos. De esta manera, el despliegue de redes DTN plantea un conjunto de retos.

Factores como el consumo de energía de los nodos y la necesidad de un enrutamiento efectivo intervienen significativamente a la hora de ofrecer un rendimiento óptimo en métricas de calidad de servicio. Del mismo modo, las limitaciones en la escalabilidad de la red y la seguridad, han obstaculizado la aplicación de esta técnica. No obstante, los avances en materia de computación de los dispositivos móviles, el aumento de sus capacidades técnicas y la innovación en algoritmos de comunicación, han permitido que las redes DTN adquieran especial relevancia en la actualidad. Como resul-

tado, se trata de un modelo de transmisión de información que se alinea satisfactoriamente con las premisas de la presente propuesta, consolidando un mecanismo activo para comunicar aplicaciones distribuidas.

Considerando estas conclusiones, el siguiente capítulo detalla cada uno de los componentes de la arquitectura propuesta, analizando el comportamiento de los módulos que componen la solución y detallando las relaciones que existen entre cada capa.

Capítulo 3

Arquitectura Oportunista para el Despliegue de Aplicaciones Edge-Fog-Cloud

“Incluso un mal café es mejor
que nada de café.”

David Lynch

El presente trabajo de tesis propone una arquitectura de comunicación basada en redes oportunistas que permite el despliegue de aplicaciones distribuidas en entornos IoT. La propuesta se fundamenta en el modelo Edge-Fog-Cloud para agrupar los componentes que integran las aplicaciones, favoreciendo la ejecución de sistemas distribuidos en múltiples tipos de contextos. Para ello, la arquitectura considera tres capas esenciales en su funcionamiento: la capa Edge, compuesta por el conjunto de sensores y equipos que generan información y emprenden acciones; la capa Fog, integrada por aquellos elementos que obtienen la información y son capaces de emprender tareas de procesamiento y comunicación con Internet; y, finalmente, la capa Cloud, compuesta por las entidades desplegadas de manera

remota, capaces de almacenar datos y emprender tareas pesadas. Este enfoque favorece la distribución de los sistemas, así como la adaptación de las aplicaciones a las características del contexto en el que se ejecutan. Esta particularidad, junto con la aplicación de las redes oportunistas y un enfoque sostenible, hacen posible que la arquitectura permita la comunicación de aplicaciones distribuidas en entornos aislados sin conexión, así como en contextos inteligentes donde resulta posible optimizar el intercambio de información.

La presente sección proporciona un recorrido íntegro sobre el funcionamiento de la arquitectura, detallando el rol de cada componente de la solución, así como los procesos de comunicación oportunista que tienen lugar entre ellos. Finalmente, se estudian los algoritmos de encaminamiento integrados en la arquitectura, ideados explícitamente para soportar la transmisión oportunista de la información.

3.1. Arquitectura

El funcionamiento de la arquitectura propuesta define como principal eje la comunicación de componentes integrados en un sistema distribuido. Para ello, la solución sigue un modelo basado en las capas del paradigma Edge-Fog-Cloud que agrupa los elementos según el rol que desempeñan en el sistema. La Figura 3.1 representa el conjunto de elementos que comprenden la arquitectura, definiendo las tres capas principales (Edge-Fog-Cloud), encargadas de generar información e interactuar con el contexto, transmitir los datos a Internet y coordinar las tareas, respectivamente. Cada una de estas capas se compone de nodos que pueden ser de dos tipos: nodo de la red oportunista (sin conexión a Internet) y nodo conectado a Internet. Esta conjunción permite identificar el papel de cada grupo en el despliegue de aplicaciones en áreas aisladas y en contextos inteligentes. Complementando esta representación, se incluyen los algoritmos de encaminamiento involucrados en la comunicación oportunista, así como la función del perfil virtual en el proceso. A continuación, se detalla el rol de cada elemento y proceso de la arquitectura, incluyendo los mecanismos de comunicación aplicados en la transmisión de información entre cada una de ellas.

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA OPORTUNISTA PARA EL DESPLIEGUE DE APLICACIONES EDGE-FOG-CLOUD

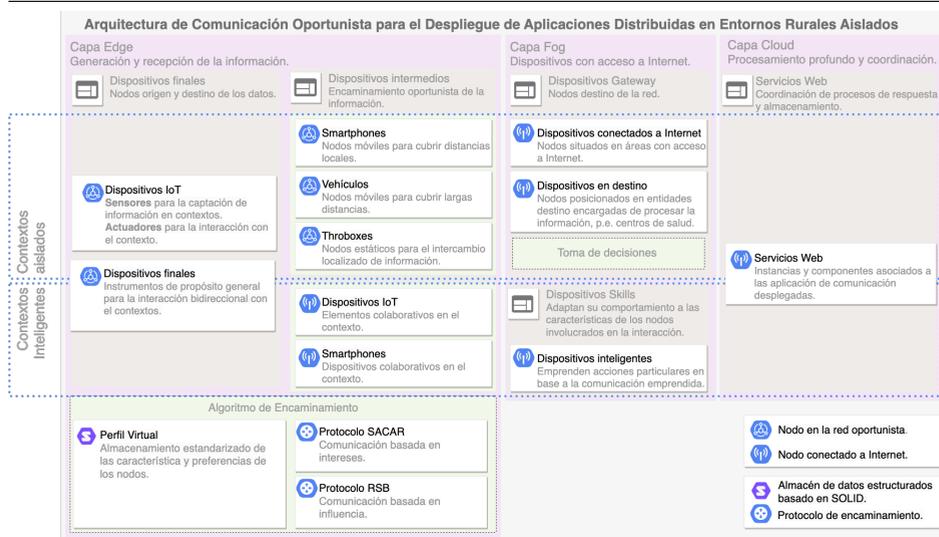


Figura 3.1: Arquitectura y componentes de la propuesta.

3.1.1. Capa Edge

La capa Edge se compone activamente de los dispositivos desplegados sobre un contexto en particular. Estos componentes se encargan de la generación de información en la arquitectura, así como de adaptar el entorno. La arquitectura asume la desconexión de estos elementos, permitiendo así su implantación en entornos en los que se carece de conexión a Internet. Con el objetivo de comunicar estos nodos con Internet, se definen como integrantes de una red oportunista que recurre a las capacidades autónomas de los dispositivos para trasladar la información hacia la capa Fog. Como resultado, se identifican dos tipos de componentes según el rol que desempeñan en la red: los nodos finales, encargados de interactuar con el entorno, así como generar y transmitir la información hacia la red oportunista; y los nodos intermedios, capaces de trasladar los datos hacia el nodo destino, conectado a Internet.

3.1.1.1. Nodos finales

Los nodos finales son aquellos encargados de generar información en la arquitectura, así como emprender acciones sobre el contexto a petición del sistema. Suelen tratarse de dispositivos IoT y se identifican tres tipos generales de componentes: sensores, actuadores y dispositivos de propósito general.

- **Sensores.** Agrupados bajo el concepto de IoT, estos dispositivos se encargan de generar información a partir del contexto. Consolidan una solución sólida para analizar la situación del entorno en el que se despliegan, permitiendo implementaciones complejas de aplicaciones distribuidas.
- **Actuadores.** Los dispositivos actuadores se encargan de emprender acciones sobre el contexto en el que se sitúan. Estos dispositivos tienen la capacidad de modificar parámetros del entorno a petición del usuario.
- **Dispositivos de propósito general.** Dentro de esta categoría se engloban aquellos nodos finales que desempeñan múltiples tareas en el contexto. Las funciones que proporcionan pueden identificarse como labores complejas que involucran un procesamiento autónomo e independiente al resto de la arquitectura. Ejemplos de este tipo de dispositivos son los sistemas embebidos o los *smartphones*.

La información generada por estas entidades es transmitida de manera oportunista a nodos intermedios usando un formato *JavaScript Object Notation* (JSON) [111]. Este esquema de representación de la información permite recopilar cada mensaje a través de una tupla de tres variables: tiempo, dispositivo e información (Figura 3.2). (1) El primer parámetro indica el tiempo en el que la información fue registrada por el dispositivo. Así, la hora y la fecha son especificadas en este campo. El valor dispositivo (2) identifica el equipo que ha generado la información, incluyendo su referencia y detalles de localización. Finalmente, el valor de la información a transmitir es indicado (3). Como resultado, el formato permite una identificación exacta de la fuente de datos y las potenciales mediciones o valores que genere.

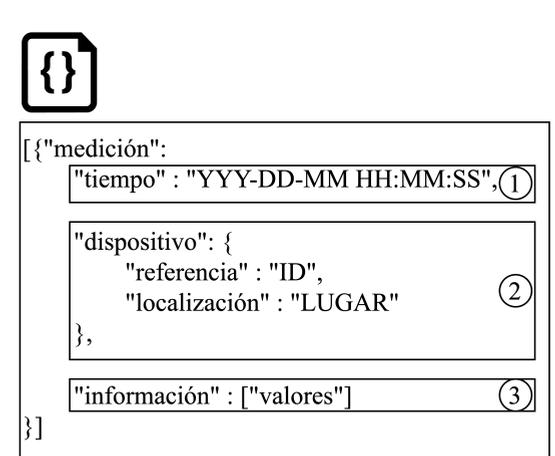


Figura 3.2: Formato en JSON de la información transmitida.

3.1.1.2. Nodos intermedios

En ocasiones, las capacidades de comunicación de los nodos emisores resultan limitadas debido a su naturaleza estática o a su reducida presencia en el contexto. De esta forma, es esencial para la arquitectura dotar el sistema con un conjunto de nodos intermedios que actúen como puente entre los nodos generadores de la capa Edge y los elementos conectados de la capa Fog. Para ello, se propone un conjunto de nodos que, a través de sus capacidades de desplazamiento y de las características distribuidas de las redes oportunistas, proporcionan un esquema de comunicación que enlaza el origen de los datos con la conexión a Internet.

La filosofía *store-carry-forward* de las redes oportunistas permite a los elementos intermedios hacer uso de los desplazamientos físicos, así como de la proximidad, para transmitir la información a los dispositivos del entorno. Esta mecánica permite que los datos sean comunicados desde los dispositivos de origen a los componentes de la capa Fog, definiendo así el denominado proceso de enrutamiento.

El proceso de enrutamiento se detalla en la Figura 3.3. Esta imagen representa dos líneas de tiempo diferentes a través de sendos colores: la línea temporal 1 está representada en azul, mientras que la línea temporal

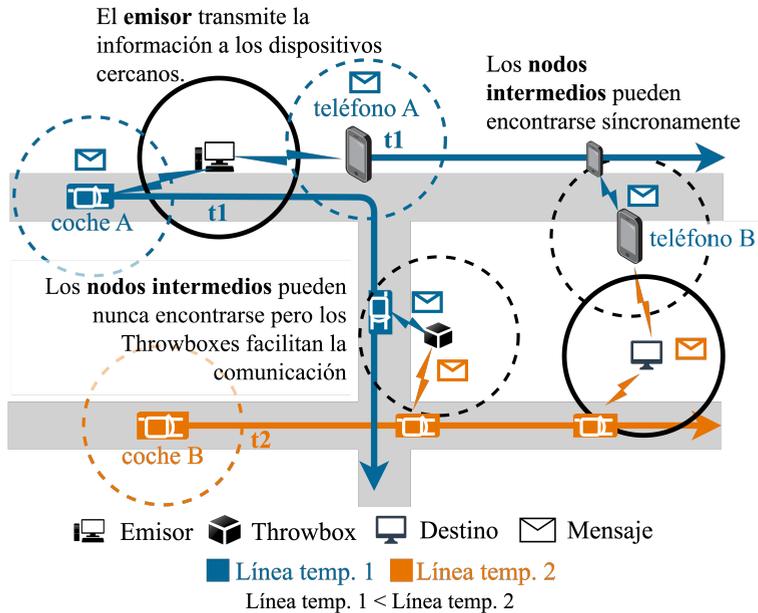


Figura 3.3: Ejemplo de enrutamiento con nodos intermedios.

2 se indica en naranja. La primera representa al emisor transmitiendo un mensaje a los dispositivos de su entorno, vehículo A y teléfono A. Ambas entidades se desplazan individualmente por el escenario, dando lugar a dos encuentros diferentes. Por un lado, vehículo A comparte la información que almacena con el *throwbox*. Por otro lado, el teléfono A encuentra otro dispositivo móvil, teléfono B, y copia los mensajes a él. Como resultado, se origina la segunda línea temporal, la cual representa cómo un vehículo B aparece y recibe la información desde el *throwbox*. Este vehículo se desplaza siguiendo una trayectoria que lo conduce al destino final de la información: el nodo Fog. Al mismo tiempo, el teléfono B alcanza también al destino y entrega la información que porta. El proceso de enrutamiento descrito depende activamente del algoritmo que se aplique, definiendo así las políticas que se siguen para transmitir la información entre los nodos.

La arquitectura propone tres tipos diferentes de nodos intermedios según el dispositivo con el que se corresponden: peatones, vehículos y *th-*

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA OPORTUNISTA PARA EL DESPLIEGUE DE APLICACIONES EDGE-FOG-CLOUD

throwboxes. La principal diferencia que radica entre estos dispositivos es su movilidad, así como el rango de alcance que tienen al desplazarse por el contexto. La Tabla 3.1 muestra las propiedades de las tres categorías, ordenadas según la distancia de alcance de la que gozan. A continuación, se detallan las características de cada uno de estos tipos.

Dispositivo	Modelo de Movilidad	Alcance mensajes
<i>Smartphone</i>	Movilidad limitada a áreas específicas con baja velocidad de desplazamiento	Áreas locales
Vehículos	Amplias capacidades de movilidad con velocidad de desplazamiento alta	Áreas regionales
<i>Throwboxes</i>	Estacionarios. Actúan como puntos de intercambio de mensajes	Fijados en puntos concretos de zonas aisladas.

Tabla 3.1: Características de los nodos intermedios.

- **Peatones.** En la arquitectura, se consideran peatones aquellas personas que portan un *smartphone* o dispositivo móvil y que colaboran como nodos intermedios en la solución. Los *smartphones* cuentan con una amplia gama de tecnologías de comunicación que los convierten en elementos esenciales de la arquitectura. Para ello, se precisa que los teléfonos tengan instalada una aplicación que permita gestionar los procesos de comunicación oportunista. De esta manera, la aplicación permite la colaboración del dispositivo como nodo de la red, emprendiendo así procesos de transmisión de información con otros peatones, así como vehículos, *throwboxes*, fuentes de datos o destinos. La aplicación integrada en los *smartphones* permite la definición del algoritmo de enrutamiento que se aplica. Como resultado, se emprenden procesos de comunicación ajustados a las restricciones y políticas que define el protocolo.
- **Vehículos.** La principal característica de los nodos intermedios vehiculares es su capacidad para recorrer largas distancias. Esta particularidad resulta especialmente favorable para trasladar información a través de áreas que carecen de conexión a Internet hasta alcanzar puntos donde la cobertura resulta accesible. La representación del nodo dentro de la red oportunista puede darse mediante dos maneras: 1) emplear el *smartphone* del conductor o de alguno de los pasajeros,

o 2) equipar el vehículo con la tecnología para recibir, almacenar y transmitir información. Cualquiera de estas dos opciones puede integrarse en la arquitectura. Los avances en las redes vehiculares ad-hoc (VANETs) han consolidado a los vehículos como referentes de la comunicación en contextos distribuidos. De esta manera, a través de una antena de amplio alcance, así como la instalación de una unidad de procesamiento de la comunicación, un vehículo puede proporcionar una sólida función como nodo de la solución.

- **Throwboxes.** Los *throwboxes* son dispositivos estáticos autónomos instalados en las orillas de carreteras e intersecciones que reciben, almacenan y transmiten información de manera oportunista a los encuentros que detectan. De esta manera, los *throwboxes* permiten establecer comunicaciones asíncronas entre dispositivos, permitiendo compartir información entre elementos que nunca se han encontrado. La principal particularidad de los *throwboxes* reside en su definición exclusiva como componente de la red, ya que, a diferencia de los *smartphones* o los vehículos, estos no desempeñan funciones adicionales a la comunicación. Este hecho motiva unos altos requisitos en cuanto a su disponibilidad, así como rendimiento, conduciendo a la necesidad de dotar los *throwboxes* de una naturaleza sostenible.

Las posibilidades de los *throwboxes* para almacenar y transmitir información a los dispositivos del entorno convierten su localización en una característica fundamental. Considerando que su despliegue está especialmente orientado para cubrir comunicaciones en entornos rurales aislados, resulta preciso equipar estos dispositivos de corriente eléctrica. No obstante, la disponibilidad de infraestructura de energía no resulta siempre favorable, por lo que estos elementos son alimentados a través de una placa solar conectada a una batería.

De manera complementaria a los contextos aislados, la arquitectura también cuenta con nodos intermedios que actúan como enlaces en contextos inteligentes. Estos equipos, a pesar de contar con conexión a Internet, llevan a cabo procesos *store-carry-forward* para comunicar nodos finales con dispositivos situados en su mismo entorno. Esta lógica permite agilizar las transmisiones de datos que dependen de entidades externas, optimizando la comunicación y ahorrando el despliegue de equipos adicionales. Para

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA OPORTUNISTA PARA EL DESPLIEGUE DE APLICACIONES EDGE-FOG-CLOUD

ello, los **dispositivos IoT** y los *smartphones* conforman los principales componentes involucrados en esta tarea.

3.1.2. Capa Fog

Los elementos de la arquitectura que cuentan con conexión a Internet se corresponden con la capa Fog y se identifican como los potenciales destinatarios de los datos que se transmiten en la red oportunista. Los dispositivos, denominados *gateways*, actúan como elementos autónomos que reciben la información y la transmiten a Internet, siendo conocidos e identificados por el resto de la red. De esta manera, la principal característica de estos componentes es su estable conexión con la red, así como su capacidad para emprender procesamientos sobre los datos que reciben. Como resultado, cuando la información es recibida, dependiendo del funcionamiento de la aplicación, el propio elemento *gateway* puede elaborar una respuesta, emprender una acción sobre el contexto o comunicar los datos con las instancias de la capa Cloud. Así, la correcta situación física de este tipo de nodos resulta esencial para garantizar la eficacia de las comunicaciones, dependiendo, al mismo tiempo, de las finalidades a las que se destinen los nodos Fog. Este comportamiento resulta extendido en los entornos inteligentes, donde el uso de la arquitectura persigue agilizar la comunicación entre dispositivos que se encuentran físicamente próximos. De esta manera, los dispositivos de esta capa, conocidos como nodos *Skills*, actúan como destinatarios de la red oportunista, proporcionando la posibilidad de adaptar su comportamiento a las necesidades de los nodos finales.

3.1.3. Capa Cloud

Muchas aplicaciones precisan de tareas de comunicación remota para enlazar instancias a través de Internet, así como almacenar de manera global y persistente la información. Esto motiva el equipamiento de componentes que reciben información de la capa Fog para su procesamiento y almacenamiento. De esta manera, la arquitectura propone la utilización de una capa Cloud para emprender aquellas labores que impliquen un procesamiento más pesado de los datos, permitiendo recibir la información que

inicialmente fue generada desde dispositivos finales, tanto con contextos aislados como inteligentes.

3.2. Encaminamiento oportunista de la información

La comunicación de la información desde los dispositivos de la capa Edge hacia los nodos Fog es posible a través del uso de redes oportunistas. Este tipo de tecnología implica el aprovechamiento de los encuentros físicos que tienen lugar entre dispositivos para transmitir información hacia los nodos destino. Sin embargo, la puntualidad de los encuentros, así como su naturaleza aleatoria, plantea la necesidad de aplicar políticas que favorezcan de manera eficaz la comunicación, considerando factores contextuales para mejorar su rendimiento. Para ello, la arquitectura propuesta propone un conjunto de algoritmos de enrutamiento que buscan maximizar la calidad de servicio de las comunicaciones.

Las políticas y mecanismos que se proponen para las relaciones entre los nodos de la red oportunista se sustentan sobre el etiquetado de la información que se transmite. Los mensajes que se envían en la red oportunista siguen el formato descrito en el estándar de las redes DTN [107]. Sin embargo, esta arquitectura propone un conjunto de cambios adicionales que involucran tanto al formato de los mensajes como los mecanismos de almacenamiento de los nodos. Por un lado, se recurre a un campo adicional en los mensajes de la red que permite involucrar variables adicionales en la comunicación, así como etiquetar los mensajes con nomenclatura interna de los algoritmos de enrutamiento de la arquitectura. Como resultado, se trata un paso esencial para enriquecer los procesos de comunicación con variables y factores contextuales adicionales. Por otro lado, estos procedimientos no serían posibles sin equipar a los nodos con los recursos necesarios para permitir la adaptación del encaminamiento de la información. Por ello, el siguiente apartado analiza el concepto de perfil virtual y el rol que juega en las transferencias que tienen lugar en la arquitectura.

3.2.1. Perfil Virtual

Los nodos que intervienen en la red oportunista de la arquitectura, emisores, intermedios y destinatarios, cuentan con un perfil virtual que define su rol y comportamiento dentro de la arquitectura. Este componente se identifica como la implementación del protocolo *Bundle* y permite detallar los elementos que participan en la comunicación. Para ello, este perfil permite la definición individual de un conjunto de datos que recopilan el rol del dispositivo, así como el resto de aspectos de la comunicación utilizados por los protocolos de encaminamiento. El perfil virtual cuenta con una amplia capacidad de expresión, facilitando también la especificación de los datos personales del usuario que utiliza el dispositivo. Así, es posible constituir una entidad completa que represente las preferencias y características del dispositivo y del usuario dentro de un entorno inteligente. Este doble uso del perfil virtual permite una concepción más individual de los nodos, favoreciendo su integración en contextos donde el reconocimiento y la detección de características entre dispositivos resulta esencial. De esta manera, el perfil virtual define un componente relevante para la comunicación oportunista, sirviendo además de base para potenciales implementaciones que requieren un almacén de información privado y estructurado.

El proceso de comunicación oportunista recurre al perfil virtual como un elemento fundamental para la implementación de los protocolos de comunicación propuestos para la arquitectura. Tomando como base las posibilidades de esta herramienta, el presente trabajo de tesis introduce *Situational Adaptive Contextual Router* (SACAR) y *Refined Social Broadcast* (RSB), dos familias de algoritmos de encaminamiento que aplican el conocimiento contextual de los nodos para satisfacer las necesidades de comunicación. A continuación, los siguientes subapartados detallan el funcionamiento de cada uno.

3.2.2. Situational Adaptive Contextual Router

SACAR es una familia de algoritmos de enrutamiento que proporciona transmisión de información entre nodos de redes oportunistas. Evolucionado mediante los trabajos [42, 112, 34], SACAR define un conjunto de cuatro protocolos que parten de la idea de Red Contextual Virtual Oportunista

3.2. ENCAMINAMIENTO OPORTUNISTA DE LA INFORMACIÓN

(*Opportunistic Context-Virtual Network*, OCVN), concepto que define la utilización de nodos con preferencias similares para entablar las comunicaciones. De esta forma, las relaciones entre dispositivos afines se entienden como redes virtuales independientes que se forman en el momento en el que existen encuentros. Las ideas detrás de OCVN son extendidas más adelante en el Capítulo 4, donde se estudia su potencial aplicación en la comunicación de dispositivos en entornos locales. Sin embargo, esta lógica resulta fundamental en la familia SACAR, bautizando al algoritmo de cabecera, SACAR OCVN.

SACAR OCVN, identificado como la implementación de cabecera de SACAR, propone un encaminamiento de la información basado en los intereses particulares de los nodos. De esta manera, cada mensaje que se transmite por la red se asocia desde el origen con un *topic* o tema, el cual es empleado para distinguir aquellos nodos intermedios que manifiestan interés por el *topic*. Así, el envío de los datos sucede únicamente entre aquellos elementos que están suscritos al tema del mensaje. Para emprender este procedimiento, se deben etiquetar los mensajes de la red con el *topic* al que se asocian, así como equipar los nodos intermedios con un perfil virtual que defina sus preferencias individuales [113]. Como resultado, es posible aplicar una política de enrutamiento que limite la información a los nodos interesados.

La Figura 3.4 ilustra el proceso de transmisión de información según los intereses de los nodos. Para ello, se identifican tres fases principales: 1) los dispositivos con perfil virtual se encuentran; 2) los perfiles virtuales son intercambiados; y, en el caso de que se detecte compatibilidad de intereses, 3) la información es replicada. Estas fases de interacción se basan en la colaboración de cinco elementos principales: 1) el perfil virtual, 2) el buffer de mensajes, 3) La Interfaz de Programación de Aplicaciones (*Application Programming Interface*, API), 4) la aplicación de comunicación y 5) la tecnología Bluetooth. Estos elementos se representan en la Figura 3.5.

1. Perfil Virtual. SACAR OCVN recurre al perfil virtual de la arquitectura para almacenar los *topics* en los que el nodo intermedio está interesado. De esta manera, la información que recibe y transmite se limita a aquellos tipos de información en los que existe declarado un interés explícito. Como resultado, las comunicaciones tienen lugar

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA OPORTUNISTA PARA EL DESPLIEGUE DE APLICACIONES EDGE-FOG-CLOUD

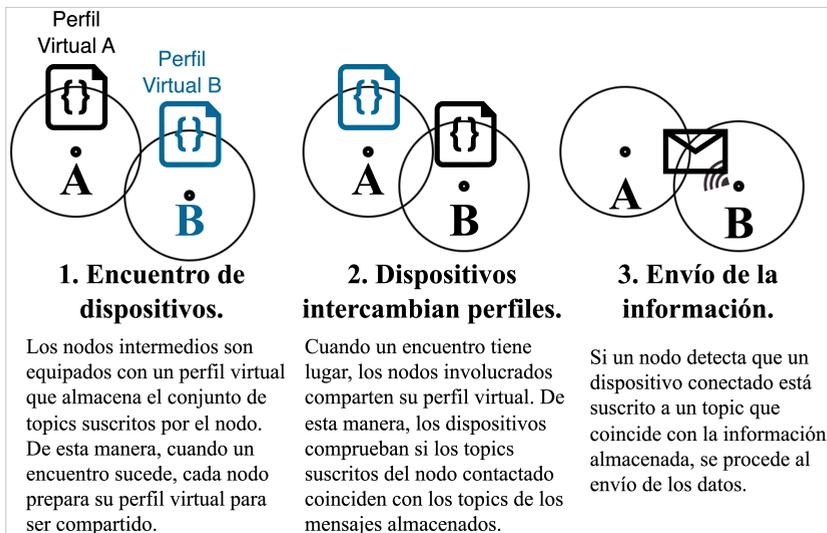


Figura 3.4: Proceso de reconocimiento entre nodos con SACAR OCVN.

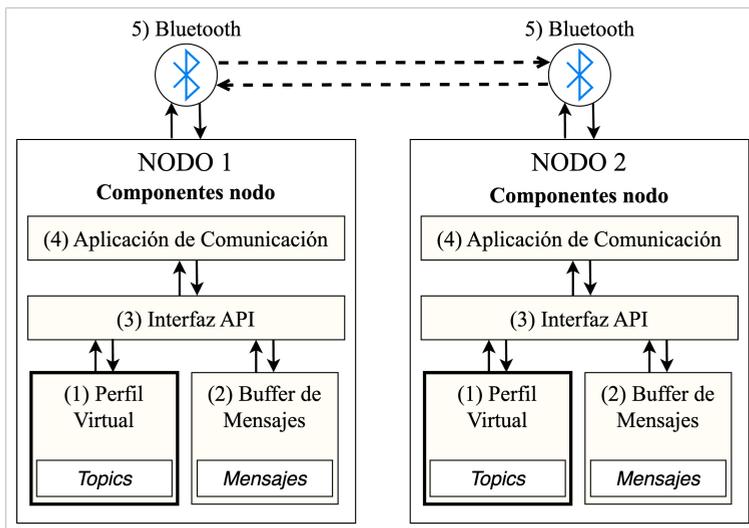


Figura 3.5: Componentes de SACAR OCVN.

3.2. ENCAMINAMIENTO OPORTUNISTA DE LA INFORMACIÓN

entre los nodos que comparten *topics*, favoreciendo las transmisiones entre entidades con las mismas preferencias.

2. Buffer de Mensajes. Este componente de los nodos se encarga del almacenamiento de los mensajes que ha generado o recibido. Así, es posible transmitir este contenido cuando el nodo experimenta un encuentro con un dispositivo interesado en el *topic* de la información. Para ello, los mensajes que se transmiten incluyen en su *payload* un conjunto específico de campos: identificador del mensaje, nodo de origen, nodo de destino y *topic* con el que se corresponde. Complementando estos datos, el campo de información integraría los datos que se están transmitiendo.
3. *Application Programming Interface* (API). Este elemento permite emprender interacciones entre la información almacenada en el perfil virtual y el buffer de mensajes. De esta manera, resulta posible manipular y consultar los datos almacenados por el nodo.
4. Aplicación de Comunicación. Este componente hace uso de la tecnología Bluetooth para descubrir aquellos dispositivos situados en el entorno del nodo, así como transmitir o recibir los mensajes. Sin embargo, el proceso de comunicación es compatible con cualquier otro protocolo de transmisión de información como 802.11n/ac/ax o 802.11p [114]. Con el objetivo de interactuar con los mensajes almacenados en el buffer, la aplicación hace uso de la API para consultar, añadir o eliminar la información almacenada.

SACAR OCVN proporciona un algoritmo de enrutamiento que prioriza los intereses individuales de los nodos. De esta manera, el protocolo permite compartir información cuando los dispositivos encontrados están interesados en la información. Como resultado, este mecanismo proporciona un funcionamiento apropiado para la transmisión de mensajes desde una entidad origen hasta el destino, alineando su filosofía con las características de comunicación de la arquitectura propuesta. Los procesos de computación requeridos hacen que la aplicación de SACAR OCVN sea viable en redes heterogéneas, en las que múltiples tipos de dispositivos colaboran. El Algoritmo 1 representa los pasos que el protocolo sigue para implementar el comportamiento descrito, siendo ilustrado en la Figura 3.6(a).

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA OPORTUNISTA PARA EL DESPLIEGUE DE APLICACIONES EDGE-FOG-CLOUD

Algorithm 1 SACAR-OCVN pseudocódigo

Require: Escenario IoT: \mathcal{D} , tiempo de simulación: T , frecuencia ω_t

- 1: **for all** node $d_i^{x_i y_i} \in \mathcal{D}$ **do**
- 2: $d_i^{x_i y_i}.escuchaConexion()$
- 3: **if** ω_t se activa **then**
- 4: **if** $G_i \neq \emptyset$ **then**
- 5: $\mathcal{N}_i \leftarrow d_i^{x_i y_i}.obtenerVecinos()$
- 6: **for all** Nodo vecino $d_j^{x_j y_j} \in \mathcal{N}_i$ **do**
- 7: **if** $(G_i) \cap (G_j \cup (S_j)) \neq \emptyset$ **then** \triangleright Solo se seleccionan aquellos nodos que comparten intereses
- 8: $m_i \leftarrow \{G_i, S_i\}$ \triangleright El mensaje se crea
- 9: $enviarMensaje(m_i, d_j^{x_j y_j})$
- 10: **end if**
- 11: **end for**
- 12: **end if**
- 13: **end if**
- 14: **end for** $t < T$

Los fundamentos de SACAR OCVN han originado la definición de algoritmos adicionales que dotan la filosofía de mecanismos alternativos para emprender las comunicaciones. A continuación, se describe el funcionamiento de estos protocolos.

3.2.2.1. Variaciones de SACAR OCVN.

Además de SACAR OCVN, la arquitectura integra tres protocolos de encaminamiento adicionales basados en los fundamentos de este y que pueden ser empleados para transmitir información entre nodos de la red oportunista. Estos mecanismos son compatibles con el algoritmo principal y conforman una alternativa para situaciones concretas. La filosofía que ofrecen se fundamenta en extender la lógica de SACAR OCVN. A continuación, se detallan los protocolos de SACAR-In Range (SACAR-IR), SACAR-Historical Contacts (SACAR-HC) y SACAR-Hybrid.

- **SACAR-IR** (Figura 3.6(b)): cuando un mensaje es transmitido por un nodo, antes de que el contenido sea creado y transmitido (paso

3.2. ENCAMINAMIENTO OPORTUNISTA DE LA INFORMACIÓN

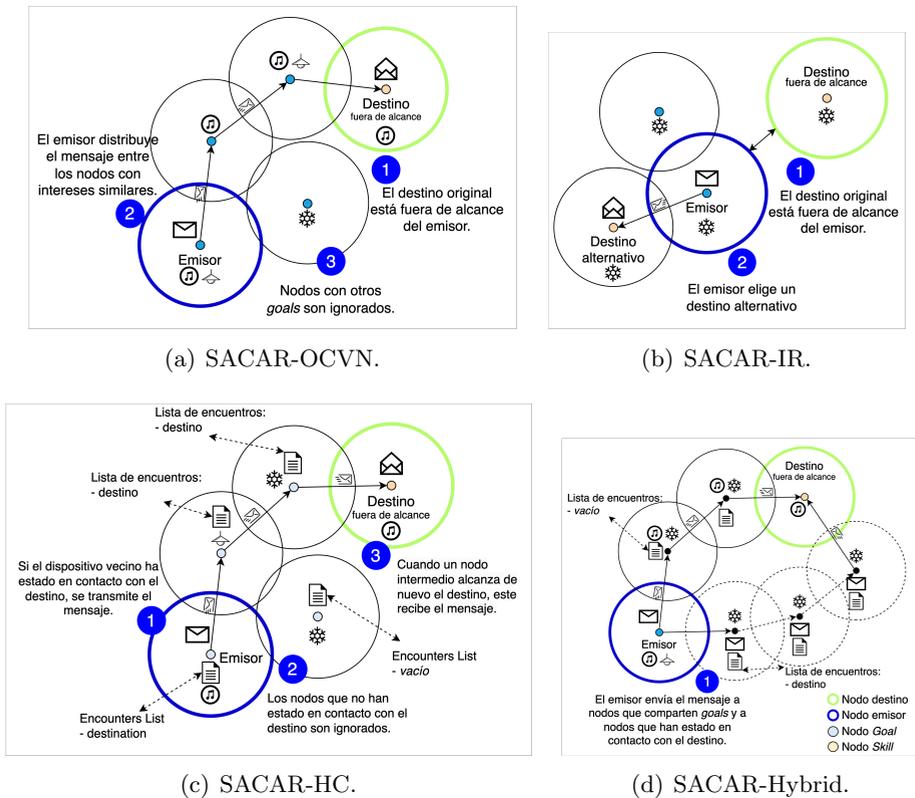


Figura 3.6: Comportamiento de los algoritmos SACAR.

1 en la Figura), este algoritmo emprende dos comprobaciones básicas: 1) comprueba si el nodo destino se encuentra entre el conjunto de conexiones del nodo y 2) comprueba si se ha transmitido algún mensaje previo. En el caso de que ambas condiciones se cumplan, el nodo emisor crea el mensaje y lo envía. Por otro lado, en caso de que el nodo destino no se encuentre entre el conjunto de conexiones, SACAR-IR busca dinámicamente nodos alternativos que puedan procesar y adaptar el contexto a través de las preferencias (paso 2 en la Figura 3.6(b)), emprendiendo de nuevo las comprobaciones del algoritmo. El pseudocódigo del protocolo se detalla en el Algoritmo 2.

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA OPORTUNISTA PARA EL DESPLIEGUE DE APLICACIONES EDGE-FOG-CLOUD

Algorithm 2 SACAR-IR pseudocódigo

Require: Escenario IoT: \mathcal{D} , tiempo de simulación: T , frecuencia ω_t

- 1: **for all** node $d_i^{x_i y_i} \in \mathcal{D}$ **do**
- 2: $d_i^{x_i y_i}.$ *escuchaConexion()*
- 3: **if** ω_t se activa **then**
- 4: **if** $G_i \neq \emptyset$ **then**
- 5: $\mathcal{N}_i \leftarrow d_i^{x_i y_i}.$ *obtenerVecinos()*
- 6: **for all** nodo vecino $d_j^{x_j y_j} \in \mathcal{N}_i$ **do**
- 7: **if** $d_i^{x_i y_i}.$ *getConexionesPrevias*($d_j^{x_j y_j}$) $\neq true$ **then**
- 8: **if** $d_i^{x_i y_i}.$ *conectadoCon*($d_j^{x_j y_j}$) and $(G_i) \cap (S_j) \neq \emptyset$ **then**
- 9: **if** $d_j^{x_j y_j}.$ *getOcupacionBuffer* $\neq full$ **then**
- 10: $m_i \leftarrow \{G_i, S_i\}$ \triangleright El mensaje se crea
- 11: *enviarMensaje*($m_i, d_j^{x_j y_j}$)
- 12: **end if**
- 13: **end if**
- 14: **end if**
- 15: **end for**
- 16: **end if**
- 17: **end if**
- 18: **end for** $t < T$

- **SACAR-HC** (Figura 3.6(c)): Este algoritmo también implementa el mecanismo de store-carry-forward para transmitir información más allá del rango de alcance de los nodos origen. Sin embargo, en lugar de enviar el mensaje a nodos intermediarios con intereses similares, el contenido es enviado a aquellos nodos que se han encontrado previamente con el destino. Para ello, se considera la información contextual sobre los encuentros entre nodos. Para implementar este algoritmo (paso 1), cada nodo almacena en su perfil virtual una lista con información sobre los diferentes nodos con los que se han encontrado. De esta forma, si un nodo origen quiere enviar un mensaje y no cuenta con acceso directo con el destino, este busca entre sus vecinos aquellos dispositivos que hayan estado o estén en contacto con el destino. Finalmente, si se cumple la condición, el mensaje es

Algorithm 3 SACAR-HC pseudo code

Require: Escenario IoT: \mathcal{D} , tiempo de simulación: T , frecuencia ω_t , lista de encuentros: \mathcal{L}

- 1: **for all** nodo $d_i^{x_i y_i} \in \mathcal{D}$ **do**
- 2: $d_i^{x_i y_i} .escuchaConexion()$
- 3: **if** ω_t se activa **then**
- 4: **if** $G_i \neq \emptyset$ **then**
- 5: $\mathcal{N}_i \leftarrow d_i^{x_i y_i} .obtenerVecinos()$
- 6: **for all** nodo vecino $d_j^{x_j y_j} \in \mathcal{N}_i$ **do**
- 7: **if** $d_j^{x_j y_j} =$ nodo destino OR nodo destino $\in d_j^{x_j y_j} .\mathcal{L}$ **then**
- 8: $m_i \leftarrow \{G_i, S_i\}$ \triangleright El mensaje es creado
- 9: $enviarMensaje(m_i, d_j^{x_j y_j})$
- 10: **end if**
- 11: **end for**
- 12: **end if**
- 13: **end if**
- 14: **end for** $t < T$

enviado al nodo intermedio con el objetivo de que alcance el destino, portando mientras tanto la información (paso 3 en la Figura).

El pseudocódigo de este protocolo se describe en el Algoritmo 3. La particularidad de SACAR-HC es que los nodos almacenan una lista con las direcciones del resto de nodos con los que han estado en contacto.

- **SACAR-Hybrid** (Figura 3.6(d)): Finalmente, esta versión del algoritmo combina SACAR-OCVN y SACAR-HC con el objetivo de permitir crear OCVNs cuando los nodos comparten intereses o cuando han estado en contacto con el destino (paso 1). En este caso, los nodos intermedios son aquellos que satisfacen alguna de estas condiciones, incrementan el tamaño de la red virtual y, por lo tanto, las posibilidades de que el mensaje alcance el destinatario. La implementación de esta alternativa está descrita en el Algoritmo 4.

Tras detallar el funcionamiento de los algoritmos que componen la familia SACAR, el siguiente apartado estudia la filosofía detrás del protocolo

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA OPORTUNISTA PARA EL DESPLIEGUE DE APLICACIONES EDGE-FOG-CLOUD

Algorithm 4 SACAR-Hybrid pseudocódigo

Require: Escenario IoT: \mathcal{D} , tiempo de simulación: T , frecuencia ω_t , lista de encuentros: \mathcal{L}

- 1: **for all** node $d_i^{x_i y_i} \in \mathcal{D}$ **do**
- 2: $d_i^{x_i y_i}.escuchaConexion()$
- 3: **if** ω_t se activa **then**
- 4: **if** $G_i \neq \emptyset$ **then**
- 5: $\mathcal{N}_i \leftarrow d_i^{x_i y_i}.obtenerVecinos()$
- 6: **for all** nodo vecino $d_j^{x_j y_j} \in \mathcal{N}_i$ **do**
- 7: **if** $d_j^{x_j y_j} = \text{nodo destino}$ OR nodo destino $\in d_j^{x_j y_j}.\mathcal{L}$ OR $(G_i) \cap (G_j \cup (S_j)) \neq \emptyset$ **then**
- 8: \triangleright Si el nodo seleccionado es el destino o tiene intereses comunes
- 9: \triangleright o si se encuentra en la lista de encuentros del nodo intermedio
- 10: $m_i \leftarrow \{G_i, S_i\}$ \triangleright El mensaje se crea y se envía
- 11: $enviarMensaje(m_i, d_j^{x_j y_j})$
- 12: **end if**
- 13: **end for**
- 14: **end if**
- 15: **end if**
- 16: **end for** $t < T$

RSB. Este enrutador extiende la lógica de SACAR e involucra dimensiones sociales adicionales en la especificación del camino de nodos, constituyendo una parte fundamental de la propuesta.

3.2.3. Refined Social Broadcast

RSB se trata de un algoritmo de enrutamiento integrado en la arquitectura propuesta que se fundamenta en la naturaleza social de los nodos de las Redes Móviles Oportunistas (*Mobile Opportunistic Networks*, MONs). El objetivo de este protocolo es determinar la mejor ruta de información entre dos elementos de una red oportunista. La solución se fundamenta en la elección de nodos intermedios que favorezcan la transmisión de los da-

3.2. ENCAMINAMIENTO OPORTUNISTA DE LA INFORMACIÓN

tos hasta un elemento en particular. La naturaleza dinámica del algoritmo favorece su explotación en redes donde el contexto resulta dinámico, con cambios recurrentes en las posiciones de los dispositivos, así como en sus interacciones dentro de la red. Estas funcionalidades son llevadas a cabo a través del uso de dos elementos del contexto de la red: 1) los encuentros históricos de los nodos y 2) el perfil virtual de los nodos integrado en la arquitectura.

1. Encuentros Históricos de los Nodos. Desde la perspectiva del enrutamiento, la socialización y la capacidad de influencia colectiva de un nodo pueden ser cuantificados mediante el número de conexiones y dispositivos con los que se ha encontrado. Así, esta métrica puede ser aplicada para identificar, entre un conjunto de nodos, un potencial candidato para transmitir la información hacia el elemento de destino. La consideración del conjunto de encuentros históricos favorece la identificación de los dispositivos más influyentes y, por lo tanto, aquellos nodos que constituyen una mejor opción de comunicación.
2. Perfil virtual de los nodos. RSB, al igual que SACAR OCVN, emplea el perfil virtual de los nodos para registrar los intereses que manifiestan en *topics* específicos de comunicación. Como resultado, esta medida permite acercar el funcionamiento de SACAR OCVN al contexto de enrutamiento social, a la vez que se preservan las características individuales de los nodos.

El historial de encuentros y los intereses de los nodos son aplicados por el protocolo de enrutamiento para transmitir mensajes desde un emisor a un nodo destinatario a través de elementos intermedios. La combinación de estas dos métricas plantea una disrupción en las mecánicas de comunicación. Para emprender este proceso, el protocolo involucra tres fases principales. Las Figuras 3.7, 3.8, y 3.9 representan la comunicación y la manera en la que la información es compartida entre un conjunto de nodos. A continuación, cada una de estas fases es detallada.

La Figura 3.7 describe el escenario inicial de la comunicación. En este primer contexto se identifican cuatro nodos, $N = \{N_1, N_2, N_3, N_4\}$, cada uno cuenta con un perfil virtual que almacena tres elementos: el número de

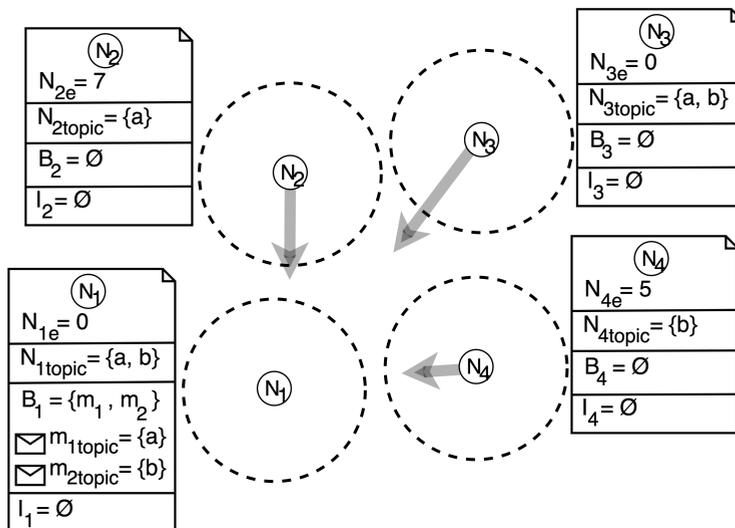


Figura 3.7: Escenario inicial antes de que el emisor transmita información.

encuentros que han experimentado con otros nodos de la red, el conjunto de *topics* en el que están interesados y el conjunto de nodos identificados como influyentes. Del mismo modo, el buffer de mensajes almacena la información que está portando el nodo, definiendo un identificador numérico para cada mensaje, así como el *topic* con el que se corresponde. Respecto los nodos del contexto, el perfil virtual de N_1 describe un conjunto de encuentros $N_{1e} = 0$, un conjunto de *topics* $N_{1topics} = \{a, b\}$, el buffer con dos mensajes $B_1 = \{m_1, m_2\}$, y su lista de nodos identificados como influyentes vacía $I_1 = \emptyset$. Los dos mensajes que están almacenados en el buffer describen *topics* diferentes $m_{1topic} = a$ y $m_{2topic} = b$. En el nodo N_2 , el número de encuentros es $N_{2e} = 7$, el *topic* es $N_{2topics} = \{a\}$, el buffer de mensajes está vacío $B_2 = \emptyset$, y su conjunto de nodos influyentes también $I_2 = \emptyset$. En el caso de N_3 , el número de contactos previos es $N_{3e} = 0$, los *topics* son $N_{3topics} = \{a, b\}$, el buffer de mensajes está vacío $B_3 = \emptyset$, y el conjunto de nodos influyentes no contiene ningún dato $I_3 = \emptyset$. Finalmente, el perfil virtual de N_4 almacena un número de encuentros $N_{4e} = 5$, un conjunto de *topics* $N_{4topics} = \{b\}$, un buffer de mensajes vacío $B_4 = \emptyset$, y el conjunto de nodos influyentes sin contenido $I_4 = \emptyset$. Como resultado, en el instante definido

3.2. ENCAMINAMIENTO OPORTUNISTA DE LA INFORMACIÓN

en la Figura 3.7, los nodos no están en contacto con ningún otro elemento. Sin embargo, debido a sus movimientos, los dispositivos se encontrarán en un instante temporal posterior, reflejado en la Figura 3.8.

