

Grado en Ingeniería Telemática  
2024-2025

*Trabajo Fin de Grado*

# “Desarrollo de una Arquitectura de Plano de Control de Redes 6G para un Dominio WiFi”

---

Emilio José Manchado Barquero

Tutor/es

ALEJANDRO CALVILLO FERNANDEZ

ANTONIO DE LA OLIVA DELGADO

Leganés, 16 de Junio 2025



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**



## RESUMEN

Este trabajo se enmarca en el contexto del desarrollo de redes de sexta generación (6G) y su aplicación específica en entornos WiFi. En particular, se ha implementado un módulo práctico denominado Resource Configurator, que permite gestionar dinámicamente la configuración de colas en un punto de acceso WiFi. Este módulo forma parte del plano de control más amplio diseñado previamente en el marco del proyecto europeo Predict-6G [1].

Mi contribución específica se centra en el desarrollo de un sistema compuesto por tres módulos propios (Cliente, Servidor y AP\_WiFi), que se comunican mediante una API REST creada con Python (Flask/Waitress) [2], [3]. El sistema también integra mecanismos para detectar cambios en las configuraciones en tiempo real (mediante la biblioteca Watchdog [4]), ejecutando automáticamente un script externo (preexistente y reutilizado en este proyecto) que aplica las configuraciones en el punto de acceso WiFi. Adicionalmente, se identifican líneas de mejora orientadas a la eficiencia energética y seguridad, que podrían abordarse en futuros trabajos.

Este trabajo contribuye así con una capa práctica de automatización, facilitando la evolución hacia arquitecturas más inteligentes, escalables y automatizadas para las redes deterministas del futuro.

This work is framed within the context of sixth-generation (6G) network development, specifically applied to WiFi environments. In particular, a practical module called Resource Configurator has been implemented to dynamically manage queue configurations on a WiFi access point. This module is part of a broader control plane previously designed by the European project Predict-6G [1].

My specific contribution consists of developing a system comprised of three custom modules (Client, Server, and AP\_WiFi). The system also integrates real-time event detection mechanisms (using the Watchdog library), automatically executing external scripts (previously developed and reused within this project) to apply the configurations to the WiFi access point. Additionally, improvement opportunities focused on energy efficiency and security have been identified for future development.

Thus, this work contributes a practical automation layer, enabling the evolution towards more intelligent, scalable, and automated architectures for future deterministic networks.

**Palabras clave:** Redes 6G, WiFi Determinista, Plano de Control, Sincronización Temporal, Gestión de Recursos, TSN (Time-Sensitive Networking), Automatización, Arquitectura Modular.



## **DEDICATORIA**

A mi familia, en especial a mis padres, que me han apoyado siempre y me enseñaron el valor del esfuerzo, la constancia y la responsabilidad.

A mis abuelos, que no han dejado de interesarse por mis progresos y que, con su eterno “¿cuándo vuelves?”, me han brindado fuerza y cariño desde la distancia.

A mi tutor, Alejandro, cuya paciencia, consejos y confianza hicieron posible este trabajo.



# ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN. . . . .	1
1.1. Motivación y Contexto. . . . .	1
1.2. Objetivos del Trabajo . . . . .	2
1.3. Estructura del Documento. . . . .	2
2. ESTADO DEL ARTE. . . . .	4
2.1. Redes Deterministas DetNet . . . . .	4
2.1.1. Características de las Redes Deterministas . . . . .	4
2.2. IEEE 802.1Qbv. . . . .	5
2.2.1. Time-Aware Traffic Shaping . . . . .	5
2.2.2. Máquinas de Estado en IEEE 802.1Qbv . . . . .	7
2.2.3. Reservas de Tiempo para Tráfico Sensible al Tiempo (TSN) . . . . .	7
2.3. Redes móviles de sexta generación (6G). . . . .	8
2.3.1. Concepto general y perspectivas futuras . . . . .	8
2.3.2. Visión específica del proyecto PREDICT-6G . . . . .	9
2.4. Tecnologías WiFi en el Contexto de 6G . . . . .	10
2.5. Planos de Control en Redes Avanzadas . . . . .	10
2.6. MDP y AICP: Conceptos Claves en Redes 6G . . . . .	10
2.6.1. Multidomain Data Plane (MDP) . . . . .	11
2.6.2. AI-driven Inter-domain Control Plane (AICP) . . . . .	11
2.7. Aplicación de IA y Machine Learning . . . . .	11
2.8. Integración y Orquestación Multi-Dominio . . . . .	12
2.9. Limitaciones Actuales y Desafíos Abiertos . . . . .	12
2.10. Proyectos Destacados . . . . .	12
2.10.1. TSN para Redes Industriales en la Industria 4.0 . . . . .	13
2.10.2. Reinforcement Learning para Time-Aware Shaping en Redes TSN . . . . .	13
2.10.3. Implementación de TSN en Redes 5G . . . . .	13
2.10.4. Hexa-X: el proyecto europeo de 6G permitirá construir un gemelo virtual del mundo real . . . . .	13

2.10.5. Proyecto MULTI-X: redes 6G con percepción ambiental inteligente . . .	14
3. ARQUITECTURA DE PREDICT-6G. . . . .	15
3.1. Arquitectura Predict-6G . . . . .	15
3.1.1. Resumen Funcional y Flujo de la Arquitectura . . . . .	16
3.1.2. Servicio de Sincronización de Tiempo (Time Sync) . . . . .	16
3.1.3. Exposición de Topología (Topology Exposure Service) . . . . .	17
3.1.4. Ingesta de Servicios (Service Ingestion) . . . . .	19
3.1.5. Configuración del Servicio (Resource Configuration) . . . . .	20
3.1.6. Automatización de Servicio (Service Automation) . . . . .	21
3.1.7. PCE (Path Computation Element) . . . . .	23
3.1.8. TE (Traffic Engineering). . . . .	24
3.1.9. Marcos Algorítmicos de Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático (AI/ML Algorithmic Frameworks) . . . . .	25
3.1.10. Marco Arquitectónico e Interfaces de ML (aprendizaje automático) (ML Architectural Framework and Interfaces). . . . .	26
3.1.11. Flujo de Provisión del Servicio en el Dominio WiFi . . . . .	29
4. IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE CONFIGURACIÓN DE RECURSOS EN EL PLANO DE CONTROL WIFI . . . . .	32
4.1. Cualidades WiFi que se están configurando y aplicación de la configuración .	33
4.2. Añadir y Eliminar Servicios. . . . .	36
4.2.1. Proceso de Añadir un Servicio . . . . .	36
4.2.2. Proceso de Eliminar un Servicio . . . . .	38
4.3. Módulos implementados. . . . .	39
4.3.1. Cliente. . . . .	39
4.3.2. Servidor . . . . .	39
4.3.3. Punto de acceso WiFi . . . . .	45
4.4. Conclusión General . . . . .	47
5. PLANIFICACIÓN . . . . .	49
6. IMPACTO SOCIOECONÓMICO . . . . .	50
6.1. Presupuesto de elaboración . . . . .	50
6.2. Impacto en la Industria y la Economía Digital. . . . .	50



6.3. Reducción de la Brecha Digital y Accesibilidad . . . . .	52
6.3.1. Sostenibilidad y Eficiencia Energética . . . . .	53
6.4. Contribución a la Innovación y el Desarrollo Tecnológico . . . . .	53
6.5. Conclusión . . . . .	54
7. MARCO REGULADOR . . . . .	55
7.1. Legislación aplicable. . . . .	55
7.2. Normativa técnica . . . . .	55
7.2.1. Ética y responsabilidad . . . . .	56
7.2.2. Propiedad intelectual. . . . .	57
8. TRABAJOS FUTUROS . . . . .	58
8.1. Optimización energética del módulo funcional desarrollado para el plano de control y gestión . . . . .	58
8.2. Fortalecimiento de la seguridad en entornos multi-dominio . . . . .	59
9. CONCLUSIÓN . . . . .	61
BIBLIOGRAFÍA . . . . .	62



## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Ejemplo de operación de <b>Time-Aware Shaper (TAS)</b> , donde las puertas de transmisión abren y cierran el acceso a diferentes colas de tráfico en momentos específicos. Imagen obtenida del estándar IEEE 802.1Qbv-2015 [18]. . . . .	6
2.2	Uso de operaciones de compuerta para reservar tiempo para tráfico TSN. Imagen obtenida del estándar IEEE 802.1Qbv-2015 [18]. . . . .	7
3.1	Arquitectura MDP-AICP [15]. . . . .	15
3.2	Diagrama de flujo de trabajo [33] . . . . .	30
4.1	Proceso de adición de un servicio WiFi ( <i>commissioning</i> ). . . . .	37
4.2	Proceso de eliminación de un servicio WiFi ( <i>decommissioning</i> ). . . . .	38
4.3	Diagrama de flujo del servidor . . . . .	39
4.4	Diagrama del end point save request . . . . .	42
4.5	Diagrama del end point delete-request . . . . .	44
4.6	Diagrama del end point return-request . . . . .	45
4.7	Diagrama de flujo del servidor AP_WiFi . . . . .	46
4.8	Diagrama de flujo del servidor WatchDog . . . . .	47
5.1	Diagrama de Gantt del desarrollo del proyecto . . . . .	49



## ÍNDICE DE TABLAS

6.1	Gastos en Recursos Humanos . . . . .	50
-----	--------------------------------------	----



# 1. INTRODUCCIÓN

El progreso de las redes móviles hacia la investigación de las redes de sexta generación (6G) representa un gran salto en términos de capacidades, arquitecturas y objetivos. A diferencia de generaciones anteriores, no se limita a aumentar el rendimiento en velocidad o cobertura, sino que busca construir una infraestructura inteligente y determinista, diseñada para ofrecer servicios con latencia garantizada, fiabilidad extrema y sincronización precisa en entornos altamente heterogéneos [5], [6].

En este contexto, surgen nuevos requisitos técnicos como la integración de inteligencia artificial (IA), la convergencia de múltiples tecnologías de acceso (5G/6G, WiFi, TSN (Time-Sensitive Networking [7])) y la necesidad de garantizar una comunicación determinista de extremo a extremo [8].

Una red determinista es aquella capaz de garantizar tiempos de transmisión predecibles y una latencia acotada, algo esencial en aplicaciones críticas como vehículos autónomos, telemedicina e industria 4.0. Las redes deterministas forman parte del concepto DetNet (Deterministic Networking) [9] definido por el IETF (Internet Engineering Task Force), que establece mecanismos de control y planificación del tráfico para garantizar la entrega de paquetes dentro de plazos estrictos.

Uno de los enfoques más destacados en la investigación sobre 6G es el del proyecto europeo **PREDICT-6G** (PRogrammable AI-Enabled DeterminIstiC neTworking for 6G) [1], que redefine el paradigma de red hacia una plataforma determinista, multi-tecnología y programable. Este proyecto plantea una arquitectura que combina dos componentes clave [10]:

1. **MDP(Multi-Domain Data Plane):** plano de datos que integra múltiples tecnologías de red en una misma infraestructura.
2. **AICP (AI-driven Inter-domain Control Plane):** plano de control basado en IA para optimizar la gestión de recursos entre dominios.

También se analiza cómo la combinación de *MDP* y *AICP* optimiza la gestión de redes WiFi.

## 1.1. Motivación y Contexto

Las redes WiFi, a pesar de su flexibilidad y amplio despliegue, presentan dificultades en el control determinista de la comunicación, debido a la naturaleza compartida del medio y la variabilidad en la calidad del enlace. Con la llegada de WiFi 6 (802.11ax) [11] y

WiFi 7 (802.11be) [12], se han introducido mejoras significativas en capacidad, eficiencia espectral y latencia.

El **plano de control** es la parte de la red encargada de la gestión, configuración y toma de decisiones, garantizando los requisitos de calidad de servicio (QoS) y latencia; es decir, actúa como el cerebro de la red [13].

## 1.2. Objetivos del Trabajo

El objetivo general de este trabajo es implementar un módulo funcional del plano de control, específicamente el **Resource Configurator**, que permite la gestión dinámica de colas en un dominio WiFi. Este módulo se alinea con el diseño funcional definido en los entregables D3.1 y D3.2 del proyecto PREDICT-6G [14], [15]. Para ello, se persiguen los siguientes objetivos específicos:

1. **Diseñar la arquitectura funcional del módulo de configuración de recursos:** Definir la estructura Cliente, Servidor, AP\_WiFi, que soporta las operaciones de commissioning y decommissioning de servicios.
2. **Implementar la API REST y los módulos del sistema:** Desarrollar en Python los módulos Cliente, Servidor y AP\_WiFi, exponiendo endpoints REST ('/save-request', '/delete-request', '/return-request') con Flask y despliegue con Waitress.
3. **Orquestrar la configuración dinámica de colas:** Implementar un sistema que reaccione automáticamente ante cambios en los servicios y actualice en tiempo real la configuración de colas del punto de acceso
4. **Incorporar mecanismos de sincronización y monitorización:** Garantizar un flujo de trabajo seguro y coherente mediante `threading.Event` para la sincronización de eventos internos y Watchdog para la detección automática de cambios en la configuración.

## 1.3. Estructura del Documento

El documento se organiza de la siguiente manera:

- **Capítulo 2 – Estado del Arte:** Revisión crítica de 6G, la visión de PREDICT-6G y tecnologías clave como DetNet, TSN, IA y arquitecturas multi-dominio.
- **Capítulo 3 – Arquitectura de PREDICT-6G:** Descripción del marco de referencia, módulos funcionales del plano de control y sus interacciones.



- **Capítulo 4 - Implementación del Módulo de Configuración de Recursos en el Plano de Control WiFi:** Se detalla la implementación práctica del módulo Resource Configurator, encargado de orquestrar dinámicamente la configuración de colas en WiFi.
- **Capítulo 5 – Planificación:** Se presenta la cronología del proyecto, junto con la estimación temporal de dedicación.
- **Capítulo 6 – Impacto Socioeconómico:** Se explica el presupuesto de elaboración del proyecto además de la evaluación del impacto potencial de la solución en la industria, sostenibilidad y desarrollo tecnológico.
- **Capítulo 7 – Marco Regulador:** Legislación aplicable, normativa técnica, ética y responsabilidad, y propiedad intelectual.
- **Capítulo 8 – Trabajos Futuros:** Se proponen mejoras orientadas a optimizar el consumo energético y fortalecer la seguridad del sistema en escenarios multi-dominio.
- **Capítulo 9 – Conclusión:** Se recogen los principales logros del trabajo y se reflexiona sobre su contribución al ecosistema de redes 6G.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo, se analiza el estado actual de las tecnologías de redes móviles y se revisan las principales tendencias y avances en la gestión del tráfico y la sincronización determinista. También se abordan los desafíos en la integración de redes heterogéneas y el papel de la inteligencia artificial en la optimización del plano de control.

### **2.1. Redes Deterministas DetNet**

Las redes deterministas [9] representan un avance significativo en el ámbito de las telecomunicaciones, ofreciendo un entorno de comunicación con latencia predecible, baja variabilidad en el retardo (jitter) y alta fiabilidad en la transmisión de datos. Estas características son esenciales para aplicaciones críticas en las que la entrega de paquetes debe garantizarse dentro de estrictos límites temporales.

Esto es realizado por el grupo de trabajo DetNet del IETF que desarrolla especificaciones para habilitar trayectos de datos con pérdida de paquetes extremadamente baja, variación de retardo acotada y latencia máxima garantizada, de modo que las comunicaciones críticas puedan circular de extremo a extremo con gran previsibilidad y control.

#### **2.1.1. Características de las Redes Deterministas**

Estas tienen una serie de atributos esenciales que las diferencian de los modelos convencionales; lo que les permite su implementación en entornos donde es muy importante la predictibilidad y la confiabilidad. Estas características son:

##### **Confiabilidad**

Una de las principales ventajas es su capacidad para garantizar la disponibilidad continua del servicio. La confiabilidad en estas redes se logra mediante mecanismos como la redundancia de caminos, la protección contra fallos y la gestión avanzada de tráfico, asegurando que la pérdida de paquetes sea mínima y que la conectividad se mantenga operativa incluso ante fallos en la infraestructura [9, Sección 3.2.2].

##### **Predictibilidad**

Una de las características clave de las redes deterministas es su capacidad para ofrecer un comportamiento de red predecible. Esto implica garantizar que los flujos de datos atraviesen la red con una latencia acotada, jitter reducido y sin pérdidas inesperadas.

Las redes deterministas pueden construirse utilizando estándares como los definidos por el grupo de trabajo DetNet del IETF [9, Sección 3.3], que especifican mecanismos técnicos para establecer rutas extremo a extremo con garantías temporales estrictas. Aunque estas redes no requieren necesariamente inteligencia artificial (IA), su combinación con técnicas de IA y aprendizaje automático (ML) puede mejorar su rendimiento: es posible anticipar la demanda de tráfico, detectar anomalías y optimizar dinámicamente la asignación de recursos.

## **Sensibilidad a la Latencia**

El tiempo de transmisión es un factor crítico en entornos donde la comunicación en tiempo real es indispensable. Para cumplir con estos requisitos, DetNet proporciona mecanismos que garantizan rutas con latencia máxima limitada, pérdida de paquetes extremadamente baja y jitter acotado [9, Sección 4.5].

Estos mecanismos pueden complementarse con tecnologías de sincronización temporal como el Precision Time Protocol (PTP) [16], definido por IEEE 1588, y su perfil IEEE 802.1AS (utilizado en redes TSN) [17], que permiten una sincronización precisa entre dispositivos. Dicha sincronización resulta esencial para coordinar el envío y recepción de datos con la mínima variación temporal posible, aumentando la predictibilidad de la red y su capacidad para soportar aplicaciones sensibles al tiempo.

## **2.2. IEEE 802.1Qbv**

Aunque el estándar IEEE 802.1Qbv (Time-Aware Shaper) [18] fue desarrollado originalmente para redes Ethernet, sus principios de gestión determinista del tráfico resultan relevantes en este trabajo, ya que permiten la asignación dinámica y precisa de recursos, garantizando así requisitos estrictos de calidad de servicio (QoS) en aplicaciones críticas. En el proyecto Predict 6G, estos conceptos se aplican al dominio WiFi mediante una implementación específica que gestiona dinámicamente la configuración de colas para servicios sensibles al tiempo.

Este estándar define un método para controlar el tráfico mediante ventanas temporales precisas, permitiendo gestionar eficientemente distintos tipos de tráfico y asegurando que se cumplan estrictamente las restricciones temporales.

### **2.2.1. Time-Aware Traffic Shaping**

Esta técnica se basa en el uso de puertas de transmisión (transmission gates) que controlan rigurosamente el acceso de las tramas al medio de transmisión según ciclos temporales precisos y predefinidos. El funcionamiento síncrono de estas puertas en toda la red se garantiza mediante el Precision Time Protocol (PTP) [16], que establece una referencia

temporal común y precisa para todos los dispositivos participantes.

A cada cola de transmisión de tráfico en un puente (Bridge) o una estación final (End Station) compatible con 802.1Qbv [18] se le asocia una puerta de transmisión específica. El estado de esta puerta (abierta o cerrada en un instante dado) determina si las tramas en esa cola particular pueden ser seleccionadas para su envío:

- **Abierta (Open):** Permite la transmisión de tramas desde la cola.
- **Cerrada (Closed):** Impide toda transmisión desde la cola.

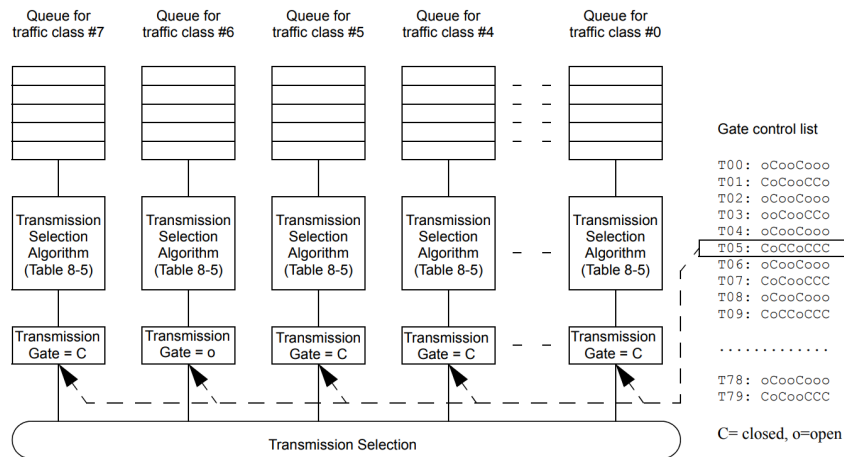


Fig. 2.1. Ejemplo de operación de **Time-Aware Shaper (TAS)**, donde las puertas de transmisión abren y cierran el acceso a diferentes colas de tráfico en momentos específicos. Imagen obtenida del estándar IEEE 802.1Qbv-2015 [18].

