

DISEÑO DE UN LABORATORIO DE COMUNICACIONES MÓVILES BASADO EN LA PLATAFORMA OPENAIRINTERFACE



Adrián Jacobo Vivas Bautista
Luis Hanier Vallejo Caicedo

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Popayán, 2019

DISEÑO DE UN LABORATORIO DE COMUNICACIONES MÓVILES BASADO EN LA PLATAFORMA OPENAIRINTERFACE



Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Adrián Jacobo Vivas Bautista
Luis Hanier Vallejo Caicedo

Directora: Msc. Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas-GRIAL
Popayán, 2019



TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1: GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PLATAFORMA OPENAIRINTERFACE.....	1
1.2.1. Objetivos OAI.....	2
1.2.2. Características OAI.....	2
1.2.3. Funcionalidades OAI	5
1.2.4. Áreas estratégicas para 5G.	6
1.2.5. Miembros	7
1.3. GENERALIDADES LTE	8
1.4. ARQUITECTURA DE LTE.....	8
1.4.1. Arquitectura de E-UTRAN.....	9
1.4.2. Entidades de red e interfaces de E-UTRAN	10
1.4.3. Protocolos de E-UTRAN.....	11
1.4.4. Arquitectura del EPC	19
1.4.5. Entidades de red e interfaces del EPC	20
1.4.6. Protocolos del EPC.....	23
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....	25
2.1. INTRODUCCIÓN.....	25
2.2. REQUERIMIENTOS.....	26
2.2.1. Problema de estudio.....	26
2.2.2. Requerimientos funcionales	26
2.3. ANÁLISIS Y DISEÑO	27
2.3.1. Canales físicos y de transporte LTE	28
2.3.2. Análisis de protocolos y trafico LTE	36
2.3.3. Experimentación con plataformas de RF.....	44
CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS.....	48
3.1. Implementación de canales físicos y de transporte	48
3.2. Resultados de canales físicos y de transporte	51
3.3. Implementación y resultados de análisis de protocolos y tráfico LTE	62
3.3.1. Implementación de escenarios sin interfaz S1	63
3.3.2. Resultados de escenarios sin interfaz S1.....	63



3.3.3.	Implementación de escenario con interfaz S1 sobre el mismo equipo	69
3.3.4.	Resultados de escenario con interfaz S1 sobre el mismo equipo.....	70
3.3.5.	Implementación de escenario con interfaz S1 sobre diferentes equipos	81
3.3.6.	Resultados de escenario con interfaz S1 sobre diferentes equipos ..	82
3.4.	Implementación de experimentación con plataformas RF	86
3.5.	Resultados de experimentación con plataformas de RF	87
CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		91
4.1.	CONCLUSIONES.....	91
4.2.	TRABAJOS FUTUROS	93
BIBLIOGRAFÍA		94
APÉNDICE A: INSTALACIÓN OAI.....		96
APÉNDICE B: CANALES FÍSICOS Y DE TRANSPORTE LTE		117
APÉNDICE C: ESCENARIOS SIN INTERFAZ S1		118
APÉNDICE D: ESCENARIO CON INTERFAZ S1 SOBRE MISMO EQUIPO		120
APÉNDICE E: ESCENARIO CON INTERFAZ S1 EN DISTINTOS ÉQUIPOS.....		133
APÉNDICE F: EXPERIMENTACIÓN CON PLATAFORMAS DE RF		144



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Áreas estratégicas de OpenAirInterface. Adaptada de: [5]	6
Figura 1. 2. Arquitectura general de LTE. Adaptada de: [9]	9
Figura 1. 3. Arquitectura E-UTRAN. Por los autores.	9
Figura 1. 4. Pila de protocolos de la interfaz radio. Tomada de: [9]	14
Figura 1. 5. Relación entre canales en Downlink. Adaptada de: [9].	17
Figura 1. 6. Relación entre canales en Uplink. Tomada de: [9].	17
Figura 1. 7. Pila de protocolos de la interfaz S1. Tomada de: [9]	18
Figura 1. 8. Pila de protocolos de la interfaz X2. Tomada de: [9]	19
Figura 1. 9. Arquitectura del EPC. Por los autores.	19
Figura 2. 1. Metodología RUP. Por los autores.	26
Figura 2. 2. Componentes del modelo de laboratorio. Por los autores.	27
Figura 2. 3. Diagrama general. Por los autores.	28
Figura 2. 4. Bloque funcional para simulación unitaria. Por los autores.	29
Figura 2. 5. Simuladores unitarios. Por los autores.	29
Figura 2. 6. Parámetros de entrada. Por los autores.	30
Figura 2. 7. Diagrama de flujo para canales físicos y de transporte LTE. Por los autores.	35
Figura 2. 8. Tratamiento datos de simulación. Por los autores.	36
Figura 2. 9. Opciones para análisis de protocolos y tráfico LTE. Por los autores. ..	37
Figura 2. 10. Modos para conexión sin EPC. Por los autores.	37
Figura 2. 11. Diagrama de flujo para escenario sin interfaz S1. Por los autores. ...	39
Figura 2. 12. Despliegue para conexión con EPC. Por los autores.	40
Figura 2. 13. Escenario con S1 sobre un mismo equipo. Por los autores.	40
Figura 2. 14. Diagrama de flujo para escenario sobre una misma máquina. Por los autores.	41
Figura 2. 15. Escenario con S1 sobre diferentes equipos. Por los autores.	42
Figura 2. 16. Diagrama de flujo para S1 sobre diferentes máquinas. Por los autores.	43
Figura 2. 17. Conexiones para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.	44
Figura 2. 18. Escenario para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.	45
Figura 2. 19. Diagrama de flujo para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.	47
Figura 3. 1. FER vs SNR a pasos de 0.2 dB. Por los autores.	49
Figura 3. 2. FER vs SNR a pasos de 1 dB. Por los autores.	50
Figura 3. 3. Escenario 1: desempeño en DL. Por los autores.	51
Figura 3. 4. Escenario 1: throughput en DL. Por los autores.	52
Figura 3. 5. Escenario 1: desempeño en UL. Por los autores.	53
Figura 3. 6. Escenario 1: throughput en UL. Por los autores.	54
Figura 3. 7. Escenario 2: desempeño en DL. Por los autores.	55
Figura 3. 8. Escenario 2: desempeño en UL. Por los autores.	56



Figura 3. 9. Escenario 3: desempeño en UL. Por los autores.	57
Figura 3. 10. Escenario 4: desempeño en DL. Por los autores.	58
Figura 3. 11. Escenario 4: throughput. Por los autores.	59
Figura 3. 12. Escenario 5: desempeño con MCS-9. Por los autores.....	60
Figura 3. 13. Escenario 5: desempeño con MCS-16. Por los autores.....	61
Figura 3. 14. Escenario 5: desempeño con MCS-28. Por los autores.....	62
Figura 3. 15. Tiempos de ejecución de la capa física completa y modo abstracción. Por los autores.	64
Figura 3. 16. Desempeño en DL con diferentes tipos de tráfico. Por los autores. .	65
Figura 3. 17. Desempeño en UL con diferentes tipos de tráfico. Por los autores. .	66
Figura 3. 18. Inicio de emulación. Por los autores.....	67
Figura 3. 19. Éxito de conexión RRC. Por los autores.	68
Figura 3. 20. Envío de datos. Por los autores.	68
Figura 3. 21. Petición de seguridad. Por los autores.	69
Figura 3. 22. Petición de capacidad de UE. Por los autores,	69
Figura 3. 23. Inicio de conexión entre el HSS y la base de datos. Por los autores	71
Figura 3. 24. Actualización de base de datos. Por los autores.....	71
Figura 3. 25. Intento de conexión entre HSS y MME. Por los autores.....	72
Figura 3. 26. Estado inicial del HSS. Por los autores.	72
Figura 3. 27. Inicio de conexión y petición de información entre HSS y MME. Por los autores.....	72
Figura 3. 28. Diagrama de secuencia: Establecimiento de conexión entre HSS y MME. Por los autores.....	73
Figura 3. 29. Conexión entre MME y eNB. Por los autores.....	74
Figura 3. 30. Diagrama de secuencia: Conexión entre MME y eNB. Por los autores.	74
Figura 3. 31. Actualización de datos de usuario. Por los autores.....	75
Figura 3. 32. Diagrama de secuencia: actualización de datos de usuario. Por los autores.	75
Figura 3. 33. Petición de autenticación y de seguridad. Por los autores.	76
Figura 3. 34. Diagrama de secuencia: petición de autenticación y de seguridad. Por los autores.	76
Figura 3. 35. Consulta de datos de la MME. Por los autores.	76
Figura 3. 36. Diagrama de secuencia: solicitud de datos de la MME. Por los autores.	77
Figura 3. 37. Vinculación de usuario. Por los autores.	77
Figura 3. 38. Diagrama de secuencia: vinculación de usuario. Por los autores. ...	78
Figura 3. 39. Terminal del EPC: vinculación de usuario. Por los autores.....	78
Figura 3. 40. Fin de conexión entre MME y eNB. Por los autores.....	79
Figura 3. 41. Diagrama de secuencia: fin de conexión entre MME y eNB. Por los autores.	79
Figura 3. 42. Petición de información post desconexión. Por los autores.	79
Figura 3. 43. Diagrama de secuencia: Petición de información post desconexión. Por los autores.	80
Figura 3. 44. Cierre de conexión HSS-MME y HSS-Base de datos. Por los autores.	80



Figura 3. 45. Diagrama de secuencia: Cierre de conexión HSS-MME y HSS-Base de datos. Por los autores.....	81
Figura 3. 46. Conexión entre HSS y MME. Por los autores.....	82
Figura 3. 47. Dirección SPGW. Por los autores.	83
Figura 3. 48. Tráfico de interfaz S1. Por los autores.	83
Figura 3. 49. Mensajes con Diameter. Por los autores.....	84
Figura 3. 50. Petición de eNB a MME para vinculación. Por los autores.....	84
Figura 3. 51. Procesos mediante protocolo GTPv2. Por los autores.....	85
Figura 3. 52. Ping hacia servidor de Google. Por los autores.	85
Figura 3. 53. Cierre de conexión entre eNB y MME. Por los autores.	86
Figura 3. 54. Desconexión de par mediante Diameter. Por los autores.	86
Figura 3. 55. Montaje de escenario para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.	87
Figura 3. 56. Espera de MME para conexión con eNB. Por los autores.	87
Figura 3. 57. Asociación del eNB con la MME. Por los autores.	88
Figura 3. 58. Comparación de TAC y PLMN. Por los autores.	88
Figura 3. 59. Estado en banda 3. Por los autores.	89
Figura 3. 60. Estado del UE en banda 4. Por los autores.....	89
Figura 3. 61. Estado del UE en banda 5. Por los autores.....	89
Figura 3. 62. Primer estado del UE en banda 13. Por los autores.	89
Figura 3. 63. Segundo estado del UE en banda 13. Por los autores.....	89
Figura 3. 64. Tercer estado del UE en banda 13. Por los autores.....	90
Figura 3. 65. Cuarto estado del UE en banda 13. Por los autores.	90
Figura 3. 66. Constelación del eNB. Por los autores.	90
Figura 3. 67. Vinculación del UE a la red. Por los autores.	90
Figura A. 1. CPUs a distintas frecuencias. Por los autores.	96
Figura A. 2. Asignación de perfil para frecuencia de procesadores. Por los autores.	97
Figura A. 3. Información de CPUs. Por los autores.	98
Figura A. 4. CPUs a frecuencia máxima. Por los autores.....	99
Figura A. 5. Archivo correspondiente a las opciones del grub. Por los autores...	100
Figura A. 6. Archivo blacklist.conf. Por los autores.	101
Figura A. 7. Información de núcleos con i7z. Por los autores.....	102
Figura A. 8. Instalación de MySQL. Por los autores.	103
Figura A. 9. Confirmación de contraseña para usuario root. Por los autores.	104
Figura A. 10. Configuración de phpmyadmin. Por los autores.	104
Figura A. 11. Creación de contraseña para usuario de la base de datos. Por los autores.	105
Figura A. 12. Creación de contraseña de MySQL para phpmyadmin. Por los autores.	105
Figura A. 13. Confirmación de contraseña de MySQL. Por los autores.	105
Figura A. 14. Elección del servidor web para phpmyadmin. Por los autores.	106
Figura A. 15. Inconveniente wireshark. Por los autores.	106
Figura A. 16. Aviso por uso de superusuario. Por los autores.....	107
Figura A. 17. Aviso de uso peligroso. Por los autores.....	107
Figura A. 18. Interfaces en wireshark usando usuario root. Por los autores.	108
Figura A. 19. Configuración del paquete wireshark-common. Por los autores. ...	109



Figura A. 20. Grupo wireshark sin crear. Por los autores.	109
Figura A. 21. Grupo wireshark creado. Por los autores.	109
Figura A. 22. Menú de configuración del kernel - parte 1. Por los autores.	111
Figura A. 23. Menú de configuración del kernel - parte 2. Por los autores.	111
Figura A. 24. Menú de configuración del kernel - parte 3. Por los autores.	112
Figura A. 25. Selección del protocolo GTP-U. Por los autores.	113
Figura A. 26. Activación del módulo GTP-U. Por los autores.	114
Figura A. 27. Confirmación de activación del módulo GTP-U. Por los autores. ..	115
Figura A. 28. Salida de menú de configuración del kernel. Por los autores.	115
Figura B. 1. Archivos en carpeta build. Por los autores.	117
Figura B. 2. Ejemplo de simulación para canales físicos y de transporte. Por los autores.	117
Figura C. 1. Interfaces oai0 y oai1. Por los autores.	118
Figura C. 2. Ping entre interfaces. Por los autores.	119
Figura C. 3. Ping del eNB al UE. Por los autores.	119
Figura D. 1. Configuración de FQDN. Por los autores.	120
Figura D. 2. Información de host. Por los autores.	120
Figura D. 3. Archivo HSS editado. Por los autores.	121
Figura D. 4. Bases de datos de localhost por defecto. Por los autores.	121
Figura D. 5. Creación de base de datos oai_db. Por los autores.	122
Figura D. 6. Bases de datos de localhost. Por los autores.	122
Figura D. 7. Tabla users. Por los autores.	122
Figura D. 8. key y OPc generados en la compilación de OAISIM. Por los autores.	122
Figura D. 9. Información por defecto del archivo CMakeLists.txt. Por los autores.	123
Figura D. 10. Información del archivo CMakeLists.txt modificado. Por los autores.	123
Figura D. 11. Información por defecto del archivo hss.conf.in. Por los autores. ...	124
Figura D. 12. PLMN generada en el archivo epc.conf.in. Por los autores.	124
Figura D. 13. Salida por defecto del archivo epc.conf.in. Por los autores.	124
Figura D. 14. Salida del archivo epc.conf.in modificada. Por los autores.	125
Figura D. 15. Interfaces virtuales generadas para la MME. Por los autores.	125
Figura D. 16. Interfaces virtuales generadas para la S-GW. Por los autores.	125
Figura D. 17. Interfaces generadas para la P-GW. Por los autores.	126
Figura D. 18. Información del archivo s6a.conf.in. Por los autores.	126
Figura D. 19. Información del archivo hss_fd.conf.in. Por los autores.	127
Figura D. 20. Información del archivo hss.conf. Por los autores.	127
Figura D. 21. Dominio local escogido en el archivo epc.conf. Por los autores. ...	127
Figura D. 22. Dominio local escogido en el archivo acl.conf. Por los autores.	127
Figura D. 23. Información del archivo hss_fd.conf. Por los autores.	128
Figura D. 24. Información del archivo mme_fd.conf. Por los autores.	128
Figura D. 25. Contenido de la carpeta freeDiameter. Por los autores.	128
Figura D. 26. PLMN generada por el archivo de configuración. Por los autores. 129	
Figura D. 27. Configuración de direcciones del archivo de configuración. Por los autores.	129



Figura D. 28. Bases de datos de localhost. Por los autores.	129
Figura D. 29. Tablas asociadas a la base de datos oai_db. Por los autores.	130
Figura D. 30. Tabla mmeidentity. Por los autores.	130
Figura D. 31. Tabla pdn. Por los autores.	130
Figura D. 32. Tabla users. Por los autores.	130
Figura D. 33. Inicio del hss. Por los autores.	131
Figura D. 34. Inicio del EPC. Por los autores.	131
Figura D. 35. Asociación del hss y la mme. Por los autores.	132
Figura D. 36. Asociación de EUTRAN y EPC. Por los autores.	132
Figura D. 37. Interfaces creadas. Por los autores.	132
Figura E. 1. Configuración de FQDN. Por los autores.	133
Figura E. 2. Información generada por el comando hostname -f.	133
Figura E. 3. Información mostrada por el archivo hss.conf. Por los autores.	134
Figura E. 4. Archivo del HSS. Por los autores.	135
Figura E. 5. Archivo de la MME. Por los autores.	136
Figura E. 6. Archivo de la SPGW. Por los autores.	136
Figura E. 7. Archivo hss_fd.conf . Por los autores.	137
Figura E. 8. Archivo mme_fd.conf. Por los autores.	137
Figura E. 9. Archivo acl.conf . Por los autores.	137
Figura E. 10. Contenido de la carpeta freeDiameter. Por los autores.	138
Figura E. 11. Intefaces de archivo de configuración. Por loa autores.	138
Figura E. 12. Direcciones de Interfaces. Por los autores.	139
Figura E. 13. Inicio del HSS. Por los autores.	140
Figura E. 14. Inicio de la MME. Por los autores.	141
Figura E. 15. Inicio de la SPGW. Por los autores.	141
Figura E. 16. Asociación de eNB y MME. Por los autores.	142
Figura E. 17. Direcciones asociadas de eNB y MME . Por los autores.	142
Figura E. 18. Respuesta a ping. Por los autores.	143
Figura E. 19. STATE_ZOMBIE. Por los autores.	143
Figura F. 1. Creación de interfaz virtual. Por los autores.	145
Figura F. 2. Verificación de interfaz virtual. Por los autores.	145
Figura F. 3. Asociación de eNB con MME. Por los autores.	145
Figura F. 4. Dirección asignada al UE. Por los autores.	146



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. 1. Plataformas RF soportadas por OAI. Tomada de: [2].....	4
Tabla 1. 2. Simuladores unitarios OAI.....	5
Tabla 1. 3. Modos de configuración de la capa RLC.....	12
Tabla 2. 1. Metodologías de desarrollo. Tomada de: [11].	25
Tabla 2. 2. MCS para el PDSCH y el PUSCH. Tomada de: [12].	31
Tabla 2. 3. Modos de transmisión soportados en LTE. Tomada de: [9].	32
Tabla 2. 4. Modelos de canal extendidos. Tomada de: [13].	33
Tabla 2. 5. Modelos de canal WINNER. Tomada de: [13].	34
Tabla 2. 6. Bloque de recursos físicos en LTE. Tomada de: [9].	34
Tabla 2. 7. Bandas de E-UTRAN soportadas por OAI. Adaptada de: [18].	46
Tabla 3. 1. Opciones de simulación de canales físicos y de transporte. Por los autores.	48
Tabla 3. 2. Variación de parámetros para visualización de resultados. Por los autores.	49
Tabla 3. 3. Escenarios para Canales físicos LTE. Por los autores.	50
Tabla 3. 4. Configuración del escenario 1 para DL y UL. Por los autores.	51
Tabla 3. 5. Configuración del escenario 2. Por los autores.	55
Tabla 3. 6. Configuración del escenario 3. Por los autores.	56
Tabla 3. 7. Configuración del escenario 4. Por los autores.	58
Tabla 3. 8. Configuración del escenario 5. Por los autores.	60
Tabla 3. 9. Opciones para emulación sin interfaz S1. Por los autores.	63
Tabla 3. 10. Escenarios para emulación sin interfaz S1. Por los autores.	63
Tabla 3. 11. Variación de parámetros para escenario 1. Por los autores.	64
Tabla 3. 12. Variación de parámetros para escenario 2. Por los autores.	65
Tabla 3. 13. Parámetros para escenario 3 sin interfaz S1. Por los autores.	67
Tabla 3. 14. Configuración de interfaces para escenario con interfaz S1 en el mismo equipo. Por los autores.	70
Tabla 3. 15. Configuración de interfaces para el escenario con interfaz S1 sobre diferentes equipos. Por los autores.	81
Tabla 3. 16. Equipos para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.	86



LISTA DE ACRONIMOS

3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i> , Proyecto de Asociación para la Tercera Generación.
4G	<i>Fourth Generation</i> , Cuarta Generación.
5G	<i>Fifth Generation</i> , Quinta Generación.
AAA	<i>Authentication, Authorization, and Accounting</i> , Autenticación, Autorización y Contabilidad.
AIA	<i>Authentication Information Answer</i> , Respuesta de Información para Autenticación.
AIR	<i>Authentication Information Request</i> , Petición de Información para Autenticación.
AM	<i>Acknowledged Mode</i> , Modo Reconocido.
AuC	<i>Authentication Center</i> , Centro de Autenticación.
BCBR	<i>Big-packets Constant Bit Rate</i> , Paquetes Grandes con Tasa de Bit Constante.
BCCH	<i>Broadcast Control CHannel</i> , Canal de Control de Difusión.
BCH	<i>Broadcast CHannel</i> , Canal de Difusión.
CCCH	<i>Common Control CHannel</i> , Canal de Control Común.
CEA	<i>Capabilities Exchange Answer</i> , Respuesta de Intercambio de Capacidades.
CER	<i>Capabilities Exchange Request</i> , Petición de Intercambio de Capacidades.
CN	<i>Core Network</i> , Red Central.
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i> , Indicador de Calidad del Canal.
CRC	<i>Cyclic Redundancy Code</i> , Código de Redundancia Cíclica
DCCH	<i>Dedicated Control CHannel</i> , Canal de Control Dedicado.
DCI	<i>Downlink Control Information</i> , Información de Control en Enlace Descendente.
DL	<i>DownLink</i> , Enlace Descendente.
DL-SCH	<i>DownLink – Shared CHannel</i> , Canal Compartido en Enlace Descendente.
DNS	<i>Domain Name System</i> , Sistema de Nombres de Dominio.
DPA	<i>Disconnect-Peer Answer</i> , Respuesta para Desconectar Par.
DPR	<i>Disconnect-Peer Request</i> , Petición para Desconectar Par.
DTCH	<i>Dedicated Traffic CHannel</i> , Canal de Tráfico Dedicado.
DWA	<i>Device Watchdog Answer</i> , Respuesta de Vigilancia del Dispositivo.
DWR	<i>Device Watchdog Request</i> , Solicitud de Vigilancia del Dispositivo.
eNB	<i>Evolved Node B</i> , Nodo B Evolucionado.
EPA	<i>Extended Pedestrian A</i> , Peatón Extendido A.
EPC	<i>Evolved Packet Core</i> , Núcleo de Paquetes Evolucionado.
EPS	<i>Evolved Packet System</i> , Sistema de Paquetes Evolucionado.
ETU	<i>Extended Typical Urban</i> , Urbano Típico Extendido.
E-UTRAN	<i>Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> , Red de Acceso Radio Terrestre UMTS Evolucionada.



EVA	<i>Extended Vehicular A, Vehículo Extendido A.</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing, Duplexación por División de Frecuencia.</i>
FER	<i>Frame Error Rate, Tasa de Error de Trama.</i>
GTP-C	<i>GPRS Tunnelling Protocol – Control plane, Protocolo de Túneles GPRS – Plano de Control.</i>
GTP-U	<i>GPRS Tunnelling Protocol – User plane, Protocolo de Túneles GPRS – Plano de Usuario.</i>
GUI	<i>Graphical User Interface, Interfaz de Usuario Gráfica.</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat-reQuest, Solicitud de Repetición Automática Híbrida.</i>
HLR	<i>Home Location Register, Registro de Ubicación Local.</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server, Servidor de Suscripción Local.</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem, Subsistema Multimedia IP.</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity, Identidad de Suscriptor Móvil Internacional.</i>
IP	<i>Internet Protocol, Protocolo de Internet.</i>
LMS-SDR	<i>Lime Micro-Systems - Software Defined Radio, Micro-Sistemas Lime – Radio Definido por Software.</i>
LTE	<i>Long Term Evolution, Evolución a Largo Término.</i>
M2M	<i>Machine To Machine, Máquina A Máquina.</i>
MAC	<i>Message Authentication Code, Código de autenticación de mensaje.</i>
MAC	<i>Medium Access Control, Control de Acceso al Medio</i>
MBMS	<i>Multimedia Broadcast Multicast Service, Servicio de Difusión/Multidifusión Multimedia.</i>
MCBR	<i>Medium-packets Constant Bit Rate, Paquetes Medianos con Tasa de Bit Constante.</i>
MCCH	<i>Multicast Control CHannel, Canal de Control de Multidifusión.</i>
MCH	<i>Multicast CHannel, Canal de Multidifusión.</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme, Esquema de Modulación y Codificación.</i>
MIB	<i>Master Information Block, Bloque de Información Maestra.</i>
MIMO	<i>Multiple input – Multiple output, Múltiples Entradas – Múltiples Salidas.</i>
MISO	<i>Multiple Input – Single Output. Múltiples Entradas - Única Salida.</i>
MME	<i>Mobility Management Entity, Entidad de Gestión de Movilidad.</i>
MSF	<i>Microsoft Solution Framework, Marco de referencia para Soluciones de Microsoft.</i>
MTCH	<i>Multicast Traffic CHannel, Canal de Tráfico de Multidifusión.</i>
NB	<i>Node B, Nodo B.</i>
OAI	<i>OpenAirInterface, Interfaz de Aire Abierta.</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.</i>
OSA	<i>OpenAirInterface Software Alliance, Alianza Software de Interfaz de Aire Abierta.</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast CHannel, Canal de Difusión Físico.</i>



PC	<i>Personal Computer</i> , Computador Personal.
PCCH	<i>Paging Control CHannel</i> , Canal de Control de Paging.
PCEF	<i>Policy Control Enforcement Function</i> , Función de Aplicación del Control de Políticas.
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator CHannel</i> , Canal Indicador de Formato de Control Físico Físico.
PCH	<i>Paging CHannel</i> , Canal de Paging.
PCRF	<i>Policy Control and charging Rules Function</i> , Función de Control de Políticas y Reglas de Cobro.
PDCCH	<i>Physical Dedicated Control CHannel</i> , Canal de Control Dedicado Físico.
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> , Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos.
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared CHannel</i> , Canal Compartido en Enlace Descendente Físico.
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> , Unidad de Dato de Protocolo.
P-GW	<i>PDN GateWay</i> , Pasarela a Redes de Paquetes de Datos.
PHICH	<i>Physical HARQ Indicator CHannel</i> , Canal de Indicador de Solicitud HARQ Físico.
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i> , Red Móvil Pública Terrestre.
PMCH	<i>Physical Multicast CHannel</i> , Canal de Multidifusión Físico.
PRACH	<i>Physical Random Access CHannel</i> , Canal de Acceso Aleatorio Físico.
PRB	<i>Physical Resource Block</i> , Bloque de Recursos Físicos.
PUCCH	<i>Physical Uplink Control CHannel</i> , Canal de Control en Enlace Ascendente Físico.
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared CHannel</i> , Canal Compartido en Enlace Ascendente Físico.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
RACH	<i>Random Access CHannel</i> , Canal de Acceso Aleatorio.
RAD	<i>Rapid Application Development</i> , Desarrollo Rápido de Aplicaciones.
RAR	<i>Random Access Response</i> , Respuesta de Acceso Aleatorio.
RE	<i>Resource Element</i> , Elemento de Recurso.
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radiofrecuencia.
RLC	<i>Radio Link Control</i> , Control de Enlace Radio.
RNC	<i>Radio Network Controller</i> , Controlador de Red Radio.
RNL	<i>Radio Network Layer</i> , Capa de Red Radio.
RRC	<i>Radio Resources Control</i> , Control de Recursos Radio.
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i> , Señal de Referencia de Potencia Recibida.
RSRQ	<i>Reference Signal Received Quality</i> , Señal de Referencia de Calidad Recibida.
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> , Indicador de Intensidad de la Señal Recibida.
RUP	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Racional Unificado.
S1-AP	<i>Application Part S1</i> , Parte de Aplicación S1.



SCBR	<i>Small-packets Constant Bit Rate</i> , Paquetes Pequeños con Tasa de Bit Constante.
SC-FDMA	<i>Single-Carrier Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única.
SCTP	<i>Stream Control Transmission Protocol</i> , Protocolo de Transmisión de Control de Flujo.
SDR	<i>Software Defined Radio</i> , Radio Definido por Software.
SDU	<i>Service Data Unit</i> , Unidad de Datos de Servicio.
S-GW	<i>Serving GateWay</i> , Pasarela de Servicio.
SI	<i>System Information</i> , Información del Sistema.
SIB	<i>System Information Block</i> , Bloque de Información del Sistema
SIMO	<i>Single Input – Multiple Output</i> . Única Entrada – Múltiples Salidas.
SISO	<i>Single Input - Single output</i> . Única Entrada - Única Salida.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
TAC	<i>Tracking Area Code</i> , Código de Área de Seguimiento.
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> , Protocolo de Control de Transmisión.
TDD	<i>Time Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Tiempo.
TM	<i>Transparent Mode</i> , Modo Transparente.
TNL	<i>Transport Network Layer</i> , Capa de Red de Transporte.
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> , Protocolo de Datagramas de Usuario
UE	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
UL	<i>UpLink</i> , Enlace Ascendente.
ULA	<i>Update-Location Answer</i> , Respuesta para Actualizar Ubicación
ULR	<i>Update-Location Request</i> , Solicitud para Actualizar Ubicación.
UL-SCH	<i>UpLink – Shared CHannel</i> , Canal Compartido en Enlace Ascendente.
UM	<i>Unacknowledged Mode</i> , Modo No reconocido.
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i> , Periférico Radio de Software Universal.
VBR	<i>Variable Bit Rate</i> , Tasa de Bit Variable.
X2-AP	<i>Appliaction Part X2</i> . Parte de Aplicación X2.
XP	<i>EXtreme Programming</i> , Programación Extrema.



CAPITULO 1: GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha pensado en un mundo totalmente conectado, por lo cual, los sistemas de comunicaciones móviles se han convertido en importantes elementos para la industria, ya que la competencia por el mercado se torna cada vez más compleja. Además, los operadores móviles se han enfocado en transformar sus redes para ofrecer un mejor servicio a sus usuarios, y así mantenerse a la vanguardia de las comunicaciones.

La constante investigación sobre nuevas tecnologías en el ámbito de las telecomunicaciones, ha permitido que los sistemas de comunicaciones móviles evolucionen de forma drástica. Sin embargo, la difícil adquisición de equipos capaces de soportar las tecnologías lanzadas al mercado, convierte al factor económico en la mayor limitante para el despliegue de las redes.

Debido a esto, existe una gran brecha en las comunicaciones móviles entre la industria y la academia, dado que la mayoría de instituciones de educación superior no cuentan con el presupuesto suficiente para la adquisición de equipos necesarios para la experimentación con tecnologías de Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*) y Quinta Generación (5G, *Fifth Generation*).

Con el objetivo de acercar la industria de las telecomunicaciones con la academia, muchas organizaciones se han enfocado en promover el desarrollo de entornos de código abierto, que permiten simular y/o emular un determinado escenario de comunicaciones móviles de bajo costo, facilitando a los estudiantes la comprensión de conceptos que no se profundizan en las aulas de clase.

1.2. PLATAFORMA OPENAIRINTERFACE

Interfaz de Aire Abierta (OAI, *OpenAirInterface*) es una plataforma de tecnología inalámbrica creada por la Alianza Software OAI (OSA, *OpenAirInterface Software Alliance*) con el objetivo de difundir un ecosistema de Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) abierto. Esta ofrece una implementación basada en software de código abierto de un sistema LTE, abarcando la pila de protocolos completa del estándar del Proyecto de Asociación para la Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*) tanto en la Red de Acceso Radio Terrestre UMTS Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network*) como en el Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*) y puede ser utilizada para construir y personalizar un Nodo B Evolucionado (eNB, *Evolved Node B*), un Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*) y una Red



Central (CN, *Core Network*) sobre un Computador Personal (PC, *Personal Computer*). Asimismo, es posible la conexión de componentes implementados con OAI y elementos comerciales, para probar diferentes configuraciones de red y monitorear su funcionamiento [1].

OAI se basa en una arquitectura software de interfaz radio alojada en un PC, escrita en lenguaje C para varias variantes de Linux en tiempo real y optimizada para procesadores Intel x86 y ARM. Además, provee un entorno de desarrollo con una gama de herramientas como modos de emulación altamente realistas, herramientas de monitoreo y depuración, analizador de protocolos y sistema de registro configurable para todas las capas y canales [1].

1.2.1. Objetivos OAI

Para la construcción de un ecosistema celular abierto y su despliegue de bajo costo, OAI apunta a los siguientes objetivos [1]:

- Entorno de desarrollo abierto e integrado bajo el control del experimentador.
- Funciones de red totalmente basadas en software que ofrecen flexibilidad para instanciar y reconfigurar los componentes de la red.
- Funciones de UE totalmente basadas en software que pueden ser utilizadas por diseñadores de modem con mejoras de LTE y características avanzadas de 5G.
- Prototipado rápido de casos de uso 3GPP y nuevos conceptos hacia sistemas 5G.

1.2.2. Características OAI

Software

OAI incluye una implementación software completa de sistemas celulares móviles 4G. En la capa física, proporciona las siguientes características [1]:

- Compatible con el *Release 8.6 de LTE* y un subconjunto de características del *Release 10*.
- Configuración para Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*) y Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*).
- Ancho de banda: 1.4, 5, 10 y 20 MHz.
- Modo de transmisión: 1, 2 (estables), 5 y 6 (experimental).



- Arreglo de antenas: Única Entrada - Única Salida (SISO, *Single Input – Single Output*), Única Entrada – Múltiples Salidas (SIMO, *Single Input – Multiple Output*), Múltiples Entradas - Única Salida (MISO, *Multiple Input – Single Output*) y Múltiples Entradas - Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input – Multiple Output*).
- Informes de Indicador de Calidad del Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*).
- Soporte de canales del Enlace Descendente (DL, *DownLink*).
- Soporte de canales del Enlace Ascendente (UL, *UpLink*).
- Soporte para Solicitud de Repetición Automática Híbrida (HARQ, *Hybrid Automatic Repeat-reQuest*) en UL y DL.

Para la pila de protocolos E-UTRAN, se proporciona [1]:

- Compatible con el *Release 8.6* de LTE y un subconjunto de características del *Release 10*.
- Implementación de las capas: Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*), Control de Enlace Radio (RLC, *Radio Link Control*), Convergencia de Paquetes de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*) y Control de Recursos Radio (RRC, *Radio Resources Control*).
- Servicio de protocolos para los canales del *Release 8*.
- Planificador *Proportional Fair*.
- Pila de protocolos reconfigurable.
- Verificación de integridad y cifrado.
- Interfaces estándar con los protocolos Parte de Aplicación S1 (S1-AP, *S1-Application Part*) y Protocolo de Túneles GPRS – Plano de Usuario (GTP-U, *GPRS Tunnelling Protocol – User plane*).
- Soporte para Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) versiones 4 y 6.

Las funciones soportadas para el EPC son [1]:

- Implementaciones de: Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobility Management Entity*), Pasarela de Servicio (SGW, *Serving GateWay*), Pasarela hacia Redes de Paquetes de Datos (PDN, *Packet Data Network*)



(PGW, *PDN GateWay*) y Servidor de Suscripción Local (HSS, *Home Subscriber Server*).

- Integridad y encriptación de protocolos de Estrato Sin Acceso (NAS, *Non Access Stratum*).
- Manejo de procedimientos de UE: vinculación, autenticación, acceso de servicio y establecimiento de portador radio.
- Acceso transparente a la red IP. Nombre del punto de acceso configurable.
- Soporte para IPv4 e IPv6.

Hardware

OAI está diseñada para soportar distintas plataformas hardware de Radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*). Actualmente cuenta con soporte para las plataformas: *Blade RF*, Periférico Radio de Software Universal (USRP, *Universal Software Radio Peripheral*) B-210, USRP X-300, USRP N-310 y Micro Sistemas Lime – Radio Definido por Software (LMS-SDR, *Lime MicroSystem – Software Defined Radio*). En la Tabla 1. 1 se comparan distintas características de estas plataformas.

Tabla 1. 1. Plataformas RF soportadas por OAI. Tomada de: [2]

	USRP B210	USRP X310	USRP N310	Blade RF	LMS SDR
Adquisición de datos	USB3	Gbit Ethernet, PCIeexpress	Gbit Ethernet	USB3	USB3
MIMO y capacidades de ancho de banda	2x1 MIMO 20MHz o 2x2 MIMO 10MHz	2x2 MIMO 120MHz	4x4 MIMO 100MHz	1x1 SISO 20MHz	2x2 MIMO 20MHz
Rango de frecuencia	70MHz – 6GHz	DC-6GHz	10MHz- 6GHz	300 MHz –3.8GHz	300 MHz – 3.8GHz
Precio	€1,130	~€5,000	~€10,000	\$420	\$299
Duplexación	FDD o TDD	FDD o TDD	FDD o TDD	FDD	FDD o TDD
Potencia de salida	10dBm	n/a	12-18dBn	6dBm	10dBm
Figura de ruido	<8dB	n/a	5.5-7.5dB	?	<7dB
Open source	FGPA/driver	FPGA/drive r	FPGA/driver	Todo	Todo
Compatibilidad	4G	4G/5G	5G up to MHz 100	4G	4G



1.2.3. Funcionalidades OAI

Simulación unitaria para LTE.

Existen varias simulaciones unitarias para la capa física de LTE, estas constituyen el punto de partida para probar innovaciones en la funcionalidad básica de la capa física. Además, se debe realizar pruebas sobre estas para incluir cualquier código nuevo al repositorio de la plataforma. Estos simuladores, presentados en la Tabla 1. 2, incluyen simulación Monte-Carlo de canales de transporte y físicos [3].

Proporcionan estimaciones de la Tasa de Error de Trama (FER, *Frame Error Rate*) de transporte y la tasa de error de la Información de Control en Enlace Descendente (DCI, *Downlink Control Information*). Además, para cada simulación es posible establecer valores para diferentes parámetros de configuración. [3].

Tabla 1. 2. Simuladores unitarios OAI.

SIMULADOR	NUMERO DE CANALES
pbchsim	1
pdccsim	1
dlsim	2
ulsim	2
pucchsim	1
prachsim	1
mbmssim	2

Sistema de emulación OAI - OASIM

El emulador del sistema permite la simulación y emulación de una red *OpenAirLTE*. Proporciona simulación con la capa física completa, o con abstracción de esta. En ambos modos, se ejecuta la pila de protocolos completa. Los casos de uso para el emulador *OASIM* son los siguientes [4]:

- **OAI UE ↔ OAI eNB:** En este caso se realiza la emulación de la red sin comunicación con el EPC, es decir, sin soporte para la interfaz S1, sobre un mismo equipo.
- **OAI UE ↔ OAI eNB ↔ OAI EPC:** A diferencia del caso anterior, sí se tiene en cuenta la conexión con el EPC, por lo que es necesario la utilización de la interfaz S1 del sistema. Este escenario tiene la opción de implementarse en un mismo equipo o sobre diferentes equipos.

Pruebas de campo

Se denominan pruebas de campo, dado que su implementación requiere componentes hardware, es decir, las plataformas de RF mencionadas en la Tabla 1.1., y equipos comerciales incorporados en distintos grados. Las posibles configuraciones de red son [1]:

- UE Comercial ↔ eNB Comercial + OAI EPC.
- UE Comercial ↔ OAI eNB + EPC Comercial.
- UE Comercial ↔ OAI eNB + OAI EPC.
- OAI UE ↔ OAI eNB + OAI EPC.
- OAI UE ↔ OAI eNB + EPC Comercial.
- OAI UE ↔ eNB Comercial + EPC Comercial.