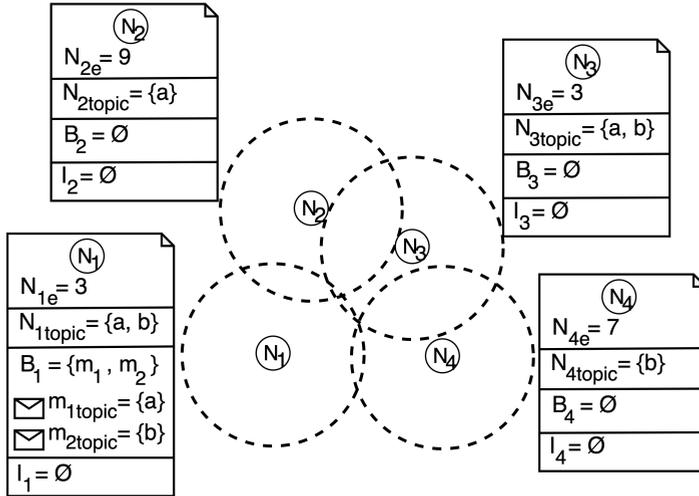


Figura 3.8: Encuentros entre nodos.

La Figura 3.8 muestra los encuentros que suceden como consecuencia de la trayectoria de los dispositivos en la Figura 3.7. Este evento supone un incremento en el número de encuentros registrados por cada nodo. Considerando que N_1 almacena en su buffer dos mensajes $B_1 = \{m_1, m_2\}$, este encuentro plantea un potencial intercambio de datos. Para ello, el protocolo RSB aplica sus métricas contextuales para retransmitir los datos hacia el nodo intermedio más apropiado en términos de compatibilidad de interés e influencia. Por lo tanto, N_1 lleva a cabo dos fases para lograr esto: i) identificar los nodos interesados en el *topic* de los mensajes almacenados en el buffer del emisor y ii) seleccionar el candidato que registre un mayor número de encuentros.

Como primer paso, N_1 identifica el nodo interesado en alguno de los *topics* de los mensajes almacenados $m_{1\text{topic}} = \{a\}$ y $m_{2\text{topic}} = \{b\}$. A continuación, se detalla el proceso de transmisión de ambos mensajes. Comen-

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA OPORTUNISTA PARA EL DESPLIEGUE DE APLICACIONES EDGE-FOG-CLOUD

zando con m_1 , el nodo N_1 busca identificar el nodo interesado en $m_{1\text{topic}}$. Para ello, todos los nodos en contacto transmiten su perfil virtual a N_1 , permitiendo así al emisor reconocer las entidades que lo rodean. En este caso, N_1 comprueba primero que los nodos N_2 y N_3 son compatibles con el mensaje $m_{1\text{topic}} = \{a\}$, dado que $N_{2\text{topics}} = \{a\}$ y $N_{3\text{topics}} = \{a\}$, respectivamente. Del mismo modo, N_1 llevará a cabo el mismo proceso con el mensaje m_2 .

Como resultado, el nodo N_1 considera los contactos N_2 y N_3 como potenciales candidatos. Un nodo es considerado como candidato cuando manifiesta interés en los mismos *topics* que los mensajes almacenados por el emisor. Así, N_2 y N_3 son añadidos al conjunto de candidatos de N_1 , $C_1 = \{N_2, N_3\}$. Este proceso está recogido de manera formal en la siguiente ecuación 3.1,

$$C_n = (N_{\text{itopics}} \cap m_{\text{ntopics}}) \forall N_i \in N, \forall m_n \in M_n \quad (3.1)$$

la cual es usada para detectar la compatibilidad de los *topics*, donde N_{itopics} es el conjunto de *topics* en los que N_i está interesado y m_{ntopics} define el *topic* de un mensaje m_n almacenado por un Nodo n. En el caso de la variable N_i , se emplea para representar una entidad perteneciente al conjunto de encuentros de N . Mientras tanto, m_n se corresponde con el buffer de mensajes del emisor M_n . Si la intersección entre ambos conjuntos de intereses no resulta en un valor nulo, el nodo encontrado se convierte en candidato para el nodo n C_n . Como resultado, aquellos nodos almacenados en el conjunto C_n son considerados para la segunda fase del algoritmo.

Considerando los valores indicados en la Figura 3.8, N_1 lleva a cabo la segunda fase del algoritmo considerando N_2 y N_3 como candidatos. Esta etapa pretende identificar el nodo que recibirá los mensajes y será posteriormente almacenado como influyendo por el emisor. Este proceso se realiza tomando como referencia el número de encuentros. Para ello, el nodo que contabilice un mayor valor de contactos entre los candidatos recibirá la información del emisor. En este caso, el número de encuentros para N_2 es $N_{2e} = 9$, mientras que para N_3 , el otro nodo perteneciente a C_1 , es $N_{3e} = 3$. Por lo tanto, N_2 es seleccionado como portador del mensaje m_1 , y es reconocido como influyente $I_1 = \{N_2\}$. Este proceso se expresa de una manera formal en la Ecuación 3.2,

3.2. ENCAMINAMIENTO OPORTUNISTA DE LA INFORMACIÓN

$$I_n = \text{máx}(N_{ie}) \forall N_i \in C_n \quad (3.2)$$

donde la identificación del nodo más influyente en el conjunto de candidatos C_n del Nodo n es detallado. El valor mayor N_{ie} recibe el mensaje y se acomoda como influyente para el dispositivo emisor, I_n .

Considerando el proceso seguido para m_1 , el proceso que se aplica para transmitir m_2 resulta el mismo, pero tomando como referencia un *topic* diferente, $m_{2\text{topic}} = \{b\}$. Como resultado, en la primera fase, N_1 identifica N_3 y N_4 como candidatos $C_1 = \{N_2, N_3\}$. En la segunda fase, cuando N_1 compara sus encuentros, N_4 se convierte en el nodo más apropiado e influyente $I_1 = \{N_2, N_4\}$.

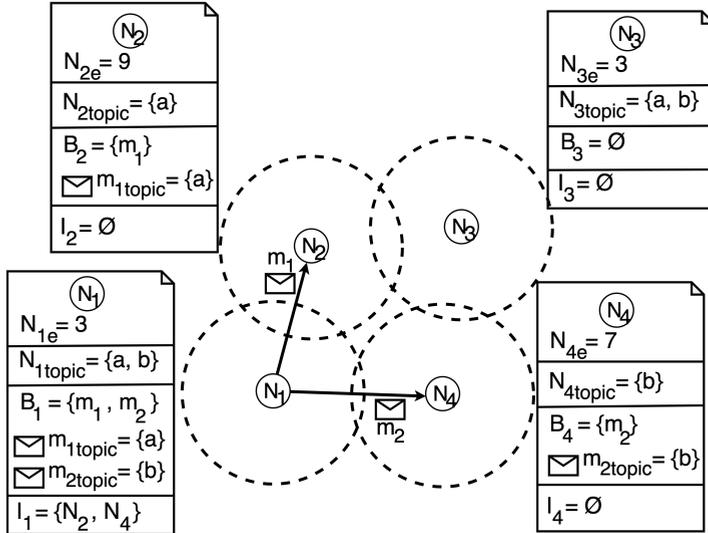


Figura 3.9: Emisión basada en intereses e influencia.

La Figura 3.9 representa la situación posterior a la Figura 3.8. Previamente, los nodos intermedios más adecuados han sido identificados para cada mensaje. Así, la información es transferida: m_1 es enviado desde N_1 a N_2 ; m_2 es transmitido desde N_2 a N_4 . Como resultado, ahora N_1 guarda ambas entidades como influyentes. Esto significa que la próxima vez que suceda un encuentro con ellos, estos no serán considerados en el proceso de

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA OPORTUNISTA PARA EL DESPLIEGUE DE APLICACIONES EDGE-FOG-CLOUD

evaluación de los contactos, sino que recibirán directamente los mensajes almacenados que coincidan con sus intereses.

Considerando el proceso explicado, RSB recurre a las propiedades individuales de los nodos para identificar el camino óptimo en la red para lograr una probabilidad de entrega alta en las comunicaciones. El algoritmo permite la retransmisión de información entre un conjunto de nodos que comparten intereses específicos. Para ello, el papel del perfil virtual propuesto en la arquitectura resulta una entidad muy útil. Sin embargo, la idea del uso de *topics* puede ser empleada para representar también información contextual de los nodos. Así, por ejemplo, si el nivel de batería de un nodo en particular resulta bajo, el perfil virtual puede suscribir al nodo a un *topic* que represente transmisiones de datos que favorezcan a dispositivos que cuenten con baja energía. De la misma forma, los *topics* pueden ser aplicados para identificar otras características dinámicas de la red, como la ausencia de espacio de almacenamiento o la disponibilidad de conexión a Internet. Por lo tanto, la aplicación del perfil virtual y el enrutamiento basado en intereses se convierten en mecanismos que contribuyen ampliamente en la interoperabilidad de la red, favoreciendo su carácter dinámico y contextual para mejorar la capacidad de entrega.

En definitiva, la arquitectura plantea una solución para el despliegue de aplicaciones distribuidas a través de la comunicación oportunista de dispositivos. De esta forma, la propuesta se alinea con las principales contribuciones de la tesis, definiendo una solución óptima para la comunicación en entornos donde no es posible acceder a Internet, así como contextos inteligentes en los que explotar la transmisión directa entre dispositivos. Para ello, la arquitectura distribuye los componentes de las aplicaciones bajo el modelo Edge-Fog-Cloud, recurriendo a las comunicaciones oportunistas para trasladar los datos desde los dispositivos de origen hasta la capa intermedia. En esta labor, los algoritmos de encaminamiento propuestos acercan estas necesidades de comunicación aprovechando recursos contextuales e individuales de los nodos para favorecer los procesos de transmisión.

En definitiva, la solución propuesta plantea un ecosistema íntegro para ejecutar aplicaciones distribuidas en múltiples contextos. Con el objetivo de estudiar las posibilidades que proporciona la arquitectura, el siguiente capítulo detalla diferentes aplicaciones y soluciones que hacen uso de la

3.2. ENCAMINAMIENTO OPORTUNISTA DE LA INFORMACIÓN

propuesta para cubrir necesidades de comunicación identificadas tanto en contextos rurales como en entornos inteligentes.

Capítulo 4

Contextos de Aplicación de la Arquitectura

“Hazlo simple pero significativo.”

Mad Men (2007)
Dir. Matthew Weiner

La arquitectura propuesta permite emprender procesos de transmisión de información en aplicaciones distribuidas incluso en entornos donde la conexión a Internet no está disponible. Esta premisa ha motivado la definición de un conjunto de contextos de aplicación donde se proponen diferentes soluciones que aprovechan las posibilidades de la solución para proporcionar servicios. De esta manera, siguiendo la representación de la Figura 4.1, se identifican seis potenciales aplicaciones enmarcadas tanto en entornos rurales como en contextos inteligentes.

Por un lado, se introducen cuatro soluciones enfocadas en brindar servicios para zonas rurales [36, 43, 35, 34]: tres de ellas centradas en proporcionar mecanismos de cuidado para la salud de adultos mayores y una cuarta encaminada a la digitalización de industrias locales. Al mismo tiempo, se consideran dos contextos de aplicación adicionales para estudiar el potencial uso de la arquitectura en contextos digitalizados. Para ello, se establecen dos propuestas: la adaptación automática del contexto a me-

4.1. SISTEMA DE DETECCIÓN DE EMERGENCIAS EN HOGARES DE ADULTOS MAYORES QUE RESIDEN SOLOS

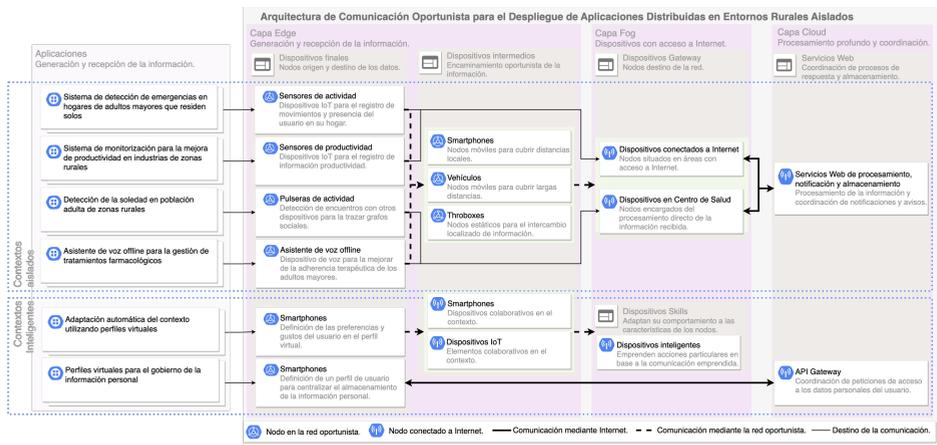


Figura 4.1: Contextos de aplicación y los componentes involucrados en la arquitectura.

didada del usuario [42] y un nuevo modelo para el gobierno de los datos personales [47]. Los siguientes apartados detallan las características y el funcionamiento de cada una, incluyendo una breve introducción, un estudio sobre el estado del arte de la aplicación y el análisis en profundidad de la propuesta. Resulta importante destacar que, con el objetivo de dotar el texto de una organización óptima, los procesos de validación y análisis de resultados de cada una de las aplicaciones se emprenden en el Capítulo 5, agrupando los detalles sobre su simulación y ejecución, así como posterior evaluación. De esta forma, el presente capítulo se enfoca en ofrecer una visión detallada de los antecedentes y de la solución particular de cada aplicación.

4.1. Sistema de detección de emergencias en hogares de adultos mayores que residen solos

Un alto número de adultos mayores que residen en zonas rurales viven solos en sus casas. Esta condición plantea un contexto en el que la detección de emergencias o de situaciones peligrosas puede resultar complicada. Además, la falta de infraestructuras de comunicación puede conformar un

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

difícil obstáculo en el despliegue de tecnologías para la monitorización de salud a través de Internet. En este escenario, la arquitectura propuesta en el trabajo de tesis permite el despliegue de soluciones que plantean una respuesta en este contexto, permitiendo la detección de potenciales situaciones de riesgo.

La presente aplicación propone un sistema basado en sensores para registrar la actividad humana y la presencia del adulto mayor en su hogar [36, 34]. Esta información permite elaborar una evaluación general del comportamiento del usuario, identificando potenciales ausencias anómalas derivadas de caídas o paseos sin retorno. Estos datos son transmitidos hacia Internet a través de la arquitectura oportunista, la cual recurre a nodos intermedios para establecer comunicación entre los hogares e Internet. Finalmente, tras recibir la información, el centro médico procesa los datos, emprendiendo, si procede, los protocolos apropiados para la emergencia.

4.1.1. Estado del Arte

La aplicación que se detalla engloba en su funcionamiento diferentes disciplinas, como la telemedicina, la detección de emergencias y la comunicación *offline*. De esta manera, con el objetivo de analizar los avances en la técnica, las siguientes subsecciones introducen el estado del arte de estas disciplinas en su aplicación para la detección de riesgos sanitarios.

4.1.1.1. Telemedicina para Adultos Mayores

La situación de pandemia acontecida en 2020 y el envejecimiento generalizado de la población han posicionado la telemedicina como una de las vertientes más relevantes en el cuidado de la salud. Un gran número de trabajos proporcionan asistencia sanitaria remota a pacientes, ofreciendo monitorización, comunicación e incluso diagnóstico. A continuación, se incluyen algunas de las propuestas más relevantes.

CardioNet [115] estudia el impacto de la tecnología IoT en el diseño e implementación de soluciones eHealth. Esta propuesta pone en valor los avances reales de la materia y el rol que juegan estos dispositivos en la medicina actual. Siguiendo esta línea, el trabajo descrito en [116] destaca por

4.1. SISTEMA DE DETECCIÓN DE EMERGENCIAS EN HOGARES DE ADULTOS MAYORES QUE RESIDEN SOLOS

sus avances en el uso del procesamiento de imágenes para la identificación de enfermedades en zonas aisladas mediante instrumental de bajo coste.

En otra vertiente popular, la monitorización de los signos vitales definen una sólida línea de investigación a través de la tecnología BLE [117]. En estos trabajos, algunas propuestas tratan de trazar patrones de compañía en los usuarios [118], así como estudiar el bienestar de los pacientes [119].

Todas estas propuestas manifiestan el progreso en telemedicina, monitorización y detección de emergencias. Sin embargo, con los últimos avances en materia de conectividad como el 5G [120], así como los significativos progresos en inteligencia artificial [121] y robótica [122] han constituido verdaderas disrupciones en la materia. Sin embargo, la mayoría de estas contribuciones no son aplicables en entornos rurales aislados donde la infraestructura de Internet no está disponible. De esta forma, el siguiente subapartado detalla las soluciones más destacadas enmarcadas en estos contextos.

4.1.1.2. Soluciones eHealth sin conexión

Tal y como se ha abordado, existen regiones rurales donde el acceso a Internet no resulta posible [123]. De esta manera, es esencial la investigación de recursos y mecanismos alternativos que permitan emprender comunicaciones remotas.

El trabajo elaborado en [124] propone el despliegue de una red local inalámbrica para la transmisión de información entre trabajadores sociales y el personal sanitario. En el caso de [125], se propone el uso de radiofrecuencias y ultrasonidos para realizar las comunicaciones. Trabajos como [126] proponen alternativas compatibles con utilidades de salud, como el despliegue de una Intranet para zonas rurales en Bangladesh con el objetivo de dotar la región con un servidor local para el intercambio de información, así como discutir asuntos locales entre los habitantes. En esta línea, [127] detalla el concepto de “Internet básico”, una solución de comunicación local basada en texto e imágenes. Siguiendo las propuestas centradas en la asistencia sanitaria, los trabajos propuestos en [128, 43] abordan la problemática de la adherencia terapéutica a través de un asistente de voz *offline* que recuerda las tomas de medicación.

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

Como conclusión, estos trabajos sirven como modelo para nuevas propuestas que exploran las posibilidades de la tecnología en estos contextos. De esta forma, las redes oportunistas conforman una tecnología apropiada para la comunicación, agnóstica a la presencia de Internet.

4.1.1.3. Soluciones basadas en redes oportunistas

Las redes oportunistas han demostrado ser un paradigma versátil en entornos donde las redes convencionales no resultan operables [109, 110]. A continuación, algunas de las contribuciones recientes más relevantes son detalladas y comparadas.

Trabajos como [129] llevan a cabo una profunda lectura de las aplicaciones de las redes oportunistas. Sin embargo, muchas contribuciones exploran más allá de los escenarios recurrentes y ofrecen servicios adicionales, como [87], que propone el uso de UAVs para proporcionar cobertura de red móvil en áreas sin Internet. En la estricta línea de la telemedicina, el trabajo [130] compara el rendimiento de un conjunto de propuestas oportunistas que responden a una variedad de contextos. Desde un punto de vista técnico, la contribución [131] analiza el uso de vehículos y sus encuentros para conformar una red de comunicación local. Concretamente para las zonas rurales, [124] repasa algunas propuestas enfocadas en proporcionar acceso a Internet de una manera sostenible, como [132], que propone un servicio de comunicación basado en Internet a través de conexión intermitente. De una manera similar, [133] propone el concepto de “Near Cloud”, una red distribuida basada en IoT para áreas rurales.

La aplicación que se propone para la detección de potenciales emergencias en hogares de adultos mayores adopta una solución distribuida basada en el patrón de la arquitectura definida. Para ello, se hace uso de un encañamiento oportunista que aprovecha las interacciones que tienen lugar entre los dispositivos intermedios para hacer llegar la información a Internet. En el siguiente apartado se detallará el funcionamiento y lógica de la propuesta.

4.1. SISTEMA DE DETECCIÓN DE EMERGENCIAS EN HOGARES DE ADULTOS MAYORES QUE RESIDEN SOLOS

4.1.2. Aplicación de detección remota de emergencias mediante la arquitectura oportunista

La propuesta se fundamenta en equipar los hogares de los adultos mayores que residen solos con un conjunto de sensores de presencia y actividad [34, 36]. Estos dispositivos transmiten sus mediciones a un componente central del hogar, encargado de actuar como coordinador de las mediciones realizadas, así como de nodo origen en la red oportunista de la arquitectura. Estos elementos conforman la capa de dispositivos Edge, la cual se encarga de transmitir la información hacia la capa Fog mediante la red oportunista. La capa Fog se compone de aquellos componentes conectados a Internet, es decir, los destinos efectivos de la información. De esta manera, estos componentes pueden situarse en entornos con cobertura para transmitir la información hacia Internet o directamente en las entidades médicas correspondientes. Así, resulta posible emprender un análisis de las mediciones realizadas, detectando potenciales anomalías en los patrones de presencia de los usuarios. Finalmente, esta entidad comunica los datos a las instancias Cloud encargadas del procesamiento más pesado, así como de su almacenamiento.

La aplicación se fundamenta en el análisis de la detección de presencia en el hogar con el objetivo de detectar ausencias anómalas. Para ello, se hace uso de un conjunto de sensores de presencia instalados en las diferentes estancias de la vivienda. De esta manera, la información sobre los hábitos y patrones diarios es monitorizado. Como resultado, la captación de un volumen elevado de datos permite la identificación de situaciones anómalas o peligrosas, facilitando la notificación de este evento a los servicios de salud.

El conjunto de sensores proporcionan datos particulares de la presencia del adulto mayor a lo largo de su hogar (Figura 4.2). De esta forma, los dispositivos están situados en puntos estratégicos como puertas, muebles, ventanas o pasillos, registrando los movimientos y almacenando la medición en el componente central del hogar. Este elemento se denomina Cerebro Principal (*Main Brain*, MB) y está a cargo de procesar y guardar toda la información, emprendiendo las comunicaciones de estos datos hacia la red oportunista. Estas funcionalidades pueden ser equipadas en un equipo informático de propósito general, sin embargo, dado que no se pre-

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

cisa de una alta capacidad de cómputo individual, este componente puede ser implementado en una Raspberry Pi [134]. Como resultado, múltiples tipos de datos pueden ser medidos, como el tiempo transcurrido desde que se abandonó la vivienda, tiempo de sueño, registro de visitas, recorridos dentro del hogar, la interacción con muebles y electrodomésticos, incluso el uso del pastillero. Considerando el elevado volumen de información que se registra, la detección de emergencias, así como las acciones reactivas de peligros, se emprenden de manera remota. Así, los informes sobre presencia son procesados remotamente, detectando anomalías como largas ausencias y alimentando el conocimiento previo para mejorar la capacidad de detección. Este mecanismo permite refinar el sistema para distinguir ausencias usuales de aquellas peligrosas. Como resultado, el MB almacena y transmite los datos hacia la red oportunista.

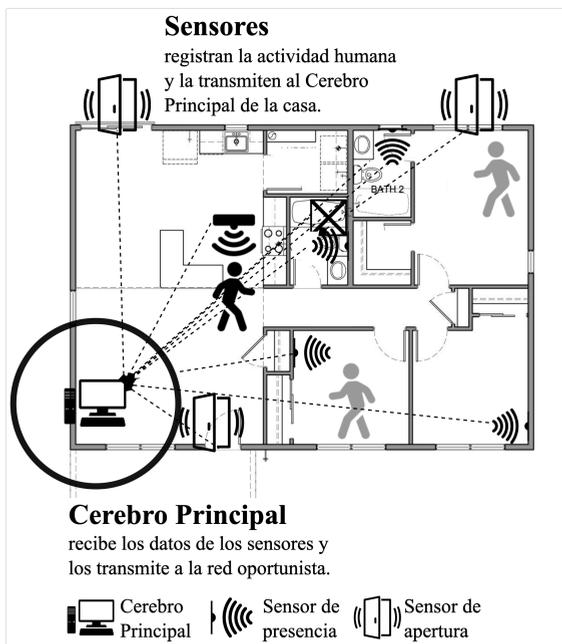


Figura 4.2: Mapa de sensores situados en el hogar del adulto mayor.

La transmisión de la información desde el origen hasta el destino se emprende a través de la red oportunista definida en la arquitectura. Esta

4.2. SISTEMA DE MONITORIZACIÓN PARA LA MEJORA DE PRODUCTIVIDAD EN INDUSTRIAS DE ZONAS RURALES

recurre a la intervención de dispositivos heterogéneos que colaboran para lograr comunicar dispositivos separados físicamente. Para ello, los MB de cada hogar involucrado en la aplicación actúan como nodos origen en la red, comunicándose con los nodos intermedios que resulten alcanzables desde su rango de comunicación. Como resultado, los dispositivos que reciban los datos aplicarán las técnicas de encaminamiento de la arquitectura para acercar los datos al destino.

Los dispositivos denominados como destinos son aquellos que, debido a su posición física y disponibilidad, cuentan con conexión a Internet. De esta manera, estos componentes pueden transmitir la información que reciben a servidores Cloud remotos. No obstante, asumiendo que su situación física puede corresponderse con instituciones como un centro médico, estos equipos pueden contar con capacidad suficiente para procesar los datos recibidos y elaborar decisiones directamente. Como resultado, los datos obtenidos permiten construir un historial de actividad de los adultos mayores, permitiendo aplicar técnicas de minería de datos, así como aprendizaje automático, para extraer patrones y detectar o predecir situaciones anómalas.

En definitiva, la aplicación pone en valor la potencial aplicabilidad de la arquitectura propuesta para el despliegue de aplicaciones distribuidas. En este caso en particular, la solución acerca un ecosistema completo de dispositivos que, a través de la red oportunista, son capaces de operar sin conexión a Internet en un entorno rural aislado. De esta manera, se plantea una herramienta que proporciona respuesta ante una de las principales necesidades de estos contextos, permitiendo la detección de potenciales situaciones de peligro en adultos mayores que residen solos.

4.2. Sistema de monitorización para la mejora de productividad en industrias de zonas rurales

La brecha digital en las zonas rurales ejerce un impacto directo en la economía local. En muchos casos, las empresas deben adaptar sus procesos de negocio a la ausencia de infraestructuras de comunicación, obstaculizando las potenciales mejoras en rendimiento y productividad que pueden brindar. Este factor conduce a una importante pérdida en la capacidad competitiva de los negocios, conteniendo en la cuota de mercado con empresas

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

situadas en núcleos urbanos que gozan de una digitalización madura. Este escenario plantea la necesidad de investigar soluciones alternativas para proporcionar mecanismos de monitorización de la productividad.

Negocios como las explotaciones industriales, ganaderas, así como agrícolas, encuentran en la monitorización de la productividad un importante recurso para comprender, analizar y mejorar sus flujos de trabajo. Funciones como el rastreo de la posición de animales dentro de una granja, la medición del nivel de alimentos en los comederos o el nivel de producción de miel en un colmenar pueden ser potenciales utilidades de los sistemas de monitorización en las explotaciones. Sin embargo, la ausencia de conexión a Internet implica la utilización de mecanismos de comunicación alternativos como la arquitectura oportunista propuesta.

En esta aplicación se propone el uso de la arquitectura para comunicar una red de sensores IoT instalados en diferentes puntos de una explotación industrial [36, 34]. Estos dispositivos se encargan de emprender una variedad de mediciones en las instalaciones, coordinados mediante un elemento central que actúa como nodo emisor en la red oportunista de la solución. De esta forma, la aplicación propone la utilización de la arquitectura para transmitir con Internet el conjunto de datos recabados por los sensores, permitiendo también la recepción de instrucciones remotas.

4.2.1. Estado del arte

El asentamiento de las tecnologías móviles, así como de los dispositivos y redes IoT, han supuesto una verdadera disrupción en la digitalización de los procesos industriales. Entre estas propuestas, el uso de las infraestructuras de comunicación se identifica como una de las principales características. De esta forma, es posible sensorizar de manera remota determinadas tareas, así como transmitir y procesar en tiempo real eventos y procesos que tienen lugar en el entorno industrial. Sin embargo, la dependencia de Internet resulta un factor limitante cuando estas explotaciones están situadas en entornos rurales que carecen de infraestructuras de comunicación. Considerando este factor, existen múltiples trabajos en la literatura que abordan la problemática desde diferentes prismas. A continuación, se destacan algunos de los más relevantes [135, 136, 137].

4.2. SISTEMA DE MONITORIZACIÓN PARA LA MEJORA DE PRODUCTIVIDAD EN INDUSTRIAS DE ZONAS RURALES

Trabajos como [135] se enfocan en proporcionar un sistema de comunicación para entornos rurales compatible con las necesidades de digitalización de la industria local. Para ello, se propone un *framework* que adapta su funcionamiento a redes de comunicación inestables donde las caídas y la pérdida de comunicación son recurrentes. Para ello, se recurre a una lógica alineada con las redes DTN en la que, cuando se pierde la conexión a Internet, la nueva información se almacena de manera persistente para que, cuando se recobre, resulte posible sincronizar los datos con la nube. La propuesta supone una herramienta integral para la comunicación de sensores y actuadores en entornos rurales. Sin embargo, esta línea de propuestas asumen la disponibilidad de conexión a Internet de manera puntual. Como resultado, este matiz implica que la propuesta no se alinea con aquellos entornos en los que la cobertura y el acceso a la red no está disponible de manera permanente o prolongada.

La propuesta de [136] se fundamenta en la utilización de una red FANET para proporcionar conexión en tiempo real a cámaras de videovigilancia de explotaciones agrícolas y ganaderas de zonas rurales. Aunque la contribución se enfoca en la transmisión de información de vídeo, la propuesta tiene un alcance relevante para el desarrollo y digitalización de las industrias locales. De esta manera, la solución propone la implementación y despliegue de una red dirigida por software (*Software-Defined Network*, SDN) junto con una red ad-hoc de drones que forman una malla de comunicación. Un subconjunto de estos dispositivos, distribuidos por zonas particulares de la explotación, son equipados con cámaras de alta resolución, las cuales transmiten un flujo de vídeo en directo. Finalmente, la red hace uso de un dron orquestador para coordinar las comunicaciones de la red FANET, mientras otro dron se encarga de almacenar los flujos de vídeo para permitir la obtención de las grabaciones incluso sin conexión a Internet. Esta propuesta, aunque enfocada en la transmisión de vídeo en tiempo real, plantea una arquitectura flexible y funcional para entornos sin acceso a la red. Sin embargo, la utilización de una red de drones para transmitir la información supone un gran despliegue e inversión que puede limitar ampliamente su aplicación.

El trabajo descrito en [137] propone una arquitectura de comunicación para contextos rurales que permite transmitir las mediciones de sensores instalados en entornos industriales con Internet. Para ello, se emplean tres

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

elementos esenciales para la comunicación y su posterior procesamiento: el conjunto de sensores instalados en la explotación, equipados con un nodo *gateway* que emplea LoraWan; un satélite desplegado que actúa como entidad intermedia entre los sensores e Internet; y, finalmente, la instancia Cloud desplegada en el entorno de ejecución en la nube Amazon Web Services, encargada del procesamiento de los datos. Esta solución se caracteriza por la aplicación de satélites para suplir las carencias de comunicación, actuando como puente entre la fuente y el destino de los datos. Para ello, la transmisión de información es realizada con LoraWan, tecnología que proporciona un amplio rango de alcance que posibilita establecer comunicaciones en entornos aislados. En definitiva, se trata de una aproximación sólida a la problemática de la sensorización, proporcionando una alternativa escalable y viable para una amplia variedad de entornos. No obstante, la utilización de radiofrecuencias en las transmisiones puede ser comprometida por las características geográficas de los territorios, implicando una reducción considerable en su alcance.

Considerando los avances de la literatura, las propuestas plantean sólidas alternativas para explotaciones industriales que carecen de acceso a Internet. Sin embargo, factores como los costes de despliegue y mantenimiento, así como las limitaciones de las tecnologías de comunicación que se aplican, plantean restricciones en su utilización. De esta manera, resulta apropiado investigar mecanismos y propuestas adicionales que se alineen con contextos en los que el acceso a la red es nulo, los costes de inversión son reducidos y el alcance de las radiofrecuencias puede resultar limitado. En respuesta a este factor, el siguiente subapartado detalla las características de la aplicación que se propone para aplicar las posibilidades de transmisión de la arquitectura en entornos industriales rurales.

4.2.2. Aplicación de sensorización de industrias mediante la arquitectura oportunista

Esta propuesta de aplicación se centra en proporcionar a las compañías locales de zonas rurales un ecosistema de sensores que permite monitorizar la productividad de los procesos industriales que realizan [36, 34]. Empresas del sector agrícola, ganadero, así como enfocadas en los cultivos y en las granjas, encuentran en la falta de conexión a Internet una impor-

4.2. SISTEMA DE MONITORIZACIÓN PARA LA MEJORA DE PRODUCTIVIDAD EN INDUSTRIAS DE ZONAS RURALES

tante limitación en la digitalización de sus procesos de negocio. De esta manera, la propuesta actual, mediante las posibilidades de comunicación de la arquitectura, permite a las industrias equipar sus explotaciones con un conjunto de sensores que recopilan múltiples tipos de datos sobre la productividad. De esta manera, la información puede ser posteriormente enviada a Internet a través de la red oportunista de la arquitectura.

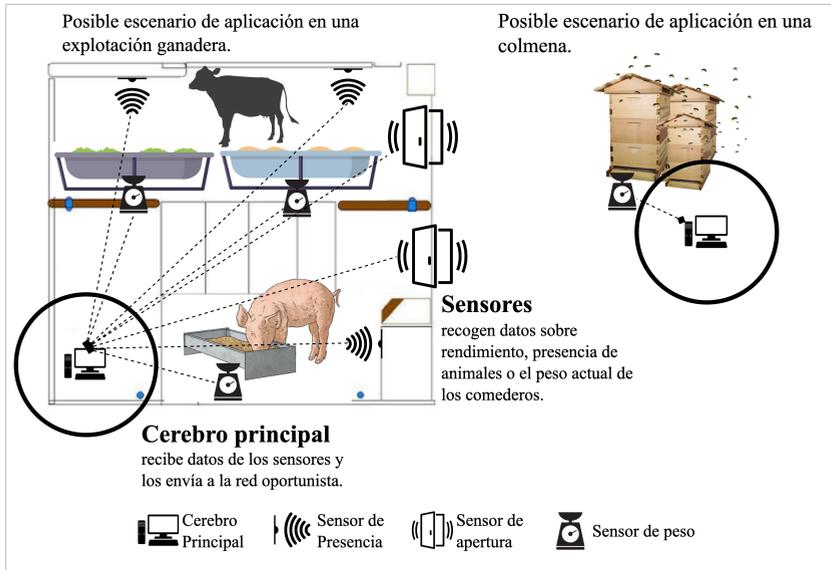


Figura 4.3: Sensores situados en una explotación industrial.

Considerando la amplia variedad de compañías que existen en el entorno rural, los mecanismos aplicados para la monitorización pueden variar y depender activamente del sector. Sin embargo, trabajos relacionados con la cría de ganado, colmenas o agricultura pueden encontrar relevante la monitorización de animales, la comprobación de existencias de recursos en los comederos o la recogida de productos. Así, los sensores pueden proporcionar valores interesantes respecto estas métricas. Estos dispositivos son coordinados localmente mediante el MB, componente que recoge las mediciones de los sensores y emprende las instrucciones recibidas a los actuadores. Este dispositivo puede ser representado con un equipo informático tradicional con tecnología *Bluetooth*, así como por un equipo Raspberry Pi que

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

coordine los procesos. Como resultado, el MB actuará como nodo origen y destino dentro de la red oportunista. De esta forma, un conjunto indeterminado de dispositivos puede ser conectado a la arquitectura y transmitir información en contextos aislados. Los tipos de sensores que interactúan con el MB pueden ser de diferentes tipos y proporcionar múltiples utilidades. A continuación, se detallan algunas potenciales funciones que pueden emprender los sensores conectados con la arquitectura.

- Monitorización de la situación de animales dentro de una granja. La posibilidad de equipar animales con dispositivos *Bluetooth* permite detectar su posición dentro de un espacio mediante la intensidad de señal respecto una baliza fija. De esta manera, estos dispositivos pueden transmitir al MB de la explotación la información sobre la ubicación y permitir dibujar un mapa aproximado de la posición de los animales.
- Control remoto de puertas. La propuesta engloba el uso de actuadores para emprender cambios en el contexto de las instalaciones. De esta forma, es posible emprender instrucciones remotas a actuadores, como interactuar con puertas y ventanas.
- Sistemas de riego. Los actuadores conectados con el MB pueden llevar a cabo múltiples acciones como activar y desactivar sistemas de riego.
- Medición de alimentos en comederos. A través de sensores de presión, resulta posible transmitir información acerca del peso que contienen los comederos de una explotación ganadera. De esta forma, se determina la cantidad de alimentos que permanece en el recipiente, identificando el consumo de los animales.
- Medición de la producción de miel. La miel producida por una colmena de abejas puede ser medida a través de sensores de peso. Estos dispositivos calculan el peso del contenedor, de manera que puede ser transmitido para conocer la evolución en la cantidad de miel generada.

Todos estos sensores son coordinados por el MB, actuando como nodo en la red oportunista y sirviendo como *gateway* local para los dispositivos

4.3. DETECCIÓN DE LA SOLEDAD EN POBLACIÓN ADULTA DE ZONAS RURALES

de la explotación. Como resultado, la aplicación responde a la necesidad de digitalizar procesos de negocio de industrias locales situadas en regiones rurales aisladas. De esta forma, propietarios y empleados pueden verse beneficiados de la monitorización de recursos, así como de la optimización resultante de conocer con detalle métricas de rendimiento, así como de la sensorización de las instalaciones.

4.3. Detección de la soledad en población adulta de zonas rurales

La soledad en adultos mayores que residen en zonas rurales se ha identificado como un problema prioritario en nuestra sociedad [138]. Factores como las limitadas posibilidades de interacción, las dificultades para relacionarse, la reducida población y la dispersión física pueden resultar condicionantes severos en la salud mental de los adultos mayores.

Esta problemática no cuenta con una respuesta sencilla. no obstante, medidas como la aplicación de políticas públicas, junto con la instauración de redes de apoyo, pueden contribuir a ayudar a lograr una mejor situación. Sin embargo, la detección del fenómeno de la soledad resulta especialmente compleja, ya que se trata de una condición ligada a la subjetividad y a la percepción del individuo. Muchos trabajos abordan la problemática desde un punto de vista cuantitativo, haciendo uso de escalas y cuestionarios para evaluar la soledad [139]. Por otro lado, otras alternativas exploran perspectivas cualitativas al incorporar la tecnología como una herramienta base.

La tecnología puede convertirse en un importante aliado para el estudio y mitigación de la soledad [139]. Sin embargo, muchos de los trabajos que hacen uso de estos recursos no pueden ser aplicados en algunas zonas rurales [140]. Como respuesta a estas circunstancias, este trabajo propone una aplicación tecnológica para la detección de la soledad en zonas rurales basada en los avances de [35, 37, 141] y sustentada en el funcionamiento de la arquitectura oportunista. Este sistema propone el registro de los encuentros físicos que llevan a cabo los adultos mayores, a efectos de identificar a aquellos que realizan menos interacciones sociales. De esta manera, es posi-

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

ble determinar potenciales candidatos que sufran soledad, así como conocer los patrones de relaciones más comunes.

4.3.1. Estado del Arte

Durante los últimos años, la soledad se ha convertido en un campo de estudio recurrente desde diferentes ámbitos. Muchos de estos trabajos se enfocan en cómo la soledad afecta en gran medida a los adultos mayores, propiciada por factores como vivir solo y la disminución de la vida social. En este escenario, la identificación de la soledad es esencial para proporcionar una respuesta, no obstante, la limitada efectividad de los mecanismos de detección dificulta la tarea.

Estudios [142, 143, 144] manifiestan cómo los mecanismos de identificación de adultos en riesgo de aislamiento social son difíciles de interpretar. Además, la falta de evidencias en su eficacia, así como en los resultados, cuestionan los experimentos. Desde el punto de vista tecnológico, existen propuestas que hacen uso de los avances técnicos para ayudar a los adultos mayores que viven solos [144, 145]. Dentro de esta línea, el acompañamiento y la mitigación de la sensación de soledad juegan un papel fundamental. Sin embargo, estos trabajos se centran en responder a la situación de soledad, sin estar enfocados en la detección a gran escala de esta.

De una forma similar, Internet y las redes sociales pueden contribuir positivamente en el bienestar de adultos mayores que sufren soledad. Trabajos como [144] muestran que la incorporación de los *smartphones* e Internet dentro de las rutinas diarias contribuyen a disminuir la tristeza y la sensación de aislamiento. Esta comunicación sin ningún obstáculo se convierte en un importante incentivo. Sin embargo, estas soluciones se encuentran con dos principales limitaciones: la falta de infraestructuras de comunicaciones de muchas zonas rurales, en las cuales el uso de Internet está limitado por factores externos como las condiciones geográficas; y su enfoque reactivo ante la soledad, ya que plantean maneras de mitigarla o reducirla, sin definir mecanismos para detectarla.

En respuesta a la necesidad de contar con mecanismos de detección de soledad en zonas rurales, este artículo plantea una aplicación distribuida que permite la identificación de adultos mayores en riesgo de aislamiento.

4.3. DETECCIÓN DE LA SOLEDAD EN POBLACIÓN ADULTA DE ZONAS RURALES

En el siguiente apartado se exponen las principales características de la idea.

4.3.2. Aplicación de detección de la soledad mediante encuentros

La detección precoz de la población adulta que sufre soledad es difícil, especialmente en zonas rurales. En respuesta a esta necesidad, la presente aplicación introduce una aplicación distribuida basada en servicios [146] que se enfoca en conocer qué personas dentro de una población pueden sufrir soledad no deseada. Basándose en los avances en la técnica [35, 37, 141] y las posibilidades de comunicación de la arquitectura, la aplicación se fundamenta en la relación entre las interacciones personales y soledad, siguiendo la premisa de conocer los encuentros físicos que han tenido los adultos mayores. Para ello, la aplicación identifica tres elementos principales: los adultos mayores; los vecinos y voluntarios de la zona; y las balizas instaladas por el pueblo.

1. Adultos mayores. Los adultos mayores del pueblo que colaboran con el proyecto son equipados con pulseras inteligentes. Estos dispositivos despliegan un servicio para llevar a cabo las comunicaciones de la información. Haciendo uso de tecnologías de corto alcance como *Bluetooth*, la pulsera detecta los dispositivos que rodean al adulto, permitiendo de esta forma reconocer los posibles encuentros físicos que tienen lugar. Así, la pulsera almacena la información del dispositivo con el que se ha encontrado, registrando el evento para posteriormente transmitirlo a un nodo Fog, identificados como balizas instaladas por la localidad.
2. Vecinos y voluntarios. Con el objetivo de trazar una relación de encuentros más óptima, los vecinos del pueblo pueden colaborar con el proyecto. De esta forma, las pulseras de los adultos detectan también a otros individuos de la localidad. Para ello, los vecinos deben instalar una aplicación que permitirá a la pulsera reconocer fácilmente el encuentro con su *smartphone*. Como resultado, el grafo de relaciones obtenido para los adultos mayores será más preciso y realista.

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

Al mismo tiempo, las capacidades comunicativas de los *smartphones* son aprovechadas para encaminar la información a los nodos Fog, actuando como intermediarios de los datos.

3. Balizas. Se tratan de los dispositivos Fog instalados en zonas clave del pueblo. A través de mecanismos de transmisión de corto alcance, las pulseras transmiten los datos que registran a las balizas, las cuales consumen el servicio de la pulsera, obteniendo la información sobre los encuentros para su procesamiento. Como resultado, es posible construir un grafo de relaciones y encuentros para cada adulto mayor, identificando aquellos que son potenciales candidatos de experimentar aislamiento social.

De esta manera, la aplicación se basa en la interacción de dos capas principales: la correspondiente a los nodos Edge, con las pulseras y *smartphones*; y la capa Fog, con las balizas receptoras. La Figura 4.4 refleja un escenario con la aplicación desplegada en la que una pareja de usuarios registra un encuentro con un vecino voluntario y su *smartphone*. Finalmente, la pulsera guarda el encuentro y, en el momento de alcanzar una localización con baliza, transmite esta información al dispositivo Fog, permitiendo la obtención final de la información. Como resultado, no se precisa de infraestructuras de telecomunicaciones ni Internet para obtener los datos, permitiendo su aplicabilidad en entornos rurales aislados. Una vez completado el proceso, es posible conocer detalladamente las relaciones sociales de los adultos mayores, así como su evolución a lo largo del tiempo. Para ello, las interacciones se almacenarán en una base de datos que permitirá su actualización y consulta.

La propuesta introduce un mecanismo que puede ayudar a mejorar la vida de los adultos mayores. La solución proporciona respuesta a la necesidad de cuantificar y evaluar la soledad. De esta forma, es posible conocer de una manera eficaz y automática el posible bienestar de la población anciana rural. Para ello, el mecanismo planteado sigue tres pilares fundamentales de rigor: la credibilidad de la información, estrictamente basada en un entorno físico y real; la precisión, medible mediante el contraste entre los datos obtenidos del sistema y entrevistas; y, finalmente, transferencia, posible a través de replicar el despliegue en múltiples zonas rurales. En

4.4. ASISTENTE DE VOZ *OFFLINE* PARA LA GESTIÓN DE TRATAMIENTOS FARMACOLÓGICOS

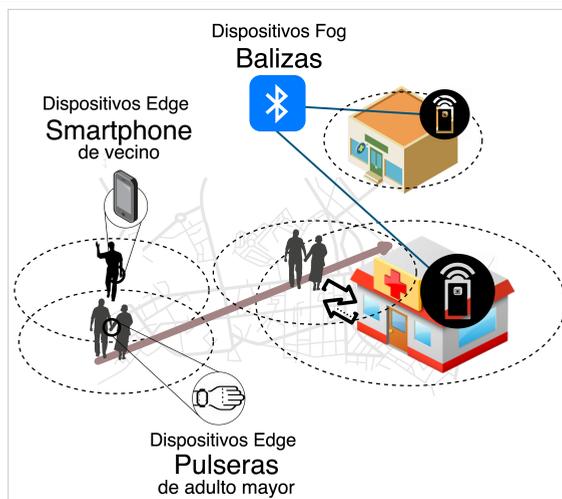


Figura 4.4: Escenario con la aplicación desplegada.

definitiva, esta aplicación supone un primer acercamiento al sistema que pretende traer una nueva visión sobre las relaciones personales y su relevancia en el ámbito rural.