La apertura y cierre de estas puertas se controlan mediante operaciones específicas (Gate Control Operations), programadas temporalmente para garantizar que el tráfico crítico no sufra interferencias ni retrasos, es decir, el Time-Aware Shaper garantiza que cada tipo de tráfico acceda al medio en intervalos temporales definidos y libres de interferencia.

Dentro de la arquitectura de procesamiento de tráfico de un dispositivo, el Time-Aware Shaper es el componente funcional o entidad encargada de gestionar el estado de estas puertas de transmisión a lo largo del tiempo, decidiendo en qué intervalos temporales cada cola tiene permiso para transmitir. Para terminar de entender las palabras técnicas:

- IEEE 802.1Qbv [18] es el estándar que define las reglas y el marco para el Time-Aware Traffic Shaping.
- Time-Aware Traffic Shaping es la técnica o el concepto de controlar el tráfico basándose en ventanas de tiempo precisas, especificada por 802.1Qbv.
- El Time-Aware Shaper es el componente dentro de un dispositivo de red que ejecuta el Time-Aware Traffic Shaping, operando las puertas de transmisión según el calendario definido por 802.1Qbv y sincronizado por PTP (Precision Time Protocol) [16].

### 2.2.2. Máquinas de Estado en IEEE 802.1Qbv

Para gestionar la operación precisa de estas puertas, IEEE 802.1Qbv define tres máquinas de estado clave:

- Máquina de Estado del Temporizador de Ciclo (Cycle Timer State Machine): Gestiona la duración y sincronización de los ciclos operativos de las puertas.
- Máquina de Estado de Ejecución de Lista (List Execute State Machine): Responsable de ejecutar listas predefinidas que determinan cuándo abrir y cerrar las puertas para cada tipo de tráfico.
- Máquina de Estado de Configuración de Lista (List Config State Machine): Permite modificar dinámicamente la configuración de la programación sin interrumpir el tráfico existente.

### 2.2.3. Reservas de Tiempo para Tráfico Sensible al Tiempo (TSN)

IEEE 802.1Qbv establece ventanas reservadas exclusivamente para tráfico sensible al tiempo (TSN), evitando interferencias con otros tráficos no críticos. Este método facilita la integración eficiente de distintos tipos de tráfico sobre una infraestructura común, asegurando el cumplimiento estricto de requisitos temporales y maximizando la eficiencia del ancho de banda disponible. Además, la sincronización proporcionada por IEEE 1588 (Precision Time Protocol) permite coordinar con precisión estos flujos críticos.

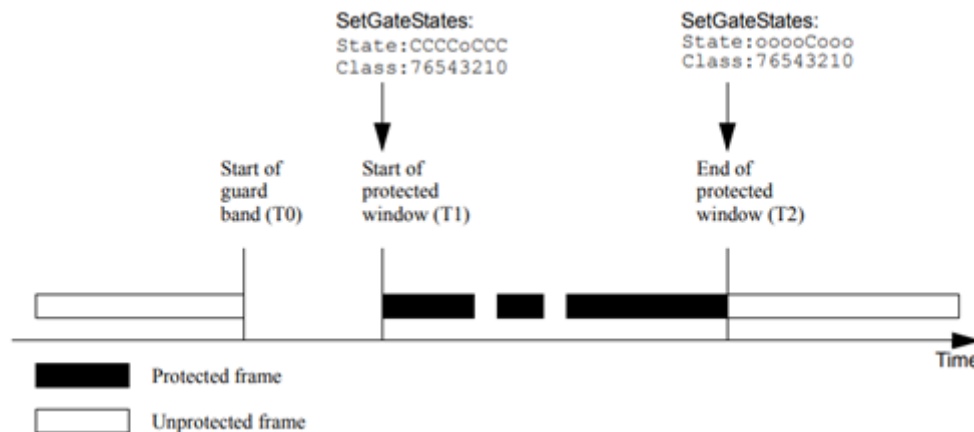


Fig. 2.2. Uso de operaciones de compuerta para reservar tiempo para tráfico TSN. Imagen obtenida del estándar IEEE 802.1Qbv-2015 [18].

## **2.3. Redes móviles de sexta generación (6G)**

### **2.3.1. Concepto general y perspectivas futuras**

La sexta generación de comunicaciones móviles (6G) ([5], [19]) se prevé para el año 2030, y está destinada a superar significativamente las capacidades del 5G actual. Según organismos como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [6], el 6G promete velocidades extremadamente altas (del orden de Tbps) [8], latencias aún menores que las actuales, conectividad global y una mayor eficiencia energética. Una característica fundamental de esta nueva generación es la integración profunda de inteligencia artificial (redes cognitivas), permitiendo que la red se “auto-optimice” en tiempo real mediante algoritmos avanzados de machine learning.

Este está diseñado para integrar diferentes tipos de redes (terrestre, aérea, satelital y submarina) en una única plataforma de comunicación. También introduce la combinación de comunicaciones con capacidades de detección ambiental y percepción (Integrated Sensing and Communication, ISC), lo que permitirá nuevos servicios como localización muy precisa y seguimiento de objetos integrados en la propia comunicación inalámbrica. Estas innovaciones buscan no solo mejorar las prestaciones técnicas, sino también avanzar en objetivos sociales y sostenibles como inclusión digital y eficiencia energética.

#### **Tecnologías clave del 6G**

Entre las tecnologías clave que habilitarán las redes 6G destacan:

- Técnicas avanzadas de antenas como Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) evolutivo y comunicación full-dúplex (comunicación bidireccional simultánea) desempeñarán un papel central en 6G [20].
- Redes totalmente virtualizadas, apoyadas en la computación en el borde (edge computing) y orquestación distribuida de recursos.
- Redes con integración nativa de IA (principio AI-native), capaces de aprender y adaptarse dinámicamente.
- Gemelos digitales para modelar la red y predecir comportamientos futuros.
- Tecnologías avanzadas de seguridad, incluyendo arquitecturas de confianza cero (Zero Trust) y criptografía poscuántica.

#### **Casos de uso previstos para el 6G**

Habilitará casos de uso altamente avanzados, entre los que destacan:

- Comunicaciones holográficas en tiempo real y experiencias de realidad extendida (XR) hiperrealistas.

- Redes ultra-confiables de baja latencia para aplicaciones críticas como telecirugía remota, robótica colaborativa en industria, y vehículos autónomos interconectados
- Comunicación ultra-masiva (UMC), extendiendo el Internet de las Cosas (IoT) a escala global, incluyendo aplicaciones industriales y ciudades inteligentes.
- Servicios inteligentes personalizados basados en IA y percepción ambiental integrada en la red.

Entre los grandes retos técnicos que enfrenta el desarrollo del 6G están la propagación en frecuencias extremadamente altas, la eficiencia energética, la integración compleja entre distintos dominios tecnológicos, la seguridad avanzada y la armonización global de estándares.

### **2.3.2. Visión específica del proyecto PREDICT-6G**

El proyecto europeo PREDICT-6G se enfoca específicamente en el desarrollo de redes 6G con características deterministas. Según la visión del proyecto, la próxima generación de comunicaciones no solo aumentará la velocidad, sino que asegurará de forma estricta comportamientos predecibles y fiables en aspectos como latencia y fiabilidad extremo a extremo. La red planteada por PREDICT-6G [10] integrará diversas tecnologías (redes celulares 5G/6G, WiFi, Ethernet industrial TSN– Time-Sensitive Networking) en un único sistema capaz de cumplir acuerdos muy rigurosos de nivel de servicio (SLAs) en diferentes entornos tecnológicos y operadores.

PREDICT-6G define el 6G como una red determinista multi-tecnología y multi-dominio, donde servicios críticos puedan atravesar múltiples redes sin perder sus estrictas garantías de calidad. Para lograr este objetivo, el proyecto desarrolla:

- Plano de datos determinista multi-tecnología (Multi-Domain Deterministic Data Plane, MDP): Integra estándares emergentes como DetNet (Deterministic Networking) y permite tratamiento uniforme de datos entre diferentes redes (5G, WiFi, TSN), asegurando sincronización temporal y calidad constante.
- Plano de control inter-dominio impulsado por IA (AI-driven Inter-domain Control Plane, AICP): Un sistema inteligente capaz de seleccionar rutas óptimas a través de múltiples dominios, adaptándose en tiempo real para cumplir requisitos estrictos como latencia y variabilidad mínima.
- Gemelo digital potenciado con IA: Una réplica virtual de la red que permite anticiparse a problemas futuros mediante simulación predictiva, ayudando a mantener las garantías deterministas en cualquier situación.

En síntesis, para PREDICT-6G, la esencia del 6G radica en proporcionar comunicaciones con garantías extremas de calidad y predictibilidad, esenciales para aplicaciones futuras como vehículos autónomos, telemedicina y automatización industrial avanzada [10].

## 2.4. Tecnologías WiFi en el Contexto de 6G

Con la evolución de las tecnologías WiFi hacia estándares como **WiFi 6 (802.11ax)** [11] y **WiFi 7 (802.11be)** [12], estas tecnologías han demostrado ser una pieza clave en el ecosistema 6G. WiFi 6 y 7 ofrecen mejoras significativas en términos de capacidad, latencia y eficiencia energética, siendo fundamentales para aplicaciones de alta densidad como hogares inteligentes y entornos industriales. Por ejemplo, WiFi 7 permitirá comunicaciones deterministas en entornos industriales como alternativa o complemento a redes celulares dedicadas, facilitando un despliegue flexible y rentable en fábricas inteligentes.

El uso del espectro no licenciado y su capacidad para coexistir con redes celulares convierten a las tecnologías WiFi en un complemento esencial dentro de arquitecturas heterogéneas. En particular, la integración de WiFi en redes 6G requiere un plano de control que garantice una coordinación eficiente con las redes celulares y otros sistemas heterogéneos.

## 2.5. Planos de Control en Redes Avanzadas

El plano de control es el componente encargado de gestionar la configuración, operación y optimización de la red. En el contexto de redes 6G, debe:

- **Garantizar la sincronización de tiempo y la exposición de topología**, esenciales para la comunicación determinista [16], [17].
- **Gestionar la interoperabilidad entre múltiples dominios tecnológicos**. [13]
- **Optimizar el tráfico en tiempo real**, adaptándose dinámicamente a las condiciones de la red [5].

Existen dos enfoques principales en la gestión del plano de control:

- **Centralizado**: Un controlador único gestiona toda la red, ofreciendo mayor control, pero con menor escalabilidad.
- **Distribuido**: Cada dominio gestiona su tráfico de manera autónoma, facilitando la escalabilidad y la resiliencia.

Este enfoque híbrido es el que sigue la arquitectura de PREDICT-6G, con AICP como plano de control distribuido coordinado por IA.

## 2.6. MDP y AICP: Conceptos Claves en Redes 6G

Para garantizar una gestión eficiente en redes 6G, se han introducido los conceptos de **Multidomain Data Plane (MDP)** y **AI-driven Inter-domain Control Plane (AICP)**.



### 2.6.1. Multidomain Data Plane (MDP)

El MDP [21] proporciona una capa de abstracción sobre la infraestructura física de la red, facilitando la transmisión de datos en entornos multi-tecnología. Sus objetivos principales son:

- Unificar la gestión del tráfico en distintos dominios tecnológicos.
- Mejorar la eficiencia en la transmisión de datos mediante mecanismos deterministas.
- Facilitar la integración de tecnologías heterogéneas como WiFi, redes 5G, redes de datos basadas en IP, redes deterministas como DetNet, etc.

Permite establecer caminos extremo a extremo con garantía de latencia y fiabilidad definida, incluso en redes heterogéneas.

### 2.6.2. AI-driven Inter-domain Control Plane (AICP)

El AICP [14] es el plano de control basado en inteligencia artificial, encargado de la toma de decisiones en la red. Funciones clave:

- Orquestación multi-dominio mediante inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML) que permite al sistema aprender patrones y comportamientos a partir de los datos de la red para mejorar la toma de decisiones sin ser programado explícitamente para cada escenario.
- Predicción y optimización del tráfico en tiempo real.
- Coordinación con el MDP para garantizar una asignación eficiente de recursos.

Este plano de control depende en gran medida de técnicas de inteligencia artificial, que analizamos en la siguiente sección.

## 2.7. Aplicación de IA y Machine Learning

Incorporar algoritmos de inteligencia artificial y técnicas de machine learning [22] se ha convertido en una pieza clave para gestionar la complejidad de las redes 6G. Las principales aplicaciones incluyen:

- **Predicción de tráfico y rendimiento:** Mejora de la gestión del tráfico y la optimización de recursos.
- **Aprendizaje federado:** Permite entrenar modelos distribuidos manteniendo la privacidad de los datos.

- **Optimización de recursos en tiempo real:** Adaptación automática a los cambios en el entorno de red.

Estas capacidades de IA se integran de forma nativa en 6G bajo el paradigma ‘AI-native network’, concepto que distingue a esta generación de las anteriores [6].

## 2.8. Integración y Orquestación Multi-Dominio

Un aspecto crucial en las redes 6G es la integración de diferentes dominios tecnológicos, como WiFi, redes 5G y otras tecnologías emergentes. Herramientas como NETCONF/YANG [13] y soluciones de orquestación basadas en Kubernetes [2] desempeñan un papel clave en la compatibilidad entre dominios.

Los estándares existentes permiten gestionar infraestructuras heterogéneas, aunque se requieren nuevas estrategias para garantizar una orquestación fluida y eficiente en tiempo real. Uno de los retos actuales es lograr que esta orquestación cumpla requisitos deterministas de latencia, especialmente cuando se combinan tecnologías con niveles de servicio muy dispares.

## 2.9. Limitaciones Actuales y Desafíos Abiertos

A pesar de los avances en la investigación sobre las redes 6G, persisten desafíos significativos:

- **Limitaciones en dominios WiFi:** La falta de soluciones específicas para la integración de WiFi en arquitecturas 6G limita su potencial [11], [12].
- **Sincronización de tiempo:** Los mecanismos actuales no siempre garantizan un determinismo adecuado en entornos heterogéneos [16], [17].
- **IA/ML(inteligencia artificial y aprendizaje automático) en entornos multi-dominio:** La implementación eficiente de modelos de IA/ML. Requiere modelos distribuidos y federados que mantengan coherencia sin saturar los canales de control, lo cual aún es un campo de investigación activa [23].
- **Gestión de energía:** Donde tenemos un alto consumo energético en redes con IA [19].

Estos retos definen el rumbo de las futuras investigaciones y desarrollos.

## 2.10. Proyectos Destacados

A continuación, se presentan algunos proyectos y estudios relevantes que abordan la implementación y aplicación del estándar **IEEE 802.1Qbv** y el *Time-Aware Traffic*

*Shaping* en diversas áreas:

Esta sección recoge iniciativas representativas centradas en la integración del estándar IEEE 802.1Qbv [18] como mecanismo fundamental para habilitar comunicaciones deterministas en arquitecturas 6G y entornos críticos.

#### **2.10.1. TSN para Redes Industriales en la Industria 4.0**

Las arquitecturas de plano de control en redes 6G heredan principios del SDN, como la separación entre planos de datos y control, lo que permite una gestión dinámica de recursos en dominios heterogéneos. Sin embargo, como señala Sood (2017), la escalabilidad en entornos masivamente distribuidos, como las redes WiFi integradas en 6G, sigue siendo un desafío abierto. Este estudio explora la implementación de TSN en redes industriales, destacando su papel en la evolución hacia la Industria 4.0 y su capacidad para garantizar comunicaciones deterministas en entornos de manufactura avanzada [24].

#### **2.10.2. Reinforcement Learning para Time-Aware Shaping en Redes TSN**

Este estudio investiga el uso de técnicas de **Reinforcement Learning** [23] para optimizar la programación basada en el tiempo en redes TSN, buscando mejorar la eficiencia y el rendimiento de la transmisión de datos sensibles al tiempo. Para garantizar QoS (calidad de servicio) en escenarios críticos (ej: vehículos autónomos conectados vía WiFi-6G), técnicas como TSN podrían integrarse en el plano de control, tal como se ha validado en entornos Automotive Ethernet.

#### **2.10.3. Implementación de TSN en Redes 5G**

Este proyecto investiga cómo las redes 5G pueden beneficiarse de la integración de TSN para mejorar la transmisión de datos en aplicaciones críticas, analizando casos de uso y desafíos técnicos [25].

#### **2.10.4. Hexa-X: el proyecto europeo de 6G permitirá construir un gemelo virtual del mundo real**

El proyecto europeo Hexa-X [26], financiado por la Unión Europea y coordinado por Nokia, propone una arquitectura 6G que permita construir un gemelo virtual del mundo físico, aplicando técnicas avanzadas de orquestación, sincronización y control inteligente. Con un fuerte enfoque en la gestión de la innovación, Hexa-X identifica oportunidades estratégicas clave para el desarrollo tecnológico en entornos 6G, incluyendo la integración de redes heterogéneas, la sincronización precisa y la automatización con IA.

Estos proyectos proporcionan una visión amplia de las aplicaciones y desarrollos actuales relacionados con IEEE 802.1Qbv y Time-Aware Traffic Shaping, destacando su relevancia en diversos sectores tecnológicos [27].

#### **2.10.5. Proyecto MULTI-X: redes 6G con percepción ambiental inteligente**

El proyecto europeo **MultiX** [28], coordinado por la Universidad Carlos III de Madrid y financiado por el programa *Horizon Europe*, propone una arquitectura RAN 6G capaz de actuar como un “observador inteligente del entorno”. Esta red sensorizada integrará comunicaciones y detección (ISAC) mediante tecnologías heterogéneas como Wi-DAR, radar o cámaras, todas ellas coordinadas por un plano de control avanzado (MP6RC) que permitiría gestionar la movilidad y los recursos de forma determinista. Esta propuesta guarda una relación directa con los principios de TSN y el estándar IEEE 802.1Qbv, ya que introduce mecanismos de temporización precisa, programación adaptativa y garantía de calidad de servicio, fundamentales para los casos de uso que persigue MultiX.

Entre sus aplicaciones se incluyen la monitorización remota de pacientes en entornos domésticos, la gestión adaptativa de redes en ciudades inteligentes o la coordinación segura de robots en fábricas inteligentes. El proyecto también explora el uso de algoritmos de inteligencia artificial para optimizar la eficiencia energética y la toma de decisiones en tiempo real, lo que lo convierte en una iniciativa pionera en la convergencia entre **redes deterministas, sensores inteligentes y control distribuido basado en IA** [29] [30].

### 3. ARQUITECTURA DE PREDICT-6G

Este capítulo presenta la arquitectura funcional propuesta por el proyecto europeo PREDICT-6G, centrada en el diseño de un plano de control inteligente para redes deterministas de sexta generación. La arquitectura se basa en una coordinación distribuida de módulos especializados que gestionan tareas clave como la sincronización temporal, la automatización del ciclo de vida de servicios, el cálculo de rutas extremo a extremo, la orquestación entre dominios heterogéneos y la optimización mediante técnicas de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML). Toda la información y descripción técnica incluida en este capítulo está fundamentada en los entregables oficiales del proyecto PREDICT-6G [14], [15].

#### 3.1. Arquitectura Predict-6G

PREDICT-6G propone una arquitectura orientada a ofrecer comunicaciones deterministas extremo a extremo (E2E) en entornos heterogéneos mediante un plano de control inteligente y distribuido. Esta solución se estructura en torno a dos componentes fundamentales: el Multidomain Data Plane (MDP) [14], que unifica y abstrae las tecnologías de red subyacentes, y el Plano de Control Interdominio Basado en IA (AICP) [15], encargado de orquestar servicios y recursos de forma dinámica y eficiente mediante técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático.