1.2.4. Áreas estratégicas para 5G.

Dado que la evolución de 5G está aún en discusión en el ámbito académico/industrial, OSA ha previsto identificar diferentes áreas estratégicas, cada una con diferentes proyectos, los cuales se crean con el objetivo de promoverlas dentro de la alianza y asegurarse que el resultado de cada proyecto se fusione con el repositorio principal en algún momento. Las áreas estratégicas de OSA se ilustran en la Figura 1. 1 [5].



Figura 1. 1. Áreas estratégicas de OpenAirInterface. Adaptada de: [5]



1.2.5. Miembros OAI

OAI cuenta con una serie de miembros, encargados del soporte económico del proyecto y de la constante investigación para el desarrollo de la plataforma. Además, dichos miembros tienen una clasificación, de acuerdo a la membresía que cada uno maneja, de la siguiente manera:

- Miembro fundador: *EURECOM*.
- Miembros Estratégicos:
 - *ORANGE*.
 - *FUJITSU*.
 - *NOKIA BELL LABS*
 - *TCL*
- Miembros Asociados, tales como:
 - *Samsung*.
 - *Blackned*.
 - *InterDigital*.
 - *Fraunhofer*.
 - *University of Washington*
 - Universidad Nacional de Colombia.
 - *The University of Edimburgh*.
 - Universidad Politécnica de Cataluña.
 - *The University of UTAH*.
 - *The University of Kent*.
 - Universidad Politécnica de Valencia.



- *University of Electronic Science and Technology of China.*
- *Technical University Dortmund.*

1.3. GENERALIDADES LTE

LTE es un estándar para sistemas de comunicaciones móviles impulsado por el 3GPP con el objetivo de satisfacer la creciente demanda de tráfico, especificando los siguientes requerimientos [6]:

- Reducción de los retardos, tanto en establecimiento de la conexión como en la latencia de transmisión.
- Aumento en las tasas de datos de usuario.
- Aumento de la tasa de bits en el borde de celda, para la uniformidad de la provisión del servicio.
- Reducción del costo por bit, que implica una eficiencia espectral mejorada.
- Mayor flexibilidad del uso del espectro, tanto en bandas nuevas como en bandas preexistentes.
- Arquitectura de red simplificada.
- Movilidad sin límites, incluso entre diferentes tecnologías de acceso radio.
- Consumo de energía razonable en el terminal móvil.

1.4. ARQUITECTURA DE LTE

La arquitectura LTE está dividida en tres componentes principales, el UE, la E-UTRAN y el EPC [7], que componen el Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) [8], cada uno está interconectado por medio de interfaces estandarizadas para permitir la interoperabilidad multivendedor [6]. Además, el EPC se comunica con redes de paquetes de datos externas, tales como Internet, redes corporativas privadas o el Subsistema Multimedia IP (IMS, *IP Multimedia Subsystem*) [8]. En la Figura 1. 2 se observa la arquitectura general de un sistema LTE.

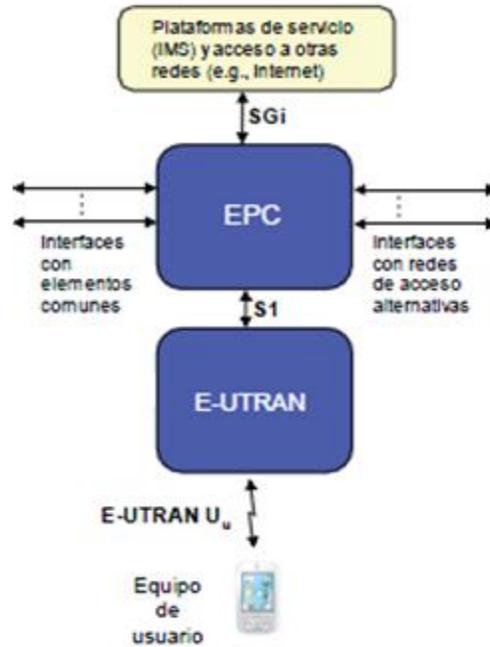


Figura 1. 2. Arquitectura general de LTE. Adaptada de: [9]

1.4.1. Arquitectura de E-UTRAN

La red de acceso E-UTRAN de LTE utiliza un solo tipo de nodo llamado eNB, por lo que su arquitectura se denomina plana [2]. En la Figura 1. 3 se aprecia la arquitectura general de E-UTRAN.

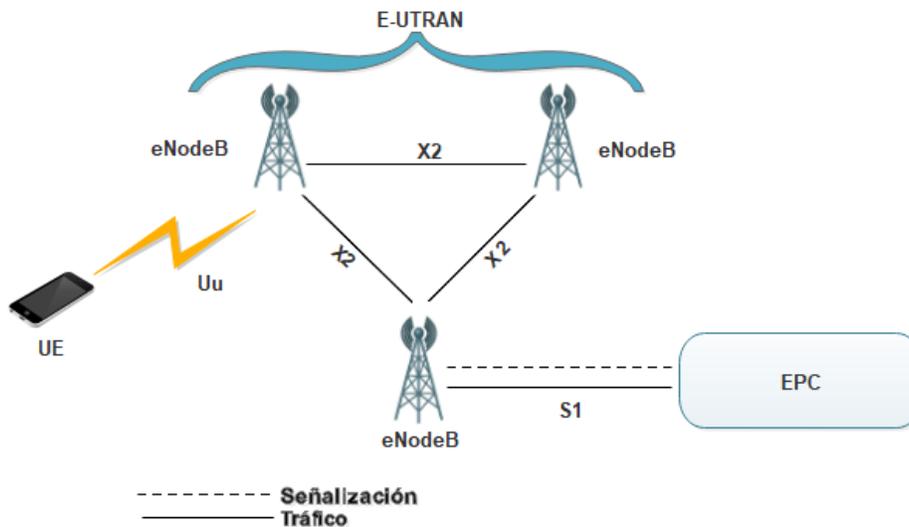


Figura 1. 3. Arquitectura E-UTRAN. Por los autores.



1.4.2. Entidades de red e interfaces de E-UTRAN

Nodo B Evolucionado

El eNB es un nodo lógico que gestiona las comunicaciones radio entre el móvil y el EPC [7], cumpliendo las funciones que en tecnologías anteriores realizaban el Nodo B (NB, *Node B*) y del Controlador de la Red Radio (RNC, *Radio Network Controller*). Los UEs controlados por los eNBs, se pueden conectar solamente a uno de ellos, por lo que no es posible realizar el *soft handover* [7]. Sus funciones principales son [10]:

- Administración de portador radio.
- Transmisión y recepción en la interfaz radio.
- Gestión dinámica de recursos radio en UL y DL; y planificación de paquetes de datos.
- Gestión de movilidad radio.
- Compresión y encriptación de encabezados de datos de usuarios IP.
- Seguridad de señalización de red.
- Planificación y transmisión de información de difusión.
- Planificación y transmisión de mensajes de *paging*.
- Selección de MME en la conexión de terminal.

Interfaz radio

Permite la interconexión además del envío de tráfico y señalización, entre el UE y el eNB; y soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de información en el canal radio: difusión de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada entre un UE y el eNB [9].

Interfaz X2

El plano de usuario de la interfaz X2 proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNBs sin garantías de entrega y sin soporte de mecanismos de control de errores y de control de flujo; la transferencia de datos de usuario entre eNBs se realiza únicamente durante los procedimientos de *handover*, en los que los



paquetes de usuario almacenados en el eNB antiguo se transfieren al eNB nuevo. De esta forma, el cambio de eNB puede resultar más transparente al usuario, ya que se reduce la posible pérdida de paquetes durante el proceso.

Respecto al plano de control, entre las funciones y procedimientos soportados en la interfaz X2 destacan [9]:

- Soporte para mecanismo de *handover* entre eNBs.
- Indicación del estado de carga del eNB.

Interfaz S1

Permite la conexión del eNB con el EPC y se divide en dos interfaces, la S1-MME que permite al eNB comunicarse con la MME, encargada únicamente de sustentar las funciones relacionadas con el plano de control y la S1-U para la comunicación entre el eNB y la S-GW, encargada de procesar el plano de usuario. Esta separación entre entidades de red es una característica importante de LTE, ya que permite dimensionar de forma independiente los recursos necesarios para el soporte de la señalización del sistema y para el envío del tráfico de los usuarios [9].

La interfaz S1 puede manejar las funciones de la interfaz X2, aunque indirectamente y más lentamente. Normalmente, las interfaces S1 y X2 no son conexiones físicas directas, en su lugar, la información se enruta a través de una red de transporte basada en IP [7].

1.4.3. Protocolos de E-UTRAN

Protocolos en la interfaz Radio

En el plano de usuario, el envío de paquetes IP entre el eNB y un UE a través de la interfaz radio se soporta en una pila de protocolos formada por una capa de enlace y una capa física. La capa de enlace se desglosa a su vez en tres subcapas: PDCP, RLC y MAC [9].

- **Capa PDCP** [6]. Procesa los mensajes de Control de Recursos Radio (RRC, *Radio Resource Control*) en el plano de control y los paquetes IP en el plano de usuario. Las principales funciones de la capa PDCP son la compresión de cabeceras, la seguridad y el soporte para el reordenamiento y retransmisión durante el traspaso. Para portadores radio que están configurados para utilizar esta capa, hay una entidad PDCP por portador radio.
- **Capa RLC** [6]. Sus funciones principales son la segmentación y el reensamblaje de los paquetes de la capa superior para adaptarlos al tamaño que realmente se puede transmitir a través de la interfaz radio. Para los portadores radio que necesitan transmisión sin errores, realiza la



retransmisión para la recuperación de paquetes, y un reordenamiento para compensar la recepción fuera de orden debido a la operación HARQ en la capa inferior. Además, puede trabajar en tres modos de configuración, Modo Transparente (TM, *Transparent Mode*), Modo No reconocido (UM, *Unacknowledged Mode*) o Modo Reconocido (AM, *Acknowledged Mode*).

En la Tabla 1. 3, se presentan las características principales de los modos de configuración de la capa RLC, en cuanto al servicio de transferencia, aplicaciones y manejo de la Unidad de Datos de Protocolo (PDU, *Protocol Data Unit*) RLC y la Unidad de Datos de Servicio (SDU, *Service Data Unit*) RLC.

Tabla 1. 3. Modos de configuración de la capa RLC.

Modo RLC	Transferencia de datos	Aplicaciones	Funciones
Modo Transparente	Unidireccional	Transferencia de mensajes de: <ul style="list-style-type: none"> • Difusión de SI. • Paging. 	<ul style="list-style-type: none"> • No agrega sobrecarga RLC a las PDUs. • Mapeo y demapeo de PDU y SDU directos.
Modo No reconocido	Unidireccional	<ul style="list-style-type: none"> • aplicaciones de tiempo real sensibles a los retrasos y tolerantes a errores. • servicios punto a multipunto 	<ul style="list-style-type: none"> • Segmentación y concatenación de SDUs RLC. • Reordenamiento de las PDU RLC. • Detección de PDU RLC duplicadas. • Reensamblaje de SDUs RLC.
Modo Reconocido	Bidireccional	<ul style="list-style-type: none"> • aplicaciones sensibles a errores y tolerantes al retardo en tiempo real. • servicios de streaming sin requisito de retardo estricto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Funciones del modo UM. • Prohibición de estado. • Re-segmentación de las PDUs de datos RLC retransmitidas. • Sondeo. • Informes de estado. • Prohibición de estado.



- **Capa MAC** [6]. Se encarga de controlar el acceso al canal radio y realiza la multiplexación de datos de diferentes portadores radio, sólo hay una entidad MAC por UE. Además, decide la cantidad de datos que se pueden transmitir desde cada portador radio e instruye a la capa RLC en cuanto al tamaño de los paquetes a proporcionar, logrando una Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) negociada para cada portador radio. Para el enlace ascendente, este proceso incluye informar al eNB la cantidad de datos almacenados en el búfer para la transmisión.
- **Capa física** [9]. Se encarga de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio, y alberga funciones de codificación de canal, modulación, procesamiento asociado a las técnicas de Múltiples Entradas - Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) y mapeo de la señal a los recursos físicos apropiados. Esta capa, para los enlaces ascendente y descendente se basa en un esquema de Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única (SC-FDMA, *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*) y de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) respectivamente.

Respecto a las funciones del plano de control, la interfaz radio las soportada sobre las mismas capas de enlace y física utilizadas en el plano de usuario. Además, adiciona una capa para la utilización de un protocolo propio del plano de control, el cual es:

- **Capa RRC** [9]. Permite establecer una conexión de control entre el eNB y un UE a través de la cual se llevan a cabo funciones relacionadas con la gestión operativa de la interfaz radio. Entre dichas funciones se destacan: 1) mecanismos de gestión de los servicios portadores radio: señalización para el establecimiento, liberación y modificación de los portadores radio; 2) soporte de funciones de movilidad: señalización de *handover*; 3) difusión de parámetros del sistema y 4) funciones de aviso de los terminales que no disponen de una conexión RRC establecida: envío de avisos a través del canal de *paging*.

En la Figura 1. 4 se muestra la pila de protocolos de la interfaz radio, tanto en el plano de usuario como en el plano de control.

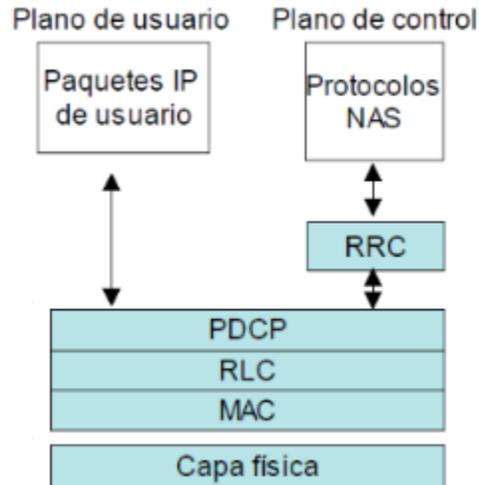


Figura 1. 4. Pila de protocolos de la interfaz radio. Tomada de: [9]

Para la comunicación entre capas de la pila de protocolos, la interfaz radio cuenta con tres tipos de canales, los cuales son: canales lógicos, canales de transporte y canales físicos.

Los canales lógicos corresponden a los servicios de transferencia de datos ofrecidos por los protocolos de la interfaz radio a las capas superiores, hay dos tipos de canales lógicos: los de control, utilizados para la transferencia de información del plano de control y los de tráfico, usados para la transferencia de información del plano de usuario [10]. Los canales lógicos de control son [6]:

- Canal de Control de Difusión (BCCH, *Broadcast Control CHannel*). Canal de DL utilizado para transmitir Información del Sistema (SI, *System Information*) a los terminales presentes en la celda.
- Canal de Control de Paging (PCCH, *Paging Control CHannel*). Canal de DL usado para notificar a los UEs de una llamada entrante o un cambio en la SI.
- Canal de Control Común (CCCH, *Common Control CHannel*). Se utiliza para entregar información de control en DL y UL durante el establecimiento de la conexión entre un UE y el eNB.
- Canal de Control de Multidifusión (MCCH, *Multicast Control CHannel*). Canal de DL empleado para transmitir información de control relacionada con la recepción del Servicio de Difusión/Multidifusión Multimedia (MBMS, *Multimedia Broadcast Multicast Service*).
- Canal de Control Dedicado (DCCH, *Dedicated Control CHannel*). Utilizado para transmitir información de control dedicada relacionada con un UE específico, tanto en DL como en UL. Se usa cuando un UE tiene una conexión RRC con el eNB.



Los canales lógicos de tráfico son [6]:

- Canal de Tráfico Dedicado (DTCH, *Dedicated Traffic CHannel*). Destinado para transmitir datos de usuarios dedicados tanto en DL como en UL.
- Canal de Tráfico de Multidifusión (MTCH, *Multicast Traffic CHannel*). Se emplea para transmitir datos de usuario para el MBMS en DL.

Los canales de transporte describen con qué características se transmiten los datos a través de la interfaz radio, como la forma en que se protegen los datos contra los errores de transmisión, el tipo de codificación de los canales, la protección del Código de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Code*) y el tamaño de los paquetes enviados, definiendo el formato de transporte [10]. Por un lado, se tienen los canales de transporte en DL y por otro lado los canales de transporte en UL:

Canales de transporte en DL [6]:

- Canal de Difusión (BCH, *Broadcast CHannel*). Se usa para transportar las partes de la SI que son esenciales para el acceso al Canal Compartido de Enlace Descendente (DL-SCH, *DownLink – Shared CHannel*). El formato de transporte es fijo y la capacidad es limitada.
- DL-SCH. Destinado para transportar datos de usuario en el DL o controlar mensajes. Además, transporta las partes restantes de la SI que no se transportan a través del BCH.
- Canal de Paging (PCH, *Paging CHannel*). Utilizado para transportar la información de búsqueda a los UEs y para informarlos sobre las actualizaciones de la SI.
- Canal de Multidifusión (MCH, *Multicast CHannel*). Se emplea para transportar datos de usuario del MBMS.

Canales de transporte en UL [6]:

- Canal Compartido de Enlace Ascendente (UL-SCH, *UpLink – Shared CHannel*). Se emplea para transportar datos de usuario en el UL o controlar mensajes.
- Canal de Acceso Aleatorio (RACH, *Random Access CHannel*). Destinado para acceder a la red cuando el UE no tiene sincronización de temporización en el UL, o cuando el UE no tiene ningún recurso de transmisión de UL asignado.



Los canales físicos son la implementación real del canal de transporte sobre la interfaz radio, solo los identifica la capa física de E-UTRAN y su estructura depende de las características OFDM de la interfaz física. Al igual que los canales de transporte, hay canales físicos para DL y UL.

Canales físicos en DL [10]:

- Canal Compartido en Enlace Descendente Físico (PDSCH, *Physical Downlink Shared CHannel*). Transporta datos de usuario y señalización de la capa superior, los esquemas de modulación soportados son QPSK, 16QAM y 64QAM con tasa de codificación de 1/3.
- Canal de Control en Enlace descendente Físico (PDCCH, *Physical Downlink Control CHannel*). Encargado del transporte de la DCI que incluye información de asignación de recursos para los canales PCH y DL-SCH.
- Canal de Multidifusión Físico (PMCH, *Physical Multicast CHannel*). Contiene información de multidifusión y difusión.
- Canal de Difusión Físico (PBCH, *Physical Broadcast CHannel*). Encargado de transportar información básica de la red, el esquema de modulación soportado es QPSK y se transmite en 4 tramas consecutivas en las ranuras 0, 1, 2 y 3 de la primera subtrama utilizando 72 subportadoras.
- Canal Indicador de Formato de Control Físico (PCFICH, *Physical Control Format Indicator CHannel*). Informa al UE sobre la cantidad de símbolos OFDM utilizados para el PDCCH.
- Canal de Indicador de Solicitud HARQ Físico (PHICH, *Physical HARQ Indicator CHannel*). Transporta las respuestas ACK y NACK del eNB a la transmisión del UL, en relación con el mecanismo HARQ.

Canales físicos en UL [10]:

- Canal Compartido en Enlace Ascendente Físico (PUSCH, *Physical Uplink Shared CHannel*). Transporta datos de usuario y señalización de la capa superior, los esquemas de modulación soportados son QPSK, 16QAM y 64QAM (opcional) con tasa de codificación de 1/3.
- Canal de Control en Enlace Ascendente Físico (PUCCH, *Physical Uplink Control CHannel*). Lleva información de control de UL, que incluye respuestas ACK y NACK desde el terminal a la transmisión del DL, en relación con el mecanismo HARQ.

- Canal de Acceso Aleatorio Físico (PRACH, *Physical Random Access Channel*). Transporta el preámbulo de acceso aleatorio enviado por los terminales para acceder a la red.

Canales físicos como el PCFICH, PDCCH, PHICH Y PUCCH, solo están destinados para la capa física, ya que transportan información relacionada con la codificación de bloques físicos o información de HARQ y no llevan información de las capas superiores, tal como señalización RRC o datos de usuario, por ello no son mapeados a ninguno de los canales de transporte [10].

En la Figura 1. 5 y en la Figura 1. 6, se muestra la relación entre los canales lógicos, de transporte y físicos en DL y UL respectivamente.

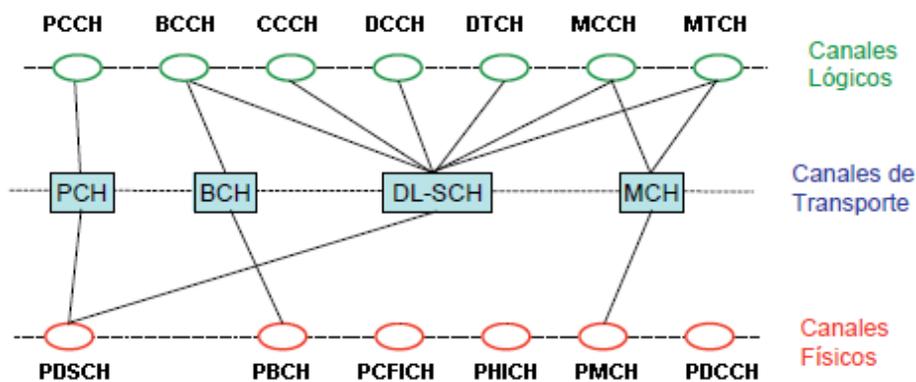


Figura 1. 5. Relación entre canales en Downlink. Adaptada de: [9].

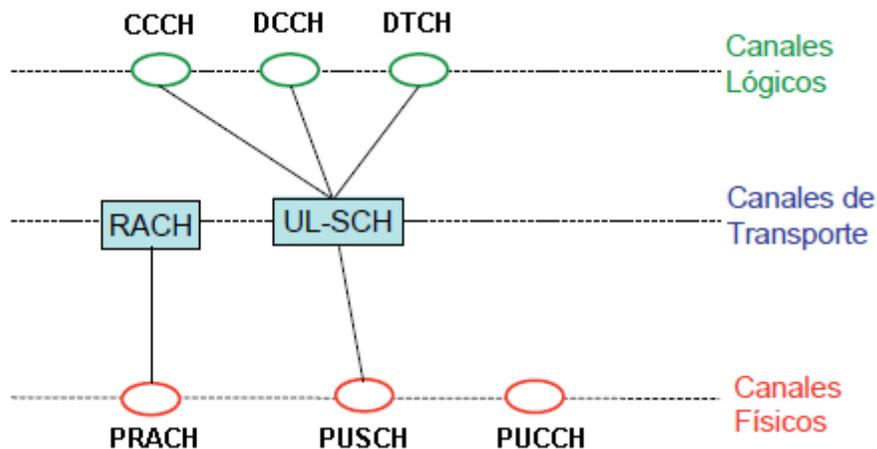


Figura 1. 6. Relación entre canales en Uplink. Tomada de: [9].

Protocolos en las interfaces S1 y X2 [9]

La estructura de protocolos utilizada para soportar las interfaces S1 y X2 establece una separación entre la Capa de Red Radio (RNL, *Radio Network Layer*) y la Capa

de Red de Transporte (TNL, *Transport Network Layer*), lo cual tiene como objetivo aislar las funciones del sistema de comunicaciones móviles de aquellas que dependen de la tecnología de transporte utilizada. De este modo, los protocolos específicos de E-UTRAN constituyen la RNL, mientras que la TNL contiene los protocolos para el transporte de la información entre las entidades de la red. Así como en la interfaz radio, los protocolos de estas interfaces presentan un plano de usuario y uno de control.

En el plano de usuario utilizan el protocolo GTP-U para el envío de paquetes IP de usuarios, se transporta sobre el Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP, *User Datagram Protocol*) y fundamentalmente se utiliza para multiplexar los paquetes IP de múltiples usuarios.

Respecto al plano de control, la RNL de las interfaces S1 y X2 consiste en los protocolos S1-AP y Parte de Aplicación X2 (X2-AP, *X2-Application Part*) respectivamente. La transferencia de mensajes de señalización de estos protocolos se ejecuta mediante el Protocolo de Transmisión de Control de Flujo (SCTP, *Stream Control Transmission Protocol*).

El SCTP es un protocolo de transporte de propósito general, el cual hereda muchas funciones del Protocolo de Control de Transmisión (TCP, *Transmission Control Protocol*) e introduce importantes mejoras como el soporte para *multihoming* (transferencia a través de múltiples caminos entre nodos) y *multistreaming* (múltiples flujos enviados en paralelo), encaminadas a proporcionar mayor robustez y versatilidad en la transferencia de diferentes tipos de información.

En la Figura 1. 7 y en la Figura 1. 8 se muestra la pila de protocolos para las interfaces S1 y X2 respectivamente, diferenciando plano de control y plano de usuario.

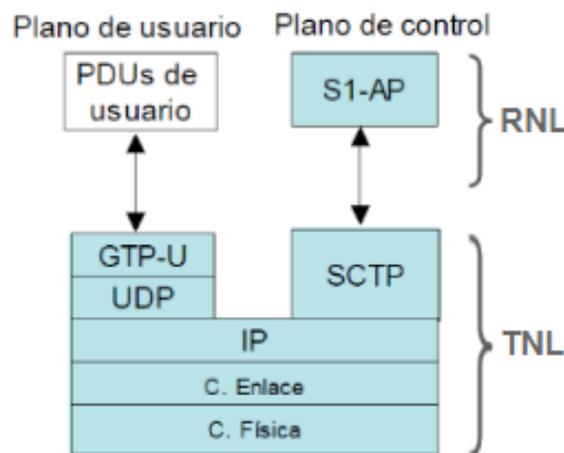


Figura 1. 7. Pila de protocolos de la interfaz S1. Tomada de: [9]

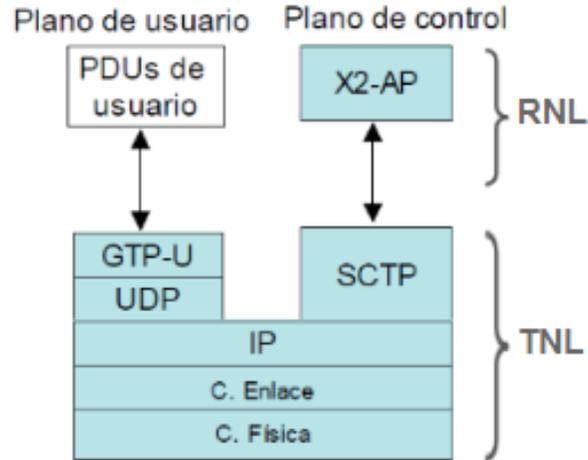


Figura 1. 8. Pila de protocolos de la interfaz X2. Tomada de: [9]

1.4.4. Arquitectura del EPC

El EPC es el responsable del control global del UE y del establecimiento de los portadores radio [6], formado principalmente por tres entidades de red: MME, S-GW y P-GW. Estas entidades junto con el HSS, constituyen los elementos básicos para la conectividad IP entre los UEs conectados a través de E-UTRAN y redes externas a las que se conecta el EPC. Las funciones asociadas con el plano de usuario se concentran en las dos pasarelas, mientras que la MME se encarga de las funciones y señalización del plano de control [10]. En la Figura 1. 9 se muestra la arquitectura general del EPC.

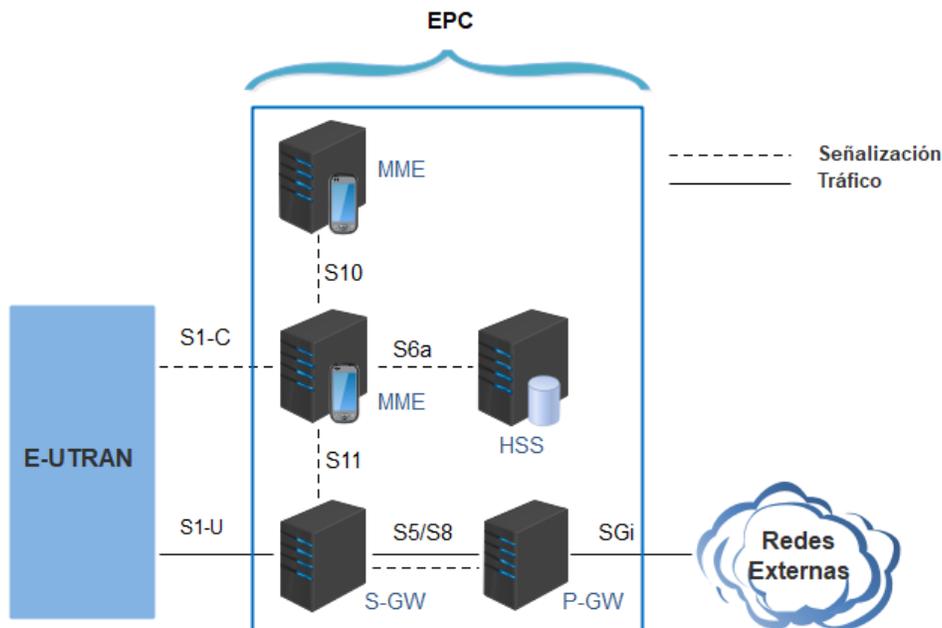


Figura 1. 9. Arquitectura del EPC. Por los autores.



1.4.5. Entidades de red e interfaces del EPC

Entidad de Gestión de Movilidad

Constituye el elemento principal del plano de control de la red LTE para gestionar el acceso de los terminales a través de E-UTRAN. Todo terminal que se encuentra registrado en la red, tiene una MME asignada.

La elección de la MME se realiza en el proceso de registro y depende de aspectos como la ubicación geográfica del terminal y criterios de balanceo de cargas. Mantiene un contexto de datos de usuario, en el cual almacena información como identificadores de usuario, conexiones y servicios portadores activos, claves de seguridad y datos de localización del usuario, y estructura las gestiones que se realizan para dicho usuario. La MME asignada a un usuario puede cambiar según la movilidad de este dentro de la zona de servicio de la red. Las principales funciones de la MME son [9]:

- Autenticación y autorización del acceso de los usuarios a través de E-UTRAN.
- Gestión de los servicios portadores EPS.
- Gestión de la movilidad de los usuarios en modo idle.
- Señalización para el soporte de la movilidad entre el EPS y redes 3GPP.
- Terminación de los protocolos NAS.

Pasarela de Servicio

Pasarela del plano de usuario entre E-UTRAN y el EPC. Un usuario registrado en la red dispone de una S-GW asignada en el EPC a través de la cual transcurre su plano de usuario, y su asignación responde a criterios geográficos y de balanceo de cargas. Entre sus principales funciones se destacan [9]:

- Proporciona un punto de anclaje en el EPC con respecto a la movilidad del UE entre eNBs.
- La funcionalidad de punto de anclaje también se aplica a la gestión de movilidad con las otras redes de acceso 3GPP.
- Almacenamiento temporal de los paquetes IP de los usuarios en caso de que estos se encuentren en modo idle.
- Enrutamiento del tráfico de usuario.



Pasarela hacia Redes de Paquetes de Datos

Proporciona conectividad entre la red LTE y las PDN, es decir, el tráfico intercambiado entre el UE y la PDN se transporta a través de esta pasarela. Un usuario tiene asignada como mínimo una P-GW desde su registro en la red. Las funciones principales de la P-GW son [9]:

- Aplicación de las reglas de uso de la red y control de tarificación a los servicios portadores que tenga establecidos el terminal.
- Asignación de la dirección IP de un terminal, utilizada en una determinada red externa.
- Actúa de punto de anclaje para la gestión de la movilidad entre LTE y redes no 3GPP.
- El tráfico IP que transcurre por la P-GW es procesado a través de un conjunto de filtros que asocian cada paquete IP con el usuario y servicio portador EPS correspondiente.

Servidor de Suscripción Local

Unión del Registro de Ubicación Local (HLR, *Home Location Register*) y el Centro de Autenticación (AuC, *Authentication Center*).

El HLR es responsable de almacenar y actualizar la base de datos que contiene toda la información de suscripción de usuario, incluyendo [10]:

- Identificación y direccionamiento de usuario: corresponde a la Identidad de Suscriptor Móvil Internacional (IMSI, *International Mobile Subscriber Identity*) del usuario y al número del móvil.
- Información del perfil de usuario.

El AuC se encarga de generar información de seguridad a partir de claves de identidad de usuario, la cual se entrega al HLR y se comunica a otras entidades. La información de seguridad se utiliza principalmente para [10]:

- Autenticación mutua de terminales.
- Cifrado de rutas y protección de la integridad, para garantizar que los datos y la señalización transmitidos al terminal no se alteren.

Por otra parte, el EPC cuenta con nodos adicionales, como la Función de Control de Políticas y Reglas de Cobro (PCRF, *Policy Control and charging Rules Function*), responsable de tomar decisiones de control de políticas y controlar las



funcionalidades de carga basadas en flujo en la Función de Aplicación del Control de Políticas (PCEF, *Policy Control Enforcement Function*) que se encuentra en la P-GW [6].

Las entidades del EPC son nodos lógicos, ya que varias pueden ser combinadas en una implementación real, formando un nodo físico [8].

Interfaz SGi

Permite la interconexión de la P-GW con redes externas IP y soporta la interconexión a redes IPv4 e IPv6 [9].

Interfaces S5 y S8

Proporcionan el soporte para la transferencia de paquetes de usuario entre la S-GW y la P-GW. La interfaz S5 se utiliza en situaciones donde ambas pasarelas pertenecen a la misma red, mientras que la interfaz S8 se emplea cuando hay escenarios de itinerancia (*roaming*), donde la S-GW pertenece a la red visitada y la P-GW a la red local [9].

Interfaz S11

Permite controlar las funciones del plano de usuario en el EPC desde la MME. Los procedimientos soportados en esta interfaz permiten la creación, eliminación, modificación y cambio de los servicios portadores que los terminales tienen establecidos a través del EPC.

Soporta el proceso de reubicación de la S-GW asociada a un terminal mediante la transferencia de contextos y paquetes de usuario entre la pasarela antigua y la nueva [9].

Interfaz S10

Permite la interconexión de dos MMEs y su función principal es el soporte del mecanismo de reubicación de la MME, es decir, a través de esta interfaz se realiza la transferencia del contexto del usuario entre las MMEs involucradas [9].

Interfaz S6a

Encargada de la transferencia de información entre el HSS y la MME. A través de esta se da soporte a diferentes funciones [9]:

- Mantenimiento de información de gestión de la localización.
- Autorización de acceso a la red. El HSS almacena los datos de suscripción de los usuarios que condicionan el acceso a los servicios que ofrece la red.



- Autenticación de los usuarios.
- Notificación y descarga de la identidad de la P-GW que utiliza un usuario en una conexión.

También soporta escenarios de itinerancia donde una MME de la red de un operador puede acceder al HSS de otro operador.

1.4.5. Protocolos del EPC

GTP-U [9]

Proporciona un mecanismo de encapsulado para el envío de paquetes de usuario entre nodos de una red IP. Los paquetes que corresponden a un mismo servicio portador EPS se transportan con el Identificador de Punto Final de Túnel (TEID, *Tunnel Endpoint Identifier*). El establecimiento de un túnel GTP-U consiste básicamente en la elección del TEID asociado a un determinado servicio portador EPS en ambos extremos del túnel.

Todas las interfaces para el transporte de información de plano de usuario en el EPC se soportan sobre el protocolo GTP-U, excepto la variante de las interfaces S5 y S8 basada en PMIPv6.

GTP-C [9]

El Protocolo de Túneles GPRS – Plano de Control (GTP-C, *GPRS Tunnelling Protocol – Control plane*) soporta un conjunto de funciones en torno a dos aspectos:

- Gestión de sesiones: a través de los mensajes y procedimientos de señalización especificados para GTP-C, la red gestiona la creación de túneles GTP-U entre las entidades por donde transcurre el plano de usuario.
- Gestión de movilidad: mediante GTP-C se llevan a cabo algunos de los procedimientos asociados con la gestión de la movilidad, como por ejemplo, la transferencia de contextos de información de los usuarios entre las entidades de red en casos de reubicación.

Diameter [9]

Es una evolución del protocolo RADIUS, creado para sustentar funciones de Autenticación, Autorización y Contabilidad (*AAA, Authentication, Authorization, and Accounting*) y mejora sus servicios en aspectos como seguridad y robustez a pérdidas de mensajes, además de la extensibilidad, que permite el uso del protocolo para aplicaciones fuera del ámbito AAA.



Diameter se estructura en torno un protocolo de base y un número de extensiones denominadas aplicaciones. El protocolo de base aporta las funcionalidades comunes como formato de mensajes y de elementos de información genéricos, mecanismos de transferencia de mensajes y aspectos de seguridad. Las aplicaciones definen los mensajes adicionales y procedimientos necesarios para adaptar el uso del protocolo a una determinada funcionalidad.

PMIPv6 [9]

Este protocolo es adoptado por el 3GPP como alternativa al uso del protocolo GTP en las interfaces S5 y S8. Al igual que GTP, resuelve la movilidad de forma transparente al UE, es decir, sin necesidad de que éste participe en la señalización pertinente.

Protocolos NAS [9]

Los protocolos NAS son desarrollados para llevar a cabo la gestión de movilidad de los UEs y la gestión de las sesiones para el establecimiento de la conectividad entre el UE y la P-GW, además, cumplen funciones de autorización y autenticación. Se extienden entre la MME y el UE, y sus mensajes se transportan de forma transparente en la interfaz radio, encapsulados en la parte de datos de los mensajes RRC.



CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE DESARROLLO

2.1. INTRODUCCIÓN

Existen varias metodologías de desarrollo para el modelado y simulación de sistemas de comunicaciones, sin embargo, cada una define características específicas, lo cual determina la selección de una en particular según el trabajo que se requiera desarrollar. Las metodologías comparadas son: Proceso Racional Unificado (RUP, *Rational Unified Process*), Marco de referencia para Soluciones de Microsoft (MSF, *Microsoft Solutions Framework*), Desarrollo Rápido de Aplicaciones (RAD, *Rapid Application Development*) y Programación Extrema (XP, *eXtreme Programming*); y se miden de acuerdo a ciertos criterios como se muestra en la Tabla 2. 1.

Tabla 2. 1. Metodologías de desarrollo. Tomada de: [11].

Criterio	%	RUP	MSF	RAD	XP
Grado de conocimiento	20	15	10	10	10
Soporte orientado a objetos	10	10	10	10	10
Adaptable a cambios	15	10	15	10	15
Basado en casos de uso	10	10	5	10	5
Posee documentación adecuada	15	15	15	15	10
Facilita la integración entre las etapas de desarrollo	10	10	10	10	10
Relación con UML	10	10	8	8	8
Permite desarrollo software sobre cualquier tecnología	10	10	10	10	10
Total	100	90	83	83	78

Para el modelado del laboratorio de comunicaciones móviles basado en la plataforma OAI se adopta la metodología RUP, la cual se caracteriza por tener un enfoque incremental e iterativo, y define cuatro etapas (requerimientos, análisis & diseño, implementación y pruebas) para cada iteración. Además, plantea una realimentación entre las cuatro fases, lo que permite realizar las modificaciones o adiciones necesarias al producto de manera más eficiente. Las etapas planteadas se ilustran en la Figura 2. 1.