4.4. Asistente de voz *offline* para la gestión de tratamientos farmacológicos

La gestión de la toma de medicamentos conforma uno de los principales retos a los que se enfrentan los adultos mayores en su día a día [147, 148]. La difícil administración de los fármacos, así como de las dosis y sus frecuencias, comprenden un escenario complejo de gestionar. Se identifica que en torno al 15% de la población mayor son pacientes polimedicados [149]. Esto significa que un porcentaje significativo de los mayores consume cinco o más medicamentos de manera diaria y durante un periodo de más de seis meses. Esta situación resulta particularmente afectada por la ausencia de asistencia, especialmente cuando el paciente padece de un deterioro cognitivo [43]. Desde el punto de vista estadístico, este contexto tiene un fuerte impacto en la sociedad: en torno al 5% de las emergencias relacio-

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

nadas con adultos mayores se debe a una incorrecta gestión de los fármacos, consecuencia directa de que prácticamente la mitad de los pacientes crónicos de este grupo de edad no siguen correctamente las prescripciones médicas [150]. Este conjunto de circunstancias resultan propicias para la aplicación de tecnología, permitiendo proporcionar asistencia.

Considerando los avances en el uso de la voz como interfaz de comunicación, los asistentes se tratan de una tecnología apropiada para la ayuda y gestión de las tomas de medicamentos de los adultos mayores. Sin embargo, es importante considerar las limitaciones que existen en el despliegue de los asistentes comerciales, especialmente derivados de su dependencia a Internet. Del mismo modo, los dispositivos comerciales plantean entornos de desarrollo privativos donde el almacenamiento de la información y la privacidad están íntimamente ligados con las políticas internas de la empresa. Como resultado, estas limitaciones técnicas plantean la necesidad de recurrir a tecnologías alternativas.

En este apartado se detalla el funcionamiento e implementación de *Assistant on Care and Health Offline* (ACHO), un asistente de voz *offline* centrado en ayudar a los adultos mayores en la gestión de los tratamientos farmacológicos, así como proporcionar utilidades enfocadas en el envejecimiento activo. De esta forma, el dispositivo emprende interacciones bidireccionales y proactivas con el objetivo de recordar las tomas de fármacos y las citas médicas; mientras se proporciona un catálogo de cuidados activos para el usuario. La información sobre el paciente, así como sus prescripciones y citas, es proporcionada a través de una aplicación móvil que se comunica con el dispositivo mediante *Bluetooth*. Esta aplicación puede ser operada por un cuidador o por el personal sanitario, facilitando su configuración de una manera sencilla. Sin embargo, el asistente también es compatible con la arquitectura oportunista, permitiendo la recepción y el envío de información hacia el centro de salud e Internet. Para ello, el asistente puede actuar como un nodo de origen y destino en la red, transmitiendo y recibiendo la información que genera y comunicándose con el centro de salud. Tras detallar el contexto del asistente y las motivaciones detrás de su funcionamiento, el siguiente subapartado analiza el estado del arte de la herramienta.

4.4.1. Estado del Arte

Existen numerosas propuestas para mejorar la adherencia terapéutica desde la perspectiva de diferentes disciplinas científicas. Un gran número de proyectos se han centrado en reforzar la capacidad del paciente para entender y seguir los tratamientos a través de su círculo social y familiar [151]. Otros identifican la comunicación entre el personal sanitario y el usuario como el principal factor a considerar [152]. Para emprender estas tareas, diferentes tecnologías y dispositivos han sido desarrollados, jugando un papel esencial en el avance del *eHealth* y el tratamiento de la adherencia [153]. En el pasado, los pacientes recurrían a diferentes técnicas para recordar la toma de medicamentos. Estas involucraban anotaciones en papeles, alarmas de reloj o pastilleros para distribuir las dosis. En la actualidad, las mejoras en las telecomunicaciones y la difusión de Internet han abierto nuevas líneas de productos basados en la comunicación instantánea, la actualización y las interacciones para recordar el consumo de las dosis al paciente.

Pastilleros inteligentes [154] como *Medication Event Monitoring System* (MEMS®), (Aardex Group, Fremont, CA, USA) [155], el *Turbo-inhaler computer*®, (Astra Draco, Lund, SWE), Doser® (Meditrack Products, S. Easton, MA, USA), Cerepak® (Information Mediay Corp., Ottawa, ON, Canada, YOW, CAN), o Dosepak® (WestRock, Atlanta, GA, USA) son tan solo algunos ejemplos de los dispositivos electrónicos actualmente disponibles [156]. No obstante, el problema actual en las tendencias como *eHealth*, *Ambient Assisted Living* (AAL) y la robótica de cuidados es su dependencia activa a la conexión con Internet. Consecuentemente, pacientes sin conexión a la red permanecen ajenos a estos avances. Así, el objetivo de esta aplicación es presentar ACHO, un asistente de voz que busca suplir estas carencias a través de su funcionamiento *offline* y el uso de las redes oportunistas.

4.4.2. Aplicación *Assistant on Care and Health* (ACHO)

La presente sección detalla el funcionamiento del asistente de voz ACHO, cuyo prototipo se muestra en la Figura 4.5, tanto en su aspecto interior (Figura 4.5(a)) como exterior (Figura 4.5(b)). Este dispositivo se basa en la interacción por voz para proporcionar al usuario una gama de funciones

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

adaptadas al contexto y necesidades de los adultos mayores de zonas rurales. La principal característica es que se trata de una plataforma de código abierto basada en un funcionamiento autónomo e independiente de Internet, sin precisar cómputo externo basado en la nube. Esta característica hace que el dispositivo no dependa de entidades externas para el almacenamiento y tratamiento de la información. Del mismo modo, esto permite que ACHO sea desplegado en cualquier hogar y región, con independencia del alcance de la conexión a Internet o cobertura celular en el área. Además, es importante considerar que muchos adultos mayores no cuentan con acceso a Internet por factores como la falta de interés, baja alfabetización digital, bajos ingresos o la ausencia de la conectividad adecuada.

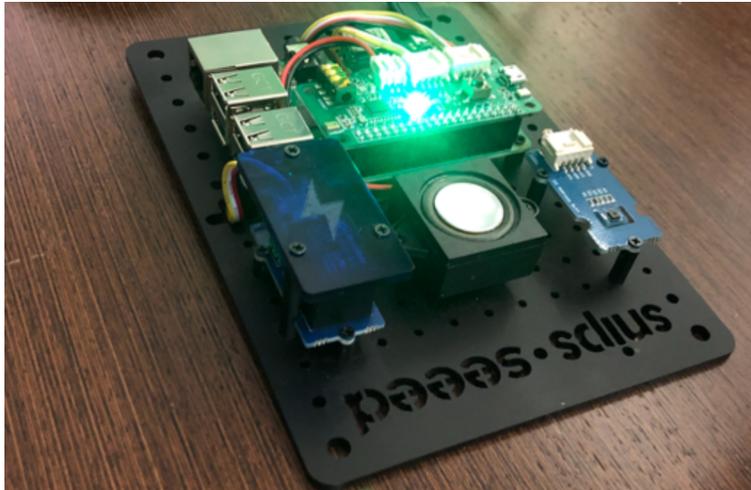
El funcionamiento base de ACHO se fundamenta en tres pasos esenciales (Figura 4.6): 1) Configuración de la información del paciente, 2) Sincronización del dispositivo e 3) Interacción con el usuario.

4.4.2.1. Configuración de la información del paciente

El primer paso para operar con el asistente de voz es especificar la información del paciente. Para ello, se emplea una aplicación móvil que permite la configuración de perfiles de usuarios, así como la definición de los datos sobre las prescripciones y las citas médicas (Figura 4.7). A continuación, se detalla cada uno de ellos.

- **Prescripción.** Las prescripciones son una de las piezas esenciales en la aplicación y en el ecosistema del asistente. Este concepto asocia al paciente con los medicamentos prescritos por su médico. De esta forma, un fármaco puede ser especificado junto con las diferentes tomas diarias que se deben realizar. Finalmente, también es posible graduar su recurrencia, permitiendo establecer qué días deben efectuarse. Con esta información, el asistente podrá identificar el momento concreto para anunciar las tomas que deben llevarse a cabo. Considerando que los usuarios son adultos mayores, la plataforma permite definir una descripción alternativa del fármaco que resulte familiar a los usuarios, complementando la denominación comercial del medicamento. Un ejemplo de esta función puede ser anunciar la toma del comprimido Adiro® junto con la especificación de “la pastilla de la caja roja”.

4.4. ASISTENTE DE VOZ *OFFLINE* PARA LA GESTIÓN DE TRATAMIENTOS FARMACOLÓGICOS



(a) Interior



(b) Exterior

Figura 4.5: Apariencia del asistente de voz.

Como resultado, es posible facilitar al paciente la identificación de la medicina y evitar potenciales confusiones. Este proceso es apreciable en la Figura 4.7(a), donde se describen los pasos para incluir una nueva prescripción de Adiro, con denominación personalizada, y un

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

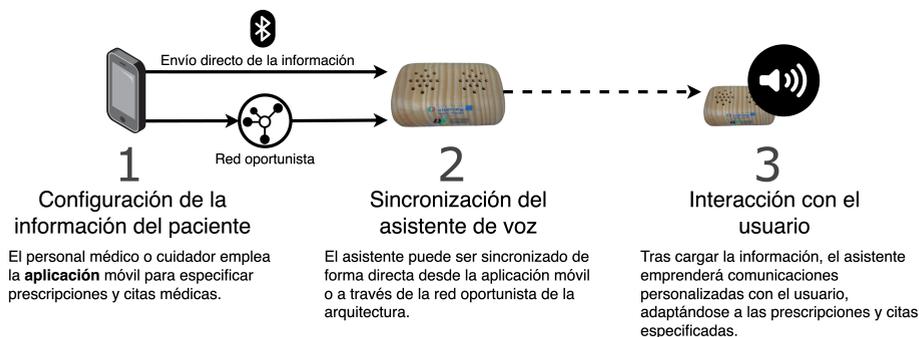


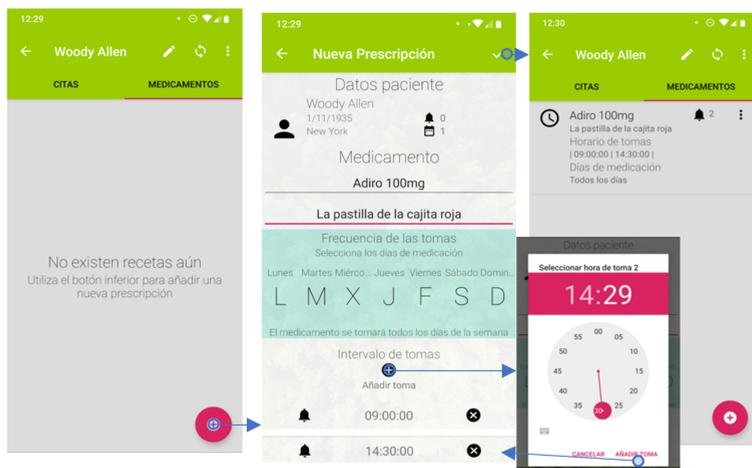
Figura 4.6: Funcionamiento de ACHO.

ajuste de recurrencia que repite diariamente su toma a las 09:00 y 14:30.

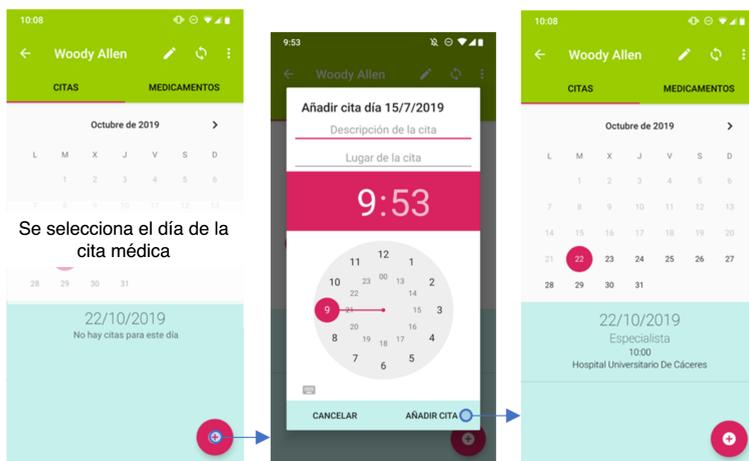
- **Cita médica.** Las citas médicas son eventos recurrentes en el calendario de muchos adultos mayores. La variedad de motivos, lugares, fechas y horas pueden resultar confusas para los pacientes. De esta forma, la aplicación integra un calendario personal que permite la definición de las citas, incluyendo el especialista al que se dirige, el sitio donde sucederá y la fecha y hora asociada. Así, el asistente tendrá presente los eventos y pondrá a disposición del usuario la consulta de las citas, así como las notificaciones a medida que se acerque la fecha. La Figura 4.7(b) recoge el proceso de adición de una nueva cita en el sistema.

Una vez que la información está configurada, la aplicación está lista para sincronizar la información con el dispositivo de voz. En el caso de que el asistente de voz esté conectado con Internet, el proceso de sincronización puede emprenderse de manera remota. Sin embargo, en la casuística más habitual, el dispositivo no tendrá acceso a Internet. Para mitigar esto, el siguiente subapartado detalla el proceso de comunicación entre la aplicación y el asistente de voz.

4.4. ASISTENTE DE VOZ *OFFLINE* PARA LA GESTIÓN DE TRATAMIENTOS FARMACOLÓGICOS



(a) Proceso de especificación de una nueva prescripción médica



(b) Proceso de adición de nuevas citas médicas

Figura 4.7: Procesos de interacción con la aplicación de sincronización.

4.4.2.2. Sincronización del asistente de voz

Considerando que el asistente de voz ACHO puede no estar conectado a Internet, la sincronización del dispositivo debe llevarse a cabo mediante

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

mecanismos alternativos. De esta manera, la arquitectura de comunicación oportunista propuesta permite servir de enlace entre la aplicación móvil y el dispositivo final, emprendiendo procesos de transmisiones bidireccionales entre ambas entidades. Para ello, el asistente de voz actúa como un dispositivo de la capa Edge, encargado de generar o recibir la información. Por otro lado, el *smartphone* que ejecuta la aplicación se considera un nodo Fog, capaz de emprender comunicaciones con Internet, así como llevar a cabo procesamiento local de los datos. Como resultado, la red oportunista se emplea como intermediario entre los extremos, permitiendo a la aplicación enviar la información a dispositivos que actúan como portadores de los datos.

Por otro lado, también sería posible realizar una sincronización directa del asistente mediante el dispositivo móvil que ejecuta la aplicación. De esta manera, si el equipo se sitúa físicamente cerca de ACHO, es posible transmitir la información introducida utilizando *Bluetooth*.

4.4.2.3. Interacción con el usuario

Cuando el dispositivo cuenta con el perfil del usuario, así como con las prescripciones y citas médicas, la información es almacenada en el dispositivo y programada en su calendario. Como resultado, cuando sucedan los eventos, el asistente actuará proactivamente, recordando el consumo de fármacos o los encuentros con especialistas.

Los recordatorios de prescripciones siguen un esquema de funcionamiento basado en la confirmación del usuario, tal y como se refleja en la Figura 4.8. Así, cuando un medicamento es anunciado en su hora correspondiente de consumo, el asistente pregunta al usuario si ha llevado a cabo la toma. Este proceso se repite hasta tres veces con intervalos de cinco minutos si no existe respuesta por parte del usuario. El anuncio del fármaco incluye su nombre comercial pero también la denominación personalizada. Como resultado, el usuario puede ser advertido de las tomas de una manera cómoda y sencilla.

Por otro lado, los eventos y las citas clínicas se anuncian de manera proactiva bajo dos circunstancias: cuando quedan cinco días para la cita y, posteriormente, cuando queda un día. Estos avisos no esperan una confirmación por parte del usuario, limitándose a anunciar la información.

4.4. ASISTENTE DE VOZ *OFFLINE* PARA LA GESTIÓN DE TRATAMIENTOS FARMACOLÓGICOS

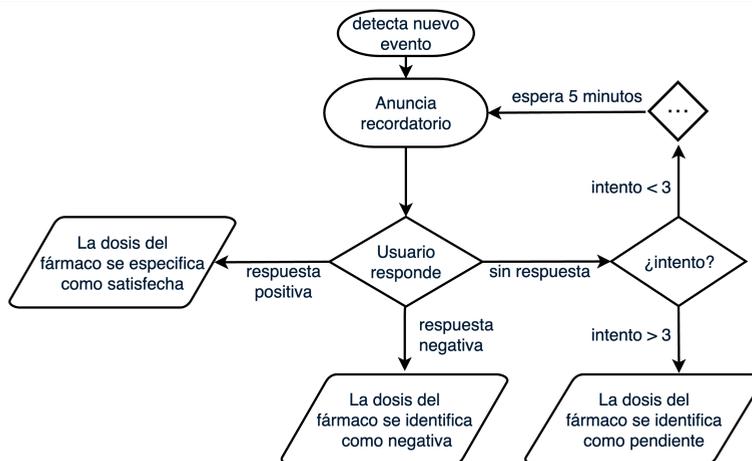


Figura 4.8: Diagrama de comunicación para la comprobación de la toma de dosis.

Además del sistema de notificaciones proactivas, los usuarios pueden emprender preguntas al dispositivo sobre las tomas de medicamentos, así como las citas. De esta forma, el asistente permite conocer qué medicamentos se han tomado a lo largo del día y qué fármacos permanecen pendientes. Del mismo modo, es posible conocer cuántos días quedan para la siguiente cita médica, así como los detalles completos sobre ella.

En definitiva, las funciones de ACHO se enfocan en mejorar la vida de los adultos mayores. Por un lado, el recordatorio de tomas de medicamentos se enfoca en mejorar la adherencia terapéutica de pacientes, mientras se supervisa y monitoriza el calendario de tomas. Por otro, los avisos de citas permiten mantener al usuario informado de los eventos pendientes. Adicionalmente, el asistente puede emprender comprobaciones sobre el estado general del usuario a través de preguntas, registrando las respuestas y ejecutando un discurso acorde a la conversación. Al mismo tiempo, el dispositivo genera un *dataset* con las interacciones, permitiendo al personal sanitario evaluar posteriormente las comunicaciones.

4.5. Adaptación automática del contexto utilizando perfiles virtuales

Durante los últimos años, el tráfico de datos en Internet se ha incrementado notablemente, evidenciando una tendencia alcista que se prolongará en el tiempo. Algunos informes destacan que el tráfico IP se ha triplicado en cuestión de años, alcanzando hasta 194.4 EB por mes [157, 158], cifras influenciadas en gran medida por la amplia penetración de los *smartphones* en el mercado. Mientras tanto, el despliegue masivo de dispositivos IoT está conduciendo a la producción e intercambio de una cantidad masiva de datos a través de la red, evidenciando la necesidad de definir nuevos modelos de almacenamiento e interacción entre los equipos [159, 160]. Concretamente, los dispositivos móviles actuales cuentan con un conjunto de características que pueden suponer un desafío dentro del contexto de las redes. Primero, estos equipos generan una gran cantidad de datos que, en muchas ocasiones, únicamente resultan relevantes en un entorno físico cercano al propio dispositivo [161]. Del mismo modo, las características autónomas de los dispositivos móviles hacen que puedan emprender desplazamientos, conduciendo a eventuales pérdidas de conexión, así como transmisiones y recepciones intermitentes [159, 162].

El escenario descrito encaja perfectamente con las motivaciones de la arquitectura propuesta, así como con el concepto y funcionamiento de las redes oportunistas. Esto conduce a la potencial aplicación de esta solución para emprender comunicaciones eficientes y dinámicas entre dispositivos en contextos inteligentes o dentro de redes IoT [159]. Sin embargo, las limitaciones en la duración de la batería y en la capacidad de almacenamiento conforman factores adicionales que pueden comprometer el rendimiento y la calidad de servicio. En esta aplicación, estos factores son tenidos en cuenta para proporcionar un esquema de comunicación que automatiza la adaptación del contexto a los gustos y preferencias de los usuarios. Para ello, empleando el concepto de perfil virtual de la arquitectura, así como la versatilidad de la capa Edge, se propone una aplicación que identifica dos tipos de dispositivos: nodos *goals*, capaces de registrar los gustos y preferencias de los usuarios; y los nodos *skills*, dispositivos actuadores que tienen la capacidad de emprender cambios en el entorno. Para ello, se emprenden

4.5. ADAPTACIÓN AUTOMÁTICA DEL CONTEXTO UTILIZANDO PERFILES VIRTUALES

comunicaciones basadas en intereses que buscan maximizar la coordinación de los elementos de la red oportunista y aplicar comunicaciones eficaces.

4.5.1. Estado del arte

Durante los últimos años, las redes oportunistas han acaparado importantes esfuerzos de investigación [163, 10]. No obstante, la difusión de las redes IoT ha abierto una nueva forma de integrar ambos paradigmas en un único área: IoT oportunista. Estas redes se componen de un alto número de dispositivos IoT, distribuidos en un espacio físico, almacenando información del contexto y generando información de interés para las aplicaciones móviles.

La idea de IoT oportunista fue introducido por primera vez en [164]. En este trabajo, se justifica la inherente relación entre humanos y la conexión oportunistas de los dispositivos inteligentes. Del mismo modo, se discute acerca de la efectividad de los protocolos de comunicación, considerando el impacto del comportamiento humano y los patrones de movilidad. Dado que las comunidades oportunistas están compuestas de acuerdo a los encuentros naturales de humanos o animales, emplear esta tecnología en entornos IoT puede resultar en un esquema de comunicación eficiente y dinámico. Un ejemplo de esto podría ser la utilización de dispositivos IoT oportunistas en escenarios de emergencia, como desastres naturales, ya que su naturaleza independiente a una infraestructura fija lo permite. Así, los nodos pueden comunicarse sin necesidad de cobertura de red 4G/5G, recurriendo a la filosofía *store-carry-forward*. Como resultado, la utilidad de estas redes en entornos de emergencia se alinea enormemente con las necesidades de comunicación. Trabajos como [165] analizan el rendimiento de los protocolos de encaminamiento, involucrando múltiples variables como el número de nodos, el volumen de datos generado y el rendimiento general de las comunicaciones.

Otra área de aplicación donde las redes oportunistas pueden ser fácilmente desplegadas es la monitorización de fauna salvaje. En este escenario, el principal objetivo es generar una trazabilidad en la actividad de animales salvajes situados en áreas geográficamente remotas. Para ello, se recurre al despliegue de dispositivos IoT heterogéneos situados en posiciones estratégicas o portados por los animales. Dentro de este marco, los autores

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

de [166] proponen un sistema de monitorización de fauna salvaje basado en redes locales de baja potencia (*Low Power Wide Area Network*, LW-PAN) utilizando LoRa para la comunicación de las estaciones fijas y BLE para la identificación de los collares de los animales. En una línea de trabajo similar, los sistemas de cuidados de la salud pasivos encuentran en el paradigma IoT un esquema pervasivo compatible para su funcionamiento. Tareas como la obtención, procesamiento y transmisión de información sobre el paciente, así como el contexto que los rodea, resultan óptimas para este tipo de redes, ya que no involucran cambios en las rutinas de los usuarios para funcionar.

A pesar de los avances y contribuciones, las redes IoT oportunistas plantean un conjunto de desafíos que comprometen la fiabilidad de las comunicaciones. Un ejemplo de ello es la interacción entre los diferentes estándares de transmisión, así como la detección de encuentros entre dispositivos heterogéneos. En [167], se propone una arquitectura software centrada en la interoperabilidad de los dispositivos IoT. A pesar de que la propuesta es validada satisfactoriamente en entornos reales, demostrando un uso adecuado de los recursos hardware, se plantean limitaciones relacionadas con el consumo de energía. Por otro lado, los autores de [168] presentan una clasificación de los diferentes protocolos de descubrimiento de dispositivos en escenarios IoT. Las soluciones analizadas permiten aprovechar el conocimiento sobre los patrones de movilidad de los elementos para optimizar el proceso de descubrimiento e identificación. Finalmente, en [169] se propone un algoritmo de encaminamiento basado en la predicción de la trayectoria de los nodos, estableciendo métricas de preferencia y reduciendo la pérdida de información.

Otro de los desafíos de las redes IoT oportunistas son las desconexiones entre los nodos de la red. La ausencia de una infraestructura fija y la movilidad aleatoria de los nodos pueden conducir a una alta complejidad para transmitir información. Para ello, los algoritmos de encaminamiento deben ser capaces de ofrecer mecanismos para facilitar los envíos de datos entre componentes de la red. Trabajos como [159] presentan soluciones de enrutamiento que permiten acceder a la información de los dispositivos IoT mediante redes móviles oportunistas. Para ello, se hace uso de paquetes de comunicación concretos que permiten a los nodos identificar los saltos más adecuados para acercar la información hacia el destino.

4.5. ADAPTACIÓN AUTOMÁTICA DEL CONTEXTO UTILIZANDO PERFILES VIRTUALES

Otros estudios se han centrado en el uso de aprendizaje automático para mejorar el rendimiento del encaminamiento. Un ejemplo de ello es el trabajo propuesto en [162], un algoritmo de enrutamiento que propone la aplicación de modelos gaussianos mixtos para inundar con mensajes grupos particulares de nodos. Esto se realiza mediante la identificación de *clusters* que reúnen los candidatos más apropiados para las transmisiones hacia un destino. Para ello, se precisa de una fase de entrenamiento que permite ajustar las variables que intervienen en las transmisiones para, posteriormente, identificar qué dispositivos proporcionan una mayor fiabilidad.

En [170, 171], los autores implementan una solución para la clasificación de dispositivos IoT dentro de una red oportunista. Este algoritmo recurre a diferentes parámetros como el ratio de *timeout* en los mensajes, la duración de los contactos, el uso del almacenamiento y el consumo de energía para identificar los dispositivos que aportan una mayor probabilidad de entrega. Este protocolo permite seleccionar de una forma justa a los dispositivos, en base a sus capacidades. Sin embargo, esta característica no tiene en cuenta los intereses de los nodos sobre la información que portan.

Recientemente, otros algoritmos de encaminamiento enmarcados en las redes DTN, se han centrado en la gestión efectiva de la energía para una selección de saltos entre los nodos con un menor consumo [172]. Con el objetivo de reducir el uso de la red, otras soluciones se han fundamentado en la utilización de información histórica, así como en la trayectoria que definen los nodos, para tomar decisiones de enrutamiento [173, 174]. Como resultado, el número de copias se reduce y la probabilidad de entrega se incrementa. No obstante, estos acercamientos no consideran los intereses de los nodos para evitar sobrecargar aquellos dispositivos que no están relacionados con el tipo de información que se está transmitiendo. Esta visión podría resultar interesante en redes IoT donde los nodos que integran las comunicaciones cuentan con recursos limitados.

Tras analizar los trabajos relacionados en el ámbito de las redes IoT oportunistas, el siguiente subapartado estudia una aplicación de la arquitectura propuesta que propone un mecanismo de comunicación alternativo para contextos IoT inteligentes.

4.5.2. Aplicación de adaptación del contexto mediante redes oportunistas

El objetivo del paradigma IoT es mejorar la vida de los usuarios a través de la automatización de tareas cotidianas. De esta manera, el contexto del usuario y la información almacenada por los dispositivos IoT puede resultar útil para mejorar la manera en la que interactúan, adaptando el comportamiento de los sistemas a las preferencias de los usuarios en cada momento. Por lo tanto, el contexto y la información registrada es intercambiada entre los dispositivos involucrados para lograr la personalización y adaptación de su comportamiento. Existen aproximaciones de trabajos previos como [175] y [176] en los que el comportamiento de los dispositivos de un entorno se adaptan de manera semiautomática a las preferencias de los usuarios. La mayoría de estas propuestas se fundamentan en una arquitectura centralizada en la que la información contextual se transmite a un servidor que procesa los datos, genera el perfil de los usuarios y lo difunde entre los dispositivos correspondientes. En los últimos años, el incremento de las capacidades de computación y almacenamiento de los dispositivos inteligentes han permitido elaborar nuevos modelos de computación contextual, cercanas a las ideas de colaboración *peer-to-peer* entre elementos. Esta propuesta primero emplea el teléfono del usuario para recolectar, almacenar y computar la información contextual para elaborar el perfil virtual. Después, el perfil es utilizado para adaptar el comportamiento de los dispositivos IoT del entorno. Este modelo se denomina contexto situacional [177], identificando los perfiles virtuales como instrumentos para contener la siguiente información:

- Un perfil básico que contiene la información contextual del usuario, así como las relaciones establecidas con otros dispositivos. También, datos como el historial de interacciones del dispositivo y mediciones realizadas por los sensores resultan involucrados en este componente.
- Un perfil social que contiene los resultados de las inferencias realizadas sobre la información contextual. La información almacenada por los perfiles básicos es procesada por un motor de inferencia para obtener datos de alto nivel.

4.5. ADAPTACIÓN AUTOMÁTICA DEL CONTEXTO UTILIZANDO PERFILES VIRTUALES

- La información sobre los *goals*, valores que detallan los intereses y deseos del usuario. Estos datos pueden ser deducidos a partir de la información básica y social mediante diferentes reglas de inferencia.
- La información sobre los *skills* o capacidades con las que la entidad cuenta. Estos valores reflejan las potenciales acciones y decisiones que el dispositivo puede realizar para modificar el contexto y satisfacer objetivos.

Considerando que los contextos cuentan con un conjunto de entidades, elementos y personas, y que cada una cuenta con un perfil virtual, el contexto situacional puede ser definido como la composición de los perfiles virtuales involucrados en un escenario particular. El resultado de combinar esta información resulta en la composición de un *timeline* conjunto que resume, en un alto nivel, las inferencias realizadas sobre los perfiles virtuales, así como el conjunto de *goals* y de *skills*.

Actualmente, existen diferentes paradigmas como la Programación Orientada a Contextos (*Context Oriented Programming*, COP) [178], que pueden ser empleados para definir diferentes comportamientos en un aplicación dependiendo de la identificación de información contextual concreta. Así, se concurre que la información y las variables involucradas se especifican directamente en el código fuente de las aplicaciones. Como resultado, la adaptación de sus capacidades se limita al conjunto de contextos contemplados durante el diseño del sistema. Por otro lado, en el contexto situacional, una vez que los perfiles son definidos, las mecánicas en las que las entidades se coordinan para satisfacer los *goals* de los usuarios son identificados en tiempo de ejecución. Así, el contexto situacional proporciona un nivel mayor de automatización en la comunicación de los dispositivos inteligentes y las personas.

La Figura 4.9 muestra un ejemplo simple de un salón donde está teniendo lugar una pequeña fiesta con tres personas y un equipo *HIFI* inteligente. Cada persona, a través de su *smartphone*, tiene un perfil virtual que detalla información contextual histórica (por ejemplo, la música que suele escuchar, su localización, etc. . .), sus preferencias (por ejemplo, los géneros musicales favoritos en una localización específica), y sus *goals* (por ejemplo, escuchar estilos de música en particular). Al mismo tiempo, el sistema *HIFI* cuenta

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

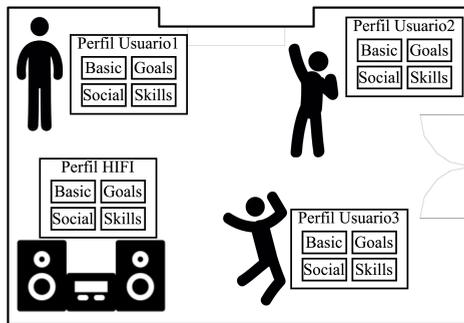


Figura 4.9: Ejemplo del contexto situacional.

con su propio perfil virtual detallando información contextual histórica (por ejemplo, la música que ha reproducido), los *goals* que tiene (por ejemplo, ahorrar energía) y sus *skills* (concretamente, reproducir música). De esta manera, el contexto situacional se entendería como una composición de los cuatro perfiles virtuales. A partir de este perfil compuesto, la estrategia para coordinar las diferentes entidades e identificar qué funcionalidades *skills* deberían ser ejecutadas se emprende en tiempo de ejecución. Concretamente, el estilo musical e incluso la canción concreta que debería reproducir el sistema *HIFI* sería detectada. Los diferentes subconjuntos de información constituyen el perfil virtual y nos permiten abordar problemas relacionados con la heterogeneidad de los dispositivos. Para ello, los procesos de comunicación, intercambio de información e interacciones se realizan a través de dos conceptos: *goals* y *skills*. Esto permite que la transmisión de información y la coordinación de las acciones se emprendan considerando las capacidades particulares de los dispositivos. Respecto este factor, algunos trabajos iniciales han sido publicados en [179].

Sin embargo, el concepto de contexto situacional resulta una idea abierta: ¿cómo los *goals* de los usuarios son distribuidos a las entidades con *skills*? Como se detalla anteriormente, la conexión intermitente entre dispositivos, los patrones de movilidad y el gran volumen de datos que se precisa conduce a especiales dificultades y retos para las actuales redes IoT. De esta manera, la presente aplicación propone el uso de las redes IoT oportunistas, así como los protocolos de encaminamiento de la arquitectu-

4.5. ADAPTACIÓN AUTOMÁTICA DEL CONTEXTO UTILIZANDO PERFILES VIRTUALES

ra, para permitir a los usuarios compartir su información entre dispositivos IoT contextuales. La siguiente subsección aborda en mayor detalle los mecanismos aplicados en los procesos de comunicación.

4.5.2.1. Redes Contextuales Virtuales Oportunistas

En este apartado, el concepto de OCVN, introducido en el Capítulo 3, es detallado en mayor medida, extendiendo su explicación a los escenarios inteligentes de esta aplicación. Para ello, un conjunto de conceptos adicionales, relacionados con los principales componentes de la red contextual, son definidos:

- **Dispositivo IoT o nodo.** Un nodo IoT es un dispositivo inteligente que cuenta con, al menos, una interfaz de red inalámbrica, independientemente de la naturaleza específica de la tecnología de comunicación. Se consideran dos tipos de nodos: (i) un nodo IoT fijo capaz de almacenar información del contexto (por ejemplo, un sensor de humedad, un sensor de presencia, etc...) y actuar acorde a las necesidades de los usuarios (por ejemplo, incrementar la temperatura en la sala, reproducir una *playlist* de música en particular...); y (ii) un nodo móvil IoT que tiene la capacidad de desplazarse a través de un área geográfica y emprender conexiones oportunistas con otros nodos IoT mediante tecnologías de comunicación de corto alcance. Cada nodo en la red es capaz de crear su particular Perfil Virtual. Además, un conjunto de datos históricos son guardados en cada nodo, con datos sobre el número y duración de los encuentros con otros dispositivos con los mismos intereses. En particular, este conjunto de información contiene, para cada nodo contactado, la siguiente información: *timestamp* del último contacto, dirección hardware, identificadores de *skills* e identificadores de *goals*. Estos atributos permiten mejorar el comportamiento de la red virtual cuando se conforma por dispositivos heterogéneos de distinta naturaleza.
- **Opportunistic Context-Virtual Network (OCVN).** Extendiendo el concepto introducido en el Capítulo 3, una OCVN es una red virtual compuesta por un conjunto de nodos IoT donde: (i) todos los nodos comparten intereses (*goals/skills*) en común; y (ii) es posible enviar

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

información de un nodo a otro mediante interacciones oportunistas. Desde una perspectiva general, los nodos de una OCVN pueden estar situados en el mismo lugar y al mismo tiempo, o bien, no compartir características espacio-temporales. Un ejemplo de esto sería cuando nodos se conectan durante un periodo de tiempo, comparten sus perfiles virtuales y, tras un instante, uno de ellos abandona el lugar físico donde se encontraba (por ejemplo, una sala). Cada nodo almacena la información sobre los perfiles virtuales del resto de los nodos en la OCVN durante un periodo de tiempo concreto. La razón por la que se emprende este almacenamiento es para compartirlo a otros nodos en el futuro, aspecto fundamental para generar OCVN basadas en intereses de *goals/skills*.

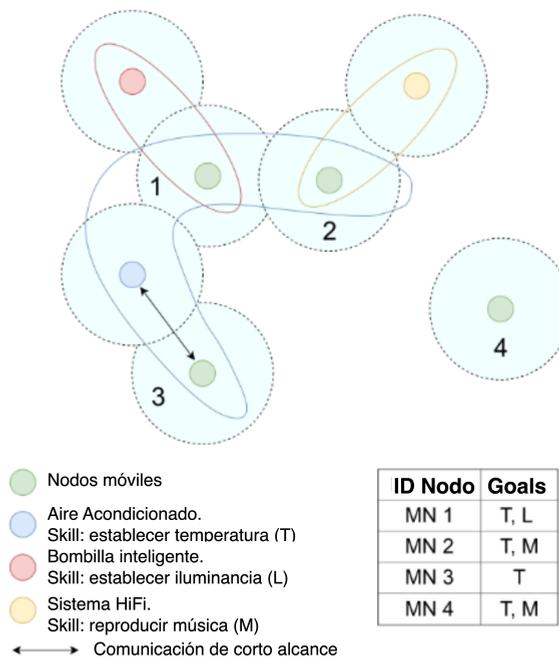


Figura 4.10: Ejemplo de 3 OCVNs en un contexto de 7 nodos.

Para comprender mejor el concepto de OCVN, la Figura 4.10 muestra un ejemplo donde siete nodos IoT coexisten en el mismo espacio geográfico

4.5. ADAPTACIÓN AUTOMÁTICA DEL CONTEXTO UTILIZANDO PERFILES VIRTUALES

y tres OCVN diferentes son creadas. Los nodos verdes representan los nodos móviles (por ejemplo, *smartphones*), y sus *goals* son descritos en la tabla mostrada en la parte derecha de la figura. Respecto el conjunto de nodos fijos IoT heterogéneos, estos representan una máquina de aire con el *skill* de regular la temperatura, una bombilla inteligente capaz de ajustar la iluminación, y un sistema *HIFI* que permite reproducir música acorde a las preferencias. En este ejemplo, se asume que el rango de cobertura, indicado mediante líneas discontinuas, es la misma para cada nodo. Del mismo modo, se considera que tiene lugar una comunicación de corto alcance cuando dos nodos están en contacto. Las líneas coloreadas representan los límites de cada OCVN. De esta manera, es posible apreciar que, a pesar de que Nodo Móvil 4 (*Mobile Node 4*, MN4) está aislado y que, por lo tanto, no pertenece a ninguna OCVN, puede todavía almacenar información sobre la última OCVN a la que perteneció. Por ejemplo, si se desplaza hacia el sur del escenario, podría haberse unido a la OCVN amarilla en el pasado, ya que uno de sus *goals* es referente al tipo de música. De esta forma, MN4 es capaz de almacenar información de dicha OCVN durante un periodo de tiempo predefinido para ser potencialmente compartida con otros nodos.

Por lo tanto, en los escenarios basados en OCVN, el uso de temporizadores para eliminar los datos almacenados resultan fundamentales para reducir el *overhead* de la red y el uso de los recursos hardware de almacenamiento. En particular, la información relacionada con los nodos que cuentan con una baja probabilidad de volver a encontrarse, es eliminada del conjunto de información una vez que se cumple el tiempo Δ_t .

La presente aplicación proporciona una visión adicional de las posibilidades de la arquitectura en escenarios inteligentes. Para ello, la comunicación oportunista es considerada para emprender configuraciones del contexto de acuerdo a los gustos y preferencias de los usuarios, empleando para ello las capacidades de los dispositivos para completar cambios en el escenario. De esta forma, se explota y aprovecha la versatilidad de las comunicaciones entre las capas Edge y Fog, así como el enfoque oportunista, para alcanzar una solución óptima y dinámica en la comunicación entre dispositivos.

4.6. Perfiles virtuales para el gobierno de la información personal

El concepto de perfil virtual de la arquitectura plantea una herramienta cuyas características favorecen el almacenamiento de datos de una manera segura y privada. Dado que se trata de una entidad que se ejecuta de manera autónoma en el dispositivo donde se despliega, permite gobernar de manera exhaustiva los datos que se registran, así como las entidades externas que acceden a la información. Como resultado, el perfil virtual se convierte en una oportunidad para proporcionar un estándar de almacenamiento de los datos personales, cambiando el paradigma de la custodia de la información personal en Internet.

La ausencia de estándares en el almacenamiento de la información en Internet, así como la tendencia a administrar de manera opaca los datos personales, impacta en la experiencia de los usuarios y en el funcionamiento de las compañías. Como resultado, este escenario conduce a que los usuarios deban replicar sus datos cada vez que emprenden la creación de un perfil en una nueva aplicación. En respuesta a esta problemática, muchas aplicaciones ofrecen actualmente iniciar sesión a través de otras credenciales como Facebook o Google, sin embargo, este punto conduce a otra problemática: la privacidad y la dependencia. Muchas de estas plataformas requieren la aceptación de términos y condiciones que involucran publicidad dirigida, favoreciendo los modelos de negocio de las grandes compañías tecnológicas [180]. De esta manera, muchos usuarios depositan una confianza ciega en estas políticas [181] que, eventualmente, han conducido a filtraciones de información privada [182], así como un uso abusivo de los datos personales para fines privados [183, 184, 185]. Del mismo modo, las restricciones de estas políticas resultan evidentes cuando la información personal no puede ser eliminada de las plataformas a pesar de que el usuario solicite la desactivación del perfil [186]. Sin embargo, otro de los aspectos colaterales del modelo privado de almacenamiento son las inconsistencias y la duplicidad.

En respuesta a este escenario, resulta apropiado alinear el concepto y funcionamiento del perfil virtual con las necesidades detectadas en el almacenamiento de la información personal en Internet. Para ello, la propuesta recurre a su integración con una de las iniciativas más significativas dentro

de la línea: la propuesta de Internet descentralizado *Social LInked Data* (SOLID) [187].

La iniciativa SOLID se trata de una propuesta impulsada por Tim Berners-Lee que plantea la descentralización de la información de los usuarios con el objetivo de separar las aplicaciones y los datos personales [187]. De esta manera, los usuarios se encargan de definir, almacenar y administrar su información individual de una manera autónoma a través de los denominados Almacenes *Online* Personales (*Personal Online Data Stores*, *PODS*, PODS) [187, 46]. Esta entidad propone la elaboración de un perfil que recoge el conjunto completo de información del usuario, permitiendo autorizar el acceso a entidades externas para su consulta o modificación. En este modelo, las aplicaciones podrían adoptar una estrategia mediante la cual no requieren almacenar y custodiar información personal, sino que pueden consultarla directamente al PODS. Como resultado, los usuarios cuentan con un control completo de los accesos, proporcionando y revocando las peticiones de las aplicaciones. La adopción de este modelo proporciona al usuario y a las compañías una experiencia enriquecida basada en la precisión, privacidad y control, evitando la duplicación de la información y las potenciales inconsistencias.

En este contexto, el perfil virtual de la arquitectura propone el despliegue de SOLID PODS en los dispositivos inteligentes que participan como nodos en la red oportunista. Esta combinación explota su naturaleza perversiva y autónoma, así como las características contextuales de las que están dotados, para proporcionar un nuevo modelo de almacenamiento de la información personal [47]. Los dispositivos móviles resultan muy apropiados para ejecutar el perfil virtual mediante un PODS, permitiendo atender de una forma sencilla la administración de los datos, la autorización o denegación de las peticiones externas y conocer en cualquier momento qué aplicaciones están consumiendo información [188, 189].

4.6.1. Estado del arte

De una manera similar a la aplicación propuesta, otras alternativas plantean diferentes filosofías para el almacenamiento y gestión de la información personal en Internet. Cuestiones como la transparencia y el gobierno

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

de los datos por parte de los usuarios han motivado trabajos que buscan democratizar y responder ante la problemática actual. En esta línea, algunas grandes compañías han manifestado responsabilidad corporativa sobre el gobierno de los datos y han propuesto mecanismos para ayudar a los usuarios. Este es el caso de Apple y su herramienta para permitir o deshabilitar la monitorización de la actividad de los usuarios por parte de apps [190]. Esta funcionalidad dota al usuario de control sobre sus datos, así como de su difusión. Sin embargo, esta herramienta no proporciona un mecanismo para mitigar la replicación y las inconsistencias entre los almacenes de datos. En respuesta a ello, otros trabajos se centran en mejorar la privacidad y cambiar las dinámicas de acceso a la información. Así, muchas propuestas se enfocan en el almacenamiento centralizado de los datos en un único punto. Ejemplos de esta dinámica pueden ser HAT Project [191], Freenet [192], DAT Foundation [193], Threefold Net [194], Activity Pub [195], Safe network [196] o BBC Databox [197]. Sin embargo, entre ellos, SOLID define la propuesta que ha acaparado mayor atención.

Trabajos como [198, 199, 200, 201] consideran SOLID como la base para implementaciones que explotan el potencial de la herramienta y desarrollan nuevas funcionalidades y mecanismos.

La propuesta desarrollada en [198] propone el uso de SOLID para propósitos sanitarios. Considerando la enorme cantidad de datos vitales que recopilan diariamente los dispositivos *wearables* de entrenamiento, este trabajo estudia una arquitectura de almacenamiento alternativa basada en SOLID. El proyecto investiga sobre la descentralización de los datos recogidos por compañías como Fitbit, Apple o Google hacia un modelo basado en SOLID y desplegado en *smartphones*. De esta manera, se abordan asuntos relevantes como la privacidad, la consistencia de la información y la gestión de la privacidad. Sin embargo, en contraste con nuestra propuesta, la solución almacena información de salud para proteger la privacidad y la consistencia, mientras la aplicación que se introduce en este apartado proporciona una herramienta para descentralizar la información y acomodar cualquier tipo de dato bajo demanda a las aplicaciones escogidas.

En el caso de [199], el trabajo proporciona un mecanismo de verificación fiable para el resultado de *tests* de COVID-19. De esta forma, el proyecto propone una arquitectura para almacenar certificaciones de manera segura y privada, permitiendo la identificación de personas que han sido some-

4.6. PERFILES VIRTUALES PARA EL GOBIERNO DE LA INFORMACIÓN PERSONAL

tidas a *tests* de coronavirus. Para esta propuesta, el estudio hace uso de SOLIDS PODS en dispositivos móviles, garantizando la privacidad de la información que se registra. A pesar de que la idea se basa en *smartphones* para desplegar PODS, el trabajo posiciona como su eje central los procesos de validación y certificación. De esta forma, la propuesta no ofrece un mecanismo generalista para el gobierno de los datos privados.

