

itleformat

[display] Chapter 0 20pt
itleformat
0.01em

Estudio de P4 y su papel en la telemetría de red en banda para las redes 5G y beyond

Edinson Montero Beltre

7 de diciembre de 2025

Índice general

Dedicatoria	5
Acrónimos	9
1. Introducción	10
1.1. Contexto general de las redes 5G y beyond	10
1.2. Motivación del estudio	10
1.3. Problemática en la visibilidad y monitoreo de redes 5G y beyond	11
1.4. Hipótesis y preguntas de investigación	11
1.5. Objetivos generales y específicos	11
1.6. Metodología de trabajo	12
1.7. Estructura del documento	13
1.8. Resumen de capítulos	13
2. Fundamentos de las Redes 5G y Beyond	14
2.1. Evolución de tecnologías móviles	14
2.1.1. De 1G a 4G: Hitos clave	14
2.1.2. De 4G a 5G SA	14
2.1.3. 5G Advanced y Beyond-5G	15
2.1.4. Tendencias hacia 6G	15
2.2. Arquitectura 5G Non Standalone (NSA)	15
2.2.1. Opciones de arquitectura 3GPP para 5G NSA	15
2.3. Arquitectura 5G Standalone (SA)	17
2.3.1. Visión general de la arquitectura 5G SA	17
2.3.2. Service-Based Architecture (SBA)	18
2.3.3. Componentes principales: AMF, SMF, UPF, AUSF, UDM, PCF, NRF	19
2.3.4. Funciones del plano de control y plano de usuario	19
2.3.5. Interfaces clave: N1, N2, N3, N4, N6, N9	19
2.3.6. NGRAN y separación CP/UP	19
2.4. Protocolos relevantes en 5G	19

ÍNDICE GENERAL

2.4.1.	NGAP	19
2.4.2.	SCTP en 5G	19
2.4.3.	GTP-U	19
2.4.4.	PFCP	19
2.5.	QoS en 5G	19
2.5.1.	Conceptos de QFI, 5QI y políticas de flujo	19
2.5.2.	Programación del tráfico en UPF	19
2.5.3.	QoS-based routing y desafíos actuales	19
2.5.4.	Relación entre QoS y telemetría	19
3.	Telemetría en Redes 5G	20
3.1.	Necesidad de telemetría en redes modernas	21
3.1.1.	Limitaciones de mecanismos tradicionales (SNMP, Net- Flow, sFlow)	21
3.1.2.	Requisitos de visibilidad en URLLC, eMBB y mMTC	21
3.2.	In-Band Network Telemetry (INT)	21
3.2.1.	Concepto y motivación	21
3.2.2.	Arquitectura INT: source, transit y sink	21
3.2.3.	Metadatos INT-MD y su estructura	21
3.2.4.	INT vs telemetría out-of-band	21
3.3.	Telemetría aplicada en 5G	21
3.3.1.	Relevancia de INT en el plano de control N2	21
3.3.2.	Relevancia de INT en el plano de usuario N3	21
3.3.3.	Métricas clave para tráfico GTP-U	21
3.3.4.	Desafíos y limitaciones en redes móviles	21
4.	Fundamentos de P4 y Programación del Plano de Datos	22
4.1.	Introducción a P4	22
4.1.1.	Historia y evolución	22
4.1.2.	Modelo de arquitectura PISA	22
4.1.3.	P4_14 vs P4_16	22
4.2.	Herramientas y ecosistema P4	22
4.2.1.	BMv2 como switch software	22
4.2.2.	P4C: compilador	22
4.2.3.	P4Runtime: control del data plane	22
4.3.	Implementación de INT en P4	22
4.3.1.	Definición de cabeceras INT	22
4.3.2.	Parsing y deparsing en BMv2	22
4.3.3.	Inyección hop-by-hop de metadatos	22
4.3.4.	Limitaciones del pipeline P4	22