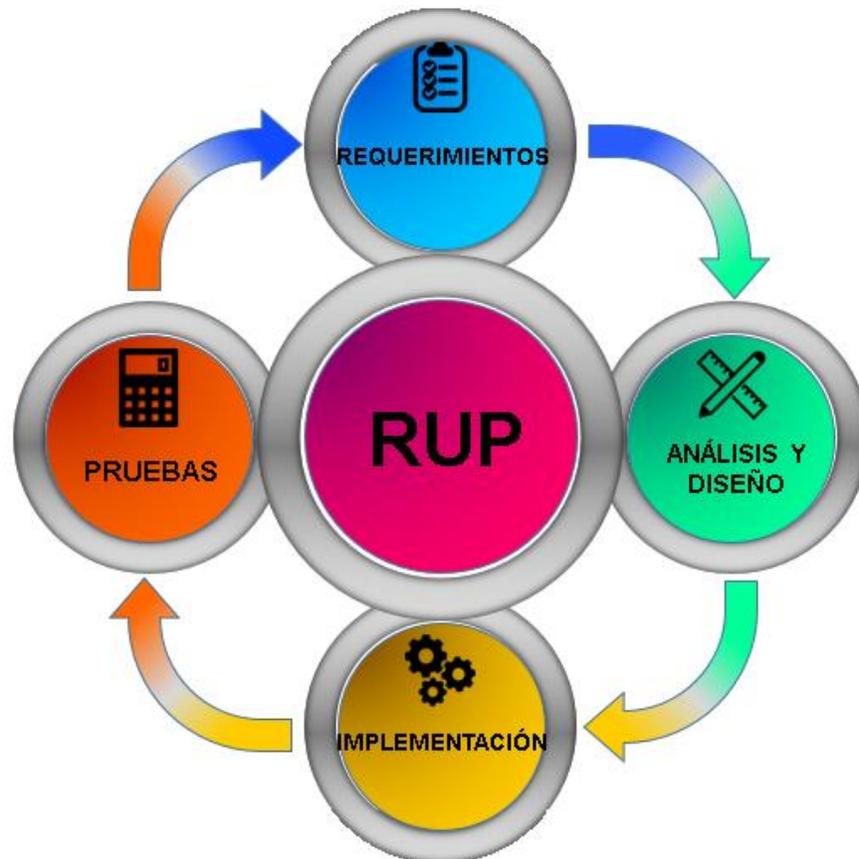


Figura 2. 1. Metodología RUP. Por los autores.

2.2. REQUERIMIENTOS

Para definir de manera apropiada los requerimientos funcionales y no funcionales, y así realizar un análisis y diseño óptimos para el modelo de laboratorio, es necesario tener claro el problema de estudio y dar una breve explicación de éste.

2.2.1. Problema de estudio

En la Universidad del Cauca no se cuenta con laboratorios que permitan un acercamiento a los sistemas de comunicaciones reales, debido a los altos costos de dispositivos y las licencias de las herramientas.

Teniendo una plataforma de código abierto como OAI, se busca explorar las funcionalidades que esta ofrece, de manera que se pueda diseñar un modelo de laboratorio y un prototipo de este basados en la plataforma.

2.2.2. Requerimientos funcionales

Los requerimientos funcionales del laboratorio definen las acciones que se pueden realizar con el modelo planteado.

Requerimiento 1: Analizar el desempeño de canales físicos y de transporte de LTE.

Requerimiento 2: Analizar los protocolos empleados entre las entidades de red LTE.

Requerimiento 3: Realizar pruebas de conexiones entre entidades de red de LTE con plataformas de RF.

2.3. ANÁLISIS Y DISEÑO

En esta sección se describe el proceso de análisis y diseño para un modelo de laboratorio de comunicaciones móviles basado en las funcionalidades de OAI, y se plantea un diseño dividido en componentes, en los que se incorporan las funcionalidades más importantes de OAI. De este modo, cada componente se estructura en un bloque con características específicas y una descripción de los parámetros que involucran. Además, mediante diagramas de flujo se presenta un bosquejo del funcionamiento y manejo de cada bloque. Los componentes del modelo de laboratorio se muestran en la Figura 2. 2.



Figura 2. 2. Componentes del modelo de laboratorio. Por los autores.

Los componentes definidos en el diseño son independientes entre sí, ya que en cada uno se analizan distintos aspectos de una red LTE, por esta razón, se definen parámetros iniciales de entrada para cada componente. Con ellos se generan los escenarios a implementar y se realiza el proceso definido para obtener los resultados esperados. El diagrama genérico para cada escenario se ilustra en la Figura 2. 3.



Figura 2. 3. Diagrama general. Por los autores.

A continuación, se describe cada componente del laboratorio, especificando los bloques que los conforman, además de los aspectos que se analizan en cada uno.

2.3.1. Canales físicos y de transporte LTE

En este componente del laboratorio se realizan simulaciones de diferentes canales, variando distintos parámetros, dirigidos principalmente hacia aspectos de la capa física, definiendo las características de cada transmisión. La variación de los parámetros se realiza con el fin de analizar el desempeño de los canales frente a distintos escenarios, generados conforme a los parámetros que se deseen considerar. El desempeño de los canales se analiza mediante tablas o gráficas, de acuerdo a factores como la FER y/o el *throughput*.

El bloque correspondiente al componente de canales físicos y de transporte LTE, está conformado por los subbloques 1.A y 1.B relacionados con los canales que se pueden simular y sus parámetros de entrada respectivamente. En la Figura 2. 4 se muestra la estructura del bloque 1.



Figura 2. 4. Bloque funcional para simulación unitaria. Por los autores.

El subbloque 1.A, corresponde a los canales físicos: PBCH, PDCCH, PDSCH, PUSCH, PUCCH, PRACH y PMCH, y de transporte: DLSCH, ULSCCH y MCH. En la Figura 2. 5 se presenta la distribución de los canales mencionados, cabe destacar que los canales de transporte están asociados a su respectivo canal físico.



Figura 2. 5. Simuladores unitarios. Por los autores.

El subbloque 1.B corresponde a los parámetros de entrada que tienen mayor relevancia para el desempeño de los canales físicos y de transporte. Se varían de acuerdo al análisis que se lleve a cabo en cada escenario. En la Figura 2. 6 se muestran los parámetros de entrada.



Figura 2. 6. Parámetros de entrada. Por los autores.

Parámetros de entrada

- **Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*)**

Relación existente entre la potencia de la señal y la potencia de ruido, se expresa principalmente en valores logarítmicos, por lo que es posible que tome valores negativos, en casos en los que la potencia de la señal es menor a la potencia de ruido.

- **Esquema de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*)**

Define el tipo de modulación y la tasa de codificación utilizadas en un Bloque de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resource Block*) determinado. Típicamente, un índice MCS más alto ofrece una mayor eficiencia espectral, pero requiere una SNR más alta para soportarlo. Según las especificaciones del 3GPP para el *Release 8.6*, se definen las características de cada MCS para los canales PDSCH y PUSCH, como se muestra en la Tabla 2. 2.



Tabla 2. 2. MCS para el PDSCH y el PUSCH. Tomada de: [12].

PDSCH			PUSCH		
Índice MCS	Orden de Modulación	Índice TBS	Índice MCS	Orden de Modulación	Índice TBS
0	2	0	0	2	0
1	2	1	1	2	1
2	2	2	2	2	2
3	2	3	3	2	3
4	2	4	4	2	4
5	2	5	5	2	5
6	2	6	6	2	6
7	2	7	7	2	7
8	2	8	8	2	8
9	2	9	9	2	9
10	4	9	10	2	10
11	4	10	11	4	10
12	4	11	12	4	11
13	4	12	13	4	12
14	4	13	14	4	13
15	4	14	15	4	14
16	4	15	16	4	15
17	6	15	17	4	16
18	6	16	18	4	17
19	6	17	19	4	18
20	6	18	20	4	19
21	6	19	21	6	19
22	6	20	22	6	20
23	6	21	23	6	21
24	6	22	24	6	22
25	6	23	25	6	23
26	6	24	26	6	24
27	6	25	27	6	25
28	6	26	28	6	26
29	2	Reservado	29	Reservado	
30	4		30		
31	6		31		



- **Modos de transmisión**

Para LTE se especifican siete modos de transmisión, los cuales se muestran en la Tabla 2. 3.

Tabla 2. 3. Modos de transmisión soportados en LTE. Tomada de: [9].

Modo de Transmisión	Características Principales
1	Transmisión por una única antena.
2	Diversidad en transmisión.
3	Multiplexado espacial en bucle abierto.
4	Multiplexado espacial en bucle cerrado.
5	MIMO para esquemas multiusuario.
6	Conformación de haz con realimentación desde el terminal móvil para indicar que tipo de precodificación debe utilizarse en el proceso de conformación de haz.
7	Conformación de haz sin realimentación. En este caso el eNB determina el esquema de precodificación apropiado para la conformación de haz a partir por ejemplo de los ángulos de llegada de canales del enlace ascendente.

- **Tipos de arreglo de antenas**

- **SISO.** Sistema de comunicaciones que utiliza una sola antena en transmisión y en recepción.
- **MISO.** Sistema de comunicaciones que utiliza dos o más antenas transmisoras, pero sólo una antena receptora. También se le conoce como diversidad en transmisión.
- **SIMO.** Sistema de comunicaciones que utiliza una sola antena en transmisión y dos o más antenas receptoras, se conoce como diversidad en recepción.
- **MIMO.** Sistema de comunicaciones que usa varias antenas en transmisión y en recepción. MIMO aprovecha fenómenos físicos como la propagación multitrayecto para incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error.



- **Modelos de canal**
 - **ITU Extendidos**

Los modelos extendidos de la ITU para LTE son Peatón Extendido A (EPA, *Extended Pedestrian A*), Vehicular Extendido A (EVA, *Extended Vehicular A*) y Urbano Típico Extendido (ETU, *Extended Typical Urban*), representados con dispersión del retardo baja, media y alta respectivamente. Los modelos con dispersión de retardo baja se utilizan para representar ambientes *indoor* y de celdas pequeñas, mientras que la dispersión de retardo media y alta se usan para modelar entornos urbanos con celdas grandes [13].

En la Tabla 2. 4 se muestra una descripción general de los modelos de canal extendidos de la ITU.

Tabla 2. 4. Modelos de canal extendidos. Tomada de: [13].

MODELOS DE CANAL EXTENDIDO DE LA ITU						
	EPA		EVA		ETU	
Corrimiento Doppler máximo [Hz]	5		5, 70		70, 300	
Velocidad máxima [Km/h]	3		50		90	
Nº de taps	Exceso de retardo (ns)	Potencia Relativa (dB)	Exceso de retardo (ns)	Potencia Relativa (dB)	Exceso de retardo (ns)	Potencia Relativa (dB)
1	0	0	0	0	0	-1
2	30	-1	30	-1.5	50	-1
3	70	-2	150	-1.4	120	-1
4	90	-3	310	-3.6	200	0
5	110	-8	370	-0.6	230	0
6	190	-17.2	710	-9.1	500	0
7	410	-20.8	1090	-7	1600	-3
8	--	--	1730	-12	2300	-5
9	--	--	2510	-16.9	5000	-7



- **Modelos de canal del grupo WINNER**

Creados para sistemas superiores a 3G usando un ancho de banda de 100 MHz y una frecuencia entre 2 y 6 GHz. En la Tabla 2. 5 se muestran las características principales de los modelos WINNER [13].

Tabla 2. 5. Modelos de canal WINNER. Tomada de: [13].

Modelo	Entorno de propagación	Disposición de la estación base	Disposición de la estación móvil	Velocidad del móvil (Km/h)
SCM-A	Suburbano Macro	3-sector, 0.5 de espaciamiento	Auricular en posición de llamada	0-5
SCM-B	Urbano Macro (dispersión baja)	6-sector, 0.5 de espaciamiento	Auricular en posición de datos	0-70
SCM-C	Urbano Macro (dispersión alta)	3-sector, 4 de espaciamiento	Laptop	0-120
SCM-D	Urbano Micro	6-sector, 4 de espaciamiento	Laptop	0-350

- **Bloque de recursos físicos**

Mínimo elemento de información asignado por el eNB a un terminal móvil, ocupa un ancho de banda de 180 KHz equivalente a 12 subportadoras con un espaciamiento de 15 KHz entre ellas; en él se transmiten 6 o 7 símbolos OFDM, dependiendo de la longitud de prefijo cíclico utilizada. La duración de un PRB es igual a 0,5 ms, es decir, la duración de un slot o ranura temporal [9]. El número de PRBs disponibles depende de la disposición del ancho de banda, como se indica en la Tabla 2. 6.

Tabla 2. 6. Bloque de recursos físicos en LTE. Tomada de: [9].

Ancho de Banda [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Número de PRB	6	15	25	50	75	100

- **Número de tramas**

Corresponde a la cantidad de tramas que se envían a través de los canales mediante los simuladores unitarios.

De acuerdo a los bloques planteados para el componente de canales físicos y de transporte, se determina un proceso, explicado mediante el diagrama de flujo de la Figura 2. 7, para el manejo de los datos y el análisis de resultados.

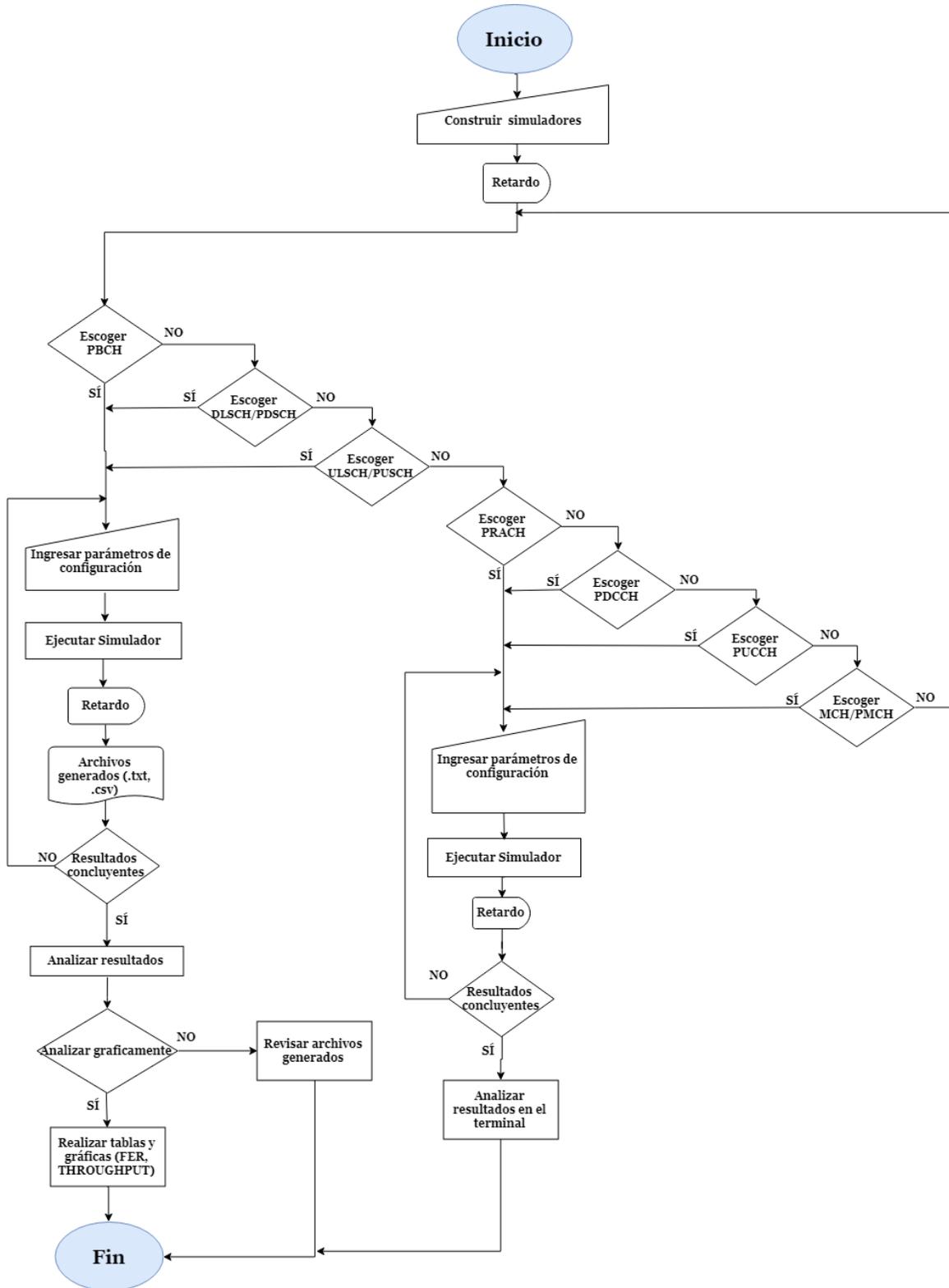


Figura 2. 7. Diagrama de flujo para canales físicos y de transporte LTE. Por los autores.

Para realizar el análisis de desempeño de los canales en cada simulación, se debe efectuar un determinado proceso para el tratamiento de los datos que brinda cada simulador, ya que éste crea un archivo en un formato de Valores Separados por Comas (CSV, *Comma-Separated Values*) solo con el número de tramas enviadas y erradas. Dicho proceso se muestra en la Figura 2. 8



Figura 2. 8. Tratamiento datos de simulación. Por los autores.

El valor de FER y *throughput* que se requieren para generar las gráficas de los resultados se obtienen a partir de las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

$$FER = \frac{\text{Número de tramas con errores}}{\text{Número de tramas enviadas}} \quad (1)$$

$$\text{Throughput [Kbps]} = C_{max} [\text{Kbps}] (1 - FER) \quad (2)$$

C_{max} es la capacidad máxima de cada enlace, encontrada de acuerdo a los valores teóricos de LTE [14] con prefijo cíclico normal mediante la ecuación (3):

$$C_{max} [\text{Kbps}] = 168 N_{RB} \log_2 M \quad (3)$$

Donde N_{RB} es el número de PRB y M es el índice de modulación.

Se busca obtener un rendimiento de los canales, determinado por un valor de *throughput* mayor o igual al 95% que se puede alcanzar, por ello se apunta a un límite superior de FER del 5% para lograrlo.

2.3.2. Análisis de protocolos y tráfico LTE

En este componente se analiza el manejo de la pila de protocolos de LTE, principalmente los protocolos involucrados en las conexiones entre las entidades de red que se emulan. El análisis se realiza mediante herramientas especializadas para el análisis de protocolos, con el objetivo de tener conocimiento de los procedimientos que se llevan a cabo durante determinada emulación.

En el bloque correspondiente al análisis de protocolos y tráfico LTE, ilustrado en la Figura 2. 9, se tiene la posibilidad de emular escenarios con y sin soporte de la interfaz S1.



Figura 2. 9. Opciones para análisis de protocolos y tráfico LTE. Por los autores.

El primer caso, presentado en la Figura 2. 10, corresponde a la emulación de una red LTE sin soporte para la interfaz S1, es decir, tiene en cuenta solo la conexión de un eNB y un UE, excluyendo la interacción con el EPC. Se define un bloque para el manejo de la capa física y otro para los parámetros que se varían para analizar el desempeño del DL y UL.

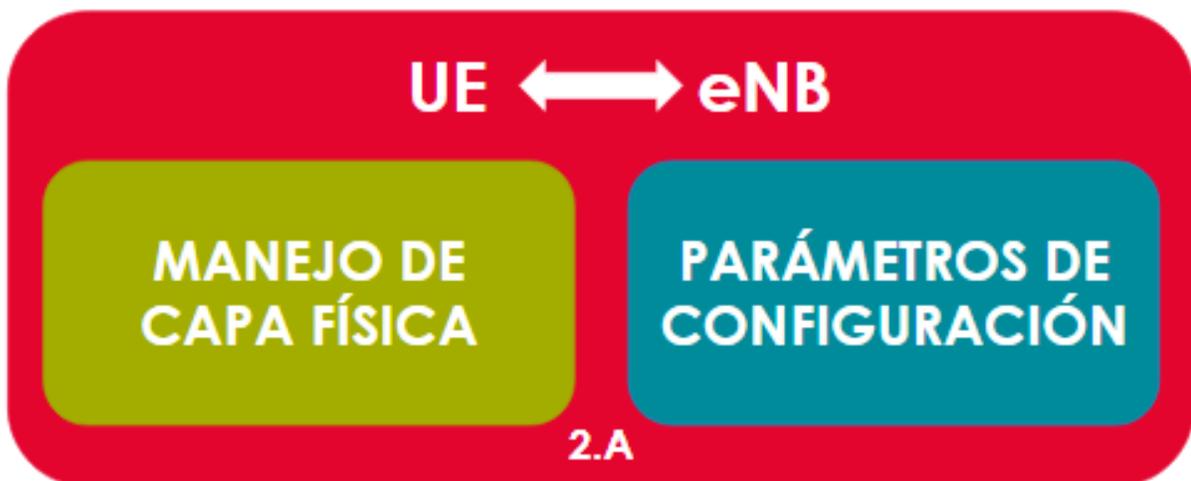


Figura 2. 10. Modos para conexión sin EPC. Por los autores.

Para el manejo de la capa física se tienen dos opciones: el modo abstracción y la implementación completa de esta capa.



Cuando se realiza una implementación con la capa física completa, el 75% del tiempo y los recursos totales de la simulación se gastan únicamente en la modulación, demodulación, codificación, decodificación y convolución del canal con la señal en la capa física, lo que supone una enorme sobrecarga en términos de complejidad y duración de las evaluaciones a nivel de sistema. Por lo tanto, para reducir dicha complejidad y duración, es necesario reemplazar los algoritmos de la capa física por técnicas que predican el rendimiento de esta capa basadas en el estado actual del canal y así proporcionar a las capas superiores la métrica de calidad de enlace necesaria y precisa [15]. La utilización de la abstracción de la capa física proporciona beneficios como [15]:

- Baja complejidad y velocidad al sustituir todo el procesamiento de la capa física por cálculos sencillos utilizando búsquedas en tablas.
- Escalabilidad al permitir evaluar grandes sistemas con bastantes nodos.
- Precisión al proporcionar una métrica de calidad de enlace tal y como se obtiene con el procesamiento completo de la capa física.

Dentro de los parámetros de configuración se tiene: arreglo de antenas, PRBs, descritos en la sección 2.3.1, y tipo de tráfico, para este se tienen las siguientes opciones [16]:

- Máquina A Máquina (M2M, *Machine To Machine*). M2M permite que dispositivos de bajo consumo que requieren bajas tasas de datos, se comuniquen con poca o ninguna intervención humana.
- Paquetes Pequeños con Tasa de Bit Constante (SCBR, *Small-packets Constant Bit Rate*). Tipo de tráfico con paquetes de 32 bytes y tiempo medio entre llegada de paquetes de 1000 ms.
- Paquetes Medianos con CBR (MCBR, *Medium-packets Constant Bit Rate*). Tipo de tráfico con paquetes de 64 bytes y tiempo medio entre llegada de paquetes de 500 ms.
- Paquetes Grandes con CBR (BCBR, *Big-packets Constant Bit Rate*). Tipo de tráfico con paquetes de 128 bytes y tiempo medio entre llegada de paquetes de 100 ms.

De acuerdo a las características de este componente se plantea un proceso para la ejecución de una emulación mediante un diagrama de flujo, el cual se despliega en la Figura 2. 11.

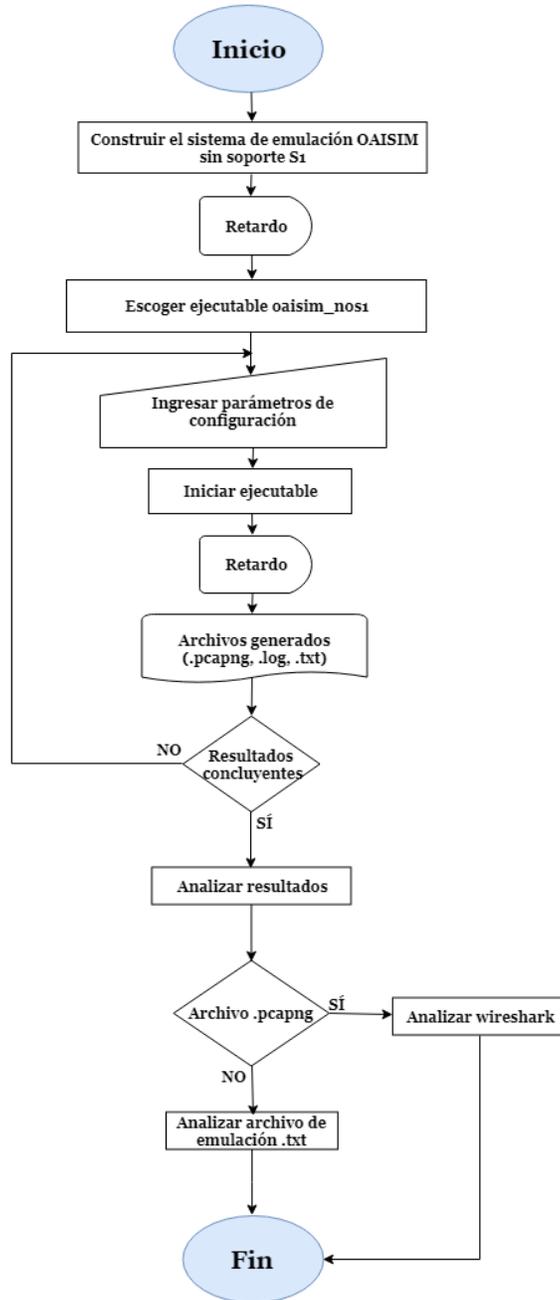


Figura 2. 11. Diagrama de flujo para escenario sin interfaz S1. Por los autores.

Para los escenarios en los que la emulación de la red LTE tiene soporte para la interfaz S1, es decir, que involucra las conexiones del eNB con el UE y con el EPC, se tienen dos posibilidades, realizar la emulación sobre un mismo equipo y sobre diferentes equipos. Dichas opciones se muestran en la Figura 2. 12.

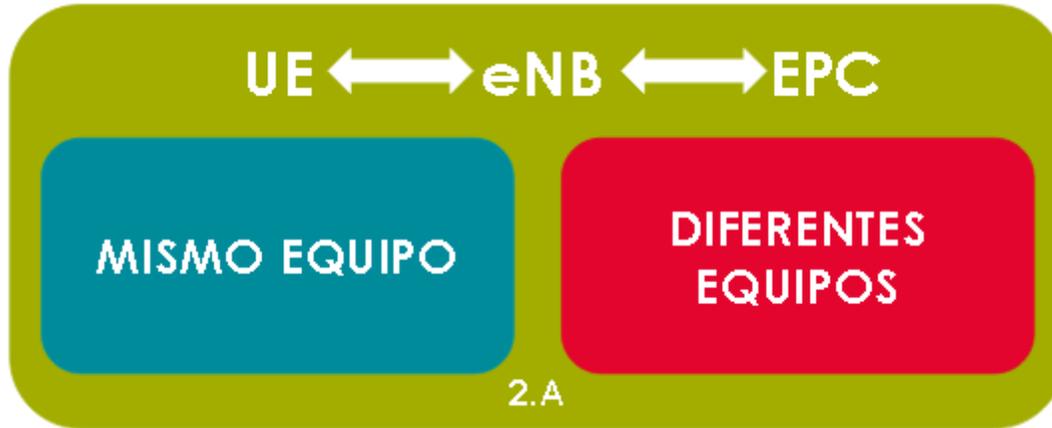


Figura 2. 12. Despliegue para conexión con EPC. Por los autores.

El escenario sobre un mismo equipo se caracteriza por la utilización de interfaces diferentes a las físicas, como las virtuales, el rango de *loopback* y las interfaces punto a punto para la comunicación entre las entidades del EPC, y de éste con el eNB.

En la Figura 2. 13 se muestra un escenario implementado sobre un mismo equipo, en el que se tiene una interfaz física con dirección IP privada, designada para la salida hacia internet, además, se utiliza una interfaz virtual y una de *loopback* para la conexión entre el eNB y el EPC. La interfaz S11 no se especifica, ya que para la implementación sobre un mismo equipo no cuenta con soporte para esta interfaz, por lo que la MME, SGW y PGW se ejecutan juntas.

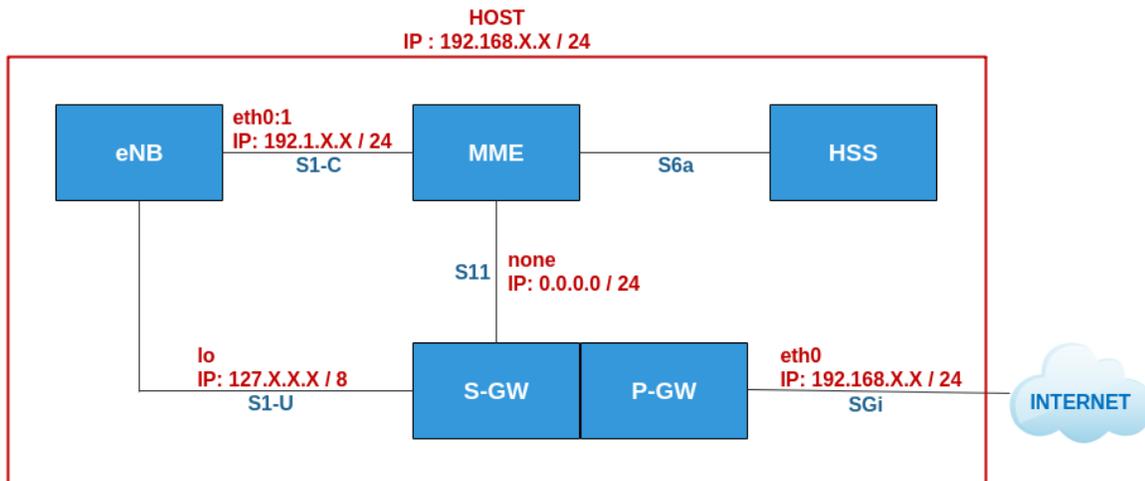


Figura 2. 13. Escenario con S1 sobre un mismo equipo. Por los autores.

En la Figura 2. 14 se muestra el diagrama de flujo planteado para este escenario.

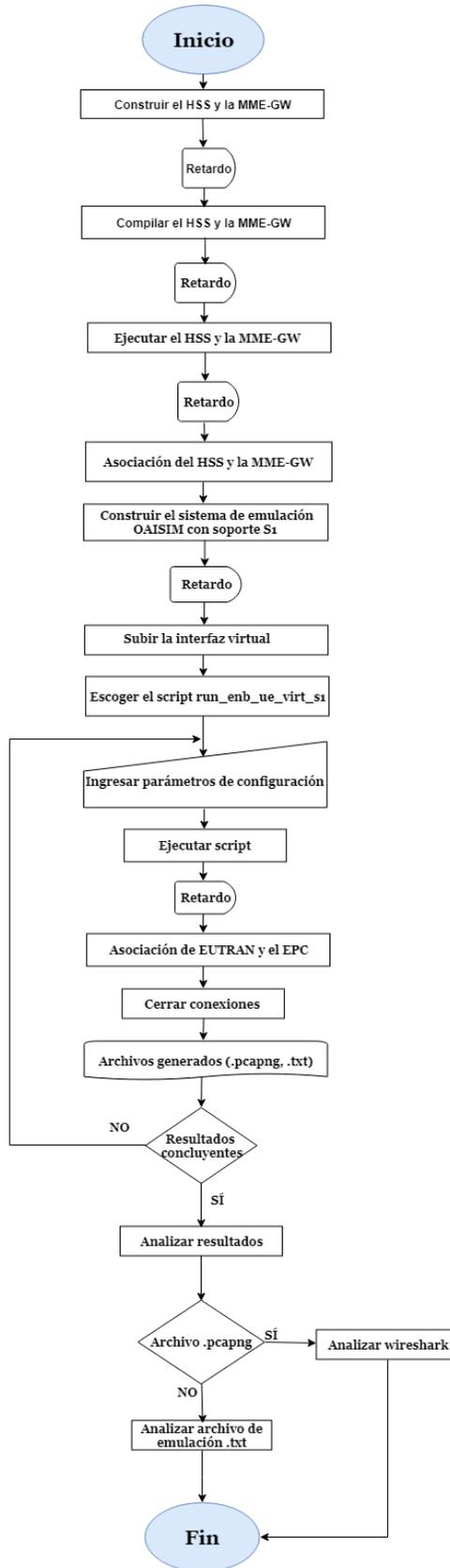


Figura 2. 14. Diagrama de flujo para escenario sobre una misma máquina. Por los autores.

Para la ejecución sobre diferentes equipos se debe contar con dos *hosts*, en uno se implementa el EPC, y en el otro se emula la conexión entre un eNB y un UE. En este escenario se utilizan interfaces virtuales o el rango de *loopback* para comunicar las entidades del EPC, pero a diferencia del anterior escenario, para la conexión entre el EPC y el eNB es necesario la utilización de las interfaces físicas de los equipos.

La Figura 2. 15 representa un escenario sobre distintos equipos. Cada host tiene una interfaz física con dirección IP privada, estas direcciones IP se asignan para la conexión de las interfaces S1-C y S1-U. Además, se deben asignar direcciones virtuales para la interfaz S11, ya que en este caso se ejecuta la MME separada de la SGW y PGW.

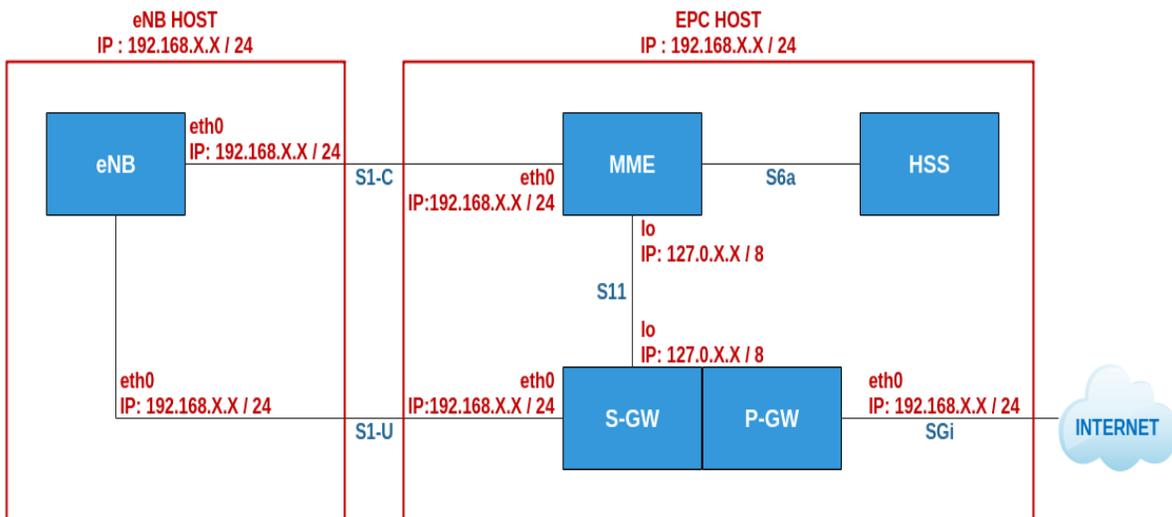


Figura 2. 15. Escenario con S1 sobre diferentes equipos. Por los autores.

Como se observa en la Figura 2. 13 y Figura 2. 15, para la implementación de los dos escenarios, no se tiene en cuenta las interfaces S5 y S8, ya que de acuerdo a la estructura que maneja OAI en sus repositorios, las dos pasarelas (S-GW y P-GW) se gestionan mediante un mismo módulo funcional o ejecutable denominado SPGW.

Basándose en las características, mencionadas anteriormente, se estructura un diagrama de flujo para la implementación de este escenario, el cual se muestra en la Figura 2. 16.

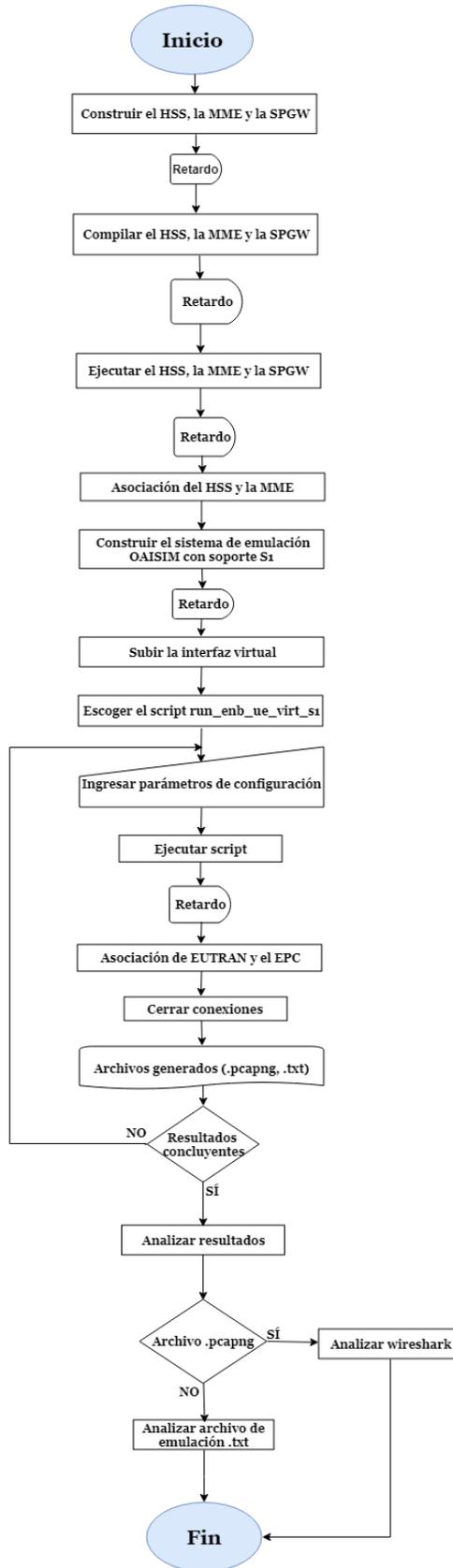


Figura 2. 16. Diagrama de flujo para S1 sobre diferentes máquinas. Por los autores.

2.3.3. Experimentación con plataformas de RF

Este componente del laboratorio tiene como propósito trabajar con dispositivos *hardware*, con los cuales se pueda implementar una red LTE. El manejo de dichos dispositivos es lo que adiciona este componente frente a los anteriores, ya que en aquellos se trabaja a nivel de simulación y emulación, y en este se incorpora el manejo de señales reales.

Para el planteamiento de un escenario que involucre plataformas de RF, se realiza de acuerdo a los ambientes que se pueden desplegar con OAI, mencionados en la sección 0, de los cuales se descartan: primero, aquellos que involucran eNBs y EPCs comerciales por cuestión de costos, y segundo, los que involucran UE comerciales, ya que se requieren *simcards* reprogramables. De esta manera, el entorno que es posible desplegar es:

- OAI UE ↔ OAI eNB + OAI EPC.

El bloque que se muestra en la Figura 2. 17, correspondiente a la experimentación con plataformas de RF, está conformado por el escenario que se puede desplegar.



Figura 2. 17. Conexiones para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.

De las plataformas de RF descritas en la Tabla 1. 1, puesto que el Departamento de Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca cuenta con USRP-B210, se escoge esta para el despliegue del escenario planteado.

Por otra parte, en la configuración del eNB y UE, es necesario establecer valores a los parámetros más importantes de los archivos de configuración: banda de operación de E-UTRAN, frecuencia portadora en DL, número de PRB y ganancia de antenas. Además, se debe tener en cuenta parámetros como:

- Potencia Recibida de la Señal de Referencia (RSRP, *Reference Signal Received Power*). Mide el promedio de potencia por portadora LTE calculada sobre todas las señales de referencia, es un indicador habitual para expresar la cobertura en 4G, por lo que está ligada con la potencia media en recepción. Este parámetro se halla con la ecuación (4) [17].

$$RSRP [dBm] = RSSI [dBm] - 10 \log_{10} 12 * N_{RB} \quad (4)$$

- Indicador de Intensidad de la Señal Recibida, (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*). Mide la potencia total recibida en la banda teniendo en cuenta interferencia y ruido.
- Calidad de Señal de Referencia Recibida (RSRQ, *Reference Signal Received Quality*). Proporciona una indicación de la calidad de la señal y se define como la relación de la RSRP y el RSSI, como se muestra en la ecuación (5) [17].

$$rsrq = N_{RB} * \frac{rsrp}{rssi} \quad (5)$$

La Figura 2. 18 representa el escenario planteado en este componente.