De la misma manera, [200] también hace uso de SOLID para verificar información mientras se garantiza la confidencialidad. Así, el proyecto conecta los PODS con *Blockchain* para crear una arquitectura descentralizada que proporciona un mecanismo de almacenamiento fiable, manteniendo la integridad y la privacidad.

El trabajo propuesto en [201] presenta un modelo para agilizar procesos burocráticos y administrativos con el gobierno. Esta idea pretende responder a la gran cantidad de información personal que los gobiernos almacenan y cómo las instituciones se enfrentan a la custodia y gobierno de un gran volumen de copias y redundancia. Factores como la consistencia, el control de accesos y la privacidad son asumidos mediante el uso de PODS, siguiendo el marco legal establecido. De esta forma, los ciudadanos gestionan su información, almacenando los datos en sus PODS privados y permitiendo a las instituciones públicas el acceso. Como resultado, los ciudadanos cuentan con el control de su información mientras se resuelve la problemática de la redundancia y de las inconsistencias entre las instituciones. Alineando [201] con la aplicación, el trabajo limita el almacenamiento a los datos administrativos y burocráticos, así como su acceso a las instituciones oficiales.

Estas implementaciones hacen uso de SOLID desplegando la instancia del POD en *smartphones*. Como resultado, estos componentes se dotan con nuevos comportamientos y posibilidades, definiendo una arquitectura descentralizada y basada en dispositivos individuales. De esta manera, SOLID es empleado para tareas como certificación y validación o, como en el caso de [198], almacenamiento. Sin embargo, estos acercamientos no emplean SOLID para guardar información generalista, definiendo un mecanismo universal para el gobierno de los datos. Así, evaluando las alternativas de la literatura, creemos que es interesante posicionar los *smartphones* como potenciales herramientas de gestión de la información y alienar sus posibilidades con los mecanismos de SOLID. Así, la aplicación propuesta sitúa a los *smartphones* como el centro del almacenamiento, definiendo un nue-

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

vo paradigma donde la privacidad y la descentralización definen elementos principales en el gobierno de los datos en Internet.

Considerando estas necesidades, se propone el uso del perfil virtual definido en la arquitectura para el almacenamiento y gestión de la información. Esto permite a los nodos de la red oportunista registrar sus datos de una manera estandarizada mientras permite su integración con aplicaciones externas. Trabajos como [34, 35, 36], requieren un perfil virtual para los datos de los dispositivos. De esta manera, mediante la integración con SOLID, es posible incluir sus funciones y alinearlas con los requisitos de gestión de la información. Del mismo modo, soluciones como [202, 203, 204] podrían encontrar en la presente propuesta un sólido recurso para su implementación.

4.6.2. Aplicación de integración de SOLID POD en *Smartphones*

Esta aplicación de la arquitectura propone una solución para combinar la naturaleza íntima de los *smartphone* y la poderosa filosofía de la iniciativa SOLID [47]. La solución combina estas dos líneas en un singular proyecto que sitúa al usuario en el centro de la gestión de la información. Así, los *smartphone* se convierten en el almacén individual de los datos de sus usuarios, empoderando estos dispositivos para servir como proveedores de la información a las aplicaciones externas que lo demanden. Esta propuesta pretende responder al creciente interés por el gobierno de los datos y presentar una solución para las inconsistencias y publicidad de la información en los perfiles personales.

La propuesta hace uso de un conjunto de componentes que colaboran para proporcionar la información bajo demanda a entidades externas, tal y como se detalla en la Figura 4.11. El esquema explica el proceso completo para comunicar una petición desde una aplicación externa (ϵ) al SOLID PODS (P_{solid}) del usuario, desplegado en su *smartphone*. De esta manera, la solución se compone de tres entidades principales: el SOLID PODS (P_{solid}) y Pusher App (P_{app}) en el *Smartphone* (S); y la API Gateway (G) en el servidor. Adicionalmente, Firebase (F) es utilizado para comunicar peticiones entre el servidor, el *smartphone* y las aplicaciones externas. A continuación, se detallan los integrantes de la solución.

4.6. PERFILES VIRTUALES PARA EL GOBIERNO DE LA INFORMACIÓN PERSONAL

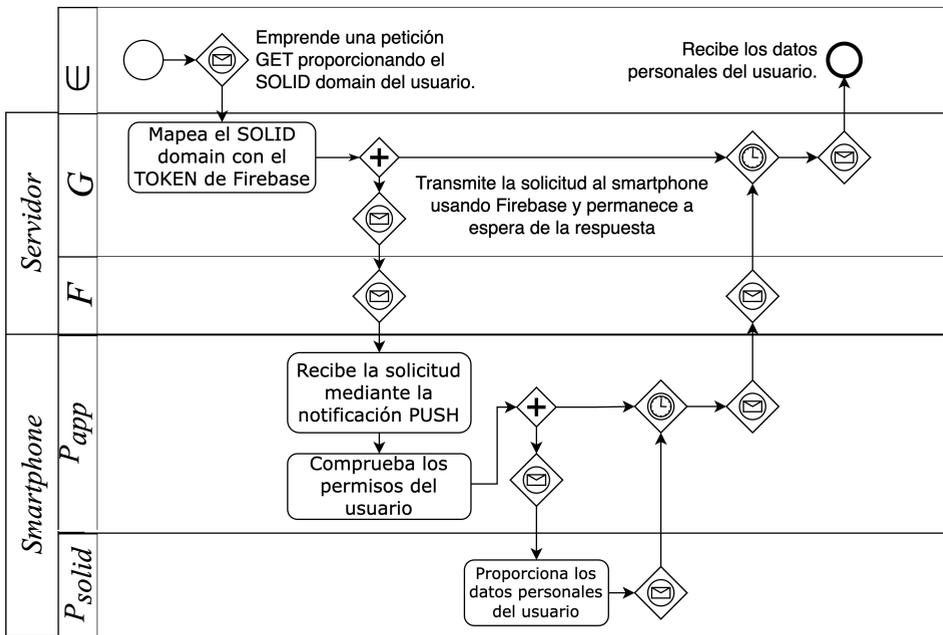


Figura 4.11: Arquitectura de Pushed SOLID

El SOLID PODS es la entidad encargada del almacenamiento de la información personal. Este elemento es ejecutado de manera local en el *smartphone* del usuario. Aunque ha sido diseñado para ser desplegado en un servidor, la aplicación propuesta despliega este componente en *smartphones*, actuando como el perfil virtual en la arquitectura. Así, el PODS almacena los datos localmente en el dispositivo, de manera independiente y aislada de entidades externas.

Una vez que el SOLID PODS es configurado, el componente estará listo para proporcionar información. Así, los datos guardados son únicamente visibles desde la aplicación del dispositivo, resultando inaccesibles para aplicaciones externas. Sin embargo, queremos que P_{solid} proporcione a los servicios externos (ϵ) la información que soliciten. Para ello, se recurre a Pusher Application (P_{app}), elemento encargado de gestionar las peticiones externas. Esta funcionalidad permite proporcionar comunicación entre la

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

API Gateway (G) y el SOLID Server (P_{solid}) ejecutado en el *smartphone*. Se precisa que la API Gateway resuelva de manera efectiva las peticiones y mapee el dominio del SOLID PODS con la dirección Firebase del dispositivo. No obstante, la adopción de esta capa intermedia no contradice la filosofía descentralizada de la propuesta, ya que la API Gateway no almacena información de los usuarios, sino que se limita a guardar tuplas que relacionan la dirección del dispositivo con las peticiones. Con el objetivo de emprender las comunicaciones entre la API Gateway y el *smartphone*, Firebase (F) [205] es utilizado para conectar las peticiones desde G con el dispositivo.

Firestore es una tecnología desarrollada por Google que permite procesos de comunicación simples basados en notificaciones push entre entidades. Esta herramienta se considera como componente de la solución debido a su simpleza, pero puede ser fácilmente sustituido por alternativas de código abierto como MQTT [206]. Sin embargo, Firestore proporciona un rendimiento fiable y sus términos de uso especifican que la información que se almacena en el servicio se limita a datos básicos requeridos para su funcionamiento [207].

Una vez que Firestore transmite las peticiones recibidas en la API Gateway, este componente comunica la petición con el *smartphone*, ejecutando un método *callback* en Pusher App. Así, el método solicita la información requerida al SOLID PODS, que rescata los datos particulares del perfil y devuelve los valores. Como resultado, Pusher App proporciona los datos solicitados a la API Gateway. Considerando que el método *callback* identifica la entidad que solicita la información y el SOLID PODS emprende el control de accesos; la seguridad y la validación pueden ser fácilmente integrados en el proceso. Como resultado, los detalles técnicos para replicar el proceso de implementación pueden ser encontrados en el repositorio del proyecto¹.

Considerando estos tres componentes del sistema, la manera en la que se coordinan comienza con la instalación y configuración del SOLID PODS y Pusher Application. Una vez que estos elementos están operativos, Pusher App comunica la adición con la API Gateway, la cual se encargará de mapear las peticiones entrantes con el correspondiente *smartphone*. Para

¹<https://bitbucket.org/spilab/solidsituational.context>

4.6. PERFILES VIRTUALES PARA EL GOBIERNO DE LA INFORMACIÓN PERSONAL

ello, el valor del Token ID de Firebase es actualizado desde Pusher App en caso de que este cambie. Así, la API Gateway se mantiene actualizada con los últimos valores necesarios para funcionar.

El proceso de funcionamiento de la propuesta se detalla en la Figura 4.12, la cual identifica todos los pasos y colaboraciones entre las diferentes capas. Primero, la aplicación externa (ϵ) requiere un conjunto concreto de información del usuario (paso 1) (por ejemplo, una nueva plataforma web donde el usuario está creando una cuenta). Así, en lugar de tener que introducir todos los datos personales, el nuevo miembro proporciona su dominio en SOLID (2). Esta variable es el nombre público de su SOLID PODS y actúa como el principal identificador en la arquitectura. Así, la aplicación únicamente tiene que solicitar la información requerida a la API Gateway (G), indicando el dominio en SOLID. La API Gateway es la única entidad que realmente conoce dónde se almacena la información, recurriendo a la tecnología de Firebase para comunicarse fácilmente con *smartphones* mediante notificaciones *push*. Así, la API Gateway mapea el dominio en SOLID con el Firebase ID y notifica al *smartphone* correspondiente (S) sobre la petición (3). Como resultado, el dispositivo recibe la notificación y pregunta al usuario si acepta que la aplicación externa acceda a la información (4). Esta transacción se realiza con Pusher Application (P_{app}), la cual ejecuta un método *callback* invocado cuando la API Gateway recibe interacciones. Entonces, el usuario puede aceptar o denegar la petición. Así, los permisos pueden ser configurados, definiendo entidades solicitantes como fiables. Esta operación puede ser emprendida desde el SOLID PODS o mediante Pusher App. En el caso de que el permiso del usuario sea favorable, el SOLID PODS local (P_{solid}) proporciona la información requerida a Pusher App. Entonces, la aplicación responde a la API Gateway con los datos (5). Finalmente, la API Gateway retorna la respuesta al servicio solicitante (ϵ), culminando así el proceso completo (6).

Considerando este procedimiento, la aplicación se convierte en una herramienta apropiada para gestionar la información, tanto de usuarios como de aplicaciones. Por un lado, los usuarios son capaces de almacenar físicamente su información personal en un único lugar: su teléfono móvil. Además, resulta posible identificar de una manera fiable todas las aplicaciones y servicios que tienen acceso al perfil. Así, el usuario puede autorizar o revocar el acceso en cualquier momento. Por otro lado, las aplicaciones

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

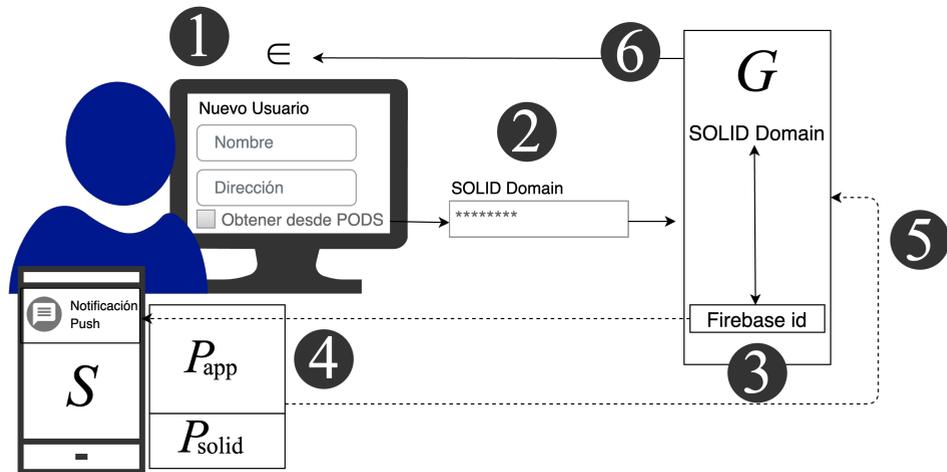


Figura 4.12: Ejemplo de servicio de datos desde un *smartphone* ejecutando un PODS.

externas se benefician de la centralización de la información en el PODS. Esta solución garantiza la fiabilidad de la información, así como que los perfiles personales resulten completos y actualizados. Del mismo modo, las inconsistencias y la replicación de la información se resuelve, proporcionando de una manera uniforme una única fuente de datos común para todas las aplicaciones. Como resultado, la información puede ser compartida entre plataformas, resultando posible monitorizar las entidades que consumen nuestros datos mediante la estandarización del almacenamiento. Como resultado, la manera en la que la información personal se almacena en Internet podría cambiar, dibujando una nueva filosofía basada en el control y en el gobierno del usuario.

Con el objetivo de detallar el potencial impacto de la propuesta en el uso cotidiano de aplicaciones de Internet, el siguiente apartado refleja un caso de uso en el que SOLID se emplea para gestionar la personalización de servicios de música.

4.6.2.1. Caso de Uso

Tal y como se ha detallado en el apartado previo, la independencia de datos entre plataformas afecta a la experiencia de los usuarios. Uno de los casos más recurrentes es el de los servicios de música en *streaming*, propiciado por la tendencia a reproducir contenidos en múltiples plataformas [208]. En este apartado se compara el escenario descrito con la utilización de la solución propuesta.

Para este ejemplo, se consideran dos de los servicios de *streaming* más usados [209]: Amazon Music y Spotify. Ambas aplicaciones cuentan con un sistema de recomendación basado en las reproducciones históricas y listas de favoritos, de esta manera, las sugerencias de contenido resultan más precisas cuanto mayor es el uso de los servicios por parte del usuario. Tanto Amazon Music como Spotify mantienen estos datos de manera privada, limitando la capacidad de compartir esta información entre ellas. Como resultado, estas políticas definen un inconveniente cuando los usuarios emplean ambas aplicaciones de manera irregular, conduciendo a recomendaciones imprecisas. Considerando este escenario, el caso de uso propuesto presenta un posible contexto (Figura 4.13) en el que un usuario pasa el 90% del tiempo ($t = 90\%$) escuchando música en Spotify ($\epsilon_{\text{spotify}}$) y un 10% ($t = 10\%$) usando Amazon Music (ϵ_{amazon}). Así, el conocimiento sobre preferencias musicales resulta desbalanceado, de manera que Amazon Music no puede proporcionar recomendaciones precisas, mientras Spotify desconoce el 10% restante de las reproducciones. Por lo tanto, este contexto puede afectar en gran medida a la experiencia de usuario (ω_1).

En respuesta a esta situación recurrente, se propone la unificación del conocimiento generado por las plataformas a través del SOLID PODS (ω_2). Así, la información sobre las reproducciones históricas y la música preferida es almacenada en una entidad única. De esta forma, las plataformas de música en *streaming* leen y modifican las mismas preferencias, con independencia del porcentaje del tiempo de uso que supongan. Como consecuencia, todas las aplicaciones proporcionan recomendaciones tal y como si hubiesen sido utilizadas el 100% del tiempo. Esta mejoría se refleja en la situación ω_2 de la Figura 4.13 donde tanto Amazon Music como Spotify consumen la misma información sobre las preferencias de música.

Como resultado, la propuesta mejora el rendimiento de las recomenda-

CAPÍTULO 4. CONTEXTOS DE APLICACIÓN DE LA ARQUITECTURA

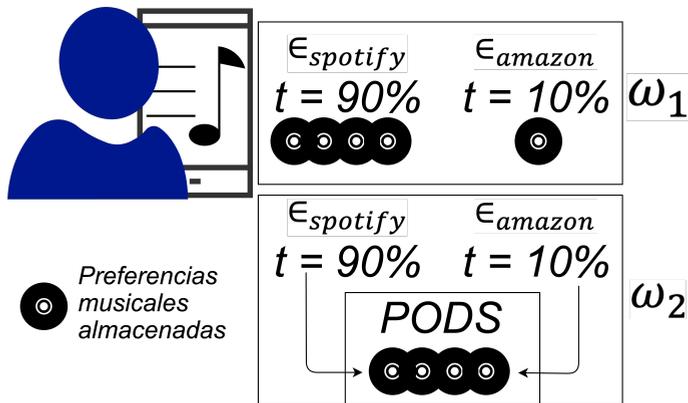


Figura 4.13: Streaming de música aplicando la propuesta (ω_2) y sin aplicarla (ω_1).

ciones musicales, así como la experiencia de los usuarios, compartiendo las fuentes de datos y democratizando las posibilidades de los servicios personalizados. De la misma forma, el usuario no resulta el único beneficiado, ya que las aplicaciones pueden ofrecer mejores utilidades independientemente del tiempo de uso. Así, la solución resulta una propuesta interesante para la gestión de la información, donde el gobierno de los datos recae completamente en el poder de decisión del usuario.

El conjunto completo de contextos de aplicación de la arquitectura permiten comprender las principales contribuciones de la propuesta, así como las eventuales implementaciones que soporta. Como resultado, las posibilidades que ofrece satisfacen en gran medida algunos de los objetivos perseguidos por la tesis. Para complementar este apartado junto con el resto de contribuciones, el siguiente capítulo estudia el rendimiento de las aplicaciones propuestas ante diferentes contextos de aplicación, evaluando las métricas de calidad de servicio y comparando los resultados con alternativas de la literatura.

4.6. PERFILES VIRTUALES PARA EL GOBIERNO DE LA INFORMACIÓN PERSONAL

Capítulo 5

Validación y Resultados de la Arquitectura

“Voy a citar a Thoreau: antes que el amor, el dinero, la fe, la fama y la justicia... dadme la verdad.”

Hacia Rutas Salvajes (2007)
Dir. Sean Penn

La arquitectura propuesta pone a disposición de las aplicaciones distribuidas un conjunto de recursos para permitir su despliegue en entornos rurales aislados, así como en contextos inteligentes. Para ello, la red oportunista actúa como enlace entre los dispositivos finales y los componentes destino, proporcionando protocolos de encaminamiento para transmitir la información. Este proceso resulta especialmente complejo debido al comportamiento autónomo y aleatorio de los nodos, de manera que el rendimiento de la red depende activamente de las decisiones de enrutamiento de los protocolos. De esta forma, el presente capítulo estudia y analiza el rendimiento de las aplicaciones propuestas para la arquitectura, detallando los escenarios de ejecución implementados e identificando los elementos principales, así como las decisiones de diseño. Finalmente, los resultados

5.1. DESPLIEGUE DE APLICACIONES DISTRIBUIDAS EN ENTORNOS RURALES AISLADOS

de comunicación son evaluados de acuerdo a las métricas de calidad de servicio más representativas en las redes oportunistas.

Con el objetivo de realizar los análisis de rendimiento, las aplicaciones propuestas se agrupan en cuatro potenciales escenarios: despliegue de aplicaciones distribuidas en entornos rurales aislados, detección de la soledad en adultos mayores de zonas rurales, adaptación del contexto en entornos inteligentes y viabilidad técnica del perfil virtual para el gobierno de los datos personales en Internet. Cabe destacar que, en el caso particular del primer grupo, se incluyen los contextos de aplicación referentes a la detección de emergencias en hogares de adultos mayores y a la monitorización de productividad en industrias rurales. Ambos escenarios resultan compatibles para una evaluación conjunta, de manera que el análisis de sus resultados se realiza en un mismo contexto. Finalmente, no se incluye la validación de la aplicación del asistente de voz en el capítulo, ya que los avances realizados para su análisis se han emprendido desde un punto de vista cualitativo y antropológico [43], consolidando una evaluación que se aleja de la perspectiva técnica del presente trabajo de tesis. En los siguientes apartados, cada uno de estos escenarios es estudiado con detalle.

5.1. Despliegue de aplicaciones distribuidas en entornos rurales aislados

En esta sección se agrupan las diferentes aplicaciones centradas en proporcionar servicios en entornos rurales aislados. De esta forma, se plantea la simulación de un escenario realista donde se sitúa el conjunto de nodos emisores, intermedios y destinos, permitiendo la ejecución de las aplicaciones y la posterior evaluación de los procesos de comunicación. Para ello, se hará uso del algoritmo de encaminamiento SACAR OCVN, encargado de establecer las políticas de transmisión de la información entre los nodos de la red.

En este contexto, se ejecutan las aplicaciones correspondientes con la sensorización de la presencia en el hogar de adultos mayores y la monitorización de la producción en industrias locales. Estas propuestas se fundamentan en la generación de un flujo de información que permite emprender

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

un estudio riguroso de las comunicaciones en la arquitectura. Como resultado, la sección se compone de cuatro apartados principales: la configuración del escenario, donde se detallan las características de la simulación; el análisis del rendimiento, apartado que estudia los resultados obtenidos en términos de calidad de servicio y su comparación con otros protocolos de la literatura; y la discusión de los resultados.

5.1.1. Configuración del escenario

El escenario de ejecución de las aplicaciones de sensorización de la presencia de adultos mayores y de la monitorización de industrias se ha definido utilizando el simulador The ONE [210] en su versión v1.6.0 ¹. Este programa permite una especificación eficaz y detallada de dispositivos IoT independientes que se relacionan con el entorno. Como resultado, es posible simular desplazamientos, encuentros, transmisiones y desconexiones de una manera realista. Del mismo modo, al concluir su ejecución, es posible conocer múltiples variables de la simulación, así como las métricas de calidad de servicio de la comunicación. De esta manera, utilizando las posibilidades de la herramienta, se define un contexto que incorpora la potencial aplicación de los servicios relacionados con el despliegue de sistemas en entornos rurales.

El escenario configurado se corresponde con el área rural de Las Hurdes, en Extremadura. Este entorno se caracteriza por contar con una población distribuida a lo largo de diferentes núcleos rurales dispersos, con una media de edad que supera los 60 años en determinados pueblos [211]. Este territorio cuenta con una fuerte presencia del sector agrícola y ganadero, incluyendo explotaciones industriales y otras dirigidas al autoconsumo. De esta forma, el contexto descrito se alinea favorablemente con las propuestas de aplicación de la arquitectura.

Tomando como referencia el escenario real, se lleva a cabo la simulación del contexto tal y como describe la Figura 5.1. Para ello, se consideran diferentes grupos de nodos que se relacionan e interactúan de manera diferente con el entorno. El grupo 1) está conformado por los hogares de los adultos mayores que están equipados con los sensores de presencia. Estos

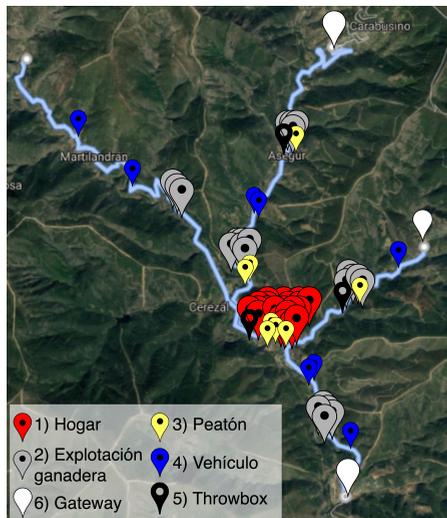
¹<https://github.com/akeranen/the-one>

5.1. DESPLIEGUE DE APLICACIONES DISTRIBUIDAS EN ENTORNOS RURALES AISLADOS

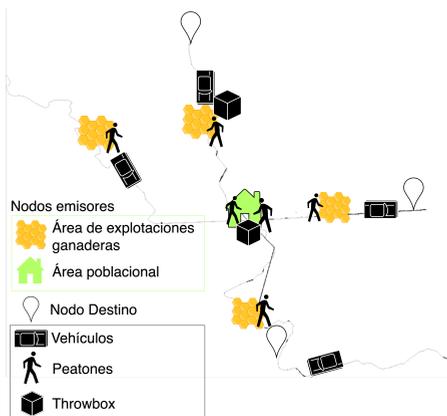
elementos se encargan de generar información en la red relacionada con las mediciones. Por otro lado, el grupo 2) se corresponde con las explotaciones ganaderas y agrícolas, las cuales producen información relacionada con las mediciones de sus sensores y la ponen a disposición de la red oportunista. Así, los nodos intermedios reciben la información y se encargan de transmitirla mediante encuentros hacia los destinos. Estos componentes pueden ser de tres tipos, 3) peatones, 4) vehículos y 5) *throwboxes*, definiendo perfiles virtuales independientes que incluyen sus preferencias en cuanto al tipo de dato a portar. Como resultado, estos elementos actúan como portadores para alcanzar alguno de los tres nodos 6) *gateway* localizados en el escenario. Estos últimos elementos representan los nodos Fog de la arquitectura y se encargan de transmitir a Internet o procesar los datos que reciben. Los nodos *gateway* se sitúan en áreas donde la conexión con la red de Internet es posible, por lo que su capacidad de transmisión de la información justifica su papel como destinos de los datos. De esta manera, con el objetivo de trazar y evaluar de manera determinista la transmisión de información entre el origen y el destino, se asume que los nodos 6) *gateway* cuentan con una naturaleza estática y siempre cuentan con acceso a Internet. Las Figuras 5.1(a) y 5.1(b) muestran una vista satélite de la región y su representación en The ONE, respectivamente.

Una vez que el escenario es definido, el comportamiento de la simulación puede ser adaptado mediante un conjunto de parámetros que permiten establecer variables de la vida real en el contexto. Los parámetros más relevantes que se incluyen son los siguientes: dimensiones del escenario, $A = 33,07 [Km^2]$, las cuales comprenden el aspecto real del territorio; duración de la simulación, $T = 28800 [s]$, representando las horas de mayor actividad en el área, desde las 08:00 pm a las 15:00 pm; intervalo de generación de mensajes, $\omega = 60, 900, 1800, 3600, 14400 [s]$, que especifica la frecuencia con la que los mensajes son generados; y los interfaces de comunicación, $I = Bluetooth$, definiendo *Bluetooth* como la tecnología inalámbrica que mejor se ajusta a la naturaleza heterogénea de los dispositivos de la red. En relación con esta tecnología, las estadísticas de trabajos como [212] son extraídas para definir el rango de alcance de los nodos, I_r , de 100 metros y una velocidad de transmisión, I_s , de 1 MB/s. Finalmente, el consumo de energía de los nodos se realiza tomando como referencia las métricas

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA



(a) Mapa real utilizado como base,



(b) Mapa simulado en The ONE.

Figura 5.1: Mapas implementados en las simulaciones.

definidas en los avances [213, 214], por lo que el tamaño de mensaje, M_{size} , se corresponde con 300 [KB].

Las comunicaciones que tienen lugar en la simulación se realizan siguiendo las directrices del algoritmo de encaminamiento SACAR OCVN,

5.1. DESPLIEGUE DE APLICACIONES DISTRIBUIDAS EN ENTORNOS RURALES AISLADOS

integrado en la arquitectura. Este algoritmo restringe el tráfico de información exclusivamente entre aquellos nodos que estén interesados en la información que se transmite. De esta manera, es posible optimizar las comunicaciones teniendo en cuenta las preferencias de los nodos. Como resultado, tras la definición de los parámetros de ejecución de la simulación, se determina el conjunto de nodos que interactúan en la red.

5.1.1.1. Nodos

Siguiendo un perfil similar al de las zonas rurales aisladas [215], el número global de nodos en el escenario, N , asciende hasta $N = 152$. Dentro de este número, los nodos emisores comprenden casi la mitad de la población, definiendo un 52.6 % del conjunto de dispositivos. Detrás de esta cifra, 60 emisores son hogares de adultos mayores y 20 se corresponden con explotaciones locales. Así, el 47.4 % se compone de nodos intermedios de diferente índole: 19 peatones, 47 vehículos y 3 *throwboxes*. Finalmente, se consideran 3 *gateways* diferentes, localizados en los bordes del escenario. Asumiendo esta distribución, el aspecto visual de la simulación puede apreciarse en la Figura 5.1.

5.1.2. Análisis del Rendimiento

Esta sección analiza los resultados obtenidos tras la ejecución de la aplicación en el escenario propuesto. Como punto de partida, se describen los parámetros de calidad de servicio considerados para la evaluación.

5.1.2.1. Métricas de Rendimiento

El rendimiento de la solución puede determinarse a través de cuatro métricas de calidad de servicio principales: probabilidad de entrega, d_{prob} , que refleja el porcentaje de mensajes que han sido recibidos en el nodo destino; latencia media, τ , que representa el tiempo medio necesario para recibir un mensaje una vez que se ha enviado a la red; *overhead*, θ , que relaciona el número de mensajes replicados con el número de mensajes entregados; y, finalmente, el número de saltos medio, γ , que representa

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

el número de nodos intermediarios que intervienen de media para que un mensaje enviado alcance el destino.

Adicionalmente a estos parámetros, el intervalo de generación de mensajes, ω , tiene un impacto directo en el rendimiento. Este valor gestiona el número de mensajes que se generan en la red, M_{gen} , permitiendo estudiar qué configuración es la más favorable. De esta forma, después de un análisis de sensibilidad, se consideran cinco valores diferentes para este parámetro: $\omega = 60$ [s], $\omega = 900$ [s], $\omega = 1800$ [s], $\omega = 3600$ [s] y $\omega = 14400$ [s]. Dado que una de las aplicaciones que se quiere simular se corresponde con la detección de emergencias en adultos mayores, se requiere que el intervalo de generación de mensajes sea bajo, ajustándose a unos valores realistas (60, 900, 1800 y 3600). También, considerando que el tiempo de simulación será $T = 28800$ [s], el intervalo 14400 [s] se incluye como el máximo valor posible para el escenario.

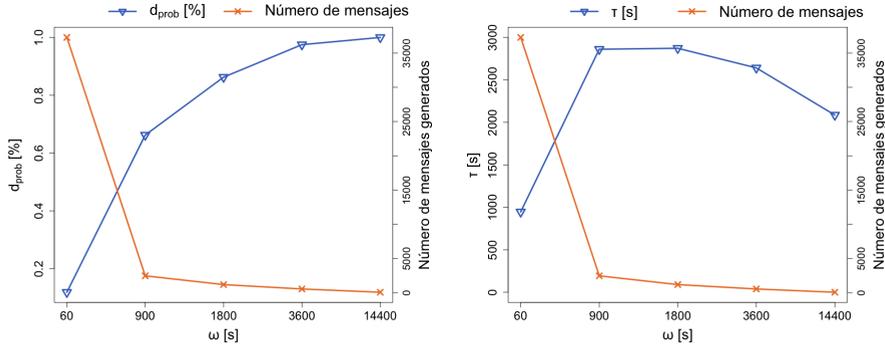
5.1.2.2. Evaluación del Rendimiento de SACAR OCVN

El conjunto de resultados obtenidos tras la ejecución de la simulación se muestra en las Figuras 5.2(a), 5.2(b), 5.2(c) y 5.2(d).

La Figura 5.2(a) muestra la probabilidad de entrega como función del intervalo de generación de mensajes. Como puede apreciarse, a medida que el número de mensajes enviados aumenta, la probabilidad de entrega se reduce. Así, cuando el número de mensajes en la red decrece, d_{prob} aumenta. Siguiendo la tendencia positiva, $\omega = 3600$ [s] logra una probabilidad de entrega de $d_{\text{prob}} = 97,50\%$ mientras que el máximo valor del porcentaje se alcanza con $\omega = 14400$ [s], al lograr $d_{\text{prob}} = 100\%$. Sin embargo, dado que $\omega = 14400$ [s] y $T = 28800$ [s] proporcionarían una única ronda de nuevos mensajes durante toda la simulación, los valores obtenidos pueden resultar poco imparciales, ya que el número de mensajes a transmitir en la red es ampliamente reducido en comparación con el resto de intervalos. Por esta razón, el intervalo $\omega = 3600$ [s] proporciona la mejor probabilidad de entrega de la solución, con una buena relación entre M_{gen} y d_{prob} .

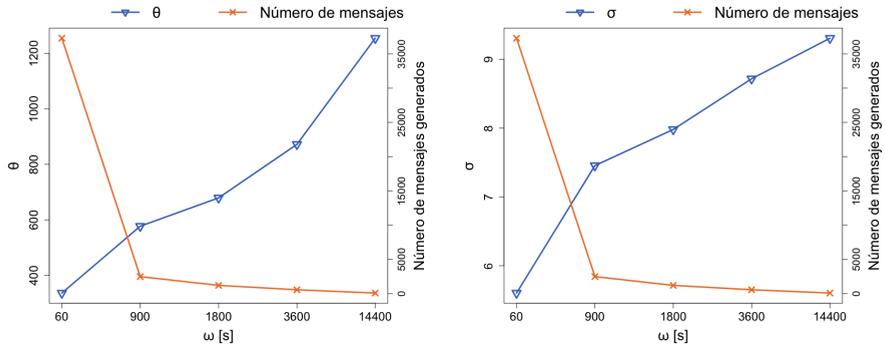
Los valores de latencia se muestran en la Figura 5.2(b) como una función del intervalo de generación de mensajes. Cuando el número de mensajes recibidos correctamente es bajo, la latencia experimentada también

5.1. DESPLIEGUE DE APLICACIONES DISTRIBUIDAS EN ENTORNOS RURALES AISLADOS



(a) Probabilidad de entrega (d_{prob}).

(b) Latencia media (τ).



(c) Overhead (θ).

(d) Número de saltos medio (σ).

Figura 5.2: Resultados de SACAR OCVN en el escenario rural.

es reducida. Esto puede interpretarse como que los pocos mensajes que han sido recibidos fueron transmitidos rápidamente. En el resto de la simulación, la latencia media se mantiene a $\tau = 2872,5[s]$, un valor aceptable asumiendo las dificultades inherentes en la comunicación oportunista [216].

La Figura 5.2(c) muestra el *overhead* medio (θ) como una función del intervalo de generación de mensajes. Este valor refleja la relación entre los mensajes duplicados (M_{copies}) y los recibidos (M_{received}). Por ello, el *overhead* medio representa la utilización de los recursos de la red (por ejemplo, ancho de banda, almacenamiento...). En este caso, θ alcanza el

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

pico máximo en $\omega = 14400[s]$. Considerando el alto grado de mensajes entregados en este intervalo, se deduce que la cantidad de copias generadas han favorecido que todos los mensajes fuesen recibidos.

El valor del número de saltos medio (σ) se muestra en la Figura 5.2(d) como una función del intervalo de generación de mensajes. Este segundo parámetro, ω , es un valor del que depende el número de mensajes nuevos que se envían por la red. De esta forma, cuando ω es bajo, el encaminamiento de nuevos mensajes sin saltos previos decrementa el valor de saltos medio. Sin embargo, cuando ω se incrementa y el número de mensajes en la red disminuye, los nodos interactúan con una cantidad menor de mensajes, por lo que existe una mayor propensión a realizar saltos de datos entre dispositivos.

Como resultado, la probabilidad de entrega manifiesta un éxito práctico en las comunicaciones de la red, satisfaciendo los requisitos de éxito en la entrega y demostrando la eficacia de la arquitectura para el despliegue de soluciones distribuidas. Del mismo modo, el tiempo requerido por un mensaje para ser recibido resulta satisfactorio, mientras que el valor de *overhead* y de saltos medio denota un buen rendimiento. De esta forma, tomando como referencia los resultados de la mejor configuración ($\omega = 3600[s]$), la siguiente subsección compara estos resultados con protocolos de encaminamiento alternativos encontrados en la literatura.

5.1.2.3. Comparación con otras Soluciones

La presente sección compara los resultados de SACAR OCVN en el escenario simulado con protocolos de encaminamiento consolidados y referentes en el campo [217, 218]. Así, los algoritmos considerados son: Life Router [217], el cual aplica la influencia de los encuentros para tomar decisiones de encaminamiento, encajando correctamente con el escenario simulado; GeoSpray Router [219, 220], el cual recurre al uso de datos geográficos para alcanzar un rendimiento óptimo, especialmente en redes VANETs; Wave Router [217], protocolo basado en una comunicación mediante intervalos que se alinea con la idea del escenario de comunicar extremos separados; Simbet Router [221], protocolo que hace uso de métricas como la similaridad y la centralidad en comunidades de nodos; y Distributed

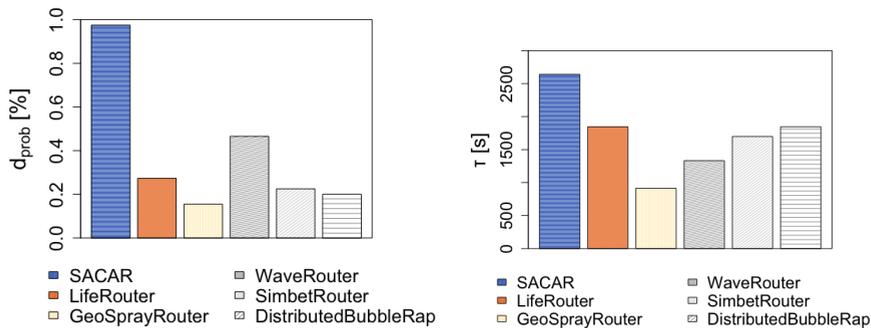
5.1. DESPLIEGUE DE APLICACIONES DISTRIBUIDAS EN ENTORNOS RURALES AISLADOS

BubbleRap [222], algoritmo que mejora la implementación del original BubbleRap para evitar la congestión a través de los encuentros, característica que se alinea con el escenario propuesto. De esta forma, las métricas que se consideran para sus resultados son las mismas que en el apartado anterior, ejecutando las simulaciones con $\omega = 3600[s]$, valor que manifiesta los mejores resultados de SACAR OCVN, así como un comportamiento realista de la red. Analizando la Figura 5.3, puede apreciarse que, en líneas generales, los resultados son favorables para SACAR OCVN.

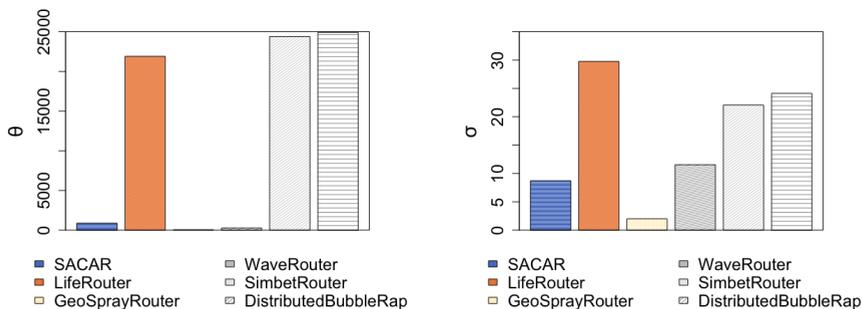
La Figura 5.3(a) compara la probabilidad de entrega, d_{prob} , manifestando una gran diferencia entre SACAR OCVN, $d_{\text{prob}} = 97,5\%$, y el resto de protocolos. La mejora en d_{prob} es de un $52,25\%$ sobre Wave Router, $d_{\text{prob}} = 46,56\%$, el segundo mejor resultado. En el caso de la latencia, τ , la Figura 5.3(b) muestra cómo SACAR OCVN alcanza el valor medio mayor, $\tau = 2568 [s]$. Sin embargo, esta cifra puede resultar asumible para la red, ya que la probabilidad de entrega que se logra es prácticamente absoluta. Respecto el *overhead*, θ , la Figura 5.3(c) manifiesta cómo SACAR OCVN ofrece un valor reducido, mientras LifeRouter, SimbetRouter y BubbleRap, debido a su funcionamiento basado en un uso masivo de las copias de mensajes, alcanzan los valores más altos. Finalmente, el número de saltos medio, σ , se detalla en la Figura 5.3(d). Para este valor, SACAR OCVN define el segundo resultado más bajo. Considerando el conjunto de variables que intervienen en los resultados, la probabilidad de entrega, d_{prob} , es la que plantea un papel más relevante, dado que refleja la efectividad de la red a la hora de transmitir información hacia el destinatario. De esta manera, asumiendo esta métrica como la principal, se confirma que SACAR OCVN plantea la mejor opción entre las soluciones evaluadas para el escenario analizado.

SACAR OCVN se convierte en la mejor opción para el escenario propuesto, proporcionando un rendimiento de la aplicación con una alta probabilidad de entrega y una latencia tolerable. De esta manera, podemos considerar que SACAR OCVN y la arquitectura propuesta encajan perfectamente con el escenario de transmisión de datos en entornos aislados. No obstante, la solución cuenta con dimensiones adicionales a las pruebas de encaminamiento. El rendimiento de la sostenibilidad y el consumo de

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA



(a) Comparación de la probabilidad de entrega (d_{prob}). (b) Comparación de la latencia media (τ).



(c) Comparación del *Overhead* medio (θ). (d) Comparación de la media de saltos (σ).

Figura 5.3: Comparación de rendimiento con otras soluciones.

energía son elementos clave de la propuesta. Para ello, la siguiente subsección analiza el consumo de energía.

5.1.3. Análisis del Consumo de Energía

Una de las premisas de la arquitectura propuesta es alcanzar un rendimiento sostenible en las comunicaciones entre nodos. Esta sección analiza

5.1. DESPLIEGUE DE APLICACIONES DISTRIBUIDAS EN ENTORNOS RURALES AISLADOS

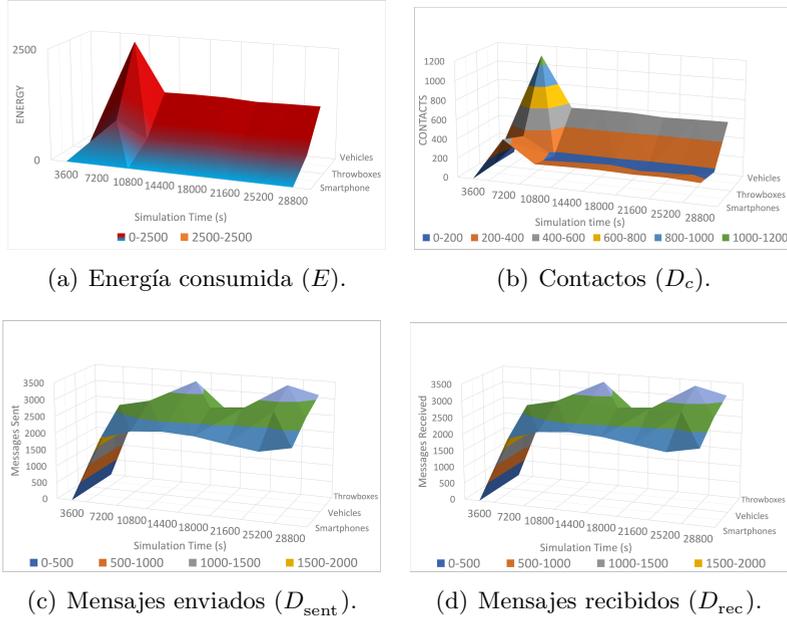


Figura 5.4: Análisis del consumo de energía.

los resultados basando en los cálculos del modelo de consumo en las estimaciones de los trabajos [223, 214].

5.1.3.1. Coste Energético Operacional

Considerando el escenario simulado para la evaluación de la comunicación en la sección previa ($\omega = 3600[s]$, $d_{\text{prob}} = 97,5\%$, $\tau = 2641,5[s]$, $\theta = 872,1$ y $\sigma = 8,72$), se analizan los resultados en materia de consumo energético considerando el mismo contexto.

Los parámetros involucrados en el análisis del consumo son: tipo de dispositivo (D), número de mensajes enviados (D_{sent}), número de mensajes recibidos (D_{rec}), número de contactos (D_c) y energía consumida por el nodo (E).

La Figura 5.4 muestra los resultados obtenidos. Estas gráficas se componen de tres ejes: el intervalo de generación de mensajes ($i[s]$) en el eje-x;

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

los tres tipos de dispositivos involucrados (*smartphone*, vehículos y *throwboxes*) en el eje-z; y el eje-y, el cual varía dependiendo de la figura con la que se corresponda: energía consumida, número de contactos y número de mensajes, respectivamente.

El consumo global de cada dispositivo durante la ejecución se muestra en la Figura 5.4(a). Por un lado, la operación de contacto conforma la tarea que más consumo de energía requiere, ya que existe un claro patrón entre la energía consumida (E) y los contactos, D_c (Figura 5.4(b)). Los contactos entre los nodos no son regulares, sino que experimentan un pico al comienzo de la simulación, el cual se va reduciendo a medida que los nodos de la red se dispersan.

Por otro lado, el envío y recepción de mensajes se muestran en las Figuras 5.4(c) y 5.4(d). Los valores representados evidencian cómo la recepción de mensajes está enlazada directamente con la creación de nuevos mensajes en la red. De esta forma, se puede deducir que casi todos los mensajes generados en la red son rápidamente recibidos por un nodo intermedio que se encarga de portarlos. Del mismo modo, se identifican dos picos en dos momentos concretos de la simulación, en $i = 14400[s]$ y $i = 25200[s]$. Sin embargo, estos valores destacados no implican un impacto evidente en el consumo de energía.

Como conclusión, la energía media consumida por cada dispositivo durante la simulación muestra que los vehículos son los elementos que requieren mayor energía en el escenario. En el caso de los *smartphones*, los resultados revelan que se tratan de los equipos más sostenibles, ya que se corresponden con los dispositivos que menos energía consumen.

De manera adicional, los *throwboxes* representan un consumo de energía bajo comparado con el resto de dispositivos. Existen dos picos que destacan, tanto en el envío como en la recepción de la información, que evidencian cómo los *throwboxes* han actuado como principales proveedores de datos en momentos concretos. Como resultado, la energía que consumen es reducida, actuando como un elemento sostenible dentro de la red. Con el objetivo de explorar con mayor profundidad esta característica, la siguiente subsección estudia en detalle los requisitos de energía, así como los consumos, de los *throwboxes*.