5. Entorno de Desarrollo e Implementación	23
5.1. Arquitectura general del sistema	24
5.1.1. Descripción general del diseño	24
5.1.2. Topología de red	24
5.1.3. Interacción entre NGRAN, AMF y switches P4	24
5.2. Despliegue del Core 5G SA	24
5.2.1. Componentes utilizados	24
5.2.2. Configuración y orquestación	24
5.2.3. Integración con UERANSIM	24
5.3. Implementación de la red de distribución P4	24
5.3.1. Diseño de los programas P4	24
5.3.2. Tablas y acciones configuradas	24
5.3.3. Inserción INT-MD en tráfico N2 (SCTP)	24
5.3.4. Inserción INT-MD en tráfico N3 (GTP-U)	24
5.4. Servidor de recolección y análisis	24
5.4.1. Implementación del sink INT	24
5.4.2. Procesamiento y parsing de metadatos	24
5.4.3. Modelo de base de datos	24
5.4.4. Visualización en Grafana	24
5.5. Tecnologías empleadas	24
5.5.1. Docker / Docker Compose	24
5.5.2. GNS3 / GNS3 VM	24
5.5.3. Wireshark y herramientas auxiliares	24
6. Resultados Experimentales	25
6.1. Metodología de evaluación	26
6.1.1. Escenarios de prueba	26
6.1.2. Tráfico analizado	26
6.1.3. Métricas recolectadas	26
6.2. Validación funcional	26
6.2.1. INT en tráfico N2	26
6.2.2. INT en tráfico N3	26
6.2.3. Recepción de metadatos en el servidor	26
6.3. Resultados cuantitativos	26
6.3.1. Latencia hop-by-hop	26
6.3.2. Carga adicional introducida por INT	26
6.3.3. Impacto en el plano de usuario	26
6.4. Resultados cualitativos	26
6.4.1. Dashboards obtenidos	26
6.4.2. Interpretación de tendencias	26
6.4.3. Problemas encontrados	26

ÍNDICE GENERAL

7. Discusión	27
7.1. Análisis crítico de los resultados	27
7.1.1. Comparación con el estado del arte	27
7.1.2. Validación de la hipótesis planteada	27
7.2. Beneficios del uso de P4 en redes 5G	27
7.3. Desafíos de escalabilidad	27
7.4. Consideraciones de seguridad para INT	27
7.5. Limitaciones del trabajo realizado	27
8. Conclusiones y Trabajo Futuro	28
8.1. Conclusiones principales	28
8.2. Contribuciones del trabajo	28
8.3. Limitaciones del estudio	28
8.4. Líneas futuras de investigación	28
8.4.1. INT en 6G	28
8.4.2. UPF programable con P4	28
8.4.3. IA para análisis de telemetría	28
A. Apéndices	29
A.1. Código P4	29
A.2. Topologías de red	29
A.3. Configuraciones del core 5G	29
A.4. Capturas de tráfico	29
A.5. Dashboards de Grafana	29
A.6. Scripts y herramientas auxiliares	29

Dedictory

A quienes me apoyaron en este proyecto.

Índice general

Índice de figuras

- 2.1. Posibles combinaciones de RAN y Core en una red 5G NSA [2]. 16

Índice de cuadros

Acrónimos

Acrónimo	Significado
5G	Fifth Generation (Quinta Generación)
5GC	5G Core (Núcleo de Red 5G)
API	Application Programming Interface (Interfaz de Programación de Aplicaciones)
DNS	Domain Name System (Sistema de Nombres de Dominio)
INT	In-band Network Telemetry (Telemetría en Banda)
IP	Internet Protocol (Protocolo de Internet)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Entrada Múltiple Salida Múltiple)
NFV	Network Functions Virtualization (Virtualización de Funciones de Red)
P4	Programming Protocol-Independent Packet Processors
QoS	Quality of Service (Calidad de Servicio)
SDN	Software-Defined Networking (Redes Definidas por Software)
TCP	Transmission Control Protocol (Protocolo de Control de Transmisión)
TLS	Transport Layer Security (Seguridad de la Capa de Transporte)
UDP	User Datagram Protocol (Protocolo de Datagrama de Usuario)
UE	User Equipment (Equipo de Usuario)
UL	Uplink (Enlace Ascendente)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles)
UPF	User Plane Function (Función del Plano de Usuario)
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications (Comunicaciones de Ultra Fiabilidad y Baja Latencia)

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto general de las redes 5G y beyond

Las redes de quinta generación (5G) representan un avance significativo en la evolución de las telecomunicaciones móviles, ofreciendo mayores velocidades, menor latencia y una capacidad mejorada para conectar dispositivos masivos. Con la creciente demanda de servicios en tiempo real y aplicaciones críticas, como la realidad aumentada, los vehículos autónomos y la telemedicina, en donde la latencia y la fiabilidad son esenciales debido a que cualquier retraso puede tener consecuencias graves, la necesidad de una visibilidad y monitoreo efectivos de la red se ha vuelto crucial. En esta evolución, las bajas latencias son cruciales para los nuevos servicios en la actualidad y los futuros, incluyendo la cuarta revolución industrial.