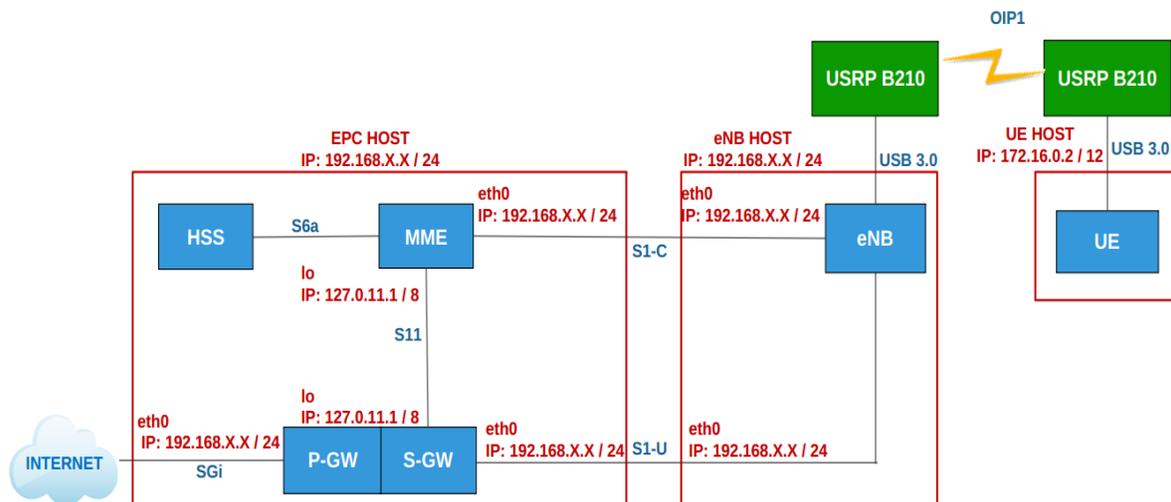


Figura 2. 18. Escenario para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.



Para la utilización de las bandas de E-UTRAN, OAI cuenta con una serie de bandas especificadas en los archivos de configuración, diferenciadas de acuerdo a la Duplexación, frecuencia portadora, rangos de operación en DL y UL, y los anchos de banda con los cuales se pueden manejar, dichas bandas se describen en la Tabla 2. 7.

Tabla 2. 7. Bandas de E-UTRAN soportadas por OAI. Adaptada de: [18].

Banda	Duplexación	Frecuencia portadora [MHz]	Rango de operación DL [MHz]	Rango de operación UL [MHz]	Separación duplex [MHz]	Ancho de banda [MHz]
3	FDD	1805	1805-1880	1710-1785	95	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
4	FDD	2110	2110-2155	1710-1755	400	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
5	FDD	869	869-894	824-849	45	1.4, 3, 5, 10
7	FDD	2620	2620-2690	2500-2570	120	5, 10, 15, 20
13	FDD	746	746-756	777-787	-31	5, 10
38	TDD	2570	2570-2620	2570-2680	N/A	5, 10, 15, 20
39	TDD	1880	1880-1920	1880-1920	N/A	5, 10, 15, 20
40	TDD	2300	2300-2400	2300-2400	N/A	5, 10, 15, 20

Con base al diseño propuesto, se genera un diagrama de flujo, ilustrado en la Figura 2. 19, para el manejo de este escenario.

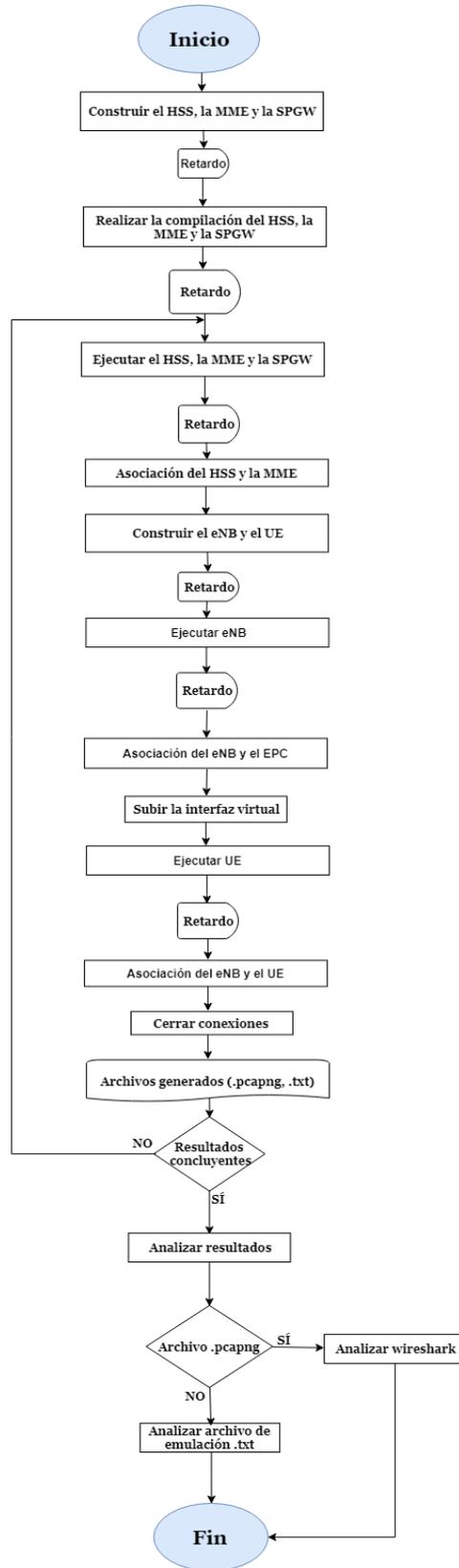


Figura 2. 19. Diagrama de flujo para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.



CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se describe el proceso para la implementación del laboratorio de comunicaciones móviles basado en OAI, de acuerdo a una serie de escenarios planteados para cada componente del laboratorio, además se presentan y analizan los resultados de dichos escenarios con base en los requerimientos establecidos.

Antes de trabajar cualquier componente del laboratorio, es necesario configurar una serie de aspectos en los equipos; los pasos para esta configuración están descritos en el Apéndice A. A continuación, se presenta la implementación y resultados obtenidos en cada uno de los componentes del laboratorio.

3.1. Implementación de canales físicos y de transporte

De acuerdo al diseño planteado en la sección 2.3.1, para la implementación del bloque de canales físicos y de transporte se escoge trabajar con los pares de canales DLSCH/PDSCH y ULSCH/PUSCH, ya que son los encargados de transportar los datos de usuario para el DL y UL respectivamente; para ello se cuenta con dos simuladores, *dlsim* y *ulsim*, los cuales ofrecen un archivo de salida que contiene los resultados de cada simulación. En la Tabla 3. 1 se muestran las opciones para los simuladores seleccionados, las cuales corresponden a los parámetros a variar en las simulaciones.

Tabla 3. 1. Opciones de simulación de canales físicos y de transporte. Por los autores.

Opción	Simulador	
	dlsim	ulsim
-h	Desplegar el menú de opciones.	
-n	Establecer el número de tramas a simular.	
-s	Asignar el valor inicial de SNR.	
-g	Escoger el Modelo de canal (SCM-D, EPA, EVA, ETU).	
-x	Seleccionar el modo de transmisión (1, 2, 5, 6).	
-y	Determinar el número de antenas en el eNB.	
-a	Activa modelo de canal AWGN.	
-m	Selecciona MCS (0 - 28).	
-B	Número de bloques de recursos (6, 25, 50, 100).	
-f	Pasos de simulación de la SNR.	
-z	Número de antenas en el UE (1, 2).	
-q	Número de puertos de antena en el eNB (1, 2).	

De estos parámetros, es necesario fijar valores para el número de tramas y los pasos de la SNR antes de realizar las simulaciones, con el objetivo de visualizar los resultados de manera similar en todas las gráficas. Para definir los valores de estos parámetros se simuló un caso específico para el DL variándolos como se muestra en la Tabla 3. 2.

Tabla 3. 2. Variación de parámetros para visualización de resultados. Por los autores.

Parámetro	Valores
Número de tramas	1000, 2000, 10000
Pasos de SNR	0.2, 1

Como se observa en la Figura 3. 1, al trabajar con pasos simulación de 0,2 dB y un numero de tramas de 1000 o 2000 se obtiene una gráfica con mucho rizado, es decir, si se desea una gráfica suavizada se debe simular con un numero de tramas mayor o igual a 10000.

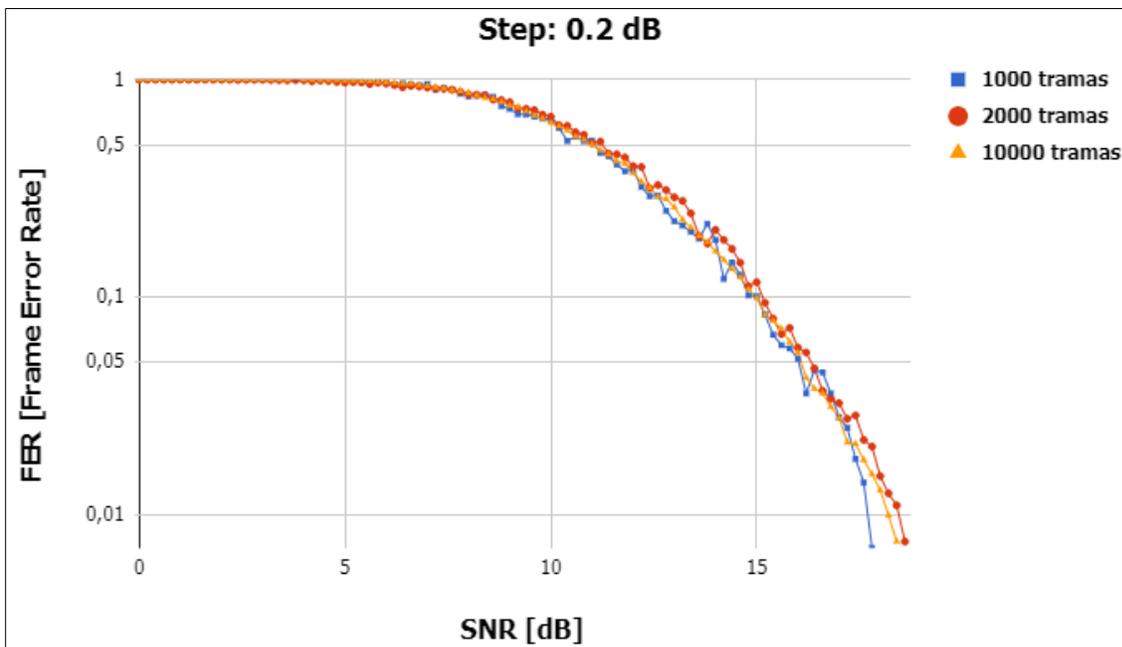


Figura 3. 1. FER vs SNR a pasos de 0.2 dB. Por los autores.

En el caso que se empleen pasos de simulación de 1 dB se nota un comportamiento más general de los resultados, tal como se observa en la Figura 3. 2. Al igual que el caso anterior se obtiene un mejor resultado cuando se trabaja con 10000 tramas, sin embargo, a partir de 2000 tramas se puede obtener una grafica sin tanta fluctuación de la FER.

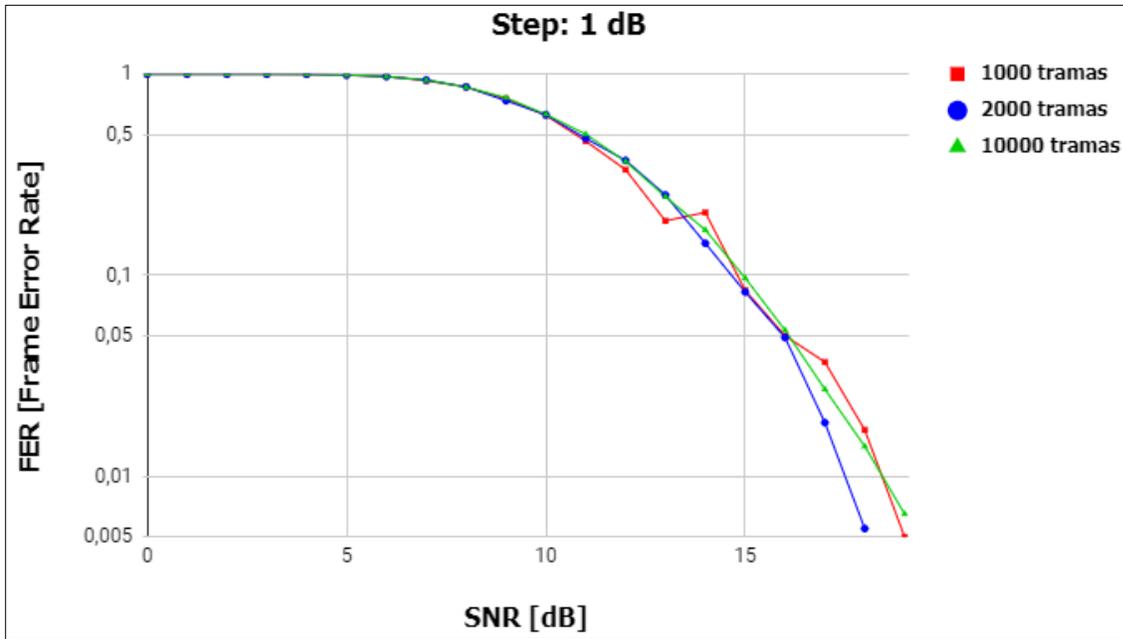


Figura 3. 2. FER vs SNR a pasos de 1 dB. Por los autores.

Los mejores resultados se obtienen cuando se trabaja con un numero de tramas alto, sin embargo, no es muy conveniente cuando se analizan los tiempos de simulación y la carga de la CPU, por esta razón se escoge un número de tramas de 2000 y pasos de simulación de 1 dB.

Con el fin de analizar el efecto que tienen los diferentes parámetros de entrada, mencionados en la Tabla 3. 1, sobre el desempeño de los canales físicos y de transporte, se generan una serie de escenarios tanto para DL como para UL, en ellos se analiza el comportamiento de la FER y/o *throughput* ante la variación del MCS, el arreglo de antenas, el modo de transmisión, el ancho de banda y el modelo de canal. Estos escenarios se presentan en la Tabla 3. 3.

Tabla 3. 3. Escenarios para Canales físicos LTE. Por los autores.

Escenarios	Descripción
1	Variación del MCS tanto en DL como en UL.
2	Uso de diferentes modelos de canal en DL y UL.
3	Utilización de diferentes arreglos de antenas en UL.
4	Manejo de distintos anchos de banda en DL.
5	Variación del modo de transmisión y arreglo de antenas en el desempeño del DL.

Las configuraciones necesarias para el manejo de los simuladores de los canales físicos están descritas en el Apéndice B.

3.2. Resultados de canales físicos y de transporte

Para este bloque, se obtuvieron resultados divididos de acuerdo a los escenarios planteados en la Tabla 3. 3.

- **Escenario 1**

La finalidad de este escenario es evaluar el efecto que produce en la FER y el *throughput* el aumento del MCS. Para el análisis tanto en DL como en UL se fijaron una serie de valores para las simulaciones, los cuales se indican en la Tabla 3. 4.

Tabla 3. 4. Configuración del escenario 1 para DL y UL. Por los autores.

Parámetro	Valor
MCS	0, 9, 12, 16, 22, 28
Modelo de canal	SCM-D
Arreglo de antenas	SISO
Modo de transmisión	1
Ancho de banda [MHz]	5

Con la variación del MCS para el DL, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 3. 3 y la Figura 3. 4.

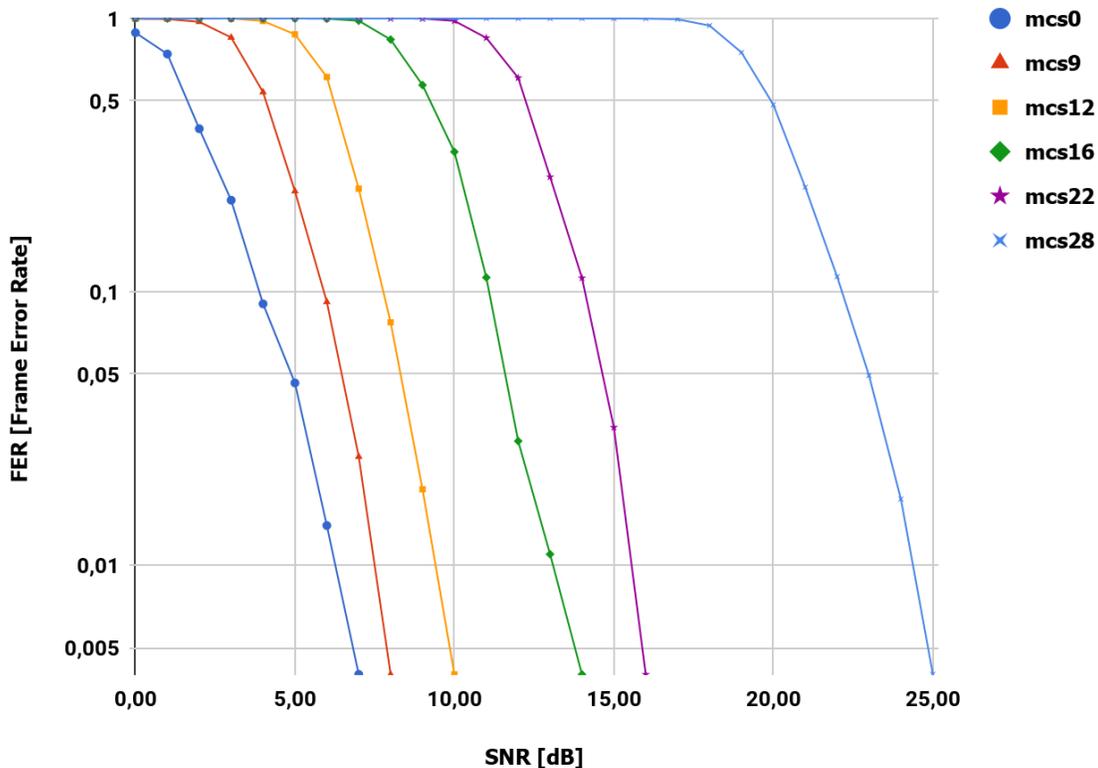


Figura 3. 3. Escenario 1: desempeño en DL. Por los autores.

Se observa que, para conseguir una FER por debajo de 0.005, cuando se trabaja con un MCS de orden de modulación 2 se necesita una SNR por debajo 10 dB, con orden de modulación 4 es necesario una SNR en el rango de 10dB y 15dB; y valores por encima de 15dB son requeridos cuando se trabaja con un MCS de orden de modulación 6.

Con esto se nota que la variación del MCS es directamente proporcional al valor de la SNR necesaria para tener un buen desempeño en el enlace, ya que mientras mayor sea el índice del MCS mayor será la SNR requerida. Esto se debe al orden de modulación que cada uno maneja, dado que un orden de modulación alto tiene mayor probabilidad de error y de generación de interferencia intersimbólica en la transmisión.

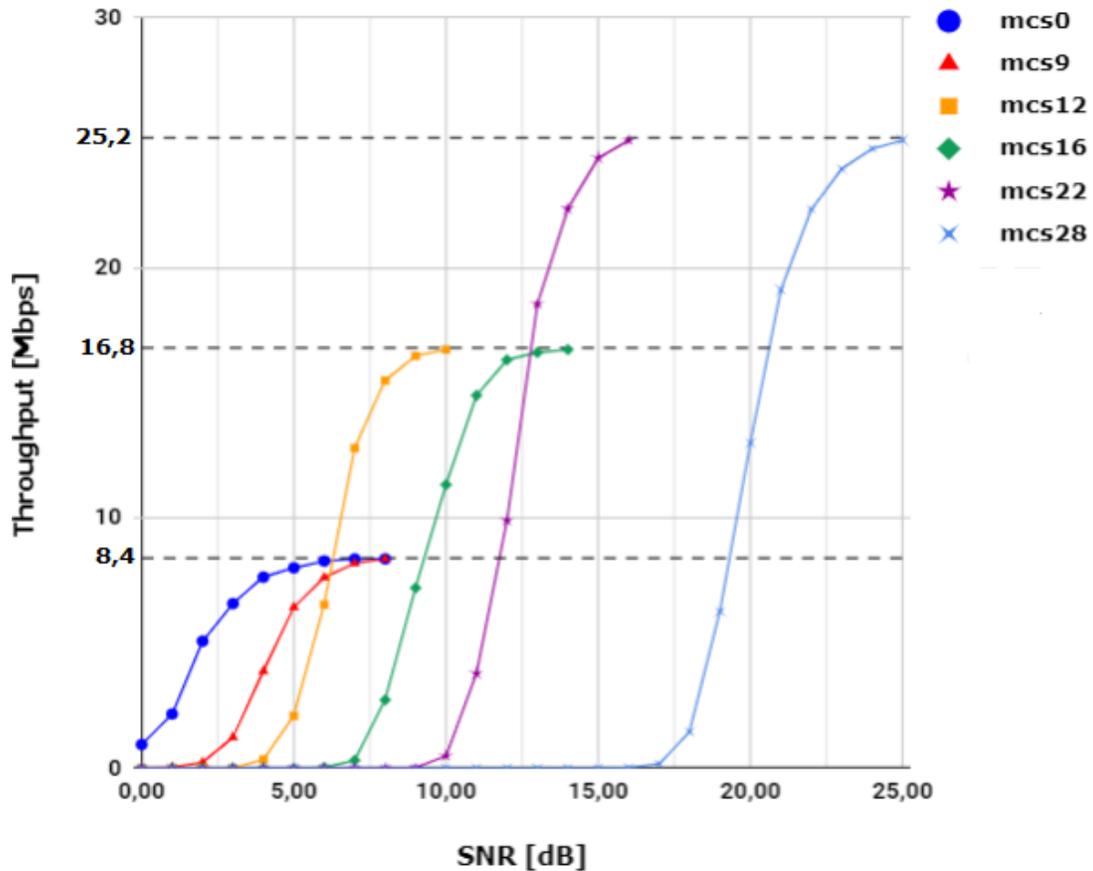


Figura 3. 4. Escenario 1: throughput en DL. Por los autores.

En cuanto al *throughput*, tal como se observa en la Figura 3. 4. Las capacidades máximas son 8,4 16,8 y 25,2 Mbps para orden de modulación 2, 4 y 6 respectivamente. Los MCSs más bajos se acercan a su capacidad máxima primero que los demás, sin embargo, cuando se aumenta el orden de modulación se obtiene

una mayor capacidad si la SNR es mayor a 13 dB. Con orden de modulación 2 ocurre esto antes de los 10 dB, mientras que con orden de modulación 4 y 6 sucede en los rangos de 10 a 15 dB y 15 a 25 dB respectivamente.

La diferencia entre las capacidades máximas que se alcanzan con cada orden de modulación se debe a que, al trabajar con más niveles de modulación, mayor será el número de bit que se envíen por símbolo, y por lo tanto se enviarán más bits por cada trama.

De igual manera, para el UL se obtuvieron los resultados ilustrados en la Figura 3.5.

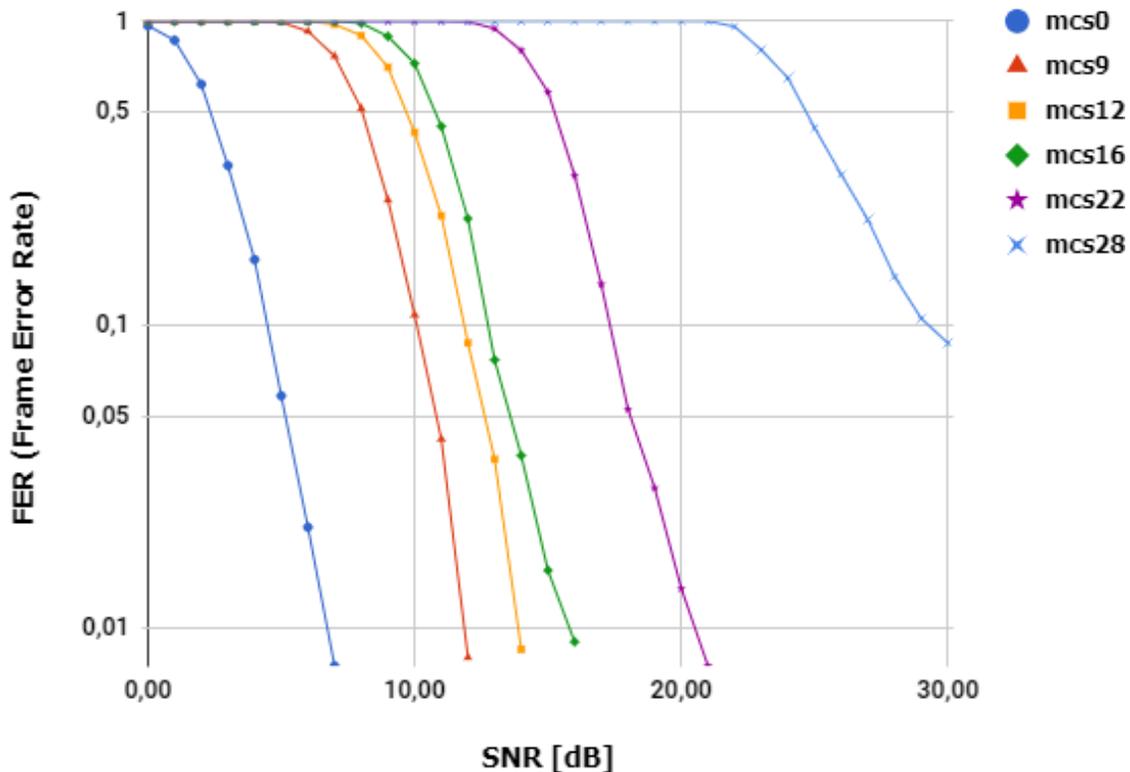


Figura 3.5. Escenario 1: desempeño en UL. Por los autores.

Al igual que en el DL, mientras mayor sea el orden de modulación del MCS, mayor es el valor de la SNR requerida para una FER determinada. Además, al comparar el desempeño de los dos enlaces, al utilizar un mismo índice de MCS se necesita una SNR menor en el DL para conseguir una FER determinada. Por ejemplo, para alcanzar la FER objetivo de 0,05 con MCS 22, en DL se requiere una SNR entre 14 y 15 dB, mientras en UL es necesaria una SNR de 19 dB.

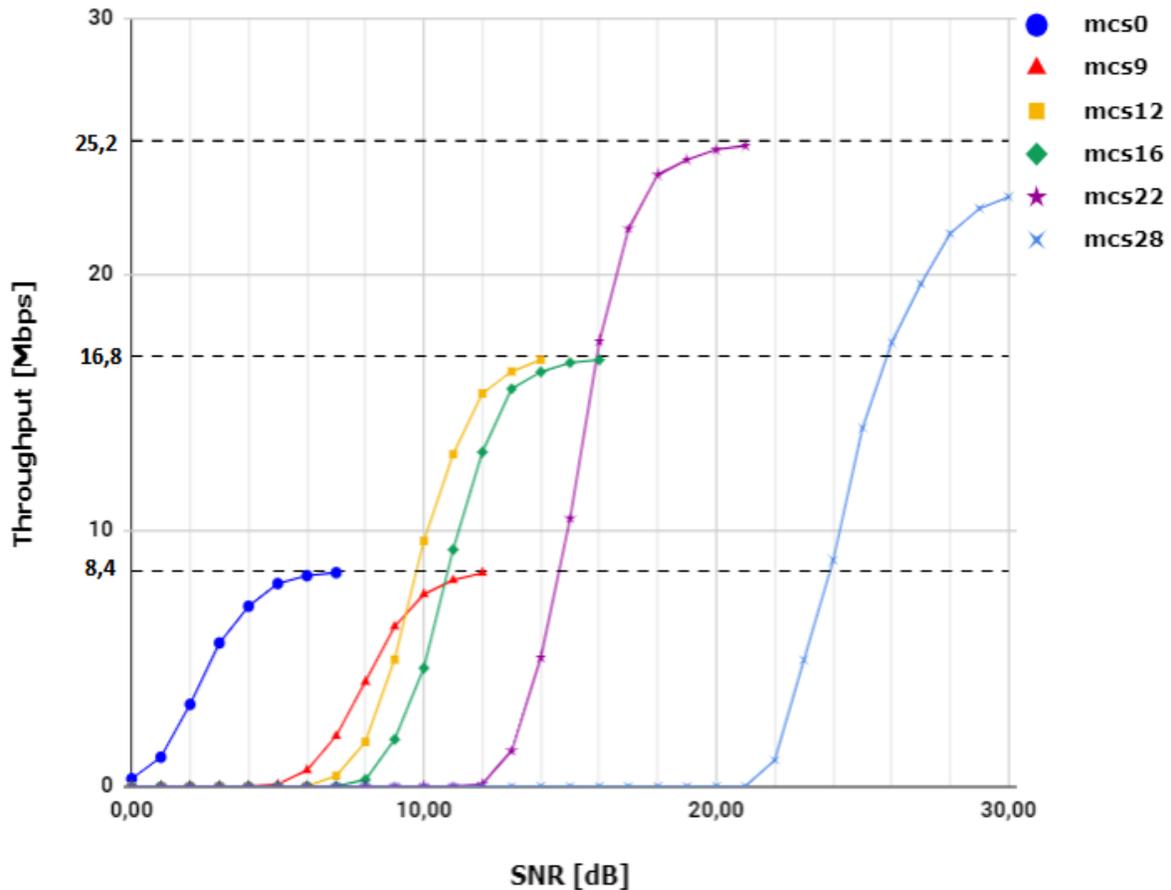


Figura 3. 6. Escenario 1: throughput en UL. Por los autores.

En la Figura 3. 6 se puede observar que el UL tiene un comportamiento similar al DL, los MCSs más bajos se aproximan a su capacidad máxima primero, pero mientras mayor sea el orden de modulación se alcanza un *throughput* más alto cuando la SNR es mayor a 15 dB.

A diferencia del DL, para acercarse a la capacidad máxima en UL, aumenta la SNR requerida: con orden de modulación 2 y 4 sucede entre 7 y 12 dB y entre 14 y 16 dB respectivamente, así mismo, con MCS 22 ocurre con 21 dB, mientras que con MCS28 y 30 dB no alcanza a suceder.

- **Escenario 2**

El propósito de este escenario es analizar el desempeño del DL y el UL comparando diferentes modelos de canal. En la Tabla 3. 5 se indican los parámetros con los que se realizó la simulación.

Tabla 3. 5. Configuración del escenario 2. Por los autores.

Parámetro	Valor	
	DL	UL
MCS	28	16
Modelo de canal	SCM-D, EPA, EVA, ETU, AWGN	SCM-D, EPA, EVA, ETU, AWGN
Arreglo de antenas	MISO	SISO
Modo de transmisión	2	1
Ancho de banda [MHz]	5	5

En cuanto al DL, a excepción del AWGN, que tiene el mejor desempeño por ser un modelo de canal ideal, el que mejor desempeño tiene cuando se trabaja con una SNR de hasta 30, es el SCM-D llegando a obtener una FER por debajo de 0.01, siendo los modelos de tipo extendido los de peor desempeño, el EPA llega a perder poco más del 5% de las tramas enviadas, con el EVA se pierde más del 10%, y con el ETU, se logran enviar pocas tramas con éxito. Estos resultados se ilustran en la Figura 3. 7.

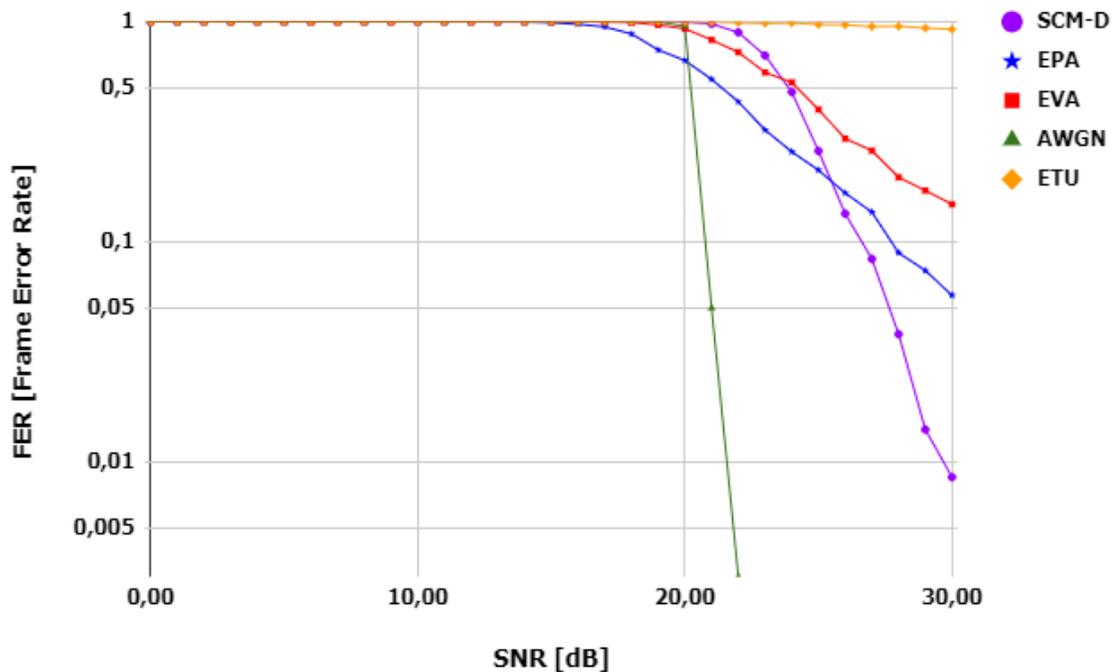


Figura 3. 7. Escenario 2: desempeño en DL. Por los autores.

Con los parámetros correspondientes al UL, se obtuvieron los resultados plasmados en la Figura 3. 8. Al igual que en DL, los modelos de canal de tipo extendidos son los de peor desempeño, siendo el SCM-D, después del AWGN, el que presenta los mejores resultados.

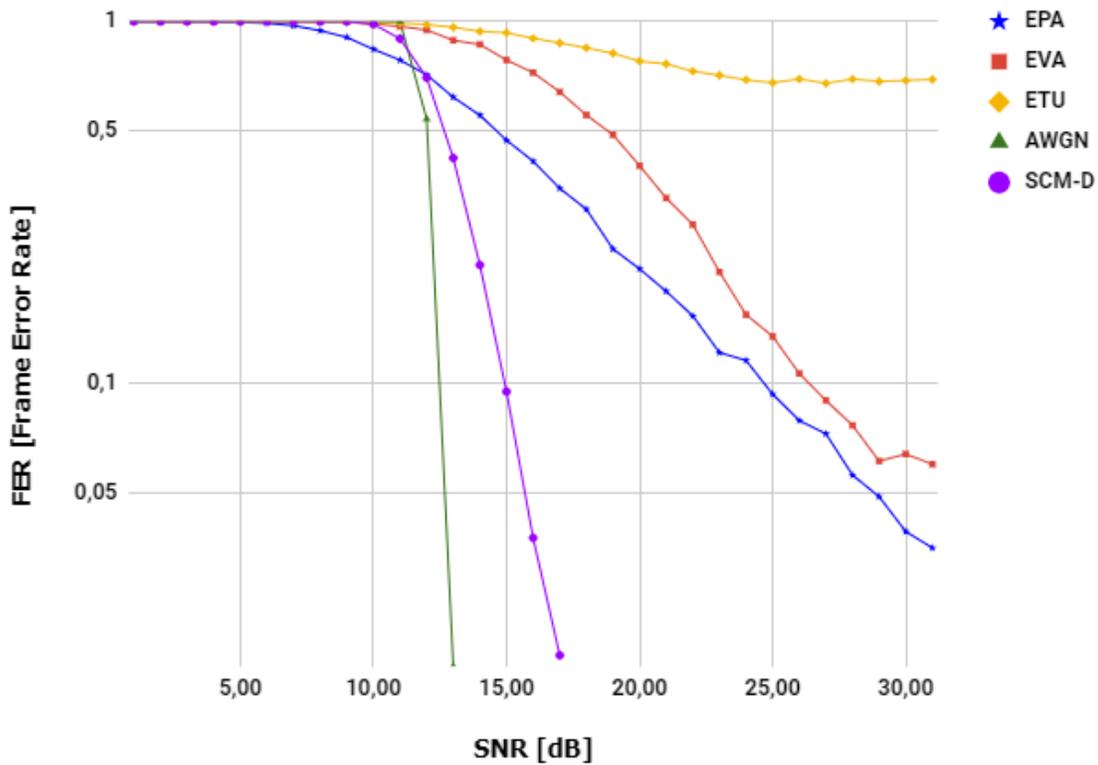


Figura 3. 8. Escenario 2: desempeño en UL. Por los autores.

En los dos enlaces, los peores comportamientos se obtienen con los modelos de canal de tipo extendidos de la ITU, esto debido a los retardos, la velocidad máxima y corrimiento Doppler máximo que cada uno maneja: el EPA trabaja con valores de retardos de hasta 410 ns, velocidad máxima de 3 Km/h y corrimiento Doppler máximo de 5 Hz; el EVA maneja valores de 2510 ns, 5 Km/h y 70 Hz; y el ETU lo hace con 5000 ns, 90 Km/h y 300 Hz. Por eso, este último evidencia el peor comportamiento tanto en DL como en UL.

- **Escenario 3**

El objetivo de este escenario es analizar el efecto que produce en el desempeño del UL los distintos tipos de arreglos de antenas. La Tabla 3. 6 indica los parámetros con los cuales se simuló este escenario.

Tabla 3. 6. Configuración del escenario 3. Por los autores.

Parámetro	Valor
MCS	9
Modelo de canal	EVA
Arreglo de antenas	SISO, SIMO
Modo de transmisión	1
Ancho de banda [MHz]	5

El arreglo SIMO presenta un mejor desempeño que el arreglo SISO, obteniendo una FER por debajo de 0.01 con una SNR por debajo de 12 dB, punto en el cual el arreglo SISO pierde más del 40% de las tramas enviadas. Además, para la FER objetivo de 0.05, hay más de 6 dB de diferencia, puesto que el arreglo SIMO la alcanza un poco por encima de 10 dB, mientras que el arreglo SISO la consigue aproximadamente con 17 dB. Los resultados mencionados se muestran en la Figura 3. 9.

Los resultados anteriores se deben a que el arreglo SIMO, al utilizar diversidad en recepción tiene ventajas frente al arreglo SISO, ya que al ser una versión parcial de MIMO tiende a tener mejoras en cuanto a capacidad y tasas de datos a pesar de tener un procesamiento más complejo.