5.1.3.2. Evolución de la Batería en los *Throwboxes*

A diferencia de los *smartphones* y los vehículos del escenario simulado, los equipos de *throwboxes* se despliegan específicamente en la red con el objetivo de colaborar en la transmisión de mensajes. Estos dispositivos se sitúan en puntos estratégicos que pueden resultar apartados de las localidades. De esta forma, el mecanismo más apropiado para proporcionar corriente eléctrica a los *throwboxes* son los paneles solares [224]. Considerando esto, es posible determinar la viabilidad y la sostenibilidad de la propuesta a través del estudio del consumo de energía de estos dispositivos. Para ello, se comprueba que la energía obtenida del panel solar es suficiente para satisfacer las operaciones que se realizan en la red, tomando como base datos reales sobre la producción de energía solar en Extremadura a través de la plataforma PWatts ².

Como resultado, la Figura 5.5 compara la evolución de tres variables: energía consumida (C), energía obtenida de la placa solar (E_c) y el nivel de batería ($B\%$), en función del tiempo (i) de la simulación. Además, se establece una capacidad de batería típica de $B_{\max} = 2300mAh$, así como un valor inicial de $B_0 = 1024mAh$ (44,5 % de la batería, estimada a partir de los datos de radiación solar durante los días previos).

La evaluación de E_c y C durante la simulación evidencia una clara tendencia ascendente para la energía solar capturada. Tal y como se detalla en la sección previa, se detecta un pico de consumo en el intervalo de tiempo correspondiente con las 9:00 am. Sin embargo, una vez que la simulación continúa, C se estabiliza y mantiene una tendencia plana. Al mismo tiempo, la energía capturada comienza con valores bajos, correspondientes con las primeras horas de sol, a las 8:00 am. De esta manera, a medida que el día avanza, el valor de E_c se incrementa hasta alcanzar un pico a las 13:00 pm y a las 14:00 pm. Esta tendencia demuestra cómo la energía proporcionada por el panel solar resulta mayor que la consumida por el *throwbox*, demostrando la sostenibilidad y viabilidad técnica de la solución.

Tras completar el análisis de rendimiento de la arquitectura en los casos de uso contemplados, así como demostrar la sostenibilidad de la propuesta, se procede con una discusión general de los resultados.

²<https://pvwatts.nrel.gov/>

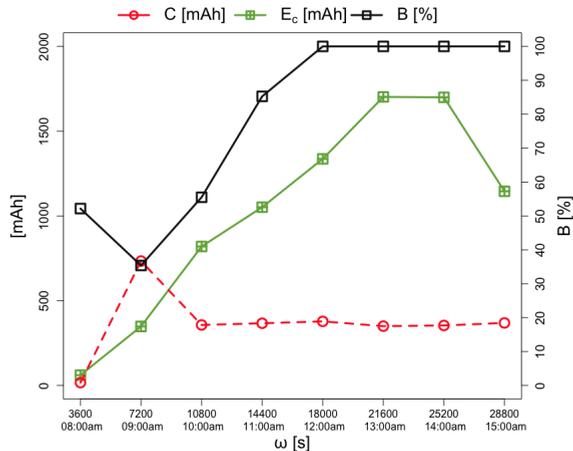


Figura 5.5: Energía consumida (C), energía capturada (E_c) y nivel de batería (B) en el *throwbox*.

5.1.4. Discusión

El análisis de resultados proporciona un detallado informe acerca del rendimiento de la arquitectura en el marco de las comunicaciones en entornos rurales. Para ello, se ha realizado la simulación de un entorno realista y la comparación de la calidad de servicio obtenida con otras alternativas de la literatura. Como resultado, los valores son favorecedores y demuestran la sostenibilidad y viabilidad técnica de la arquitectura.

Por un lado, los resultados presentados manifiestan valores satisfactorios en el ratio de probabilidad de entrega, latencia, *overhead* y saltos medios. Estos resultados son comparados con protocolos alternativos asentados como Life Router, GeoSpray Router, Wave Router, Simbet Router y Distributed BubbleRap Router. Los valores de rendimiento que manifiesta SACAR OCVN proporcionan los mejores resultados. De manera adicional, resulta interesante considerar que los valores analizados están expresados como valores medios. Esto significa que, detrás de los valores, pueden existir picos que pasen desapercibido. Este es el caso de la latencia, dimensión extremadamente relevante para la aplicación de detección de emergencias.

5.1. DESPLIEGUE DE APLICACIONES DISTRIBUIDAS EN ENTORNOS RURALES AISLADOS

De esta forma, a pesar de los resultados medios asumibles, pueden existir situaciones particulares donde la latencia se dispare, conduciendo a intervalos largos de espera. Estos casos resultan difíciles de solventar en redes oportunistas, ya que se fundamentan en encuentros aleatorios entre dispositivos autónomos. Por lo tanto, es difícil de garantizar que, bajo todas las circunstancias, la arquitectura proporcionará una transmisión rápida en la detección de emergencias. Sin embargo, el impacto negativo de estos contextos puede reducirse al aplicar técnicas de predicción para detectar de manera proactiva situaciones peligrosas. Para ello, recursos como la minería de datos o el aprendizaje automático suponen mecanismos para mejorar el rendimiento y fiabilidad de la arquitectura.

Por otro lado, la sostenibilidad de la arquitectura es evaluada. Como resultado, se ha detectado una relación directa entre los contactos de nodos y su consumo de energía. Se demostró que los vehículos son los dispositivos que consumen la mayor parte de la energía, mientras los *smartphones* proporcionan un rendimiento en el consumo óptimo. Además, los *throwboxes* juegan un rol significativo en la emisión de información y cuentan con un consumo de energía viable y razonable. Además, la energía que obtienen a través de las placas solares resulta satisfactoria para las funciones desempeñadas en la simulación, logrando cargar sus baterías a su máxima capacidad. Como resultado, el consumo de energía es técnicamente viable y la arquitectura resulta sostenible en su aplicación.

5.1.5. Conclusiones

El despliegue de servicios y aplicaciones en zonas rurales aisladas es desafiante debido a la escasez de infraestructuras de comunicación. Esto afecta críticamente áreas como la telemedicina y eHealth, especialmente en la detección de emergencias en adultos mayores que viven solos. También, los negocios locales, enfocados en agricultura y ganadería, podrían perder competitividad por falta de digitalización. Como respuesta este escenario, se propone el despliegue de la arquitectura oportunista para ofrecer servicio a dos aplicaciones: la detección de emergencias en hogares de adultos mayores y la sensorización de explotaciones industriales. Para ello, los hogares se equipan con un conjunto de sensores coordinados que transmiten a la red oportunista las lecturas de presencia, permitiendo así detectar anomalías

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

en los patrones de los usuarios. Por otro lado, las industrias son equipadas con dispositivos que permiten la monitorización remota de recursos concretos. Como resultado, estos equipos son coordinados para actuar como nodos emisores en la red oportunista.

El rendimiento de la arquitectura es estudiado a través de la simulación de un escenario realista, donde el proceso de encaminamiento, basado en SACAR OCVN, es evaluado y comparado con alternativas del estado del arte. Como resultado, el rendimiento de la red es alto, con 97.5% de probabilidad de entrega, mejorando un 52.25% a la segunda mejor opción. Además, el consumo de energía demuestra unos resultados positivos. Por lo tanto, la simulación demuestra que la arquitectura es técnicamente viable, manifestando la solidez de su capacidad autosostenible.

5.2. Evaluación de la detección de la soledad en adultos mayores

En el capítulo anterior se detalla la aplicación de la arquitectura para detectar la soledad en adultos mayores. Esta propuesta hace uso de los contactos entre dispositivos para generar un grafo de relaciones que permite identificar potenciales situaciones de soledad en poblaciones rurales aisladas. Esta visión técnica se complementa con una metodología que relaciona la visión humanista y antropológica con la utilización de la tecnología [225]. Así, resulta posible emprender un proceso de ejecución en un escenario que represente un potencial contexto de aplicación.

Desde una perspectiva técnica, la propuesta propone equipar a los adultos mayores de una población rural aislada con pulseras inteligentes capaces de registrar los encuentros físicos que experimentan a lo largo del día. Para ello, la tecnología *Bluetooth* permite la identificación de dispositivos del entorno como otras pulseras o *smartphones*. Como resultado, es posible trazar patrones de compañía entre los adultos y los vecinos, permitiendo la eventual detección de candidatos que sufren soledad. Así, la información de los encuentros se almacena en las pulseras y es transmitida a balizas *Bluetooth* instaladas en puntos representativos de la localidad como el centro médico, el ayuntamiento o la biblioteca. Esta información es procesada

5.2. EVALUACIÓN DE LA DETECCIÓN DE LA SOLEDAD EN ADULTOS MAYORES

por el destino para generar un grafo sobre los encuentros, representando a los ciudadanos como nodos y sus relaciones como enlaces.

Como resultado, el proceso de comunicación de la metodología se alinea perfectamente con el funcionamiento de las redes oportunistas, así como con el algoritmo de encaminamiento RSB, incorporado en la arquitectura propuesta. De esta forma, resulta apropiado plantear un escenario de ejecución que recree este contexto y estudie los resultados que ofrece el protocolo. Para ello, se hará uso del simulador de redes oportunistas The ONE [226], herramienta que permite representar escenarios y obtener métricas de su ejecución. Así, la presente sección se compone de dos apartados: la configuración del escenario de ejecución y el estudio, comparación y discusión de los resultados.

5.2.1. Configuración del Escenario

La configuración del escenario se ha realizado siguiendo las directrices detalladas en el trabajo [225]. Para alinear la configuración de la simulación con la propuesta de detección de la soledad, se requiere la especificación de un contexto realista donde los nodos interactúen de manera autónoma en un escenario en particular. Para ello, se han tomado como referencia los datos del informe anual del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) sobre envejecimiento [227]. Estos estudios reflejan el fenómeno de la despoblación en las zonas rurales y la realidad demográfica actual sobre el porcentaje de adultos mayores en estas regiones. Considerando las cifras, se estima que en los poblados con menos de 500 habitantes, el porcentaje de adultos mayores se corresponde con prácticamente la mitad de la población [227].

Considerando los detalles del estudio, se establece un escenario con una superficie $S = 10000 \times 10000 m^2$ en la que se sitúan un total de $N = 110$ nodos. El tiempo de simulación es de $T = 30000$ s, pretendiendo recrear ocho horas de un día. En cuanto a la representación de elementos, se establecen tres tipos diferentes de nodos: 1) adultos mayores en el escenario, N_e , 2) vecinos colaboradores, N_i , y 3) un nodo destino para obtener la información, N_d . Para dotar el escenario de una distribución realista, se establece un 54.54% de adultos mayores en el contexto, mientras que el resto se corres-

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

ponde con los nodos intermedios, además del nodo destino. A continuación, se detallan las características de cada grupo de dispositivos:

1. Adultos Mayores (N_e). Estos nodos representan los adultos mayores equipados con pulseras inteligentes en el poblado. Estos elementos actúan como fuente de información, sirviendo como nodos emisores en la red. Se encargan de almacenar sus encuentros con otros dispositivos y transmitir esta información entre los nodos de la red, pretendiendo que la información alcance el elemento destino. Siguiendo las directrices del protocolo RSB, cada mensaje de red se asocia con el *topic*, m_{topic} , “Elder’s encounters”. Como resultado, los datos se transmiten únicamente entre aquellos nodos interesados en la información, N_i . La movilidad de N_e representa el comportamiento de adultos mayores habitando su poblado. Para ello, el modelo de movilidad escogido, M , se basa en *clusters* para simular un patrón de desplazamiento que recorre aleatoriamente la localidad en torno puntos concretos, asignando un rango de distancia máximo, M_r , y un centro, M_c , con coordenadas x e y . Como resultado, es posible simular paseos en torno puntos concretos como la plaza mayor, un barrio en particular, la iglesia o áreas de recreo. Esta característica está gráficamente representada en la Figura 5.6.

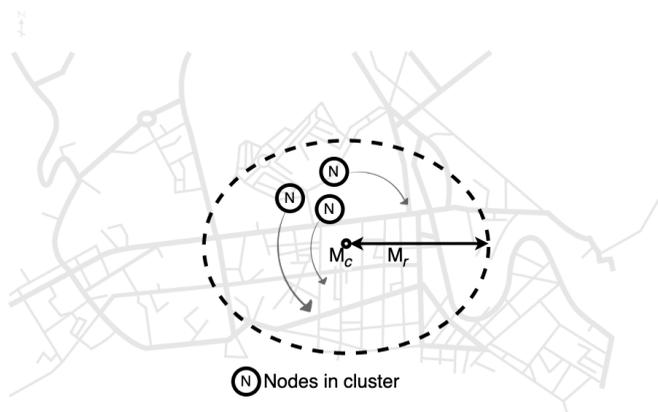


Figura 5.6: Modelo de movilidad basado en clusters integrado en The ONE.

5.2. EVALUACIÓN DE LA DETECCIÓN DE LA SOLEDAD EN ADULTOS MAYORES

2. Vecinos colaboradores (N_i). La información generada por N_e debe dirigirse a la entidad de destino N_d , la cual actúa como sumidero de la información. Sin embargo, la distancia física entre los emisores y el destino requiere el uso de elementos intermedios que actúen como portadores de la información. Para ello, los *smartphones* de los vecinos de la localidad pueden proporcionar la comunicación necesaria hasta el destinatario. Así, los vecinos pueden definir en su perfil virtual su interés en portar la información relacionada con el *topic* m_{topic} “*Elder's encounters*”, actuando como intermediarios en la red oportunista.
3. Destinatario (N_d). El nodo de destino es el elemento de la red al que se dirigen los mensajes. Esta entidad es capaz de recibir, procesar y transmitir a Internet los datos entrantes sobre encuentros. Por ello, alcanzar este dispositivo se convierte en una prioridad para la información generada por los nodos origen. Dado que el dispositivo destino juega un papel pasivo en la comunicación, este no cuenta con ningún modelo de movimiento.

Para llevar a cabo la comunicación entre los dispositivos de la red, todos los nodos son simulados utilizando el mismo interfaz, I basado en BLE [228]. Esta tecnología permite alcanzar un rango de decenas de metros para transmitir información [229]. Por lo tanto, se considera un rango de $I_{\text{range}} = 30\text{m}$, con una velocidad de transmisión de $I_s = 1\text{Mbps}$ [229]. Además, los mensajes de la red son establecidos con un tamaño máximo de $m_s = 300\text{kb}$, valor que estima el peso necesario para compartir los datos de encuentros de un adulto mayor. Mientras tanto, considerando las características de almacenamiento descritas en los trabajos de la literatura [230, 231], se establece un tamaño de *buffer* de $N_{\text{buffer}} = 5\text{Mb}$. Del mismo modo, el valor de *time-to-live* (TTL) de la red será $m_{\text{ttl}} = 1800\text{s}$, representando el tiempo que transcurrirá antes de que un mensaje sea descartado por su portador. Este valor pretende evitar la transmisión de información desactualizada en la red. Finalmente, se destacan algunos elementos adicionales que intervienen en el proceso de comunicación.

- Intervalo de generación de mensajes. Este parámetro regula el número

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

ro de mensajes generados en la red durante la simulación. Para ello, se define el parámetro ω , que variará entre los valores $\omega = \{1800, 3600, 7200\}$.

- Algoritmo de Enrutamiento. Esta característica indica el protocolo que se utilizará para transmitir la información entre los nodos de la red. Dado que la arquitectura cuenta con el protocolo RSB, enfocado en el enrutamiento social, se aplicará dicho protocolo, comparando sus salidas con un conjunto de alternativas de la literatura que representan soluciones ya asentadas: EpSoc [232], Simbet [233], y BubbleRap [234].

EpSoc [232] es un algoritmo de enrutamiento que busca proporcionar comunicación con una filosofía de inundación mejorada que limita la replicación y la sobrecarga. Para ello, combina una estrategia de enrutamiento epidémico con variables sociales como la centralidad de grado. Esta característica permite adaptar dinámicamente el TTL de los mensajes, disminuyendo su valor si el siguiente nodo que interviene define una mayor centralidad. En el caso de que un mensaje alcance un TTL de cero, se rechazan las réplicas entrantes del mensaje. Esta solución ha demostrado gran rendimiento en múltiples contextos, contribuyendo a la reducción de latencia y sobrecarga.

SimBet [233] usa métricas de centralidad e intermediación para identificar los nodos intermedios con mayor influencia social. Estos realizan una inundación epidémica que emplea características de centralidad para limitar la sobrecarga y mejorar la latencia.

BubbleRap [234] aplica los conceptos de centralidad y comunidad para entender las redes como una colección de grupos individuales con características independientes donde la integración de los miembros de la comunidad es irregular. En consecuencia, en términos de conectividad, algunas personas se vuelven más interesantes que otras. Considerando esto, el algoritmo pretende identificar aquellos nodos que proporcionan un mayor rango de conexiones. Así, BubbleRap ha demostrado buen rendimiento en varios escenarios, convirtiéndose en una de las soluciones más relevantes.

Considerando la configuración explicada, la Figura 5.7 describe una representación visual de los diferentes nodos, así como sus patrones de mo-

5.2. EVALUACIÓN DE LA DETECCIÓN DE LA SOLEDAD EN ADULTOS MAYORES

alidad dentro del escenario. Para ello, se han indicado un total de seis clústeres diferentes, pretendiendo distribuir los nodos a lo largo de la superficie de una manera realista y variada. De esta forma, tres clústeres son asignados a los adultos mayores, M_{e1} , M_{e2} , y M_{e3} . Mientras tanto, los otros tres clústeres se corresponden con los vecinos colaboradores, M_{i1} , M_{i2} , y M_{i3} . En el caso del primer grupo, la distribución pretende definir un contexto en el que la labor de los nodos intermedios resulte obligatoria para conectar el origen de la información con el destino. Excepto para M_{e1} , los nodos situados en M_{e2} y M_{e3} nunca contactan directamente con el nodo destino. Como resultado, los nodos intermedios resultan indispensables. Así, los clústeres que definen los movimientos de los vecinos colaboradores incluyen las rutas de los adultos mayores. Este es el caso del clúster M_{i1} , que engloba una gran distancia en el escenario. Mientras tanto, M_{i2} y M_{i3} actúan como puntos de enlace entre los diferentes emisores.

A modo de resumen de todas las variables y configuraciones, la Tabla 5.1 expone los valores asignados a cada atributo del escenario, incluyendo la distribución de los nodos, su modelo de movilidad, el rango y centro de cada *cluster*, y los protocolos involucrados. A continuación, en la siguiente subsección se analiza el rendimiento de RSB junto con las comparativas de resultados.

5.2.2. Evaluación del Rendimiento

En esta sección, el algoritmo RSB es ejecutado en el escenario propuesto, presentando y discutiendo los resultados obtenidos. Para este propósito, se han llevado a cabo 10 ejecuciones para determinar el rendimiento medio de la solución. Para ello, se consideran las cuatro métricas de calidad de servicio ya empleadas en el análisis de la anterior aplicación: probabilidad de entrega, d_{prob} [%], que representa el porcentaje de mensajes que han sido recibidos correctamente por el destino; latencia, τ [s], que indica el tiempo medio necesario para recibir un mensaje; *overhead*, θ , que relaciona los mensajes duplicados con los recibidos; y el número de saltos, σ , que define el número medio de nodos necesarios para alcanzar el destino. Entre estas variables, la probabilidad de entrega d_{prob} define la principal métrica para determinar el éxito en las comunicaciones.

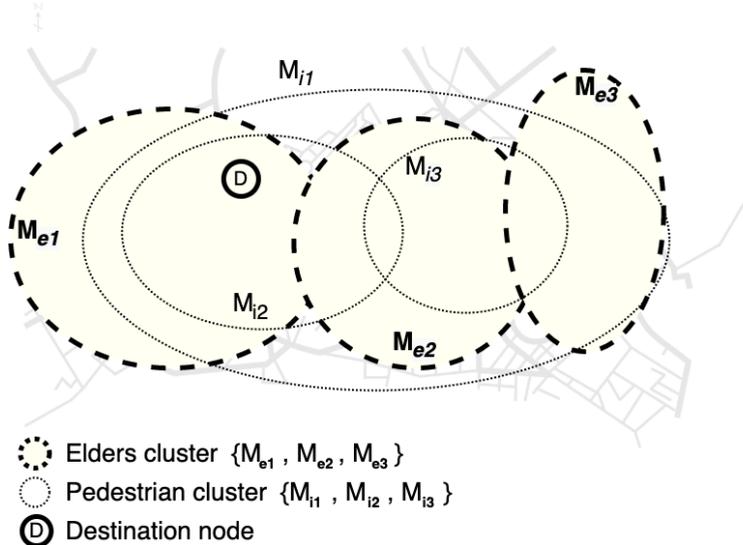


Figura 5.7: Modelos de movilidad (M) basados en clusters en la simulación del escenario.

La Figura 5.8 muestra la probabilidad de entrega, d_{prob} , como función del intervalo de generación de mensajes, ω . Generalmente, el incremento en ω , conduce a una mejoría en la probabilidad de entrega, ya que el tiempo transcurrido sin emitir nueva información a la red es mayor. En este caso, existe una ligera mejoría en d_{prob} . Sin embargo, no existe una variación relevante entre los diferentes valores, manifestando la considerable robustez de RSB incluso cuando el número de nodos en la red decrece. Este factor evidencia el potencial de combinar los encuentros históricos con los intereses basados en *topics*. Considerando la efectividad de la comunicación y los patrones de movilidad definidos en el escenario, cabe destacar cómo la elección de nodos intermedios resulta exitosa. Esto también implica que incluso cuando los nodos emisores permanecen fuera del alcance del destino, los nodos intermedios resultan efectivos.

Respecto la comparativa de resultados, el valor más alto de d_{prob} es alcanzado por RSB en cada uno de los valores de ω . Concretamente, en $\omega = 3600\text{s}$, RSB define el mejor resultado de todos, con $d_{\text{prob}} = 97,03\%$

5.2. EVALUACIÓN DE LA DETECCIÓN DE LA SOLEDAD EN ADULTOS MAYORES

Parámetro	Valor
S	10000 x 10000 [m^2]
T	30000 [s]
ω	1800, 3600, 7200 [s]
N	110
N_{buffer}	5Mb
N_e	60 (54.54 %)
N_i	50 (45.45 %)
N_d	1
M	ClusterMovement
M_{e1r}	1700m
M_{e1c}	(x,y) = (3900, 2700)
M_{e2r}	1600m
M_{e2c}	(x,y) = (5000, 2700)
M_{e3r}	1600m
M_{e3c}	(x,y) = (5000, 2500)
M_{i1r}	2200m
M_{i1c}	(x,y) = (4100, 2700)
M_{i2r}	900m
M_{i2c}	(x,y) = (5400, 2700)
M_{i3r}	1600m
M_{i3c}	(x,y) = (5000, 2500)
m_{topic}	Elder's encounters
m_{size}	300kb
m_{ttl}	1800 [s]
I	BLE
I_{range}	30m
I_s	1 Mbps
Algorithm	RSB, EpSoc, SimBet, BubbleRap

Tabla 5.1: Variables y distribución del escenario de Detección de Soledad.

de éxito en las transmisiones, un 17 % más que SimBet, el segundo mejor resultado.

La Figura 5.9 muestra la latencia de cada protocolo (τ) como función del intervalo de generación de mensajes (ω). La latencia define un parámetro sensible a la carga de la red. De esta forma, se puede apreciar una clara

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

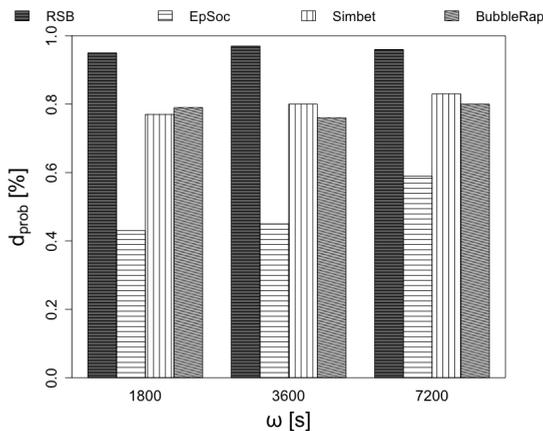


Figura 5.8: Probabilidad de Entrega (d_{prob}) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).

relación inversa entre el intervalo de generación de mensajes y la latencia media de los protocolos. En este aspecto, una de las principales características de RSB para mitigar la latencia es la identificación y guardado de los nodos con mayor influencia. Sin embargo, esta función no resulta efectiva cuando el número de mensajes es alto. Finalmente, la técnica manifiesta una ligera mejoría para $\omega = \{3600, 7200\}$. Comparando los resultados de RSB con el resto de alternativas, los valores demuestran cómo la solución se mantiene cerca del resto en cuanto latencia, requiriendo un tiempo razonable para trasladar la información entre el origen y el destino.

La Figura 5.10 muestra el *overhead*, θ , como función de ω . Esta métrica refleja la relación entre el número de mensajes copiados que hay en la red y el número de mensajes únicos recibidos. Este parámetro resulta interesante de medir, ya que permite conocer la efectividad de la duplicación de la información y de la introducción de copias en la red. En este caso, RSB alcanza valores reducidos en $\omega = 3600\text{s}$ y $\omega = 7200\text{s}$, demostrando la efectividad de disminuir la inundación de mensajes copiados en la red. Así, la elección de nodos intermedios puede ser interpretada como efectiva. Además, el almacenamiento de los nodos influyentes y las limitaciones de-

5.2. EVALUACIÓN DE LA DETECCIÓN DE LA SOLEDAD EN ADULTOS MAYORES

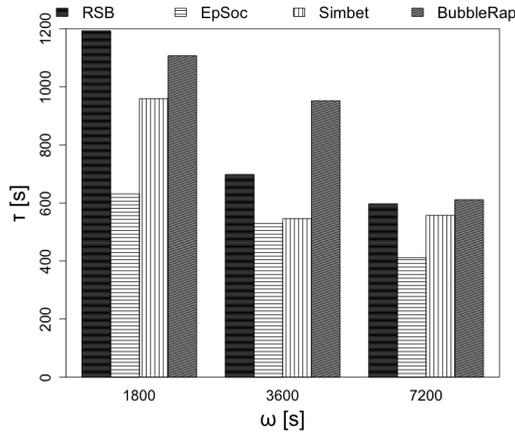


Figura 5.9: Latencia media (τ) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).

rivadas del encaminamiento basado en intereses contribuyen a la reducción de las copias implicadas en la comunicación.

Finalmente, en el caso de la Figura 5.11, se muestra el número medio de saltos requeridos para alcanzar el destino (σ) en función de ω . RSB registra valores similares a EpSoc y SimBet, definiendo el número medio de dispositivos implicados a la hora de construir un camino asíncrono entre el origen y el destino. De esta forma, se puede deducir cómo la transmisión de información resulta exitosa, especialmente considerando los valores de probabilidad de entrega. De esta manera, existe una relación satisfactoria entre el número de nodos implicados en la comunicación y los mensajes que finalmente son recibidos.

Una dimensión adicional que puede ser considerada en el análisis de resultados es el coste energético del algoritmo RSB. En el caso que se ilustra en el experimento, la arquitectura de la red se fundamenta en la utilización de nodos autónomos e independientes para emprender las transmisiones: *smartphones* y *wearables*. Estas comunicaciones implican un alto grado de interacción y cooperación entre los dispositivos. Por lo tanto, el consumo energético debe ser técnicamente asumible por los dispositivos de la red.

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

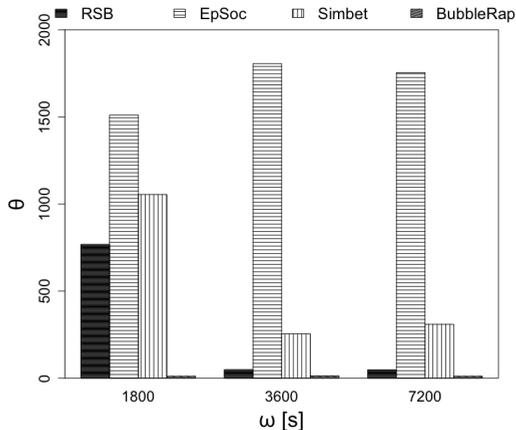


Figura 5.10: *Overhead* (θ) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).

Considerando esto, y siguiendo las cargas en la red reflejadas por el valor de *overhead*, θ , el consumo energético del algoritmo puede ser evaluado.

El consumo de energía de los dispositivos depende activamente de las tareas que desempeñen en la red. Las operaciones de envío, recepción y transmisión de los mensajes impactan directamente en la duración de la batería. Considerando que las ejecuciones han sido realizadas bajo las mismas condiciones para los cuatro algoritmos de enrutamiento, la creación de eventos será la misma. De esta forma, únicamente las métricas relacionadas con el *overhead* de la red, θ , son consideradas para definir el coste energético, ya que representa la relación entre los mensajes enviados y los copiados. Como resultado, tomando como referencia los resultados de *overhead*, la suma del coste energético total se estima para cada protocolo de encaminamiento. Para ello, las métricas de consumo son obtenidas de [235], permitiendo la estimación del coste de las comunicaciones. En el trabajo mencionado, el consumo de energía utilizando BLE es medido, determinando una estimación en miliamperios (mA) para cada tarea: reposo, escaneo de dispositivos cercanos, transmisión y recepción. En el caso de la simulación, se simplifica la evaluación, asumiendo las estimaciones para

5.2. EVALUACIÓN DE LA DETECCIÓN DE LA SOLEDAD EN ADULTOS MAYORES

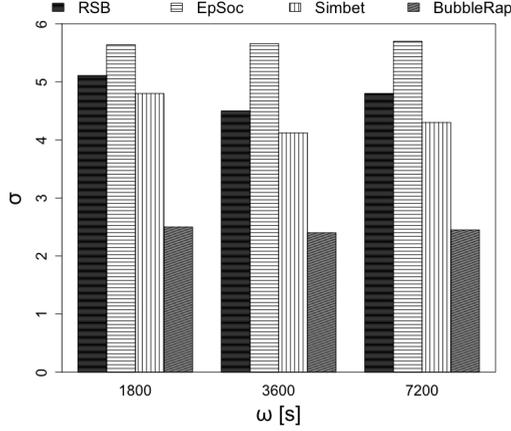


Figura 5.11: Número de saltos medio (σ) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).

el envío y recepción de los mensajes. De esta forma, el número de copias transmitidas en la red es relacionada usando la Ecuación 5.1:

$$E_g = \sum_{i=1}^N (m_{\text{isent}} \times c_{\text{sent}}) + (m_{\text{ireceived}} \times c_{\text{received}}) \quad (5.1)$$

obteniendo una estimación del consumo global (E_g) a partir de la suma del total de mensajes enviados por cada nodo (m_{sent}) multiplicado por el consumo de energía asociado (c_{sent}) y el total de recepciones de mensajes realizadas (m_{received}) multiplicada por el consumo de energía estimado (c_{received}).

Como resultado, la Figura 5.12 muestra la suma del consumo de energía para cada algoritmo de encaminamiento de la ejecución, manifestando cómo el consumo requerido por RSB es eminentemente más bajo que los protocolos alternativos. Resulta interesante resaltar que BubbleRap alcanza el menor de los valores de consumo, debido a su bajo valor medio de *overhead*. Sin embargo, resulta importante considerar que, a pesar de ello, la probabilidad de entrega que proporciona es inferior a RSB.

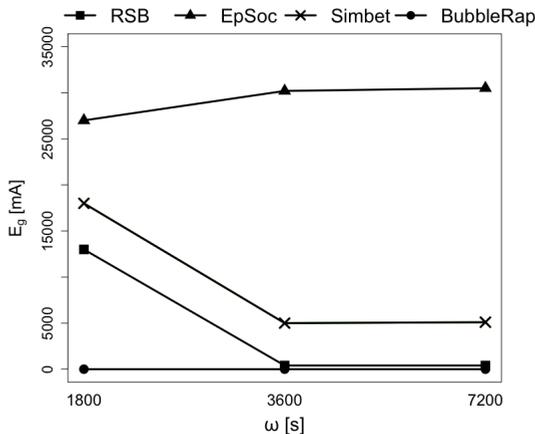


Figura 5.12: Coste energético (E_g) como función del intervalo de generación de mensajes (ω).

Tras analizar las cuatro variables consideradas para evaluar la calidad de servicio, así como el consumo energético, los resultados obtenidos por RSB son prometedores. La solución ofrece un comportamiento apropiado para las cuatro dimensiones, destacando especialmente d_{prob} . Los valores obtenidos muestran cómo RSB proporciona la mejor probabilidad de entrega, superando las soluciones alternativas y considerando la implementación como efectiva. De esta forma, la combinación de encuentros históricos y enrutamiento basado en intereses mejora el rendimiento.

5.2.3. Conclusiones

La soledad en los ancianos, especialmente en zonas rurales, es un problema creciente. La implantación de políticas públicas para su gestión es crucial, pero la detección y cuantificación de la soledad resulta complicada. En respuesta a este escenario, se propone la utilización de la arquitectura descrita en este trabajo para desplegar una aplicación que permite identificar los encuentros físicos de los adultos mayores y construir un grafo social que destaque a quienes corren riesgo de sufrir soledad.

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

La propuesta ha sido implementada, ejecutada y evaluada en un escenario realista simulado de una localidad rural. De esta forma, la simulación se ha equipado con nodos que siguen el comportamiento y características de nodos emisores, intermedios y destinos. Utilizando el protocolo de comunicación RSB, integrado en la arquitectura, se analizan las métricas de calidad de servicio obtenidas, comparando las salidas con otros algoritmos de encaminamiento, populares en la literatura, como EpSoc, SimBet y BubbleRap. Los resultados obtenidos demuestran que RSB proporciona la mayor probabilidad de entrega, mejorando en un 17 % al segundo valor más alto. También, reduce el valor máximo de *overhead* (EpSoc) en un 97 %. Aunque los valores de latencia son mejorables, se consideran unos resultados óptimos debido al alto ratio de transmisiones completas exitosas.

En definitiva, esta propuesta introduce una solución ante la creciente necesidad de respuesta para la soledad en las zonas rurales. De esta manera, es posible conocer desde un prisma cuantitativo el bienestar de los ancianos, así como detectar de una forma objetiva la soledad.

5.3. Evaluación de la comunicación entre dispositivos en entornos inteligentes

La arquitectura de comunicación oportunista que se propone en este trabajo de tesis se enfoca en proporcionar transmisión de información entre dispositivos que están situados en entornos donde la conexión a Internet no es accesible. Sin embargo, este mismo enfoque puede ser aplicado para emprender transmisiones de información en contextos inteligentes, donde dispositivos independientes interactúan en entornos locales. En la presente aplicación de la arquitectura se propone el uso de la comunicación oportunista para adaptar automáticamente el contexto a las preferencias de los usuarios.

La propuesta de aplicación explora las utilidades de la arquitectura en entornos IoT inteligentes y se fundamenta en proporcionar un sistema que ajusta el entorno a los gustos y preferencias de los usuarios. Para ello, recurriendo a las posibilidades del perfil virtual de los dispositivos, es posible especificar dos tipos de nodos: *Goals* y *Skills*. Los primeros comprenden los dispositivos que representan los gustos y preferencias de los usuarios,

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

por ejemplo, un *smartphone* que almacena la temperatura favorita de su propietario. Por otro lado, los nodos *Skills* definen los dispositivos que son capaces de emprender acciones en el entorno, por ejemplo, una máquina de aire que controla la temperatura ambiental. De esta manera, se recurre a la red oportunista para comunicar los dispositivos *Goals* con los elementos *Skills*.

La evaluación de la aplicación se lleva a cabo estudiando los resultados que ofrecen los algoritmos SACAR OCVN, SACAR-IR, SACAR-HC y SACAR-Hybrid en dos contextos simulados: una oficina inteligente y centro comercial. Como punto de partida, se realiza un estudio de los recursos que requieren, relacionando el consumo de batería, el tráfico de datos y el almacenamiento necesario con el intervalo de generación de mensajes. Después, se procede con la descripción de los escenarios de simulación contemplados, así como las variables que intervienen. Finalmente, se realiza un análisis del impacto del número de nodos con *Goals* y con *Skills* en el desempeño de la red.

5.3.1. Análisis del Consumo de Recursos

El consumo de energía y la gestión de los datos se identifican como dos características importantes de las que depende el éxito o fracaso de cualquier despliegue [236]. De esta forma, la propuesta de arquitectura oportunista requiere de un estudio detallado del consumo de recursos que implica.

Aplicando el *framework* definido en el trabajo [237] a la arquitectura propuesta, es posible identificar el consumo de recursos de cada una de las versiones de SACAR, así como la capacidad para reducir o preservar la energía. De esta manera, el consumo de recursos de un nodo depende activamente de las siguientes operaciones:

- Recepción de un mensaje (*get(size)*).
- Almacenamiento de un mensaje hasta que es transmitido a otro nodo (*store(size)*).
- Enviar al destino el mensaje (*post(size)*).

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

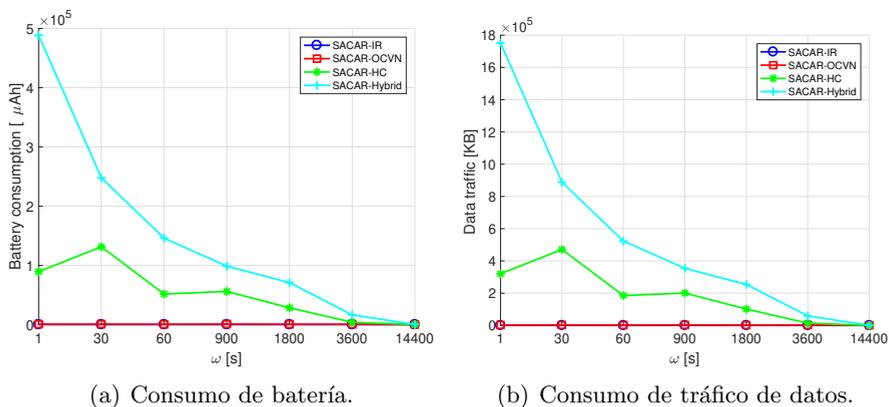


Figura 5.13: Consumo de recursos de los algoritmos SACAR.

A su vez, el consumo de cada una de las operaciones está ligado al tamaño del mensaje. Esta variable incluye la cantidad de información contextual que se compartirá entre los nodos, así como su asociación a un dominio específico. Para evaluar el consumo, se asume que el tamaño de los mensajes ronda 768 KB. No obstante, cualquier cambio en este valor resultaría proporcional para todos los algoritmos, por lo que los patrones de consumo serían los mismos. El consumo específico de cada operación puede ser revisado en los detalles del *framework*.

Concretamente, el consumo de cada nodo $d_i \in \mathcal{D}$ también depende del número de nodos con los que se está en contacto (c) en un momento específico (t) y la frecuencia en el intervalo de generación de mensajes ω . Por lo tanto, el consumo puede ser calculado usando la siguiente ecuación (Ecuación 5.2).

$$d_i = (\text{receive}(\text{size}) + \text{store}(\text{size})) \cdot (\omega \cdot c_t) + (\text{post}(\text{size})) \cdot (\omega \cdot c_{t+1}) \quad (5.2)$$

La Figura 5.13 muestra el consumo por hora total de la batería y el tráfico de datos de cada uno de los algoritmos propuestos, variando en función del intervalo de generación de mensajes. Así, se asume la variación $\omega = \{1, 30, 60, 90, 180, 360, 1440\}$ s. con un total de siete nodos.

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

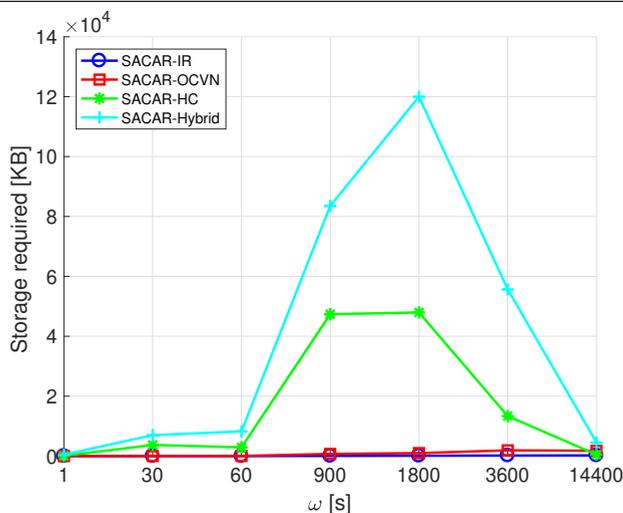


Figura 5.14: Almacenamiento requerido para los algoritmos SACAR.

Como puede apreciarse, tanto SACAR-HC como SACAR-Hybrid conforman las versiones que suponen un mayor consumo, especialmente debido a que distribuyen los mensajes a un número mayor de nodos. Obviamente, SACAR-IR es la aproximación que menos consume, ya que no implementa un mecanismo de *store-carry-forward*, por lo tanto, no se implican nodos intermedios en las comunicaciones. Finalmente, SACAR-OCVN, a pesar de que transmite la información entre los nodos, proporciona buenos resultados, sin sobrecargar las entidades intermedias. Concretamente durante una hora, este algoritmo únicamente consume $586\mu AH$, lo que supone tan solo un 0.02% de la capacidad de batería normal de un dispositivo.

Finalmente, la Figura 5.14 muestra el almacenamiento requerido para desplegar los algoritmos. De nuevo, SACAR-HC y SACAR-Hybrid proporcionan las salidas más voraces, a pesar de los requisitos de almacenamiento. SACAR-IR define la solución que representa los requisitos más ligeros, ya que los mensajes no tienen que ser almacenados. Finalmente, SACAR OCVN es la solución más efectiva, ya que los mensajes recibidos son almacenados y retransmitidos, sin embargo, no implica una capacidad grande de almacenamiento. Concretamente, se precisan de 1914 KB por nodo para almacenar los mensajes generados.

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

5.3.2. Descripción de los Escenarios

Se define un conjunto de escenarios realistas para evaluar el rendimiento de la aplicación mediante su ejecución con los algoritmos SACAR. Para ello, se detallan dos escenarios: uno basado en una oficina inteligente y otro centrado en un centro comercial.

5.3.2.1. Oficina Inteligente

Este primer escenario se compone de un conjunto de empleados que manifiestan diferentes necesidades y un conjunto de dispositivos IoT inteligentes que satisfacen estos requisitos. De esta forma, los dispositivos se enfocan en el bienestar de los empleados. En este entorno, se relacionan diferentes características ligadas al contexto social, como el número de dispositivos y de personas involucrados, al igual que los patrones de movilidad que se siguen durante un día de trabajo. Por lo tanto, el concepto de OCVN está alineado con esta situación. La comunicación entre los nodos permite adaptar el comportamiento de los dispositivos inteligentes a las necesidades y preferencias de los empleados, creando un área de trabajo más cómodo y productivo. En particular, los componentes definidos en este escenario se detallan en la Figura 5.15 y se describen a continuación:

- Dos máquinas de aire acondicionado, una en la sala de trabajo y otra en la sala de reuniones. Ambos dispositivos definen el *Skill* de modificar la temperatura del ambiente. Esto se realiza considerando la temperatura deseada de los empleados en cada sala, calculando una media de las preferencias. Es importante resaltar que, aunque esta política podría ser más compleja (por ejemplo, asignando pesos en las preferencias de los empleados según su rol en la empresa), se define de una manera simple para centrar el funcionamiento en analizar la probabilidad de entrega de los mensajes.
- Bombillas inteligentes, localizadas en la sala de trabajo, son capaces de modificar la intensidad de la luz en base a las preferencias de los empleados que estén en el entorno.

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

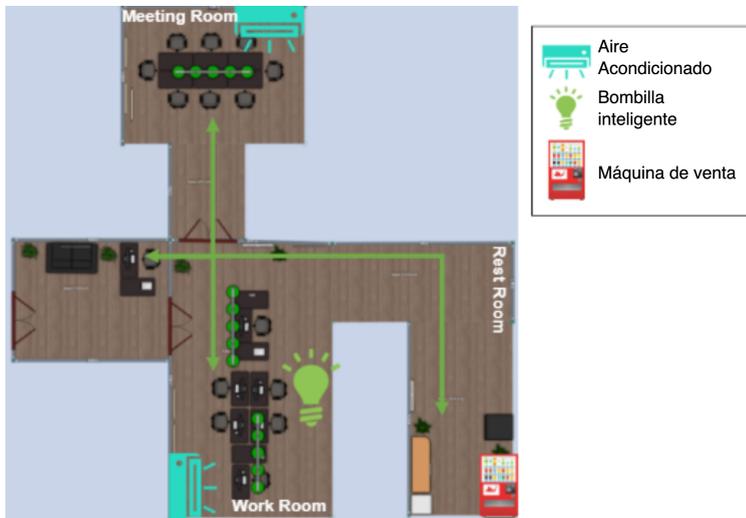


Figura 5.15: Escenario de oficina inteligente.

- Una máquina de venta, situada en la sala de descanso, con la *Skill* de expender bebidas, prepara el producto en base a las preferencias que definen de los usuarios.
- Siete empleados con diferentes roles se desplazan e interactúan con los dispositivos, proporcionando sus preferencias de iluminación, temperatura y bebidas.

La Tabla 5.2 resume la configuración de parámetros del escenario. De esta manera, un total de $N = 11$ nodos son situados en una oficina, con una superficie de $A = 150 \text{ m}^2$, siendo $N_s = 4$ dispositivos estáticos con *skills*. El resto de los nodos $N_g = 7$ se corresponden con los dispositivos móviles (por ejemplo, los empleados). El conjunto de *Skills* y *Goals* es el mismo: $S = G = \{\text{Temperature, Illuminance, ProductType}\}$. Con esta configuración, se asume que el número de nodos que definen *Goals* (por ejemplo, *smartphones* y *tablets*), y se desplazan a lo largo del escenario, es mayor que el número de nodos IoT estáticos que emprenden acciones asociadas a *Skills*.

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

Respecto el número de *Skills* por nodo estacionario, se considera que un dispositivo únicamente podrá gestionar un *Skill* ($s_n = 1$). Esta lógica encaja con un contexto realista en el que un dispositivo ha sido diseñado para desempeñar un único propósito. Por el contrario, un nodo móvil es capaz de considerar un conjunto de *Goals* diferentes. En este escenario, el número de *Goals* por nodo móvil es de $g_n = 3$.