1.2. Motivación del estudio

La complejidad y dinamismo de las redes 5G y superiores, plantean desafíos significativos para la gestión y el monitoreo de la red. Los métodos tradicionales de telemetría, como SNMP y NetFlow, a menudo no proporcionan la granularidad y la rapidez necesarias para detectar y resolver problemas en tiempo real otorgando una visibilidad de extremo a extremo sobre el estado de la red de forma precisa. La telemetría en banda (In-Band Network Telemetry, INT) emerge como una solución prometedora para abordar estas limitaciones, permitiendo la recopilación de datos detallados directamente desde los paquetes que atraviesan la red. Este estudio se centra en explorar el papel de P4, un lenguaje de programación para definir el comportamiento de los dispositivos de red, en la implementación y optimización de soluciones de telemetría en banda para redes 5G y beyond.

1.3. Problemática en la visibilidad y monitoreo de redes 5G y beyond

A medida que las redes 5G se vuelven más complejas, la visibilidad y el monitoreo efectivos se convierten en desafíos críticos. La diversidad de servicios y la naturaleza dinámica del tráfico generan dificultades para identificar cuellos de botella, latencias elevadas y otros problemas de rendimiento. Además, la necesidad de cumplir con estrictos requisitos de calidad de servicio (QoS) y experiencia del usuario (QoE) exige soluciones de monitoreo que puedan adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes de la red. La problemática radica en cómo implementar mecanismos de telemetría que sean capaces de proporcionar datos precisos y en tiempo real sin introducir una sobrecarga significativa en la red.

1.4. Hipótesis y preguntas de investigación

La hipótesis central de este estudio es que la implementación de telemetría en banda utilizando P4 puede mejorar significativamente la visibilidad y el monitoreo de las redes 5G y beyond, permitiendo una gestión más eficiente y una mejor calidad de servicio. Las preguntas de investigación que guían este estudio incluyen:

- ¿Cómo puede P4 facilitar la implementación de soluciones de telemetría en banda en redes 5G y beyond?
- ¿Qué beneficios específicos ofrece la telemetría en banda en comparación con los métodos tradicionales de monitoreo?
- ¿Cuáles son los desafíos y limitaciones asociados con el uso de P4 para telemetría en banda en entornos 5G y beyond?
- ¿Cómo afecta la telemetría en banda al rendimiento general de la red y a la experiencia del usuario?

1.5. Objetivos generales y específicos

El objetivo general de este estudio es evaluar el papel de P4 en la implementación de telemetría en banda para mejorar la visibilidad y el monitoreo de las redes 5G y beyond. Los objetivos específicos incluyen:

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

- Analizar las capacidades de P4 para definir y programar el comportamiento de los dispositivos de red en el contexto de la telemetría en banda, específicamente INT-MD.
- Diseñar e implementar un prototipo de telemetría en banda (INT-MD) utilizando P4 en un entorno de red 5G SA simulado.
- Evaluar el rendimiento y la efectividad de la solución propuesta en términos de visibilidad, latencia y sobrecarga de la red.
- Identificar los desafíos y limitaciones encontrados durante la implementación y proponer posibles soluciones o mejoras.