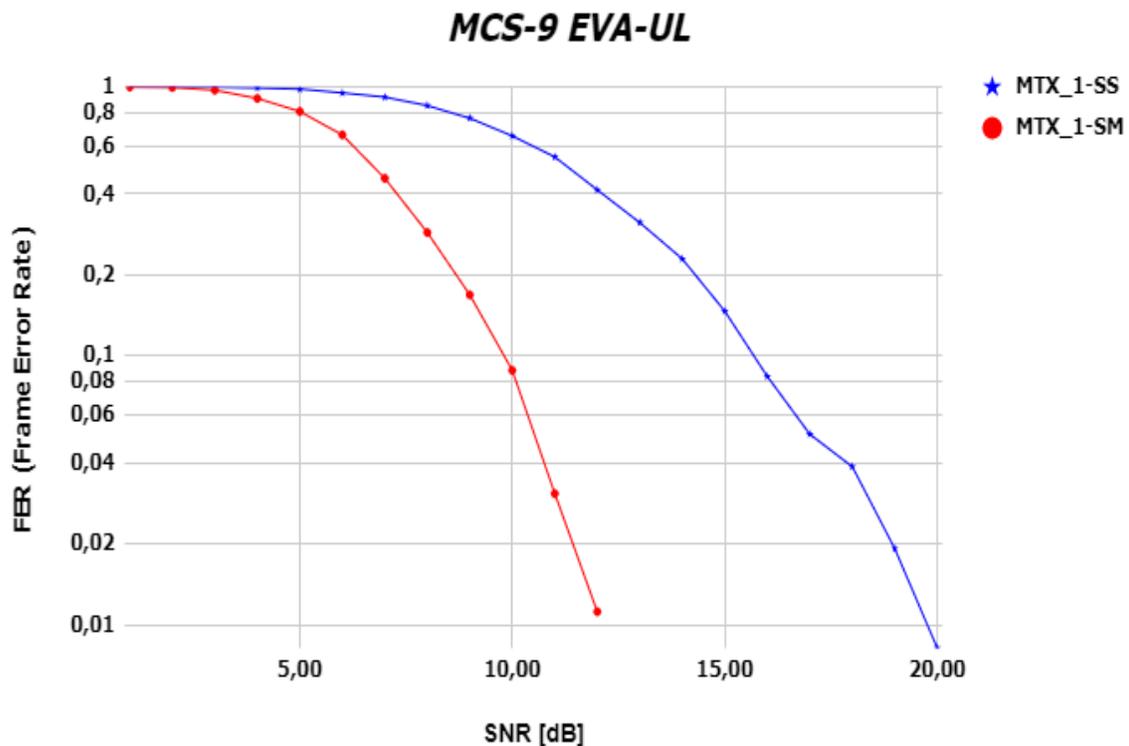


Figura 3. 9. Escenario 3: desempeño en UL. Por los autores.

- **Escenario 4**

En este escenario se analiza el desempeño del DL ante diferentes anchos de banda, variando los PRBs que se pueden asignar en cada ancho de banda. En la Tabla 3. 7 se indican los valores de los parámetros de simulación.

Tabla 3. 7. Configuración del escenario 4. Por los autores.

Parámetro	Valor
MCS	9
Modelo de canal	EVA
Arreglo de antenas	MISO
Modo de transmisión	2
Número de bloques de recursos	6, 25, 50,100

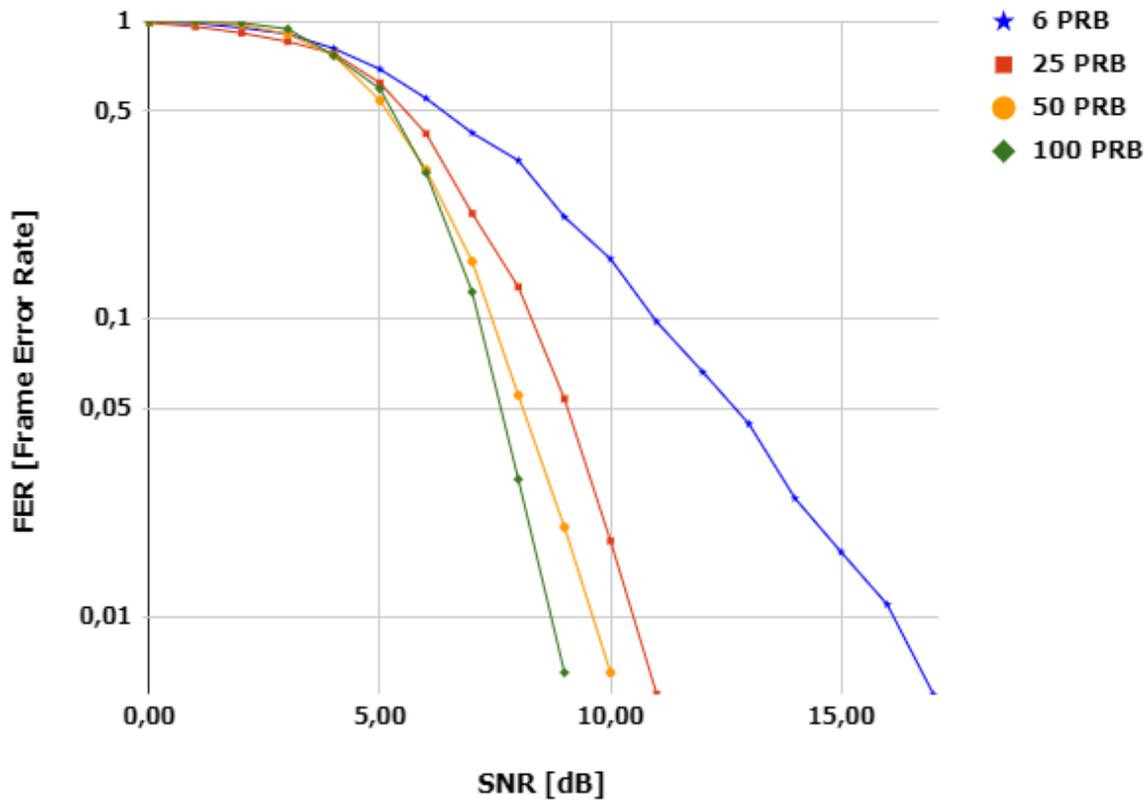


Figura 3. 10. Escenario 4: desempeño en DL. Por los autores.

En la Figura 3. 10 se observa que el peor desempeño se logra con una asignación de 6 PRB, ya que se necesita un valor de SNR por encima de 15 dB para alcanzar una FER de 10^{-2} en contraste con la asignación de 100 PBR, la cual logra el mejor desempeño ya que necesita un valor por debajo de los 10 dB para conseguir el mismo valor de FER. Asimismo, para lograr este valor de FER, las asignaciones de 25 y 50 PRB necesitan un valor cercano a los 11 dB. De este modo, mientras mayor sea el número de PRBs que se asignan al enlace, menor va a ser la SNR requerida para alcanzar la FER objetivo de 0.05.

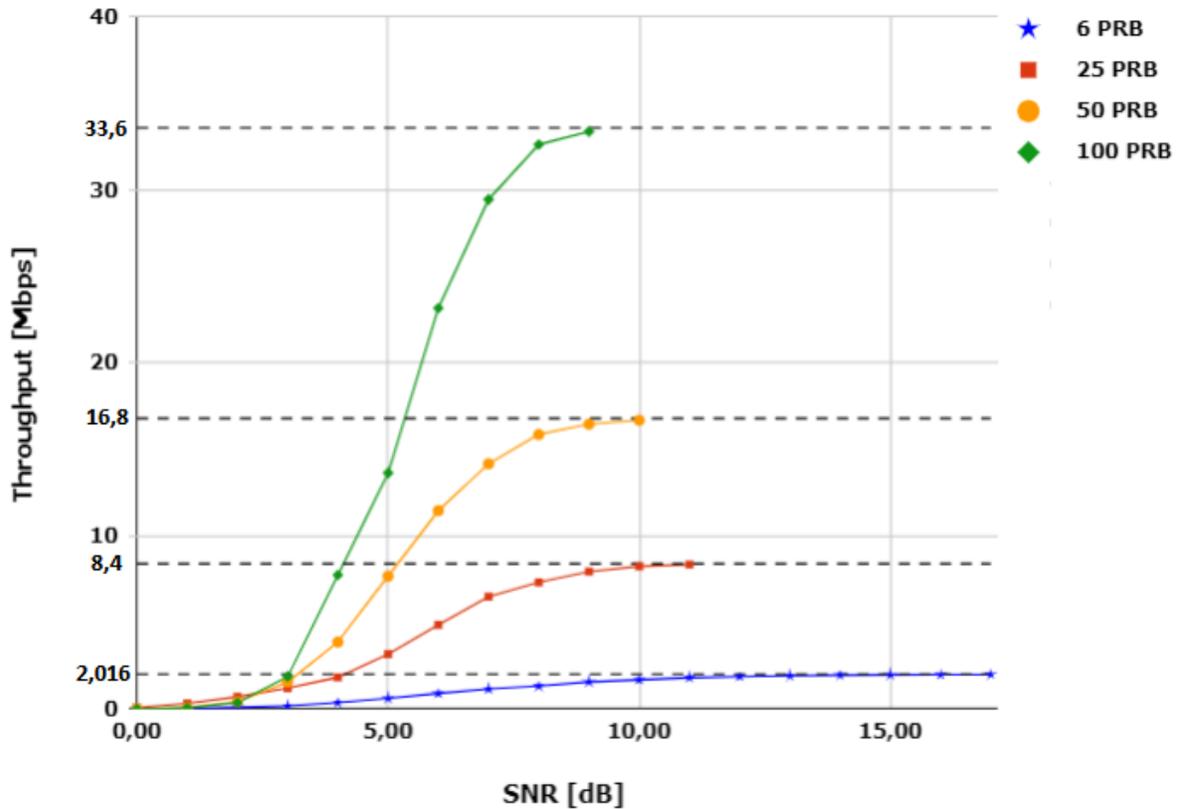


Figura 3. 11. Escenario 4: throughput. Por los autores.

Tal como se observa en la Figura 3. 11, cuando se trabaja con 100 PRBs se alcanza el mayor *throughput*, cercano a 33,6 Mbps, con la SNR más baja, 9 dB. A medida que se disminuye el tamaño del PRB se obtiene un *throughput* más bajo con SNR más alta, 16,8 Mbps con 10 dB y 8,4 Mbps con 11 dB para 50 y 25 PRBs respectivamente. El peor caso se presenta cuando se trabaja con 6 PRBs, el cual alcanza cerca de 2,016 Mbps con 17 dB.

Los valores de *throughput* se diferencian debido a que, si se asigna una mayor cantidad de PRBs a determinado enlace, se enviará un número mayor de bits por subtrama, por esta razón, los valores más altos se alcanzan con un valor de 100 PRBs, y a medida que se va disminuyendo los PRBs asignados, también lo hace el valor del *throughput*, hasta el punto de alcanzar las tasas de datos más bajas con una asignación de 6 PRBs.

- **Escenario 5**

En este escenario se analiza el desempeño del DL ante diferentes arreglos de antenas y modos de transmisión, para ello se escogieron una serie de parámetros de entrada mostrados en la Tabla 3. 8.

Tabla 3. 8. Configuración del escenario 5. Por los autores.

Parámetro	Valor
MCS	9, 16, 28
Modelo de canal	SCM-D
Arreglo de antenas	SISO, SIMO, MISO, MIMO
Modo de transmisión	1, 2, 5, 6
Ancho de banda [MHz]	5 MHz

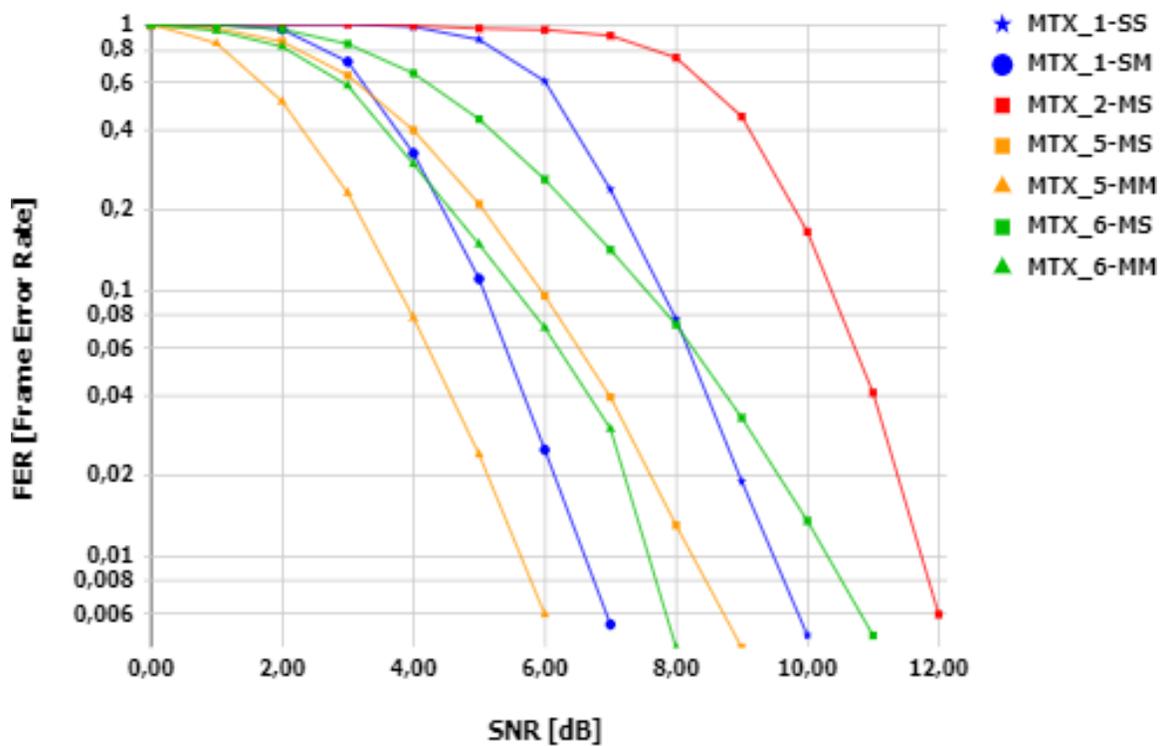


Figura 3. 12. Escenario 5: desempeño con MCS-9. Por los autores.

En la Figura 3. 12 se puede observar que las configuraciones con diversidad en recepción son las que tienen un mejor desempeño, ya que requieren un valor de SNR menor a 8 dB, las configuraciones MISO presentan un buen desempeño con los modos de transmisión 5 y 6 ya que para obtener una FER de 0.006 necesitaron una SNR de 9 y 11 dB respectivamente, en comparación al modo de transmisión 2 que requiere una SNR de 12 dB para obtener el mismo valor de FER; la configuración SISO y modo de transmisión 1 necesita una SNR de 10 dB para obtener el mismo valor de FER.

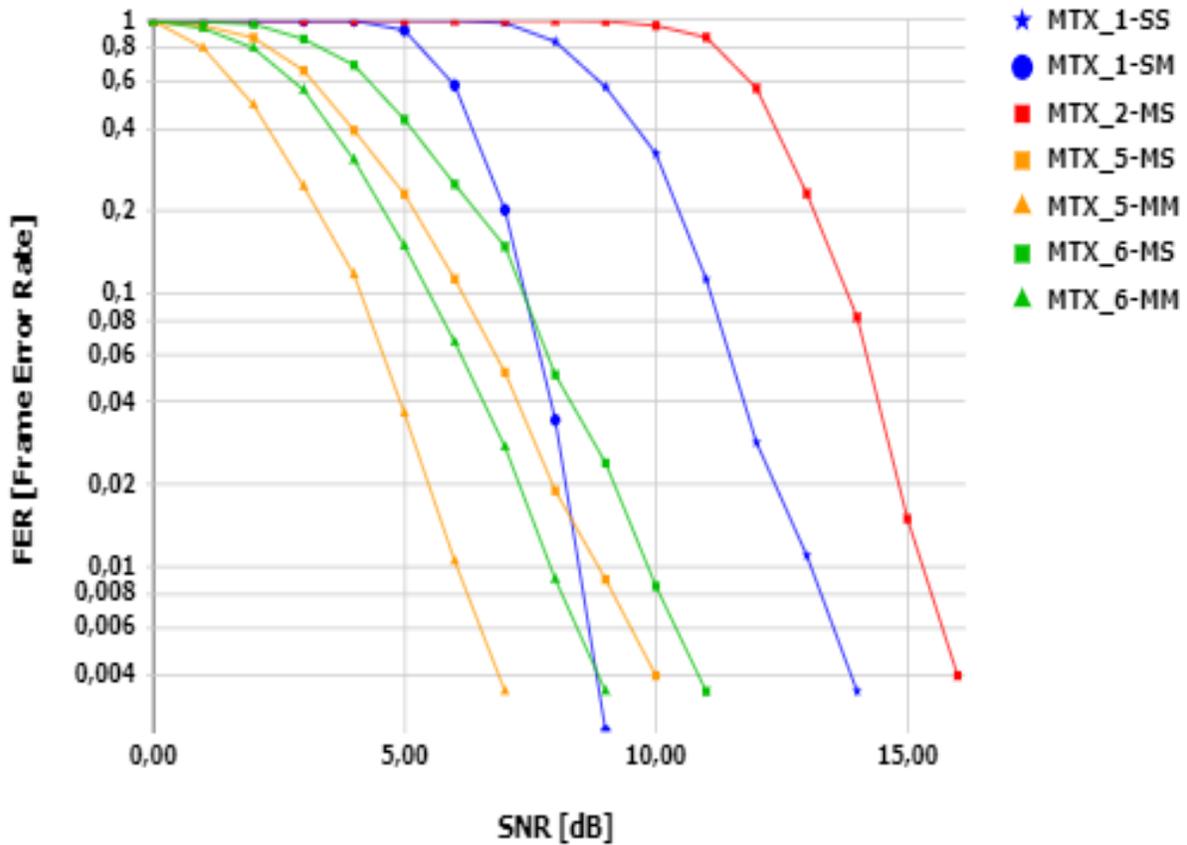


Figura 3. 13. Escenario 5: desempeño con MCS-16. Por los autores.

En la Figura 3. 13 se observa que las configuraciones MIMO presentan el mejor desempeño, ya que con estas se obtiene un valor de FER por debajo de 0.004 con valores de SNR menores a 8 dB, las siguientes configuraciones son los arreglos MISO para los modos 5 y 6 y SIMO para el modo de transmisión 1, se puede observar que para valores de SNR menores a 6 dB la configuración MISO con los modos de transmisión 5 y 6 presenta un mejor desempeño que el arreglo SIMO, pero para valores de SNR superiores a 8 dB el desempeño de la configuración SIMO es un poco mejor a los MISO necesitando una SNR menor para obtener una FER de 0.004.

Las configuraciones con peor desempeño fueron el arreglo SISO con modo de transmisión 1 y el arreglo MISO con modo de transmisión 2, las cuales necesitaron un valor de SNR aproximado de 13dB y 15 dB respectivamente para obtener una FER de 0.004.

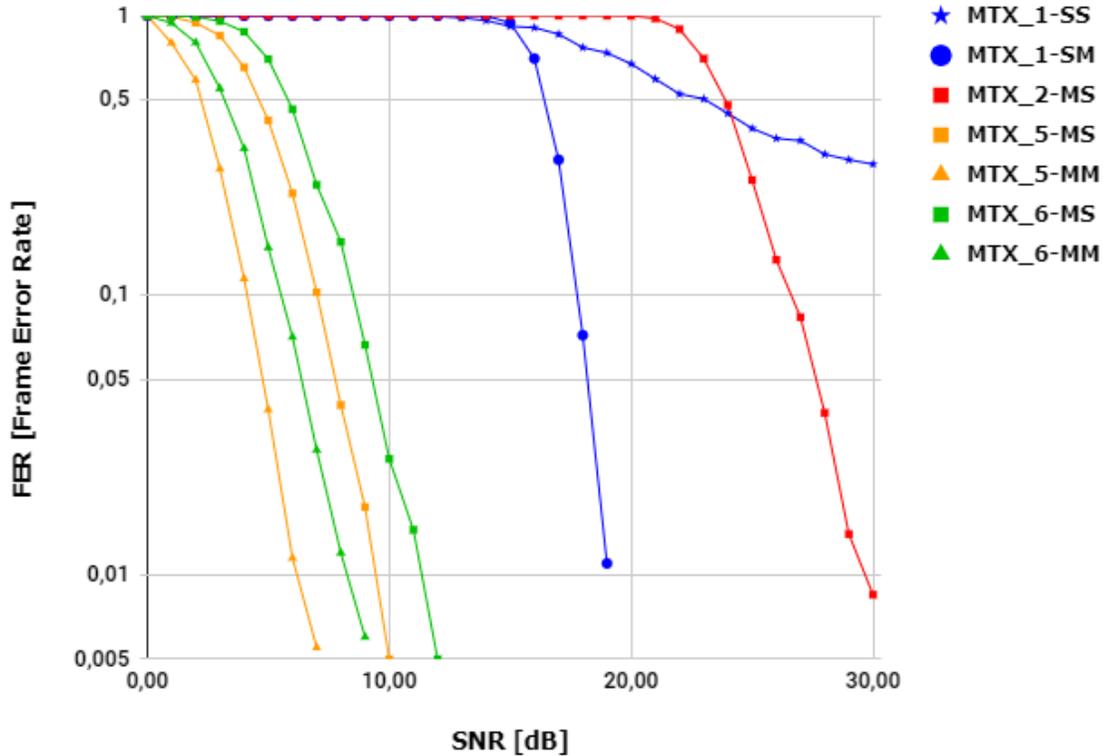


Figura 3. 14. Escenario 5: desempeño con MCS-28. Por los autores.

En la Figura 3. 14 se puede observar que las configuraciones MIMO son las que presentan mejor desempeño, ya que se obtiene un valor de FER de 0.005 para valores de SNR menores a 10 dB, la siguiente configuración con mejor desempeño es el arreglo MISO para los modos de transmisión 5 y 6 en los cuales se obtienen los mismos valores de FER pero con SNR menor a 15 dB; el modo de transmisión 2 requiere de una SNR de 30 dB para alcanzar el mismo valor de SNR y el modo de transmisión 1 presentó dos variantes ya que con un arreglo SIMO se necesita de una SNR menor a 20 dB para alcanzar el valor de FER de 0,01 y con un arreglo SISO se pierde cerca del 35% de las tramas enviadas.

Los resultados del escenario 5 se deben a que al utilizar arreglos MIMO las señales sobre las antenas transmisoras y receptoras se combinan en una forma que permiten mejorar la calidad en términos de la FER y la velocidad de los datos en comparación a los arreglos SISO con los mismos valores de SNR.

3.3. Implementación y resultados de análisis de protocolos y tráfico LTE

La implementación de este componente se realiza de acuerdo al diseño propuesto en la sección 2.3.2, diferenciando los escenarios de acuerdo a la utilización o no de la interfaz S1.



3.3.1. Implementación de escenarios sin interfaz S1

Dado que en estos escenarios se emula una red LTE sin tener en cuenta el EPC, se implementa el eNB y el UE sobre un PC, con el fin de analizar el tráfico de usuario mediante la herramienta *wireshark* y el desempeño en DL y UL de acuerdo a los tráficos descritos en la sección 2.3.2.

Para la implementación se cuenta con un ejecutable denominado *oaisim_nos1*, el cual cuenta con una serie de opciones, descritas en Tabla 3. 9, para ejecutar la emulación. Dichas opciones corresponden a los parámetros que se van a variar en cada escenario.

Tabla 3. 9. Opciones para emulación sin interfaz S1. Por los autores.

Opción	Descripción
-h	Menú de ayuda.
-a	Activar modo abstracción.
-A	Establecer el modelo de canal (SCM-D, EPA, EVA, ETU, AWGN).
-F	Activar transmisión FDD.
-n	Establecer número de tramas a enviar.
-O	Archivo de configuración del eNB.
-P	Habilita el analizador de protocolos (<i>wireshark</i> , <i>tshark</i> , <i>pcap</i>).
-R	Asignar número de bloques de recursos (25, 50, 100).
-T	Activa el generador de tráfico M2M, SCBR, MCBR, BCBR.

Los escenarios planteados para el análisis de protocolos UDP y tráfico entre el eNB y el UE, se presentan en la Tabla 3. 10.

Tabla 3. 10. Escenarios para emulación sin interfaz S1. Por los autores.

Escenario	Descripción
1	Comparación de tiempo de ejecución con y sin abstracción.
2	Desempeño en DL y UL con diferentes tipos de tráfico.
3	Análisis de protocolos UDP.

Todas las configuraciones necesarias para la ejecución de esta parte se encuentran descritas en el Apéndice C.

3.3.2. Resultados de escenarios sin interfaz S1

Para este componente, los resultados obtenidos se dividen de acuerdo a los escenarios planteados en la Tabla 3. 10.

- **Escenario 1**

Este escenario tiene como objetivo emular y analizar el desempeño de la red, comparando el tiempo de ejecución al implementar los dos manejos de la capa física, descritos en la sección 2.3.2. La Tabla 3. 11 muestra los parámetros seleccionados para la ejecución del escenario.

Tabla 3. 11. Variación de parámetros para escenario 1. Por los autores.

Parámetro	Valor
Tipo de trama	FDD
Modelo de canal	EPA
Arreglo de antenas	SISO, SIMO, MISO, MIMO
Modo de transmisión	2
Tipo de tráfico	M2M
Ancho de banda [MHz]	5 MHz

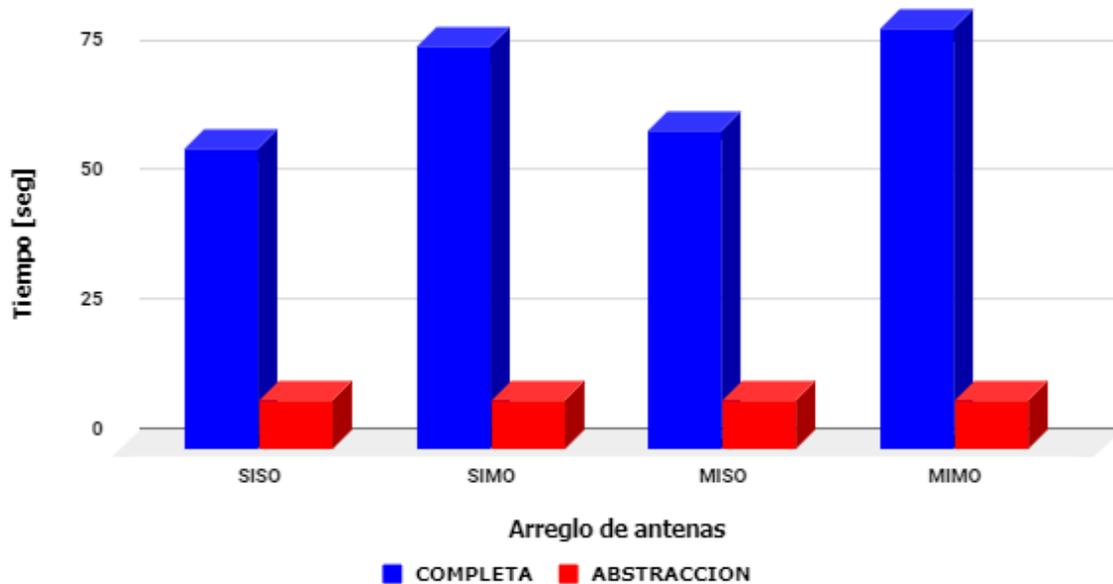


Figura 3. 15. Tiempos de ejecución de la capa física completa y modo abstracción. Por los autores.

En la Figura 3. 15 se puede observar que independientemente del arreglo de antenas que se utilice, cuando se implementa abstracción de la capa física se tiene un tiempo total de ejecución cercano a los 10 segundos, mientras en la implementación completa los tiempos de ejecución son superiores y varían de acuerdo al arreglo de antenas. El arreglo SISO gastó cerca de 58 segundos para realizar la emulación en comparación al modo MIMO que necesitó cerca de 81

segundos; en cuanto a los modos con diversidad se tiene un tiempo de 77 segundos para SIMO y 61 segundos para MISO. Cabe resaltar que se envían la misma cantidad de paquetes en todos los casos emulados en este escenario.

- **Escenario 2**

El objetivo de este escenario es analizar el desempeño tanto en DL como en UL ante diferentes tipos de tráfico y anchos de banda, la configuración para este escenario se muestra en la Tabla 3. 12.

Tabla 3. 12. Variación de parámetros para escenario 2. Por los autores.

Parámetro	Valor
Tipo de trama	FDD
Modelo de canal	EPA
Arreglo de antenas	MIMO
Modo de transmisión	2
PRBs	25, 50, 100
Tipo de tráfico	M2M, SCBR, MCBR, BCBR

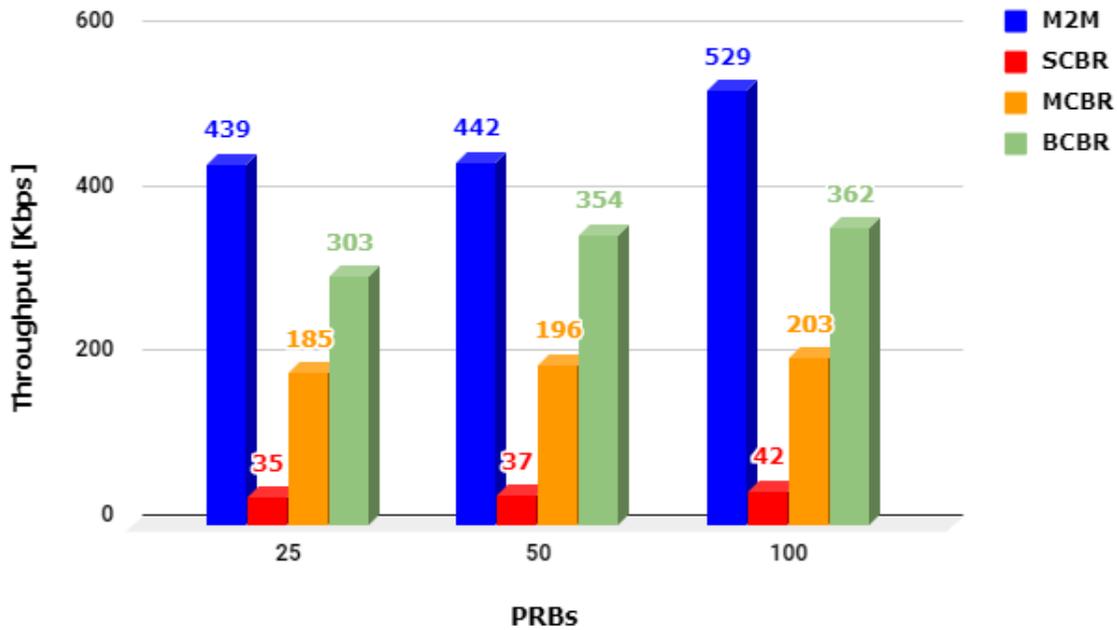


Figura 3. 16. Desempeño en DL con diferentes tipos de tráfico. Por los autores.

En la Figura 3. 16 se observa una tendencia, independiente del tipo de tráfico que se escoja, al tener valores de *throughput* mayores a medida que se aumentan los PRBs. Además, con los tres valores de PRB, se evidencia un mejor desempeño cuando se utiliza un tráfico M2M, seguido del BCBR y el MCBR respectivamente. Asimismo, se nota el peor desempeño cuando el tráfico es SCBR.

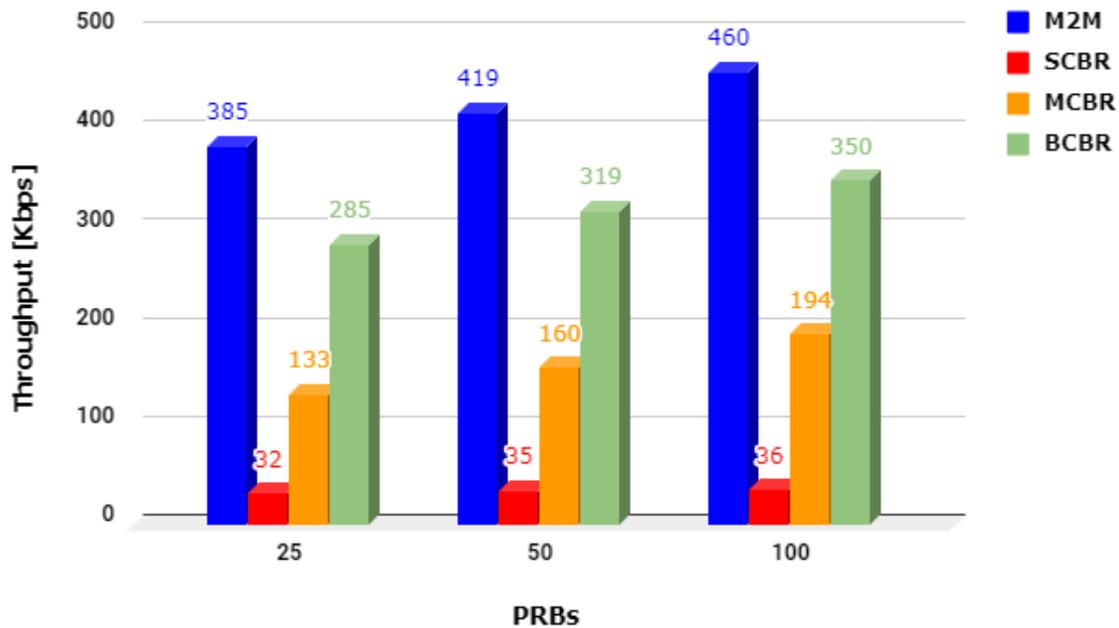


Figura 3. 17. Desempeño en UL con diferentes tipos de tráfico. Por los autores.

Como se observa en la Figura 3. 17, el UL tiene un comportamiento similar al DL. El tráfico M2M obtiene los valores de *throughput* más altos, seguido del BCBR; mientras que el MCBR obtienen un mejor resultado solo en comparación con el SCBR, el cual presenta el peor desempeño. Asimismo, con todos los tipos de tráfico se tiene una mejora en el desempeño del enlace cuando se aumenta el valor del PRB.

Tanto para DL como para UL, se esperaría que el tráfico M2M se comporte de manera similar al SCBR, ya que el tamaño de paquetes que maneja es pequeño, sin embargo, de acuerdo a las características de este tráfico, se consideran muchos paquetes pequeños, que en conjunto se manejan como un paquete de tamaño grande. Por otra parte, se evidencian los valores de *throughput* más bajos con el manejo de paquetes pequeños debido a que, si bien tienen menos probabilidades de error respecto al manejo de paquetes grandes, en la emulación se considera una condición de canal cuya probabilidad de pérdida de paquetes, independiente del tamaño de estos, es baja.

- **Escenario 3**

Este escenario tiene como finalidad, analizar por medio de *wireshark* los diferentes tipos de mensajes enviados entre eNB y UE, así como los protocolos usados en la emulación, para el desarrollo de este escenario se configuraron los parámetros mostrados en la Tabla 3. 13.



Tabla 3. 13. Parámetros para escenario 3 sin interfaz S1. Por los autores.

Parámetro	Valor
Tipo de trama	FDD
Modelo de canal	EPA
Arreglo de antenas	SISO
Modo de transmisión	2
Tipo de tráfico	M2M
Ancho de banda [MHz]	5

Se observa el envío de la SI por parte del eNB al UE mediante los mensajes de Bloque de Información Maestra (MIB, *Master Information Block*), Bloque de Información del Sistema (SIB, *System Information Block*) 1, SIB2 y SIB3, los cuales llevan parámetros para que el UE acceda a la red, estos mensajes se envían mediante el protocolo RRC. Este tráfico se muestra en la Figura 3. 18.

Source	Destination	Protocol	Info
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformation [SIB2 SIB3]
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=1)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=2)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=2)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformation [SIB2 SIB3]
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformation [SIB2 SIB3]

Figura 3. 18. Inicio de emulación. Por los autores.

En seguida se procede a realizar las respuestas de acceso aleatorio y el procedimiento de petición para la conexión RRC por parte del UE para el establecimiento de la conexión con el eNB. Luego, se realiza la configuración de la conexión RRC y el envío de paquetes mediante el protocolo RLC, los cuales especifican qué modo RLC se está implementando.

Posteriormente, se muestra una notificación indicando que la configuración de la conexión RRC se ha completado, a su vez se realiza la petición para la vinculación del usuario. En la Figura 3. 19 se presenta este tráfico.



Source	Destination	Protocol	Info
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	RAR (RA-RNTI=1, SFN=10 , SF=5) (RAPID=24: TA=0, UL-Grant=13644, Tem
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	RAR (RA-RNTI=2, SFN=10 , SF=4) (RAPID=24: TA=0, UL-Grant=13644, Tem
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_CCCH	RRCConnectionRequest
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=2)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_CCCH	RRCConnectionRequest
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=3)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	DL-SCH: (SFN=12 , SF=5) UEId=0 (UE Contention Resolution Identity) (CC
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_CCCH	RRCConnectionSetup
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=3)
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[UL][AM] SRB:1 [DATA] sn=0 [2-bytes..
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[UL][AM] SRB:1 [DATA] sn=0 [2-bytes..
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[UL][AM] SRB:1 [DATA] sn=1 ..4-bytes..
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH/NAS-EPS	RRCConnectionSetupComplete, Attach request, PDN connectivity request

Figura 3. 19. Éxito de conexión RRC. Por los autores.

Una vez se completa la configuración de la conexión RRC se evidencia un intercambio de tráfico mediante el protocolo RLC, se envía información de control en el DL y datos de usuario en el UL. Este envío de información se muestra en la Figura 3. 20.

Source	Destination	Protocol	Info
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=3) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=3)
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=4) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=5) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[UL][AM] SRB:1 [DATA] (P) sn=2 ..57-bytes]
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[DL][AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=1
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=3) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=7) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=4) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=8) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=5) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=9) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[UL][AM] SRB:1 [DATA] sn=1 ..4-bytes..
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[DL][AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=1
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=14 , SF=7) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[DL][AM] SRB:1 [DATA] sn=0 [7-bytes..

Figura 3. 20. Envío de datos. Por los autores.

En la Figura 3. 21 se evidencia el envío de una petición de seguridad por medio del DL-DCCH obteniendo la respuesta del UL-DCCH indicando que se ha completado esta petición.



Source	Destination	Protocol	Info
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_DCCH	SecurityModeCommand
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=3)
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[DL][AM] SRB:1 [DATA] sn=0 [7-bytes..
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[DL][AM] SRB:1 [DATA] (P) sn=1 ..1-byte]
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=15 , SF=6) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	MAC-LTE	UL-SCH: (SFN=15 , SF=7) UEId=0 (Long BSR) (Padding:remainder)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=4)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH	[UL][AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=2 , SecurityModeComplete
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=4)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformation [SIB2 SIB3]
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformation [SIB2 SIB3]
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH	[UL][AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=2 , SecurityModeComplete

Figura 3. 21. Petición de seguridad. Por los autores.

En la Figura 3. 22 se evidencia la siguiente petición que se realiza, la de la capacidad del UE, enviada por medio del DL-DCCH y obteniendo su respectiva respuesta por parte del UL-DCCH.

Source	Destination	Protocol	Info
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_DCCH	UECapabilityEnquiry
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=4)
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[DL][AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=4
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[DL][AM] SRB:1 [DATA] sn=2 [7-bytes..
127.0.0.1	127.0.0.1	RLC-LTE	[DL][AM] SRB:1 [DATA] (P) sn=3 ..1-byte]
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC DL_SCH	SystemInformationBlockType1
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC BCCH_BCH	MasterInformationBlock (SFN=4)
127.0.0.1	127.0.0.1	LTE RRC UL_DCCH	[UL][AM] SRB:1 [CONTROL] ACK_SN=4 , UECapabilityInformation

Figura 3. 22. Petición de capacidad de UE. Por los autores,

A Lo largo de todo el tráfico capturado, se envían constantemente mensajes MIB, SIB1, SIB2 y SIB3, indicando al usuario las características del sistema, además, gran porcentaje del tráfico es de control.

