

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

Edinson Montero Beltre

December 13, 2025

Contents

Dedicatoria	5
Acrónimos	6
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	12
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	15
2.1 Evolución de tecnologías móviles	15
2.1.1 De 1G a 6G: Hitos clave	15
2.2 Arquitectura NR en 5G	16
2.3 Arquitectura 5G Non Standalone (NSA)	17
2.4 Arquitectura 5G Standalone (SA)	19
2.4.1 Visión general de la arquitectura 5G SA	19
2.4.2 Arquitectura basada en servicios (SBA)	20
2.4.3 Interfaces HTTP REST	21
2.4.4 Componentes de 5G Core (5GC)	22
2.4.5 Componentes principales de 5GC	22
2.4.6 Pila de protocolos del plano de control y plano de usuario	24
2.4.6.1 Plano de Control	24
2.4.6.2 Plano de Usuario	25
2.4.7 Interfaces clave en 5GC	25
2.4.8 Tendencias emergentes en redes beyond 5G	26

CONTENTS	2
3 Telemetría y QoS en 5G	28
3.1 Desafíos de Telemetría en Redes 5G	29
3.1.1 Limitaciones de mecanismos tradicionales (SNMP, Net-Flow, sFlow)	29
3.1.2 Requisitos de visibilidad en URLLC, eMBB y mMTC	29
3.2 In-Band Network Telemetry (INT)	29
3.2.1 Concepto y motivación	29
3.2.2 Arquitectura INT: source, transit y sink	29
3.2.3 Metadatos INT-MD y su estructura	29
3.2.4 INT vs telemetría out-of-band	29
3.3 Telemetría aplicada en 5G	29
3.3.1 Relevancia de INT en el plano de control N2	29
3.3.2 Relevancia de INT en el plano de usuario N3	29
3.3.3 Métricas clave para tráfico GTP-U	29
3.3.4 Desafíos y limitaciones en redes móviles	29
3.4 Calidad de Servicio en 5G	29
3.5 QoS basado en 5G Flujo	29
3.5.1 Definición de flujo en 5G	29
3.5.2 Identificación y clasificación de flujos	29
3.5.3 Mecanismos de gestión de QoS por flujo	29
3.6 Señalización de QoS en 5G	29
3.7 Características de QoS en 5G	29
4 Fundamentos de P4 y Programación del Plano de Datos	30
4.1 Introducción a P4	30
4.1.1 Historia y evolución	30
4.1.2 Modelo de arquitectura PISA	30
4.1.3 P4_14 vs P4_16	30
4.2 Herramientas y ecosistema P4	30
4.2.1 BMv2 como switch software	30
4.2.2 P4C: compilador	30
4.2.3 P4Runtime: control del data plane	30
4.3 Implementación de INT en P4	30
4.3.1 Definición de cabeceras INT	30
4.3.2 Parsing y deparsing en BMv2	30
4.3.3 Inyección hop-by-hop de metadatos	30
4.3.4 Limitaciones del pipeline P4	30
5 Entorno de Desarrollo Implementado	31
5.1 Arquitectura general del sistema	31
5.1.1 Diseño de la red 5G SA	32

5.1.1.1	Diseño de alto nivel (HLD)	33
5.1.1.2	Diseño de bajo nivel (LLD)	33
5.2	Despliegue del Core 5G SA	34
5.2.1	Configuración de Core-Host	34
5.2.1.1	Despliegue con Docker Compose	34
5.2.1.1.1	DB	34
5.2.1.1.2	NRF	36
5.2.1.1.3	AUSF	36
5.2.1.1.4	NSSF	36
5.2.1.1.5	PCF	36
5.2.1.1.6	UDM	36
5.2.1.1.7	UDR	36
5.2.1.2	Despliegue del AMF	36
5.2.1.3	Despliegue del SMF	36
5.2.1.4	Despliegue del UPF	36
5.2.2	Configuración y orquestación	36
5.2.3	Integración con UERANSIM	36
5.3	Implementación de la red de distribución P4	36
5.3.1	Diseño de los programas P4	36
5.3.2	Tablas y acciones configuradas	36
5.3.3	Inserción INT-MD en tráfico N2 (SCTP)	36
5.3.4	Inserción INT-MD en tráfico N3 (GTP-U)	36
5.4	Servidor de recolección y análisis	36
5.4.1	Implementación del sink INT	36
5.4.2	Procesamiento y parsing de metadatos	36
5.4.3	Modelo de base de datos	36
5.4.4	Visualización en Grafana	36
5.5	Tecnologías empleadas	36
5.5.1	Docker / Docker Compose	36
5.5.2	GNS3 / GNS3 VM	36
5.5.3	Wireshark y herramientas auxiliares	36
6	Resultados Experimentales	37
6.1	Metodología de evaluación	38
6.1.1	Escenarios de prueba	38
6.1.2	Tráfico analizado	38
6.1.3	Métricas recolectadas	38
6.2	Validación funcional	38
6.2.1	INT en tráfico N2	38
6.2.2	INT en tráfico N3	38
6.2.3	Recepción de metadatos en el servidor	38

CONTENTS	4
6.3 Resultados cuantitativos	38
6.3.1 Latencia hop-by-hop	38
6.3.2 Carga adicional introducida por INT	38
6.3.3 Impacto en el plano de usuario	38
6.4 Resultados cualitativos	38
6.4.1 Dashboards obtenidos	38
6.4.2 Interpretación de tendencias	38
6.4.3 Problemas encontrados	38
7 Discusión	39
7.1 Análisis crítico de los resultados	39
7.1.1 Comparación con el estado del arte	39
7.1.2 Validación de la hipótesis planteada	39
7.2 Beneficios del uso de P4 en redes 5G	39
7.3 Desafíos de escalabilidad	39
7.4 Consideraciones de seguridad para INT	39
7.5 Limitaciones del trabajo realizado	39
8 Conclusiones y Trabajo Futuro	40
8.1 Conclusiones principales	40
8.2 Contribuciones del trabajo	40
8.3 Limitaciones del estudio	40
8.4 Líneas futuras de investigación	40
8.4.1 INT en 6G	40
8.4.2 UPF programable con P4	40
8.4.3 IA para análisis de telemetría	40
A Apéndices	41
A.1 Código P4	41
A.2 Topologías de red	41
A.3 Configuraciones del core 5G	41
A.4 Capturas de tráfico	41
A.5 Dashboards de Grafana	41
A.6 Scripts y herramientas auxiliares	41

Dedicatory

A quienes me apoyaron en este proyecto.