1.6. Metodología de trabajo

Este estudio adoptará un enfoque experimental y analítico para investigar el papel de P4 en la telemetría en banda para redes 5G y beyond. La metodología incluirá las siguientes etapas:

- Revisión bibliográfica: Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre telemetría en banda, P4 y redes 5G y beyond para establecer un marco teórico sólido.
- Diseño del prototipo: Se diseñará un prototipo de telemetría en banda utilizando P4, definiendo las tablas y acciones necesarias para insertar metadatos INT-MD en el tráfico N2 (SCTP) y N3 (GTP-U).
- Implementación: El prototipo se implementará en un entorno emulado usando herramientas como GNS3 y VMware workstation que contará con Routers Cisco y switches P4 (BMv2), los cuales serán programados para soportar INT-MD y por último, un servidor sink para la recolección y análisis de los datos de telemetría usando InfluxDB y Grafana para representar los datos. Este prototipo integrará un core 5G SA básico y una red de distribución programable con P4.
- Evaluación: Se llevarán a cabo pruebas para evaluar el rendimiento del prototipo, midiendo métricas como la latencia, la sobrecarga de la red y la precisión de los datos recopilados, así como el impacto de la telemetría en banda en la calidad del servicio.
- Análisis de resultados: Los resultados obtenidos se analizarán críticamente para identificar beneficios, desafíos y áreas de mejora.

1.7. Estructura del documento

El documento se estructura en varios capítulos que abordan diferentes aspectos del estudio:

- Capítulo 1: **Introducción** - Presenta el contexto, la motivación, los objetivos y la metodología del estudio.
- Capítulo 2: **Redes 5G** - Proporciona una visión general de las redes 5G, sus características y desafíos.
- Capítulo 3: **Telemetría en Redes 5G** - Explora la necesidad de telemetría, los métodos tradicionales y la telemetría en banda (INT).
- Capítulo 4: **Fundamentos de P4** - Describe el lenguaje P4, su arquitectura y capacidades relevantes para la telemetría.
- Capítulo 5: **Entorno de Desarrollo** - Detalla el entorno utilizado para implementar y probar el prototipo de telemetría en banda.
- Capítulo 6: **Resultados** - Presenta los resultados obtenidos durante las pruebas del prototipo.
- Capítulo 7: **Discusión** - Analiza críticamente los resultados, comparándolos con el estado del arte y discutiendo beneficios y desafíos.
- Capítulo 8: **Conclusiones y Trabajo Futuro** - Resume las conclusiones principales, contribuciones, limitaciones y propone líneas futuras de investigación.

1.8. Resumen de capítulos

Cada capítulo del documento se enfoca en aspectos específicos del estudio, proporcionando una comprensión integral del papel de P4 en la telemetría en banda para redes 5G. A lo largo del documento, se integran conceptos teóricos con aplicaciones prácticas, culminando en un análisis crítico de los resultados obtenidos y su relevancia para el campo de las telecomunicaciones móviles.

Capítulo 2

Fundamentos de las Redes 5G y Beyond

2.1. Evolución de tecnologías móviles

Las redes móviles han evolucionado significativamente desde su inicio, pasando por varias generaciones que han mejorado la capacidad, velocidad y latencia de las comunicaciones inalámbricas. pasando a ser una pieza clave en la infraestructura de telecomunicaciones global, impactando positivamente en diversos sectores como la industria, la salud y el entretenimiento, entre otros.

2.1.1. De 1G a 4G: Hitos clave

1G: Introducción de la comunicación analógica.

2G: Digitalización de la voz y servicios básicos de datos (SMS).

3G: Introducción de datos móviles y servicios multimedia.

4G: Redes IP y mayor velocidad de datos.

LTE y LTE-Advanced: Mejoras en eficiencia espectral y latencia.

2.1.2. De 4G a 5G SA

5G Non-Standalone (NSA): Uso combinado de 4G y 5G para una transición suave. Aumentando la capacidad y velocidad de la red.

5G Standalone (SA): Arquitectura completamente nueva basada en servicios y virtualización, permitiendo nuevas funcionalidades y mejoras en latencia y confiabilidad.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE LAS REDES 5G Y BEYOND

2.1.3. 5G Advanced y Beyond-5G

5G Advanced: Mejoras en IA, eficiencia energética y soporte para nuevas aplicaciones, como XR y comunicaciones vehiculares.

Beyond-5G: Investigación en tecnologías emergentes como comunicaciones cuánticas y redes holográficas, con miras a la futura generación 6G.

2.1.4. Tendencias hacia 6G

Visión de 6G: Redes ultra confiables, latencia casi nula y capacidades de inteligencia artificial integradas de manera nativa.

Tecnologías emergentes: Comunicaciones terahertz, redes auto-organizadas y computación en el borde (Edge Computing).

Aplicaciones futuras: Realidad extendida (XR), ciudades inteligentes (Smart Cities) y redes de sensores masivos (IoT masivo).