El plano de control AICP (Plano de Control Interdominio Basado en IA) está compuesto por múltiples módulos funcionales que permiten gestionar aspectos críticos como la sincronización temporal, el cálculo de rutas, la configuración de recursos, la exposición de topología, la automatización de servicios y el análisis predictivo para la gestión de la red determinista.

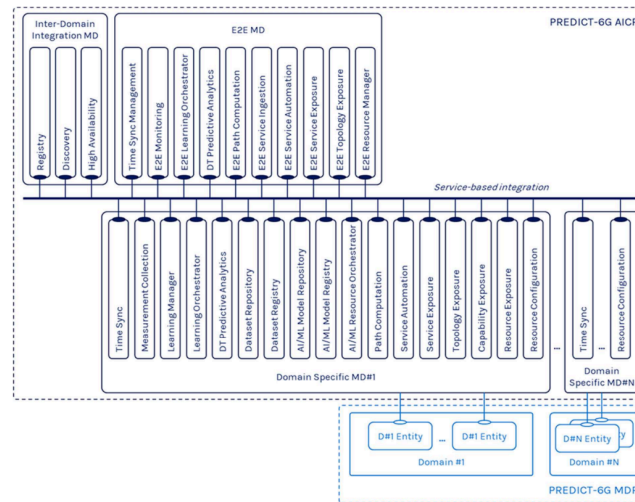


Fig. 3.1. Arquitectura MDP-AICP [15].

### 3.1.1. Resumen Funcional y Flujo de la Arquitectura

Cada módulo de la arquitectura [14], [15] cumple una función específica dentro del ciclo de vida del servicio, interactuando con otros a través de interfaces bien definidas. El flujo funcional de la arquitectura puede resumirse de la siguiente forma:

1. El usuario o sistema externo realiza una solicitud de servicio mediante el módulo de **Ingesta de Servicios**, que valida la petición y la transmite al módulo de **Automatización del Servicio**.
2. El módulo de **Automatización** coordina el despliegue E2E, solicitando al **PCE** (Path Computation Element) el cálculo de una ruta óptima que cumpla con los requisitos de QoS (calidad de servicio), y utilizando información actualizada del estado de red desde el módulo de **Exposición de Topología**.
3. Una vez calculada la ruta, el **Módulo de Configuración de Recursos** se encarga de asignar los recursos necesarios en cada dominio, consultando a otros servicios como los de capacidades y disponibilidad.
4. Durante la ejecución del servicio, el módulo de **Ingeniería de Tráfico** (TE) supervisa el uso eficiente de los recursos y puede proponer reconfiguraciones si se detectan congestiones.
5. Simultáneamente, los marcos de **IA/ML** (inteligencia artificial y aprendizaje automático) recogen métricas de rendimiento, entrenan modelos predictivos y facilitan decisiones automáticas en tiempo real.
6. Finalmente, si el servicio debe ser modificado o terminado, los mismos módulos colaboran para actualizar o dismantelar los recursos, liberar capacidad de red y mantener la coherencia del sistema.

Esta organización jerárquica se apoya en tres pilares fundamentales: el desacoplamiento funcional, la automatización inteligente y la abstracción inter-dominio. Gracias a ello, la arquitectura permite una gestión ágil, robusta y escalable de servicios deterministas sobre redes 6G que integran tecnologías como WiFi, TSN (Time-Sensitive Networking), 3GPP (3rd Generation Partnership Project) y otras futuras.

A continuación, se describen estos módulos en detalle.

### 3.1.2. Servicio de Sincronización de Tiempo (Time Sync)

La sincronización de tiempo [15] es esencial para garantizar que todos los elementos de la red compartan una referencia temporal común, permitiendo que las operaciones sensibles al tiempo se ejecuten de forma coordinada y con baja latencia.

Dos módulos clave colaboran para lograr una sincronización de tiempo completa:

## Módulo de Sincronización de Tiempo Extremo a Extremo (E2E)

El Módulo de Sincronización de Tiempo Extremo a Extremo (E2E) actúa como el orquestador global de sincronización en la red, gestionando las operaciones de sincronización a través de múltiples dominios tecnológicos. Algunas de sus principales funciones son:

- **Recolección de configuración y capacidades de sincronización por dominio:** Se comunica con cada dominio de la red para recolectar información sobre sus capacidades de sincronización temporal, como precisión soportada y compatibilidad con protocolos como PTP (Precision Time Protocol) [16].
- **Configuración de roles Gran Maestro (GM) Líder y Seguidor:** Evalúa las capacidades de los nodos y asigna roles apropiados para asegurar una jerarquía de sincronización efectiva.
- **Monitoreo continuo del estado de sincronización:** Supervisa el estado de sincronización tanto a nivel de dominio como a nivel global (extremo a extremo), asegurando que todos los nodos permanezcan dentro de los márgenes de sincronización definidos.

## Módulo de Sincronización de Tiempo para el Dominio Tecnológico

Recibiendo instrucciones del módulo Sincronización de Tiempo Extremo a Extremo (E2E), este componente gestiona la sincronización temporal dentro de un dominio tecnológico específico (por ejemplo WiFi) y aplica las configuraciones necesarias para mantener la coherencia temporal. Sus responsabilidades incluyen:

- **Recolección de capacidades internas:** Al recibir consultas desde el Módulo de Gestión de Sincronización de Tiempo Extremo a Extremo, recupera información sobre las capacidades de sincronización disponibles en el dominio.
- **Configuración de parámetros de sincronización:** Aplica las configuraciones necesarias para definir roles como Líder o Seguidor y garantizar una sincronización correcta.
- **Monitoreo y reporte del estado temporal:** Supervisa continuamente el estado de sincronización en el dominio y lo reporta de vuelta al módulo E2E (extremo a extremo) para asegurar la coordinación global.

### 3.1.3. Exposición de Topología (Topology Exposure Service)

La Exposición de Topología [15] es un módulo esencial que proporciona a otros componentes del AICP (Plano de Control Interdominio Basado en IA) una visión actualizada,

coherente y abstracta de la topología de la red, incluyendo tanto la conectividad física como información relevante sobre recursos y capacidades asociadas a los nodos y enlaces. Esta funcionalidad es clave para la planificación de rutas, la gestión de recursos y la toma de decisiones a nivel inter e intra-dominio.

Este servicio permite traducir las representaciones tecnológicas específicas de cada dominio en modelos homogéneos y abstractos, facilitando la interoperabilidad entre dominios tecnológicos heterogéneos (por ejemplo, Wi-Fi, TSN, 3GPP).

- **Recopilación de Información Topológica:** El módulo obtiene información sobre los elementos de red (nodos y enlaces) a través de múltiples mecanismos, como protocolos de descubrimiento (por ejemplo, LLDP (Link Layer Discovery Protocol), BGP-LS (Border Gateway Protocol with Link State)), APIs (Application Programming Interface) del dominio tecnológico o sistemas externos como controladores SDN o gestores de inventario.
- **Cache Interna:** La topología recopilada se almacena en una caché local que se actualiza dinámicamente, ya sea mediante peticiones periódicas o mediante suscripciones a notificaciones de eventos, asegurando así la consistencia y actualidad de los datos.
- **Lógica de Abstracción y Traducción:** Convierte la información específica del dominio en un modelo topológico unificado, siguiendo modelos estándar como los definidos por el IETF (Internet Engineering Task Force). Esta abstracción puede aplicarse con distintos niveles de granularidad dependiendo de si la topología será utilizada a nivel local o E2E.
- **Interfaces Norte-Sur (NBI/SBI):** Existen interfaces REST (Representational State Transfer) o RPC (Remote Procedure Call) tanto para obtener como para exponer la topología, permitiendo interacciones con otros módulos. Las interfaces soportan operaciones de consulta y suscripción para recibir notificaciones sobre cambios en la topología.
- **Exposición de Topología Abstracta:** A través de su interfaz norte, el módulo proporciona una vista abstracta y uniforme de la red que puede ser consumida por otros módulos del AICP (Plano de Control Interdominio Basado en IA), como el módulo de cálculo de rutas E2E o el de configuración de recursos.

Este servicio puede operar tanto a nivel de dominio tecnológico como a nivel E2E, proporcionando abstracción topológica adaptada a cada caso. En el nivel E2E, por ejemplo, la topología puede representarse como una secuencia de nodos abstractos (uno por dominio), mientras que a nivel local puede incluir cada dispositivo de red individual.



### 3.1.4. Ingesta de Servicios (Service Ingestion)

La Ingesta de Servicios (Service Ingestion) [15] constituye el punto de entrada principal del plano de control AICP (Plano de Control Interdominio Basado en IA) para la provisión y desmantelamiento de servicios deterministas extremo a extremo (E2E). Este módulo expone las interfaces de gestión de servicios extremo a extremo a usuarios externos, ya sean operadores humanos o aplicaciones automatizadas (por ejemplo, controladores industriales), y es responsable de validar, procesar y registrar todas las solicitudes relacionadas con el ciclo de vida de dichos servicios.

Funcionalidades principales:

- **Validación de solicitudes de servicio:** La validación de solicitudes de servicio se lleva a cabo en varias fases, incluyendo la verificación de sintaxis (estructura del mensaje), la autenticación del solicitante y el análisis del modelo del servicio. En caso de éxito, la solicitud se transforma en un modelo estructurado (basado en YANG) y se remite a los módulos correspondientes para su ejecución.
- **Gestión del ciclo de vida del servicio:** Este módulo soporta las operaciones de provisión (POST), desmantelamiento (DELETE) y actualización (UPDATE) de servicios E2E(extremo a extremo), coordinando los pasos iniciales necesarios antes de que el módulo de Automatización se haga cargo del despliegue.
- **Interfaz REST Norte (NBI):** Las solicitudes se reciben mediante una API REST (Application Programming Interface Representational State Transfer) definida en base al estándar OpenAPI, y gestionada mediante frameworks como FastAPI.

Componentes internos del módulo:

- **Lógica de Prevalidación:** También conocida como *Request Pre-Validator*, esta lógica divide cada solicitud en dos partes: una dirigida a la autenticación del solicitante, y otra para el análisis del modelo del servicio. Además, se encarga de ensamblar las respuestas y de registrar los resultados en el *Request Status Register*.
- **Lógica de Autenticación:** Comprueba las credenciales y el nivel de privilegio del usuario mediante una plataforma IAM centralizada (por ejemplo, Keycloak), lo cual asegura una gestión segura de las solicitudes.
- **Lógica de Análisis de Solicitud (Request Parsing Logic):** Valida la estructura semántica del modelo de servicio recibido. En caso de una solicitud de desmantelamiento, este análisis es mínimo. En cambio, en una provisión, se analiza un modelo completo del servicio representado en JSON/XML con base en el esquema YANG definido en el apéndice técnico

- **Registro de Estado de Solicitudes (Request Status Register):** Lleva un registro de cada solicitud procesada, incluyendo su estado actual, tipo de operación (PROVISION, DECOMMISSION, UPDATE), ID del solicitante, y mensajes informativos como errores o confirmaciones. Esta información se mantiene en una base de datos optimizada para series temporales.
- **Clientes (SBI Clients):** Interfaces internas que permiten la comunicación con otros módulos del AICP (Plano de Control Interdominio Basado en IA). El cliente IAM (Identity and Access Management) interactúa con el sistema de identidad, mientras que el cliente de Automatización de Servicios permite pasar la solicitud a los módulos de despliegue E2E correspondientes.

APIs (Application Programming Interface) expuestas (NBI):

- POST /provision: Inicia la provisión de un nuevo servicio E2E.
- DELETE /decommission: Solicita la eliminación de un servicio identificado por su ID.
- UPDATE /update: Permite modificar parámetros de un servicio existente.
- GET /status: Devuelve el estado de una o varias solicitudes.

Este módulo es indispensable para garantizar un control coherente y seguro sobre la creación y gestión de servicios deterministas en entornos multi-dominio, siendo fundamental en todos los casos de uso del proyecto.

### 3.1.5. Configuración del Servicio (Resource Configuration)

El módulo de Configuración de Recursos [15] es un componente central del plano de control AICP (Plano de Control Interdominio Basado en IA), cuya finalidad es traducir los requisitos de un servicio determinista extremo a extremo (E2E) en configuraciones específicas por dominio, ajustadas a la tecnología subyacente en cada uno. Este módulo es responsable de garantizar que los recursos de red (nodos, enlaces, colas, buffers) se configuren correctamente para satisfacer las necesidades de calidad de servicio (QoS), latencia y sincronización del servicio solicitado.

Función principal: Implementa el *Resource Configuration Management Service* (MS), que recibe las solicitudes de configuración desde el módulo de Automatización de Servicios y ejecuta las acciones necesarias para configurar los recursos del plano de datos en los dominios tecnológicos correspondientes.

Flujo de trabajo del módulo:

1. El **MS de Automatización de Servicios** envía una solicitud de asignación de recursos de ruta (Path Resource Allocation) al módulo de Configuración de Recursos.

2. El módulo solicita información a otros MS para llevar a cabo la configuración:
  - **Topología (Topology Exposure MS):** Solicita el grafo topológico del dominio tecnológico implicado.
  - **Recursos disponibles (Resource Exposure MS):** Consulta qué recursos están disponibles en cada nodo del camino.
  - **Capacidades (Capability Exposure MS):** Solicita las capacidades específicas de los nodos que forman parte del camino.
3. Con toda esta información, el módulo genera una configuración óptima adaptada a los requisitos del servicio y la estructura del dominio.
4. Finalmente, esta configuración se transmite a la interfaz sur (South Bound Interface), la cual genera los archivos y comandos que se envían al plano de datos para ejecutar físicamente los cambios necesarios.

Otras funcionalidades clave:

- **Respuesta de estado de configuración:** El módulo puede responder al dominio de gestión E2E con una estimación de la capacidad de cumplir con los KPI definidos para el servicio.
- **Monitorización del uso de recursos:** Durante la prestación del servicio, el módulo reporta métricas de utilización de los recursos configurados, ayudando a garantizar su funcionamiento dentro de los límites deseados.
- **Interfaz sur (SBI):** Aunque no está completamente implementada en la versión actual, está previsto que este módulo genere los scripts de configuración que serán enviados directamente al plano de datos mediante APIs (Application Programming Interface) o protocolos específicos por tecnología (por ejemplo, tc para WiFi, NETCONF para routers SDN, etc.).

Este módulo es particularmente relevante en el contexto de este trabajo, ya que se ha implementado una adaptación funcional de su lógica al dominio WiFi mediante el módulo **Resource Configurator**, desarrollado específicamente para gestionar dinámicamente la configuración de colas en puntos de acceso.

### 3.1.6. Automatización de Servicio (Service Automation)

Forma una parte esencial del plano de control AICP (Plano de Control Interdominio Basado en IA), y tiene como objetivo garantizar el despliegue correcto, mantenimiento continuo y finalización adecuada de los servicios deterministas extremo a extremo (E2E) sobre múltiples infraestructuras tecnológicas heterogéneas.

Este módulo está compuesto por dos Servicios de Gestión (MS) [15]:

- **MS de Automatización del Servicio E2E:** Supervisa la implementación y la gestión de un servicio determinista a lo largo de todos los dominios tecnológicos involucrados. Además, resuelve posibles conflictos entre dominios y coordina las operaciones E2E de aprovisionamiento y desmantelamiento.
- **MS de Automatización del Servicio MD (por dominio):** Interactúa con cada dominio tecnológico específico (por ejemplo, WiFi, TSN o 5G) para llevar a cabo la automatización en bucle cerrado del servicio dentro de dicho dominio.

#### **Fases gestionadas por el módulo:**

- **Provisionamiento de servicios:** Este proceso inicial configura los dominios tecnológicos implicados para cumplir con los requisitos definidos en la solicitud del servicio (QoS (calidad de servicio), latencia, fiabilidad, etc.).
- **Garantía de servicio (Service Assurance):** Durante la vida útil del servicio, se implementan mecanismos de bucle cerrado que supervisan continuamente su rendimiento. Estos mecanismos recopilan KPIs (Key Performance Indicators) desde el MS de Monitorización y permiten reconfiguraciones si se detectan desviaciones.
- **Terminación del servicio:** Permite eliminar el servicio una vez alcanzado su tiempo de vida o por petición expresa del usuario. La terminación incluye liberar los recursos, actualizar el estado del servicio y notificar al resto de MS implicados.

#### **Interacciones clave del MS de Automatización:**

- **Recibe:** Solicitudes desde el MS de Ingesta de Servicios E2E, cálculo de rutas desde el MS Path Computation, y predicciones de KPIs (Key Performance Indicators) desde el motor de análisis predictivo (Digital Twin Predictive Analytics).
- **Envía:** Configuraciones iniciales al MS de Configuración de Recursos, actualizaciones al MS de Exposición de Servicios, y notificaciones al MS de Monitorización y a los motores de IA/ML (inteligencia artificial y aprendizaje automático) para gestionar ajustes proactivos.

Esta arquitectura de doble nivel (E2E y por dominio) permite que las decisiones de gestión puedan tomarse tanto de forma centralizada como local, fomentando la escalabilidad y flexibilidad del sistema. Además, el modelo de bucle cerrado asegura la autonomía operativa del sistema, donde la detección de problemas, la decisión de soluciones y su ejecución pueden automatizarse casi por completo.

### 3.1.7. PCE (Path Computation Element)

El módulo **Path Computation Element (PCE)** [15] es responsable del cálculo de rutas óptimas extremo a extremo (E2E) sobre una topología abstracta multi-dominio. Este proceso tiene en cuenta múltiples métricas y restricciones impuestas por el servicio, como latencia, jitter, pérdida de paquetes, capacidad de los nodos y fiabilidad, de forma que las rutas generadas cumplan con los requisitos deterministas solicitados por el usuario.

#### Arquitectura Funcional del PCE E2E

El PCE E2E está compuesto por los siguientes bloques funcionales:

- **Servidor e Interfaz MS:** Implementa una interfaz REST que recibe solicitudes de cálculo de rutas desde el módulo de Automatización de Servicios E2E. Esta interfaz desencadena el proceso de cómputo.
- **Interfaces Cliente de MS:** Contiene las interfaces hacia otros módulos de gestión (MS), como Exposición de Topología, el módulo Predictivo basado en IA (Predictive & Decision MS), los MS de Automatización de Servicio de cada dominio y el Gemelo Digital E2E (DT). Estas interfaces soportan operaciones CRUD (Create, Read, Update, Delete) sobre los datos topológicos y de rutas.
- **Inventario y Topología:** Estos bloques internos mantienen la visión abstracta de la topología E2E y el inventario de recursos, que son recuperados desde el módulo de Exposición de Topología.
- **Motor de Cálculo y Decisión de Rutas:** Este motor calcula caminos E2E candidatos utilizando el modelo de topología abstracta, el inventario, y los requisitos del servicio. Puede además apoyarse en módulos IA para mejorar el rendimiento mediante técnicas de predicción inteligente. También gestiona la solicitud de caminos locales a cada MS de Automatización de Servicio por dominio y compone los resultados en una o varias rutas E2E completas.
- **Interacción con el Key Performance Indicators para validación de KPIs (Key Performance Indicators):** Las rutas candidatas generadas son enviadas al módulo de Gemelo Digital (DT) para una estimación de su rendimiento respecto a los KPIs. El camino más adecuado es seleccionado y enviado de vuelta al MS de Automatización para su despliegue.

**PCE por dominio:** Además del PCE E2E, cada dominio tecnológico puede implementar su propio PCE local encargado de calcular rutas internas. Estos PCE locales colaboran con el PCE E2E para componer rutas completas y consistentes a través de toda la red.

Este módulo permite una orquestación eficiente y automatizada del cálculo de caminos adaptado a servicios deterministas, integrando múltiples dominios tecnológicos como TSN, WiFi, 5G y más. Además, la colaboración con el módulo predictivo basado en IA posibilita un cómputo de rutas más dinámico, ajustado a condiciones cambiantes de la red.

### 3.1.8. TE (Traffic Engineering)

Su objetivo [31] es optimizar el flujo de datos en la red de manera que se aprovechen de forma eficiente los recursos disponibles, se reduzcan las congestiones y se mantengan los requisitos de calidad de servicio (QoS) establecidos para los servicios deterministas extremo a extremo (E2E).