3.3.3. Implementación de escenario con interfaz S1 sobre el mismo equipo

Para la implementación de este escenario, a diferencia de los anteriores, se cuenta con las entidades del EPC, teniendo como propósito emular una red LTE en un PC y analizar el tráfico de control entre las entidades emuladas, además de la conexión del UE a la red. Para este escenario se deben fijar las direcciones por las cuales se conectan las entidades de red, estas se muestran en la Tabla 3. 14.

La emulación se ejecuta en cuatro partes: la ejecución del HSS, el funcionamiento de las otras entidades del EPC, la ejecución de E-UTRAN y UE y por último, el cierre de las conexiones.



**Tabla 3. 14. Configuración de interfaces para escenario con interfaz S1 en el mismo equipo.
Por los autores.**

Interfaz	Entidad	Nombre	Dirección IP	Tipo
S1-C	MME	eth0:1	192.170.0.10	Ethernet (Virtual)
	eNB	eth0:3	192.170.0.20	
S1-U	SPGW	eth0:2	192.170.1.10	
	eNB	eth0:4	192.170.1.20	
U _u	UE	oip1	192.188.0.2	Virtual
S6a	MME	lo	127.0.1.1	Loopback
	HSS	lo	127.0.0.1	
SGi	SPGW	eth0	192.168.x.x	Ethernet

En el Apéndice D se describen las configuraciones necesarias para este escenario.

3.3.4. Resultados de escenario con interfaz S1 sobre el mismo equipo

Debido a que en la emulación del sistema sin la interfaz S1 se analizó el tráfico UDP de la interfaz radio, en este escenario se analizan los protocolos empleados por las entidades ejecutadas: HSS, MME y eNB.

Los resultados para este escenario se presentan de acuerdo a las partes de ejecución planteadas en la sección anterior.

- **Ejecución del HSS.**

La Figura 3. 23 ilustra el momento en que se ejecuta el *script* correspondiente al HSS, el primer procedimiento que se realiza es el establecimiento de una conexión TCP entre dos puertos de la interfaz de *loopback*: el 51066 que es escogido por el HSS y el 3306, el cual está asignado para el sistema de gestión de bases de datos. Este proceso se realiza mediante un reconocimiento de 3 vías conocido como **three-way handshake**:

- **Mensaje 1 (51066 -> 3306):** solicitud para establecer conexión TCP mediante la bandera SYN y ajuste de secuencia X.
- **Mensaje 2 (3306 -> 51066):** respuesta a la solicitud de establecimiento de conexión mediante la bandera SYN con ajuste de secuencia Y, además, la bandera ACK con número X+1.
- **Mensaje 3 (51066 -> 3306):** acuse de recibo por medio de la bandera ACK con número Y+1, asimismo, con secuencia X+1.



Luego se procede a ingresar al servidor mediante el protocolo MySQL con el usuario (root) e indicando la base de datos a la que se desea ingresar (oai_db) obteniendo un “*Response OK*”; tanto el usuario como la base de datos se especificaron en el archivo de configuración. Se puede observar que luego de cada procedimiento se envía un ACK entre los dos puertos notificando el éxito del procedimiento.

SOURCE	DESTINATI	PROTOCC	INFO
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [SYN] Seq=0 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=2421321 TSecr=0 WS=128
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	3306 → 51066 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=2421321 TSecr=
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=43776 Len=0 TSval=2421321 TSecr=2421321
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Server Greeting proto=10 version=5.5.60-0ubuntu0.14.04.1
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [ACK] Seq=1 Ack=96 Win=43776 Len=0 TSval=2421322 TSecr=2421322
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Login Request user=root db=oai_db
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	3306 → 51066 [ACK] Seq=96 Ack=92 Win=43776 Len=0 TSval=2421323 TSecr=2421323
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK

Figura 3. 23. Inicio de conexión entre el HSS y la base de datos. Por los autores

Luego del ingreso al servidor, se envía una primera solicitud de consulta (Request Query) para seleccionar parámetros como “IMSI”, “Key” y “OPc” de los usuarios que se encuentran registrados en la base de datos. Posteriormente se procede a actualizar el OpC de cada uno de los usuarios con el fin de refrescar el contenido de la base de datos. Las peticiones y actualizaciones se observan en la Figura 3. 24.

SOURCE	DESTINATI	PROTOCC	INFO
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { SELECT `imsi`,`key`,`OPc` FROM `users` }
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [ACK] Seq=143 Ack=2335 Win=174720 Len=0 TSval=2421324 TSecr=2421324
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('5e9ca44baceef288d5d846655ff97e0') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('4c8b2a5cba949bb117815eddf95df620') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `OPc`=UNHEX('e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c') WHERE `users`.`i
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK

Figura 3. 24. Actualización de base de datos. Por los autores.

Finalmente, como se ilustra en la Figura 3. 25, se solicita el establecimiento de la conexión TCP entre los puertos 43136 y 3870, correspondientes al HSS y la MME respectivamente. Puesto que el puerto 3870 no está abierto, porque no se ha puesto en funcionamiento el EPC, se envía una respuesta indicando que se debe reiniciar la conexión.



SOURCE	DESTINATI	PROTOCC	INFO
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43136 → 3870 [SYN] Seq=0 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=2421947 TSecr=0 WS=128
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43136 [RST, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=0 Len=0

Figura 3. 25. Intento de conexión entre HSS y MME. Por los autores.

Desde este momento el HSS permanece en un estado cerrado (STATE CLOSED) como se observa en la Figura 3. 26, hasta el momento en que el puerto 3870 esté en estado “abierto” para iniciar de nuevo el proceso de establecimiento de la conexión TCP.

```
07/31/18,19:12:40.402594 DBG adrian.openair4G.eur: Connecting...
07/31/18,19:12:40.402611 DBG 'STATE_CLOSED' -> 'STATE_WAITCNXACK' 'adrian.openair4G.eur'
07/31/18,19:12:40.402917 DBG Core state: 2 -> 3
Initializing s6a layer: DONE
07/31/18,19:12:40.403130 DBG Prepared 1 sets of connection parameters to peer adrian.openair4G.eur
07/31/18,19:12:40.403155 DBG Connecting to TCP 127.0.1.1(3870)...
07/31/18,19:12:40.403294 DBG TCP connection to 127.0.1.1(3870) failed: Connection refused
07/31/18,19:12:40.403318 DBG Connection to 'adrian.openair4G.eur' failed: All connection attempts failed, will retry later
07/31/18,19:12:40.403367 DBG 'STATE_WAITCNXACK' -> 'STATE_CLOSED' 'adrian.openair4G.eur'
```

Figura 3. 26. Estado inicial del HSS. Por los autores.

- **Conexión entre EPC y HSS**

Cuando se ejecuta el SCRIPT correspondiente al EPC se inicia el proceso para establecer la conexión TCP por parte del HSS, el cual es muy similar al mencionado en la ejecución del HSS, realizado mediante los primeros tres mensajes “**three-way handshake**”, en este caso los puertos involucrados son el 43138 escogido por el HSS, y el 3870 correspondiente a la MME.

En seguida se envía un mensaje por parte del HSS hacia la MME indicando con la bandera PSH (PUSH) que se debe enviar información en cuanto se pueda, y no almacenarla en un buffer, a lo que el EPC notifica el recibido con la bandera ACK; esta secuencia se repite un par de veces.

El anterior intercambio de mensajes se muestra en la Figura 3. 27 y su correspondiente diagrama de secuencia en la Figura 3. 28.

SOURCE	DESTINATI	PROTOCC	INFO
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [SYN] Seq=0 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=2452390 TSecr=0
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=2452391 TSecr=0
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=43776 Len=0 TSval=2452390 TSecr=2452390
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=43776 Len=296 TSval=2452391 TSecr=2452390
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [ACK] Seq=1 Ack=297 Win=44800 Len=0 TSval=2452391 TSecr=2452391
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=297 Win=44800 Len=296 TSval=2452391 TSecr=2452391
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [ACK] Seq=297 Ack=297 Win=44800 Len=0 TSval=2452392 TSecr=2452391

Figura 3. 27. Inicio de conexión y petición de información entre HSS y MME. Por los autores.

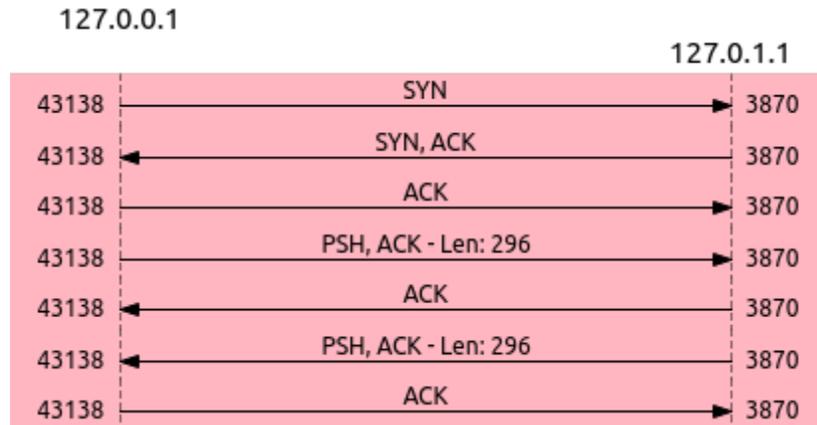


Figura 3. 28. Diagrama de secuencia: Establecimiento de conexión entre HSS y MME. Por los autores.

- **Conexión de E-UTRAN.**

Cuando se decide poner en funcionamiento a E-UTRAN y el UE con el *SCRIPT* correspondiente, se inicia una asociación SCTP que a diferencia de TCP emplea un reconocimiento en 4 vías en los primeros 4 mensajes. En esta asociación el eNB y la MME tienen las direcciones IP 192.170.0.20 y 192.170.0.10 respectivamente:

- **Mensaje 1 (eNB -> MME):** solicitud para establecer asociación SCTP mediante la señal INIT.
- **Mensaje 2 (MME -> eNB):** respuesta a la solicitud mediante la señal INIT_ACK con una cookie de estado que contiene un Código de Autenticación de Mensaje (MAC, *Message Authentication Code*).
- **Mensaje 3 (eNB -> MME):** Envío de respuesta COOKIE_ECHO, la cual es un eco de la cookie de estado recibida.
- **Mensaje 4 (MME -> eNB):** asignación de recursos y envío de COOKIE_ACK como reconocimiento al COOKIE_ECHO recibida, asociación establecida.

En seguida, se realiza la solicitud para la configuración S1 mediante el protocolo S1AP por parte del eNB, recibiendo de la MME un SACK confirmando la solicitud y generando una respuesta para la configuración S1. El eNB envía la confirmación que ha recibido la respuesta y además solicita la conectividad de la PDN y la vinculación para un UE específico por medio de su IMSI (208930100001111); este usuario es el que ha sido establecido en la compilación de la emulación. En la Figura 3. 29 se muestra la lista de mensajes intercambiados y en la Figura 3. 30 se ilustra el proceso mediante el diagrama de secuencia correspondiente.



Source	Destination	Protocol	Info
192.170.0.20	192.170.0.10	SCTP	INIT
192.170.0.10	192.170.0.20	SCTP	INIT_ACK
192.170.0.20	192.170.0.10	SCTP	COOKIE_ECHO
192.170.0.10	192.170.0.20	SCTP	COOKIE_ACK
192.170.0.20	192.170.0.10	S1AP	S1SetupRequest
192.170.0.10	192.170.0.20	SCTP	SACK
192.170.0.10	192.170.0.20	S1AP	S1SetupResponse
192.170.0.20	192.170.0.10	SCTP	SACK
192.170.0.20	192.170.0.10	S1AP/NAS-EPS	InitialUEMessage, Attach request, PDN connectivity request

Figura 3. 29. Conexión entre MME y eNB. Por los autores.

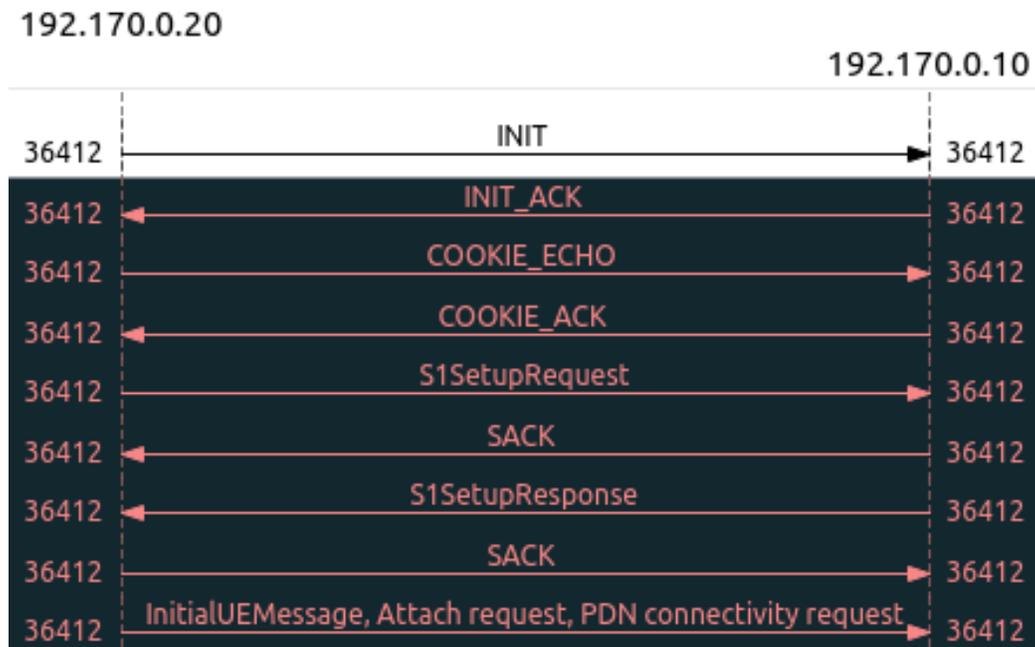


Figura 3. 30. Diagrama de secuencia: Conexión entre MME y eNB. Por los autores.

Como se muestra en la Figura 3. 31, luego se envía un mensaje con la señal PSH del puerto 3870 al puerto 43138 para el envío de la información en cuanto se pueda y obteniendo un ACK como respuesta, además, ya que se conoce el IMSI del usuario que se quiere conectar a la red, se realiza una consulta en la que se piden de este usuario los siguientes parámetros: Key, SQN, Rand y OPc, obteniéndose con éxito de la base de datos.

Asimismo, se establece el valor del parámetro Rand y se actualiza el valor del SQN. Luego de esta serie de peticiones, se vuelve a enviar una señal PSH entre los dos puertos (3870 y 43138)



SOURCE	DESTINATI	PROTOC	INFO
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [PSH, ACK] Seq=297 Ack=297 Win=44800 Len=268 TSval=2467333 TSecr=2452392
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [ACK] Seq=297 Ack=565 Win=45952 Len=0 TSval=2467333 TSecr=2467333
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { SELECT `key`,`sqn`,`rand`,`OPc` FROM `users` WHERE `users`.`imsi`=208930100001111 }
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [ACK] Seq=4408 Ack=4604 Win=179200 Len=0 TSval=2467336 TSecr=2467336
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `rand`=UNHEX('9a2dd92ed91291df5d141dba727212e6'),`sqn`=8407
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { UPDATE `users` SET `sqn` = `sqn` + 32 WHERE `users`.`imsi`=208930100001111 }
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [PSH, ACK] Seq=297 Ack=565 Win=45952 Len=288 TSval=2467340 TSecr=2467333
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [ACK] Seq=4609 Ack=4708 Win=179200 Len=0 TSval=2467380 TSecr=2467340
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [ACK] Seq=565 Ack=585 Win=45952 Len=0 TSval=2467380 TSecr=2467340
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [PSH, ACK] Seq=565 Ack=585 Win=45952 Len=256 TSval=2467544 TSecr=2467340

Figura 3. 31. Actualización de datos de usuario. Por los autores.

En la Figura 3. 32 se presenta el diagrama de secuencia correspondiente a las solicitudes mencionadas.

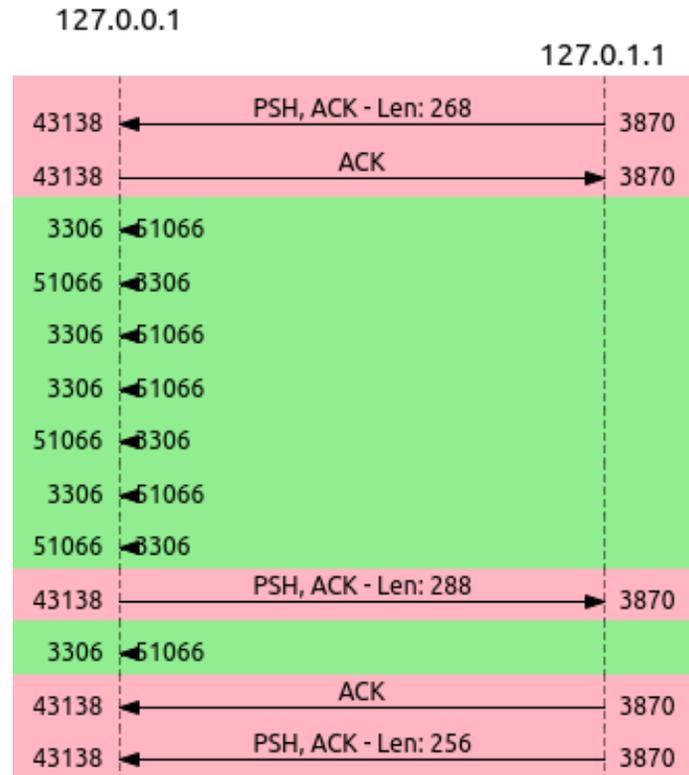


Figura 3. 32. Diagrama de secuencia: actualización de datos de usuario. Por los autores.

Por otra parte, la MME envía peticiones de autenticación y seguridad al eNB, recibiendo la respuesta de éxito para cada una de las solicitudes. Los mensajes se observan en la Figura 3. 33, estas peticiones y respuestas se envían por medio del protocolo S1AP y NAS, además, su diagrama de secuencia se presenta en la Figura 3. 34.



Source	Destination	Protocol	Info
192.170.0.10	192.170.0.20	S1AP/NAS-EPS	DownlinkNASTransport, Authentication request
192.170.0.20	192.170.0.10	S1AP/NAS-EPS	UplinkNASTransport, Authentication response
192.170.0.10	192.170.0.20	S1AP/NAS-EPS	DownlinkNASTransport, Security mode command
192.170.0.20	192.170.0.10	S1AP/NAS-EPS	UplinkNASTransport, Security mode complete

Figura 3. 33. Petición de autenticación y de seguridad. Por los autores.

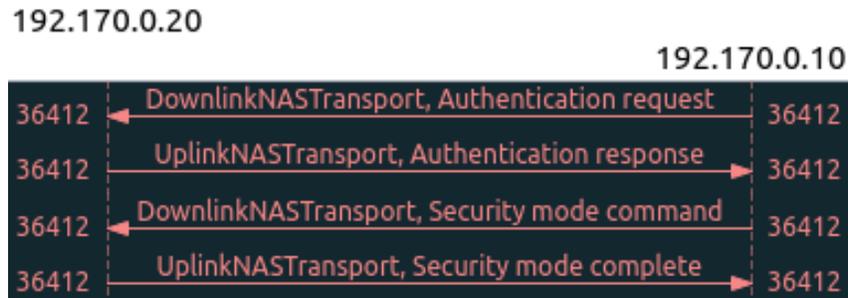


Figura 3. 34. Diagrama de secuencia: petición de autenticación y de seguridad. Por los autores.

Lo siguiente a efectuar es consultar algunos parámetros del usuario con IMSI=208930100001111, como el ID de la MME asignada, con este ID se solicita posteriormente el host (mmehost) y el dominio de la MME (mmerealm) para actualizarlos si es necesario. Además, se envían mensajes con la bandera PSH y sus respectivas respuestas con ACK entre la MME y el HSS, como también entre el HSS y el servidor de la base datos.

En la Figura 3. 35 y la Figura 3. 36 se presentan los procedimientos mencionados y su diagrama de secuencia respectivamente.

SOURCE	DESTINATI	PROTOCC	INFO
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { SELECT `access_restriction`,`mmeidentity_id`,`mmeidentity`,`msisdn`,`ue_ambr_ul`,`ue_ambr_d
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [ACK] Seq=4773 Ack=5192 Win=183552 Len=0 TSval=2467546 TSecr=2467546
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { SELECT mmehost,mmerealm FROM mmeidentity WHERE mmeidentity_idmmeidentity='43' }
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { INSERT INTO `mmeidentity` (`mmehost`,`mmerealm`) SELECT 'hanier.openair4G.eur','openai
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response OK
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [ACK] Seq=5370 Ack=5494 Win=188032 Len=0 TSval=2467548 TSecr=2467547
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { SELECT * FROM `pdn` WHERE `pdn`.`users_imsi`=208930100001111 LIMIT 10; }
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [PSH, ACK] Seq=585 Ack=821 Win=46976 Len=544 TSval=2467548 TSecr=2467544
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [ACK] Seq=821 Ack=1129 Win=46976 Len=0 TSval=2467550 TSecr=2467548
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [ACK] Seq=5446 Ack=6431 Win=192512 Len=0 TSval=2467588 TSecr=2467548

Figura 3. 35. Consulta de datos de la MME. Por los autores.

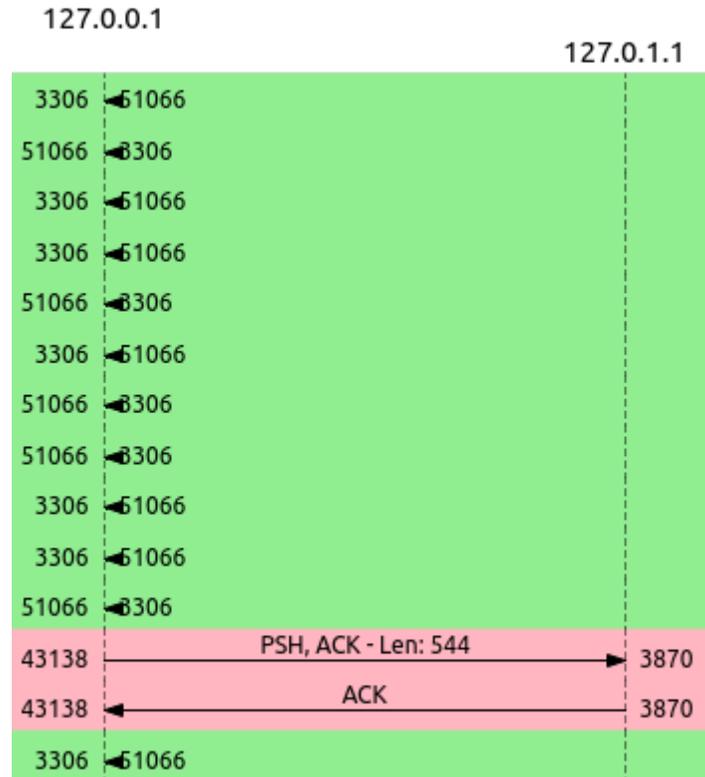


Figura 3. 36. Diagrama de secuencia: solicitud de datos de la MME. Por los autores.

La MME envía peticiones de configuración del contexto inicial y de activación de los portadores radio por defecto, además envía el indicador de aprobación para la vinculación del usuario. El eNB envía información del usuario y la respuesta para la configuración del contexto con el objetivo de recibir el próximo mensaje de la MME, en el que muestra que la vinculación del usuario se ha completado. En la Figura 3. 37 se muestran los mensajes mencionados.

Source	Destination	Protocol	Info
192.170.0.10	192.170.0.20	S1AP/NAS-EPS	InitialContextSetupRequest, Attach accept, Activate default EPS bearer context request
192.170.0.20	192.170.0.10	SCTP	SACK
192.170.0.20	192.170.0.10	S1AP	UECapabilityInfoIndication, UECapabilityInformation
192.170.0.10	192.170.0.20	SCTP	SACK
192.170.0.20	192.170.0.10	S1AP	InitialContextSetupResponse
192.170.0.10	192.170.0.20	SCTP	SACK
192.170.0.20	192.170.0.10	S1AP/NAS-EPS	UplinkNASTransport, Attach complete, Activate default EPS bearer context accept
192.170.0.10	192.170.0.20	SCTP	SACK

Figura 3. 37. Vinculación de usuario. Por los autores.

Asimismo, en la Figura 3. 38 se presenta el diagrama de secuencia de estos procedimientos.

192.170.0.20

192.170.0.10



Figura 3. 38. Diagrama de secuencia: vinculación de usuario. Por los autores.

En el terminal correspondiente la EPC, se muestra una tabla como la que se muestra en la Figura 3. 39, que evidencia la vinculación del UE y los portadores radio.

```

Leaving s1ap_handle_conn_est_cnf()
===== Statistics =====
UE      | Global  | Since last display |
Bearers |      1 |           0         |
        |      1 |           0         |
  
```

Figura 3. 39. Terminal del EPC: vinculación de usuario. Por los autores.

- **Cierre de conexiones**

Una vez que el usuario se encuentra conectado a la red, se realizan *HEARTBEATS* con su respectiva respuesta entre la MME y el eNB, con el fin de sondear la red para verificar que el usuario siga conectado y revisar nuevas solicitudes de vinculación.

También se observa que una vez se finaliza la ejecución de E-UTRAN se realiza el cierre de la asociación SCTP mediante tres vías entre el eNB y la MME:

- **Mensaje 1 (eNB -> MME):** envío de una señal SHUTDOWN para indicar a la MME que está preparado para cerrar la conexión.
- **Mensaje 2 (MME -> eNB):** envío de reconocimiento mediante la señal SHUTDOWN_ACK.
- **Mensaje 3 (eNB -> MME):** envío de la señal SHUTDOWN_COMPLETE indicando que el cierre de la asociación se ha completado.

En la Figura 3. 40 y la Figura 3. 41 se muestra la lista de mensajes y su diagrama de secuencia respectivamente.

Source	Destination	Protoco	Info
192.170.0.10	192.170.0.20	SCTP	HEARTBEAT
192.170.0.20	192.170.0.10	SCTP	HEARTBEAT_ACK
192.170.0.20	192.170.0.10	SCTP	HEARTBEAT
192.170.0.10	192.170.0.20	SCTP	HEARTBEAT_ACK
192.170.0.20	192.170.0.10	SCTP	SHUTDOWN
192.170.0.10	192.170.0.20	SCTP	SHUTDOWN_ACK
192.170.0.20	192.170.0.10	SCTP	SHUTDOWN_COMPLETE

Figura 3. 40. Fin de conexión entre MME y eNB. Por los autores.



Figura 3. 41. Diagrama de secuencia: fin de conexión entre MME y eNB. Por los autores.

Debido a que la MME y el HSS siguen conectados esperando la vinculación de usuarios a la red, se envían las señales con la bandera PSH y ACK, indicadas en la Figura 3. 42, a la espera del envío de alguna información.

SOURCE	DESTINATI	PROT	INFO
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [PSH, ACK] Seq=1129 Ack=821 Win=46976 Len=84 TSval=2497522 TSecr=2467550
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [ACK] Seq=821 Ack=1213 Win=46976 Len=0 TSval=2497523 TSecr=2497522
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [PSH, ACK] Seq=821 Ack=1213 Win=46976 Len=96 TSval=2497523 TSecr=2497522
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [ACK] Seq=1213 Ack=917 Win=46976 Len=0 TSval=2497563 TSecr=2497523

Figura 3. 42. Petición de información post desconexión. Por los autores.

En la Figura 3. 43 se observa el intercambio de señales entre la MME y el HSS a la espera de información mediante el diagrama de secuencia.

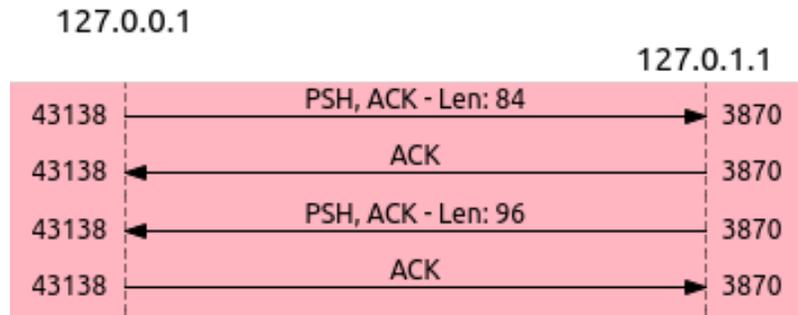


Figura 3. 43. Diagrama de secuencia: Petición de información post desconexión. Por los autores.

Luego se procede a desconectar la MME del HSS, mediante un proceso de cierre de asociación TCP de 3 vías:

- **Mensaje 1 (3870 -> 43138):** solicitud para finalizar la conexión TCP mediante la bandera FIN.
- **Mensaje 2 (43138 -> 3306):** respuesta a la solicitud de finalización de conexión mediante la bandera ACK, además de la bandera FIN para la finalización.
- **Mensaje 3 (3870 -> 43138):** acuse de recibo por medio de la bandera ACK.

Posteriormente se procede a desconectar el HSS del servidor de la base de datos mediante el mismo proceso anterior, pero con otros puertos involucrados: el 51066 correspondiente al HSS, y el 3306 asignado a la base de datos. Los dos procesos de desconexión se muestran en la Figura 3. 44, además del diagrama de secuencia de la Figura 3. 45.

SOURCE	DESTINATI	PROT	INFO
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [FIN, ACK] Seq=1097 Ack=1393 Win=46976 Len=0 TSval=2572773 TSecr=2557929
127.0.0.1	127.0.1.1	TCP	43138 → 3870 [FIN, ACK] Seq=1393 Ack=1098 Win=46976 Len=0 TSval=2572773 TSecr=2572773
127.0.1.1	127.0.0.1	TCP	3870 → 43138 [ACK] Seq=1098 Ack=1394 Win=46976 Len=0 TSval=2572773 TSecr=2572773
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [FIN, ACK] Seq=5446 Ack=6431 Win=192512 Len=0 TSval=2577144 TSecr=2467548
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	3306 → 51066 [FIN, ACK] Seq=6431 Ack=5447 Win=45952 Len=0 TSval=2577145 TSecr=2577144
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	51066 → 3306 [ACK] Seq=5447 Ack=6432 Win=192512 Len=0 TSval=2577145 TSecr=2577145

Figura 3. 44. Cierre de conexión HSS-MME y HSS-Base de datos. Por los autores.

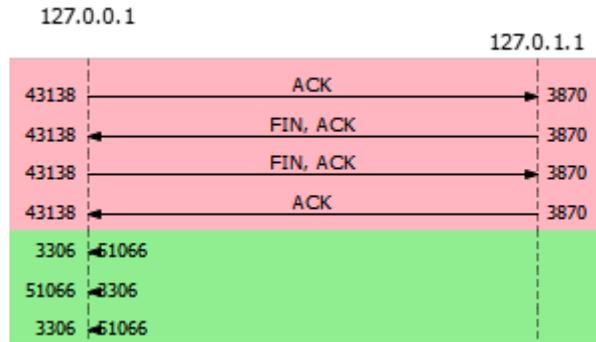


Figura 3. 45. Diagrama de secuencia: Cierre de conexión HSS-MME y HSS-Base de datos. Por los autores.

3.3.5. Implementación de escenario con interfaz S1 sobre diferentes equipos

La implementación de este escenario es lo más acercado a la realidad de una red LTE ya que las entidades de red se implementan en diferentes equipos, además de analizar el tráfico de control se realizan pruebas de conexión a internet por parte del UE. Al igual que en escenario sobre un mismo equipo se deben configurar las direcciones necesarias para la comunicación entre las entidades de red. En Tabla 3. 15 se muestra las interfaces usadas para cada entidad, así como una descripción de cada una de ellas.

Esta emulación, a diferencia de la anterior, se realiza en cinco partes: la ejecución del HSS, el funcionamiento de la MME, la ejecución de la SPGW, la puesta en marcha de E-UTRAN y del UE y por último, el cierre de las conexiones. La Tabla 3. 15 muestra la configuración de las interfaces para este escenario.

Tabla 3. 15. Configuración de interfaces para el escenario con interfaz S1 sobre diferentes equipos. Por los autores.

Interfaz	Entidad	Nombre	Dirección IP	Tipo
S1-C	MME	eth0	192.168.x.x	Ethernet
	eNB	eth0	192.168.x.x	
S1-U	SPGW	eth0	192.168.x.x	
	eNB	eth0	192.168.x.x	
SGi	SPGW	eth0	192.168.x.x	
S11	MME	lo	127.0.11.1	Loopback
	SPGW	lo	127.0.11.2	
S6a	MME	lo	127.0.1.1	
	HSS	lo	127.0.0.1	
U _u	UE	oip1	172.16.0.2	Virtual

El Apéndice E describe las configuraciones requeridas para la ejecución de este escenario.



3.3.6. Resultados de escenario con interfaz S1 sobre diferentes equipos

Algunos procedimientos en este escenario, son similares a los que se obtuvieron en el escenario de la sección 3.3.4, por esto, se profundizará en aquellos procesos que involucren nuevos aspectos.

De acuerdo a las cinco partes planteadas en la sección anterior, se presentan los resultados obtenidos para este escenario.

- **Ejecución HSS**

Esta etapa de la emulación tiene un comportamiento muy similar a la del escenario sobre una misma máquina, difiriendo en dos detalles: el puerto utilizado por el HSS (49084) para la conexión con la base de datos, y la no solicitud de conexión TCP con la MME al final del proceso.

- **Ejecución MME**

Al igual que el escenario sobre un mismo equipo, se establece la conexión TCP mediante los puertos 3868 y 52532, y se consulta el ID de la MME mediante el nombre del host, en este caso “adrian.openair4G.eur”. Además, se manifiesta la utilización del protocolo Diameter, que entra en juego para el manejo de la interfaz S6a; este utiliza mensajes comunes para las peticiones que son necesarias en la puesta en marcha de la emulación. En esta parte de la emulación se usa para el intercambio de capacidades con sus correspondientes mensajes:

- Petición de Intercambio de Capacidades (CER, *Capabilities Exchange Request*): mensaje con código 257 y con la bandera *Request* activada. Este mensaje tiene como origen el nombre que utiliza el host para la MME (adrian.openair4G.eur).
- Respuesta de Intercambio de Capacidades (CEA, *Capabilities Exchange Answer*): al igual que el CER tiene código 257 pero sin ninguna bandera activada, además, el host de origen de este mensaje es el nombre que se usa para el HSS (hss.openair4G.eur).

En la Figura 3. 46 se muestra el tráfico mencionado anteriormente.

SOURCE	DESTINATI	PROTOCOL	INFO
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	37118 → 3868 [SYN] Seq=0 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=11518740 TSecr=0 WS=128
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	3868 → 37118 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=43690 Len=0 MSS=65495 SACK_PERM=1 TSval=11518740 TSecr=1
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	37118 → 3868 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=43776 Len=0 TSval=11518740 TSecr=11518740
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=Capabilities-Exchange Request(257) flags=R-- appl=Diameter Common Messages(0) h2h=6fbf1f77 e2e=63e3
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	3868 → 37118 [ACK] Seq=1 Ack=217 Win=44800 Len=0 TSval=11518741 TSecr=11518741
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Request Query { SELECT idmmeidentity FROM mmeidentity WHERE mmeidentity.mmehost='adrian.openair4G.eur'
127.0.0.1	127.0.0.1	MySQL	Response
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	54488 → 3306 [ACK] Seq=5842 Ack=5798 Win=174720 Len=0 TSval=11518741 TSecr=11518741
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=Capabilities-Exchange Answer(257) flags=--- appl=Diameter Common Messages(0) h2h=6fbf1f77 e2e=63e3
127.0.0.1	127.0.0.1	TCP	37118 → 3868 [ACK] Seq=217 Ack=217 Win=44800 Len=0 TSval=11518742 TSecr=11518742

Figura 3. 46. Conexión entre HSS y MME. Por los autores.

- **Ejecución SPGW**

En el momento en que se pone en funcionamiento esta entidad, esta se asocia con la MME, ejecutada anteriormente, y queda a la espera de información, además, se muestra su dirección IP realizando peticiones de Sistema de Nombres de Dominio (DNS, *Domain Name System*), tal como se observa en la Figura 3. 47

SOURCE	DESTINATION	PROTOCO	INFO
172.16.0.1	172.16.255.200	DNS	Standard query 0xa825 A productsearch.ubuntu.com
172.16.0.1	172.16.255.200	DNS	Standard query 0xa825 A productsearch.ubuntu.com
172.16.0.1	172.16.255.183	DNS	Standard query 0xa825 A productsearch.ubuntu.com

Figura 3. 47. Dirección SPGW. Por los autores.

- **Ejecución EUTRAN**

Este proceso es similar al del escenario sobre una misma máquina en cuanto al tráfico MySQL y al intercambio de información sobre la interfaz S1, con la diferencia que en esta interfaz las direcciones IP de la MME y el eNB no son virtuales sino reales. En la Figura 3. 48 se muestra el diagrama de secuencia en el que se evidencia las direcciones IP reales mencionadas.



Figura 3. 48. Tráfico de interfaz S1. Por los autores.



Asimismo, se ve involucrado el protocolo Diameter. cuyo primer procedimiento es el de autenticación, realizado mediante el mensaje de Petición de Información para Autenticación (AIR, *Authentication Information Request*), enviado por la MME hacia el HSS, y el mensaje de Respuesta de Información para Autenticación (AIA, *Authentication Information Answer*). Los dos mensajes se identifican con el código 318; el AIR tiene las banderas R y P activas, mientras que el AIA tiene solo la bandera P activada. Después, aparece el mensaje de Solicitud para Actualizar Ubicación (ULR, *Update-Location Request*) con las banderas R y P activadas; y el mensaje de Respuesta para Actualizar Ubicación (ULA, *Update-Location Answer*) con la bandera P activada, los dos mensajes son identificados con el código 316. La ULR es enviada por la MME hacia el HSS, el cual responde con la ULA.

Luego, hay una serie de mensajes de Solicitud de Vigilancia del Dispositivo (DWR, *Device Watchdog Request*), el cual tiene como fuente la MME y destino al HSS, asimismo, tiene activada la bandera R. Por cada DWR hay un mensaje de Respuesta de Vigilancia del Dispositivo (DWA, *Device Watchdog Answer*), que tiene como fuente el HSS y destino la MME, este mensaje no tiene ninguna bandera activada. Tanto la DWR como la DWA se reconocen con el código 280.

La Figura 3. 49 muestra los mensajes intercambiados mediante Diameter.

SOURCE	DESTINATION	PROTOCOL	INFO
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=3GPP-Authentication-Information Request(318) flags=RP- appl=3GPP S6a/S6d(16777251) h2h=6fbf1f79 e2e=6fbf1f7a
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=3GPP-Authentication-Information Answer(318) flags=-P- appl=3GPP S6a/S6d(16777251) h2h=6fbf1f79 e2e=6fbf1f7a
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=3GPP-Update-Location Request(316) flags=RP- appl=3GPP S6a/S6d(16777251) h2h=6fbf1f79 e2e=6fbf1f7a
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=3GPP-Update-Location Answer(316) flags=-P- appl=3GPP S6a/S6d(16777251) h2h=6fbf1f79 e2e=6fbf1f7a
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=Device-Watchdog Request(280) flags=R- appl=Diameter Common Messages(0) h2h=6fbf1f7a e2e=6fbf1f7a
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=Device-Watchdog Answer(280) flags=- appl=Diameter Common Messages(0) h2h=6fbf1f7a e2e=6fbf1f7a

Figura 3. 49. Mensajes con Diameter. Por los autores.