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)

Contents

List of Figures

2.1	Opciones de implementación de NR en 5G: NSA y SA [1].	17
2.2	Arquitectura 5GC basada en interfaces basadas en servicios [4].	20
2.3	Arquitectura 5GC con interfaces punto a punto. [4].	21
2.4	Pila de protocolos del plano de control en 5GC [1].	24
2.5	Pila de protocolos del plano de usuario en 5GC. [1, 2].	25
5.1	Arquitectura general	32
5.2	Topología de red implementada en GNS3	33

List of Tables

5.1 Diseño de bajo nivel (LLD)	33
--	----

Chapter 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:

- 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.

Chapter 2

Fundamentos de las Redes 5G y Beyond

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales de las redes 5G y beyond, incluyendo su evolución desde generaciones anteriores, las características clave de la arquitectura 5G, y las tendencias emergentes hacia futuras generaciones de redes móviles. Se abordan aspectos técnicos como la arquitectura del núcleo de red 5GC, las funciones principales del plano de control y del plano de usuario, así como las tecnologías habilitadoras que sustentan el despliegue y operación de estas redes avanzadas.

2.1 Evolución de tecnologías móviles

La evolución de las tecnologías móviles ha sido un proceso continuo que ha transformado la forma en que las personas se comunican y acceden a la información. Desde la primera generación (1G) hasta la actual quinta generación (5G) y más allá, cada etapa ha introducido avances significativos en términos de velocidad, capacidad, latencia y funcionalidad. A continuación, se presenta un resumen de la evolución de las tecnologías móviles:

2.1.1 De 1G a 6G: 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.
- **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.
- **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.
- **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 NR en 5G

3GPP introdujo 6 opciones de implementación para la tecnología New Radio (NR) como se muestra en la figura 2.1. Estas opciones se dividen en dos categorías principales: **Non-Standalone (NSA)** y **Standalone (SA)**. SA representa una arquitectura con NR como única tecnología de acceso, mientras que NSA combina NR con la infraestructura existente de 4G LTE. Las opciones 1, 2, 5 son implementaciones SA, mientras que las opciones 3, 4 y 7 son implementaciones NSA. Cabe destacar que la opción 1 es puramente LTE sin NR.

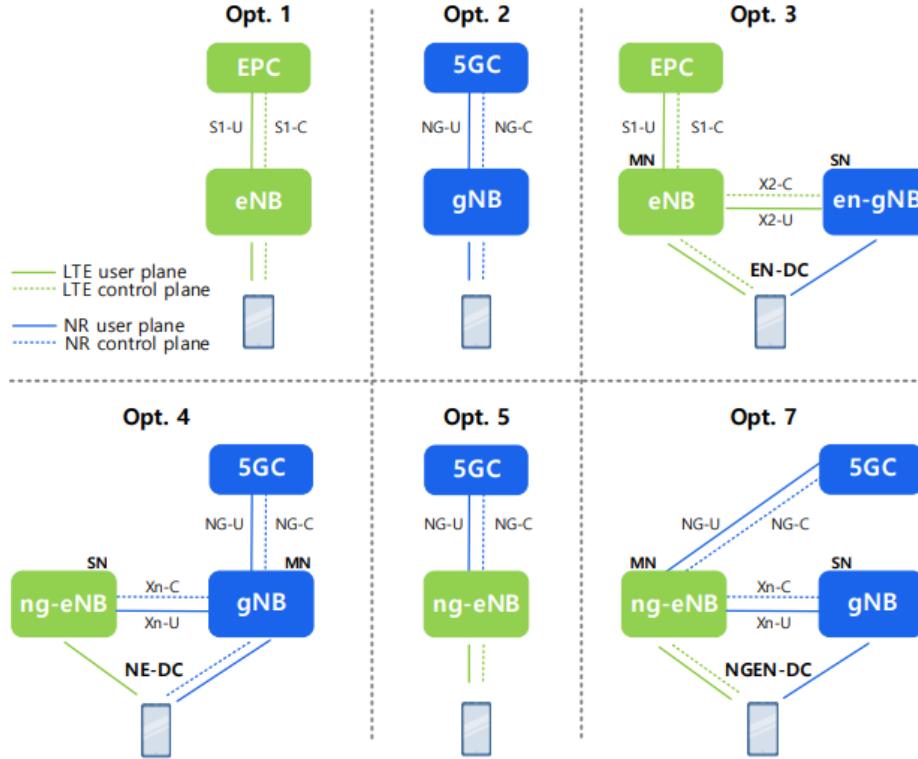


Figure 2.1: Opciones de implementación de NR en 5G: NSA y SA [1].

2.3 Arquitectura 5G Non Standalone (NSA)

La arquitectura 5G Non-Standalone (NSA) es una configuración de red que permite la coexistencia y colaboración entre las tecnologías 4G LTE y 5G NR. En esta arquitectura, la red 4G LTE actúa como la red principal para la señalización y el control, mientras que la red 5G NR se utiliza principalmente para el transporte de datos de alta velocidad. Esta coexistencia se logra mediante **Multi-Radio Dual Connectivity (MR-DC)**, descrito más adelante y que permite a los dispositivos de usuario (UE) conectarse simultáneamente a dos distintas generaciones de red de radio. Las opciones pueden ser:

- **EN-DC (E-UTRA-NR Dual Connectivity):** *Opcion 3*, donde el UE se conecta a una estación base LTE (eNodeB) como nodo maestro y a una estación base NR (gNodeB) como nodo secundario. El eNodeB

gestiona la señalización y el control, mientras que el gNodeB se utiliza principalmente para la transferencia de datos de alta velocidad.