Este módulo [15] actúa en coordinación con otros elementos del plano de control, como el Path Computation Element (PCE), los módulos de Monitorización y el motor de predicción basado en IA. TE se encarga de aplicar políticas activas que aseguren el comportamiento deseado del tráfico, especialmente bajo condiciones de carga variable, múltiples dominios tecnológicos y topologías complejas.

#### **Responsabilidades clave del módulo TE:**

- **Admisión de tráfico:** Evalúa si un nuevo flujo puede ser aceptado sin comprometer el rendimiento de flujos ya existentes. Para ello, aplica políticas de control en los puntos de entrada del dominio.
- **Gestión de recursos:** Supervisa el uso de enlaces y nodos en base a métricas como la utilización del ancho de banda, latencia, jitter y pérdida de paquetes, y propone reconfiguraciones si se identifican cuellos de botella.
- **Reconfiguración dinámica:** Puede sugerir reencaminamiento o reajustes de recursos ante degradación del servicio o congestión incipiente. Esto se hace en colaboración con el PCE, que puede calcular nuevas rutas más óptimas.
- **Interacción con mecanismos de QoS (calidad de servicio):** Se coordina con configuraciones específicas del dominio (por ejemplo, mecanismos de colas y TSN), incluyendo el uso de compuertas de transmisión temporizadas para colas de tráfico determinista, según lo especificado en IEEE 802.1Qbv [18]. Estos mecanismos permiten una planificación precisa del tráfico mediante la definición de ciclos de transmisión y control granular sobre las ventanas temporales habilitadas para cada clase de tráfico.

**Ejemplo de aplicación en escenarios WiFi:** En dominios inalámbricos, donde las condiciones del canal son altamente variables, TE implementa mecanismos de adaptación mediante control de admisión inteligente en los puntos de acceso (AP), evitando

saturaciones. Cuando se dispone de visibilidad topológica y de capacidades (por ejemplo, a través de controladores SDN), se aplican configuraciones dinámicas que incluyen el ajuste de pesos de colas, modelado de tráfico o redirección de servicios no críticos.

Este módulo, junto con las capacidades de predicción y monitorización continua, forma parte del ciclo de automatización en bucle cerrado, siendo clave para garantizar el rendimiento sostenido de los servicios E2E deterministas en redes heterogéneas.

### 3.1.9. Marcos Algorítmicos de Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático) AI/ML Algorithmic Frameworks)

Esta subsección detalla los marcos y algoritmos diseñados para mejorar el rendimiento y la eficiencia de los procesos de aprendizaje automático (ML) en redes distribuidas y entornos multi-dominio [15], optimizando el uso de recursos y reduciendo el consumo energético.

#### Orquestación de Ejecución de Tareas de Aprendizaje Automático

La orquestación de tareas de ML se encarga de coordinar el entrenamiento distribuido de modelos, facilitando la interacción entre múltiples nodos y dominios administrativos. Algunas de las funciones clave de esta orquestación son:

- **Distribución de Tareas de Aprendizaje:** Los algoritmos de distribución asignan de forma óptima las tareas de entrenamiento entre los nodos disponibles, considerando la disponibilidad de datos y recursos computacionales.
- **Modelo de Aprendizaje Federado (FL):** Se implementa un modelo FL para aprovechar los datos de múltiples nodos sin comprometer la privacidad, minimizando la necesidad de transferencia de datos.
- **Compresión y Selección de Modelos (PACT):** El marco PACT permite seleccionar y comprimir modelos en función de los recursos disponibles, adaptándose a nodos heterogéneos y optimizando la eficiencia energética.

Además, se contempla un enfoque complementario de **aprendizaje cooperativo multi-dominio**, que permite la colaboración entre dominios administrativos para el entrenamiento coordinado de modelos. Este enfoque utiliza una *capa de federación* que gestiona la comunicación entre dominios y garantiza la privacidad de los datos, facilitando la agregación eficiente de modelos a través de algoritmos jerárquicos como E-TREE.

#### Aprendizaje Cooperativo Multi-Dominio

En un entorno federado compuesto por múltiples dominios administrativos, el aprendizaje cooperativo permite el entrenamiento colaborativo de modelos, asegurando el apro-

vechamiento óptimo de datos y recursos a través de una Capa de Federación. Las principales funciones de este marco son:

- **Orquestador de Federación (FO):** El FO gestiona las interacciones entre dominios administrativos, facilitando el acceso seguro a los recursos compartidos y utilizando contratos inteligentes para preservar la privacidad y la seguridad de los datos.
- **Orquestador de Entrenamiento (TO):** El TO coordina el entrenamiento de modelos en cada dominio, gestionando los recursos locales y federados para optimizar el proceso de aprendizaje.
- **Agrupación de Modelos Eficiente (E-TREE):** En los casos donde los nodos se agrupan en clústeres, el algoritmo E-TREE permite la agregación jerárquica de modelos entrenados, mejorando la precisión y eficiencia en entornos distribuidos.

### Arquitectura del Sistema para Aprendizaje Distribuido

La arquitectura de aprendizaje distribuido se basa en un Conjunto de Dominio Federado (FDS), que permite a cada dominio aprovechar los recursos del conjunto, manteniendo una sincronización de datos y optimización de recursos. Los componentes clave de esta arquitectura incluyen:

- **Capa de Federación:** La Capa de Federación conecta los dominios administrativos y facilita la cooperación mediante el intercambio controlado de datos y recursos.
- **Sincronización y Actualización de Modelos:** Cada dominio mantiene sus propios datos de entrenamiento y prueba, que se actualizan continuamente para reflejar los cambios en la distribución de datos de entrada.
- **Selección de Recursos y Optimización Energética:** Se seleccionan los recursos necesarios de cada dominio y se gestionan para minimizar el consumo energético general del sistema.

#### 3.1.10. Marco Arquitectónico e Interfaces de ML (aprendizaje automático) (ML Architectural Framework and Interfaces)

El marco arquitectónico de aprendizaje automático de PREDICT-6G se basa en los principios de **MLOps**, una extensión del enfoque DevOps aplicada a todo el ciclo de vida de los modelos de IA/ML en entornos de producción. Su objetivo es facilitar el desarrollo, entrenamiento, despliegue, orquestación y mantenimiento continuo de modelos de aprendizaje en arquitecturas distribuidas.

La solución de ATOS (ATOS IT Solutions and Services Iberia SL) para PREDICT-6G [15] incorpora una arquitectura que emplea entornos basados en contenedores y herra-



mientas de orquestación como Kubernetes (K8s), utilizando Kubeflow como plataforma central para el desarrollo y control de flujos de trabajo de aprendizaje automático.

### **Componentes principales de la arquitectura:**

- **Desarrollo de Pipelines:** Este módulo permite construir flujos de trabajo ML completos utilizando Jupyter Notebooks y bibliotecas como TensorFlow Extended (TFX) o PyTorch. Los flujos pueden incluir etapas de ingesta, preparación, validación, entrenamiento y evaluación de datos.
- **Plataforma de Orquestación de Pipelines (POP):** Orquesta la ejecución de los pipelines ML usando estrategias de contenedorización, programando y desplegando las tareas en entornos cloud-native con Kubeflow Pipelines. POP gestiona bases de datos como InputDB (datos de entrenamiento) y MetadataDB (etapas y metadatos del pipeline).
- **Almacenamiento de Modelos:** Este componente almacena los modelos entrenados y ofrece una interfaz REST/gRPC para su recuperación. Actualmente, utiliza MinIO [32] como sistema de almacenamiento orientado a objetos compatible con Kubernetes.
- **Despliegue Automático de Modelos:** Monitoriza la creación de nuevos modelos y los transfiere automáticamente al módulo de inferencia (Model Serving).
- **Model Serving e Inferencia:** Utiliza TensorFlow Serving o TorchServe para hacer los modelos accesibles para tareas de inferencia. Está conectado al sistema de inferencia, que recibe peticiones externas, y al módulo de monitorización para controlar rendimiento y detectar posibles derivaciones en el comportamiento del modelo.
- **Monitorización de Modelos y Métricas:** Supervisa el rendimiento de los modelos desplegados (como latencia, precisión o tasa de aciertos) y activa reentrenamientos en caso de detectar deriva (drift).

Este marco se encuentra en proceso de evolución para incluir capacidades adicionales como:

- Soporte completo para PyTorch.
- Extensiones para aprendizaje federado (FL), distribuido (DL) y por refuerzo (RL).
- Repositorios de datasets y registros de modelos con interfaces REST.
- Integración con el resto de servicios de gestión e inferencia de la arquitectura AICP(Plano de Control Interdominio Basado en IA).

Gracias a esta infraestructura, los modelos ML pueden integrarse directamente en los bucles de control del sistema, facilitando la inteligencia en tiempo real dentro de redes deterministas y distribuidas como las 6G.

## Principios de MLOps y Soporte Multi-Dominio

Basándose en MLOps, el marco de aprendizaje automático facilita el desarrollo, despliegue y gestión continua de modelos en entornos distribuidos y heterogéneos. Este enfoque permite integrar los modelos en los bucles de control del sistema de Gestión y Orquestación de la red, mejorando la eficiencia operativa y la capacidad de adaptación de la red en tiempo real.

Las principales funcionalidades de este marco incluyen:

- **Gestión del Ciclo de Vida del Modelo:** El sistema permite gestionar de forma completa el ciclo de vida de los modelos, desde su diseño y entrenamiento hasta el despliegue en producción. Además, habilita actualizaciones automáticas de los modelos en función de métricas de rendimiento o cambios en los datos de entrada.
- **Compatibilidad con Infraestructuras de Contenedores:** El marco se basa en tecnologías de contenedorización y orquestación como Kubernetes (K8s), lo que permite una implementación escalable, portable y fácilmente adaptable a distintas plataformas.
- **Compatibilidad con Librerías y Herramientas de ML:** El sistema es compatible con librerías y herramientas ampliamente utilizadas en el ecosistema de IA, como PyTorch, TensorFlow, TorchServe y KubeFlow, lo que facilita el desarrollo, la orquestación y el despliegue automatizado de modelos ML en entornos cloud-native.

## Componentes del Marco de IA/ML (inteligencia artificial y aprendizaje automático)

El marco de IA/ML desarrollado por ATOS para el proyecto PREDICT-6G está compuesto por varios módulos clave que permiten una integración eficiente de los modelos de aprendizaje automático en múltiples dominios tecnológicos. Esta arquitectura modular permite escalar, monitorizar y actualizar modelos de forma automatizada en un entorno distribuido.

Los principales módulos que conforman el marco son:

- **Desarrollo de Pipelines:** Módulo orientado a la creación de flujos de trabajo completos para el ciclo de vida de los modelos ML. Se basa en herramientas como Jupyter Notebooks, TensorFlow Extended (TFX) o PyTorch, y cubre desde la ingesta y preparación de datos hasta el entrenamiento, validación y despliegue.
- **Plataforma de Orquestación de Pipelines (POP):** Esta plataforma orquesta la ejecución de los pipelines, automatizando el flujo de tareas y coordinando la interacción con bases de datos de entrada (InputDB) y bases de metadatos (MetadataDB). Opera sobre entornos contenedorizados mediante Kubernetes y KubeFlow.

- **Almacenamiento y Servicio de Modelos:** Proporciona mecanismos para almacenar los modelos entrenados y ponerlos a disposición de otros componentes del sistema mediante servicios REST/gRPC. Utiliza soluciones como MinIO [32] y sirve modelos a través de TensorFlow Serving o TorchServe, según corresponda.
- **Sistema de Inferencia y Monitoreo de Métricas:** Supervisa el comportamiento de los modelos desplegados en producción. Detecta posibles desviaciones (drift) en el rendimiento del modelo y puede activar procesos de reentrenamiento automático cuando sea necesario, garantizando así la robustez y la precisión del sistema a lo largo del tiempo.

### 3.1.11. Flujo de Provisión del Servicio en el Dominio WiFi

En la Figura 3.2, se representa el flujo de trabajo (*workflow*) que describe la provisión de un servicio determinista extremo a extremo (E2E) dentro del dominio local, con especial enfoque en el dominio WiFi. Este flujo abarca desde la solicitud inicial hasta la activación final del servicio, incluyendo las fases de cómputo de rutas, asignación de recursos y configuración de la monitorización.

El proceso se descompone en los siguientes pasos:

1. **Service Provisioning Request:** El módulo de Automatización de Servicio recibe la solicitud de provisión, donde se indican los parámetros del servicio deseado (latencia, pérdida de paquetes, fiabilidad, etc.).
2. **Path Computation:** Se solicita al PCE el cálculo de la ruta más adecuada. Este proceso se apoya en la información topológica obtenida del módulo de Exposición de Topología y en predicciones generadas por los módulos IA/ML.
  - a. **Get Topology:** El PCE solicita al módulo de Topología una vista abstracta actualizada de la red.
  - b. **Retrieve TSN Topology:** El módulo de Topología recupera la topología específica del dominio (WiFi en este caso).
  - c. **Compute Path:** El PCE calcula la ruta óptima para el flujo según las métricas deseadas.
  - d. **Computed Path:** El resultado del cálculo se envía de vuelta al módulo de Automatización.
3. **Resource Allocation:** Una vez calculada la ruta, se activan los mecanismos de asignación de recursos. Aquí comienza la participación directa del módulo **Resource Configuration** para WiFi:
  - **Allocate Service Flow:** El configurador recibe la ruta y los requisitos del servicio, y con ello calcula y selecciona los recursos necesarios para garantizar

los niveles de calidad de servicio (QoS) requeridos. Esta información se almacena y se prepara para ser enviada al dominio correspondiente (ServerFlow en este caso, hacia el punto de acceso WiFi).

- a. **Allocate TSN Flow (equivalente en WiFi):** Se comunica al dominio WiFi los recursos asignados para configurar la red adecuadamente. Estos recursos pueden incluir parámetros como la asignación de colas específicas, ventanas temporales, prioridades o reglas de acceso al canal, los cuales se alinean con los mecanismos definidos en el estándar IEEE 802.1Qbv [18] para tráfico programado.
  - b. **Allocated Service Flow:** Una vez configurado el dominio, se informa de vuelta al módulo de Automatización de Servicio que la configuración se ha completado, indicando los recursos utilizados (por ejemplo: qué colas, con qué tiempo y prioridades).
  - c. **Store Service and Flow:** Toda la información relativa al servicio y a los flujos configurados se almacena para su trazabilidad futura.
4. **Monitoring Configuration:** Se activa el módulo de recolección de métricas que permite configurar la monitorización del servicio, incluyendo la recopilación de datos sobre el estado del flujo (KPIs (Key Performance Indicators), métricas de rendimiento, etc.). Esto se realiza mediante la configuración de fuentes de datos específicas en el dominio WiFi y se activa el sistema de monitorización correspondiente.
  5. **Service Provisioned:** Con todos los pasos anteriores completados, el servicio se marca como aprovisionado y operativo.

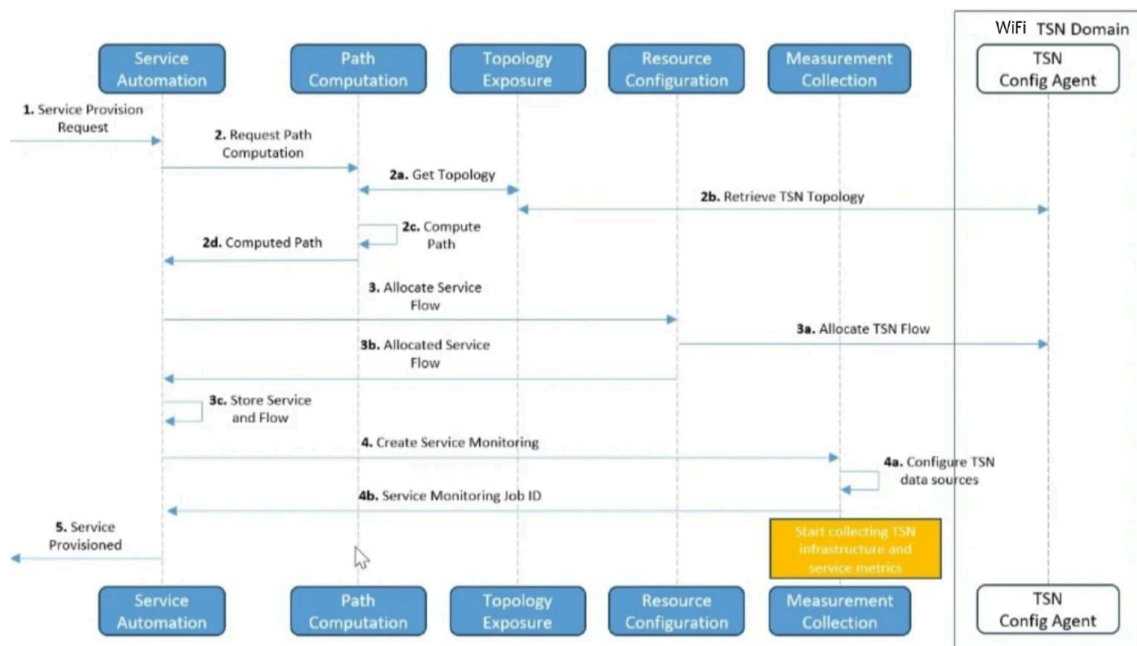


Fig. 3.2. Diagrama de flujo de trabajo [33]

Este flujo implementa un enfoque modular, donde cada componente (Automation, PCE, Topology, Resource Configuration, Monitoring) actúa como un microservicio colaborativo. En el caso específico del dominio WiFi, la integración de este flujo en el módulo de **Resource Configuration** es una de las principales contribuciones prácticas de este trabajo, centrado en adaptar la lógica de configuración a tecnologías de acceso inalámbrico y, en particular, a mecanismos de scheduling.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE CONFIGURACIÓN DE RECURSOS EN EL PLANO DE CONTROL WIFI

En capítulos anteriores se ha presentado el contexto teórico y tecnológico necesario para comprender el funcionamiento de las redes deterministas y los retos asociados a la gestión de recursos en entornos heterogéneos. A partir de esta base, se describe el proceso de implementación de un sistema funcional que permite gestionar dinámicamente la configuración de colas en redes WiFi dentro del marco del proyecto **Predict 6G** [1].

En concreto, este capítulo presenta la implementación de un componente funcional del plano de control, el módulo **Resource Configurator**, desarrollado para operar dentro de un dominio WiFi. Este módulo permite la configuración dinámica de colas de tráfico, adaptándose en tiempo real a los requisitos de servicios deterministas.

El objetivo principal de esta sección es mostrar de forma detallada cómo se ha construido la arquitectura del sistema funcional desarrollado, basado en tres módulos clave: **Cliente**, **Servidor** y **AP\_WiFi**. Estos módulos colaboran para garantizar una gestión eficiente del tráfico, permitiendo la asignación y liberación de recursos de acuerdo con las necesidades específicas de cada servicio. La arquitectura ha sido concebida con el fin de ser escalable, modular y fácilmente adaptable a futuros desarrollos dentro del entorno de redes 6G.

A lo largo del capítulo se explicará el diseño de cada módulo, los protocolos de comunicación utilizados y la lógica implementada para gestionar los flujos de tráfico. Además, se incluyen fragmentos clave de código y diagramas representativos que permiten visualizar las decisiones técnicas adoptadas y su impacto sobre el comportamiento del sistema. Se presentan también los desafíos encontrados durante el desarrollo y las soluciones aplicadas para garantizar la robustez y eficiencia del sistema.

Todo el desarrollo se ha realizado utilizando el lenguaje de programación **Python**, apoyado en diversas bibliotecas específicas que han facilitado tanto la creación de la API (Application Programming Interface) como la gestión de eventos y la interacción con otros servicios. A continuación, se detallan las más relevantes:

- **Flask** [2]. Framework ligero para el desarrollo web en Python que permite construir interfaces RESTful de forma eficiente. Se ha utilizado como base para desarrollar la API del proyecto.
- **Waitress** [3]. Servidor WSGI (Web Server Gateway Interface) para aplicaciones Python que permite ejecutar servicios en producción de forma robusta y eficiente. En este proyecto se emplea para desplegar la aplicación Flask.
- **Watchdog** [4]. Biblioteca utilizada para la monitorización de eventos en el sistema

de archivos. Permite detectar en tiempo real cambios en carpetas o archivos, lo que resulta esencial para la lógica de respuesta automática del sistema.