Desafíos: Seguridad, privacidad y sostenibilidad ambiental.

2.2. Arquitectura 5G Non Standalone (NSA)

2.2.1. Opciones de arquitectura 3GPP para 5G NSA

El trabajo realizado por el 3GPP sobre la arquitectura de la red 5G dio como resultado un conjunto de alternativas arquitectónicas, fundamentadas en tres decisiones clave del propio 3GPP. Este estudio está documentado en el reporte técnico 3GPP TR 23.799 [1], donde se describen las diferentes opciones arquitectónicas para la implementación de redes 5G NSA. A continuación, se presentan las principales opciones:

- **Opción 1:** Arquitectura basada en LTE/EPC, donde el Core de la red sigue siendo el EPC y se utiliza NR como acceso adicional.
- **Opción 2:** Arquitectura basada en 5G Core (5GC), donde tanto el acceso como el Core de la red son 5G (SA).
- **Opción 3:** Arquitectura híbrida que combina elementos de LTE/EPC y 5GC, permitiendo una transición gradual hacia 5G.

El hecho de que la red de acceso LTE y NR puedan coexistir en una misma red 5G NSA, permite a los operadores de red aprovechar la infraestructura existente de LTE mientras implementan nuevas capacidades de NR. Por lo que la red LTE (RAN) tiene dos formas de conectarse con el Core (Core):

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE LAS REDES 5G Y BEYOND

- **Conexión mediante S1 al EPC:** En esta configuración, la red LTE se conecta al EPC a través de la interfaz S1, mientras que la red NR se conecta al EPC a través de una interfaz adaptada. Esta opción permite una integración más sencilla con la infraestructura LTE existente.
- **Conexión mediante N2/N3 al Core 5GC:** En esta configuración, la red LTE se conecta al Core 5GC a través de las interfaces N2 y N3, mientras que la red NR también se conecta al 5GC. Esto permite una integración más estrecha entre las redes LTE y NR, facilitando la gestión y el control de la red.

Teniendo en cuenta que RAN de LTE y NR pueden coexistir en una misma red 5G NSA, existen cuatro formas de implementar LTE y/o NR. [1]:

- **Opción 1:** Solo LTE para todo el tráfico de datos y señalización.
- **Opción 2:** Solo NR para todo el tráfico de datos y señalización.
- **Opción 3:** Una combinación de LTE y NR donde LTE tiene la mayor cobertura y se utiliza para señalización, mientras que LTE y NR se utilizan para tráfico de datos.
- **Opción 4:** Una combinación de LTE y NR donde NR tiene la mayor cobertura y se utiliza para señalización, mientras que LTE y NR se utilizan para tráfico de datos.

Considerando la integración de 2 Core diferentes (EPC y 5GC) en una red 5G NSA, existen 8 formas de implementar la arquitectura 5G NSA. [2].

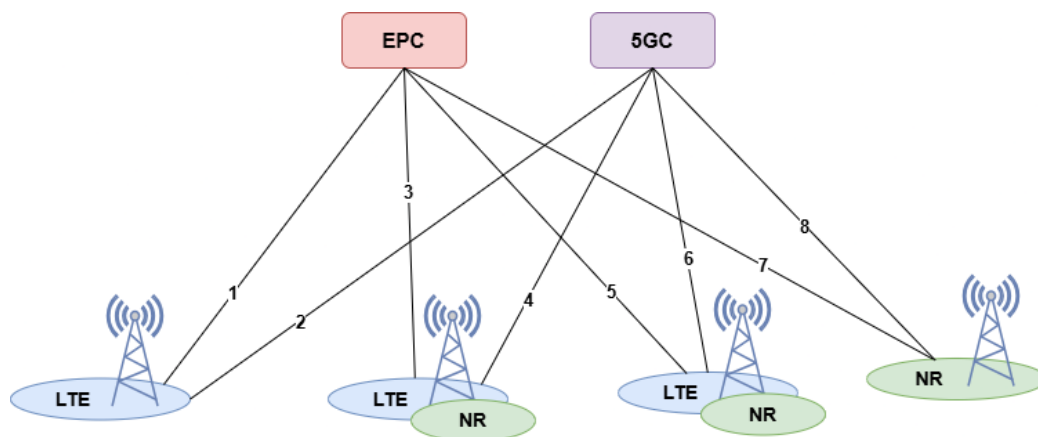


Figura 2.1: Posibles combinaciones de RAN y Core en una red 5G NSA [2].