De igual manera, se observa el trabajo con el protocolo GTPv2 para la interfaz S11. En la emulación se realizan tres procedimientos: primero, la creación de la sesión; segundo, la modificación del portador; y tercero, la liberación de acceso a portadores. Cada uno de estos procedimientos está conformado por una petición enviada de la MME a la SPGW, y una respuesta, enviada de la SPGW hacia la MME.

Los procesos de crear la sesión y modificar el portador se realizan como parte de los procesos *E-UTRAN Initial Attach* y *UE requested PDN connectivity*. Estos procedimientos son solicitados a la MME por parte del eNB, tal como se observa en la Figura 3. 50.

SOURCE	DESTINATION	PROTOCOL	INFO
192.168.125.78	192.168.125.224	S1AP/NAS-EPS	InitialUEMessage, Attach request, PDN connectivity request

Figura 3. 50. Petición de eNB a MME para vinculación. Por los autores

En la Figura 3. 51 se puede observar los procedimientos ejecutados por el protocolo GTPv2, además de las direcciones para la MME (127.0.11.1) y SPGW (127.0.11.2), que fueron establecidas en los archivos de configuración respectivos.

SOURCE	DESTINATION	PROTOCOL	INFO
127.0.11.1	127.0.11.2	GTPv2	Create Session Request
127.0.11.2	127.0.11.1	GTPv2	Create Session Response
127.0.11.1	127.0.11.2	GTPv2	Modify Bearer Request
127.0.11.2	127.0.11.1	GTPv2	Modify Bearer Response
127.0.11.1	127.0.11.2	GTPv2	Release Access Bearers Request
127.0.11.2	127.0.11.1	GTPv2	Release Access Bearers Response

Figura 3. 51. Procesos mediante protocolo GTPv2. Por los autores.

Una vez se completan los procesos para la vinculación del UE, se procede a realizar un *ping* desde la dirección asignada al UE hacia un servidor de *Google*, con el fin de conectarse a internet por medio de la SPGW. En la Figura 3. 52 se muestran la solicitud y respuesta del ping mencionado.



Figura 3. 52. Ping hacia servidor de Google. Por los autores.

- **Cierre de conexiones**

Por último, se procede a realizar el cierre de las conexiones entre las entidades de red. La desconexión del eNB con la MME se hace mediante el mismo procedimiento del escenario anterior, pero con direcciones IP reales, tal como se muestra en la Figura 3. 53.



SOURCE	DESTINATION	PROTOCOL	INFO
192.168.125.78	192.168.125.224	SCTP	SHUTDOWN
192.168.125.224	192.168.125.78	SCTP	SHUTDOWN_ACK
192.168.125.78	192.168.125.224	SCTP	SHUTDOWN_COMPLETE

Figura 3. 53. Cierre de conexión entre eNB y MME. Por los autores.

El protocolo Diameter también se evidencia cuando se desea terminar una conexión, ya que para el cierre de la conexión TCP entre el HSS y la MME, primero se realiza la Petición para Desconectar Par (DPR, *Disconnect-Peer Request*) recibiendo el un mensaje de Respuesta para Desconectar Par (DPA, *Disconnect-Peer Answer*), estos mensajes tienen como indicador el código 282, con la diferencia que el primero tiene la bandera R activa, mientras el segundo no tiene ninguna. Estos mensajes se muestran en la Figura 3. 54.

SOURCE	DESTINATION	PROTOCOL	INFO
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=Disconnect-Peer Request(282) flags=R-- appl=Diameter Common Messages(0) h2h=6781c646
127.0.0.1	127.0.0.1	DIAMETER	cmd=Disconnect-Peer Answer(282) flags=--- appl=Diameter Common Messages(0) h2h=6781c646 e:

Figura 3. 54. Desconexión de par mediante Diameter. Por los autores.

Luego se procede a realizar el cierre de las conexiones TCP entre la MME y el HSS y la finalización de la conexión TCP entre el HSS y la base de datos, tal como se realiza en el escenario sobre un equipo.

3.4. Implementación de experimentación con plataformas RF

En este componente del laboratorio se analiza las conexiones entre entidades de una red LTE de bajo costo, haciendo uso de las USRPs y equipos con buenas características en cuanto a procesador y memoria RAM. Las especificaciones técnicas de cada equipo se muestran en la Tabla 3. 16.

Tabla 3. 16. Equipos para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.

Host	Entidad	Marca	RAM [Gb]	Procesador
1	EPC	Samsung	4	Intel Celeron CPU B820 @ 1.7 GHz x 2
2	eNB	Asus	4	Intel Core i7-7500U CPU 2.7 GHz x 4
3	UE	Dell	8	intel Core i7-3770 CPU 3.4 GHz x 4

La RSRP en el UE debe estar entre -75 y -95 dBm, ya que un valor mayor provocará la saturación del eNB y el UE y un valor menor la no sincronización entre las entidades de red, por lo cual se deben configurar los valores de ganancias en transmisión y recepción en ambos.

Es conveniente escoger una banda de operación dentro del rango de frecuencia de las antenas. En este caso las VERT-900, cuyos rangos de operación son (824-960) MHz y (1710-1990) MHz. De acuerdo a la Tabla 2. 7, las bandas disponibles son la 3, 5 y 39, sin embargo, esta última se descarta por manejar TDD. Además de las bandas 3 y 5, se escogen la 4 y la 13 por estar cerca del rango de las antenas.

De acuerdo a los dispositivos mencionados anteriormente, se tiene un escenario como el que se muestra en la Figura 3. 55.

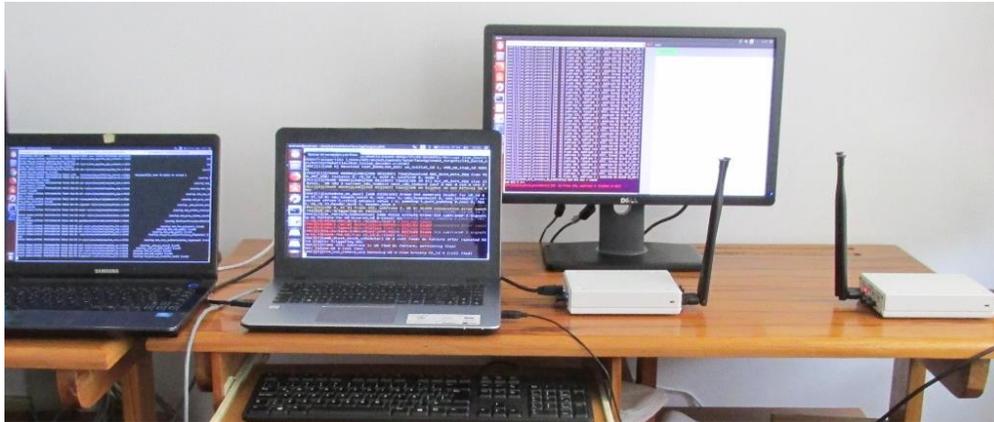


Figura 3. 55. Montaje de escenario para experimentación con plataformas de RF. Por los autores.

Las configuraciones requeridas para el funcionamiento de este escenario se describen en el Apéndice F.

3.5. Resultados de experimentación con plataformas de RF

Lo primero que se realiza es la inicialización de las entidades del EPC de la misma manera que en la sección 3.3.4 en el *host 1*. Luego de la asociación del HSS y la MME, esta última queda a la espera de la conexión del eNB como se muestra en la Figura 3. 56.

```
Initializing SPGW-APP task interface: DONE
===== Statistics =====
UE          | Global | Since last display |
Bearers     |        |                     |
```

Figura 3. 56. Espera de MME para conexión con eNB. Por los autores.

Luego se ejecuta el eNB en el *host 2* y se genera la asociación con la MME como se muestra en la Figura 3. 57.

```
eutran@eutran: ~
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] outstrms ..... 2
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] fragmentation : 1452
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] pending data .. 0
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] unack data .... 0
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] rwnd ..... 106496
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] peer info .....
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] state ..... 2
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] cwnd ..... 4380
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] srtt ..... 0
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] rto ..... 3000
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] mtu ..... 1500
[SCPT][I][sctp_get_sockinfo] .....
[SCPT][I][sctp_eNB_read_from_socket] Comm up notified for sd 41, assigned assoc_
id 3
[SIAP][I][siap_eNB_generate_s1_setup_request] 3584 -> 00e000
[SCPT][I][sctp_send_data] Successfully sent 59 bytes on stream 0 for assoc_id 3
[SCPT][I][sctp_eNB_flush_sockets] Found data for descriptor 41
[SCPT][I][sctp_eNB_read_from_socket] Received notification for sd 41, type 32777
[SCPT][I][sctp_eNB_flush_sockets] Found data for descriptor 41
[SCPT][I][sctp_eNB_read_from_socket] [3][41] Msg of length 27 received from port
36412, on stream 0, PPIID 18
[SIAP][I][siap_decode_siap_s1setupresponseies] Decoding message Siap_S1SetupResp
onseIEs (/home/eutran/oa/openairinterface5g/cmake_targets/lte_build_oai/build/C
MakeFiles/R10.5/siap_decoder.c:3535)
[SIAP][I][siap_eNB_handle_s1_setup_response] servedCUMMEIs.list.count 1
[SIAP][I][siap_eNB_handle_s1_setup_response] servedPLMNs.list.count 1
[ENB_APP][I][eNB_app_task] [eNB 0] Received SIAP_REGISTER_ENB_CNF: associated MM
E 1
Initializing eNB threads
[PHY][I]initializing eNB 0 CC_id 0 j (eNodeB_3GPP,synch_to_ext_device)
```

Figura 3. 57. Asociación del eNB con la MME. Por los autores.

Luego de la asociación y como parte del proceso de autenticación, se observa en el *host* 1 como la MME compara los valores configurados y recibidos del Código de Área de Seguimiento (TAC, *Tracking Area Code*) y de la Red Móvil Pública Terrestre (PLMN, *Public Land Mobile Network*), este proceso se observa en la Figura 3. 58.

```
[S1AP][D]Comparing config tac 1, received tac = 1
[S1AP][D]Comparing plmn_mcc 208/208, plmn_mnc 93/93
[S1AP][D]Adding eNB to the list of served eNBs
[S1AP][D][eNB]
[S1AP][D][eNB]eNB name: eNB_Eurecom_LTEBox
```

Figura 3. 58. Comparación de TAC y PLMN. Por los autores.

Por último, se procede a inicializar el UE, de acuerdo a las bandas escogidas en la sección 2.3.3. Luego de iniciar el UE, se muestran 4 estados:

- No sincronizado: el UE inicia su transmisión.
- Modo PRACH: el terminal solicita acceder a la red.
- Modo Respuesta de Acceso Aleatorio (RAR, *Random Access Response*): lo envía el eNB al UE en el DL-SCH para que pueda utilizar el UL-SCH.
- Modo PUSCH: envío de información de usuario.

Para las bandas 3, 4 y 5, a pesar de utilizar diferentes valores de ganancias el UE sólo queda en el modo PRACH, pero no hay respuesta por parte del eNB, como se muestra en la Figura 3. 59, Figura 3. 60 y Figura 3. 61.



```
[UE_PROC] RSRP[0] -79.20 dBm/RE, RSSI -54.43 dBm, RSRQ[0] 9.03 dB,  
[UE_PROC] RX Gain 95 dB  
[UE_PROC] Frequency offset -27 Hz, estimated carrier frequency 1864995227.000000 Hz  
[UE_PROC] UE mode = PRACH (1)
```

Figura 3. 59. Estado en banda 3. Por los autores.

```
[UE_PROC] RSRP[0] -79.09 dBm/RE, RSSI -54.32 dBm, RSRQ[0] 9.03 dB,  
[UE_PROC] RX Gain 95 dB  
[UE_PROC] Frequency offset 0 Hz, estimated carrier frequency 2119992803.000000 Hz  
[UE_PROC] UE mode = PRACH (1)
```

Figura 3. 60. Estado del UE en banda 4. Por los autores.

```
[UE_PROC] RSRP[0] -66.85 dBm/RE, RSSI -42.08 dBm, RSRQ[0] 9.03 dB,  
[UE_PROC] RX Gain 81 dB  
[UE_PROC] Frequency offset -1511 Hz, estimated carrier frequency 879004660.000000 Hz  
[UE_PROC] UE mode = PRACH (1)
```

Figura 3. 61. Estado del UE en banda 5. Por los autores.

La banda 13, a diferencia de las mencionadas anteriormente, pasa por los cuatro estados hasta obtener la conexión a la red, como se muestra a continuación:

Modo no sincronizado, en el cual no se muestra ningún valor de RSRP como se muestra en la Figura 3. 62.

```
[UE_PROC] RSRP[0] -inf dBm/RE, RSSI -inf dBm, RSRQ[0] -inf dB,  
[UE_PROC] RX Gain 75 dB  
[UE_PROC] Frequency offset 0 Hz, estimated carrier frequency 751000000.000000 Hz  
[UE_PROC] UE mode = NOT SYNCHED (0)
```

Figura 3. 62. Primer estado del UE en banda 13. Por los autores.

Modo PRACH, como se observa en la Figura 3. 63, se obtiene una RSRP de -76,99 dBm por Elemento de Recurso (RE, *Resource Element*), casi al borde del valor máximo recomendado.

```
[UE_PROC] RSRP[0] -76.99 dBm/RE, RSSI -52.22 dBm, RSRQ[0] 9.03 dB,  
[UE_PROC] RX Gain 80 dB  
[UE_PROC] Frequency offset 1716 Hz, estimated carrier frequency 750997084.000000 Hz  
[UE_PROC] UE mode = PRACH (1)
```

Figura 3. 63. Segundo estado del UE en banda 13. Por los autores.

Modo RAR, con una RSRP igual al modo PRACH, como se muestra en la Figura 3. 64.

```
[UE PROC] RSRP[0] -76.99 dBm/RE, RSSI -52.22 dBm, RSRQ[0] 9.03 dB
[UE PROC] RX Gain 80 dB
[UE_PROC] Frequency offset 1716 Hz, estimated carrier frequency 750997084.000000 Hz
[UE PROC] UE mode = RAR (2)
```

Figura 3. 64. Tercer estado del UE en banda 13. Por los autores.

Por último, el modo PUSCH, con una RSRP de -80 dBm/RE, mostrada en la Figura 3. 65.

```
[UE PROC] RSRP[0] -80.00 dBm/RE, RSSI -55.23 dBm, RSRQ[0] 9.03 dB,
[UE PROC] RX Gain 80 dB
[UE_PROC] Frequency offset -61 Hz, estimated carrier frequency 751002861.000000 Hz
[UE PROC] UE mode = PUSCH (3)
```

Figura 3. 65. Cuarto estado del UE en banda 13. Por los autores.

Luego de esto, la sincronización se ha completado y se envía información entre las entidades de red, en el *host 3*, tal como se observa en la Figura 3. 66, se muestra la constelación del PDSCH y el valor del *throughput* en ese momento.

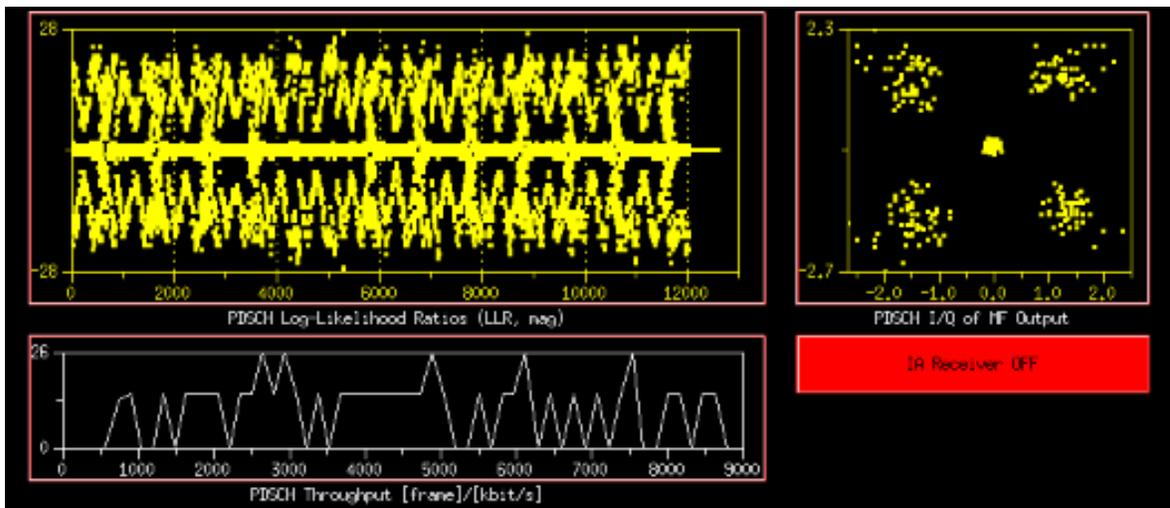


Figura 3. 66. Constelación del eNB. Por los autores.

Luego, en el *host 1* muestra que hay un UE vinculado, indicando la asociación entre las entidades de red. Esta notificación se indica en la Figura 3. 67.

```
===== Statistics =====
| Global | Since last display |
UE | 1 | 1 |
Bearers | 1 | 1 |
```

Figura 3. 67. Vinculación del UE a la red. Por los autores.



CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de grado se expuso el análisis, diseño e implementación de un laboratorio para LTE, a nivel de simulación, emulación y experimentación con plataformas de RF en la cual se plantean diferentes escenarios para cada uno de los componentes mencionados. En este capítulo se presentan las conclusiones y los trabajos futuros del trabajo de grado *Diseño de un Laboratorio de Comunicaciones Móviles Basado en OpenAirInterface*.

4.1. CONCLUSIONES

- OAI es una plataforma adecuada para un laboratorio de comunicaciones móviles, ya que es muy amplia en su estructura, además, tiene una proyección muy fuerte hacia tecnologías de 5G, con lo cual el diseño del laboratorio se hace escalable. Sin embargo, los tutoriales contenidos en su *wiki* tienen grandes vacíos, puesto que algunas de sus funcionalidades aún son experimentales, dejando en el aire muchos aspectos importantes para el buen funcionamiento de la implementación.
- El trabajo colaborativo mediante el *Mailing list* de OAI permite la resolución de inconvenientes de manera eficiente, además, otorga una experiencia como solucionador de problemas, ya que gracias a la experimentación con la plataforma es posible ayudar a resolver dificultades a diferentes miembros de OAI de distintas partes del mundo.
- El diseño del laboratorio mediante componentes independientes permite un manejo eficiente, ya que en ocasiones no se cuenta con el tiempo suficiente para abarcar todos los temas que en el modelo del laboratorio se plantean, por lo que es necesario tener la posibilidad de enfocarse en determinado componente de interés. Asimismo, al tener una utilización de menor a mayor complejidad, se obtiene una mejor asimilación del manejo de OAI.

A partir de los escenarios planteados para el componente “Canales físicos y de transporte LTE” se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El conjunto de parámetros que se pueden variar, permite realizar un análisis detallado de la capa física en cuanto al desempeño en términos de FER y *throughput*, sin embargo, al no permitir la configuración de distintas señales de referencia provoca que la eficiencia de los canales de datos sea del 100%, lo cual se ve reflejado en el la capacidad máxima, en este caso los valores máximos teóricos especificados por el 3GPP, de lo contrario los valores de *throughput* serían menores a los que se alcanzaron.



- En el escenario 1 para alcanzar una FER objetivo, los MCSs de orden de modulación 2 necesitan un valor de SNR menor en comparación a los órdenes 4 y 6, no obstante, para obtener un valor alto de *throughput* se debe aumentar el orden de modulación. Así mismo, en el escenario 4 se evidenció una mejoría al aumentar el ancho de banda, ya que con una asignación de 100 PBRs se alcanzó el *throughput* más alto con un valor de SNR más bajo, en comparación a las demás asignaciones.
- Para el escenario 2 los canales multitrayecto extendidos fueron los que necesitaron de una mayor SNR en comparación con el modelo de canal SCM-D, el cual presenta un comportamiento similar al canal AWGN. Por otra parte, en el escenario 5, los arreglos MIMO presentaron los mejores resultados en términos de FER, para todos los valores de SNR.

De acuerdo al manejo y resultados del componente “Análisis de protocolos y tráfico LTE”, se presentan las siguientes conclusiones:

- En los escenarios 1 y 2 se evidencia los beneficios de usar abstracción de la capa física ya que, a pesar de emplear diferentes arreglos de antenas, el tiempo de ejecución de cada uno fue menor en comparación a la implementación completa, lo cual genera un ahorro en el procesamiento de la CPU y es idóneo para la implementación con arreglos de antenas mayor a 2x2, varios UE conectados a la red y diferentes tipos de tráfico.
- Los escenarios con soporte para la interfaz S1 se asemejan a una implementación real en cuanto al proceso de vinculación de un UE a la red, ya que maneja detalladamente la pila de protocolos de LTE. Además, el escenario con soporte para la interfaz S1 sobre diferentes equipos es el que maneja la pila de protocolos más completa, ya que, se requiere el uso de *Diameter*; asimismo, entra en funcionamiento la interfaz S11, y con ella el protocolo GTP.

Del componente “Experimentación con plataformas de RF” se puede concluir lo siguiente:

- La experimentación con plataformas de RF permite un despliegue detallado de una red basada totalmente en SDR, en la cual se puede observar la comunicación entre entidades de red LTE. No obstante, se evidenciaron limitaciones e inconvenientes en cuanto a la transferencia de datos y frecuencia de muestreo, por los equipos con los que se trabajaron, ya que OAI requiere de equipos con altas prestaciones¹ para su correcto funcionamiento.

¹ Las prestaciones requeridas son: puerto USB 3.0, memoria RAM mayor a 4 GB, procesador con mínimo 4 núcleos mayor a 3 GHz, con Intel core i5/i7 desde tercera generación.



- Respecto a la conexión entre entidades de red, se obtuvieron los mejores resultados en la banda 13, a pesar de estar fuera del rango de las antenas VERT-900. Con esta se alcanzaron valores de RSRP dentro del rango recomendado, y se logra la conexión entre entidades de red. Por otra parte, las bandas 3 y 4 no pasan de la solicitud de acceso a la red, puesto que son ocupadas por los operadores comerciales, y es conveniente trabajar con una jaula de RF para evitar interferencia, además, con la banda 5, el valor de la RSRP no se estabiliza en los rangos recomendados.

4.2. TRABAJOS FUTUROS

Los trabajos que se proponen para un futuro están ligados a mejoras o adiciones más propicias para el diseño del laboratorio que se plantea y se implementa en este trabajo.

1. Generar una Interfaz de Usuario Gráfica (GUI, *Graphical User Interface*) en el componente del laboratorio “Canales físicos y de transporte LTE”, con el objetivo de hacer menos complejo el trabajo con los simuladores e implementar la generación de archivos .csv para los demás simuladores.
2. Implementación de un bloque para la experimentación de 5G tanto para emulación como experimentación con plataformas de RF.
3. Trabajar a nivel de emulación con mayor cantidad de usuarios.
4. Generación de otro componente del laboratorio en la que se involucren herramientas de OAI, que ya se hayan perfeccionado en un futuro, ya que esta es una plataforma que está en constante evolución.
5. Para el componente de canales físicos LTE, automatizar el proceso de tratamiento de datos, con el objetivo de no enfocarse en la generación de tablas y gráficas, sino pasar directamente a los análisis de los resultados para hacer más eficiente el tiempo requerido para este componente.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Towards Open Cellular Ecosystem – OpenAirInterface,” 2017. [Online]. Available: http://www.openairinterface.org/?page_id=864. [Accessed: 29-Sep-2017].
- [2] F. Kaltenberger and R. Knopp, “OpenAirInterface 5G Training,” 2018.
- [3] “Openairltephysimul · Wiki · oai / openairinterface5G · GitLab,” 2017. [Online]. Available: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/wikis/OpenAirLTEPhySimul>. [Accessed: 05-Oct-2017].
- [4] “Openairlteemulation · Wiki · oai / openairinterface5G · GitLab,” 2017. [Online]. Available: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g/wikis/OpenAirLTEEmulation>. [Accessed: 05-Oct-2017].
- [5] “5G Strategic Areas – OpenAirInterface,” 2017. [Online]. Available: http://www.openairinterface.org/?page_id=1098. [Accessed: 29-Sep-2017].
- [6] M. Sesia, Stefania; T Oufik, Isaam; Baker, *The UMTS Long Term Evolution - Second Edition: From Theory To Practice*. 2011.
- [7] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. 2012.
- [8] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. 2013.
- [9] O. Comes, Ramón; Álvarez, Francisco; Casadevall, Fernando; Ferrús, Ramón; Pérez, Jordi; Sallent, *LTE: Nuevas Tendencias En Comunicaciones Móviles*. 2010.
- [10] P. Lescuyer and T. Lucidarme, *Evolved Packet System (Eps): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*. 2008.
- [11] O. Tinoco Gómez, P. P. Rosales López, and J. Salas Bacalla, “Criterios de selección de metodologías de desarrollo de software,” *Ind. Data*, vol. 13, no. 2, p. 070, 2014.



- [12] T. Specification, “TS 136 213 - V8.6.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 8.6.0 Release 8),” vol. 0, pp. 0–78, 2009.
- [13] S. J. Song Lingyang, *Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE*. 2011.
- [14] J. M. Rábanos, L. M. Tomás, and J. M. Salís, “Comunicaciones Móviles,” vol. 3, p. 720, 2015.
- [15] N. Nikaein, “OPENAIRINTERFACE SIMULATOR / EMULATOR,” 2015.
- [16] N. Nikaein, M. K. Marina, S. Manickam, A. Dawson, R. Knopp, and C. Bonnet, “OpenAirInterface: A Flexible Platform for 5G Research,” *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 44, no. 5, pp. 33–38, 2014.
- [17] T. O. Technologies, “Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos,” 2014.
- [18] T. Specification, G. Radio, and A. Network, “3gpp ts 36.101,” vol. 0, no. Release 8, 2009.



APÉNDICE A: INSTALACIÓN OAI

Realizar actualizaciones en el sistema operativo con los siguientes comandos:

- `sudo apt-get update`
- `sudo apt-get upgrade`

Configuración del *Kernel* y administración de energía

Al trabajar con la rama maestra de OAI, se requiere la distribución Ubuntu 14.04.3 LTS con *kernel* 3.19 de baja latencia:

- `sudo apt-get install linux-image-3.19.0-61-lowlatency linux-headers-3.19.0-61-lowlatency`

Se debe reiniciar el equipo para aplicar los cambios. Luego, al escribir `uname -a`, desplegará algo como:

- `Linux [Hostname] 3.19.0-61-lowlatency #69~14.04.1-Ubuntu SMP PREEMPT Thu Jun 9 10:15:00 UTC 2016 x86_64 x86_64 x86_64 GNU/Linux`

Se deben anular las características de administración de energía como estados de suspensión y escala de frecuencias desde la *BIOS* del computador. Además, deshabilitar la función de *Hyperthreading* y asegurarse que esté desactivado.

Chequear la frecuencia a la cual están trabajando las CPUs: `watch grep \"cpu MHz\" /proc/cpuinfo`.

```
Cada 2,0s: grep "cpu MHz" /proc/cpuinfo
cpu MHz      : 2700.000
cpu MHz      : 1600.000
cpu MHz      : 1800.000
cpu MHz      : 1800.000
```

Figura A. 1. CPUs a distintas frecuencias. Por los autores.



Si no están trabajando a su máxima frecuencia, los siguientes pasos son necesarios:

- Instalar *cpufrequtils*: `sudo apt-get install cpufrequtils`
- Editar el siguiente archivo (se debe crear si no existe): `sudo nano /etc/default/cpufrequtils`
- Agregar la siguiente línea: `GOVERNOR="performance"`

```
GNU nano 2.2.6      Archivo: /etc/default/cpufrequtils  
GOVERNOR="performance"
```

Figura A. 2. Asignación de perfil para frecuencia de procesadores. Por los autores.

- Guardar y salir.
- Deshabilitar el estado *ondemand*:
 - `sudo update-rc.d ondemand disable`
 - `sudo /etc/init.d/cpufrequtils restart`
- Comprobar que las CPUs están trabajando a su frecuencia máxima y se encuentran en estado *performance*:
 - `cpufreq-info`



```
oai@oai:~$ cpufreq-info
cpufrequtils 008: cpufreq-info (C) Dominik Brodowski 2004-2009
Report errors and bugs to cpufreq@vger.kernel.org, please.
analyzing CPU 0:
  driver: intel_pstate
  CPUs which run at the same hardware frequency: 0
  CPUs which need to have their frequency coordinated by software: 0
  maximum transition latency: 0.97 ms.
  hardware limits: 1.60 GHz - 3.90 GHz
  available cpufreq governors: performance, powersave
  current policy: frequency should be within 1.60 GHz and 3.90 GHz.
                   The governor "performance" may decide which speed to use
                   within this range.
  current CPU frequency is 3.40 GHz.
analyzing CPU 1:
  driver: intel_pstate
  CPUs which run at the same hardware frequency: 1
  CPUs which need to have their frequency coordinated by software: 1
  maximum transition latency: 0.97 ms.
  hardware limits: 1.60 GHz - 3.90 GHz
  available cpufreq governors: performance, powersave
  current policy: frequency should be within 1.60 GHz and 3.90 GHz.
                   The governor "performance" may decide which speed to use
                   within this range.
  current CPU frequency is 3.40 GHz.
analyzing CPU 2:
  driver: intel_pstate
  CPUs which run at the same hardware frequency: 2
  CPUs which need to have their frequency coordinated by software: 2
  maximum transition latency: 0.97 ms.
  hardware limits: 1.60 GHz - 3.90 GHz
  available cpufreq governors: performance, powersave
  current policy: frequency should be within 1.60 GHz and 3.90 GHz.
                   The governor "performance" may decide which speed to use
                   within this range.
  current CPU frequency is 3.40 GHz.
analyzing CPU 3:
  driver: intel_pstate
  CPUs which run at the same hardware frequency: 3
  CPUs which need to have their frequency coordinated by software: 3
  maximum transition latency: 0.97 ms.
  hardware limits: 1.60 GHz - 3.90 GHz
  available cpufreq governors: performance, powersave
  current policy: frequency should be within 1.60 GHz and 3.90 GHz.
                   The governor "performance" may decide which speed to use
                   within this range.
  current CPU frequency is 3.40 GHz.
```

Figura A. 3. Información de CPUs. Por los autores.

Ejecutar nuevamente el comando `watch grep \"cpu MHz\" /proc/cpuinfo` y observe si el equipo está trabajando a su máxima frecuencia.



```
Cada 2,0s: grep "cpu MHz" /proc/cpuinfo
cpu MHz      : 3400.000
cpu MHz      : 3400.000
cpu MHz      : 3400.000
cpu MHz      : 3400.000
```

Figura A. 4. CPUs a frecuencia máxima. Por los autores.

Deshabilitar los estados “p” y “c” agregando `intel_pstate=disable` en las opciones de arranque de Ubuntu, es decir, agregar `GRUB_CMDLINE_LINUX_DEFAULT="quiet intel_pstate=disable"` en `/etc/default/grub`, luego ejecutar:

- `sudo update-grub`.

Agregar `GRUB_CMDLINE_LINUX_DEFAULT="processor.max_cstate=1 intel_idle.max_cstate=0 idle=poll"` y adicionalmente comentar la línea `GRUB_HIDDEN_TIMEOUT=0` si no lo está, para que al iniciar el computador no inicie con el *kernel* por defecto. opcionalmente



```
1 # If you change this file, run 'update-grub' afterwards to update
2 # /boot/grub/grub.cfg.
3 # For full documentation of the options in this file, see:
4 #   info -f grub -n 'Simple configuration'
5
6 GRUB_DEFAULT=0
7 #GRUB_HIDDEN_TIMEOUT=0
8 GRUB_HIDDEN_TIMEOUT_QUIET=true
9 GRUB_TIMEOUT=10
10 GRUB_DISTRIBUTOR=`lsb_release -i -s 2> /dev/null || echo Debian`
11 GRUB_CMDLINE_LINUX_DEFAULT="quiet splash"
12 GRUB_CMDLINE_LINUX=""
13 GRUB_CMDLINE_LINUX_DEFAULT="quiet intel_pstate=disable"
14 GRUB_CMDLINE_LINUX_DEFAULT="processor.max_cstate=1 intel_idle.max_cstate=0 idle=poll"
15
16 # Uncomment to enable BadRAM filtering, modify to suit your needs
17 # This works with Linux (no patch required) and with any kernel that obtains
18 # the memory map information from GRUB (GNU Mach, kernel of FreeBSD ...)
19 #GRUB_BADRAM="0x01234567,0xfefefefe,0x89abcdef,0xefefefef"
20
21 # Uncomment to disable graphical terminal (grub-pc only)
22 #GRUB_TERMINAL=console
23
24 # The resolution used on graphical terminal
25 # note that you can use only modes which your graphic card supports via VBE
26 # you can see them in real GRUB with the command `vbeinfo`
27 #GRUB_GFXMODE=640x480
28
29 # Uncomment if you don't want GRUB to pass "root=UUID=xxx" parameter to Linux
30 #GRUB_DISABLE_LINUX_UUID=true
31
32 # Uncomment to disable generation of recovery mode menu entries
33 #GRUB_DISABLE_RECOVERY="true"
34
35 # Uncomment to get a beep at grub start
36 #GRUB_INIT_TUNE="480 440 1"
```

Figura A. 5. Archivo correspondiente a las opciones del grub. Por los autores.

Agregar `blacklist intel_powerclamp` al final de `/etc/modprobe.d/blacklist.conf`, para poner en la lista negra el módulo `intel_powerclan`. Si el archivo no existe se debe crear y adicional la línea.



```
21 # snd_intel8x0m can interfere with snd_intel8x0, doesn't seem to support much
22 # hardware on its own (Ubuntu bug #2011, #6810)
23 blacklist snd_intel8x0m
24
25 # Conflicts with dvb driver (which is better for handling this device)
26 blacklist snd_aw2
27
28 # causes failure to suspend on HP compaq nc6000 (Ubuntu: #10306)
29 blacklist i2c_i801
30
31 # replaced by p54pci
32 blacklist prism54
33
34 # replaced by b43 and ssb.
35 blacklist bcm43xx
36
37 # most apps now use garmin usb driver directly (Ubuntu: #114565)
38 blacklist garmin_gps
39
40 # replaced by asus-laptop (Ubuntu: #184721)
41 blacklist asus_acpi
42
43 # low-quality, just noise when being used for sound playback, causes
44 # hangs at desktop session start (Ubuntu: #246969)
45 blacklist snd_pcsp
46
47 # ugly and loud noise, getting on everyone's nerves; this should be done by a
48 # nice pulseaudio bing (Ubuntu: #77010)
49 blacklist pcspkr
50
51 # EDAC driver for amd76x clashes with the agp driver preventing the aperture
52 # from being initialised (Ubuntu: #297750). Blacklist so that the driver
53 # continues to build and is installable for the few cases where its
54 # really needed.
55 blacklist amd76x_edac
56 blacklist intel_powerclamp
```

Figura A. 6. Archivo blacklist.conf. Por los autores.

Instalar la herramienta *i7z*:

- `sudo apt-get install i7z`

Reiniciar el equipo y ejecutar el siguiente el comando:

- `sudo i7z`



```
Cpu speed from cpufreq 2658.00MHz
cpufreq might be wrong if cpufreq is enabled. To guess correctly try estimating via tsc
Linux's inbuilt cpu_khz code emulated now
True Frequency (without accounting Turbo) 2658 MHz
CPU Multiplier 20x || Bus clock frequency (BCLK) 132.90 MHz

Socket [0] - [physical cores=4, logical cores=4, max online cores ever=4]
TURBO ENABLED on 4 Cores, Hyper Threading OFF
Max Frequency without considering Turbo 2790.90 MHz (132.90 x [21])
Max TURBO Multiplier (if Enabled) with 1/2/3/4 Cores is 24x/24x/21x/21x
Real Current Frequency 2658.00 MHz [132.90 x 20.00] (Max of below)
Core [core-id] :Actual Freq (Mult.) C0% Halt(C1)% C3 % C6 % Temp
Core 1 [0]: 2658.00 (20.00x) 100 0 0 0 58
Core 2 [1]: 2658.00 (20.00x) 100 0 0 0 57
Core 3 [2]: 2658.00 (20.00x) 100 0 0 0 58
Core 4 [3]: 2658.00 (20.00x) 100 0 0 0 57

C0 = Processor running without halting
C1 = Processor running with halts (States >C0 are power saver)
C3 = Cores running with PLL turned off and core cache turned off
C6 = Everything in C3 + core state saved to last level cache
Above values in table are in percentage over the last 1 sec
[core-id] refers to core-id number in /proc/cpuinfo
'Garbage Values' message printed when garbage values are read
Ctrl+C to exit
```

Figura A. 7. Información de núcleos con i7z. Por los autores.

La CPU no debe cambiar su frecuencia en más de 1 o 2 hertz y no debe estar en ningún estado C distinto a C0. Si la frecuencia de la CPU está variando o se encuentra solo en estado C0, se debe arreglar este problema, de lo contrario habrá inconvenientes de tiempo real con eNB, UE y RRC.

Obtener el repositorio de OAI

El software de OAI se puede obtener del servidor de GitLab. Es necesario tener un cliente Git para realizar el proceso. Se debe instalar Git con los siguientes comandos:

- `sudo apt-get update`
- `sudo apt-get install subversion git`

Configurar Git con un nombre de usuario e *email*:

- `git config --global user.name "Your Name"`
- `git config --global user.email "Your email address"`

Agregar un certificado de gitlab.eurecom.fr:



- `sudo echo -n | openssl s_client -showcerts -connect gitlab.eurecom.fr:443 2>/dev/null | sed -ne '/-BEGIN CERTIFICATE-/,/-END CERTIFICATE-/p' | sudo tee -a /etc/ssl/certs/ca-certificates.crt`

Desactivar la verificación del certificado si no se tiene acceso al directorio /etc/ssl:

- `git config --global http.sslverify false`

Crear una carpeta para guardar toda la información relacionada con OAI:

- `mkdir oai`

Descargar los repositorios de OAI:

- `git clone https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g.git`
- `git clone https://gitlab.eurecom.fr/oai/openair-cn.git`
- `git clone https://gitlab.eurecom.fr/oai/xtables-addons-oai.git`

Instalación y configuración de MySQL y phpmyadmin

Instalar mysql: `sudo apt-get install mysql-server mysql-common mysql-client.`

Ingresar la contraseña para el usuario *root* de MySQL, aunque no es obligatoria.