- **NGEN-DC (NG-RAN E-UTRA-NR Dual Connectivity):** *Opcion 7*, similar a la opcion 3, pero con una integración más estrecha entre las estaciones base LTE y NR. En este modo, el eNodeB y el gNodeB están conectados a través de la interfaz Xn, lo que permite una mejor coordinación y gestión de recursos entre ambas tecnologías.
- **NE-DC (NR-E-UTRA Dual Connectivity):** *Opcion 4*, donde el UE se conecta a ng-eNB como MN y gNB como SN y ambas estaciones base están conectadas a través de la interfaz Xn. En este modo, el ng-eNB gestiona la señalización y el control, mientras que el gNB se utiliza para la transferencia de datos.
- **NR-DC (NR-NR Dual Connectivity):** *Opcion 2*, En la que UE se conecta a dos estaciones base NR (gNodeB) como nodos maestro y secundario. Ambas estaciones base están conectadas a través de la interfaz Xn, lo que permite una coordinación y gestión de recursos más eficiente entre ellas.

La arquitectura NSA permite a los proveedores de servicios móviles activar capacidades 5G de forma gradual sin necesidad de reemplazar completamente la infraestructura de núcleo de red existente. El despliegue de NSA comienza típicamente con la instalación de nuevas estaciones base NR que coexisten con las estaciones base LTE existentes. Los dispositivos del usuario (UE) que soportan tanto LTE como NR pueden conectarse simultáneamente a ambas redes, aprovechando la mejor señal disponible para la señalización de control a través de LTE y utilizando NR para el tráfico de datos cuando está disponible. Este enfoque dual proporciona beneficios inmediatos de rendimiento sin requerir una arquitectura de núcleo completamente nueva, lo que reduce significativamente los costos de inversión durante la transición. Desde el punto de vista del usuario final, la arquitectura NSA ofrece una experiencia mejorada en comparación con las redes LTE puras. Los usuarios pueden experimentar velocidades de descarga más altas (potencialmente en el rango de gigabits por segundo), menor latencia en aplicaciones específicas de datos, y mejor eficiencia general de la red. Sin embargo, las ventajas están limitadas principalmente al tráfico de datos, ya que los servicios de señalización y control siguen estando limitados por las especificaciones de LTE. Para casos de uso que requieren baja latencia extrema o requisitos ultra confiables (como comunicaciones críticas), la arquitectura NSA puede no ser suficiente, lo que subraya la necesidad eventual de migrar a 5G SA para alcanzar todas las capacidades de 5G.

2.4 Arquitectura 5G Standalone (SA)

2.4.1 Visión general de la arquitectura 5G SA

La arquitectura 5G Standalone (SA) representa una evolución significativa en comparación con las generaciones anteriores de redes móviles. A diferencia de las implementaciones Non-Standalone (NSA), que dependen de la infraestructura existente de 4G LTE, la arquitectura SA está diseñada desde cero para aprovechar al máximo las capacidades de la tecnología 5G. Esta arquitectura se basa en una serie de principios clave que permiten una mayor flexibilidad, eficiencia y capacidad para soportar una amplia gama de servicios y aplicaciones. Entre los aspectos más destacados de la arquitectura 5G SA se encuentran:

- **Red basada en servicios:** La arquitectura 5G SA adopta un enfoque basado en servicios, donde las funciones de red se implementan como servicios independientes que pueden ser orquestados y gestionados de manera flexible.
- **Virtualización y desagregación:** La arquitectura permite la virtualización de funciones de red (NFV) y la desagregación de hardware y software, lo que facilita la implementación en entornos de nube y mejora la escalabilidad.
- **Separación del plano de control y plano de usuario:** Esta separación permite una gestión más eficiente del tráfico y una mejor calidad de servicio (QoS) para diferentes tipos de aplicaciones.
- **Soporte para nuevas tecnologías:** La arquitectura 5G SA está diseñada para integrar tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA), el edge computing y la Internet de las cosas (IoT).
- **Categorías de servicio: eMBB, URLLC y mMTC:** 5G define tres clases de servicio principales —**eMBB** (enhanced Mobile Broadband) para altas tasas de datos y capacidad; **URLLC** (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) para comunicaciones con latencia muy baja y alta fiabilidad; y **mMTC** (massive Machine Type Communications) para conectividad masiva de dispositivos IoT de baja potencia y baja tasa. La arquitectura SA y el 5GC están pensados para soportar simultáneamente estas demandas diferenciadas /cite3gpp.ts.22.261.
- **Network Slicing:** Permite crear múltiples redes virtuales independientes (slices) sobre la misma infraestructura física, cada una con sus

propios requisitos de rendimiento, seguridad y gestión (por ejemplo, un slice para eMBB y otro para URLLC). Network Slicing se apoya en SBA, NFV y orquestación para instanciar, aislar y escalar slices según demanda.

2.4.2 Arquitectura basada en servicios (SBA)

La diferencia más destacada en 5G frente a las arquitecturas 3GPP anteriores es la adopción del concepto de interfaces basadas en servicios (**SBA**). Esto implica que las funciones de red que contienen la lógica y los mecanismos para procesar los flujos de señalización ya no se conectan mediante interfaces punto a punto, sino que **exponen sus capacidades como servicios** accesibles para otras funciones de red. En cada intercambio, una función actúa como **consumidora de servicios** y la otra como **proveedora de dichos servicios**. 2.2 muestra la arquitectura 5GC basada en SBA.