- **Requests** [34]. Biblioteca de Python utilizada para realizar peticiones HTTP de manera sencilla. Se ha utilizado para interactuar con servicios externos y gestionar la comunicación entre diferentes componentes del sistema.
- **Subprocess** [35]. Módulo estándar de Python que permite ejecutar comandos del sistema operativo desde el propio código, facilitando la integración con procesos externos.
- **Datetime** [36]. Módulo de la biblioteca estándar de Python que se ha empleado para gestionar fechas y horas dentro del sistema, esencial para el registro y la temporización de eventos.
- **Threading Event** [37]. Módulo de la biblioteca estándar de Python utilizado para la sincronización entre los endpoints del sistema. Resulta fundamental para la coordinación de procesos concurrentes y evitar desincronización en la ejecución.

Este lenguaje ha facilitado la integración con herramientas como *tc* (*Traffic Control*), empleada para la obtención de la configuración de colas.

Finalmente, se recomienda al lector consultar el repositorio de código disponible, donde se recopila y mantiene actualizada toda la implementación descrita. El análisis conjunto del documento y el código permitirá una comprensión más profunda del sistema y de sus capacidades actuales, así como de las posibles líneas de mejora para futuras versiones.

<https://github.com/EmilioJ16/TFG>

#### 4.1. Cualidades WiFi que se están configurando y aplicación de la configuración

La implementación actual de este trabajo aprovecha las características específicas del estándar IEEE 802.1Qbv (Time-Aware Shaper) [18] y de IEEE 802.1AS (gPTP) [17], adaptándolas al contexto WiFi para gestionar tráfico determinista en entornos inalámbricos. En concreto, se están configurando las siguientes cualidades [38]:

- Sincronización precisa de tiempo (IEEE 802.1AS/gPTP sobre WiFi): Se utiliza la sincronización horaria basada en el Protocolo de Tiempo de Precisión Generalizado (gPTP) IEEE 802.1AS [17], implementado sobre WiFi mediante la especificación Fine Timing Measurement (FTM) [39] del estándar IEEE 802.11. Esto permite que todos los dispositivos en la red compartan una referencia temporal precisa y común, indispensable para operar las colas deterministas del sistema.
- Gestión determinista del tráfico mediante Time-Aware Shaper (IEEE 802.1Qbv) [18]: El estándar IEEE 802.1Qbv permite gestionar las colas de tráfico mediante

puertas de transmisión temporizadas (transmission gates). En la implementación actual del módulo funcional **Resource Configurator**, se asignan dinámicamente recursos y se configuran estas puertas para:

- Crear ventanas protegidas destinadas al tráfico crítico en el tiempo.
  - Bloquear selectivamente el tráfico no crítico durante dichas ventanas protegidas.
  - Garantizar un mejor control de la latencia y jitter, cumpliendo con estrictos requisitos de QoS (calidad de servicio) para aplicaciones deterministas.
- **Asignación dinámica de colas:** La configuración actual emplea dos tipos de colas para gestionar el tráfico:
- Tráfico crítico en tiempo: Cola específica para servicios sensibles al tiempo (TSN), con prioridades máximas (QoS 7).
  - Tráfico de mejor esfuerzo (BE): Cola para tráfico general, con menor prioridad.

Aunque actualmente se utiliza una configuración con dos colas, la solución es fácilmente extensible a las cuatro colas independientes de QoS admitidas por WiFi para aislar aún más el tráfico determinista y proporcionar mayores garantías.

- **Fiabilidad y pérdida de paquetes:** En pruebas experimentales como las descritas en [38], se midió cero pérdida de paquetes para el tráfico determinista configurado mediante IEEE 802.1Qbv [18]. En cambio, el tráfico de mejor esfuerzo experimenta mayores retardos y pérdidas potenciales debido a la acción explícita de priorización del tráfico determinista, destacando así la eficacia del mecanismo para mantener la calidad de servicio en condiciones de alta congestión .

Para aplicar esta configuración, el sistema se apoya en un script. Este script no ha sido desarrollado en el marco de este trabajo.

La lógica del script calcula internamente los **intervalos de transmisión** de cada cola en función de los parámetros recibidos, y programa las ventanas de tiempo activas para dichas colas. Para entender su funcionamiento, se puede usar el siguiente ejemplo:

### Ejemplo: 3 servicios deterministas

```
1  [
2      {
3          "sender": "00:11:22:33:44:56",
4          "receivers": [
5              "66:77:88:99:AA:BC"
6          ],
7          "creation_type": "UNICAST",
8          "latency_constraint": "1500",
```



```

9      "size": "1000",
10     "time": "50",
11     "type": "BEST_EFFORT"
12   },
13   {
14     "sender": "00:11:22:33:44:56",
15     "receivers": [
16       "66:77:88:99:AA:BC"
17     ],
18     "creation_type": "UNICAST",
19     "latency_constraint": "80",
20     "size": "1000",
21     "time": "20",
22     "type": "TSN"
23   },
24   {
25     "sender": "00:11:22:33:44:56",
26     "receivers": [
27       "66:77:88:99:AA:BC"
28     ],
29     "creation_type": "UNICAST",
30     "latency_constraint": "100",
31     "size": "1000",
32     "time": "40",
33     "type": "TSN"
34   }
35 ]

```

Lo primero es determinar la duración del **macrociclo**, es decir, el tiempo más pequeño en el que se pueden encajar todos los flujos de tráfico periódicos, asegurando que se repitan sin solaparse ni perder paquetes. Para ello, se calcula el mínimo común múltiplo (mcm) de los intervalos definidos por el campo "time": (intervalo entre paquetes, en milisegundos) de cada uno de nuestros servicios. Teniendo esto en cuenta, el cálculo del macrociclo sería el siguiente:

$$\text{macrociclo} = \text{mcm}(50, 20, 40) = 200 \text{ ms}$$

Este resultado, 200 ms, representa el primer instante en el que todos los servicios periódicos vuelven a coincidir, permitiendo planificar un ciclo completo que posteriormente se repetirá de manera cíclica.

A continuación, se calcula el número de ventanas necesarias para cada servicio dentro del macrociclo:

- Servicio 1 (BE):  $200 \text{ ms} / 50 \text{ ms} = 4$  ventanas
- Servicio 2 (TSN):  $200 \text{ ms} / 20 \text{ ms} = 10$  ventanas

- Servicio 3 (TSN): 200 ms/40 ms = 5 ventanas

En total se tienen 15 ventanas TSN (Time Sensitive Networking) y 4 ventanas BE (Best Effort). El tiempo durante el cual la puerta de una cola está abierta para permitir la transmisión de sus paquetes se denomina ( $t_{\text{ventana}}$ ). Este valor se define individualmente para cada ventana programada dentro del macrociclo con la siguiente fórmula:

$$t_{\text{ventana}} \geq t_{\text{serialización}} + guard_{\text{band}} + \text{margen}_{\text{jitter}}$$

Donde:

- $t_{\text{ventana}}$ : tiempo durante el cual la puerta de la cola está abierta.
- $t_{\text{serialización}}$ : tiempo necesario para transmitir el paquete por el enlace.
- $guard_{\text{band}}$ : tiempo de seguridad antes de abrir una ventana para tráfico determinista. Su objetivo es evitar que un paquete largo no determinista bloquee la transmisión cuando se debería abrir la cola TSN.
- $\text{margen}_{\text{jitter}}$ : tiempo de seguridad para absorber variaciones de sincronización o jitter.

Aunque el algoritmo está predefinido dentro del script y no ha sido rediseñado como parte de este trabajo, su uso ha requerido una capa de control superior que automatiza su ejecución, valida sus resultados y mantiene sincronizados todos los componentes del sistema.

## 4.2. Añadir y Eliminar Servicios

El proceso de gestión de servicios en la red se basa en la interacción entre el **cliente**, el **servidor** y el **punto de acceso WiFi** (AP\_WiFi). Esta arquitectura permite la adición (*commissioning*) y eliminación (*decommissioning*) de configuraciones de red de manera dinámica, garantizando una administración eficiente de los recursos. A continuación, se describen ambos procesos.

### 4.2.1. Proceso de Añadir un Servicio

El proceso de adición de un servicio comienza cuando el cliente envía una solicitud POST /save-request al servidor, indicando que se desea registrar una nueva configuración WiFi. Los pasos que siguen son:

- El servidor recibe la solicitud y actualiza el flujo de servicios.

- Posteriormente, envía los parámetros del nuevo servicio, que serán utilizados por el AP\_WiFi para realizar la configuración local del sistema.
- El AP\_WiFi recibe esta configuración y lleva a cabo las siguientes acciones:
  - Elimina la configuración WiFi actual.
  - Configura el nuevo servicio con los parámetros proporcionados.
  - Obtiene la nueva configuración de colas.
- Finalmente, el servidor actualiza su base de datos interna (`stored_data_colas_estado`) y activa el evento `evento_colas_estados_actualizadas` para notificar que la nueva configuración está en funcionamiento.
- El servidor devuelve la configuración y el estado actualizado al cliente.

Este flujo se representa visualmente en la Figura 4.1, las interacciones entre el cliente, el servidor y el punto de acceso WiFi (AP\_WiFi) durante el proceso de *commissioning* o adición del servicio.

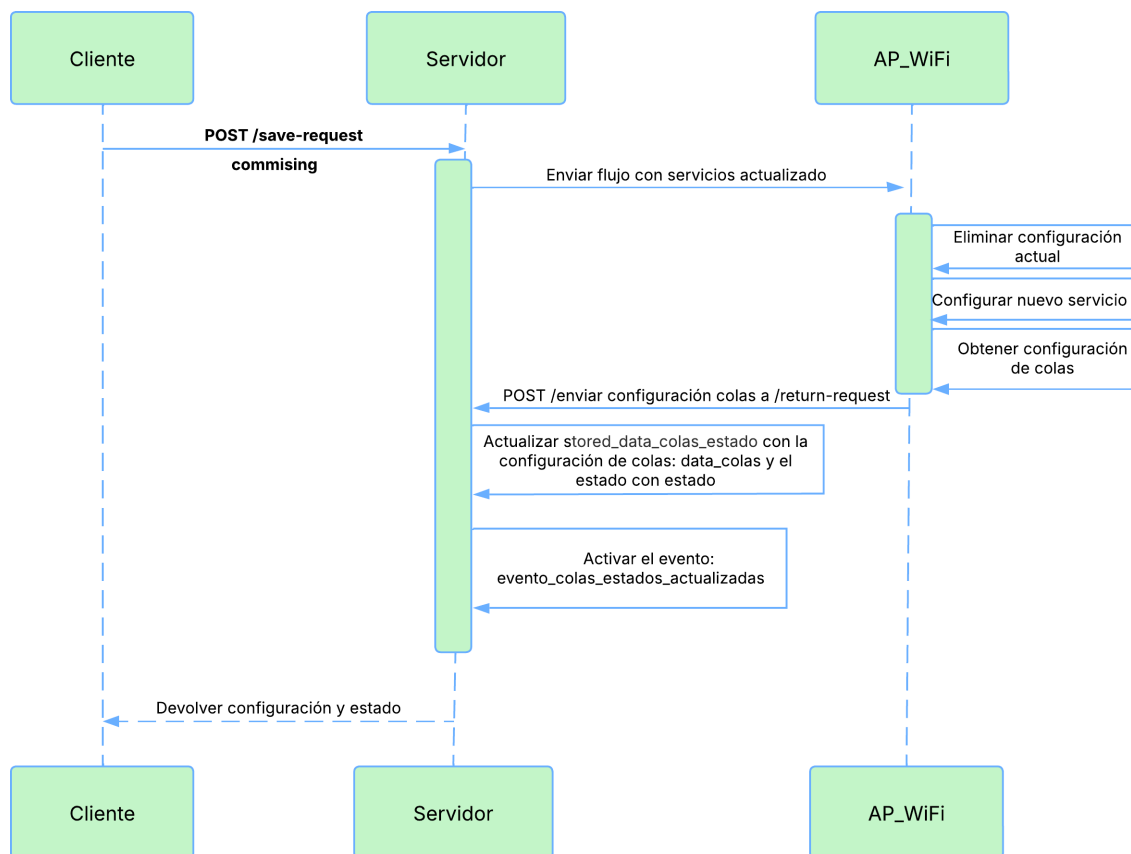


Fig. 4.1. Proceso de adición de un servicio WiFi (*commissioning*).

#### 4.2.2. Proceso de Eliminar un Servicio

El proceso de eliminación de un servicio (*decommissioning*) sigue una secuencia similar, pero en este caso, el cliente envía una solicitud POST `/delete-request` al servidor para eliminar una configuración WiFi existente. La secuencia de eventos es la siguiente:

- El servidor recibe la solicitud y actualiza el flujo de servicios.
- Luego, envía al AP\_WiFi los parámetros necesarios del servicio para que este pueda aplicar los cambios correspondientes en la red.
- El AP\_WiFi ejecuta las siguientes acciones:
  - Elimina la configuración WiFi actual.
  - Configura el sistema para reflejar la eliminación del servicio.
  - Obtiene la configuración de colas.
- Una vez completados estos pasos, el servidor actualiza el estado de `stored_data_colas_estado` y activa el evento `evento_colas_estados_actualizadas`.
- Finalmente, el servidor informa al cliente sobre la actualización de la configuración y el estado del sistema.

Este flujo se representa visualmente en la Figura 4.2, que muestra las interacciones entre el cliente, el servidor y el punto de acceso WiFi durante el proceso de *decommissioning*.

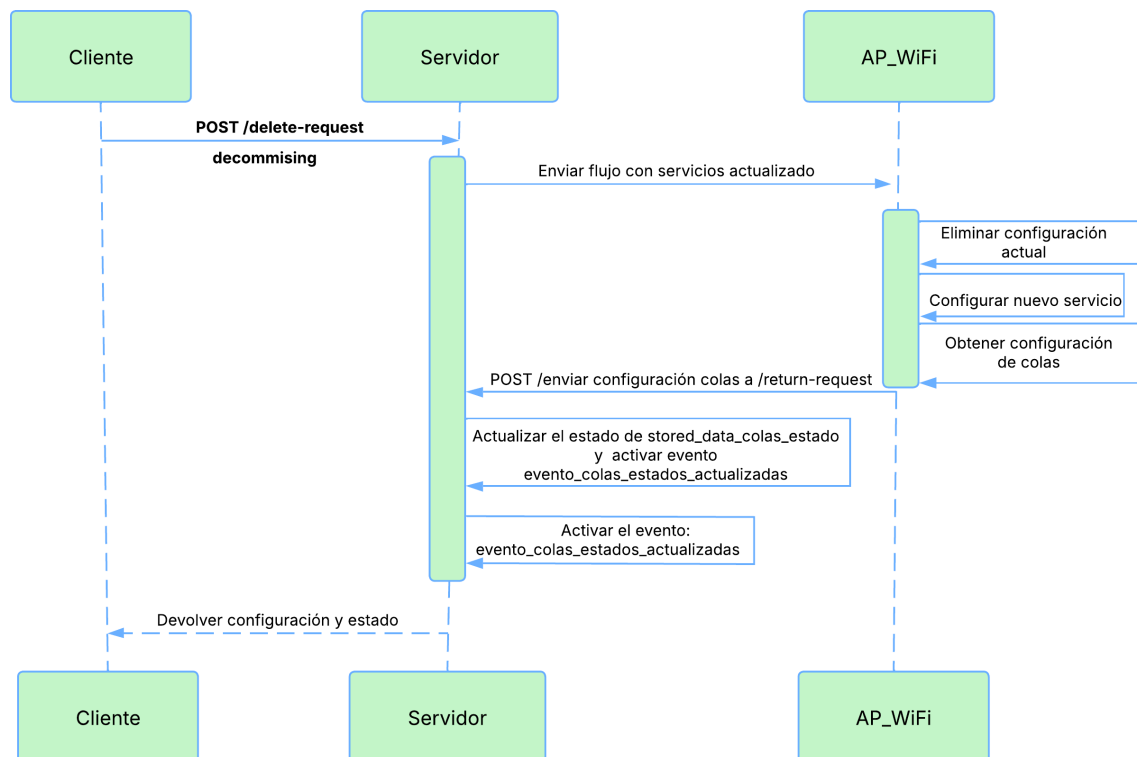


Fig. 4.2. Proceso de eliminación de un servicio WiFi (*decommissioning*).

### 4.3. Módulos implementados

A continuación, se presentan detalladamente los módulos individuales que componen la arquitectura del sistema, explicando sus responsabilidades y funcionamiento interno específico.

#### 4.3.1. Cliente

El cliente está compuesto por dos programas cuya función principal es gestionar la adición y eliminación de recursos a través de clienteEnvioJson\_save y clienteEnvioJson\_delete. Cuando se añade un nuevo recurso, el cliente recibe como respuesta un JSON con la configuración actualizada de las colas y un indicador del estado de la operación. En cambio, al eliminar un recurso, se obtiene el estado de la operación y el mismo JSON que se envió.

#### 4.3.2. Servidor

El servidor central se ha diseñado con una arquitectura basada en múltiples **endpoints**, los cuales gestionan las peticiones del cliente y la comunicación con el punto de acceso WiFi (AP\_WiFi). Su objetivo principal es controlar la adición, eliminación y consulta de recursos en el sistema, permitiendo una configuración dinámica de las colas en la red. Para entender mejor las partes que tiene este y su funcionamiento, tenemos el siguiente diagrama de flujo:

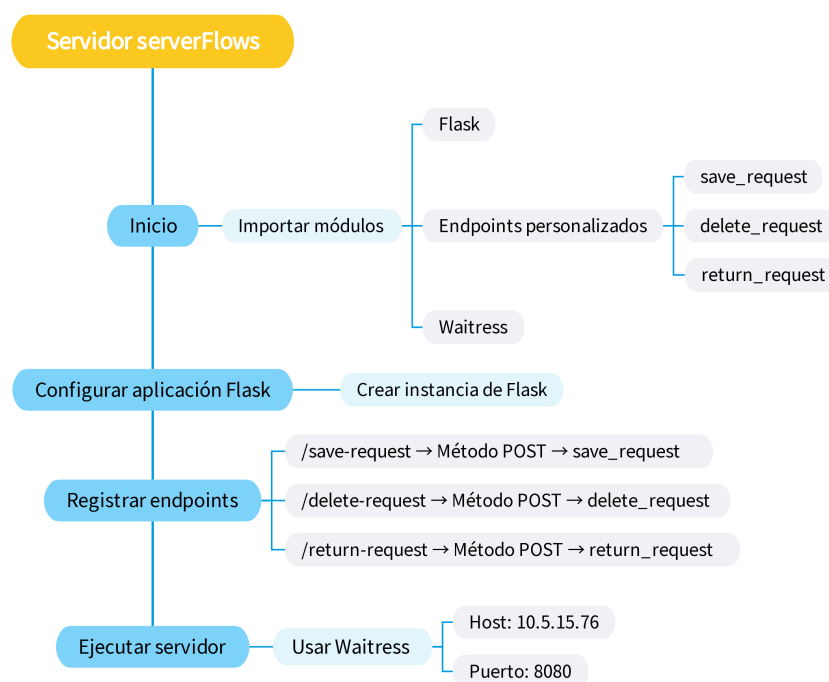


Fig. 4.3. Diagrama de flujo del servidor

Para la correcta coordinación de los endpoints y el mantenimiento de los datos en el sistema, se utilizan variables compartidas y eventos de sincronización:

- **stored\_data\_colas\_estado**: Variable global utilizada en los endpoints para almacenar el JSON con la configuración de colas y el estado devuelto por el punto de acceso. Esta información es necesaria para responder correctamente a la petición del cliente.
- **store\_data**: Almacena el JSON recibido del cliente en los endpoints `/save request` y `/delete request`, permitiendo su posterior recuperación en `/return request` para actualizar `stored_data_colas_estado`.
- **return\_request\_delete**: Indicador booleano usado para diferenciar si es un proceso de adición o eliminación de un recurso. Se establece en `True` cuando es debido a la eliminación y en `False` cuando es debido a la adición.
- **evento\_colas\_estados\_actualizadas**: Evento utilizado para sincronizar la actualización de la variable compartida `stored_data_colas_estado`, asegurando que los endpoints esperen hasta que la información esté lista antes de responder al cliente.