En la figura 2.1 se muestran las diferentes combinaciones posibles de RAN y Core en una red 5G NSA. Las cuales son:

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE LAS REDES 5G Y BEYOND

- **Opción 1:** RAN LTE conectada al EPC. (Solo LTE)
- **Opción 2:** RAN LTE conectada al 5GC. (Solo LTE)
- **Opción 3:** RAN LTE y NR conectadas al EPC. (LTE para señalización y datos, NR para datos)
- **Opción 4:** RAN LTE y NR conectadas al 5GC. (LTE para señalización y datos, NR para datos)
- **Opción 5:** RAN NR y LTE conectadas al EPC. (NR para señalización y datos, LTE para datos)
- **Opción 6:** RAN NR y LTE conectadas al 5GC. (NR para señalización y datos, LTE para datos)
- **Opción 7:** RAN NR conectada al EPC. (Solo NR)
- **Opción 8:** RAN NR conectada al 5GC. (Solo NR)

2.3. Arquitectura 5G Standalone (SA)

2.3.1. Visión general de la arquitectura 5G SA

Separación del plano de control y plano de usuario: Mejora en la flexibilidad y escalabilidad.

Redes definidas por software (SDN) y virtualización de funciones de red (NFV): Permiten una gestión dinámica de los recursos de red.

- **EN-DC (E-UTRA-NR Dual Connectivity):** el UE (User Equipment) se conecta simultáneamente a una estación base LTE (eNodeB) como master node (MN) y a una estación base NR (gNodeB) como secondary node (SN), utilizando el EPC como Core de la red. El gNodeB (en-gNB) se puede conectar al EPC mediante la interface S1-U o x2-U para el plano de usuario y la interfaz S1-MME o X2-C para el plano de control.
- **NE-DC (NR-E-UTRA Dual Connectivity):** el UE se conecta simultáneamente a una estación base gNodeB como master node (MN) y a una estación base eNodeB como secondary node (SN), utilizando el EPC como Core de la red.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE LAS REDES 5G Y BEYOND

- **NGEN-DC (ng-eNB en modo NSA)**: el UE se conecta simultáneamente a una estación base ng-eNB como master node (MN) y a una estación base gNodeB como secondary node (SN), utilizando el EPC como Core de la red.

2.3.2. Service-Based Architecture (SBA)

La arquitectura basada en servicios (SBA) es un enfoque modular que permite a las funciones de red comunicarse entre sí a través de interfaces estándar.

Microservicios: Cada función de red se implementa como un microservicio independiente.

APIs RESTful: Comunicación entre funciones de red mediante APIs basadas en REST.

Escalabilidad y flexibilidad: Facilita la adaptación a diferentes demandas de tráfico y servicios.

Ejemplos de funciones de red SBA: AMF, SMF, UPF, AUSF, UDM, PCF, NRF.

Beneficios de SBA: Reducción de costos operativos, mejora en la eficiencia y soporte para nuevas aplicaciones.

Desafíos de SBA: Complejidad en la gestión, interoperabilidad y seguridad.

Implementación de SBA: Uso de contenedores y orquestadores como Kubernetes para desplegar funciones de red.

Evolución futura: Integración con tecnologías emergentes como IA y edge computing.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE LAS REDES 5G Y BEYOND