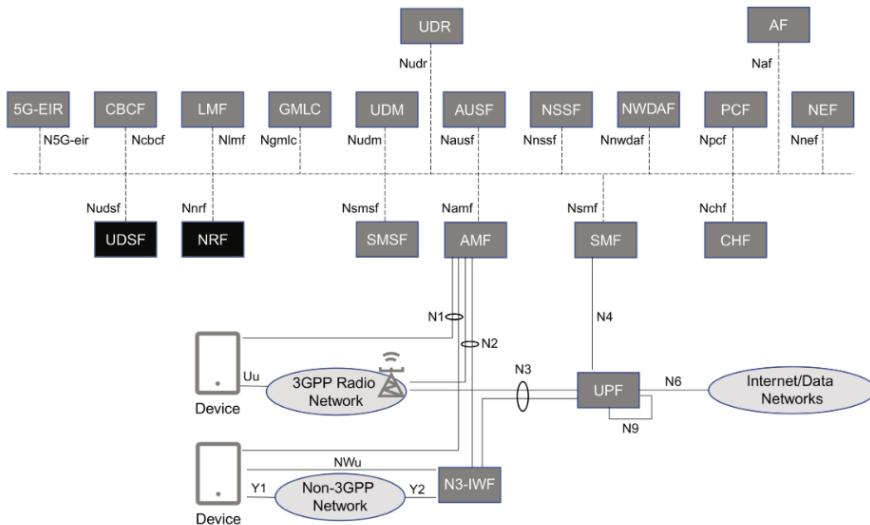


Figure 2.2: Arquitectura 5GC basada en interfaces basadas en servicios [4].

Las funciones de red en 5GC se comunican entre sí a través de una interfaz común llamada **Service-Based Interface (SBI)**. Esta interfaz utiliza protocolos estándar como HTTP/2 y RESTful APIs para facilitar la comunicación entre las funciones de red. La adopción de SBA permite una mayor flexibilidad y escalabilidad en la arquitectura de la red, ya que las funciones pueden ser desarrolladas, desplegadas y actualizadas de manera independiente. Además, esta arquitectura facilita la integración con tecnologías emergentes como la virtualización de funciones de red (NFV) y la computación

en la nube, permitiendo a los operadores de red adaptarse rápidamente a las demandas cambiantes del mercado y ofrecer nuevos servicios de manera más eficiente.

La arquitectura SBA también se puede representar como punto a punto, donde cada función de red se conecta directamente con las demás funciones que requieren sus servicios, utilizando la interfaz SBI para la comunicación. Como se muestra en la figura 2.3.

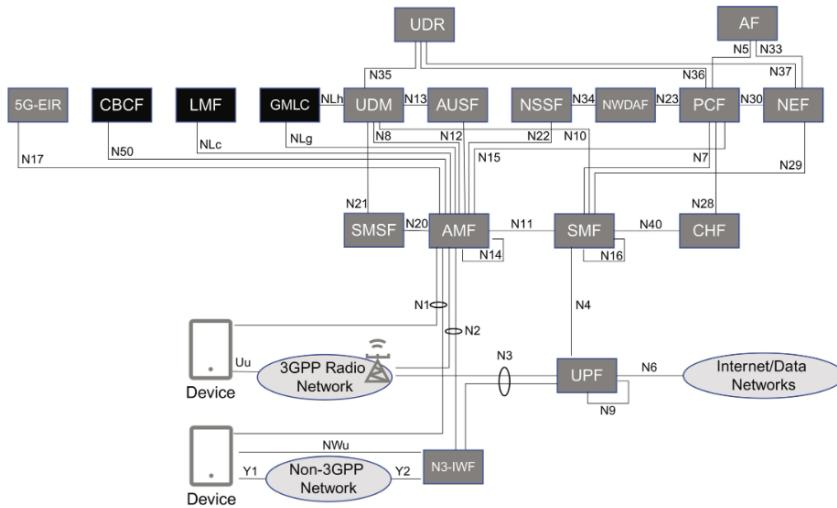


Figure 2.3: Arquitectura 5GC con interfaces punto a punto. [4].

2.4.3 Interfaces HTTP REST

En la arquitectura 5G Core (5GC), las funciones de red se comunican entre sí utilizando una interfaz basada en servicios conocida como Service-Based Interface (SBI). Esta interfaz utiliza el protocolo HTTP/2 junto con RESTful APIs para facilitar la comunicación y el intercambio de información entre las diferentes funciones de red. A continuación, se describen los aspectos clave de las interfaces HTTP REST en 5GC:

- **Protocolo HTTP/2:** 5GC utiliza HTTP/2 como el protocolo de transporte para las comunicaciones entre funciones de red. HTTP/2 ofrece varias ventajas sobre su predecesor, HTTP/1.1, incluyendo una mayor eficiencia en la multiplexación de solicitudes, compresión de encabezados y reducción de la latencia, lo que es crucial para las aplicaciones de baja latencia en 5G.
- **RESTful APIs:** Las funciones de red en 5GC exponen sus capacidades a través de RESTful APIs, que son interfaces basadas en prin-

cipios REST (Representational State Transfer). Estas APIs permiten a las funciones de red interactuar de manera sencilla y estandarizada, utilizando métodos HTTP como GET, POST, PUT y DELETE para realizar operaciones sobre los recursos.

- **Formato de datos JSON:** La comunicación entre funciones de red a través de las RESTful APIs generalmente utiliza JSON (JavaScript Object Notation) como formato de datos para el intercambio de información. JSON es ligero y fácil de leer, lo que facilita la integración entre diferentes sistemas y tecnologías.
- **Seguridad:** La seguridad es un aspecto crítico en las comunicaciones entre funciones de red. En 5GC, se implementan mecanismos de autenticación y autorización para garantizar que solo las funciones autorizadas puedan acceder a los servicios expuestos a través de las RESTful APIs. Además, se utilizan protocolos seguros como TLS (Transport Layer Security) para proteger la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos.
- **Escalabilidad y flexibilidad:** La adopción de interfaces HTTP REST permite una mayor escalabilidad y flexibilidad en la arquitectura 5GC. Las funciones de red pueden ser desarrolladas, desplegadas y actualizadas de manera independiente, lo que facilita la adaptación a las demandas cambiantes del mercado y la incorporación de nuevas tecnologías.

2.4.4 Componentes de 5G Core (5GC)

En 5G Core (5GC), los componentes tienen funciones específicas a diferencia de las arquitecturas anteriores, las cuales combinaban algunas funciones como por ejemplo, el MME y el SGW en una sola entidad llamada AMF.