## Endpoint `/save request`

Este endpoint recibe solicitudes para la configuración de nuevos recursos en la red WiFi. El proceso consta de los siguientes pasos:

1. Se recibe una petición en formato JSON con la información del nuevo recurso a configurar. Este JSON se guarda en una variable compartida (`store_data`) entre este endpoint y `/return request`.

```
1 data = request.get_json()
```

2. Se extraen y transforman los datos para su compatibilidad con el sistema de configuración de la red WiFi.

```
1         # Extraer datos del JSON
2         id = data["id"]
3         qos = data["qos_characteristics"]
4         traffic = data["traffic_characteristics"]
5
6         latency_constraint = str(qos["td_delay"])
7         priority = str(qos["priority"])
8         time_interval = str(traffic["period"])
9         size = str(traffic["burst_size"])
10
```

```

11         if priority == "7":
12             traffic_type = "TSN"
13         else:
14             traffic_type = "BEST_EFFORT"
15
16         # Construir el flujo para este archivo
17         flows = []
18         for mac in MACS:
19             flow = {
20                 "id": id,
21                 "sender": mac["sender"],
22                 "receivers": mac["receivers"],
23                 "creation_type": "MULTICAST" if len(mac["
24                     receivers"]) > 1 else "UNICAST",
25                 "latency_constraint": latency_constraint,
26                 "size": size,
27                 "time": time_interval,
28                 "type": traffic_type
29             }
30             flows.append(flow)

```

3. Se genera un historial de recursos recibidos, manteniendo actualizado el registro de recursos y almacenando una copia de cada recurso junto con la hora de llegada.
4. La información procesada se envía al AP\_WiFi, que se encarga de aplicar la configuración en la red.

```

1         try:
2             response = requests.post("http
3                 ://10.5.100.10:8080", json=historial_sin_id)
4             if response.status_code == 200:
5                 # Esperar que se actualicen las colas (espera
6                     bloqueante con timeout)
7                 evento_colas_estados_actualizadas.clear()#
8                     Antes de esperar, aseguramos que el evento
9                     esté limpio
10                 evento_disponible =
11                     evento_colas_estados_actualizadas.wait(
12                         timeout=5)
13                 if not evento_disponible:
14                     print("Timeout esperando datos de colas.")
15                     return jsonify({"error": "Timeout
16                         esperando datos de colas"}), 500
17                 else:
18                     print("save-request")
19                     data_colas = stored_data_colas_estado.get
20                         ("json")
21                     estado = stored_data_colas_estado.get("
22                         estado")

```

```

14         print(f"Esto son las colas configuradas:
15               {data_colas}")
16         print(f"Este es el estado de configuracion
17               : {estado}")
18         return jsonify(data_colas), estado
19     else:
20         return jsonify({"error": "Error interno en
21               save_request"}), 500
except Exception as e:
    print(f"Error al enviar el historial: {e}")
    return jsonify({"error": "Error interno en
          save_request"}), 500

```

5. Se espera la actualización de la variable `stored_data_colas_estado` mediante una espera bloqueante con `timeout`.

6. Con los datos obtenidos enviamos la respuesta a la petición del cliente.

El proceso queda reflejado en el siguiente diagrama de flujo:

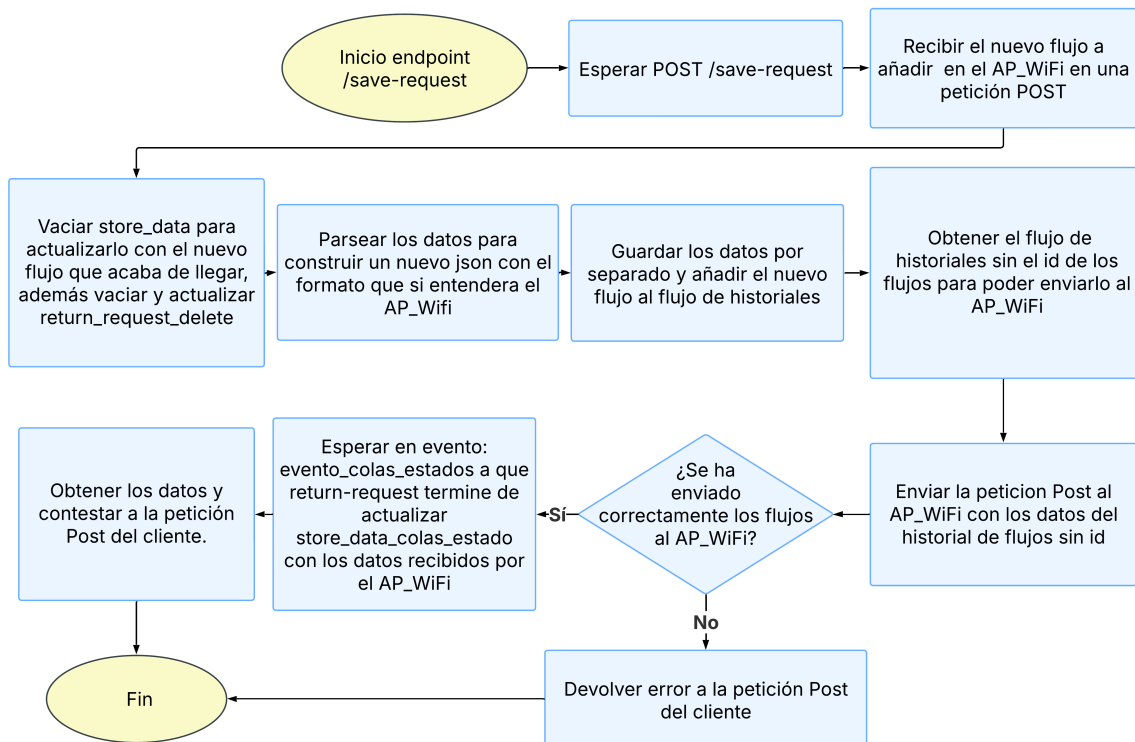


Fig. 4.4. Diagrama del end point save request

## Endpoint /delete request

Este endpoint permite eliminar recursos previamente configurados en la red WiFi utilizando su identificador (id). El proceso es el siguiente:



1. Se recibe la petición en formato JSON con el **id** a eliminar.

```
1         id_to_delete = data["id"]
2         print(f"Eliminando recursos con ID: {id_to_delete}")
```

2. Se busca y elimina el recurso correspondiente del historial de recursos, asegurando que la información almacenada esté siempre actualizada.

```
1         flow_histories = glob.glob(HISTORIAL_FILE)
2         if not flow_histories:
3             return jsonify({"error": "No se encontró historial"}), 404
4
5         # Cargar el historial del archivo más reciente
6         flow_histories_mas_reciente = flow_histories[0]
7         with open(flow_histories_mas_reciente, "r") as f:
8             try:
9                 historial = json.load(f)
10            except json.JSONDecodeError:
11                return jsonify({"error": "Error leyendo el historial"}), 500
12
13            # ----- Eliminar flujos con el ID
14            # proporcionado -----
15            historial_actualizado = []
16            id_count=0
17            for flujo in historial:
18                if isinstance(flujo, dict):
19                    # Es un diccionario, eliminar solo si el ID no
20                    # coincide
21                    if flujo.get("id") != id_to_delete:
22                        historial_actualizado.append(flujo)
23                    else:
24                        id_count += 1
25            if id_count==0:
26                return jsonify(data), 404
```

3. Se prepara y envía la configuración actualizada en una petición Post al AP\_WiFi, que reconfigura las colas.
4. Se espera la actualización de la variable `stored_data_colas_estado` mediante una espera bloqueante con `timeout` (`evento_colas_estados_actualizadas`).
5. Se responde al cliente.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo que ilustra la secuencia de eliminación de un recurso:

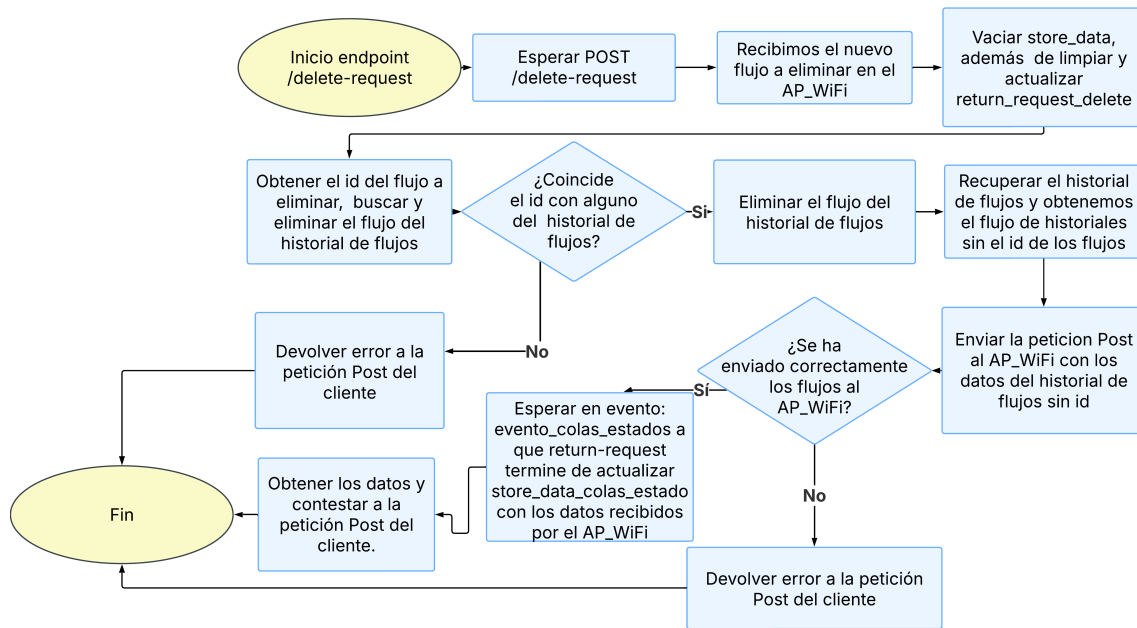


Fig. 4.5. Diagrama del end point delete-request

## Endpoint /return request

Este endpoint es el encargado de comunicarse con el punto de acceso, además de proporcionar el estado y la configuración actualizada de las colas en el sistema. Su flujo es el siguiente:

1. Se recibe la petición con el estado y la configuración de las colas en el punto de acceso.
2. Obtener la configuración actual gracias a la variable global `store_data`.
3. Diferenciar si la solicitud proviene de una adición o eliminación de recurso.

Cuando estamos añadiendo un nuevo recurso:

- a) Generar un JSON con la información obtenida y añadir el valor de la configuración de las colas.

```

1     valores_interval = re.findall(r'interval (\d
2     +)', data_colas)
3     print(valores_interval)
4
5     node_list = stored_data["td_path_selection
6     "]["involved_nodes"]["node_list"]
7
8     # Guardar la lista completa de intervalos en
9     todos los nodos, FUNCIONA
10    for idx, nodo in enumerate(node_list):

```

```

8         for i, valor in enumerate(
9             valores_interval):
10             resource_list del nodo.
11             nodo["node_resources"]["resource_list
12                 ][f"c{i}"] = valor

```

- b) Guardar el estado y el json en la variable global compartida `stored_data_colas_estado`
- c) Activar el evento para decir que ya está la variable compartida con la información necesaria.

```

1         evento_colas_estados_actualizadas.set()

```

- d) Enviar un OK, 200 al punto de acceso.

Cuando estamos eliminando un recurso:

- a) A partir de la configuración de colas establecer el estado.
- b) Guardar el estado y el json en la variable global compartida y activar el evento.
- c) Enviar un OK, 200 al punto de acceso.

Se resume gráficamente en la Figura 4.6:

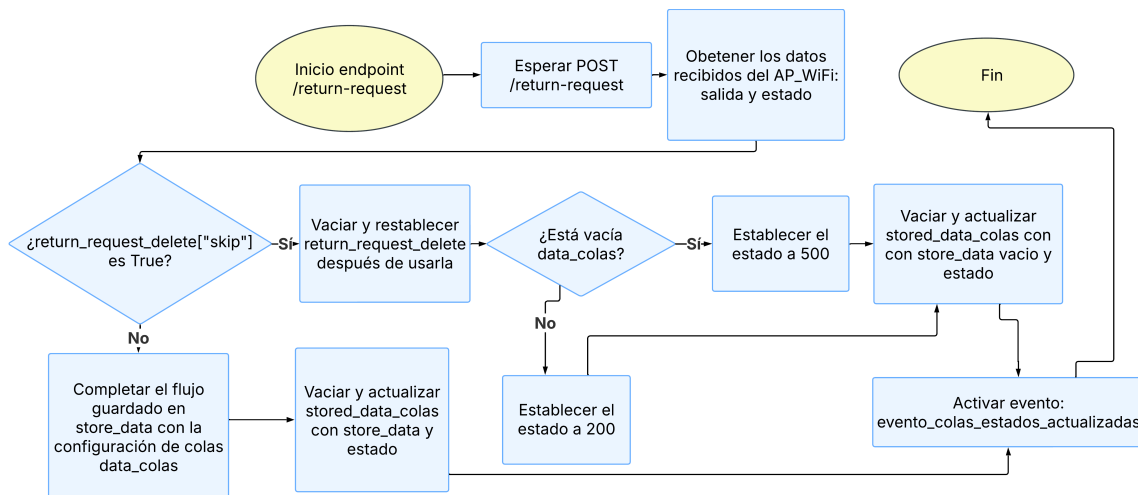


Fig. 4.6. Diagrama del end point return-request

### 4.3.3. Punto de acceso WiFi

#### Servidor

El AP es un servidor cuya única función es gestionar la configuración de las colas en la interfaz WiFi. Su flujo de trabajo es el siguiente:

1. Recibe solicitudes de configuración de recursos desde el servidor central.
2. Almacena estas solicitudes junto con la fecha y hora de recepción en una carpeta supervisada por un **watchdog**.

Se muestra en el siguiente diagrama de flujo:

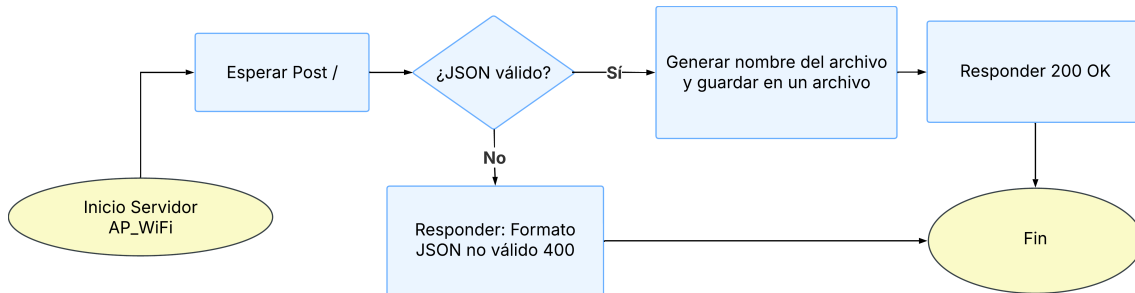


Fig. 4.7. Diagrama de flujo del servidor AP\_WiFi

## Watchdog

El *watchdog* supervisa y gestiona la configuración de la red WiFi en función de los recursos añadidos o eliminados.

1. Se inicia el observador en la carpeta de monitoreo.
2. Cuando se detecta un nuevo fichero **.txt**, se ejecutan las siguientes acciones:
  - a) Se ejecutan los comandos para eliminar la configuración actual del router, aplicar la nueva configuración y obtener el estado actualizado de las colas.

```

1      comando_1 = ["bash", "-c","python3 configurador.py -i
        wlp2s0 -u --verbose"]
2      comando_2 = ["bash", "-c",f"python3 configurador.py -
        i wlp2s0 -f {ultimo_fichero} --verbose"]
3      comando_3 = ["bash","-c", "sudo tc -s qdisc show dev
        wlp2s0 | grep interval"]
  
```

- b) Según las salidas de estos comandos, se establece el estado que posteriormente se devolverá al cliente.
3. Se almacena esta información y se envía al endpoint **return** del servidor encargado de la comunicación con el punto de acceso.

Para entenderlo, tenemos el siguiente diagrama de flujo:

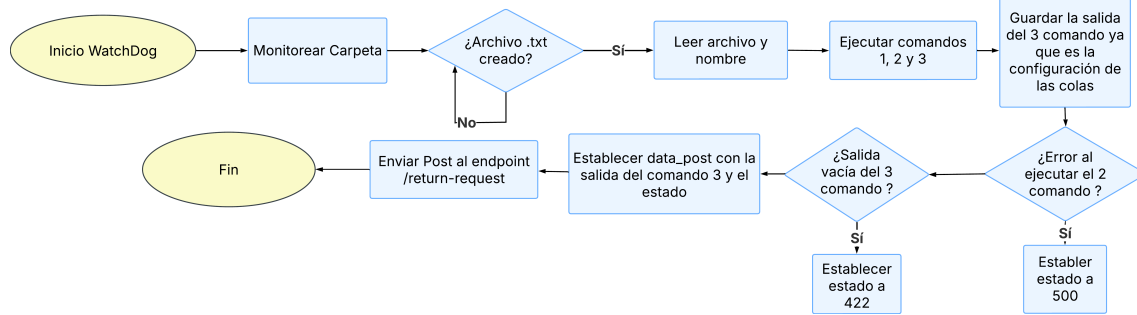


Fig. 4.8. Diagrama de flujo del servidor WatchDog

Es importante señalar que el script, encargado de aplicar y eliminar las configuraciones de colas, ha sido reutilizado de desarrollos previos, y su código no ha sido modificado ni creado en el contexto de este trabajo. Su uso se limita a su integración mediante orquestación y automatización, que sí constituye una contribución original de este proyecto.

Con esta implementación se optimiza la gestión dinámica de recursos en redes WiFi dentro del marco del proyecto **Predict 6G**, mejorando la eficiencia y reduciendo la carga de procesamiento en el cliente.

#### 4.4. Conclusión General

En este capítulo se ha mostrado el desarrollo de un módulo funcional dentro del plano de control, adaptado específicamente para la gestión de colas en un dominio WiFi. Se han alcanzado las siguientes metas:

- Se ha diseñado e implementado una arquitectura modular, compuesta por los tres módulos (Cliente, Servidor y AP\_WiFi), cuyos roles y responsabilidades están claramente delimitados.
- Se han incorporado mecanismos de sincronización basados en eventos para coordinar procesos concurrentes y notificaciones de estado, garantizando un flujo de trabajo coherente y sin bloqueos indeseados.
- Se ha desarrollado un sistema de monitorización automática que detecta cambios en las especificaciones de servicio y dispara la reconfiguración de colas en tiempo real, optimizando la asignación de recursos según las demandas de cada servicio.
- La solución se apoya en tecnologías consolidadas (Flask, Waitress, Watchdog) y en la integración con herramientas de bajo nivel (tc), lo que ha permitido construir un sistema fiable, extensible.

Gracias a estos desarrollos, el sistema consigue:

1. Adaptarse de forma ágil a variaciones en los requisitos de red, reduciendo la intervención manual.
2. Mantener un alto grado de fiabilidad y consistencia en la configuración de colas, incluso en escenarios con múltiples servicios simultáneos.
3. Proporcionar una base escalable para futuras mejoras.

## 5. PLANIFICACIÓN

Con el fin de representar las tareas realizadas durante el desarrollo del proyecto y su distribución temporal, se ha elaborado un diagrama de Gantt general Fig 5.1.

El inicio oficial del trabajo se sitúa en octubre de 2024; desde entonces, se inició la fase previa de documentación y estudio exhaustivo, revisando artículos científicos. Entre los principales recursos consultados destacan los entregables D3.1 [14] y D3.2 [15] del proyecto europeo Predict-6G, y el estándar IEEE 802.1Qbv [18], esencial para el entendimiento de redes TSN (Time-Sensitive Networking). Durante los meses de noviembre y diciembre de 2024 se llevaron a cabo pruebas iniciales, incluyendo la implementación de un pequeño watchdog. Paralelamente, se comenzó la redacción progresiva del documento, actividad que se ha prolongado hasta junio de 2025.