2.3.3. Componentes principales: AMF, SMF, UPF, AUSF, UDM, PCF, NRF

2.3.4. Funciones del plano de control y plano de usuario

2.3.5. Interfaces clave: N1, N2, N3, N4, N6, N9

2.3.6. NGRAN y separación CP/UP

2.4. Protocolos relevantes en 5G

2.4.1. NGAP

2.4.2. SCTP en 5G

2.4.3. GTP-U

2.4.4. PFCP

2.5. QoS en 5G

2.5.1. Conceptos de QFI, 5QI y políticas de flujo

2.5.2. Programación del tráfico en UPF

2.5.3. QoS-based routing y desafíos actuales

2.5.4. Relación entre QoS y telemetría

Capítulo 3

Telemetría en Redes 5G

3.1. Necesidad de telemetría en redes modernas

3.1.1. Limitaciones de mecanismos tradicionales (SNMP, NetFlow, sFlow)

3.1.2. Requisitos de visibilidad en URLLC, eMBB y mMTC

3.2. In-Band Network Telemetry (INT)

3.2.1. Concepto y motivación

3.2.2. Arquitectura INT: source, transit y sink

3.2.3. Metadatos INT-MD y su estructura

3.2.4. INT vs telemetría out-of-band

3.3. Telemetría aplicada en 5G

3.3.1. Relevancia de INT en el plano de control N2

3.3.2. Relevancia de INT en el plano de usuario N3

3.3.3. Métricas clave para tráfico GTP-U

3.3.4. Desafíos y limitaciones en redes móviles

Capítulo 4

Fundamentos de P4 y Programación del Plano de Datos

4.1. Introducción a P4

4.1.1. Historia y evolución

4.1.2. Modelo de arquitectura PISA

4.1.3. P4_14 vs P4_16

4.2. Herramientas y ecosistema P4

4.2.1. BMv2 como switch software

4.2.2. P4C: compilador

4.2.3. P4Runtime: control del data plane

4.3. Implementación de INT en P4

4.3.1. Definición de cabeceras INT

4.3.2. Parsing y deparsing en BMv2

4.3.3. Inyección hop-by-hop de metadatos

4.3.4. Limitaciones del pipeline P4

Capítulo 5

Entorno de Desarrollo e Implementación

5.1. Arquitectura general del sistema

5.1.1. Descripción general del diseño

5.1.2. Topología de red

5.1.3. Interacción entre NGRAN, AMF y switches P4

5.2. Despliegue del Core 5G SA

5.2.1. Componentes utilizados

5.2.2. Configuración y orquestación

5.2.3. Integración con UERANSIM

5.3. Implementación de la red de distribución P4

5.3.1. Diseño de los programas P4

5.3.2. Tablas y acciones configuradas

5.3.3. Inserción INT-MD en tráfico N2 (SCTP)

5.3.4. Inserción INT-MD en tráfico N3 (GTP-U)

5.4. Servidor de recolección y análisis

5.4.1. Implementación del sink INT

5.4.2. Procesamiento y parsing de metadatos

5.4.3. Modelo de base de datos

Capítulo 6

Resultados Experimentales

6.1. Metodología de evaluación

6.1.1. Escenarios de prueba

6.1.2. Tráfico analizado

6.1.3. Métricas recolectadas

6.2. Validación funcional

6.2.1. INT en tráfico N2

6.2.2. INT en tráfico N3

6.2.3. Recepción de metadatos en el servidor

6.3. Resultados cuantitativos

6.3.1. Latencia hop-by-hop

6.3.2. Carga adicional introducida por INT

6.3.3. Impacto en el plano de usuario

6.4. Resultados cualitativos

6.4.1. Dashboards obtenidos

6.4.2. Interpretación de tendencias

6.4.3. Problemas encontrados

Capítulo 7

Discusión

7.1. Análisis crítico de los resultados

7.1.1. Comparación con el estado del arte

7.1.2. Validación de la hipótesis planteada

7.2. Beneficios del uso de P4 en redes 5G

7.3. Desafíos de escalabilidad

7.4. Consideraciones de seguridad para INT

7.5. Limitaciones del trabajo realizado

Capítulo 8

Conclusiones y Trabajo Futuro

- 8.1. Conclusiones principales
- 8.2. Contribuciones del trabajo
- 8.3. Limitaciones del estudio
- 8.4. Líneas futuras de investigación
 - 8.4.1. INT en 6G
 - 8.4.2. UPF programable con P4
 - 8.4.3. IA para análisis de telemetría

Apéndice A

Apéndices

A.1. Código P4

A.2. Topologías de red

A.3. Configuraciones del core 5G

A.4. Capturas de tráfico

A.5. Dashboards de Grafana

A.6. Scripts y herramientas auxiliares

Bibliografía

- [1] 3GPP. 3gpp tr 23.799: Study on new radio access technology architecture for 5g. Technical report, 2014.
- [2] 3GPP. 3gpp sp-160455: Technical specification group services and system aspects. Technical report, 2016.