2.4.5 Componentes principales de 5GC

NRF El Network Repository Function es un componente clave en la arquitectura 5G Core (5GC) que actúa como un repositorio centralizado para la gestión y descubrimiento de servicios de red. Su función principal es mantener un registro actualizado de todas las funciones de red disponibles en la red 5G, permitiendo que otras funciones de red puedan descubrir y comunicarse con ellas de manera eficiente. El NRF mantiene un catálogo dinamizado de instancias de funciones de red (NF) con sus perfiles, incluyendo identidad (NF Instance ID), tipo de NF, direcciones de servicio (Service URIs) y

versiones de API soportadas, con soporte para mecanismos de heartbeat y actualización periódica del estado operacional [1].

AMF El Access and Mobility Management Function es una de las funciones clave en la arquitectura 5G Core (5GC) y se encarga de gestionar el acceso y la movilidad de los dispositivos de usuario (UE) en la red 5G. El AMF desempeña un papel fundamental en la gestión de la conexión del UE, la autenticación, la autorización y el control de movilidad, asegurando que los dispositivos puedan acceder a los servicios de red de manera eficiente y segura [1].

SMF El Session Management Function se encarga de gestionar las sesiones de datos del usuario (UE) en la red 5G. El SMF desempeña un papel fundamental en la configuración, mantenimiento y liberación de las sesiones de datos, asegurando que los dispositivos puedan acceder a los servicios de red de manera eficiente y segura [1].

UPF El User Plane Function es responsable de la gestión del plano de usuario (User Plane) en la arquitectura 5GC, actuando como el punto de anclaje para el procesamiento y enrutamiento de tráfico de datos. El UPF desempeña un papel crítico en la cadena de procesamiento de paquetes, implementando funciones de forwarding, encapsulación y aplicación de políticas a nivel de flujo [1].

AUSF El Authentication Server Function Se encarga de gestionar la autenticación de los dispositivos de usuario (UE) en la red 5G. El AUSF desempeña un papel fundamental en la seguridad de la red, asegurando que solo los dispositivos autorizados puedan acceder a los servicios de red [1].

UDM El Unified Data Management Es responsable de gestionar los datos de suscripción y la información del usuario en la red 5G. El UDM desempeña un papel fundamental en la gestión de la identidad del usuario, las políticas de acceso y las configuraciones de servicio, asegurando que los dispositivos puedan acceder a los servicios de red de manera eficiente y segura [1].

PCF El Policy Control Function Gestiona las políticas de control y calidad de servicio (QoS) en la red 5G. El PCF desempeña un papel fundamental en la aplicación de políticas de acceso, control de tráfico y gestión de recursos, asegurando que los dispositivos puedan acceder a los servicios de red de manera eficiente y segura.

NSSF El Network Slice Selection Function Se encarga de gestionar la selección y asignación de redes de corte (slices) para los dispositivos de usuario (UE) en la red 5G. El NSSF desempeña un papel fundamental en la implementación de redes de corte, que permiten a los operadores ofrecer servicios personalizados y optimizados para diferentes tipos de aplicaciones y usuarios.

NEF El Network Exposure Function Expone las capacidades y servicios de la red 5G a aplicaciones externas y terceros. El NEF desempeña un

papel fundamental en la facilitación de la interoperabilidad entre la red 5G y aplicaciones de terceros, permitiendo a los desarrolladores crear aplicaciones innovadoras que aprovechen las capacidades avanzadas de la red 5G.

AF El Application Function Gestiona las aplicaciones que interactúan con la red 5G. El AF desempeña un papel fundamental en la facilitación de la comunicación entre las aplicaciones y las funciones de red, permitiendo a los desarrolladores crear aplicaciones innovadoras que aprovechen las capacidades avanzadas de la red 5G.

2.4.6 Pila de protocolos del plano de control y plano de usuario

Uno de los aspectos diferenciadores de la arquitectura 5G Core (5GC) es la separación clara entre el plano de control (Control Plane - CP) y el plano de usuario (User Plane - UP) mediante CUPS (Control and User Plane Separation). Esta separación permite una gestión más eficiente del tráfico y una mejor calidad de servicio (QoS) para diferentes tipos de aplicaciones. A continuación, se describen las pilas de protocolos utilizadas en ambos planos.

2.4.6.1 Plano de Control

En el plano de control (Control Plane - CP) se gestionan las señales y la lógica necesarias para establecer, mantener y liberar las conexiones entre los dispositivos de usuario (UE) y la red, incluyendo protocolos como SCTP, NGAP, NAS, HTTP/2 y RESTful APIs. A continuación se muestra la pila de protocolos del plano de control de forma detallada 2.4.

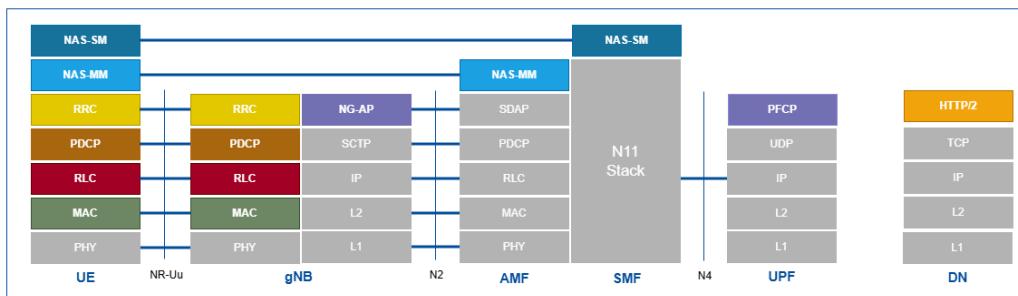


Figure 2.4: Pila de protocolos del plano de control en 5GC [1].

Para mas detalles de los acrónimos y protocolos ver la tabla ?? y ?? en el apéndice ??.

2.4.6.2 Plano de Usuario

En este plano se maneja el tráfico de datos real que fluye entre los dispositivos de usuario (UE) y la red. El plano de usuario se encarga de la transmisión eficiente y segura de los datos, asegurando que se cumplan los requisitos de calidad de servicio (QoS) y latencia para diferentes tipos de aplicaciones. A continuación se muestra la pila de protocolos del plano de usuario de forma detallada 2.5.