A partir de enero de 2025, se inició la fase principal de implementación en la máquina virtual facilitada, utilizando las credenciales para acceder a los entornos de IMDEA Networks Institute [40]. Esta etapa, altamente técnica, se prolongó hasta finales de marzo, momento en que la implementación quedó plenamente funcional.

Tras finalizar la implementación a finales de marzo de 2025, durante el mes de abril y mayo me centré en la redacción progresiva del documento. No fue hasta mediados de mayo de 2025 cuando comencé la fase de revisión final, que se prolongó hasta mediados de junio de 2025, abarcando la comprobación de resultados, el formateo, la bibliografía, el estilo y las correcciones de última hora.

Además del seguimiento en todo el proceso sobre los avances en el trabajo, durante el desarrollo se han llevado a cabo aproximadamente 10 reuniones, con una duración promedio estimada entre 50 minutos y 1 hora cada una, sumando en total unas 9 horas aproximadamente. El tiempo dedicado al desarrollo de este proyecto puede estimarse como:

$$3 \text{ horas/día} \times 169 \text{ días de dedicación académica} \approx 507 \text{ horas}$$

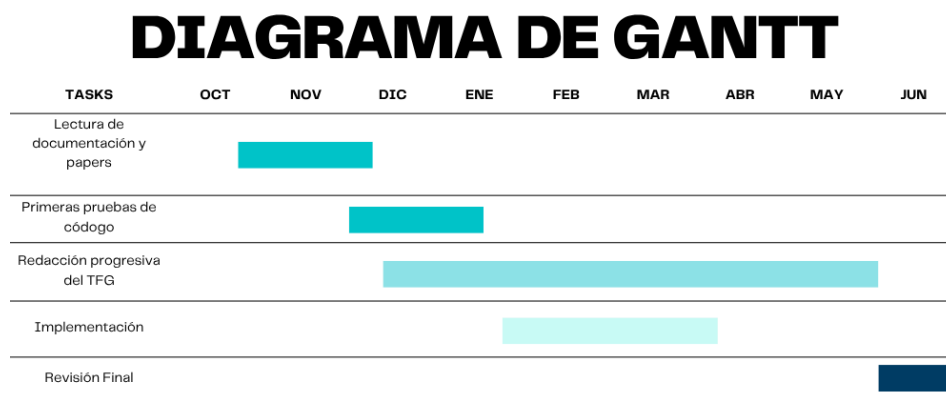


Fig. 5.1. Diagrama de Gantt del desarrollo del proyecto

## 6. IMPACTO SOCIOECONÓMICO

El desarrollo de una arquitectura de plano de control para un dominio WiFi no solo representa un avance tecnológico, sino que también tiene un impacto significativo en los ámbitos económico, social e industrial. La capacidad de gestionar redes de manera más eficiente y determinista permite la creación de nuevos modelos de negocio, mejora la accesibilidad a las comunicaciones y optimiza la productividad en diversos sectores estratégicos [5].

### 6.1. Presupuesto de elaboración

En esta sección se presenta un análisis económico detallado del coste de este trabajo, basado en el desglose de recursos humanos empleados durante todo el proceso. Se han estimado las horas dedicadas por el autor y la supervisión del tutor, considerando:

- 516 h dedicadas por el estudiante.
- 9 h en reuniones de seguimiento (10 reuniones  $\times$  0,9 h media).
- 51 h de supervisión por parte del tutor.

Persona	Tarifa (€/h)	Horas estimadas	Total (€)
Estudiante (autor)	9	516 (507 + 9)	4 644
Tutor	15	60	900
<b>Total Recursos Humanos</b>			<b>5 544</b>

TABLA 6.1. GASTOS EN RECURSOS HUMANOS

Con estos datos, el **coste total** del trabajo se estima en:

$$4\,644 + 900 = 5\,544 .$$

### 6.2. Impacto en la Industria y la Economía Digital

La integración de un **plano de control determinista en redes 6G** abre la puerta a un ecosistema digital más robusto y confiable. Este desarrollo impulsa la evolución de la Industria 4.0, permitiendo la automatización avanzada de procesos industriales, la optimización del uso de recursos y la reducción de costos operativos. También se mejora la eficiencia en sectores clave[27]:



- **Telecomunicaciones:** La puesta en marcha de un plano de control determinista en redes 6G revoluciona el sector de las telecomunicaciones al proporcionar una base para ofrecer Servicios con Niveles de Servicio (SLAs) extremos. Gracias a la garantía de latencias ultra-bajas y un jitter prácticamente nulo, los operadores podrán diseñar redes que aseguren una calidad de servicio constante, incluso bajo picos de demanda o en entornos muy congestionados. Esto abre la puerta a servicios premium (por ejemplo, conectividad 6G-SLA para telemedicina o vídeo 8K en remoto) y reduce drásticamente las interrupciones de red, traduciéndose en menores indemnizaciones por caídas de servicio y mayores márgenes de beneficio [41].
- **Automatización industrial:** La comunicación determinista tanto a nivel de capa 2 con TSN como en capa 3 con DetNet garantiza un control en tiempo real altamente confiable para maquinaria, robots y procesos productivos, evitando tiempos de inactividad inesperados [42], [43]. Gracias a técnicas como el acceso por tiempo programado, rutas explícitas y replicación/eliminación de paquetes, se asegura que cada mensaje de control llegue dentro de un plazo limitado, sin variabilidad significativa y con jitter acotado en microsegundos lo cual es crucial para coordinaciones precisas en líneas de montaje y sistemas robotizados [43], [44]. En entornos industriales modernos, estos mecanismos permiten que cada actuador y sensor opere de manera sincronizada, logrando una precisión temporal que puede reducir casi a cero las interrupciones de producción y maximizar la eficiencia operativa.
- **Redes vehiculares y V2X:** Las redes vehiculares y V2X se benefician considerablemente de la fiabilidad extrema y la baja latencia que ofrece un plano de control determinista. En el contexto de la conducción autónoma, una comunicación constante, precisa y sin interrupciones no es solo una ventaja, sino un requisito fundamental de seguridad. Gracias a este tipo de conectividad, es posible intercambiar datos como la posición, imágenes de cámara y lecturas de sensores LiDAR entre vehículos y con la infraestructura urbana. Por ejemplo, si un vehículo detecta un obstáculo tras una curva, como una rama caída, puede enviar una alerta inmediata mediante la red móvil para advertir a otros conductores antes de que lleguen a la zona de peligro. Este intercambio de información en tiempo real entre vehículos, semáforos y otros elementos urbanos constituye un requisito de seguridad esencial para entornos de conducción autónoma y semiautónoma garantizados [45].
- **Ciudades inteligentes y IoT:** El determinismo del plano de control en redes 6G permite una orquestación de miles de sensores y actuadores con latencia ultra-baja y entrega garantizada de mensajes [46], [47]. En un entorno urbano, esto se traduce en la capacidad de integrar flujos de información heterogéneos mediciones de calidad del aire, ocupación de carriles, niveles sonoros y consumo energético en un único tejido de control distribuido. Por ejemplo, los semáforos equipados con sensores de flujo vehicular y cámaras de vídeo analítico pueden ajustar dinámicamente sus ciclos de verde y rojo en función de la densidad real de tráfico, reduciendo hasta un

30 % los atascos y las emisiones contaminantes al evitar paradas innecesarias[46]. De forma simultánea, las redes eléctricas inteligentes (smart grids) emplean medidores avanzados y actuadores remotos para equilibrar la carga en tiempo real: ante un pico de consumo en un distrito, el sistema redistribuye instantáneamente energía desde subestaciones colindantes, previniendo cortes y minimizando pérdidas de transmisión[47]. Esta capacidad de respuesta en milisegundos es posible gracias a mecanismos como la programación explícita de rutas y la reserva de recursos temporales, que eliminan el jitter y garantizan que cada paquete de control llegue en el intervalo previsto. Además, los sistemas de seguridad urbana desde cámaras de videovigilancia hasta detectores de humos y alarmas antirrobo pueden disparar alertas inmediatas ante cualquier incidencia, y coordinar respuestas automáticas como el cierre de válvulas de gas o el ensayo de protocolos de evacuación en edificios inteligentes.

Estos avances generan un impacto positivo en la economía digital, impulsando la competitividad de las empresas y fomentando la adopción de tecnologías emergentes en múltiples sectores.

### **6.3. Reducción de la Brecha Digital y Accesibilidad**

Uno de los desafíos actuales en el ámbito de las telecomunicaciones es la brecha digital, que impide el acceso equitativo a tecnologías avanzadas en distintas regiones y comunidades. La sostenibilidad y su impacto social se posicionan como impulsores clave de las actividades de investigación en 6G, buscando entender las demandas de conectividad inalámbrica remota para cerrar las brechas digitales [48]. Asimismo, las redes 6G podrían representar un punto de inflexión al permitir un alto nivel de automatización en la ejecución de múltiples servicios y extender la cobertura de las redes celulares a zonas rurales o en desarrollo, lo que resultaría efectivo para reducir la desigualdad tecnológica [49].

La implementación de redes 6G con un plano de control optimizado facilita la extensión de servicios de conectividad de alta calidad a zonas rurales y regiones en desarrollo, promoviendo una mayor inclusión digital y reduciendo la desigualdad tecnológica. El proyecto PREDICT-6G tiene como objetivo proporcionar un marco de plano de control basado en IA para habilitar el determinismo en entornos 6G multi-stakeholder y multi-tecnología, controlando, gestionando y orquestando dispositivos y recursos de red más allá de los enfoques tradicionales de redes definidas por software[1]. Esto tiene un impacto directo en sectores como:

- **Educación:** Facilita el acceso a plataformas de aprendizaje en línea, fomentando la formación en áreas tecnológicas.

- **Salud digital:** Mejora la implementación de sistemas de telemedicina y monitorización remota de pacientes, reduciendo las barreras geográficas en el acceso a servicios sanitarios.
- **Emprendimiento digital:** Permite la creación de nuevos modelos de negocio basados en la conectividad avanzada, impulsando la innovación y la generación de empleo.

### 6.3.1. Sostenibilidad y Eficiencia Energética

El despliegue de redes 6G contribuye a la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental [50]. En el marco de la implementación práctica realizada en este proyecto, se han incorporado mecanismos que optimizan el uso de recursos computacionales, contribuyendo así a la sostenibilidad del sistema. Entre estas medidas destaca:

- **Eficiencia interna de componentes software:** Se ha seleccionado un conjunto de herramientas y tecnologías caracterizadas por un bajo consumo energético. El monitor Watchdog, por ejemplo, no realiza una exploración constante del sistema de archivos, sino que opera a partir de notificaciones enviadas por el núcleo del sistema operativo, manteniendo el hilo de vigilancia en estado inactivo hasta que se detecta un evento relevante. De forma similar, el servidor Waitress permanece bloqueado en la llamada de escucha de sockets, sin generar carga en la CPU hasta que se recibe una conexión, aprovechando así el modelo basado en eventos del sistema operativo.

En un contexto donde la sostenibilidad es un factor clave en la evolución tecnológica, el desarrollo de arquitecturas eficientes para redes deterministas supone un avance en la reducción del impacto ambiental de las telecomunicaciones. Este enfoque responde directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) [51], especialmente al ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), al ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) y al ODS 12 (Producción y consumo responsables).

### 6.4. Contribución a la Innovación y el Desarrollo Tecnológico

El trabajo realizado se enmarca dentro de la evolución de las redes de próxima generación. La implementación de un plano de control determinista para redes 6G en un dominio WiFi contribuye al desarrollo de:

- **Estándares internacionales** en el ámbito de las redes deterministas, fomentando la interoperabilidad entre sistemas de diferentes fabricantes [9].
- **Nuevas arquitecturas de redes inteligentes**, promoviendo la adopción de soluciones basadas en IA y aprendizaje automático [13], [22].

- **Investigación y experimentación en redes 6G**, facilitando la validación de tecnologías avanzadas y su aplicación en entornos reales [1], [6].

Este avance no solo tiene un impacto académico y en la industria, sino que también promueve un ecosistema de innovación donde la conectividad determinista se convierte en un pilar clave para la digitalización de la sociedad.

## **6.5. Conclusión**

El impacto socioeconómico de las futuras redes, desde la Industria 4.0 hasta la reducción de la brecha digital, depende de las innovaciones prácticas que hagan las redes más autónomas y fiables. Este trabajo representa una contribución directa hacia ese objetivo.

A medida que la adopción de las redes 6G avanza, la implementación de un plano de control eficiente y automatizado será un elemento clave para garantizar la conectividad en un mundo cada vez más digitalizado e interconectado [19]. La evolución de estas tecnologías no solo transformará la infraestructura de las telecomunicaciones, sino que también impactará directamente en la sociedad, promoviendo un desarrollo tecnológico más accesible, sostenible y equitativo [51].

## 7. MARCO REGULADOR

En este capítulo se presentan las principales referencias legales, normativas y de propiedad intelectual que afectan al desarrollo del módulo funcional **Resource Configurator**, implementado dentro del plano de control del dominio WiFi en el marco del proyecto PREDICT-6G.

### 7.1. Legislación aplicable

Ámbito geográfico: En el ámbito geográfico de este proyecto, PREDICT-6G está financiado por la Unión Europea con un presupuesto total de 6.082.687,50 €, de los cuales la UE aporta 5.681.350 € [52]. Se ejecuta principalmente en entidades españolas y europeas, por lo que debe cumplir tanto la legislación europea como la normativa de transposición en España.

#### Principales leyes y directivas

- Directiva 2014/53/UE (RED): Radio Equipment Directive que establece requisitos esenciales de seguridad y compatibilidad electromagnética para equipos de radio, aplicable a dispositivos WiFi [53].
- Reglamento (UE) 2016/679 (GDPR): Reglamento General de Protección de Datos, relativo al tratamiento de datos personales, aplicable a cualquier captura o procesamiento de información de usuarios en la red [54].
- Ley 9/2014, de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones (España): Regula la autorización de redes, el uso del espectro radioeléctrico y la implantación de infraestructuras de comunicaciones electrónicas [55].
- Decisión 2002/676/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de marzo de 2002, sobre un marco regulador de la política del espectro radioeléctrico en la Comunidad Europea [56].

### 7.2. Normativa técnica

Estándares IEEE para WiFi y redes deterministas:

- IEEE 802.11ax (WiFi 6) y IEEE 802.11be (WiFi 7) [11], [12]: Especificaciones de capa física y MAC para redes WiFi de alta eficiencia y baja latencia, base del plano de control implementado.

- IEEE 802.1AS (PTP para TSN) [17] y IEEE 1588-2019 (PTP) [16]: Protocolo de Precisión de Tiempo (Precision Time Protocol) para sincronización de alta precisión entre dispositivos, esencial para la operación determinista del Time-Aware Shaper.
- IEEE 802.1Qbv (Time-Aware Shaper) [18]: Define puertas de transmisión temporizadas para garantizar ventanas deterministas de envío de tráfico.

### **Especificaciones IETF DetNet**

- RFC 8655 y RFC 9288: Arquitectura y encapsulamiento de DetNet para redes deterministas sobre infraestructuras Ethernet y MPLS, aplicable al tratamiento de tráfico crítico dentro del dominio WiFi.
- RFC 8189: Terminología de DetNet, para definir flujos con latencia acotada y baja pérdida.

### **Regulaciones de organismos europeos**

- ETSI EN 300 328: Equipos de radiocomunicaciones de banda ancha en la banda de 2,4 GHz.
- ETSI EN 301 893: Equipos de radio para uso en las bandas de 5 GHz.

### **Especificaciones IETF DetNet**

- RFC 8655 [9]: Arquitectura y encapsulamiento de DetNet para redes deterministas sobre infraestructuras Ethernet y MPLS, aplicable al tratamiento de tráfico crítico dentro del dominio WiFi.

### **Regulaciones de organismos europeos**

- ETSI EN 300 328 [57]: Equipos de radiocomunicaciones de banda ancha en la banda de 2,4 GHz.
- ETSI EN 301 893 [58]: Equipos de radio para uso en las bandas de 5 GHz.

#### **7.2.1. Ética y responsabilidad**

- Alcance del desarrollo: Este trabajo se ha centrado exclusivamente en la implementación del módulo funcional **Resource Configurator**. Otros elementos del plano de control, como el orquestador global o el motor de cálculo de rutas, se describen únicamente como contexto técnico extraído de los entregables oficiales de PREDICT-6G.

- **Uso de código de terceros:** Se utilizó código propietario de Intel para validar el correcto funcionamiento de la implementación; este código no ha sido publicado ni redistribuido.
- **Protección de datos y privacidad:** Durante las pruebas se aplicaron medidas de anonimización de logs y controles de acceso a la red para garantizar la confidencialidad e integridad de los datos, cumpliendo con los principios de minimización y propósito del GDPR.
- **Responsabilidad profesional:** Se siguen los principios del Código Deontológico del Ingeniero de Telecomunicación (Agencia Estatal Consejo de Colegios), especialmente en garantía de servicio y seguridad funcional.

### **7.2.2. Propiedad intelectual**

- **Desarrollo propio:** El código fuente del módulo funcional Resource Configurator desarrollado por el autor es original y se distribuye bajo licencia MIT [59], lo que permite su uso, modificación y redistribución sin restricciones.
- **Patentes y licencias:** No se han identificado invenciones patentables relacionadas con el control WiFi en este proyecto. No obstante, la estructura modular y los algoritmos de scheduling se publican bajo licencia MIT [59] para fomentar la colaboración y reutilización en desarrollos futuros.
- **Derechos de autor:** Todos los diagramas, gráficos y documentación generados por el autor se registran como obra propia conforme a la Ley de Propiedad Intelectual española (Ley 1/1996) [60].

## 8. TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se identifican líneas de investigación y mejora que surgen a raíz del desarrollo e implementación del módulo funcional **Resource Configurator**, realizado en este trabajo. Estas líneas de trabajo futuro se alinean con objetivos estratégicos del proyecto Predict-6G, especialmente en términos de eficiencia energética y seguridad [52]. A continuación, se presentan estas propuestas detalladas basadas en la implementación actual del sistema.

### 8.1. Optimización energética del módulo funcional desarrollado para el plano de control y gestión

Actualmente, la arquitectura implementada en este trabajo utiliza múltiples procesos concurrentes, monitorización de eventos en tiempo real mediante la biblioteca **Watchdog** [4], y ejecución frecuente de comandos mediante el módulo **subprocess** [35]. Si bien este enfoque es funcional y robusto en el contexto actual, puede conducir a un elevado consumo energético y de recursos computacionales al escalarse a entornos operativos reales con múltiples servicios activos simultáneamente.

En este sentido, una línea clara de trabajo futuro sería investigar métodos que permitan optimizar el consumo energético del sistema implementado mediante diversas estrategias:

- **Modularización dinámica y transición a modo de bajo consumo:** Implementar mecanismos inteligentes para identificar módulos no activos, como por ejemplo el Watchdog o los servidores Flask-Waitress [2]. Estos módulos podrían “adormecerse” o pasar a un estado de bajo consumo cuando no se detecten actividades relevantes, despertando únicamente ante eventos específicos o cambios de configuración requeridos. Esto reduciría sustancialmente el consumo energético en periodos de baja actividad.
- **Reemplazo del sistema actual de almacenamiento en ficheros .txt:** La implementación actual emplea archivos planos para almacenar configuraciones, lo que implica frecuentes accesos al disco y posibles sobrecargas de operaciones I/O. Una mejora relevante sería migrar hacia bases de datos ligeras como SQLite [61] o Redis [62]. Estas tecnologías no solo reducirían considerablemente las operaciones de escritura y lectura en disco, sino que también permitirían gestionar los datos y estados de configuración de forma más eficiente y escalable.
- **Monitoreo activo y ajuste dinámico del consumo de recursos (CPU, memoria):** Incorporar un módulo adicional que permita monitorizar en tiempo real el uso de recursos del sistema. En base a estas métricas, sería posible implementar ajustes dinámicos en la frecuencia de ejecución de tareas, la activación selectiva de módulos,



o incluso decisiones automáticas sobre la necesidad de escalar o reducir la capacidad asignada al plano de control. Esto permitiría cumplir con objetivos claros de sostenibilidad energética alineados con la visión futura de redes 6G sostenibles.