En cuanto al movimiento de los nodos móviles (empleados), la Figura 5.15 muestra un esquema de los patrones de movilidad considerados en el escenario, *P*. Como puede apreciarse, existen dos principales flujos de movimiento, representados con las líneas verdes: uno primero entre la sala de reuniones y la sala de trabajo; y otra entre la sala de trabajo y la sala de descanso. Estos dos patrones han sido seleccionados por su potencial representación realista de interacciones en la oficina. Dos o tres veces al día, cada empleado acude a la sala de reuniones a discutir sobre los avances de los proyectos y cada una o dos horas, se dirige a la sala de descanso durante un intervalo de tiempo. Además, considerando que uno de los empleados es el secretario, desempeña un rol especial que le permite seguir ambos patrones de desplazamiento. Usualmente, el secretario no suele acudir a la sala de reuniones pero sí se dirige con mayor frecuencia a la sala de descanso.

Para la evaluación, el simulador ejecutará una duración de $T = 28000$ s, la cual se corresponde con una jornada laboral media, y un parámetro, ω , que define la frecuencia con la que se generan nuevos mensajes en la red. Como potencial ejemplo de esto, si $\omega = 60$ s, se crearán y enviarán nuevos mensajes a la red cada minuto. La Tabla 5.2 muestra los diferentes valores que se consideran para este parámetro, el cual permite ejecutar de manera independiente el escenario y variar los resultados en función de su valor.

5.3.2.2. Centro Comercial

En este escenario, la atención se centra en la definición de un contexto más grande basado en un centro comercial (ver Tabla 5.3 para consultar todas las especificaciones). En este segundo contexto, se muestra información y anuncios personalizados a los compradores dependiendo de sus preferencias, necesidades, compras, gustos, etc... Esta información se muestra en diferentes pantallas instaladas en puntos de información del centro comercial, así como a lo largo de sus instalaciones. El intercambio de información

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

Parameter	Value
A	150 [m^2]
N	11
N_s	7
N_g	4
S	{Temperature, Illuminance, ProductType}
G	{Temperature, Illuminance, ProductType}
s_n	1
g_n	3
P	StationaryMovement para N_s , MapRouteMovement para N_g con periodos de tiempo de trabajo situados en el rango de $t = [1800, 7200]$ s.
T	28000 [s]
ω	{1,30,60,90,1800,3600,14400} [s]

Tabla 5.2: Configuración de parámetros para el escenario de la oficina inteligente.

contextual entre las personas y las pantallas permite a las tiendas mostrar ofertas adaptadas a los compradores. Del mismo modo, también resulta posible para el administrador del centro comercial conocer información sobre el comportamiento de los clientes, así como patrones de movimiento, perfiles y preferencias. Este caso de estudio busca mejorar la satisfacción de los clientes, mostrando un conjunto de ofertas y de información que se ajustan a sus características. Al mismo tiempo, se favorece la visibilidad de los negocios y marcas. A través de este contexto, el objetivo de la simulación se centra en evaluar el comportamiento de los algoritmos SACAR en entornos cerrados pero con un gran número de usuarios que no siguen un patrón de desplazamiento claro. En particular, los diferentes componentes del escenario se muestran en la Figura 5.16 y se describen a continuación:

- Pantallas situadas a lo largo del centro comercial con la *Skill* de mostrar a los compradores información en base a sus necesidades, como tiendas, productos u ofertas en las que estén interesados.
- Compradores con un perfil virtual con diferentes *Goals* que varían en función de sus necesidades, preferencias, compras previas, etc...

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

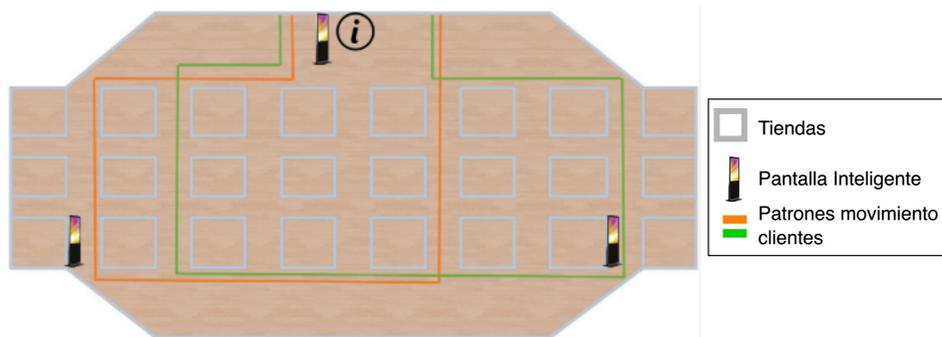


Figura 5.16: Escenario del centro comercial.

La Figura 5.16 muestra un esquema del contexto simulado, así como algunos ejemplos de patrones de movilidad. Como puede apreciarse, se describen dos principales flujos de movimiento, con líneas de color verde y naranja, respectivamente. En la figura, se han definido únicamente dos rutas para mejorar la comprensión de la imagen. Estos patrones de movilidad se han asignado a compradores dependiendo de sus preferencias y *Goals*. Este hecho se corresponde con el factor de que los usuarios con un conjunto común de preferencias, suelen acudir a tiendas similares. Por otro lado, dado que las pantallas se han situado en diferentes localizaciones dentro del espacio del centro comercial, se evalúa también el incremento o decremento en el número de nodos con *Skills* sobre la probabilidad de entrega.

El principal objetivo de emplear este escenario es evaluar el rendimiento de las soluciones propuestas en un contexto con un alto número de nodos que se desplazan con diferentes patrones de movilidad. Además, es posible analizar también el impacto en el rendimiento de distribuciones alternativas en el número de nodos compradores (nodos con *Goals*), asumiendo, por ejemplo, que acude mucha gente al centro comercial en un momento preciso. Del mismo modo, se puede analizar cuál es el número mínimo de pantallas (nodos con *Skills*) que se precisa para alcanzar el número máximo de compradores. Como resultado, se procede a realizar la ejecución de los contextos. Para ello, tras obtener los resultados, se emprenderá la comparación con protocolos alternativos de la literatura. A continuación, en la siguiente subsección, se detallan los algoritmos escogidos.

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

Parámetro	Valor
A	225000 [m^2]
N	41
N_s	3
N_g	38
S	{Purchases}
G	{Purchases}
s_n	1
g_n	1
P	StationaryMovement para N_s , MapRouteMovement para N_g con periodos de tiempo estacionarios en el rango de $t = [300, 500]$ s.
T	28000 [s]
ω	{1,30,60,90,1800,3600,14400} [s]

Tabla 5.3: Configuración de Parámetros para el escenario del centro comercial.

5.3.3. Algoritmos Alternativos para la Comparativa

Con el objetivo de comparar los resultados y rendimiento de la arquitectura, se recurre a un conjunto de algoritmos de encaminamiento alternativos y presentes en la literatura. De esta forma, se proporciona una descripción breve de cada uno.

- **Direct Delivery Routing (DDR)** [238]. Este algoritmo transmite los mensajes entre nodos únicamente cuando existe una comunicación directa entre el origen y el destino. De esta forma, no se realizan copias ni se emplean elementos intermedios. Como resultado, se precisa que exista un camino directo entre el origen y el destino.
- **Epidemic Routing (ER)** [239]. En este algoritmo, una copia del mensaje es enviada a cada contacto. Se asume que cada nodo cuenta con una capacidad de almacenamiento, así como de banda ancha, ilimitada.
- **Max-Prop Routing (MPR)** [240]. Este algoritmo ejecuta el cálculo del camino más corto para cada destino basándose en los contactos

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

históricos, así como en el número de saltos. Las copias son eliminadas cuando un mensaje se recibe en el destino.

- **ProPHET Routing (PR)** [241]. El objetivo de este algoritmo es mejorar el rendimiento de la red adoptando un enfoque probabilístico que refleja los contactos de los nodos.
- **Spray and Wait Routing (SWR)** [242]. En este algoritmo, el nodo origen genera un número N de copias y las transmite a los nodos intermedios. Después de ello, los portadores se encargan de aplicar una filosofía alineada con DDR, emprendiendo una transmisión directa con el destino.
- **Geographic-Based Spray-and-Relay (GSaR)** [174]. La idea detrás de este algoritmo se centra en explotar la información geográfica histórica y la trayectoria de los nodos para emprender decisiones de encaminamiento en base a la probabilidad de los encuentros.

5.3.4. Evaluación de Resultados

El proceso de ejecución de los escenarios se emprende tomando como referencia las implementaciones de los algoritmos SACAR-IR, SACAR-OCVN, SACAR-HC y SACAR-Hybrid en el simulador The One Simulator [243]. La especificación del resto de algoritmos, excepto GSaR, están disponibles en el simulador. En este caso en particular, se ha añadido el protocolo para emprender las comparaciones. Cada algoritmo es ejecutado en un portátil con 2.3GHz 2-core Intel i5, 16Gb of RAM and Intel Iris Plus Graphics 640.

5.3.4.1. Evaluación del Escenario de la Oficina Inteligente

El primer análisis que se propone consiste en comparar diferentes métricas de calidad de servicio tras ejecutar la simulación descrita en el apartado 5.3.2.1 con los algoritmos de encaminamiento propuestos. Tal y como se detalla en 5.3.2, se asume una variación de $\omega = \{1, 30, 60, 90, 1800, 3600, 14400\}$ s. para analizar el impacto de la frecuencia de generación de mensajes en el rendimiento de la red. Por lo tanto, un total de $|RA| * |\omega|$ simulaciones

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

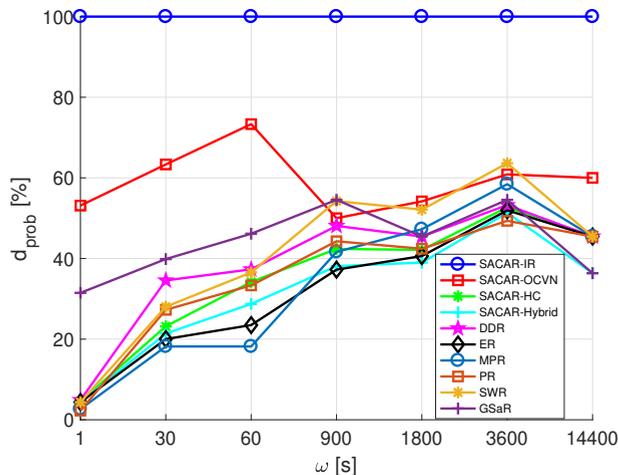


Figura 5.17: Probabilidad de entrega medio (d_{prob}) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de oficina inteligente.

han sido ejecutadas, variando los componentes de la dupla $E = \{RA, \omega\}$, donde $RA = \{SACAR-IR, SACAR-OCVN, SACAR-HC, SACAR-Hybrid, DDR, ER, MPR, PR, SWR, GSaR\}$ se corresponde con los algoritmos de encaminamiento. De esta forma, cuatro métricas de la red son examinadas en cada simulación: probabilidad de entrega media, d_{prob} [%]; latencia media, τ [s]; *overhead*, θ ; y número de saltos medio, σ .

Tras destacar las diferentes métricas de calidad de servicio, se procede con el análisis de los resultados del escenario de la oficina inteligente. Tal y como se ha introducido previamente, la probabilidad de entrega d_{prob} evalúa la probabilidad de que un mensaje alcance su destinatario. Dado que todos los nodos en el escenario son capaces de transmitir mensajes al resto de nodos, la Figura 5.17 representa los valores obtenidos para d_{prob} como función de ω .

Considerando la Figura 5.17, se extraen un conjunto de consideraciones. Al principio, se puede apreciar cómo SACAR-IR presenta un valor de 100% de probabilidad de entrega a pesar del corto intervalo en la generación de mensajes. Esta situación encuentra una inmediata explicación en que este protocolo sigue una naturaleza diferente respecto el resto de

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

alternativas. En SACAR-IR, un nodo emisor únicamente transmitirá sus mensajes al destino si i) está situado dentro de su rango de alcance y ii) ambos nodos comparten intereses (coinciden *goals/skills*). Dado que la solución [244] restringe ampliamente los potenciales destinos, cada mensaje creado alcanzará siempre su destino, con una media de probabilidad de entrega absoluta, $d_{\text{prob}} = 100\%$.

Respecto el resto de algoritmos basados en SACAR, así como en los protocolos de comparación, es necesario remarcar que todos ellos aplican la filosofía *store-carry-forward* para transmitir mensajes. En estos casos, los nodos origen y destino no requieren estar en el mismo rango, permitiendo así la utilización de nodos intermedios para recibir la información, almacenarla temporalmente, y enviarla al siguiente nodo con el que se encuentre el portador. Según los resultados de la Figura 5.17, SACAR-OCVN se trata del algoritmo que representa los mejores resultados en términos de probabilidad de entrega, alcanzando un pico del 73,33% para $\omega = 60$ s. El uso del concepto OCVN en las acciones de comunicación hacen que la solución encaje particularmente para escenarios como una oficina inteligente, con un tamaño limitado y con un amplio ratio de individuos compartiendo intereses comunes. Resulta interesante comprobar que el resto de algoritmos revelan una tendencia similar: cuando ω se incrementa, el tiempo entre las rondas de nuevos mensajes es mayor y d_{prob} tiende a incrementarse. Esto resulta evidente para los valores de $\omega \leq 60$, conduciendo a que los mensajes sean generados muy frecuentemente. Particularmente en este caso, GSaR presenta la mejor solución entre este último conjunto de algoritmos. Este protocolo presenta un incremento lineal de d_{prob} para valores de $\omega \leq 900$. Concretamente, para $\omega = 900$, alcanza mejores resultados que SACAR OCVN. En cambio, SWR se comporta mejor para valores de $\omega \geq 900$ s., ligeramente mejorando SACAR OCVN en $\omega = 900$ s. y $\omega = 3600$ s. Finalmente, mientras SACAR-HC permanece en la media de los algoritmos de comparación, SACAR-Hybrid empeora en valores altos de ω .

En la Figura 5.18 se evalúa la latencia media, γ , experimentada por los mensajes transmitidos desde el origen hasta el nodo de destino. Los resultados demuestran cómo la latencia media tiende a incrementarse con ω . Claramente, SACAR-IR presenta los mejores resultados en términos de latencia media, dado que la comunicación origen-destino se restringe a que ambos elementos estén físicamente situados en el mismo rango. En el caso

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

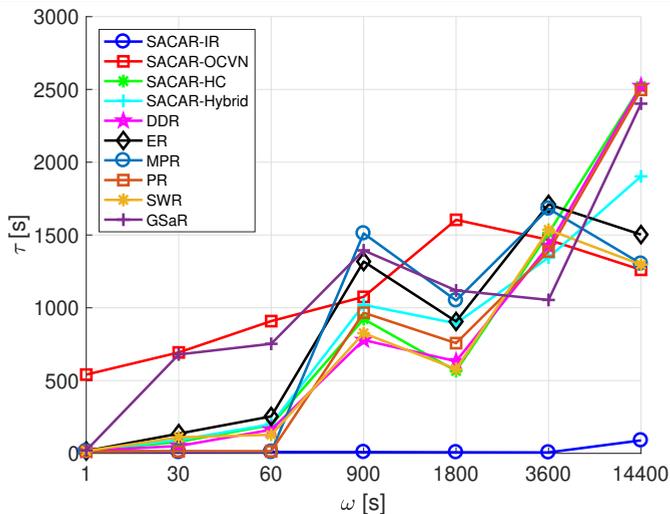


Figura 5.18: Latencia media (τ) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de oficina inteligente.

de los algoritmos basados en *store-carry-and-forward*, es posible apreciar cómo SACAR OCVN y GSaR reducen su rendimiento para valores bajos de ω , en comparación con el resto de algoritmos. La explicación a esta situación es que un nodo únicamente transmitirá el mensaje a otro nodo si comparten intereses (coincidencia de *Goals/Skill*). De una manera similar, para GSaR, un mensaje únicamente se transmite si los nodos definen una trayectoria específica. Por lo tanto, a pesar de que se manifiesten potenciales posibilidades para transmitir los mensajes entre dos nodos que se encuentran, se deben satisfacer limitaciones adicionales. Resulta relevante destacar, pese a que SACAR OCVN ofrece resultados interesantes en valores altos de ω , SWR es el algoritmo que, en general, ofrece una mejor latencia media.

La tercera métrica que se considera en el análisis es el ratio de *overhead*, θ , representado en la Figura 5.19 en función de ω . Entre los resultados, no se consideran las salidas ofrecidas por los algoritmos que no proporcionan replicas de mensajes (SACAR-IR y DDR), ya que no se experimenta *overhead* ($\theta = 0$). En el caso del resto, SACAR-OCVN, SWR y GSaR presentan una

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

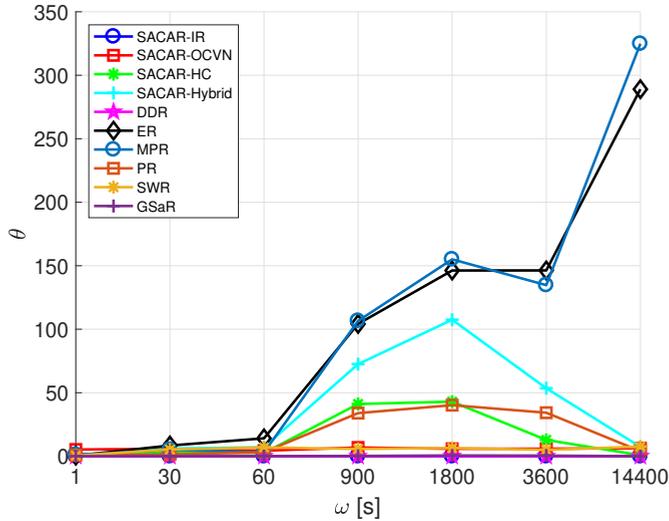


Figura 5.19: Ratio de *Overhead* (θ) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de oficina inteligente.

tendencia plana con valores reducidos de θ , con independencia del valor de ω . Esto denota la existencia de una muy reducida diferencia entre el número de copias de mensajes realizadas y aquellas finalmente recibidas en el destino. Por lo tanto, recursos de los nodos como la ocupación del *buffer* y el consumo de energía derivado del envío de mensajes no resultan especialmente afectados por el uso de estos algoritmos. Por otro lado, se evidencia un claro incremento en el valor de θ con respecto ω cuando se aplican MPR y ER. La lógica de expansión de la información en estas soluciones, donde múltiples copias de los mensajes son creadas bajo diferentes circunstancias, impactan severamente el rendimiento de la red en términos de *overhead*.

Finalmente, se procede a analizar el número de saltos que un mensaje necesita para trasladarse desde un nodo origen hasta el nodo destino. Para ello, la Figura 5.20 muestra el número medio de saltos como una función de ω . Una vez más, la tendencia general es que el número de saltos se incrementa con ω , excepto para SACAR-IR y DDR, ya que su lógica se basa en generar mensajes únicamente cuando el emisor está en contacto con el

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

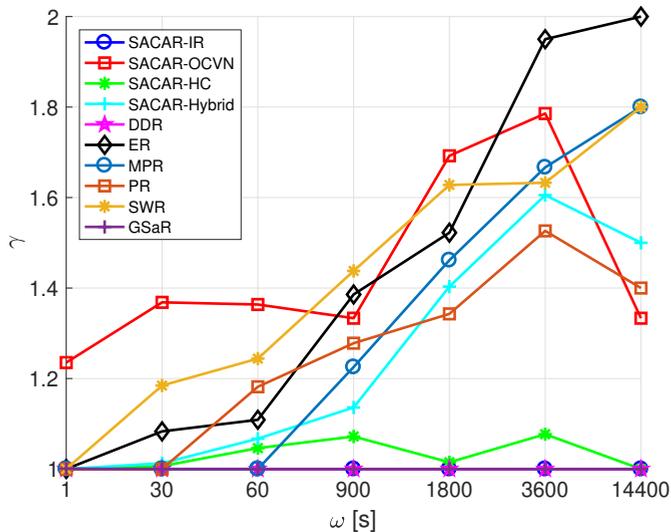


Figura 5.20: Número de saltos medio (γ) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de oficina inteligente.

destino. En el caso de SACAR-HC, el número de saltos medio se estabiliza en torno a 1 para cada valor de ω . En el caso de GSaR, el número de saltos se estabiliza también en torno a 1 porque está enfocado en ofrecer comunicación en múltiples tipos de escenarios. A diferencia de los análisis previos de latencia, SACAR OCVN y SWR presentan resultados comparables en término de número de saltos.

Como resumen, tras analizar la evaluación del escenario de una oficina inteligente utilizando el conjunto de algoritmos SACAR, así como sus comparaciones, se extraen las siguientes conclusiones: i) si la mayoría de los nodos se encuentran dentro de un mismo rango, la mejor opción es hacer uso de SACAR-IR; ii) si no se da la situación descrita en i), SACAR OCVN presenta los mejores resultados en probabilidad de entrega y *overhead* entre el conjunto de alternativas fundamentadas en el *store-carry-forward*, a pesar de los valores de latencia y de número de saltos; iii) si se precisa de un balance entre probabilidad de entrega y latencia, la mejor opción, de acuerdo a los resultados obtenidos, es utilizar SACAR-HC.

Una vez que se ha evaluado la ejecución de la aplicación en un esce-

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

nario pequeño, la siguiente subsección analiza las salidas obtenidas por los algoritmos en un contexto mayor, tanto en superficie como en número de nodos.

5.3.4.2. Evaluación del Escenario del Centro Comercial

El escenario de un centro comercial se simula a través de la especificación de dos conjuntos de nodos: uno relacionado con nodos como dispositivos con *Skills* (pantallas) y otro con el resto de elementos representando a las personas que acuden al centro comercial con el objetivo de comprar (por ejemplo, con el *Goal* de comprar). Tal y como la Sección 5.3.4.1 describe, el principal objetivo es analizar el rendimiento de la aplicación en este escenario. Para ello, se consideran los algoritmos basados en SACAR. Dado que estos protocolos consideran las similitudes entre encuentros a través de los *Goals/Skills* para transmitir un mensaje (formar una OCVN), se estudiará también el impacto en el rendimiento al incrementar el número de nodos con *Goals* y el número de nodos con *Skills*.

La primera métrica que se analiza es la probabilidad de entrega media. La Figura 5.21 representa los valores resultantes de d_{prob} como función de ω . Como punto de partida, los mejores resultados se obtienen cuando los mensajes son continuamente generados y el tráfico en la red es alto (incremento de un 40% cuando $\omega = 1s$). A pesar de que la d_{prob} de SACAR OCVN decrementa con ω , los valores se comportan de una forma estable y siempre por encima del 20%. Por el contrario, el resto de algoritmos presentan una tendencia incremental que asciende en función de ω . Sin embargo, sus salidas son peores que las obtenidas cuando se aplica el concepto de OCVN. Entre ellas, resulta relevante destacar GSaR, ya que proporciona los mejores resultados para $\omega \leq 1800$. De hecho, presenta mejores resultados que SACAR-OCVN para $\omega = 14400$.

En un escenario grande como un centro comercial, resulta necesario evaluar el tiempo que un mensaje permanece almacenado en el *buffer* de un nodo. Dado que existen múltiples nodos en la red y el tráfico puede ser significativamente alto, es importante emprender las tareas de *store-carry-forward* de una manera eficiente. Así, se analiza una nueva métrica

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

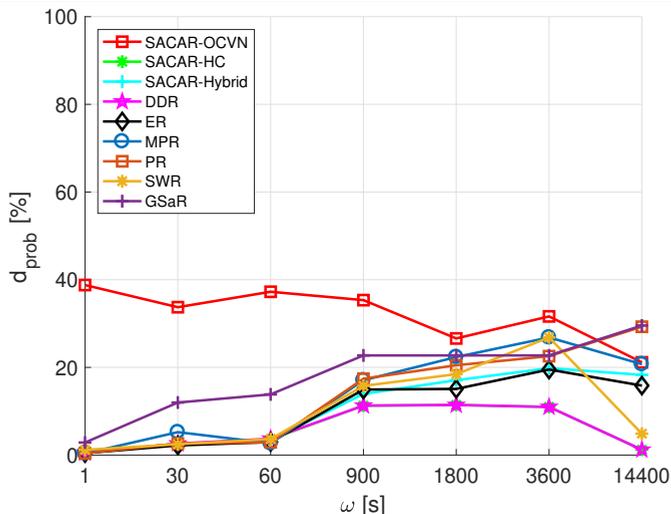


Figura 5.21: Probabilidad de entrega media (d_{prob}) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de centro comercial inteligente.

en este escenario, δ , que indica el tiempo medio que un mensaje se mantiene almacenado en un *buffer*.³

La Figura 5.22 muestra los valores de δ como función de ω . A partir de estos resultados, se puede destacar que los algoritmos se distribuyen en dos grupos, de acuerdo a sus resultados de δ . Como punto de partida, existen cuatro algoritmos con los que el tiempo medio que transcurre un nodo intermedio con un mensaje se incrementa con ω , DDR, SACAR-HC, GSaR y SWR; alcanzando resultados prohibitivos cuando el periodo de tiempo se acerca al intervalo de generación de mensajes. Por el contrario, en el caso del resto de algoritmos, no se detecta un impacto en δ cuando ω cambia. Si se establece el foco en la mejor solución en términos de probabilidad de entrega, SACAR OCVN (ver Figura 5.21), es posible afirmar que los resultados son inesperados. A pesar de que la lógica del algoritmo restringe el número de nodos que pueden ser empleados como intermedios (debe existir

³Dado que los resultados obtenidos para el resto de métricas resultan similares a los considerados en la Sección 5.3.4.1, se presenta un conjunto de conclusiones similares en el escenario del centro comercial, evitando incluirse en este análisis y enfocando los detalles en d_{prob} y δ .

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

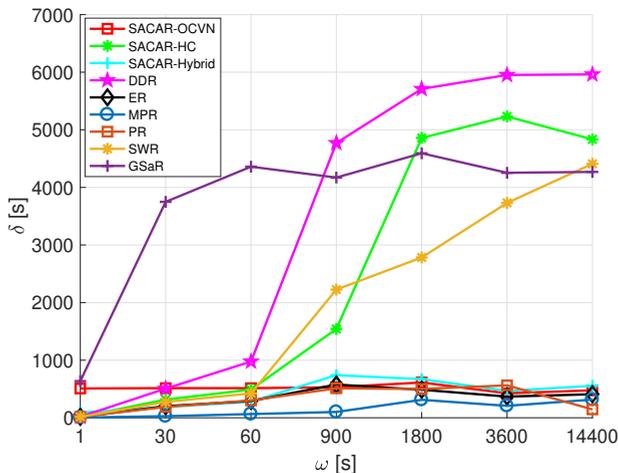


Figura 5.22: Tiempo medio de buffer (δ) vs. Frecuencia de generación de mensajes (ω) en el escenario de centro comercial inteligente.

coincidencia *Goal/Skill*), y esto conduce a que los mensajes se mantengan durante más tiempo almacenados en el *buffer*, los resultados de δ mostrados en la Figura 5.22 indican que estos tiempos son comparables con aquellas soluciones donde no se considera ninguna restricción y donde los mensajes son compartidos con los nodos disponibles como contactos.

En este último análisis, el objetivo se centra en evaluar el impacto de incrementar el número de nodos con *Goals* y el número de nodos con *Skills* para las diferentes métricas de calidad de servicio cuando SACAR OCVN es aplicado. Para ello, se realiza un análisis multivariante que considera el número de nodos definiendo *Goals* N_g , al igual que el número de nodos con *Skills* N_s en el escenario, como variables independientes. Mientras, las variables d_{prob} , θ , τ , γ , y δ se definen como dependientes. Así, la idea es conocer el impacto de cada variable independiente sobre las métricas identificadas como dependientes. En resumen, el conjunto de variables usadas en el análisis estadístico son definidos y categorizados en la Tabla 5.4.

Respecto la configuración de las simulaciones, se considera el escenario del centro comercial con un valor de $\omega = 3600$ s. De esta forma, el periodo de tiempo transcurrido entre dos rondas consecutivas de generación

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

Variable	Descripción	Tipo
N_g	Número de nodos con <i>Goals</i>	Independiente/Continuo
N_s	Número de nodos con <i>Skills</i>	Independiente/Continuo
d_{prob}	Probabilidad de entrega media	Dependiente/Continua
θ	<i>Overhead</i>	Dependiente/Continua
τ	Latencia media	Dependiente/Continua
γ	Número de nodos medio	Dependiente/Continuo
δ	Tiempo medio de <i>buffer</i>	Dependiente/Continuo

Tabla 5.4: Valores y variables usadas en el análisis multivariante.

Variable	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
d_{prob}	-0.025	0.023	-0.113	-1.122	0.265
θ	1.719	0.141	0.777	12.228	0.000
τ	7.168	1.340	0.475	5.348	0.000
γ	0.023	0.001	0.898	20.164	0.000
δ	-1.363	0.207	-0.553	-6.568	0.000

Tabla 5.5: Coeficientes de regresión OLS con N_g como variable independiente.

de mensajes es de una hora. Este intervalo es escogido debido a que permite que los nodos se desplacen a lo largo del escenario y aprovechen sus funciones de *store-carry-forward*. Así, resulta posible reducir la influencia de eventos en la comunicación, como el incremento de los mensajes de la red. Para ello, se han realizado diferentes ejecuciones variando el número de nodos y la posición inicial de cada uno dentro del escenario. Como resultado, un total de 25 ejecuciones independientes son llevadas a cabo por cada prueba para generar resultados estadísticamente enriquecidos.

La Tabla 5.5 muestra los resultados tras llevar a cabo la regresión de los Mínimos Cuadrados Ordinarios (*Ordinary Least Squares*, OLS), considerando el número de nodos con *Goals* como variable independiente y alcanzando un valor medio de $R^2 = ,876$. Primero, todas las variables consideradas en el análisis resultan estadísticamente significativas ($p < 0,05$) excepto d_{prob} , para la que no se puede extraer conclusiones ($p = 0,265$). Consultando los coeficientes sin estandarizar (columna B), resulta eviden-

5.3. EVALUACIÓN DE LA COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS EN ENTORNOS INTELIGENTES

te que no existe una proporcionalidad directa entre el número de nodos con *Goals*, N_g , y el ratio de *overhead*, θ . En particular, un incremento de una unidad en el número de nodos con *Goals* en el escenario es asociada estadísticamente de una manera significativa, con un incremento de 1,719 en el *overhead*. Del mismo modo, un incremento de 7,168 s. en la latencia media, τ , es alcanzado si un nuevo nodo se une a la red. En cambio, el número de saltos, γ , no resulta altamente afectado por la consideración de la variable independiente, con un pequeño incremento por el nodo añadido. Sin embargo, es interesante destacar que la única variable con coeficientes negativos es el tiempo medio del *buffer*, δ , con $B = -1,363$. Esto significa que el tiempo medio que un mensaje transcurre en el *buffer* es reducido con el incremento de un nuevo nodo con *Goals* en la red, siguiendo una progresión descendente de 1,363 s. por cada nuevo nodo. Esta situación puede corresponderse con el siguiente patrón: dado que existen más nodos en la red con intereses comunes, la probabilidad de que un nodo almacene temporalmente un mensaje que va dirigido a otro nodo se reduce. Por lo tanto, el tiempo medio del *buffer* en la red también se decrementa.

Inspeccionando la Tabla 5.6, es posible extraer resultados similares cuando el número de nodos con *Skills*, N_s , se considera como variable independiente. De nuevo, añadir un nodo *Skill* conduce a un incremento en el *overhead* y en la latencia media. Al mismo tiempo, se reduce en más de 4 puntos el tiempo medio del *buffer*. De una manera similar a la Tabla 5.5, el impacto en el incremento del número de nodos sobre el número de saltos resulta despreciable ($B = -0,047$). No obstante, la principal diferencia con el análisis previo es que la variable d_{prob} ahora es estadísticamente significativa. Por lo tanto, se puede extraer de los resultados que el impacto de añadir un nuevo nodo con *Skills* en la red está asociado a la mejoría de un 1,521 % en la probabilidad de entrega.

Como resumen de los resultados de la regresión OLS, a medida que se incrementa el número de nodos en la red mientras se usa SACAR OCVN, el ratio de *overhead* y la latencia media aumenta. Sin embargo, un punto remarcable es que los recursos de los nodos, como los *buffer*, resultan eficientemente utilizados en la solución. Finalmente, la probabilidad de entrega se incrementa cuando se añaden nodos con *Skills* en la red.

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

Variable	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
d_{prob}	1.521	0.222	-0.231	-2.349	0.021
θ	6.794	1.698	0.375	4.002	0.000
τ	3.236	10.652	0.031	0.304	0.762
γ	-0.047	0.009	-0.483	-5.454	0.000
δ	-4.469	0.727	-0.527	-6.145	0.000

Tabla 5.6: Coeficientes de regresión OLS con Ns como variable independiente.

5.3.5. Conclusiones

La propuesta de algoritmos asociados a SACAR OCVN ha sido evaluada a través de dos escenarios representativos, basados en una oficina y en un centro comercial, ambos equipados con dispositivos IoT inteligentes. Estos contextos han sido escogidos debido a su compatibilidad con el despliegue de redes IoT con las que los usuarios finales pueden relacionarse, tanto a un nivel personal en escenarios pequeños, como su hogar o sitio de trabajo; como a un nivel que involucra distancias medias, como un centro comercial o conciertos. Los resultados de simulación muestran que los algoritmos SACAR mejoran las salidas de otros protocolos populares en la literatura en términos de probabilidad de entrega y *overhead*, mientras que el uso de nodos intermedios se reduce significativamente. Además, el análisis multivariante (regresión OLS) permite conocer el impacto del número de nodos sobre diferentes métricas de rendimiento que también refuerzan la conclusión de que los recursos de los nodos son eficientemente usados por la propuesta.

5.4. Viabilidad técnica del perfil virtual en dispositivos móviles

La arquitectura propuesta define el concepto de perfil virtual como un componente individual que permite la especificación de información. Esto permite equipar fácilmente a los nodos de la arquitectura con los recursos necesarios para realizar procesos de enrutamiento con datos contextuales,

5.4. VIABILIDAD TÉCNICA DEL PERFIL VIRTUAL EN DISPOSITIVOS MÓVILES

así como individuales de los propios nodos. Sin embargo, el perfil virtual puede resultar una herramienta muy útil para el almacenamiento de información, incluso fuera de la red oportunista. De esta manera, una potencial aplicación de esta utilidad permite aprovechar la naturaleza individual de los *smartphones* para dotar el perfil virtual de la capacidad para almacenar y gobernar la información personal del usuario.

La propuesta de aplicación permite emplear el teléfono personal como herramienta para almacenar y custodiar los datos individuales del usuario. Este enfoque permite que la información que se emplea en Internet pueda ser consultada en el perfil, bajo la aprobación del propietario. Para ello, el perfil virtual se despliega junto con un PODS, perfil ideado por la iniciativa SOLID que implementa la idea fundamental de descentralización de la información. Como resultado, aplicaciones y empresas no tienen que encargarse de almacenar la información, si no que pueden consultarla directamente al perfil virtual del usuario. Esto se traduce en una mayor agilidad a la hora de crear nuevos usuarios en plataformas, pero también conduce a evitar la duplicidad, redundancia y mercantilización de los datos personales.

La aplicación propone que los *smartphones* se conviertan en el centro de todos nuestros perfiles en Internet. Esto significa que el dispositivo estará al cargo de gestionar las peticiones de datos entrantes, así como satisfacerlas con la información correspondiente. Afortunadamente, las capacidades técnicas de los *smartphones* se han incrementado notablemente durante los últimos años. Sin embargo, los altos requisitos de la propuesta plantean un desafío para los dispositivos, principalmente debido a limitaciones en el consumo de la batería y en el tiempo de respuesta. Además, resulta relevante considerar la naturaleza controvertida del proyecto. Dado que el objetivo se centra en gestionar un significativo conjunto de información personal distribuida a lo largo de Internet, la percepción de los usuarios es crítica para construir una solución fiable. Considerando estos dos puntos, se ha llevado a cabo una evaluación experimental sobre la concepción que los usuarios manifiestan de la propuesta, así como una evaluación técnica del rendimiento. Para este estudio, se ha considerado un PODS de SOLID que almacena un perfil de información personal junto con el histórico de música reproducida e intereses principales (Tabla 5.7).

La evaluación llevada a cabo en el experimento sigue dos dimensiones

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

Denominación Dato
Nombre
Puesto
Nombre Organización
Dirección
Email
Teléfono
Historial de Música Reproducida
Principales Intereses

Tabla 5.7: Información personal almacenada en el PODS

principales: la percepción y la usabilidad de la solución; y el rendimiento técnico de la implementación.

5.4.1. Tests de Usabilidad

La percepción y los sentimientos de los usuarios resultan una variable crítica para la propuesta. Considerando que el principal objetivo es proporcionar una herramienta para gestionar toda la información personal, resulta relevante conocer y estudiar las reacciones de los usuarios. Del mismo modo, es importante considerar las opiniones que el trabajo suscita tras utilizar un prototipo de la herramienta. Para ello, a través de un conjunto de fases, se aplica una metodología basada en *User Testing* [245] que permite recopilar respuestas fiables. Las guías de esta metodología permiten elaborar un cuestionario donde se analiza la percepción y las primeras impresiones de la propuesta tras experimentar su uso. De esta forma, un grupo de usuarios participan y responden dos cuestionarios diferentes. A continuación, se detallan los pasos involucrados en la metodología aplicada.

Como primer paso, se escoge un grupo de 16 usuarios, no relacionados con el proyecto, y se introduce la propuesta de aplicación. El bagaje de los participantes es variado, contando particularmente con seis perfiles técnicos entre los encuestados. De esta forma, se pretende evitar potenciales desviaciones en la opinión de los participantes.

5.4. VIABILIDAD TÉCNICA DEL PERFIL VIRTUAL EN DISPOSITIVOS MÓVILES

A continuación, se somete el grupo al primer test relacionado con la percepción de la idea. Para ello, se abordan cuestiones sobre las políticas de privacidad, la centralización de la información y opiniones, desde una perspectiva neutral. De esta forma, las preguntas propuestas incluyen la percepción de la aplicación, las tendencias actuales sobre la información y el concepto que los usuarios han entendido sobre la explicación. Las respuestas se basan en rangos: cada pregunta (Q) se relaciona con un *topic* y los encuestados deben proporcionar una puntuación (S_p) desde $0 \leq S_p \leq 5$, de acuerdo con la relevancia subjetiva con la que se dota. Adicionalmente, una caja de comentarios adicional permite recoger opiniones y sugerencias. Las preguntas incluidas en la encuesta se muestran en la Tabla 5.8. Como resultado, la Figura 5.23 recopila una media de los resultados obtenidos. Dado que Q_5 no se trata de un campo de puntuación, si no de un parámetro de texto, se consideran como resumen las palabras más recurrentes obtenidas en las respuestas. Adicionalmente, se incluye una pregunta de control para comprobar si alguno de los encuestados responde aleatoriamente. Como resultado, todos los usuarios han respondido satisfactoriamente.

	Q	S_p
Q_1	¿Confías en las actuales políticas de gestión de la información personal de las grandes compañías?	[0,5]
Q_2	¿Te gusta la idea de almacenar todos tus datos personales en tu teléfono?	[0,5]
Q_3	¿Crees los actuales usuarios de Internet estarían dispuesto a adoptar este modelo?	[0,5]
Q_4	¿Crees que este modelo soluciona los principales problemas de la gestión actual de la información personal? (consistencia, duplicidad...)	[0,5]
Q_5	¿Cómo mejorarías la plataforma?	[texto]

Tabla 5.8: Encuesta de percepción del usuario sobre la idea.

La Figura 5.23 muestra las puntuaciones obtenidas en el test de percepción. Los resultados manifiestan un generoso interés de los usuarios sobre la propuesta y sobre el uso del *smartphone* como corazón de la gestión de la información. Al mismo tiempo, los participantes también desconfían acerca de las políticas de gestión de los datos por parte de las compañías (Q_1),

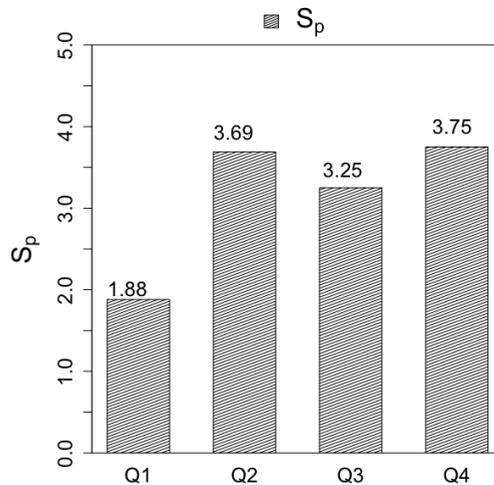


Figura 5.23: Distribución de respuestas (S_p) de las cuestiones (Q_n) sobre la percepción del proyecto.

especialmente en aquellos participantes que no tienen un perfil técnico. Respecto las cuestiones que abordan el concepto del proyecto, los usuarios manifiestan interés por la centralización (Q_2), definiendo una de las dimensiones mejor valoradas. Del mismo modo, los encuestados también creen que el conjunto de usuarios debería aprobar y adoptar la propuesta (Q_3). En el caso del principal objetivo de la aplicación, los usuarios creen que puede plantear una solución para la replicación y las inconsistencias en Internet (Q_4), consolidando el aspecto mejor valorado. Adicionalmente, las respuestas para Q_5 son analizadas considerando la recurrencia de las palabras. Para ello, se han descartado como conceptos comunes aquellos términos que son incluidos en la descripción de la propuesta. Por lo tanto, palabras como “*smartphone*”, que aparece hasta 14 veces en las respuestas, Internet (13), privacidad (11), datos (10) e información (6) se ignoran en el análisis. Como resultado, las palabras que más se repiten y no se consideran comunes son centralización (10), compañías (9), seguridad (7), confianza (6), cambio (6) y música (4). Por lo tanto, los mensajes se centran en ensalzar la relevancia de la idea como una herramienta disruptiva

5.4. VIABILIDAD TÉCNICA DEL PERFIL VIRTUAL EN DISPOSITIVOS MÓVILES

que implica importantes cambios en la gestión de los datos a través de la centralización. Además, la tendencia actual manifiesta cómo existe una concienciación generalizada sobre proporcionar mecanismos de seguridad para garantizar un almacenamiento seguro en el *smartphone*, definiendo esto como uno de los pilares del proyecto. También, existen comentarios que apoyan que las compañías deberían participar en la propuesta, identificando las bondades del trabajo a la hora de ofrecer una mejora potencial en la experiencia de usuario. Al final, algunas contribuciones de los encuestados mencionan utilidades como el *streaming* de música. Considerando los resultados obtenidos en la primera interacción con usuarios, la encuesta permite identificar un significativo interés en la propuesta.

Una vez que el primer paso concluye, los participantes proceden a interactuar con la plataforma. Las tareas que desarrollan se centran principalmente en la experiencia de usuario, con acciones como crear un nuevo PODS e introducir información. Además, los usuarios supervisan peticiones de acceso a la información de aplicaciones externas. De la misma forma que en el paso previo, los encuestados responden un conjunto de preguntas centradas en la experiencia de usuario. De esta manera, los participantes puntúan (S_x) en un rango de $0 \leq S_x \leq 5$ la satisfacción y accesibilidad de la solución. Las preguntas incluidas en la encuesta se muestran en la Tabla 5.9. Como resultado, la Figura 5.24 muestra los resultados medios obtenidos.

Q		S_x
Q_5	Satisfacción en el proceso de introducción de la información en el POD	[0,5]
Q_6	Simplicidad en el proceso de registro	[0,5]
Q_7	Simplicidad a la hora de especificar los parámetros del SOLID POD	[0,5]
Q_8	Campo de comentarios para sugerir cambios	[texto]

Tabla 5.9: Encuesta de percepción del usuario sobre el prototipo.

La Figura 5.24 muestra los resultados obtenidos de la encuesta sobre la experiencia de usuario. En términos globales, las puntuaciones obtenidas denotan que los usuarios han tenido una experiencia favorable, en especial aquellos con bagaje técnico. Para Q_5 , la media de respuestas sitúa la introducción de información con una valoración de 2.69, alrededor de un

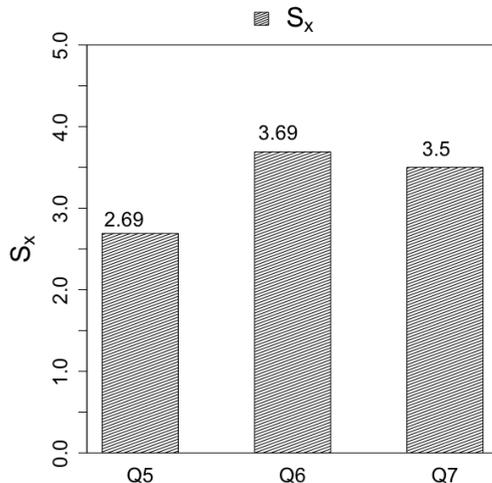


Figura 5.24: Distribución de respuestas (S_x) sobre las preguntas (Q_n) de experiencia de usuario.

punto menos que Q_7 . El parámetro mejor valorado de la encuesta es Q_6 con una valoración de 3.69. Por lo tanto, estos resultados manifiestan una gran aceptación de la propuesta. Los encuestados han enfatizado principalmente la simpleza en el uso de la plataforma, especialmente en los procesos de registro y configuración del POD. Adicionalmente, las propuestas y comentarios en Q_8 han resultado interesantes. De la misma forma que en el análisis de la encuesta previa, las opiniones en el campo de comentarios han sido abordadas considerando las palabras más recurrentes. Así, los conceptos que más veces aparecen han sido interfaz de usuario (11 veces), fácil (10), cómodo (9), batería (8), rendimiento (5) e integración (4). Las palabras repetidas muestran los aspectos más favorables de la prueba de concepto. Los usuarios mencionan el interfaz de usuario y la manera en la que la aplicación resulta sencilla de configurar. También, los participantes han situado la comodidad para gestionar la información como un punto positivo, al igual que el manejo de peticiones entrantes de aplicaciones externas. Del mismo modo, el rendimiento y el consumo de batería han sido dos de los aspectos más recurrentes, resaltando la importancia de proporcionar una buena eficiencia en la ejecución de la plataforma. Como

5.4. VIABILIDAD TÉCNICA DEL PERFIL VIRTUAL EN DISPOSITIVOS MÓVILES

resultado, la implementación de la solución proporciona una experiencia de usuario satisfactoria, con una interfaz fácil de utilizar.