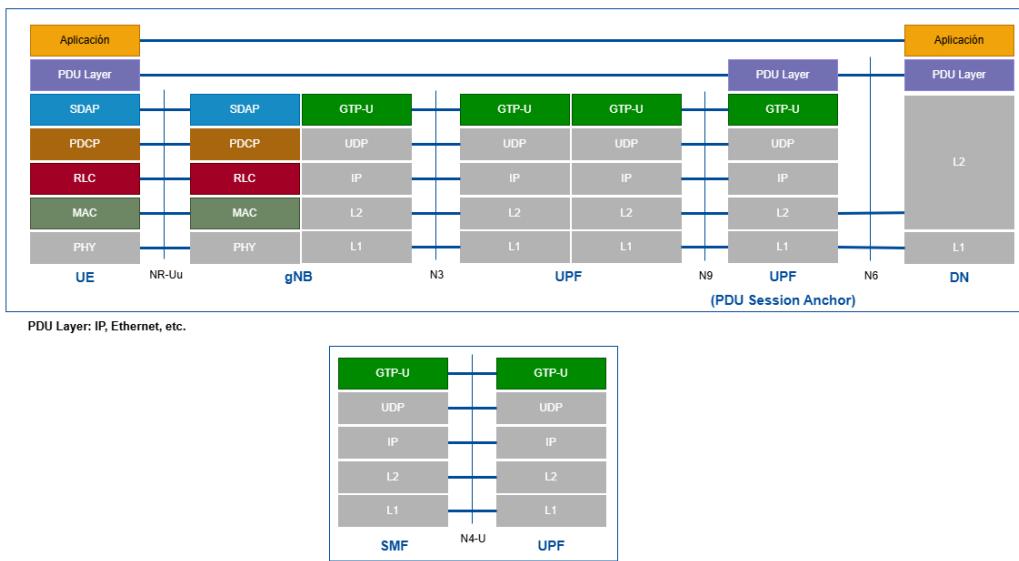


Figure 2.5: Pila de protocolos del plano de usuario en 5GC. [1, 2].

Al igual que en el plano de control, para mas detalles de los acrónimos y protocolos ver la tabla ?? y ?? en el apéndice ??.

2.4.7 Interfaces clave en 5GC

Las interfaces N1, N2, N3, N4, N6 y N9 son fundamentales en la arquitectura de las redes 5G, cada una desempeñando un papel crucial en la interconexión de dispositivos y la gestión de datos. A continuación, se describen cada una de estas interfaces, los protocolos asociados y los dispositivos que conectan.

- **N1:** Esta interfaz conecta el dispositivo de usuario (UE) con el Access and Mobility Management Function (AMF) en el plano de control. Utiliza el protocolo NAS (Non-Access Stratum) para la señalización y gestión de la conexión del UE.

- **N2:** Conecta la estación base 5G (gNodeB) con el AMF en el plano de control. Utiliza el protocolo NGAP (Next Generation Application Protocol) para la señalización y gestión de la conexión entre el gNodeB y el AMF.
- **N3:** Esta interfaz conecta la estación base 5G (gNodeB) con el User Plane Function (UPF) en el plano de usuario. Utiliza el protocolo GTP-U (GPRS Tunneling Protocol - User Plane) para la transmisión de datos entre el gNodeB y el UPF.
- **N4:** Conecta el SMF (Session Management Function) con el UPF en el plano de control. Utiliza el protocolo PFCP (Packet Forwarding Control Protocol) para la gestión y configuración del plano de usuario en el UPF.
- **N6:** Esta interfaz conecta el UPF con la red externa, como Internet o una red privada. Utiliza protocolos estándar como IP para la transmisión de datos entre el UPF y la red externa.
- **N9:** Conecta diferentes instancias de UPF entre sí en el plano de usuario. Utiliza el protocolo GTP-U para la transmisión de datos entre las instancias de UPF, permitiendo la movilidad y continuidad del servicio.
- **N11:** Conecta el AMF con el SMF en el plano de control. Utiliza interfaces basadas en servicios (SBI) y protocolos HTTP/2 y RESTful APIs para la comunicación entre el AMF y el SMF.

2.4.8 Tendencias emergentes en redes beyond 5G

Las tendencias emergentes en redes beyond 5G incluyen:

- **Comunicaciones Terahertz (THz):** Utilización de frecuencias en el rango de terahercios para ofrecer velocidades de datos ultra altas y baja latencia.
- **Redes auto-organizadas (Self-Organizing Networks - SON):** Implementación de algoritmos de inteligencia artificial para la gestión automática y optimización de la red.
- **Computación en el borde (Edge Computing):** Despliegue de capacidades de procesamiento cerca del usuario final para reducir la latencia y mejorar la eficiencia.

- **Integración de inteligencia artificial (IA):** Uso de IA para la gestión de red, optimización del rendimiento y personalización de servicios.
- **Redes holográficas y realidad extendida (XR):** Soporte para aplicaciones avanzadas que requieren alta capacidad y baja latencia, como hologramas y experiencias inmersivas.
- **Sostenibilidad y eficiencia energética:** Desarrollo de tecnologías y prácticas que reduzcan el consumo energético y el impacto ambiental de las redes móviles.
- **Seguridad y privacidad mejoradas:** Implementación de mecanismos avanzados para proteger los datos y la privacidad de los usuarios en un entorno de red cada vez más complejo.
- **Redes cuánticas:** Investigación en la integración de tecnologías de comunicación cuántica para mejorar la seguridad y la capacidad de las redes móviles.
- **Conectividad masiva y ubicua:** Desarrollo de infraestructuras que permitan una conectividad continua y confiable en cualquier lugar y momento, soportando una amplia gama de dispositivos y aplicaciones.

Estas tendencias reflejan el compromiso de la industria de las telecomunicaciones para avanzar hacia redes móviles más inteligentes, eficientes y capaces de satisfacer las necesidades futuras de los usuarios y las aplicaciones.

Chapter 3

Telemetría y QoS en 5G

En 5GC, la telemetría juega un papel crucial en la monitorización y gestión del rendimiento de la red, especialmente en el contexto de las demandas crecientes de servicios como URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications), eMBB (enhanced Mobile Broadband) y mMTC (massive Machine Type Communications). La telemetría en banda (In-Band Network Telemetry, INT) permite la recopilación de datos en tiempo real directamente desde los paquetes que atraviesan la red, proporcionando una visibilidad detallada del estado de la red y facilitando la detección y resolución de problemas.