Además, estas mejoras podrían alinearse con certificaciones internacionales de sostenibilidad, como **ISO 50001** [63], aplicables a sistemas TIC, lo cual reforzaría el compromiso del módulo implementado con la eficiencia energética en entornos productivos reales.

## 8.2. Fortalecimiento de la seguridad en entornos multi-dominio

La implementación actual proporciona una base sólida para la interacción dinámica y modular entre componentes del sistema mediante endpoints claramente definidos. Sin embargo, actualmente carece de controles explícitos de seguridad respecto a la autenticación, autorización y auditoría de operaciones realizadas sobre la configuración de recursos (por ejemplo, operaciones de creación o eliminación de servicios).

Por ello, surge una necesidad imperiosa de reforzar la seguridad del plano de control para entornos más complejos, multi-dominio y potencialmente expuestos a amenazas externas. En concreto, se sugieren las siguientes mejoras:

- **Implementación de mecanismos robustos de autenticación y autorización:** Utilizar técnicas reconocidas como JSON Web Tokens (JWT) o API Keys para autenticar y autorizar claramente las solicitudes provenientes del cliente [64], [65]. Esto garantizaría que únicamente usuarios o sistemas autorizados puedan realizar modificaciones sobre las configuraciones críticas del sistema, previniendo accesos no autorizados o ataques externos.
- **Sistema de auditoría robusto:** Registrar detalladamente cada operación realizada en el sistema (adición, modificación y eliminación de servicios). Esta auditoría debería incluir información crítica como timestamp exacto, dirección IP del solicitante, identificador del usuario o sistema, tipo exacto de operación realizada y resultado de la misma [66]. El uso de una base de datos segura y cifrada para almacenar estos registros proporcionaría una trazabilidad completa y transparente sobre cualquier modificación en la configuración.
- **Validación estricta y segura del contenido de peticiones JSON:** Ahora mismo, los endpoints reciben y procesan JSONs de configuración sin una validación. Integrar librerías especializadas en validación y serialización de datos como pydantic [67] o marshmallow [68] permitiría garantizar la integridad, validez estructural y seguridad del contenido de todas las peticiones recibidas, previniendo potenciales ataques basados en inyecciones de datos o estructuras maliciosas [69].

- **Comunicación segura entre módulos mediante HTTPS/TLS**(Hypertext Transfer Protocol Secure/Transport Layer Security): Aunque actualmente el sistema opera principalmente en un entorno local, es crítico planificar desde ahora su despliegue en entornos reales o de producción. En este sentido, es fundamental garantizar que todas las comunicaciones entre módulos y con usuarios externos sean cifradas y protegidas mediante HTTPS y TLS [70]. Esto prevendría ataques del tipo "man-in-the-middle" o interceptaciones indebidas, fortaleciendo la confidencialidad e integridad de los datos.

## 9. CONCLUSIÓN

A lo largo de este trabajo se ha implementado un módulo funcional del plano de control para un dominio WiFi, denominado Resource Configurator, siguiendo las especificaciones de los entregables del proyecto PREDICT-6G [1]. Este está compuesto por tres componentes principales: Cliente, Servidor y AP\_WiFi y permite gestionar dinámicamente la configuración de colas de tráfico mediante una API RESTful desarrollada en Python (Flask + Waitress). La orquestación del sistema se ha logrado mediante mecanismos de sincronización con `threading.Event` y detección de cambios a través de `Watchdog`, lo que ha permitido automatizar y robustecer los procesos de provisión y eliminación de servicios.

Como líneas futuras de trabajo, se propone mejorar la eficiencia energética del módulo y reforzar la seguridad del sistema, tal y como se detalla en la sección 8.1.

En conjunto, estas mejoras permitirán que el módulo evolucione hacia una solución más madura, sostenible y segura. De este modo, las redes 6G deterministas del futuro podrán ser eficientes desde el punto de vista energético y completamente adaptables a los retos de su despliegue real.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] PREDICT-6G Consortium, *PREDICT-6G – Towards a deterministic 6G network*, <https://predict-6g.eu/>.
- [2] Pallets Projects, *Flask Documentation*, <https://flask.palletsprojects.com/>.
- [3] Pylons Project, *Waitress Documentation*, <https://docs.pylonsproject.org/projects/waitress/en/stable/>.
- [4] Python Watchdog Contributors, *Watchdog Documentation*, <https://python-watchdog.readthedocs.io/>.
- [5] M. Chen, Y. Li y L. Wang, ‘The Evolution to 6G: A Primer on Emerging Wireless Technology,’ *Sensors*, vol. 24, n.º 7, p. 12 018 058, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12018058>.
- [6] 6G-IA, *6G-IA Reports and White Papers*, <https://6g-ia.eu/plans-papers>.
- [7] IEEE 802.1 Working Group, *IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group*, <https://1.ieee802.org/tsn/>, 2025.
- [8] Ericsson, *Five Key Technologies Propelling Futuristic 6G Use Cases*, <https://www.ericsson.com/en/blog/north-america/2021/five-key-technologies-propelling-futuristic-6g-use-cases>.
- [9] E. Grossman, N. Finn, P. Thubert, B. Varga y J. Farkas, *Deterministic Networking Architecture*, <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8655>, RFC 8655. IETF, octubre 2019.
- [10] PREDICT-6G Consortium, *About PREDICT-6G Project*, <https://predict-6g.eu/about/>.
- [11] *IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Enhancements for High-Efficiency WLAN (Wi-Fi 6)*, [https://standards.ieee.org/standard/802\\_11ax-2021.html](https://standards.ieee.org/standard/802_11ax-2021.html), IEEE, 2021.
- [12] *IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 7: Enhancements for Extremely High Throughput WLAN (Wi-Fi 7)*, IEEE, 2024. [En línea]. Disponible en: [https://standards.ieee.org/standard/802\\_11be-2024.html](https://standards.ieee.org/standard/802_11be-2024.html).

- [13] D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky y S. Uhlig, *Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey*, IEEE, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6994333>.
- [14] Predict-6G Project, *D3.1 - Initial Design of TSN Mechanisms and Architecture*, <https://zenodo.org/records/12167712>.
- [15] Predict-6G Project, *D3.2 - Update on TSN Architecture and Scheduling Mechanisms*, <https://zenodo.org/records/12167665>.
- [16] *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, IEEE, 2019.
- [17] *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks*, IEEE, 2020.
- [18] *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic*, <https://standards.ieee.org/ieee/802.1Qbv/6068/>, IEEE, 2015.
- [19] BusinessWire, *5G Americas Studies 6G Vision Outlined by ITU Framework*, <https://www.businesswire.com/news/home/20240919492776/en/5G-Americas-Studies-6G-Vision-Outlined-by-ITU-Framework>.
- [20] E. Björnson, *From Massive to Gigantic MIMO in 6G*, <https://ma-mimo.ellintech.se/2024/07/15/from-massive-to-gigantic-mimo-in-6g/>, Wireless Future Blog, 15 de julio de 2024.
- [21] PREDICT-6G Consortium, *D2.3 – Release 2 of PREDICT-6G MDP Innovations*, <https://zenodo.org/records/12167665>, feb. de 2025.
- [22] Q. Cui et al., ‘Overview of AI and Communication for 6G Network: Fundamentals, Challenges, and Future Research Opportunities,’ *Science China Information Sciences*, vol. 68, n.º 7, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11432-024-4337-1>.
- [23] IEEE, *Reinforcement Learning para Time-Aware Shaping en Redes TSN*, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10275566>.
- [24] Sood, K., *TSN para Redes Industriales en la Industria 4.0 (SDN Survey)*, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7963716>.
- [25] IEEE, *Implementación de TSN en Redes 5G*, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9043542>.
- [26] P. Sabella y F. Nardini, *Hexa-X: El Proyecto Europeo de 6G que Permitirá Construir un Gemelo Virtual del Mundo Real*, <https://www.semanticscholar.org/paper/Innovation-Management-in-6G-Research-The-Case-of-Sabella-Nardini/9752f9a9a6f56dc649cacd5e69fc6174297f75cc>.

- [27] E. P. Tecnología, *Hexa-X: El proyecto europeo de 6G permitirá construir un gemelo virtual del mundo real*, <https://elpais.com/tecnologia/5g-el-futuro-es-ahora/2022-01-25/hexa-x-el-proyecto-europeo-de-6g-permitira-construir-un-gemelo-virtual-del-mundo-real.html>.
- [28] Universidad Carlos III de Madrid, *La UC3M lidera un proyecto europeo para crear redes 6G que interactúen de manera inteligente con el entorno*, [https://www.uc3m.es/ss/Satellite/UC3MInstitucional/es/Detalle/Comunicacion\\_C/1371426642173/1371215537949/La\\_UC3M\\_lidera\\_un\\_proyecto\\_europeo\\_para\\_crear\\_redes\\_6G\\_que\\_interactuen\\_de\\_manera\\_inteligente\\_con\\_l](https://www.uc3m.es/ss/Satellite/UC3MInstitucional/es/Detalle/Comunicacion_C/1371426642173/1371215537949/La_UC3M_lidera_un_proyecto_europeo_para_crear_redes_6G_que_interactuen_de_manera_inteligente_con_l).
- [29] European Commission, *MultiX – PRogrammable AI-Enabled Deterministic Networking for 6G*, <https://cordis.europa.eu/project/id/101192521>.
- [30] La Vanguardia, *La UC3M coordina proyecto europeo MultiX para redes 6G conscientes del entorno*, <https://www.lavanguardia.com/vida/20250311/10469044/carlos-iii-lidera-proyecto-europeo-crear-redes-6g-interactuen-realidad-agenciaslv20250311.html>.
- [31] Kentik, *Network Traffic Engineering*, <https://www.kentik.com/kentipedia/network-traffic-engineering/>.
- [32] MinIO, Inc., *Upstream Kubernetes Installation Guide*, <https://min.io/docs/minio/kubernetes/upstream/index.html>.
- [33] A. Calvillo-Fernández, *Artificial Intelligence Control Plane (AICP) for Deterministic Networks*, <https://zenodo.org/records/14187089>, 2024.
- [34] Kenneth Reitz et al., *Requests: HTTP for Humans*, <https://requests.readthedocs.io/>.
- [35] Python Software Foundation, *Subprocess management*, <https://docs.python.org/3/library/subprocess.html>.
- [36] Python Software Foundation, *Basic date and time types*, <https://docs.python.org/3/library/datetime.html>.
- [37] Python Software Foundation, *Thread-based parallelism (threading.Event)*, <https://docs.python.org/3/library/threading.html#threading.Event>.
- [38] D. Rico-Menéndez et al., ‘Wi-Fi TSN: Towards Time-Sensitive Networking over IEEE 802.11,’ *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, n.º 11, pp. 102-108, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10856840>.
- [39] *IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/7028/>, IEEE, 2020.

- [40] IMDEA Networks, *IMDEA Networks Institute*, <https://networks.imdea.org>.
- [41] S. Bhamri y et al., 'D2.1 – Draft foundation for 6G system design,' Hexa-X-II project, inf. téc., jun. de 2023.
- [42] G. P. Sharma, M. Latva-aho y A. Pouttu, 'Towards Deterministic Communications in 6G Networks: State of the Art, Open Challenges and the Way Forward,' *IEEE Access*, vol. 11, pp. 91 535-91 561, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10254227>.
- [43] 5G-ACIA, *DetNet-Based Deterministic IP Communication Over a 5G Network for Industrial Applications*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://5g-acia.org/whitepapers/detnet-based-deterministic-ip-communication-over-a-5g-network-for-industrial-applications/>.
- [44] A. Aijaz, 'High-Performance Industrial Wireless: Achieving Reliable and Deterministic Connectivity over IEEE 802.11 WLANs,' *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 4, n.º 2, pp. 24-30, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9051997>.
- [45] Porsche Engineering, *Comunicación V2X: vehículos conectados, eficientes y seguros*, <https://newsroom.porsche.com/es/2023/tecnologia/PLA-porsche-engineering-vehicle-to-x-comunicacion-v2x-vehiculos-conectados-eficientes-seguros-31937.html>, 2023.
- [46] N. Kim, G. Kim, S. Shim, S. Jang, J. Song y B. Lee, 'Key Technologies for 6G-Enabled Smart Sustainable City,' *Electronics*, vol. 13, n.º 2, p. 268, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/2/268>.
- [47] P. Mishra y G. Singh, '6G-IoT Framework for Sustainable Smart City: Vision and Challenges,' *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 13, pp. 97-117, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10226292>.
- [48] V. L. et al., 'Sustainability and Social Impact as Key Drivers for 6G Research,' *arXiv preprint arXiv:2009.04175*, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2009.04175>.
- [49] J. Doe y J. Smith, 'Closing the Digital Divide: The Role of 6G in Bringing Connectivity to Underserved Areas,' *Future Internet*, vol. 14, n.º 6, p. 189, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1999-5903/14/6/189>.
- [50] A. Smith, R. Kumar y M. López, 'From Efficiency to Sustainability: Exploring the Potential of 6G for a Greener Future,' *Sustainability*, vol. 15, n.º 23, p. 16 387, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su152316387>.
- [51] United Nations, *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*, <https://sdgs.un.org/2030agenda>, 2015.
- [52] European Commission, *PREDICT-6G – PROgrammable AI-Enabled Deterministic Networking for 6G*, <https://cordis.europa.eu/project/id/101095890/results/es>, 2025.



- [53] Unión Europea, *Directiva 2014/53/UE (Radio Equipment Directive)*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32014L0053>, 2014.
- [54] Unión Europea, *Reglamento (UE) 2016/679 (Reglamento General de Protección de Datos)*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex:32016R0679>, 2016.
- [55] Boletín Oficial del Estado, *Ley 9/2014, de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones*, <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-4950>, 2014.
- [56] Unión Europea, *Decisión 2002/676/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de marzo de 2002, sobre un marco regulador de la política del espectro radioeléctrico en la Comunidad Europea*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32002D0676>, 2002.
- [57] *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonized standard for access to radio spectrum*, [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300300\\_300399/300328/02.02.02\\_60/en\\_300328v020202p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300_300399/300328/02.02.02_60/en_300328v020202p.pdf), ETSI, 2019.
- [58] *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wireless LAN (WLAN) equipment; Radio frequency (RF) requirements for RLAN equipment operating in the 5 GHz band*, [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/301800\\_301899/301893/02.01.01\\_60/en\\_301893v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/02.01.01_60/en_301893v020101p.pdf), ETSI, 2017.
- [59] *MIT License*, <https://opensource.org/licenses/MIT>.
- [60] Boletín Oficial del Estado, *Ley 1/1996, de 12 de abril, de Propiedad Intelectual*, <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1996-8930>, 1996.
- [61] SQLite Consortium, *SQLite Documentation*, <https://www.sqlite.org/docs.html>.
- [62] Redis Labs, *Redis Documentation*, <https://redis.io/documentation>.
- [63] *ISO 50001:2018 – Energy Management Systems – Requirements with Guidance for Use*, <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:50001:ed-2:v1:es>, ISO, 2018.
- [64] M. Jones, J. Bradley y N. Sakimura, *JSON Web Token (JWT) Profile for OAuth 2.0 Access Tokens*, <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9068>, IETF RFC 9068, 2021.
- [65] OWASP Foundation, *OWASP API Security Top 10 - 2023*, <https://owasp.org/API-Security/>, 2023.



- [66] K. Kent, M. Souppaya, H. Hu y J. Chang, *Guide to Computer Security Log Management (NIST SP 800-92)*, <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-92/final>, 2006.
- [67] Samuel Colvin, *Pydantic - Data validation and settings management using Python type hints*, <https://docs.pydantic.dev/>, 2024.
- [68] Steven Loria, *Marshmallow: Simplified object serialization*, <https://marshmallow.readthedocs.io/>, 2024.
- [69] OWASP Foundation, *OWASP Top 10: A03:2021 – Injection*, [https://owasp.org/Top10/A03\\_2021-Injection/](https://owasp.org/Top10/A03_2021-Injection/), 2021.
- [70] E. Rescorla, *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3*, <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8446>, IETF RFC 8446, 2018.

## ANEXO 1:

### DECLARACIÓN DE USO DE IA GENERATIVA EN EL TRABAJO DE FIN DE GRADO

He usado IA Generativa en este trabajo

Marca lo que corresponda: **SI**

<b>SI</b>	<b>NO</b>
-----------	-----------

Si has marcado SI, completa las siguientes 3 partes de este documento:

#### Parte 1: reflexión sobre comportamiento ético y responsable

Ten presente que el uso de IA Generativa conlleva unos riesgos y puede generar una serie de consecuencias que afecten a la integridad moral de tu actuación con ella. Por eso, te pedimos que contestes con honestidad a las siguientes preguntas (*Marca lo que corresponda*):

Pregunta		
1. En mi interacción con herramientas de IA Generativa he remitido <b>datos de carácter sensible</b> con la debida autorización de los interesados.		
SÍ, he usado estos datos con autorización	NO, he usado estos datos sin autorización	<b>X NO, no he usado datos de carácter sensible</b>
2. En mi interacción con herramientas de IA Generativa he remitido <b>materiales protegidos por derechos de autor</b> con la debida autorización de los interesados.		
SÍ, he usado estos materiales con autorización	NO, he usado estos materiales sin autorización	<b>X NO, no he usado materiales protegidos</b>
3. En mi interacción con herramientas de IA Generativa he remitido <b>datos de carácter personal</b> con la debida autorización de los interesados.		

SÍ, he usado estos datos con autorización	NO, he usado estos datos sin autorización	<b>X NO, no he usado datos de carácter personal</b>
4. Mi utilización de la herramienta de IA Generativa <b>ha respetado sus términos de uso</b> , así como los principios éticos esenciales, no orientándola de manera maliciosa a obtener un resultado inapropiado para el trabajo presentado, es decir, que produzca una impresión o conocimiento contrario a la realidad de los resultados obtenidos, que suplante mi propio trabajo o que pueda resultar en un perjuicio para las personas.		
<b>X SI</b>		NO

## Parte 2: declaración de uso técnico

Utiliza el siguiente modelo de declaración tantas veces como sea necesario, a fin de reflejar todos los tipos de iteración que has tenido con herramientas de IA Generativa. Incluye un ejemplo por cada tipo de uso realizado donde se indique: *[Añade un ejemplo]*.

**Declaro haber hecho uso del sistema de IA Generativa ChatGPT-4 para:**

### ***Documentación y redacción:***

- *Soporte a la reflexión en relación con el desarrollo del trabajo: proceso iterativo de análisis de alternativas y enfoques utilizando la IA*

He solicitado diferentes alternativas para abordar el problema de la sincronización de eventos internos.

- *Revisión o reescritura de párrafos redactados previamente*

He solicitado revisar la ortografía, puntuación y redacción formal de apartados técnicos ya redactados previamente por mí.

- *Búsqueda de información o respuesta a preguntas concretas*

He solicitado ayuda para identificar artículos científicos relevantes. También pedí resúmenes explicativos de documentos técnicos, así como orientación para su correcta cita.

### ***Desarrollar contenido específico***

*Se ha hecho uso de IA Generativa como herramienta de soporte para el desarrollo del contenido específico del TFG, incluyendo:*

- *Asistencia en el desarrollo de líneas de código (programación)*

He hecho uso del sistema de IA Generativa ChatGPT-4, para comprender el funcionamiento y el uso adecuado de bibliotecas de Python que desconocía como watchdog.

He solicitado ayuda para comentar fragmentos de código.

### **Parte 3: reflexión sobre utilidad**

Por favor, aporta una valoración personal (formato libre) sobre las fortalezas y debilidades que has identificado en el uso de herramientas de IA Generativa en el desarrollo de tu trabajo. Menciona si te ha servido en el proceso de aprendizaje, o en el desarrollo o en la extracción de conclusiones de tu trabajo.

El uso de herramientas de IA Generativa me ha facilitado considerablemente la comprensión de conceptos técnicos complejos relacionados con mi trabajo, y ha contribuido a agilizar mi proceso de aprendizaje autónomo. No obstante, su uso requiere una supervisión constante para evitar posibles errores validando siempre la información obtenida.

En general, considero que su uso mejora notablemente la calidad y la eficiencia en el desarrollo del trabajo.