Considerando los resultados obtenidos en los tests de usabilidad, la propuesta satisface los requisitos de interacción y proporciona una solución disruptiva para gestionar los datos personales. Sin embargo, es importante resaltar los requisitos de rendimiento que el prototipo define. Para ello, la siguiente sección analiza el comportamiento técnico de la propuesta, evaluando la batería consumida y el tiempo de respuesta. Finalmente, se expone la discusión de resultados.

5.4.2. Rendimiento Técnico

Una de las principales dimensiones del proyecto es la viabilidad técnica. Considerando que la aplicación propone el uso de los *smartphones* como proveedores de toda la información personal requerida en Internet, la solución debe garantizar un rendimiento óptimo. De esta forma, parámetros como la energía consumida y el tiempo de respuesta resultan variables críticas para analizar. En esta sección, la implementación de SOLID en *smartphones* es evaluada en un contexto de laboratorio donde se simulan peticiones aleatorias para estudiar el impacto en el consumo de la batería del dispositivo, así como determinar el tiempo requerido para obtener un dato en particular del PODS. A continuación, se detalla la especificación del escenario y se discuten los resultados.

5.4.2.1. Configuración del Escenario

Para evaluar el funcionamiento de la plataforma, se lleva a cabo la especificación de un escenario de pruebas. Para ello, se especifican dos contextos diferentes: el laboratorio y los *smartphones*. Cada uno de ellos se encarga de desplegar alguna de las tres entidades involucradas en la solución: aplicaciones externas que realizan peticiones (E_{app}); la API Gateway que enlaza las peticiones con los *smartphones* (G); los *smartphones* que ejecutan Pusher App (P_{app}) y el PODS para almacenar la información (P_{solid}). Considerando esto, se simula un contexto experimental donde la arquitectura se somete a una carga pesada de peticiones. La Figura 5.25 representa gráficamente el proceso.

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

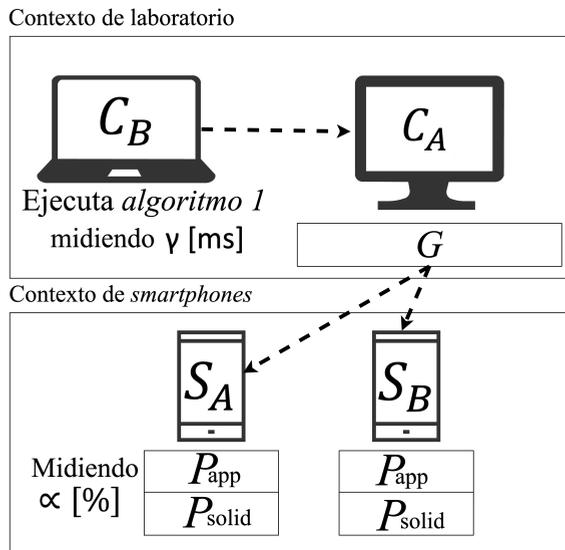


Figura 5.25: Escenario de evaluación.

Las peticiones son generadas en el contexto de laboratorio. Este se compone de dos ordenadores, Equipo A (C_A) y Equipo B (C_B) (Tabla 5.10). El primero se encarga de desplegar la API Gateway (G) mientras que el segundo transmite peticiones a esta entidad, simulando la actividad de aplicaciones externas (E_{app}). C_B ejecuta el Algoritmo 5 para solicitar la información a la API Gateway, que se comunica con los *smartphones*. El contexto del *smartphone* está compuesto por dos dispositivos: *smartphone* A (S_A) y B (S_B) (Tabla 5.11). Ambos dispositivos son sometidos a un uso diario por sus propietarios, mientras ejecutan el SOLID PODS y responde automáticamente a las peticiones generadas por C_B . Como resultado, el escenario propuesto define un contexto experimental donde el rendimiento de la plataforma puede ser eficazmente comprobado. Cada vez que C_B lleva a cabo una petición, se registra el periodo de tiempo transcurrido entre la petición y la respuesta. Del mismo modo, ambos *smartphones* S_A y S_B monitorizan la batería consumida al proporcionar los datos desde el PODS.

El esquema de ejecución propuesto se lleva a cabo durante tres días de

5.4. VIABILIDAD TÉCNICA DEL PERFIL VIRTUAL EN DISPOSITIVOS MÓVILES

Especificaciones	C_A	C_B
Sistema Operativo	Ubuntu 19.10	macOS Catalina 10.1
Memoria RAM	8Gb	16Gb
Procesador	Intel Core i5-3570(3.4GHz)	Intel Core i5-7360U(2.3GHz)

Tabla 5.10: Especificaciones técnicas de los equipos usados durante el experimento (C_A and C_B)

Especificaciones	S_A	S_B
Modelo	LG G5 titan	Xiaomi Mi A2 Lite
Versión de Android	Android 6.0 Marshmello	Android X
Batería (mAh)	2800	4000
Procesador	Snapdragon 820 (2.15 GHz)	Snapdragon 625 (2.0 GHz)

Tabla 5.11: Especificaciones técnicas de los *smartphones* usados en el experimento (S_A and S_B)

manera continuada, siguiendo las instrucciones descritas en el Algoritmo 5. De esta forma, existen dos picos de peticiones programados durante los primeros dos días. Estos eventos pretenden comprobar la capacidad y resiliencia de la plataforma para proporcionar respuesta a un conjunto grande de peticiones, permitiendo analizar su impacto en el tiempo de respuesta y en el consumo de la batería. El número de peticiones llevadas a cabo en el experimento durante una hora oscila entre cero y veinte. Por lo tanto, el tráfico no sigue un patrón fijo y cambia aleatoriamente. Esta idea se corresponde con el objetivo de proporcionar un flujo de mensajes irregular y realista. Como resultado, este comportamiento pretende simular una cantidad de peticiones variable, basada en el número medio de notificaciones que los *smartphones* suelen recibir en un día [246]. Una vez que la ejecución concluye, se obtienen las salidas. La siguiente subsección discute los resultados y aborda las conclusiones.

5.4.2.2. Análisis de Resultados

Los resultados del experimento se obtienen tras tres días de ejecuciones. Existen dos fuentes de resultados: Ordenador B (C_B), que monitoriza el tiempo de respuesta, y *smartphone* A (S_A) y B (S_B), que monitorizan el nivel de batería. Estas dos variables resultan relevantes para determinar el

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

Algorithm 5 Pseudocódigo usado para generar peticiones aleatorias. Ejecutado en C_B

Require: retorna *false* si el tiempo de simulación concluye: $S()$, probabilidad de petición: P , tipo de petición: P_t , retorna *verdadero* si es el momento de emprender peticiones pico: $P()$, obtiene el SOLID DOMAIN del *smartphone*: $SOLID(\textit{smartphone})$, genera un número aleatorio entre $[0.0, 1.0]$ $R()$, espera durante cinco minutos: $W()$, devuelve el tipo de dato a solicitar: $T()$, emprende la petición de un dato en particular a un *smartphone* concreto: $L(S_n, T)$

- 1: $P \leftarrow R()$
 - 2: **if** $P \geq 0,5$ **then**
 - 3: $P_t \leftarrow T()$
 - 4: $L(SOLID(S_A), P_t)$
 - 5: $L(SOLID(S_B), P_t)$ $P() = True$
 - 6: **end if**
 - 7: $W()$ $S() = True$
-

rendimiento de la plataforma, ya que reflejan dimensiones críticas para la propuesta de aplicación. De esta forma, se detalla el consumo de la batería y el tiempo de respuesta medio.

Por un lado, el consumo de batería (α_s [%] con s como el *smartphone* correspondiente) representa el porcentaje de batería consumido por la ejecución de la aplicación. Los *smartphones* ejecutan dos componentes principales: el SOLID PODS y Pusher App. El primer elemento se mantiene a la espera de peticiones por parte de Pusher App que, al mismo tiempo, recibe solicitudes de la API Gateway, empleando para ello Firebase. Por lo tanto, el consumo de energía es una parte importante del proyecto. Considerando que las aplicaciones de Internet precisan de los datos almacenados en el *smartphone*, resulta importante estudiar la disponibilidad del servicio. De cara a obtener resultados realistas, S_A y S_B se han sometido a un uso diario por sus propietarios, con tareas como navegar en Internet, mensajería, reproducción multimedia y geoposicionamiento. El experimento se enfoca en analizar cómo la solución puede integrarse en las rutinas del día a día y abordar la calidad de su integración con el resto de funciones. De esta manera, se descarta la evaluación en un ambiente controlado, enfocando

5.4. VIABILIDAD TÉCNICA DEL PERFIL VIRTUAL EN DISPOSITIVOS MÓVILES

el análisis en los resultados que se dan en un entorno real. Así, se asumen algunas imprecisiones, como la distinción entre el consumo del dispositivo cuando está conectado a una red WiFi y cuando está conectado a una red celular. Para esta tarea, la herramienta *Android Battery Monitoring Tool* [247, 248] ha sido usada. Como resultado, los valores obtenidos se corresponden con un contexto realista.

Por otro lado, el tiempo de respuesta (γ [ms]) representa el tiempo transcurrido entre que una aplicación externa realiza una petición y recibe eventualmente la información. Este parámetro resulta especialmente relevante, ya que la información debe ser proporcionada de una manera rápida a las múltiples aplicaciones que pueden solicitarla. Factores como el uso de la CPU, la memoria disponible y la conexión a Internet pueden afectar a los resultados pero también enriquecer los valores obtenidos. Considerando que la idea es integrar el servicio en el uso del *smartphone*, es interesante estudiar la respuesta de la arquitectura cuando el dispositivo es sometido a un uso real. Una vez que las ejecuciones se completan, los resultados son obtenidos. Así, las Figuras 5.26 y 5.27 muestran las salidas obtenidas.

La Figura 5.26 muestra la evolución de la batería en S_A y S_B durante los tres días de ejecución del experimento. La figura representa tres variables diferentes en función del tiempo de ejecución (T): la evolución de la batería de ambos *smartphones* (α_a and α_b) y el número de solicitudes generadas (M_{gen}). Como puede identificarse, no existe un claro patrón entre M_{gen} y la evolución de la batería (α_a and α_b). Existen dos picos de solicitudes programados en M_{gen} a $T = 11,00$ en el día 1 y 2. Estos eventos se presentan para estudiar un impacto más evidente en la batería. Sin embargo, como puede apreciarse, la batería no es afectada directamente por las peticiones. De esta manera, se puede deducir que el consumo de energía derivado de la actividad del perfil virtual en el dispositivo es bajo. Adicionalmente, la herramienta *Android Battery Monitoring Tool* indica un consumo inferior al 0% en el caso de la aplicación Pusher App, informe que coincide con la trayectoria en el consumo de la batería.

En el caso de γ , la Figura 5.27 muestra los tiempos de espera registrados para satisfacer peticiones externas en función del tiempo de ejecución (T). En este caso, es posible apreciar una relación entre M_{gen} y γ . El tiempo medio de respuesta ronda $\gamma = 2152,25$ [ms] con un número medio de peticiones de $M_{\text{gen}} = 12,87$. Los picos de solicitudes programados cuentan

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

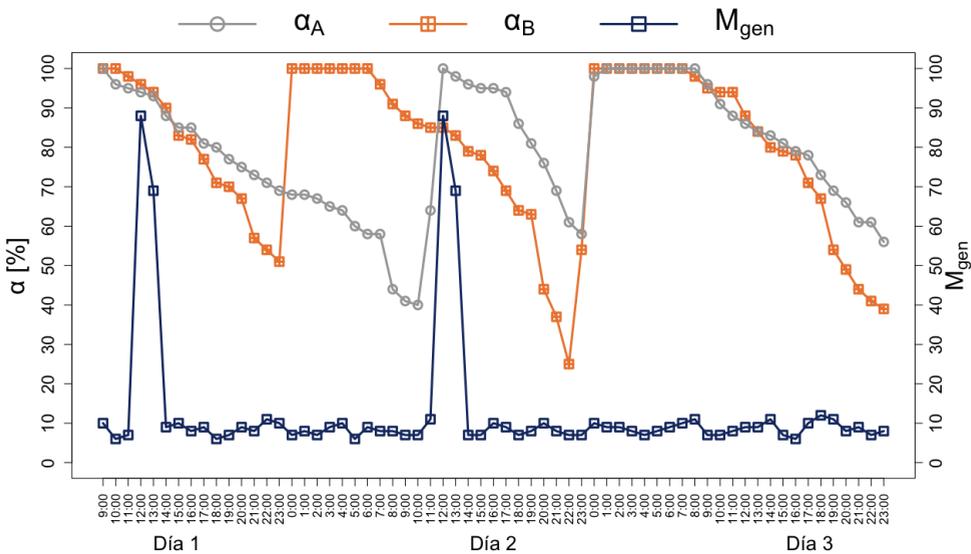


Figura 5.26: Evolución de la batería en el *smartphone* (α) en función del número de mensajes generados (M_{gen}).

con un impacto directo en el tiempo requerido para resolver la petición. Así, γ se incrementa desde los valores medios hasta más de 7000 [ms], evidenciando que la solución resulta sensible a un número alto de peticiones. Además, en el caso del resto de solicitudes, existen valores por encima de un segundo. El tamaño de los mensajes que se transmiten varía entre 582 bytes y 612-1024 bytes, dependiendo de si se trata de una petición o de una respuesta. Por lo tanto, es difícil identificar el tamaño de los mensajes como el cuello de botella. Sin embargo, este retraso puede ser introducido por la API Gateway, que emprende un tiempo de espera para recibir la información desde el *smartphone*. Como resultado, el tiempo requerido para obtener los datos desde el dispositivo puede ser optimizado. No obstante, considerando que el objetivo principal es evaluar la viabilidad técnica, las demoras pueden ser asumibles en este contexto.

El prototipo desarrollado como prueba de concepto de la propuesta proporciona una solución válida para el almacenamiento de la informa-

5.4. VIABILIDAD TÉCNICA DEL PERFIL VIRTUAL EN DISPOSITIVOS MÓVILES

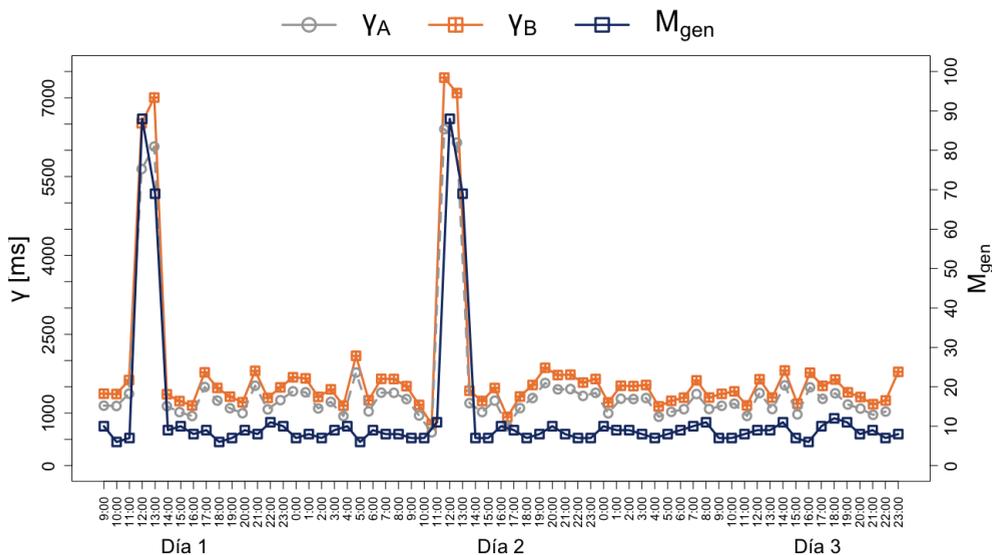


Figura 5.27: Tiempo de respuesta del *smartphone* (γ) en función del número de mensajes generados (M_{gen}).

ción personal en *smartphones*. El trabajo ha sido evaluado para estudiar la viabilidad técnica del proyecto y los resultados son favorables. Las dos principales métricas que se han usado han sido el consumo de energía y el tiempo de respuesta. De esta manera, una vez que las pruebas han concluido, los resultados son favorables. Por otro lado, el despliegue del SOLID PODS y Pusher APP en los *smartphones* no ha demostrado un impacto directo en la batería. De hecho, los resultados obtenidos manifiestan que el consumo ha sido especialmente reducido. Además, los picos programados en el número de peticiones no han afectado especialmente el rendimiento. Sin embargo, el tiempo de respuesta necesario para satisfacer las solicitudes ha demostrado sensibilidad frente a las peticiones concurrentes. A pesar de ello, el tiempo medio requerido para proporcionar información es reducido y satisface los requisitos del servicio.

Considerando las dos dimensiones de la evaluación, la usabilidad y el rendimiento técnico, el prototipo se considera como una primera imple-

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

mentación correcta de la arquitectura. La solución proporciona un acercamiento sólido para estudiar las posibilidades del proyecto en el ámbito. Como resumen, los usuarios involucrados en la evaluación de la herramienta manifiestan un significativo interés por la propuesta, mientras que la evaluación cualitativa muestra su viabilidad técnica. Por lo tanto, el proyecto representa una línea de trabajo prometedora que acerca la gestión de la información a un nuevo paradigma. Finalmente, con el objetivo de definir algunas consideraciones en la evaluación, la siguiente subsección proporciona un conjunto de consideraciones que deben ser tenidos en cuenta a la hora de interpretar los resultados. Finalmente, se proporcionan unas conclusiones sobre la propuesta.

5.4.3. Consideraciones a la validez

En esta sección se abordan las principales consideraciones que deben ser tenidas en cuenta a la hora de interpretar los resultados obtenidos en la evaluación. Para ello, se detallan dos puntos principales: las pruebas realizadas con usuarios y las realizadas con los *smartphones*.

Una de las partes más relevantes en la validación de la aplicación es el test de usabilidad. Estas pruebas han involucrado a un conjunto de investigadores que han proporcionado su visión y opinión sobre la propuesta. Los resultados manifiestan una buena respuesta de los usuarios, que consideran que el sistema resulta una alternativa apropiada para el almacenamiento de la información. Sin embargo, se debe tener en cuenta que 6 de los 16 participantes cuentan con bagaje y un perfil técnico, acostumbrados a lidiar con nuevas soluciones y tecnologías emergentes. En el caso del resto de participantes, no se tratan de perfiles técnicos, por lo que su visión resulta más imparcial a la hora de evaluar la experiencia de usuario.

Por otro lado, la operabilidad de los *smartphones* también implica un conjunto de consideraciones. Los dispositivos que ejecutan el PODS pueden perder la conectividad, así como agotar su batería, por lo que las peticiones que se realizan durante el periodo de inactividad pueden perderse. Sin embargo, es importante considerar los inherentes patrones de uso de los *smartphones* y los hábitos de los usuarios, ya que los dispositivos móviles suelen permanecer usualmente conectados y encendidos. De acuerdo a estudios como [249, 250, 251] la mayoría de los usuarios mantienen sus

5.4. VIABILIDAD TÉCNICA DEL PERFIL VIRTUAL EN DISPOSITIVOS MÓVILES

dispositivos con la batería activa durante todo el día, al igual que conectados a Internet. Por lo tanto, se considera que la propuesta puede resultar operativa en la mayoría de las circunstancias.

5.4.4. Conclusiones

Los datos personales se han convertido en una valorada moneda para las compañías de Internet. La personalización de los servicios y la publicidad son ya elementos indispensables para las empresas, que encuentran en este modelo de negocio una importante fuente de ingresos. Como resultado, las compañías mantienen la información que recopilan de una manera opaca y privada, careciendo de un estándar y conduciendo a la replicación e inconsistencias entre plataformas. En respuesta a este escenario, la iniciativa SOLID propone una filosofía alternativa para el almacenamiento que centraliza los datos en entidades denominadas PODS que controlan los accesos externos a la información. En este marco, se propone la utilización del perfil virtual, componente integrado en la arquitectura que se describe en esta tesis, para desplegar SOLID PODS en *smartphones*. Así, la información se almacena en el dispositivo, actuando como un proveedor de datos a las peticiones externas. De esta manera, los usuarios pueden fácilmente autorizar o denegar el acceso al PODS.

Con el objetivo de estudiar las posibilidades del trabajo y su viabilidad técnica, se implementa un prototipo de la solución. Así, un grupo de participantes son entrevistados sobre su opinión del proyecto, obteniendo una respuesta positiva generalizada. Los usuarios consideran el modelo como una idea apropiada frente al problema del descontrol de la información, así como del almacenamiento masivo de los datos personales. Además, considerando que la solución sitúa al *smartphone* como el centro de la implementación, resulta relevante estudiar su viabilidad técnica. Para ello, se realiza una evaluación de la implementación donde se estudia el impacto en el consumo de la batería y en el tiempo de respuesta. Como resultado, las pruebas experimentales manifiestan un buen rendimiento del prototipo en ambos parámetros.

Considerando las evaluaciones, la utilización del perfil virtual para acomodar SOLID PODS y almacenar información resulta válida. La posibilidad que la herramienta proporciona para mantener todos los datos perso-

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS DE LA ARQUITECTURA

nales de Internet en un único dispositivo mejora el control del usuario sobre su propia información. De esta manera, tanto usuarios como empresas se benefician de este modelo. Por un lado, el usuario cuenta con un conocimiento fiable sobre las entidades que acceden a sus datos, resultando posible rechazar peticiones y manteniendo una trazabilidad de la información consumida. Por otro lado, las empresas obtienen información actualizada y consistente, de manera que problemáticas como la replicación son resueltas. Como resultado, la propuesta define un nuevo paradigma para el gobierno de los datos en Internet, proponiendo una nueva manera de entender la privacidad y beneficiando tanto a usuarios como empresas.

5.4. VIABILIDAD TÉCNICA DEL PERFIL VIRTUAL EN DISPOSITIVOS MÓVILES

Capítulo 6

Conclusión y Trabajos Futuros

“Construir el futuro y mantener vivo el pasado son la misma cosa”

Metal Gear Solid II (2001)
Dir. Hideo Kojima

Internet se ha convertido en uno de los mayores fenómenos de la historia moderna, conduciendo a una nueva forma de entender la economía, los cuidados médicos, la sociedad y la cultura. Al mismo tiempo, también ha supuesto cambios en la manera en la que se relacionan los usuarios con los dispositivos y con su entorno. Transversal a este contexto, el denominado IoT ha planteado un nuevo paradigma para los sistemas distribuidos. La posibilidad de dotar soluciones tecnológicas con sensores y actuadores autónomos e independientes ha traído un gran número de nuevas aplicaciones y servicios, utilizando Internet como elemento coordinador. El notable crecimiento, tanto de las aplicaciones como de los propios dispositivos involucrados en las soluciones, ha planteado nuevos desafíos para garantizar el gobierno y la calidad de servicio en el entorno IoT. Como resultado, estas necesidades han motivado la especificación de nuevos paradigmas que buscan optimizar la comunicación y rendimiento de los dispositivos, mientras

aprovechan la capacidad de operación de los elementos que intervienen. Este es el caso particular del modelo Edge-Fog-Cloud, el cual distribuye los actores de un sistema en sus tres capas. En la primera, denominada Edge, se incluyen los dispositivos encargados de la generación y recepción de la información, reuniendo a dispositivos finales como sensores, actuadores, *smartphones* u ordenadores. La capa Fog se compone de elementos intermedios que son capaces de entablar comunicación directa con entidades remotas a través de Internet. Finalmente, los componentes Cloud son aquellos que llevan a cabo procesamientos remotos y almacenamiento de la información, utilizando Internet como mecanismo de coordinación con el resto de elementos. El objetivo de este modelo se centra en distribuir las tareas de cómputo para reducir la carga de trabajo que suelen afrontar los procesos en la nube, ofreciendo así una mejoría en el funcionamiento global del sistema. El paradigma Edge-Fog-Cloud, además de permitir el despliegue de aplicaciones, puede adaptarse para mitigar uno de los principales problemas de los sistemas distribuidos: la dependencia de Internet. Considerando esto, el presente trabajo de tesis propone una arquitectura Edge-Fog-Cloud basada en redes oportunistas para permitir el despliegue sostenible de aplicaciones en entornos sin conexión, concretamente en zonas rurales aisladas.

La arquitectura propuesta se centra en el uso de redes oportunistas para mitigar las consecuencias de la falta de acceso a Internet en el despliegue de sistemas distribuidos en zonas rurales aisladas. De esta forma, el trabajo propone una distribución de las capas del modelo Edge-Fog-Cloud a un enfoque oportunista, permitiendo así acercar la transmisión de información a través de la autonomía y desplazamientos de los nodos. Como resultado, se identifican nuevas funcionalidades para las capas.

Como punto de partida, la capa Edge de la arquitectura se conforma por los sensores, actuadores y equipos informáticos que actúan como dispositivos finales en las aplicaciones. Dentro de este conjunto, los componentes son integrados en una red oportunista que recurre a la comunicación asíncrona de sus nodos para transmitir información entre dispositivos alcanzables mediante una tecnología de rango limitado como *Bluetooth* o WiFi. De esta forma, los nodos pueden actuar como portadores de la información, alcanzando eventualmente el destino y permitiendo la transmisión entre equipos alejados físicamente. Para ello, se aplica la lógica de comunicación *store-*

carry-forward, filosofía que define el proceso en el que se fundamentan las redes oportunistas: i) un nodo genera información para transmitirla a un destino. ii) Utilizando una tecnología de comunicación de rango limitado, el nodo comprueba si existen potenciales conexiones. En el caso de que no, la información se guarda de manera persistente. Finalmente, iii) cuando se detecta una conexión para retransmitir la información, los mensajes son enviados al nuevo nodo, siguiendo de nuevo el proceso. Esta mecánica puede variar dependiendo del algoritmo de encaminamiento que se aplique, de manera que estos elementos resultan componentes sustanciales de la red.

Este modelo de comunicación oportunista es aplicado en la arquitectura para permitir que conjuntos de dispositivos coordinados actúen como nodos emisores en la red, recurriendo a nodos intermedios para hacer llegar la información a la capa Fog. Los nodos intermedios pueden ser de múltiples tipos, definiendo así las propiedades heterogéneas de la red: *smartphones*, vehículos o dispositivos fijos denominados *throwboxes*. Con el fin de dotar la red con protocolos de encaminamiento que aprovechen las características de los nodos y acerquen su funcionamiento a la realidad de los escenarios rurales aislados, se proponen dos algoritmos de enrutamiento principales: la familia de protocolos denominada SACAR y RSB. Estos componentes se centran en proporcionar medidas favorables para comunicar los nodos origen con los nodos destino, aquellos que con capaces de procesar la información, así como comunicarla a Internet. Estos elementos se agrupan en la capa Fog.

La capa Fog comprende los dispositivos que tienen acceso a Internet dentro de la arquitectura. De esta manera, resultan fundamentales para la correcta comunicación de las aplicaciones distribuidas. Por ello, los nodos Fog actúan como destinos de la red oportunista, recibiendo la información que los nodos intermedios portan. Del mismo modo, estas capacidades particulares resultan favorables para que puedan desempeñar procesamientos particulares sobre la información que reciben. Como resultado, cuando un nuevo dato es recibido, este puede ser finalmente transmitido a Internet, es decir, a las instancias Cloud que se encarguen de procesarlo o almacenarlo.

La capa Cloud conforma los componentes desplegados en servidores e instancias remotas que reciben la información generada por los dispositivos Edge que carecen de conexión directa a Internet. Estos elementos, aprovechando la disponibilidad de recursos y el acceso pleno a Internet, son

apropiados para desarrollar tareas de procesamiento pesadas, así como encargarse del almacenamiento de la información. Como resultado, esta capa conforma el funcionamiento íntegro de la arquitectura, permitiendo así el despliegue y funcionamiento de aplicaciones distribuidas en entornos donde la conexión a Internet no es posible. Con el objetivo de explorar y analizar las posibilidades de la solución, el trabajo propone un conjunto de contextos de aplicación que precisamente representan potenciales utilidades de la plataforma.

La arquitectura ha sido sometida a un conjunto de escenarios que exploran las posibilidades de aplicación de la propuesta. Para ello, se han propuesto diferentes aplicaciones y escenarios que satisfacen necesidades identificadas en las zonas rurales aisladas. Como resultado, se emprende un análisis del rendimiento de la solución, evaluando la calidad de servicio, la sostenibilidad y la viabilidad de arquitectura. De esta forma, las aplicaciones que se han estudiado abordan cuestiones clave como la detección de emergencias en adultos mayores que residen solos, la sensorización de industrias locales, la detección de la soledad en personas mayores y la ayuda en la gestión de las tomas de medicamentos. Del mismo modo, aprovechando las posibilidades de la herramienta, se definen dos casos de estudio adicionales que evalúan el papel de la arquitectura para la adaptación del contexto en entornos inteligentes, y el uso del teléfono móvil como almacén de la información personal en Internet. Todas estas propuestas han sido definidas sobre la arquitectura, evaluando el rendimiento que ofrece la solución.

Con el objetivo de estudiar con detalle el rendimiento y la sostenibilidad de la arquitectura propuesta, se han llevado a cabo un conjunto de simulaciones que representan casos de uso sobre escenarios realistas. Para ello, se ha evaluado la calidad de servicio de los algoritmos de encaminamiento SACAR y RSB, comparando las salidas con alternativas del estado del arte. Como resultado, ambos algoritmos han demostrado un rendimiento superior a las alternativas, especialmente en probabilidad de entrega. Del mismo modo, los valores de latencia, *overhead* y número de saltos resultan asumibles y apropiados para los casos de uso. Por otro lado, el consumo de energía se ha tenido en cuenta, analizando los requisitos de batería de los nodos y evaluando el rendimiento final. Como resultado, se ha demostrado la viabilidad de la propuesta y la sostenibilidad de los algoritmos.

Considerando los resultados globales del trabajo de tesis, se enumeran

las contribuciones definidas en el Capítulo 1, detallando los avances que se asocian con cada una.

1. **C1.** Definición y simulación de una arquitectura de comunicación oportunista basada en el modelo Edge-Fog-Cloud. El Capítulo 3 describe la propuesta principal de la tesis con la que se pretende dar respuesta a la necesidad de arquitecturas de comunicación para entornos desconectados. Para ello, se propone un modelo fundamentado en Edge-Fog-Cloud, aplicando comunicación oportunista para el enlace de la primera capa con la segunda. De esta forma, es posible adaptar el comportamiento de aplicaciones distribuidas a una dinámica oportunista, permitiendo su potencial aplicación en entornos rurales. Esta idea se explora con detalle en las aplicaciones propuestas en el Capítulo 4, donde se ponen en valor algunas soluciones aplicables al marco rural, así como en entornos inteligentes, a través de la arquitectura. Por último, la viabilidad y el rendimiento de las propuestas son analizadas en el Capítulo 5.
2. **C2.** Establecer procesos de comunicación en entornos donde el acceso a Internet resulta intermitente o inaccesible. La arquitectura propuesta fundamenta sus mecánicas de comunicación en redes oportunistas, permitiendo así mitigar las potenciales limitaciones de la falta de infraestructuras de comunicación, así como optimizando las potenciales interacciones entre los dispositivos físicos cercanos. Este contenido es particularmente desarrollado en los Capítulos 2 y 3, los cuales analizan los fundamentos de las redes tolerantes y justifican el papel que desempeñan en la solución, respectivamente.
3. **C3.** La propuesta de arquitectura de comunicación se fundamenta en la aplicación sostenible de redes oportunistas para proporcionar conexión entre dispositivos. Debido a la propia naturaleza de las redes oportunistas, la gestión de la energía y de los recursos de los nodos resulta una tarea fundamental para el funcionamiento de la red. De esta manera, la arquitectura propuesta emplea elementos fijos en la infraestructura de comunicación que buscan proporcionar puntos de encuentro de información en lugares remotos. Para ello, estos dispositivos son alimentados mediante placas solares y baterías individuales.

Este concepto está descrito en el Capítulo 3, donde se detallan las necesidades de estos equipos. Posteriormente, el Capítulo 5 analiza un modelo de consumo aplicado a un caso de uso realista donde se evalúa la viabilidad positiva de la propuesta y la sostenibilidad de la arquitectura.

4. **C4.** La arquitectura de comunicación aplica un conjunto de algoritmos de encaminamiento que permiten transmitir de una forma óptima la información entre las diferentes capas de las aplicaciones distribuidas. El proceso de enrutamiento juega un papel fundamental en la arquitectura propuesta. De esta forma, el trabajo describe un conjunto de algoritmos de encaminamiento que buscan proporcionar unas métricas de calidad de servicio óptimas, así como un rendimiento general aplicable en entornos realistas. Así, el Capítulo 3 describe con detalle los protocolos planteados, exponiendo su funcionamiento y analizando los fundamentos detrás de cada uno. Posteriormente, el Capítulo 5 estudia el rendimiento de los algoritmos propuestos en diferentes escenarios realistas en los que se emplea la arquitectura para desplegar aplicaciones distribuidas. Los valores ofrecidos por los algoritmos son comparados con los resultados obtenidos por protocolos alternativos del estado del arte. Como resultado, la comparativa permite identificar una clara mejoría de la propuesta sobre las alternativas, particularmente en la probabilidad de entrega. Del mismo modo, se logran valores óptimos de latencia, *overhead* y número de saltos.
5. **C5.** La arquitectura es empleada para evaluar el despliegue de diferentes aplicaciones distribuidas tanto en contextos desconectados como en entornos con acceso a Internet. Con el objetivo de identificar el conjunto de funcionalidades que aportan un mayor valor en contextos aislados y en entornos inteligentes, los Capítulos 1 y 2 resaltan las principales problemáticas de las zonas rurales, así como los principales desafíos de las aplicaciones distribuidas. Como resultado, se traza un conjunto de potenciales soluciones tecnológicas basadas en la arquitectura. Para ello, el Capítulo 4 describe diferentes servicios desplegados en la arquitectura que buscan responder carencias particulares. Para ello, cada aplicación es analizada y justificada, compa-

rando la aportación con contribuciones similares del estado del arte. Finalmente, se relaciona la propuesta con la arquitectura, analizando en el Capítulo 5 los resultados que ofrece en términos de calidad de servicio. Al mismo tiempo, el rendimiento ofrecido es comparado con protocolos de comunicación de la literatura, alcanzando resultados notablemente óptimos.

6. **C6.** Definición de un perfil virtual para los nodos. Esta idea se explora profundamente en la arquitectura propuesta (Capítulo 3) a través del concepto de perfil virtual. Este componente de la arquitectura permite la especificación de información individual en los nodos, facilitando la gestión de los datos contextuales involucrados en los procesos de encaminamiento. Aprovechando este concepto, el Capítulo 4 estudia la potencial utilización del perfil virtual como almacén centralizado de los datos personales de los usuarios de aplicaciones de Internet. Como resultado, se demuestra su viabilidad y rendimiento en un escenario de prueba.

En definitiva, las contribuciones de la presente tesis se alinean satisfactoriamente con los objetivos planteados a raíz de las necesidades identificadas. De esta manera, se considera que los avances justifican las propuestas definidas y suponen un primer paso firme en una línea de trabajo con múltiples dimensiones y vertientes. Con el objetivo de detallar los potenciales trabajos futuros, el siguiente apartado incluye las principales contribuciones que proceden al desarrollo de esta tesis.

6.1. Trabajos futuros

El presente trabajo de tesis define los fundamentos de una arquitectura de comunicación compleja fundamentada en las redes oportunistas que permite el despliegue de aplicaciones distribuidas. Las contribuciones alcanzadas por esta tesis permiten identificar las potenciales posibilidades de la plataforma en un entorno físico y real. De esta manera, se identifica una línea de trabajos futuros enfocada en trasladar estos avances a una implementación física íntegra de la arquitectura en entornos aislados reales. Para ello, disciplinas como la inteligencia artificial, IoT, algoritmos

de encaminamiento inteligentes, mecanismos de recompensa para los nodos y la computación móvil conforman las principales ramas involucradas. De esta manera, los trabajos futuros se estructuran en tres fases diferentes: 1) especificación de un *core* avanzado de enrutamiento para los nodos, 2) definición de políticas de recompensa a los nodos e 3) implementación de la arquitectura en dispositivos físicos.

- **1) Core avanzado de enrutamiento para los nodos.** Se trata de la primera fase futura de los trabajos que continúan las labores de la tesis. Las tareas comprendidas en este grupo se enfocan en proporcionar a los nodos con los mecanismos necesarios para emprender procesos de encaminamiento complejos. Estas soluciones estudiarán la aplicación de inteligencia artificial en la decisión de los nodos intermedios, recurriendo a aprendizaje supervisado y no supervisado. Para ello, se plantea la inclusión de un nuevo *core*, conjunto de recursos adicionales que equipan el perfil virtual para permitir la ejecución y actualización de modelos de predicción preentrenados. Como resultado, se persigue alcanzar un mejor rendimiento global en las métricas de calidad de servicio, reduciendo la latencia e incrementando la probabilidad de entrega de la arquitectura.
- **2) Definición de políticas de recompensa a los nodos.** Una de las principales necesidades en las redes oportunistas recae en la participación altruista de dispositivos para emprender las comunicaciones. Esto implica la participación voluntaria de actores que desempeñan el rol de nodos, poniendo a disposición de la red su cómputo y energía individual. De esta manera, resulta relevante estudiar mecanismos de gratificación que recompensen a los dispositivos su participación dentro de la red. Como resultado, se fomenta la contribución en la arquitectura, persiguiendo escalar la solución como parte del plan de mejora de rendimiento.
- **3) Implementación de la arquitectura en dispositivos físicos.** Como paso final de la línea de investigación, se propone culminar los avances en materia de rendimiento y comunicación de la arquitectura en una implementación física de la solución. De esta manera, disciplinas como el IoT y computación móvil se consideran para investigar

el potencial despliegue de la solución en un entorno físico real. Como resultado, sería posible acercar los avances logrados en los primeros pasos de la investigación a un plano práctico en el que los beneficios directos de su aplicación resultarían positivos tanto para entornos aislados como para entornos inteligentes.

Considerando la línea de investigación detallada, el presente trabajo de tesis consolida los primeros pasos firmes de un conjunto de trabajos que suponen un acercamiento sólido, viable y prometedor de las redes oportunistas a los entornos aislados. De esta manera, se abre una nueva ambiciosa perspectiva sobre el papel de las tecnologías móviles en las comunicaciones actuales, así como las posibilidades de los sistemas distribuidos, autónomos y autosostenibles.

Referencias

- [1] “Cobertura de banda ancha en españa en el año 2022.” https://avancedigital.mineco.gob.es/banda-ancha/cobertura/Documents/Informe_Cobertura_BA_2022.pdf, 2023. Accessed: 2023-06-19.
- [2] “Digital 2023: Global overview report.” <https://datareportal.com/reports/digital-2023-global-overview-report>. Accessed: 2023-02-02.
- [3] K. Rose, S. Eldridge, and L. Chapin, “The internet of things: An overview,” *The internet society (ISOC)*, vol. 80, pp. 1–50, 2015.
- [4] A. A. Alli and M. M. Alam, “The fog cloud of things: A survey on concepts, architecture, standards, tools, and applications,” *Internet of Things*, vol. 9, p. 100177, 2020.
- [5] P. Gandotra, R. K. Jha, and S. Jain, “A survey on device-to-device (d2d) communication: Architecture and security issues,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 78, pp. 9–29, 2017.
- [6] J. Valentín-Sívico, C. Canfield, S. A. Low, and C. Gollnick, “Evaluating the impact of broadband access and internet use in a small underserved rural community,” *Telecommunications Policy*, vol. 47, no. 4, p. 102499, 2023.
- [7] W. E. Zahnd, N. Bell, and A. E. Larson, “Geographic, racial/ethnic, and socioeconomic inequities in broadband access,” *The Journal of Rural Health*, vol. 38, no. 3, pp. 519–526, 2022.

-
- [8] M. Alloza, V. González-Díez, E. Moral-Benito, P. Tello-Casas, *et al.*, “El acceso a servicios en la España rural,” *Banco de España. Documentos Ocasionales*, pp. 25–33, 2021.
- [9] C. Handforth, H. Croxson, and G. Cruz, “Closing the coverage gap: How innovation can drive rural connectivity,” *GSMA Connected Society, Tech. Rep.*, 2019.
- [10] C. Boldrini, K. Lee, M. Önen, J. Ott, and E. Pagani, “Opportunistic networks,” *Comput. Commun.*, vol. 48, no. 14, pp. 1–4, 2014.
- [11] A. González-Benito, B. Gutiérrez-de Rozas, and A. Otero-Mayer, “La brecha digital como factor de exclusión social: Situación actual en España,” *Cuestiones Pedagógicas. Revista de Ciencias de la Educación*, vol. 2, no. 31, pp. 105–130, 2022.
- [12] J. F. F. i Gascón and F. D. Fábregas, “Tendencias y fenómenos tecnológicos: Insights como técnica para aprender del pasado. telecomunicaciones en España 1995-2006,” *Enl@ ce: Revista Venezolana de Información, Tecnología y Conocimiento*, vol. 7, no. 1, pp. 97–119, 2010.
- [13] “Digital 2022: Digital adoption doubled over the past decade.” <https://datareportal.com/reports/digital-2022-digital-adoption-doubled-over-the-past-decade>. Accessed: 2023-02-02.
- [14] S. Greenstein, “The basic economics of internet infrastructure,” *Journal of Economic Perspectives*, vol. 34, no. 2, pp. 192–214, 2020.
- [15] C. G. Reddick, R. Enriquez, R. J. Harris, and B. Sharma, “Determinants of broadband access and affordability: An analysis of a community survey on the digital divide,” *Cities*, vol. 106, p. 102904, 2020.
- [16] A. C. Y. Hao, C. H. Lai, H. T. Su, Y. L. Then, F. S. Tay, P. H. H. Then, and N. L. C. Yi, “Cost estimation methods for internet infrastructure deployment in rural Sarawak: a review,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 19, no. 3, pp. 1375–1383, 2020.

REFERENCIAS

- [17] M. González-Leonardo, N. Newsham, and F. Rowe, “Understanding population decline trajectories in spain using sequence analysis,” *Geographical Analysis*, 2023.
- [18] J. L. de Espinosa, “La españa vaciada: una nueva geografía,” *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, no. CLVIII, pp. 9–26, 2022.
- [19] I. Pavez, T. Correa, and J. Contreras, “Meanings of (dis) connection: Exploring non-users in isolated rural communities with internet access infrastructure,” *Poetics*, vol. 63, pp. 11–21, 2017.
- [20] L. Alfonso Hortelano Mínguez and J. Mansvelt Beck, “Is heritage tourism a panacea for rural decline? a comparative study of the camino de santiago and the canal de castilla in spain,” *Journal of Heritage Tourism*, pp. 1–19, 2023.
- [21] E. N. Sadjadi and R. Fernández, “Challenges and opportunities of agriculture digitalization in spain,” *Agronomy*, vol. 13, no. 1, p. 259, 2023.
- [22] L. E. en Red, “Un perfil de las personas mayores en españa,” *Informes. Envejecimiento en Red*, vol. 29, 2022.
- [23] M. Nandan, S. Mitra, A. Parai, R. Jain, M. Agrawal, and U. K. Singh, “Telemedicine (e-health, m-health): Requirements, challenges and applications,” *Designing Intelligent Healthcare Systems, Products, and Services Using Disruptive Technologies and Health Informatics*, pp. 1–25, 2023.
- [24] H. Kaur and S. K. Pahuja, “A comparative review of available systems for e-health monitoring,” *Productivity with Health, Safety, and Environment: Select Proceedings of HWWE 2019*, pp. 173–183, 2022.
- [25] S. Monge, P. L. Zamalloa, M. J. S. Moros, O. P. Olaso, L. G. San Miguel, C. Varela, S. R. Ariza, M. C. V. Torres, M. d. C. O. Lucerón, P. G. Yuste, *et al.*, “Lifting covid-19 mitigation measures in spain (may–june 2020),” *Enfermedades infecciosas y microbiología clínica (English ed.)*, vol. 41, no. 1, pp. 11–17, 2023.

-
- [26] M. González-Leonardo, A. López-Gay, N. Newsham, J. Recaño, and F. Rowe, “Understanding patterns of internal migration during the covid-19 pandemic in Spain,” *Population, Space and Place*, vol. 28, no. 6, p. e2578, 2022.
- [27] M. González-Leonardo, F. Rowe, and A. Fresolone-Caparrós, “Rural revival? the rise in internal migration to rural areas during the covid-19 pandemic. who moved and where?,” *Journal of Rural Studies*, vol. 96, pp. 332–342, 2022.
- [28] L. A. Escudero Gómez, J. M. Martínez Navarro, and J. A. García González, “La segunda ola de la España vaciada: la despoblación de las ciudades medias en el siglo XXI,” *La segunda ola de la España vaciada: la despoblación de las ciudades medias en el siglo XXI*, pp. 43–69, 2022.
- [29] J. Wu and I. Stojmenovic, “Ad hoc networks,” *Computer*, vol. 37, no. 2, pp. 29–31, 2004.
- [30] N. Fernando, S. W. Loke, I. Avazpour, F.-F. Chen, A. B. Abkenar, and A. Ibrahim, “Opportunistic fog for IoT: Challenges and opportunities,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8897–8910, 2019.
- [31] A. Verma, Savita, and S. Kumar, “Routing protocols in delay tolerant networks: Comparative and empirical analysis,” *Wireless Personal Communications*, vol. 118, pp. 551–574, 2021.
- [32] H. Shahin, “A review of routing protocols for mobile social networks,” *International Journal of Intelligent Computing and Information Sciences*, vol. 22, no. 2, pp. 25–34, 2022.
- [33] R. Dalal, M. Khari, J. P. Anzola, V. García Díaz, *et al.*, “Proliferation of opportunistic routing: a systematic jour,” *IEEE access*, 2022.
- [34] M. Jesús-Azabal, J. Berrocal, V. N. Soares, J. García-Alonso, and J. Galán-Jiménez, “A self-sustainable opportunistic solution for emergency detection in ageing people living in rural areas,” *Wireless Networks*, pp. 1–18, 2023.