3.1 Desafíos de Telemetría en Redes 5G

- 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

3.4 Calidad de Servicio en 5G

3.5 QoS basado en 5G Flujo

- 3.5.1 Definición de flujo en 5G
- 3.5.2 Identificación y clasificación de flujos
- 3.5.3 Mecanismos de gestión de QoS por flujo

3.6 Señalización de QoS en 5G

3.7 Características de QoS en 5G

Chapter 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

Chapter 5

Entorno de Desarrollo Implementado

5.1 Arquitectura general del sistema

A diferencia de las tecnologías pasadas, 5G está diseñada para ser fácilmente desplegada en entornos virtualizados y basados en contenedores, lo que permite una mayor flexibilidad y escalabilidad. En este proyecto, se ha implementado un entorno de desarrollo que emula una red 5G Standalone (SA), virtualizando sus componentes principales mediante Docker y orquestando el Core con Docker Compose. El entorno de desarrollo se ha desplegado utilizando GNS3, GNS3 VM y VMware Workstation para crear una infraestructura base o underlay sobre la cual se han implementado otras máquinas virtuales que alojan los contenedores Docker. Esta infraestructura virtual proporciona la conectividad necesaria entre los componentes y permite emular una red de un MNO (Mobile Network Operator) real, con componentes tanto de red y VFs (Virtualized Functions) como de 5G. También cabe destacar que para los componentes de 5G se empleó el proyecto open source free5gc [3], el cual permite desplegar un core 5G SA completo en un entorno virtualizado con Docker. La siguiente figura muestra la arquitectura general del entorno de desarrollo implementado, destacando la integración entre GNS3, Docker y la máquina virtual en vmware 5.1.

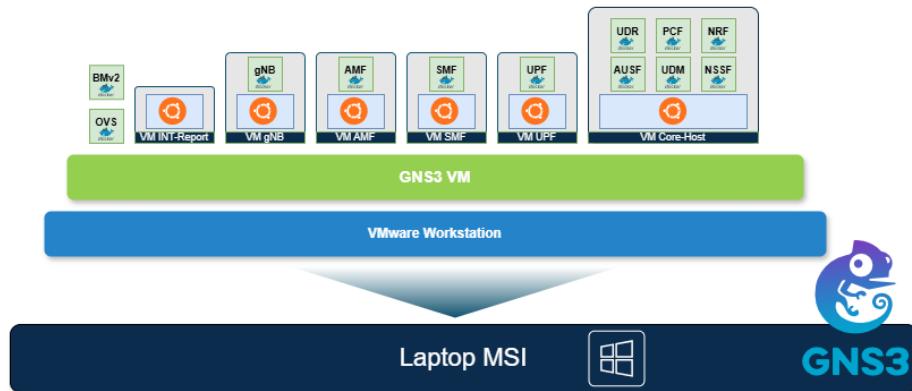


Figure 5.1: Arquitectura general

5.1.1 Diseño de la red 5G SA

Con respecto a la red de transporte, se ha implementado utilizando switches programables P4 para insertar metadatos de telemetría en banda (INT-MD) en el tráfico N2 (SCTP) y N3 (GTP-U), estos switches estan construidos con P4 para el reenvío de tráfico a nivel de L3. ademas de estos switches P4, tanto para el tráfico entre los Nodos en el Core como en la comunicación entre el NGRAN y R1, se ha empleado switches virtuales Open vSwitch (OVS) para gestionar y gestionar los paquetes ARP. La siguiente figura es un diseño de alto nivel (HLD) que muestra la topología de red implementada en GNS3 5.2.

5.1.1.1 Diseño de alto nivel (HLD)

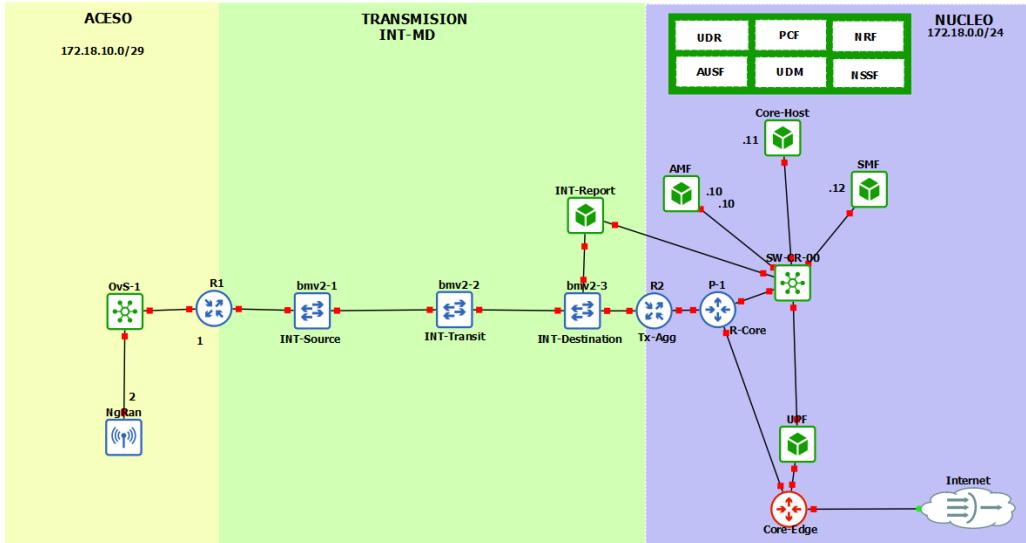


Figure 5.2: Topología de red implementada en GNS3

5.1.1.2 Diseño de bajo nivel (LLD)

La anterior tabla 5.1 detalla la configuración de red de cada contenedor Docker, direcciones IP y MAC asignadas, el tipo de red utilizado (macvlan), etc. Con esta configuración, se asegura una correcta interconexión y funcionamiento del Core 5G SA dentro del entorno virtualizado.