- [35] M. Jesús-Azabal, J. García-Alonso, V. N. Soares, and J. Galán-Jiménez, “Improving delivery probability in mobile opportunistic networks with social-based routing,” *Electronics*, vol. 11, no. 13, p. 2084, 2022.
- [36] M. Jesús-Azabal, J. L. Herrera, S. Laso, and J. Galán-Jiménez, “Oppnets and rural areas: an opportunistic solution for remote communications,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1–11, 2021.
- [37] M. Jesús-Azabal, J. Berrocal, L. M. Juarez, J. Galán-Jiménez, and J. Garcia-Alonso, “Detectando la soledad en ancianos de zonas rurales,” *Jornadas de Ciencia e Ingeniería de Servicios (JCIS) 2021*, 2021.
- [38] M. Jesús-Azabal, J. García-Alonso, and J. Galán-Jiménez, “Communication in isolated rural areas: A comprehensive review of the alternatives to the internet,” in *Gerontechnology V: Contributions to the Fifth International Workshop on Gerontechnology, IWoG 2022, November 17–18, 2022, Évora, Portugal, and Cáceres, Spain*, pp. 11–21, Springer, 2023.
- [39] M. Jesús-Azabal, J. Berrocal-Olmeda, J. García-Alonso, and J. Galán-Jiménez, “A self-sustainable dtn solution for isolation monitoring in remote areas,” in *Gerontechnology III: Contributions to the Third International Workshop on Gerontechnology, IWoG 2020, October 5-6, 2020, Évora, Portugal*, pp. 57–68, Springer, 2021.
- [40] M. Jesús-Azabal, J. Rojo, E. Moguel, D. Flores-Martin, J. Berrocal, J. García-Alonso, and J. M. Murillo, “Voice assistant to remind pharmacologic treatment in elders,” in *Gerontechnology: Second International Workshop, IWoG 2019, Cáceres, Spain, September 4–5, 2019, Revised Selected Papers 2*, pp. 123–133, Springer, 2020.
- [41] “Electronic system assisted by voice for pharmacological management and medical appointments.” <https://consultas2.oepm.es/InvenesWeb/detalle?referencia=U202230195>. Accessed: 2023-06-14.

-
- [42] J. Galán-Jiménez, J. Berrocal, J. Garcia-Alonso, and M. J. Azabal, “A novel routing scheme for creating opportunistic context-virtual networks in iot scenarios,” *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1875, 2019.
- [43] D. Conde-Caballero, B. Rivero-Jiménez, C. Cipriano-Crespo, M. Jesus-Azabal, J. Garcia-Alonso, and L. Mariano-Juárez, “Treatment adherence in chronic conditions during ageing: uses, functionalities, and cultural adaptation of the assistant on care and health offline (acho) in rural areas,” *Journal of Personalized Medicine*, vol. 11, no. 3, p. 173, 2021.
- [44] E. Moguel, M. J. Azabal, D. Flores-Martin, J. Berrocal, J. Garcia-Alonso, and J. M. Murillo, “Asistente de voz para el recordatorio de tratamiento farmacológico,” *Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos (JISBD 2019)*, 2019.
- [45] M. Jesús-Azabal, J. A. Medina-Rodríguez, J. Durán-García, and D. García-Pérez, “Remembranza pills: Using alexa to remind the daily medicine doses to elderly,” in *Gerontechnology: Second International Workshop, IWoG 2019, Cáceres, Spain, September 4–5, 2019, Revised Selected Papers 2*, pp. 151–159, Springer, 2020.
- [46] A. V. Sambra, E. Mansour, S. Hawke, M. Zereba, N. Greco, A. Ghanem, D. Zagidulin, A. Aboulnaga, and T. Berners-Lee, “Solid: A platform for decentralized social applications based on linked data,” *MIT CSAIL & Qatar Computing Research Institute, Tech. Rep.*, 2016.
- [47] M. Jesús-Azabal, E. Moguel, S. Laso, J. M. Murillo, J. Galán-Jiménez, and J. García-Alonso, “Pushed solid: deploying solid in smartphones,” *Mobile Information Systems*, vol. 2021, pp. 1–13, 2021.
- [48] M. Jesús-Azabal, J. Berrocal, S. Laso, J. M. Murillo, and J. Garcia-Alonso, “Solid and peaaS: Your phone as a store for personal data,” in *Current Trends in Web Engineering: ICWE 2020 International Workshops, KDWEB, Sem4Tra, and WoT4H, Helsinki, Finland, June 9–12, 2020, Revised Selected Papers 20*, pp. 5–10, Springer, 2020.

- [49] M. Jesús Azabal, J. L. Herrera, S. Laso, and J. Galán-Jiménez, “Opp-nets and rural areas: An opportunistic solution for remote communications,” *Jornadas de Ingeniería Telemática 2021 (JITEL)*, 2021.
- [50] Ł. Szoszkiewicz *et al.*, “Internet access as a new human right? state of the art on the threshold of 2020,” *Przegląd Prawniczy Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza*, no. 8, pp. 49–62, 2018.
- [51] I. Longoria, R. Bustamante-Bello, M. Ramírez-Montoya, and A. Molina, “Systematic mapping of digital gap and gender, age, ethnicity, or disability. sustainability 2022, 14, 1297,” 2022.
- [52] S. Kemp, “Digital 2023: Global overview report - datareportal – global digital insights,” Feb 2023.
- [53] S. Kemp, “Digital 2023: Global overview report - datareportal – global digital insights,” Feb 2023.
- [54] Sherpa, “Rural observatory: What you need to know on rural trends and data in europe,” Dec 2022.
- [55] R. Wood, A. Killeen, and J. Dayan, *State of Digital Communications 2023*. ETNO: European Telecommunications Network Operators’ Association, 2023.
- [56] A. Slekys, “Broadband teledensity,” *Annual Review of Broadband Communications*, p. 159, 2005.
- [57] A. Ferrari, M. Bacco, K. Gaber, A. Jedlitschka, S. Hess, J. Kaipainen, P. Koltsida, E. Toli, and G. Brunori, “Drivers, barriers and impacts of digitalisation in rural areas from the viewpoint of experts,” *Information and Software Technology*, vol. 145, p. 106816, 2022.
- [58] M. Mahdilo, A. E. Andargoli, M. Toloo, C. Harvie, and T.-T. Duong, “Measuring the digital divide: A modified benefit-of-the-doubt approach,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 261, p. 110191, 2023.
- [59] M. M. Nielsen, “Monitoring and measurement of digital inclusion: A critical analysis of key global frameworks,” in *HICSS*, pp. 1–10, 2022.

-
- [60] J. A. Hoyos Muñoz and D. Cardona Valencia, “Trends and challenges of digital divide and digital inclusion: A bibliometric analysis,” *Journal of Information Science*, p. 01655515221148366, 2023.
- [61] S. Dixit, V. Bhatia, S. P. Khangamba, and A. Agrawal, “Digital divide and its current state,” in *6G: Sustainable Development for Rural and Remote Communities*, pp. 1–15, Springer, 2022.
- [62] S. Jha and S. Pandey, “Digital divide: Exploring national and international approaches to bridge the digital divide in the perception of developing countries especially in the context of nepal,” *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 368–383, 2016.
- [63] J. Franken, T. Reinhold, L. Reichert, and C. Reuter, “The digital divide in state vulnerability to submarine communications cable failure,” *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 38, p. 100522, 2022.
- [64] X. Wang, Z. Wang, T. Wang, and M. Zukerman, “Designing cost-effective and reliable submarine communications cable path: Lessons from the tonga volcano disaster,” *IEEE Communications Magazine*, 2023.
- [65] M. N. Momen, “Freedom of expression in the digital age: Internet censorship,” *The Palgrave Encyclopedia of Global Security Studies*, Palgrave Macmillan, Cham, doi, vol. 10, pp. 978–3, 2019.
- [66] J. Gerschewski and A. Dukalskis, “How the internet can reinforce authoritarian regimes: The case of north korea,” *Geo. J. Int’l Aff.*, vol. 19, p. 12, 2018.
- [67] S. Aryan, H. Aryan, and J. A. Halderman, “Internet censorship in iran: A first look.,” in *FOCI*, 2013.
- [68] I. Ruiz-Martínez and J. Esparcia, “Internet access in rural areas: brake or stimulus as post-covid-19 opportunity?,” *Sustainability*, vol. 12, no. 22, p. 9619, 2020.

- [69] A. D. Nugroho, P. R. Bhagat, R. Magda, and Z. Lakner, “The impacts of economic globalization on agricultural value added in developing countries,” *PloS one*, vol. 16, no. 11, p. e0260043, 2021.
- [70] Statista, “Porcentaje de participación en el producto interior bruto (pib) de los sectores económicos de españa de 2008 a 2021.” <https://es.statista.com/estadisticas/501643/distribucion-del-producto-interior-bruto-pib-de-espana-por-sectores-economicos/>. (Accessed on 2023-06-06).
- [71] I. S. Tognisse, J. Degila, and A. D. Kora, “Solutions for closing usage gap in rural areas in west africa,” in *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, pp. 0254–0259, IEEE, 2022.
- [72] A. E. Corona *et al.*, “Protocolos tcp/ip de internet,” *Revista Digital Universitaria*, 2004.
- [73] P. Gralla and S. Ishida, *How the Internet Works*. How it works series, Que, 1998.
- [74] S. K. A. Kumar, G. V. Ihita, S. Chaudhari, and P. Arumugam, “A survey on rural internet connectivity in india,” in *2022 14th International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)*, pp. 911–916, IEEE, 2022.
- [75] Q. Wu, “4g communication technology wireless network secure communication,” in *2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, pp. 915–918, IEEE, 2021.
- [76] A. Lappalainen and C. Rosenberg, “Can 5g fixed broadband bridge the rural digital divide?,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 79–84, 2022.
- [77] D. E. Comer, *The Internet book: everything you need to know about computer networking and how the Internet works*. West Lafayette, Indiana: Chapman and Hall/CRC, 2018.

-
- [78] O. Oki and M. O. Lawrence, “The cost-effectiveness of fibre optic technology deployment in rural area: a case study of mdantsane,” *Journal on Innovation and Sustainability RISUS*, vol. 13, no. 2, pp. 111–123, 2022.
- [79] J. Deutschmann, K.-S. Hielscher, and R. German, “Broadband internet access via satellite: Performance measurements with different operators and applications,” in *Broadband Coverage in Germany; 16th ITG-Symposium*, pp. 1–7, VDE, 2022.
- [80] Y. Hu and V. O. Li, “Satellite-based internet: a tutorial,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 3, pp. 154–162, 2001.
- [81] R. J. Rodríguez Pisco, “Estudio comparativo entre los proyectos internet satelital starlink y kuiper.,” B.S. thesis, Babahoyo: UTB-FAFI. 2022, 2022.
- [82] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroğlu, “Optical wireless satellite networks versus optical fiber terrestrial networks: The latency perspective,” in *30th Biennial Symposium on Communications 2021*, pp. 225–234, Springer, 2022.
- [83] J. Deutschmann, K.-S. Hielscher, and R. German, “Next-generation satellite communication networks,” 2022.
- [84] P. Rengaraju, K. Sethuramalingam, and C.-H. Lung, “Providing internet access for post-disaster communications using balloon networks,” in *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks*, pp. 111–117, 2021.
- [85] S. A. Alhusayni, S. K. Alsuwat, S. H. Altalhi, F. A. Almalki, and H. S. Alzahrani, “Experimental study of a tethered balloon using 5g antenna to enhance internet connectivity,” in *Intelligent Computing*, pp. 649–663, Virtual: Springer, 2021.
- [86] S. Perumal, V. Raman, G. N. Samy, B. Shanmugam, K. Kisenasamy, and S. Ponnann, “Comprehensive literature review on delay tolerant

- network (dtm) framework for improving the efficiency of internet connection in rural regions of malaysia,” *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, pp. 1–14, 2022.
- [87] J. Galán-Jiménez, E. Moguel, J. García-Alonso, and J. Berrocal, “Energy-efficient and solar powered mission planning of uav swarms to reduce the coverage gap in rural areas: The 3d case,” *Ad Hoc Networks*, vol. 118, p. 102517, 2021.
- [88] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, “A survey of lorawan for iot: From technology to application,” *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3995, 2018.
- [89] M. Kumar and S. Kumar, “Communication technologies for m2m and iot domain,” in *Internet of Things*, pp. 132–160, CRC Press, 2022.
- [90] A. Raychowdhury and A. Pramanik, “Survey on lora technology: solution for internet of things,” *Intelligent Systems, Technologies and Applications*, pp. 259–271, 2020.
- [91] C. M. Ramya, M. Shanmugaraj, and R. Prabakaran, “Study on zigbee technology,” in *2011 3rd international conference on electronics computer technology*, vol. 6, pp. 297–301, IEEE, 2011.
- [92] A. Lavric, A. I. Petrariu, and V. Popa, “Sigfox communication protocol: The new era of iot?,” in *2019 international conference on sensing and instrumentation in IoT Era (ISSI)*, pp. 1–4, IEEE, 2019.
- [93] T. Kim *et al.*, “A study of the z-wave protocol: implementing your own smart home gateway,” in *2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, pp. 411–415, IEEE, 2018.
- [94] M. Jesús-Azabal, L. Mariano, J. García-Alonso, and J. Galán-Jiménez, “Distributed sustainable iot architecture for detecting loneliness in isolated rural areas,” in *International Workshop on Gerontechnology*, pp. 42–54, Springer, 2021.

-
- [95] M. Jesús-Azabal, J. Berrocal, J. García-Alonso, V. N. Soares, and J. Galán-Jiménez, “An opportunistic routing solution to monitor isolated elderly people in rural areas,” in *International Workshop on Gerontechnology*, pp. 195–203, Springer, 2019.
- [96] G. Gu and G. Peng, “The survey of gsm wireless communication system,” in *2010 international conference on computer and information application*, pp. 121–124, IEEE, 2010.
- [97] P. Manhas, S. Thakral, and C. Kumar, “Performance analysis of gprs/edge,” *Int J Electron Eng Res*, pp. 655–658, 2010.
- [98] K. Kimani, K. Langat, and V. Oduol, “Tv white spaces opportunistic spectrum access for wireless regional area networks,” in *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference*, pp. 81–89, 2022.
- [99] A. Navarro, L. Vargas, D. Guevara, D. Parada, C. Amu, and C. G. Rego, “Propagation models trials for tv white spaces in colombian rain forest,” in *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, IEEE, 2022.
- [100] J. Jubin and J. D. Tornow, “The darpa packet radio network protocols,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 1, pp. 21–32, 1987.
- [101] N. Abramson, “Development of the alohanet,” *IEEE transactions on Information Theory*, vol. 31, no. 2, pp. 119–123, 1985.
- [102] Q. K. U. D. Arshad, A. U. Kashif, and I. M. Quershi, “A review on the evolution of cellular technologies,” in *2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, pp. 989–993, IEEE, 2019.
- [103] M. A. Al-Absi, A. A. Al-Absi, M. Sain, and H. Lee, “Moving ad hoc networks—a comparative study,” *Sustainability*, vol. 13, no. 11, p. 6187, 2021.
- [104] M. M. Hamdi, L. Audah, S. A. Rashid, A. H. Mohammed, S. Alani, and A. S. Mustafa, “A review of applications, characteristics and challenges in vehicular ad hoc networks (vanets),” in *2020 international*

REFERENCIAS

- congress on human-computer interaction, optimization and robotic applications (HORA)*, pp. 1–7, IEEE, 2020.
- [105] M. Seyedi, B. Kibret, D. T. Lai, and M. Faulkner, “A survey on intrabody communications for body area network applications,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 60, no. 8, pp. 2067–2079, 2013.
- [106] R. López-Romero Guijarro, “Análisis del protocolo ieee 802.11 p en sistemas de comunicación vehiculares v2x,” *Universitat Oberta de Catalunya (UOC)*, 2019.
- [107] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss, “Delay-tolerant networking architecture,” tech. rep., Network Working Group, 2007.
- [108] S. S. Chawathe, “Beacon placement for indoor localization using bluetooth,” in *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 980–985, IEEE, 2008.
- [109] C.-M. Huang, K.-c. Lan, and C.-Z. Tsai, “A survey of opportunistic networks,” in *22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshops (aina workshops 2008)*, pp. 1672–1677, IEEE, 2008.
- [110] S. K. Mishra and R. Gupta, “Routing protocols in an opportunistic network: A survey,” in *Computer Networks, Big Data and IoT*, vol. 117, pp. 185–195, Springer, 2022.
- [111] M. Zhou, “A review of javascript object notation in data analysis,” in *2022 8th International Conference on Humanities and Social Science Research (ICHSSR 2022)*, pp. 1771–1774, Atlantis Press, 2022.
- [112] M. Jesús-Azabal, J. L. Herrera, S. Laso, and J. Galán-Jiménez, “OPPNets and Rural Areas: An Opportunistic Solution for Remote Communications,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, p. 8883501, 2021.

-
- [113] J. Guillen, J. Miranda, J. Berrocal, J. Garcia-Alonso, J. M. Murillo, and C. Canal, “People as a service: a mobile-centric model for providing collective sociological profiles,” *IEEE software*, vol. 31, no. 2, pp. 48–53, 2013.
- [114] B. Ramakrishnan, R. Rajesh, and R. Shaji, “Performance analysis of 802.11 and 802.11 p in cluster based simple highway model,” *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 1, no. 5, pp. 420–426, 2010.
- [115] T. Yamano, K. Kotani, N. Kitano, J. Morimoto, H. Emori, M. Takahata, S. Fujita, T. Wada, S. Ota, K. Satogami, *et al.*, “Telecardiology in rural practice: Global trends,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 7, p. 4335, 2022.
- [116] M. T. S. A. S. Patel and M. V. Singh, “Review of image processing technique for glaucoma detection,” *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*, vol. 8, 2022.
- [117] T. M. S. Sayeed, M. T. Rayhan, and S. Chowdhury, “Bluetooth low energy (ble) based portable medical sensor kit platform with cloud connectivity,” in *2018 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Material and Electronic Engineering (IC4ME2)*, pp. 1–4, IEEE, 2018.
- [118] J. Garcia-Alonso, J. Berrocal, A. Pérez-Vereda, J. Galán-Jiménez, C. Canal, and J. M. Murillo, “Using bluetooth low energy advertisements for the detection of people temporal proximity patterns,” *Mobile Information Systems*, vol. 2020, pp. 1–17, 2020.
- [119] I. Song and J. Vong, “Assessing general well-being using de-identified features of facial expressions,” in *2013 International Conference on Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPaR)*, vol. 1, pp. 237–242, IEEE, 2013.
- [120] D. Zhang, J. J. Rodrigues, Y. Zhai, and T. Sato, “Design and implementation of 5g e-health systems: Technologies, use cases, and future

- challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 9, pp. 80–85, 2021.
- [121] D. Impedovo and G. Pirlo, “ehealth and artificial intelligence,” *Information*, vol. 10, no. 3, p. 117, 2019.
- [122] F. Betriana, R. Tanioka, J. Gunawan, and R. C. Locsin, “Health-care robots and human generations: Consequences for nursing and healthcare,” *Collegian*, vol. 29, no. 5, pp. 767–773, 2022.
- [123] C. Handforth, “Closing the coverage gap. how innovation can drive rural connectivity,” technical report, GSMA Connected Society, July 2019.
- [124] E. Yaacoub and M.-S. Alouini, “A key 6g challenge and opportunity—connecting the base of the pyramid: A survey on rural connectivity,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, no. 4, pp. 533–582, 2020.
- [125] L. Shaddock and T. Smith, “Potential for use of portable ultrasound devices in rural and remote settings in australia and other developed countries: A systematic review,” *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, vol. 15, p. 605, 2022.
- [126] N. K. Srivastava, R. Krishna, S. Chandran, and R. Prasad, “Ict for rural and remote areas in india,” in *2019 22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.
- [127] G. Suciú, A. Geaba, C. Butca, V. Suciú, and O. Fratu, “Basic internet foundation,” in *Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures*, vol. 159, pp. 255–262, Springer, 2015.
- [128] M. Jesús-Azabal, J. Rojo, E. Moguel, D. Flores-Martin, J. Berrocal, J. García-Alonso, and J. M. Murillo, “Voice assistant to remind pharmacologic treatment in elders,” in *International Workshop on Gerontechnology*, pp. 123–133, Springer, 2019.
- [129] G. Rizzo, S. Ristov, T. Fahringer, M. Gusev, M. Dzanko, I. Bilic, C. Esposito, and T. Braun, “Emergency networks for post-disaster

- scenarios,” *Guide to Disaster-Resilient Communication Networks*, pp. 271–298, 2020.
- [130] A. Sawand, S. Djahel, Z. Zhang, and F. Naït-Abdesselam, “Multidisciplinary approaches to achieving efficient and trustworthy ehealth monitoring systems,” in *2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, pp. 187–192, 2014.
- [131] E. F. Cahyadi and M.-S. Hwang, “A comprehensive survey on certificateless aggregate signature in vehicular ad hoc networks,” *IETE Technical Review*, vol. 39, no. 6, pp. 1265–1276, 2022.
- [132] A. Thakur and C. Hota, “Designing an extensible communication platform for rural area,” in *2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, pp. 1348–1355, IEEE, 2014.
- [133] J. P. Talusan, Y. Nakamura, T. Mizumoto, and K. Yasumoto, “Near cloud: Low-cost low-power cloud implementation for rural area connectivity and data processing,” in *2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, vol. 2, pp. 622–627, IEEE, 2018.
- [134] S. Akshay, B. Vishnukumar, V. Mohan, and M. Anand, “Energy and performance analysis of raspberry pi with modern computing devices,” *International Journal of Engineering Technology*, vol. 7, 2018.
- [135] T. O. Edoh, “Reconfiguration durations optimization for high-availability distributed systems: The case of ict rural and elderly infrastructures for development,” *International Rural and Elderly Health Informatics Conference*, 2020.
- [136] C. Rametta and G. Schembra, “Designing a softwarized network deployed on a fleet of drones for rural zone monitoring,” *Future Internet*, vol. 9, no. 1, p. 8, 2017.
- [137] V. Monzon Baeza and M. Alvarez Marban, “High altitude platform stations aided cloud-computing solution for rural-environment iot applications,” *Computer Networks and Communications*, 1 (1), 2022.

REFERENCIAS

- [138] L. Mariano Juárez, D. Conde Caballero, and B. Rivero Jiménez, *Antropología de la soledad. Teorías y etnografías contemporáneas*. España: Tirant lo Blanch, 2023.
- [139] J. Ventura-León, A. R. Sánchez-Villena, T. Caycho-Rodríguez, M. Barboza-Palomino, and A. Rubio, “Fear of loneliness: development and validation of a brief scale,” *Frontiers in psychology*, vol. 11, p. 2768, 2020.
- [140] J. Galán-Jiménez, E. Moguel, J. García-Alonso, and J. Berrocal, “Energy-efficient and solar powered mission planning of uav swarms to reduce the coverage gap in rural areas: The 3d case,” *Ad Hoc Networks*, vol. 118, p. 102517, 2021.
- [141] B. R. Jiménez, N. M. G. Perales, D. C. Caballero, B. M. González, J. F. C. García, and L. M. Juárez, “Loneliness among rural elderly: Present and future public health challenges,” in *Handbook of Research on Health Systems and Organizations for an Aging Society*, pp. 48–61, IGI Global, 2020.
- [142] A. Agren, “What are we talking about? constructions of loneliness among older people in the swedish news-press,” *Journal of Aging Studies*, vol. 41, pp. 18–27, 2017.
- [143] A. Nzabona, J. Ntozi, and G. Rutaremwa, “Loneliness among older persons in uganda: Examining social, economic and demographic risk factors,” *Ageing & Society*, vol. 36, no. 4, pp. 860–888, 2016.
- [144] B. R. Jiménez, N. M. G. Perales, D. C. Caballero, B. M. González, J. F. C. García, and L. M. Juárez, “Loneliness among rural elderly: Present and future public health challenges,” *Research Anthology on Supporting Healthy Aging in a Digital Society*, pp. 1522–1535, 2022.
- [145] T. Morgan, J. Wiles, T. Moeke-Maxwell, S. Black, H.-J. Park, O. Dewes, L. A. Williams, and M. Gott, “‘people haven’t got that close connection’: Meanings of loneliness and social isolation to culturally diverse older people,” *Ageing & mental health*, vol. 24, no. 10, pp. 1627–1635, 2020.

-
- [146] S. Laso, M. Linaje, J. Garcia-Alonso, J. M. Murillo, and J. Berrocal, “Deployment of APIs on Android Mobile Devices and Microcontrollers,” in *2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 1–3, IEEE, 2020.
- [147] J. L. Pesante-Pinto, “Clinical pharmacology and the risks of polypharmacy in the geriatric patient,” *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics*, vol. 28, no. 4, pp. 739–746, 2017.
- [148] E. Rosted, M. Schultz, and S. Sanders, “Frailty and polypharmacy in elderly patients are associated with a high readmission risk,” *Dan Med J*, vol. 63, no. 9, p. A5274, 2016.
- [149] N. Masnoon, S. Shakib, L. Kalisch-Ellett, and G. E. Caughey, “What is polypharmacy? a systematic review of definitions,” *BMC geriatrics*, vol. 17, pp. 1–10, 2017.
- [150] J. A. C. Norte, “Consideraciones sobre la prescripción y utilización de fármacos en personas mayores,” *Revista ROL de enfermería*, vol. 43, no. 4, pp. 8–15, 2020.
- [151] A. Bagnasco, P. Petralia, S. Furnari, S. Ghio, S. Calza, and L. Sasso, “Paediatric nurses’ perception of the child-family dyad’s autonomy in managing a chronic disease situation: the experience of an italian paediatric department,” *Journal of preventive medicine and hygiene*, vol. 54, no. 2, p. 124, 2013.
- [152] M. I. Peñarrieta, T. Kendall, N. Martinez, A. M. Rivera, N. Gonzales, F. Flores, and E. d. Angel, “Adherencia al tratamiento antirretroviral en personas con vih en tamaulipas, méxico,” *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, vol. 26, no. 3, pp. 333–337, 2009.
- [153] A. I. Martins, A. Queirós, M. Cerqueira, N. Rocha, and A. Teixeira, “The international classification of functioning, disability and health as a conceptual model for the evaluation of environmental factors,” *Procedia Computer Science*, vol. 14, pp. 293–300, 2012.

REFERENCIAS

- [154] K. D. Checchi, K. F. Huybrechts, J. Avorn, and A. S. Kesselheim, “Electronic medication packaging devices and medication adherence: a systematic review,” *Jama*, vol. 312, no. 12, pp. 1237–1247, 2014.
- [155] L. Hartman, W. F. Lems, and M. Boers, “Outcome measures for adherence data from a medication event monitoring system: a literature review,” *Journal of clinical pharmacy and therapeutics*, vol. 44, no. 1, pp. 1–5, 2019.
- [156] M. Paterson, M. Kinnear, C. Bond, and B. McKinstry, “A systematic review of electronic multi-compartment medication devices with reminder systems for improving adherence to self-administered medications,” *International Journal of Pharmacy Practice*, vol. 25, no. 3, pp. 185–194, 2017.
- [157] V. N. I. Cisco, “Cisco visual networking index: forecast and methodology 2016–2021,” *CISCO White paper*, 2017.
- [158] T. Barnett, S. Jain, U. Andra, and T. Khurana, “Cisco visual networking index (vni) complete forecast update, 2017–2022,” *Americas/EMEAR Cisco Knowledge Network (CKN) Presentation*, pp. 1–30, 2018.
- [159] E. Borgia, R. Bruno, and A. Passarella, “Making opportunistic networks in iot environments ccn-ready: A performance evaluation of the mobccn protocol,” *Computer Communications*, vol. 123, pp. 81 – 96, 2018.
- [160] J. García-Alonso, J. Berrocal, J. M. Murillo, D. Mendes, C. Fonseca, and M. Lopes, “Situational-context for virtually modeling the elderly,” in *Ambient Intelligence - Software and Applications -, 9th International Symposium on Ambient Intelligence, ISAmI 2018, Toledo, Spain, 20-22 June 2018* (P. Novais, J. J. Jung, G. Villarrubia-González, A. Fernández-Caballero, E. Navarro, P. González, D. Carneiro, A. Pinto, A. T. Campbell, and D. Durães, eds.), vol. 806 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 298–305, Springer, 2018.

-
- [161] P. Bellavista, J. Berrocal, A. Corradi, S. K. Das, L. Foschini, and A. Zanni, “A survey on fog computing for the internet of things,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 52, pp. 71–99, 2019.
- [162] V. Vashishth, A. Chhabra, and D. K. Sharma, “Gmmr: A gaussian mixture model based unsupervised machine learning approach for optimal routing in opportunistic iot networks,” *Computer Communications*, vol. 134, pp. 138 – 148, 2019.
- [163] V. F. Mota, F. D. Cunha, D. F. Macedo, J. M. Nogueira, and A. A. Loureiro, “Protocols, mobility models and tools in opportunistic networks: A survey,” *Computer Communications*, vol. 48, pp. 5 – 19, 2014.
- [164] B. Guo, D. Zhang, Z. Wang, Z. Yu, and X. Zhou, “Opportunistic iot: Exploring the harmonious interaction between human and the internet of things,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 6, pp. 1531 – 1539, 2013.
- [165] A. Martín-Campillo, J. Crowcroft, E. Yoneki, and R. Martí, “Evaluating opportunistic networks in disaster scenarios,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 870 – 880, 2013.
- [166] E. D. Ayele, N. Meratnia, and P. J. M. Havinga, “Towards a new opportunistic iot network architecture for wildlife monitoring system,” in *2018 9th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, pp. 1–5, Feb 2018.
- [167] G. Aloï, G. Caliciuri, G. Fortino, R. Gravina, P. Pace, W. Russo, and C. Savaglio, “Enabling iot interoperability through opportunistic smartphone-based mobile gateways,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 81, pp. 74 – 84, 2017.
- [168] R. Pozza, M. Nati, S. Georgoulas, K. Moessner, and A. Gluhak, “Neighbor discovery for opportunistic networking in internet of things scenarios: A survey,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1101–1131, 2015.
- [169] P. Zou, M. Zhao, J. Wu, and L. Wang, “Routing algorithm based on trajectory prediction in opportunistic networks,” *Information*, vol. 10, no. 2, 2019.

- [170] M. Cuka, D. Elmazi, K. Matsuo, M. Ikeda, and L. Barolli, “A delay-aware fuzzy-based system for selection of iot devices in opportunistic networks,” in *Advances in Network-Based Information Systems* (L. Barolli, N. Kryvinska, T. Enokido, and M. Takizawa, eds.), (Cham), pp. 16–29, Springer International Publishing, 2019.
- [171] M. Cuka, D. Elmazi, K. Bylykbashi, E. Spaho, M. Ikeda, and L. Barolli, “A fuzzy-based system for selection of iot devices in opportunistic networks considering iot device storage, waiting time and node centrality parameters,” in *2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, pp. 710–716, May 2018.
- [172] L. Farhan, R. Kharel, O. Kaiwartya, M. Hammoudeh, and B. Adebisi, “Towards green computing for internet of things: Energy oriented path and message scheduling approach,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 38, pp. 195 – 204, 2018.
- [173] Y. Cao, O. Kaiwartya, N. Aslam, C. Han, X. Zhang, Y. Zhuang, and M. Dianati, “A trajectory-driven opportunistic routing protocol for vcps,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, pp. 2628–2642, Dec 2018.
- [174] Y. Cao, Z. Sun, N. Wang, M. Riaz, H. Cruickshank, and X. Liu, “Geographic-based spray-and-relay (gsar): An efficient routing scheme for dtns,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, pp. 1548–1564, April 2015.
- [175] D. J. Cook, J. C. Augusto, and V. R. Jakkula, “Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 277–298, 2009.
- [176] J.-y. Hong, E.-h. Suh, and S.-J. Kim, “Context-aware systems: A literature review and classification,” *Exp. Sys. with App.*, vol. 36, no. 4, pp. 8509–8522, 2009.
- [177] J. Berrocal, J. Garcia-Alonso, C. Canal, and J. M. Murillo, “Situational-context: A unified view of everything involved at a particular situation,” in *Web Engineering - 16th International Conferen-*

-
- ce, *ICWE 2016, Lugano, Switzerland, June 6-9, 2016. Proceedings*, pp. 476–483, 2016.
- [178] R. Hirschfeld, P. Costanza, and O. M. Nierstrasz, “Context-oriented programming,” *Journal of Object technology*, vol. 7, no. 3, pp. 125–151, 2008.
- [179] D. Flores-Martin, J. B. Olmeda, J. García-Alonso, and J. M. M. Rodríguez, “Towards a runtime devices adaptation in a multi-device environment based on people’s needs,” in *2nd International Workshop on Context-Awareness for Multi-Device Pervasive and Mobile Computing*, 2019.
- [180] J. G. Cabañas, Á. Cuevas, A. Arrate, and R. Cuevas, “Does facebook use sensitive data for advertising purposes?,” *Communications of the ACM*, vol. 64, no. 1, pp. 62–69, 2020.
- [181] C. Niu, Z. Zheng, F. Wu, S. Tang, X. Gao, and G. Chen, “Unlocking the value of privacy: Trading aggregate statistics over private correlated data,” in *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, pp. 2031–2040, 2018.
- [182] D. Lupton, “Thinking with care about personal data profiling: A more-than-human approach,” *International Journal of Communication*, vol. 14, p. 19, 2020.
- [183] D. Hunter and N. Evans, “Facebook emotional contagion experiment controversy,” 2016.
- [184] M. Klenk, “Digital well-being and manipulation online,” *Ethics of Digital Well-Being*, 2020.
- [185] I. ur Rehman, “Facebook-cambridge analytica data harvesting: What you need to know,” *Library Philosophy and Practice*, pp. 1–11, 2019.
- [186] J. Parker Black, “Facebook and the future of fair housing online,” *Oklahoma Law Review*, vol. 72, no. 3, p. 711, 2020.

REFERENCIAS

- [187] The SOLID Foundation, “The solid project.” <https://solid.mit.edu>. Accessed: 2021-05-25.
- [188] J. Garcia-Alonso, J. Berrocal, J. M. Murillo, D. Mendes, C. Fonseca, and M. Lopes, “Situational-context for virtually modeling the elderly,” in *International symposium on ambient intelligence*, pp. 298–305, Springer, 2018.
- [189] E. Moguel, J. Berrocal, J. M. Murillo, J. García-Alonso, D. Mendes, C. Fonseca, and M. Lopes, “Enriched elderly virtual profiles by means of a multidimensional integrated assessment platform,” *Procedia computer science*, vol. 138, pp. 56–63, 2018.
- [190] Apple Inc., “Data tracking by applications.” <https://developer.apple.com/app-store/user-privacy-and-data-use/>. Accessed: 2021-07-13.
- [191] I. C. Ng, “Can you own your personal data? the hat (hub-of-all-things) data ownership model,” *University of Warwick. Publications service & WRAP*, 2018.
- [192] I. Clarke, O. Sandberg, B. Wiley, and T. W. Hong, “Freenet: A distributed anonymous information storage and retrieval system,” in *Designing privacy enhancing technologies*, pp. 46–66, Springer, 2001.
- [193] The DAT Foundation, “The dat foundation.” <https://dat.foundation>. Accessed: 2021-05-25.
- [194] The Threefold Network, “The threefold network.” <https://threefold.io>. Accessed: 2021-05-25.
- [195] ActivityPub, “Activity pub.” <https://activitypub.rocks/>. Accessed: 2021-05-25.
- [196] SafeNetwork, “Safe network.” <https://safenetwork.org/>. Accessed: 2021-05-25.
- [197] BBC, “Bbc box.” <https://www.bbc.co.uk/rd/projects/databox>. Accessed: 2021-05-25.

-
- [198] J. Paulos, *Investigating decentralized management of health and fitness data*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2020.
- [199] M. Eisenstadt, M. Ramachandran, N. Chowdhury, A. Third, and J. Domingue, “Covid-19 antibody test/vaccination certification: There’s an app for that,” *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*, vol. 1, pp. 148–155, 2020.
- [200] M. Ramachandran, N. Chowdhury, A. Third, J. Domingue, K. Quick, and M. Bachler, “Towards complete decentralised verification of data with confidentiality: Different ways to connect solid pods and blockchain,” in *Companion Proceedings of the Web Conference 2020*, pp. 645–649, 2020.
- [201] E. Mannens, R. Verborgh, and T. Berners-Lee, “Streamlining governmental processes by putting citizens in control of their personal data,” in *Electronic Governance and Open Society: Challenges in Eurasia: 6th International Conference, EGOSE 2019, St. Petersburg, Russia, November 13-14, 2019, Proceedings*, vol. 1135, p. 346, Springer Nature, 2020.
- [202] X. Dong, Y. Guo, F. Li, L. Dong, and A. Khan, “Combination model of heterogeneous data for security measurement.,” *J. UCS*, vol. 25, no. 3, pp. 270–281, 2019.
- [203] A. Nikiforova, J. Bicevskis, Z. Bicevska, and I. Oditis, “User-oriented approach to data quality evaluation.,” *J. UCS*, vol. 26, no. 1, pp. 107–126, 2020.
- [204] A. Choi and H. Shin, “Longitudinal healthcare data management platform of healthcare iot devices for personalized services.,” *J. UCS*, vol. 24, no. 9, pp. 1153–1169, 2018.
- [205] L. Moroney, Moroney, and Anglin, *Definitive Guide to Firebase*. Springer, 2017.
- [206] R. A. Light, “Mosquitto: server and client implementation of the mqtt protocol,” *Journal of Open Source Software*, vol. 2, no. 13, p. 265, 2017.

REFERENCIAS

- [207] Google Inc., “User agreement firebase.” <https://firebase.google.com/support/privacy?hl=es-419>. Accessed: 2021-07-13.
- [208] R. Prey, “Nothing personal: Algorithmic individuation on music streaming platforms,” *Media, Culture & Society*, vol. 40, no. 7, pp. 1086–1100, 2018.
- [209] Statista, “Most used music streaming services.” <https://www.statista.com/statistics/798125/most-popular-us-music-streaming-services-ranked-by-audience/>. Accessed: 2021-05-25.
- [210] K. Ari, K. Teemu, P. Mikko, E. Frans, K. Jouni, and O. Jörg, “The one simulator v1.6.0.” <https://github.com/akeranen/the-one>. Accessed: 2022-11-05.
- [211] I. N. de Estadística, “Demografía de casares de las hurdes.” <https://www.foro-ciudad.com/caceres/casares-de-las-hurdes/habitantes.html#Piramide>. (Accessed on 2023-06-05).
- [212] A. Hernández-Solana, D. Pérez-Díaz-De-Cerio, M. García-Lozano, A. V. Bardají, and J.-L. Valenzuela, “Bluetooth mesh analysis, issues, and challenges,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 53784–53800, 2020.
- [213] A. H. K. Ali, H. Lenando, S. Chaoui, M. Alrfaay, and M. A. Tawfeek, “A dynamic resource-aware routing protocol in resource-constrained opportunistic networks,” *CMC-Computers Materials & Continua*, vol. 70, no. 2, pp. 4147–4167, 2022.
- [214] A. Basit, S. U. Khan, and O. Sabir, “Application-based forwarding in delay-tolerant networks,” *International Journal of Engineering Works*, vol. 7, no. 02, pp. 143–148, 2020.
- [215] A. Abellán García, P. Aceituno Nieto, J. Pérez Díaz, D. Ramiro Fariñas, A. Ayala García, and R. Pujol Rodríguez, “Un perfil de las personas mayores en españa, 2019 indicadores estadísticos básicos,” *Un perfil de las personas mayores en españa, 2019 indicadores estadísticos básicos*, vol. 1, pp. 38–98, 2019.

-
- [216] J. Burgess, B. Gallagher, D. D. Jensen, B. N. Levine, *et al.*, “Max-prop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks,” in *Infocom*, vol. 6, pp. 1–11, Barcelona, Spain, 2006.
- [217] J. Gandhi and Z. Narmawala, “Fair comparative analysis of opportunistic routing protocols: an empirical study,” in *Data Communication and Networks*, vol. 1049, pp. 285–294, Singapore: Springer, 2020.
- [218] R. Dalal, M. Khari, J. P. Anzola, and V. García-Díaz, “Proliferation of opportunistic routing: A systematic review,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 5855–5883, 2021.
- [219] V. N. Soares, J. J. Rodrigues, and F. Farahmand, “Geospray: A geographic routing protocol for vehicular delay-tolerant networks,” *Information Fusion*, vol. 15, pp. 102–113, 2014.
- [220] C. Ksouri, I. Jemili, M. Mosbah, and A. Belghith, “Towards general internet of vehicles networking: routing protocols survey,” *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 34, no. 7, p. e5994, 2022.
- [221] M. Shah, N. Godaliya, and A. Barad, “An improved simbet routing algorithm for human mobility based dtn,” *Kalpa Publications in Computing*, vol. 2, pp. 166–176, 2017.
- [222] P. Jaimini and R. Patel, “Efficient routing using bubble rap in delay tolerant network,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 137, pp. 16–19, 2016.
- [223] D. R. Silva, A. Costa, and J. Macedo, “Energy impact analysis on dtn routing protocols,” in *Proc. of the ExtremeCom*, vol. 12, (Zurich, Switzerland), pp. 1–6, ACM, 2012.
- [224] L. Amorosi, L. Chiaraviglio, and J. Galán-Jiménez, “Optimal energy management of uav-based cellular networks powered by solar panels and batteries: Formulation and solutions,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 53698–53717, 2019.
- [225] B. Rivero Jiménez, D. Conde-Caballero, and L. M. Juárez, “Loneliness among the elderly in rural contexts: A mixed-method study

- protocol,” *International Journal of Qualitative Methods*, vol. 20, p. 1609406921996861, 2021.
- [226] A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, “The one simulator for dtn protocol evaluation,” in *Proceedings of the 2nd international conference on simulation tools and techniques*, pp. 1–10, 2009.
- [227] J. Pérez Díaz, A. Abellán García, P. Aceituno Nieto, and D. Ramiro Fariñas, “Un perfil de las personas mayores en españa, 2020. indicadores estadísticos básicos,” *Un perfil de las personas mayores en España, 2020. Indicadores estadísticos básicos*, 2020.
- [228] R. Heydon and N. Hunn, “Bluetooth low energy,” *CSR Presentation, Bluetooth SIG* <https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx>, 2012.
- [229] C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, “Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology,” *Sensors*, vol. 12, no. 9, pp. 11734–11753, 2012.
- [230] F. F. Ishita, P. Le, A. Novak-Louie, G. Quansah, and S. Whitmore, “Smart band,” *Steve Whitmore Engineering Science Undergraduate Capstone Projects Collection*, 2016.
- [231] M. J. Rahman, B. I. Morshed, B. Harmon, and M. Rahman, “A pilot study towards a smart-health framework to collect and analyze biomarkers with low-cost and flexible wearables,” *Smart Health*, vol. 23, p. 100249, 2022.
- [232] H. Lenando and M. Alrfaay, “Epsoc: Social-based epidemic-based routing protocol in opportunistic mobile social network,” *Mobile Information Systems*, vol. 2018, 2018.
- [233] S. Ullah and A. Qayyum, “Socially-aware adaptive delay tolerant network (dtn) routing protocol,” *PloS one*, vol. 17, no. 1, p. e0262565, 2022.
- [234] S. Jain, N. Chauhan, and P. Choudhari, “Adaptive approximate community detection algorithm for bubble rap routing protocol,” in *Ad-*

-
- vances in Communication and Computational Technology*, pp. 865–878, Springer, 2021.
- [235] S. Kamath and J. Lindh, “Measuring bluetooth low energy power consumption,” *Texas instruments application note AN092, Dallas*, 2010.
- [236] R. Trestian, A.-N. Moldovan, O. Ormond, and G.-M. Muntean, “Energy consumption analysis of video streaming to android mobile devices,” in *2012 IEEE Network Operations and Management Symposium*, pp. 444–452, IEEE, 2012.
- [237] J. Berrocal, J. Garcia-Alonso, C. Vicente-Chicote, J. Hernández, T. Mikkonen, C. Canal, and J. M. Murillo, “Early analysis of resource consumption patterns in mobile applications,” *Pervasive and Mobile Computing*, 2016.
- [238] P. Zhang, C. M. Sadler, S. A. Lyon, and M. Martonosi, “Hardware design experiences in zebranet,” in *Proceedings of the 2Nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '04*, (New York, NY, USA), pp. 227–238, ACM, 2004.
- [239] A. Vahdat and D. Becker, “Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks,” tech. rep., Computer Science, 2000.
- [240] J. Burgess, B. Gallagher, D. D. Jensen, and B. N. Levine, “Max-prop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks,” *Proceedings IEEE INFOCOM 2006. 25TH IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1–11, 2006.
- [241] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schelén, “Probabilistic routing in intermittently connected networks,” *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 7, pp. 19–20, July 2003.
- [242] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, “Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks,” in *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking, WDTN '05*, (New York, NY, USA), pp. 252–259, ACM, 2005.

- [243] A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, “The one simulator for dtn protocol evaluation,” in *Proceedings of the 2Nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, Simutools '09, pp. 55:1–55:10, 2009.
- [244] J. Galán-Jiménez, J. Berrocal, J. García-Alonso, C. Canal, and J. M. Murillo, “Situational and adaptive context-aware routing for opportunistic iot networks,” in *28th International Telecommunication Networks and Applications Conference, ITNAC 2018, Sydney, Australia, November 21-23, 2018*, pp. 1–6, IEEE Computer Society, 2018.
- [245] F. Z. Ghazizadeh and S. Vafadar, “A quantitative evaluation of usability in mobile applications: An empirical study,” in *2017 International Symposium on Computer Science and Software Engineering Conference (CSSE)*, pp. 1–6, IEEE, 2017.
- [246] M. Pielot, K. Church, and R. De Oliveira, “An in-situ study of mobile phone notifications,” in *Proceedings of the 16th international conference on Human-computer interaction with mobile devices & services*, pp. 233–242, 2014.
- [247] S. K. Datta, C. Bonnet, and N. Nikaein, “Android power management: Current and future trends,” in *2012 The First IEEE Workshop on Enabling Technologies for Smartphone and Internet of Things (ETSIoT)*, pp. 48–53, IEEE, 2012.
- [248] Google Inc., “Battery monitoring android.” <https://developer.android.com/training/monitoring-device-state/battery-monitoring>. Accessed: 2021-07-13.
- [249] D. M. Gezgin, “Understanding patterns for smartphone addiction: Age, sleep duration, social network use and fear of missing out.,” *Cypriot Journal of Educational Sciences*, vol. 13, no. 2, pp. 166–177, 2018.
- [250] É. Duke and C. Montag, “Smartphone addiction, daily interruptions and self-reported productivity,” *Addictive behaviors reports*, vol. 6, pp. 90–95, 2017.

- [251] J. Kuem, S. Ray, P.-F. Hsu, and L. Khansa, “Smartphone addiction and conflict: An incentive-sensitisation perspective of addiction for information systems,” *European Journal of Information Systems*, pp. 1–22, 2020.