NF	Direccion IP	Mascara	Direccion MAC	Tipo de Red	Alias	Puertos	BD	Deps.
db	172.18.0.50	/24	22:e5:63:00:49:85	macvlan	db	27017	-	-
NRF	172.18.0.51	/24	3a:e5:07:18:07:fb	macvlan	nrf.free5gc.org	8000	db	db
AUSF	172.18.0.52	/24	aa:61:e3:b4:07:2e	macvlan	ausf.free5gc.org	8000	-	nrf
NSSF	172.18.0.53	/24	3e:74:95:c5:bc:4e	macvlan	nssf.free5gc.org	8000	-	nrf
PCF	172.18.0.54	/24	72:b2:53:59:fc:ce	macvlan	pcf.free5gc.org	8000	-	nrf
UDM	172.18.0.55	/24	9a:a1:ed:b3:60:8c	macvlan	udm.free5gc.org	8000	-	db, nrf
UDR	172.18.0.56	/24	ea:b1:9d:90:a4:d1	macvlan	udr.free5gc.org	8000	db	db, nrf
CHF	172.18.0.57	/24	ee:e6:15:22:6f:ad	macvlan	chf.free5gc.org	8000, 2122	db	db, nrf, webui
NEF	172.18.0.58	/24	e2:66:f3:0f:e0:e2	macvlan	nef.free5gc.org	8000	db	db, nrf
WebUI	172.18.0.59	/24	2a:5c:48:5c:aa:a0	macvlan	webui	2121 (ext: 5000)	-	db, nrf
AMF	172.18.0.20	/24	f2:ff:cb:34:07:b5	macvlan	amf.free5gc.org	38412 (SCTP), 8000	-	-
SMF	172.18.0.22	/24	ca:76:58:9c:8e:ec	macvlan	smf.free5gc.org	8000	-	-
UPF	172.18.0.24	/24	be:44:98:a4:e5:c4	macvlan	upf.free5gc.org	8000, 38412 (SCTP)	-	-
ueransim	172.18.10.3	/29	f6:b8:eb:4d:0f:3c	macvlan	ueransim.free5gc.org	38412 (SCTP)	-	-

Table 5.1: Diseño de bajo nivel (LLD)

5.2 Despliegue del Core 5G SA

Como se pudo apreciar en la figura 5.1, el Core 5G SA se ha desplegado utilizando contenedores Docker orquestados con Docker Compose dentro de maquinas virtuales alojadas en una maquina virtual principal (GNS3 VM). los componentes que interactuan mediante HTTP/2 se han desplegado en una VM con Ubuntu 20.04, mientras que el resto de componentes; AMF, SMF y UPF se han desplegado en maquinas virtuales separadas con la misma version de Ubuntu. Juntar los componentes que interactuan mediante HTTP/2 en una sola VM permite reducir la latencia y mejorar el rendimiento de las comunicaciones entre ellos.

La configuracion de red de cada contenedor Docker se realizó con la modalidad de red **macvlan**, detallada en la tabla 5.1, que permite asignar una direccion IP en el mismo ranfo que la red fisica de la VM anfitriona. Esto facilita la comunicacion entre los contenedores y hace posible el establecimiento del enlace **N2** (SCTP) entre el NGRAN y el AMF.

5.2.1 Configuracion de Core-Host

Los detalles sobre la instalacion de Docker y Docker Compose no estan incluidos en este documento, pero se asume que el lector tiene conocimientos basicos sobre estas tecnologias. En caso contrario, puede consultar la documentacion oficial [?].

5.2.1.1 Despliegue con Docker Compose

Como la VM Core-Host corre los contenedores UDR, UDM, PCF, NRF, AUSF, UDM y NSSF, DB, se despliegan utilizando un unico archivo Docker Compose llamado *docker-compose-build-core-host.yaml*, el cual se mostrará contenedor por contenedor a continuacion:

5.2.1.1.1 DB

La base de datos MongoDB es el primer servicio que se despliega, ya que varios componentes del Core 5G dependen de ella para almacenar información de configuración y datos de suscripción. A continuación se muestra la configuración del contenedor MongoDB en el archivo Docker Compose:

```

1 services:
2   db:
3     container_name: mongodb
4     image: mongo:3.6.8
5     command: mongod --port 27017

```

```
6   expose:
7     - "27017"
8   volumes:
9     - dbdata:/data/db
10  networks:
11    macvlan_net:
12      ipv4_address: 172.18.0.50
13      mac_address: "22:e5:63:00:49:85"
14      aliases:
15        - db
```

Código 5.1: Configuración del contenedor MongoDB en Docker Compose

Este contenedor utiliza la imagen oficial de MongoDB versión 3.6.8, expone el puerto 27017 (puerto por defecto de MongoDB), y monta un volumen persistente `dbdata` para garantizar que los datos sobrevivan a reinicios del contenedor. La dirección IP 172.18.0.50 y la MAC 22:e5:63:00:49:85 son asignadas estáticamente en la red `macvlan`.

5.2.1.1.2 NRF

5.2.1.1.3 AUSF

5.2.1.1.4 NSSF

5.2.1.1.5 PCF

5.2.1.1.6 UDM

5.2.1.1.7 UDR

5.2.1.2 Despliegue del AMF

5.2.1.3 Despliegue del SMF

5.2.1.4 Despliegue del UPF

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

5.4.4 Visualización en Grafana

5.5 Tecnologías empleadas

5.5.1 Docker / Docker Compose

5.5.2 GNS3 / GNS3 VM

5.5.3 Wireshark y herramientas auxiliares

Chapter 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

Chapter 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

Chapter 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**

Chapter 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

Bibliography

- [1] 3GPP. 3gpp ts 23.501: System architecture for the 5g system (5gs). Technical report, 2021.
- [2] 3GPP. 3gpp ts 38.300: Nr; overall description of the 5g nr physical layer. Technical report, 2023.
- [3] Free5GC Community. Free5gc: Open source 5g core network, 2021.
- [4] Ulises O'Neill, Amelia Mackey, and Victor C.M. Leung. *5G Core Networks: A Comprehensive Guide to 5GC Architecture and Deployment*. O'Reilly Media, 1st edition, 2021.