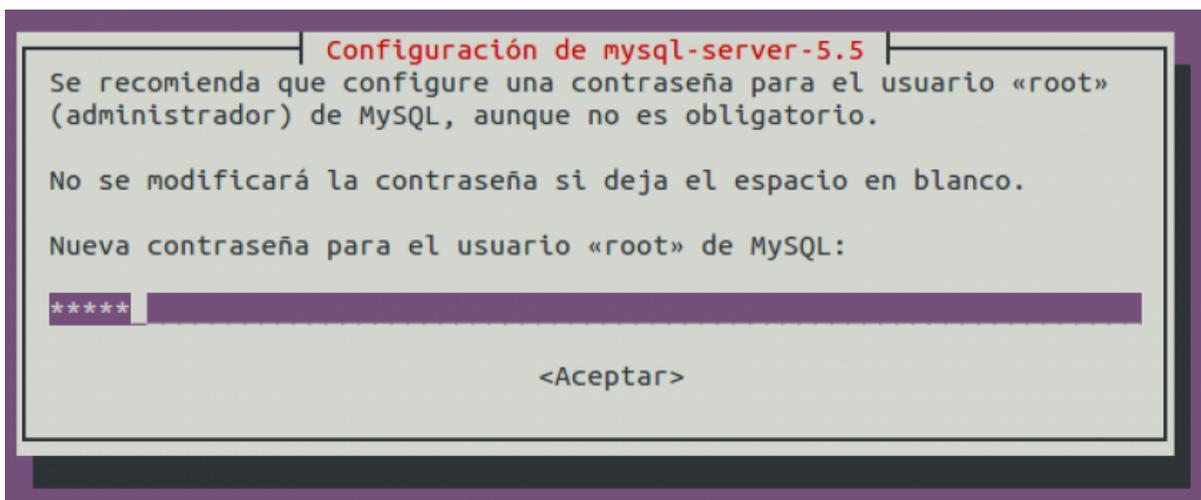


Figura A. 8. Instalación de MySQL. Por los autores.

Confirmar la contraseña.

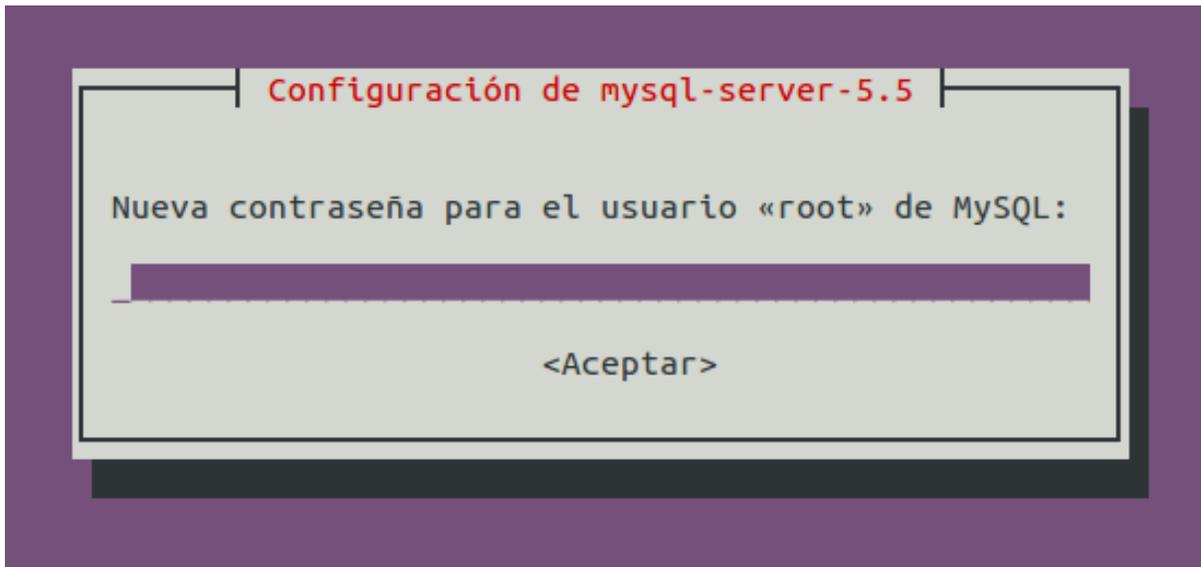


Figura A. 9. Confirmación de contraseña para usuario root. Por los autores.

Reiniciar MySQL:

- `sudo /etc/init.d/mysql restart`

Instalar *phpmyadmin*:

- `sudo apt-get install phpmyadmin`

Escoger la opción Sí para la configuración de la base de datos con *dbconfig-common*.

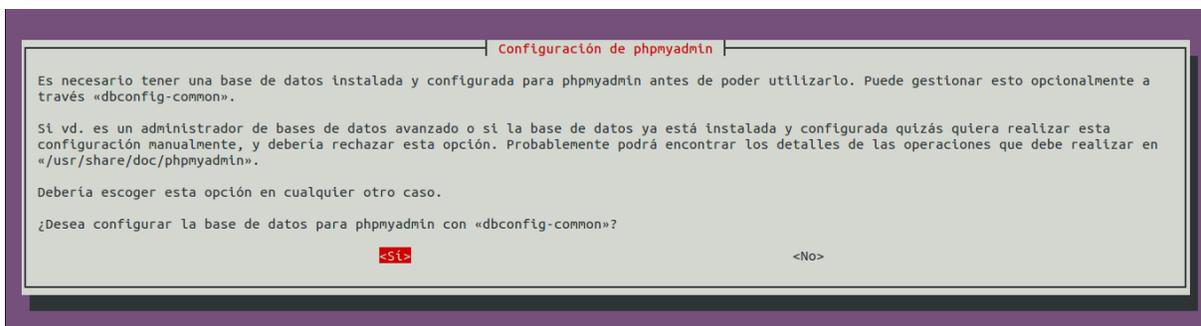


Figura A. 10. Configuración de phpmyadmin. Por los autores.

Ingresar contraseña para el usuario del administrador de la base de datos.

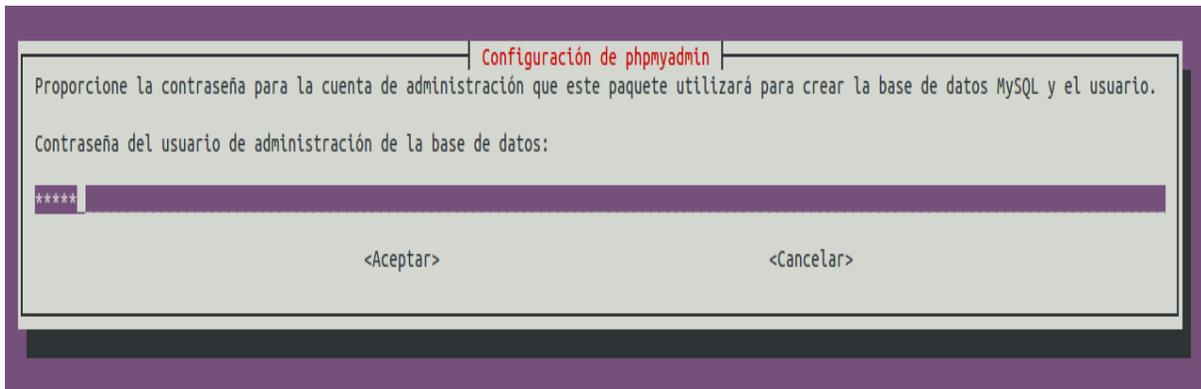


Figura A. 11. Creación de contraseña para usuario de la base de datos. Por los autores.

Ingresar contraseña para que *phpmyadmin* se registre con el servidor de base de datos.

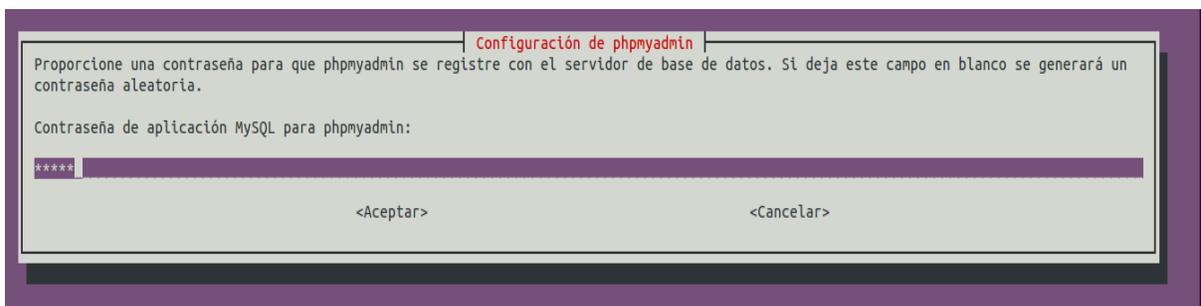


Figura A. 12. Creación de contraseña de MySQL para phpmyadmin. Por los autores.

Confirmar la contraseña anterior.

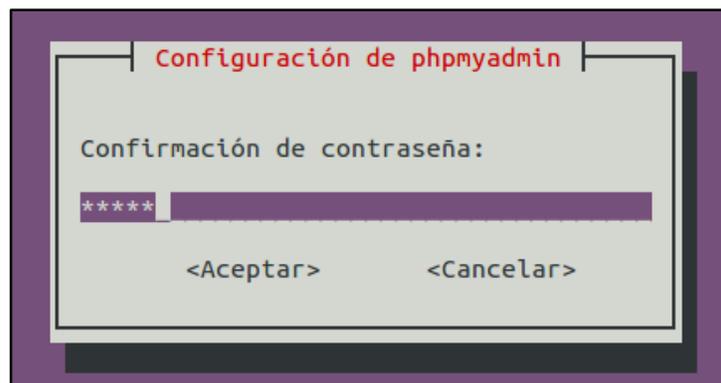


Figura A. 13. Confirmación de contraseña de MySQL. Por los autores.

Escoger el servidor web *apache2*.

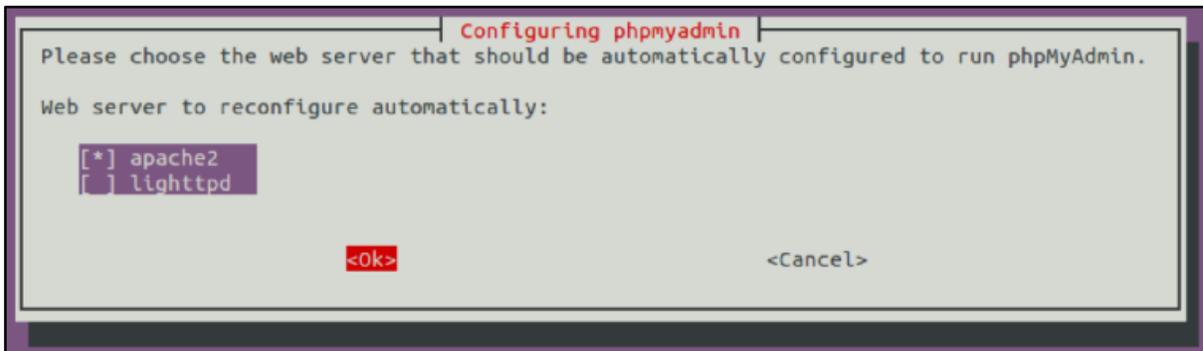


Figura A. 14. Elección del servidor web para phpmyadmin. Por los autores.

- `sudo ln -s /etc/phpmyadmin/apache.conf /etc/apache2/conf-available/phpmyadmin.conf`
- `sudo a2enconf phpmyadmin`
- `sudo /etc/init.d/apache2 reload`

Instalación de *wireshark*

- `sudo apt-get install wireshark`

Posiblemente se indique que no hay interfaces para realizar la captura.

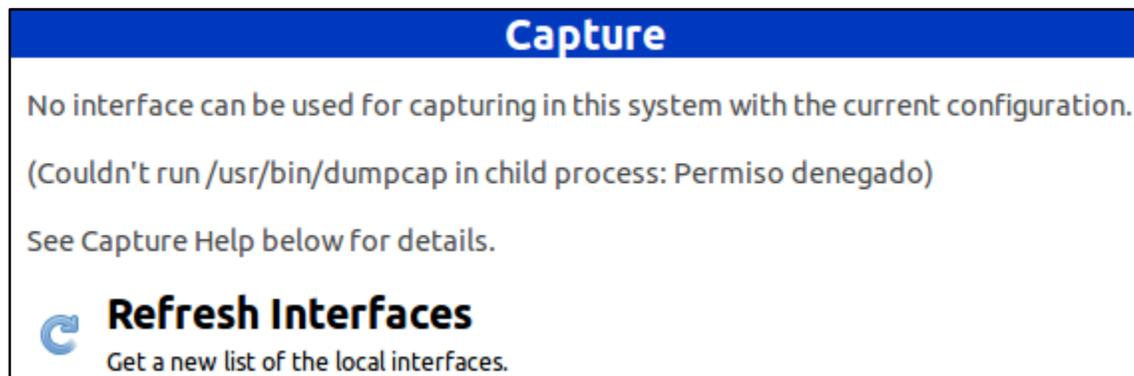


Figura A. 15. Inconveniente wireshark. Por los autores.

Esto se debe a un problema de permisos. Se puede ingresar como superusuario `sudo wireshark`. Luego, saldrá una ventana de diálogo indicando que se está utilizando el usuario *root* para ejecutar el programa y esta no es la mejor opción porque todavía los usuarios no *root* no pueden capturar tráfico.

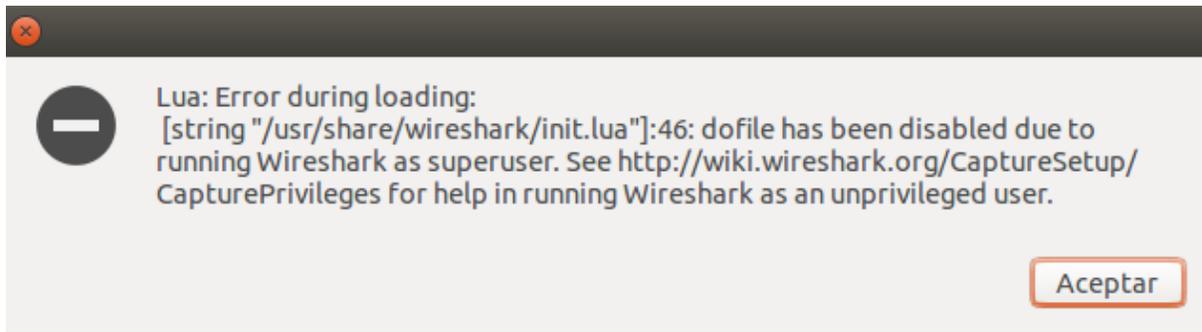


Figura A. 16. Aviso por uso de superusuario. Por los autores.

Al oprimir el botón aceptar se mostrará un nuevo cuadro indicando que correr la aplicación como usuario *wireshark* puede ser peligroso e indica documentación de cómo se puede ejecutar *wireshark* para usuarios no *root*.

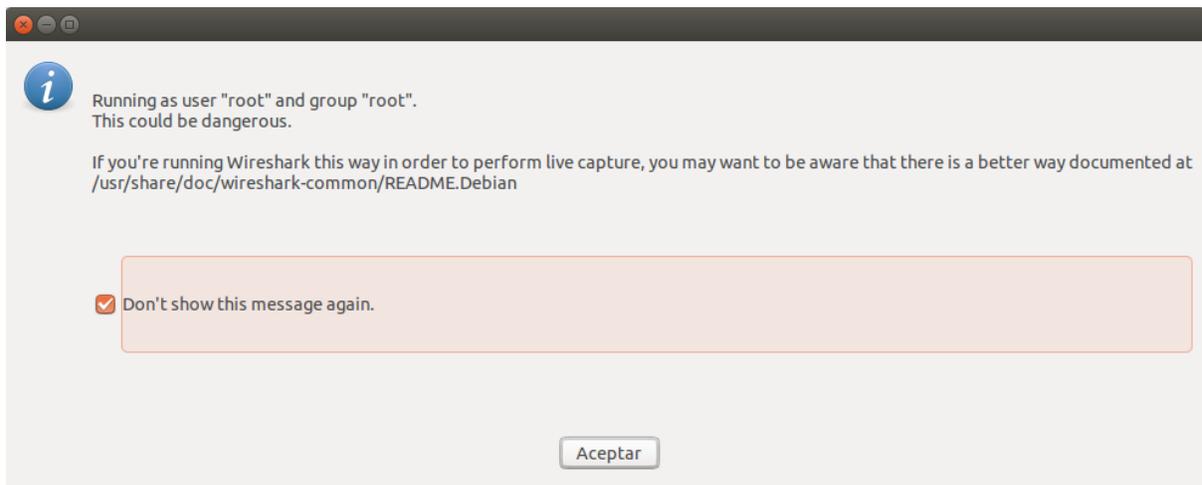


Figura A. 17. Aviso de uso peligroso. Por los autores.

Al oprimir el botón aceptar se mostrará la lista de interfaces disponibles para la captura de tráfico.

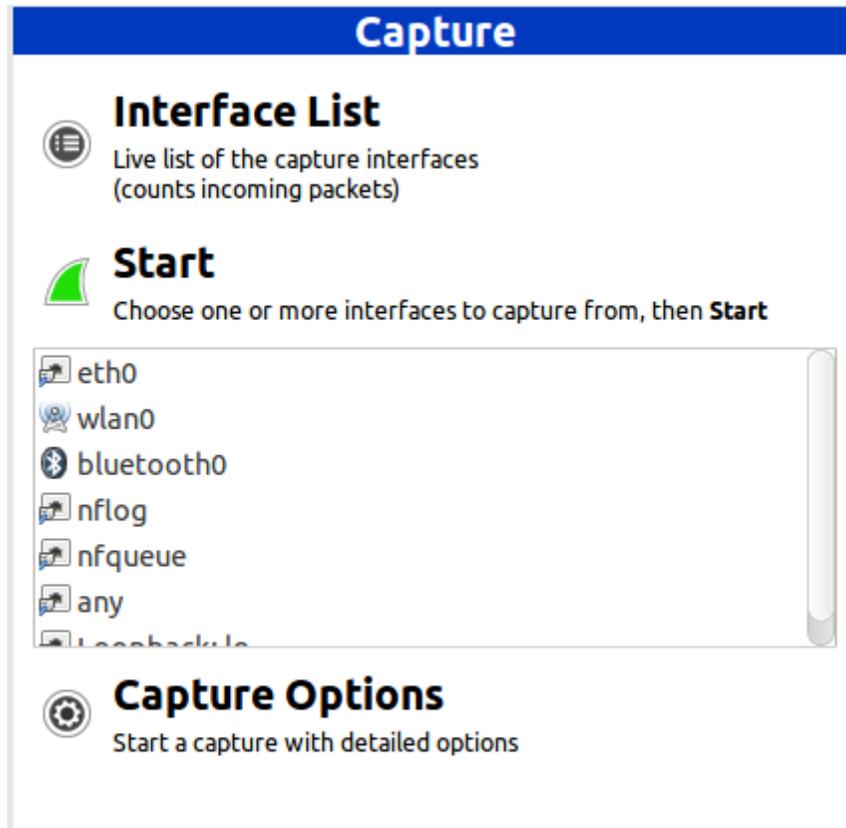


Figura A. 18. Interfaces en wireshark usando usuario root. Por los autores.

Debido a que no es recomendable capturar tráfico utilizando el usuario root, se debe hacer una reconfiguración para permitir capturar tráfico a los demás usuarios.

Reconfigurar el paquete *wireshark-common*:

- `sudo dpkg-reconfigure wireshark-common`

Aceptar la opción del cuadro de diálogo en el cual se indica que los usuarios no *root* puedan capturar paquetes.

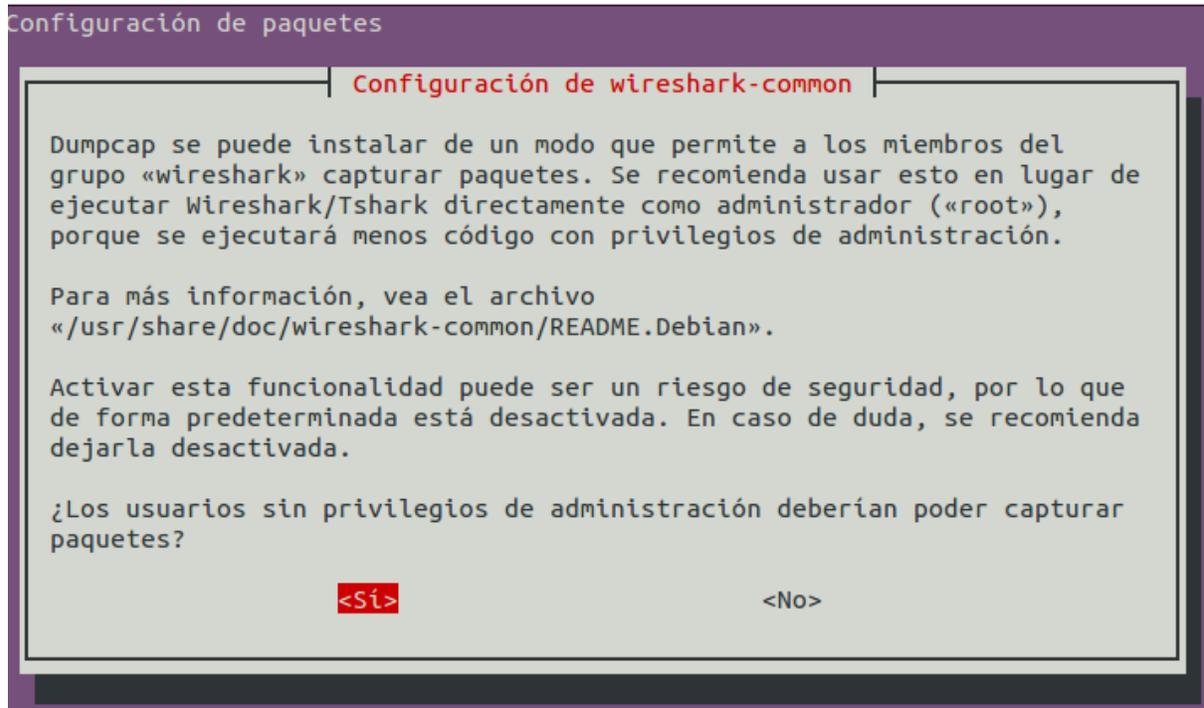


Figura A. 19. Configuración del paquete wireshark-common. Por los autores.

Se debe crear un grupo llamado *wireshark* para que todos los usuarios que pertenezcan a él puedan capturar paquetes. Con `id` se puede ver si el usuario con el cual se inició sesión pertenece al grupo *wireshark*

```
hanier@hanier:~$ id
uid=1000(hanier) gid=1000(hanier) grupos=1000(hanier),4(adm),24(cdrom),27(sudo),
30(dip),46(plugdev),108(lpadmin),124(sambashare)
```

Figura A. 20. Grupo wireshark sin crear. Por los autores.

Ya que el usuario no pertenece al grupo *wireshark* se usa el comando `sudo usermod -a -G wireshark nombre_usuario`.

Para que lo anterior tenga efecto se debe iniciar una nueva sesión y volver a ejecutar el comando `id`

```
hanier@hanier:~$ id
uid=1000(hanier) gid=1000(hanier) grupos=1000(hanier),4(adm),24(cdrom),27(sudo),
30(dip),46(plugdev),108(lpadmin),124(sambashare),126(wireshark),131(libvirt)
```

Figura A. 21. Grupo wireshark creado. Por los autores.

El usuario con el cual se está trabajando ya pertenece al grupo *wireshark* por lo cual la captura de tráfico puede iniciarse.



Instalación del kernel 4.7.1

La instalación del kernel 4.7.1 es necesaria para el correcto funcionamiento de la rama de desarrollo de OAI:

- `sudo apt-get install xz-utils build-essential wget libncurses5-dev libssl-dev`
- `sudo apt-get build-dep linux-image-$(uname -r) ncurses-bin`

Descargar e instalar el *kernel* al PC:

- `wget https://cdn.kernel.org/pub/linux/kernel/v4.x/linux-4.7.1.tar.xz`
- `unxz linux-4.7.1.tar.xz`
- `tar -xovf linux-4.7.1.tar`

Ingresar a la carpeta que acaba de descomprimir:

- `cd linux-4.7.1`

Dirigirse al documento *Changes* ubicado en la carpeta *Documentation*:

- `sudo gedit /Documentation/Changes`

Revisar la versión mínima de cada paquete necesario para la compilación del *kernel*.

Regresar a la carpeta `linux-4.7.1` y digitar `make menuconfig`. Asegurarse que la ventana de comandos abarque toda la pantalla ya que de lo contrario no se desplegará el menú.



```
[*] 64-bit kernel
  General setup --->
[*] Enable loadable module support --->
[*] Enable the block layer --->
  Processor type and features --->
  Power management and ACPI options --->
  Bus options (PCI etc.) --->
  Executable file formats / Emulations --->
< > Volume Management Device Driver
[*] Networking support --->
  Device Drivers --->
  Firmware Drivers --->
  File systems --->
  Kernel hacking --->
  Security options --->
  *- Cryptographic API --->
  *- Virtualization --->
  Library routines --->
```

Figura A. 22. Menú de configuración del kernel - parte 1. Por los autores.

Ubicarse en *Device Drivers*.

```
[*] 64-bit kernel
  General setup --->
[*] Enable loadable module support --->
[*] Enable the block layer --->
  Processor type and features --->
  Power management and ACPI options --->
  Bus options (PCI etc.) --->
  Executable file formats / Emulations --->
< > Volume Management Device Driver
[*] Networking support --->
  Device Drivers --->
  Firmware Drivers --->
  File systems --->
  Kernel hacking --->
  Security options --->
  *- Cryptographic API --->
  *- Virtualization --->
  Library routines --->
```

Figura A. 23. Menú de configuración del kernel - parte 2. Por los autores.



Una vez se haya seleccionado la opción *Device Drivers*, ubicarse en *Network device support*.

```
Generic Driver Options --->
Bus devices ----
[*] Connector - unified userspace <-> kernelspace linker --->
<M> Memory Technology Device (MTD) support --->
[ ] Device Tree and Open Firmware support ----
<M> Parallel port support --->
-* Plug and Play support --->
[*] Block devices --->
<M> NVM Express block device
[ ] SCSI emulation for NVMe device nodes
Misc devices --->
< > ATA/ATAPI/MFM/RLL support (DEPRECATED) ----
SCSI device support --->
<*> Serial ATA and Parallel ATA drivers (libata) --->
[*] Multiple devices driver support (RAID and LVM) --->
<M> Generic Target Core Mod (TCM) and ConfigFS Infrastructure --->
[*] Fusion MPT device support --->
IEEE 1394 (FireWire) support --->
[*] Macintosh device drivers --->
-* Network device support --->
[ ] Open-Channel SSD target support ----
Input device support --->
Character devices --->
I2C support --->
[*] SPI support --->
<M> SPMI support ----
<M> HSI support --->
PPS support --->
PTP clock support --->
Pin controllers --->
-* GPIO Support --->
{M} Dallas's 1-wire support --->
↑(+)
```

<Select> < Exit > < Help > < Save > < Load >

Figura A. 24. Menú de configuración del kernel - parte 3. Por los autores.

Dentro de *Network device support* buscar la opción GTP-U.



```
--- Network device support
[*] Network core driver support
<M> Bonding driver support
<M> Dummy net driver support
<M> EQL (serial line load balancing) support
[*] Fibre Channel driver support
<M> Intermediate Functional Block support
<M> Ethernet team driver support --->
<M> MAC-VLAN support
<M> MAC-VLAN based tap driver
<M> IP-VLAN support
<M> Virtual eXtensible Local Area Network (VXLAN)
<M> Generic Network Virtualization Encapsulation
< > GPRS Tunneling Protocol datapath (GTP-U)
< > IEEE 802.1AE MAC-level encryption (MACsec)
<M> Network console logging support
[*] Dynamic reconfiguration of logging targets
<M> RapidIO Ethernet over messaging driver support
(128) Number of outbound queue entries
(128) Number of inbound queue entries
<*> Universal TUN/TAP device driver support
[ ] Support for cross-endian vnet headers on little-endian kernels
<M> Virtual ethernet pair device
<*> Virtio network driver
<M> Virtual netlink monitoring device
<M> ARCnet support --->
[*] ATM drivers --->
*** CAIF transport drivers ***
<M> CAIF TTY transport driver
<M> CAIF SPI transport driver for slave interface
[ ] Next command and length in start of frame
<M> CAIF HSI transport driver
L(+)
```

Figura A. 25. Selección del protocolo GTP-U. Por los autores.

Presionar la letra M y seleccionar la opción save para guardar



```
-- Network device support
[*] Network core driver support
<M> Bonding driver support
<M> Dummy net driver support
<M> EQL (serial line load balancing) support
[*] Fibre Channel driver support
<M> Intermediate Functional Block support
<M> Ethernet team driver support --->
<M> MAC-VLAN support
<M> MAC-VLAN based tap driver
<M> IP-VLAN support
<M> Virtual extensible Local Area Network (VXLAN)
<M> Generic Network Virtualization Encapsulation
<M> GPRS Tunneling Protocol datapath (GTP-U)
< > IEEE 802.1AE MAC-level encryption (MACsec)
<M> Network console logging support
[*] Dynamic reconfiguration of logging targets
<M> RapidIO Ethernet over messaging driver support
(128) Number of outbound queue entries
(128) Number of inbound queue entries
<*> Universal TUN/TAP device driver support
[ ] Support for cross-endian vnet headers on little-endian kernels
<M> Virtual ethernet pair device
<*> Virtio network driver
<M> Virtual netlink monitoring device
<M> ARCnet support --->
[*] ATM drivers --->
*** CAIF transport drivers ***
<M> CAIF TTY transport driver
<M> CAIF SPI transport driver for slave interface
[ ] Next command and length in start of frame
<M> CAIF HSI transport driver
L(+)
```

<Select> < Exit > < Help > < Save > < Load >

Figura A. 26. Activación del módulo GTP-U. Por los autores.

Luego aparecerá una ventana de confirmación `.config`, seleccionar `ok`.

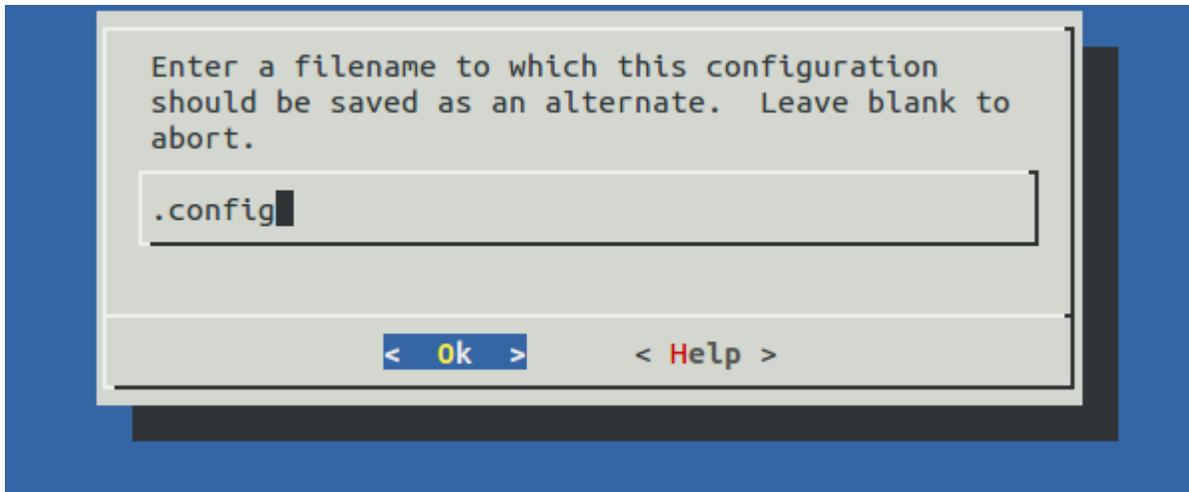


Figura A. 27. Confirmación de activación del módulo GTP-U. Por los autores.

Seleccionar *Exit*.

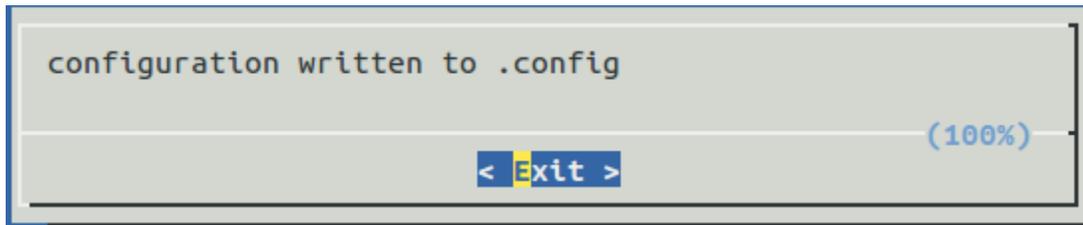


Figura A. 28. Salida de menú de configuración del kernel. Por los autores.

Salir de la configuración usando la tecla *Esc* hasta llegar a la ventana de comandos.

Dentro de la carpeta linux-4.7.1 ejecutar el comando `make -j`nproc``, esta acción puede tardar alrededor de 1 hora.

Luego, ejecutar los siguientes comandos para finalizar la instalación.

- `sudo make modules_install`
- `sudo make install`

Reiniciar el PC y corroborar que en las opciones del arranque *grub* aparezca la opción del *kernel* 4.7.1.

Instalación de paquetes y compilación de ejecutables

- Ingresar al directorio de openairinterface: `~/openairinterface5g`.



- Habilitar las variables de entorno: `source oaienv`.
- Situarse en la carpeta cmake_targets: `cd cmake_targets`
- Instalar los paquetes necesarios para oai: `./build_oai -c -C -l --install-system-files --eNB -w USRP --UE --install-optional-packages -x`.
- Compilar los simuladores unitarios: `./build_oai --phy_simulators -r Rel8`.
- Compilar el simulador oaisim sin soporte S1: `./build_oai --oaisim --noS1 -r Rel8`.
- Compilar el simulador oaisim: `./build_oai --oaisim --UE -r Rel8`.
- Compilar el eNB: `./build_oai --eNB -w USRP -r Rel8`.
- Compilar el UE: `./build_oai --UE -w USRP -r Rel8`.

APÉNDICE B: CANALES FÍSICOS Y DE TRANSPORTE LTE

- Ingresar a la carpeta: `cd ~/openairinterface5g/cmake_targets/lte-simulators/build`
- Listar los archivos de la carpeta: `ls`

```
hanier@hanier:~/openairinterface/openairinterface5g/cmake_targets/lte-simulators/build$ ls
CMakeCache.txt      dlsim      libLFDS.a      libSIMU.a      mbmssim      prachsim
CMakeFiles          dlsim_tm4  libPHY.a       libUTIL.a      pbchsim      pucchsim
cmake_install.cmake libLFDS7.a  libSCHED_LIB.a Makefile        pdcchsim      ulsim
```

Figura B. 1. Archivos en carpeta build. Por los autores.

- Realizar las simulaciones estipuladas de manera similar a la siguiente:

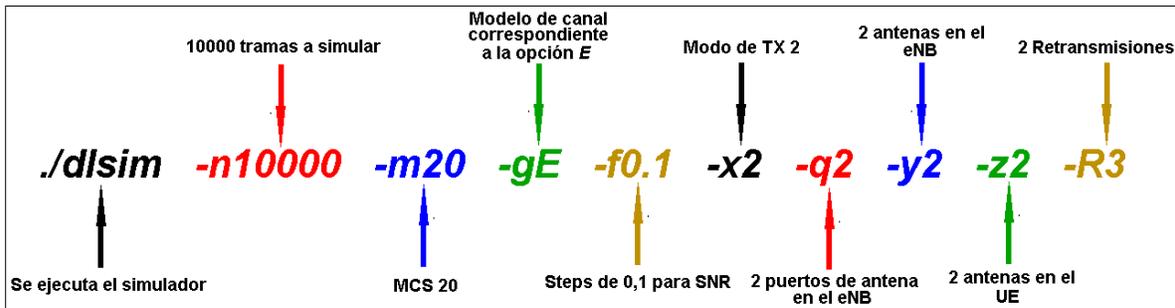


Figura B. 2. Ejemplo de simulación para canales físicos y de transporte. Por os autores.



APÉNDICE C: ESCENARIOS SIN INTERFAZ S1

- Ingresar al directorio `~/openairinterface5g`
- Verificar la versión del módulo `openairinterface5g`: `git checkout v0.5.2`
- Compilar el simulador oaisim sin soporte S1: `./build_oai --oaisim --noS1 -r Rel8`
- Ingresar a la carpeta `tools`: `cd ~/openairinterface5g/cmake_targets/tools`
- Poner en marcha el script `run_enb_ue_virt_noS1` para subir las interfaces virtuales: `run_enb_ue_virt_noS1`
- Ejecutar el comando `ifconfig` y revisar la configuración de interfaces mostradas en el dispositivo, se podrá observar que se cuenta con las interfaces `oai0` y `oai1`, las cuales son para el eNB y UE respectivamente.

```
oai0      Link encap:AMPR NET/ROM  direcciónHW 01:00:00:00:00:00
          Direc. inet:10.0.1.1  Difus.:10.0.1.255  Másc:255.255.255.0
          ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO NOARP MULTICAST  MTU:1500  Métrica:1
          Paquetes RX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
          Paquetes TX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
          colisiones:0 long.colaTX:100
          Bytes RX:0 (0.0 B)  TX bytes:0 (0.0 B)

oai1      Link encap:AMPR NET/ROM  direcciónHW 01:00:00:00:00:00
          Direc. inet:10.0.2.2  Difus.:10.0.2.255  Másc:255.255.255.0
          ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO NOARP MULTICAST  MTU:1500  Métrica:1
          Paquetes RX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
          Paquetes TX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
          colisiones:0 long.colaTX:100
          Bytes RX:0 (0.0 B)  TX bytes:0 (0.0 B)
```

Figura C. 1. Interfaces `oai0` y `oai1`. Por los autores.

- Realizar un ping a las interfaces antes mencionadas:



```
hanier@hanier:~/openairinterface/openairinterface5g/cmake_targets/tools$ ping 10.0.1.1
PING 10.0.1.1 (10.0.1.1) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.090 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.098 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.101 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=4 ttl=64 time=0.074 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=5 ttl=64 time=0.103 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=6 ttl=64 time=0.100 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=7 ttl=64 time=0.120 ms
^C
--- 10.0.1.1 ping statistics ---
7 packets transmitted, 7 received, 0% packet loss, time 6001ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.074/0.098/0.120/0.012 ms
hanier@hanier:~/openairinterface/openairinterface5g/cmake_targets/tools$ ping 10.0.2.2
PING 10.0.2.2 (10.0.2.2) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.0.2.2: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.105 ms
64 bytes from 10.0.2.2: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.100 ms
64 bytes from 10.0.2.2: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.121 ms
64 bytes from 10.0.2.2: icmp_seq=4 ttl=64 time=0.162 ms
64 bytes from 10.0.2.2: icmp_seq=5 ttl=64 time=0.092 ms
^C
--- 10.0.2.2 ping statistics ---
5 packets transmitted, 5 received, 0% packet loss, time 4005ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.092/0.116/0.162/0.024 ms
```

Figura C. 2. Ping entre interfaces. Por los autores.

- Realizar un ping del eNB al UE.

```
hanier@hanier:~/openairinterface/openairinterface5g/cmake_targets/tools$ ping 10.0.1.1 -m 1 -I 10.0.2.2
PING 10.0.1.1 (10.0.1.1) from 10.0.2.2 : 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.121 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.104 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.101 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=4 ttl=64 time=0.122 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=5 ttl=64 time=0.068 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=6 ttl=64 time=0.105 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=7 ttl=64 time=0.101 ms
64 bytes from 10.0.1.1: icmp_seq=8 ttl=64 time=0.099 ms
^C
--- 10.0.1.1 ping statistics ---
8 packets transmitted, 8 received, 0% packet loss, time 6999ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.068/0.102/0.122/0.019 ms
```

Figura C. 3. Ping del eNB al UE. Por los autores.

Dirigirse a la ruta `~/openairinterface5g/targets/bin` y poner en marcha el ejecutable `sin soporte` para S1: `sudo -E ./oaisim_noS1.Rel8 -O ~/oai/openairinterface5g/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-CONF/CONF/enb.band7.generic.oaisim.local_no_mme.conf -T m2m -F`

Para una mejor visualización de los mensajes entre las entidades utilizar `wireshark`.



APÉNDICE D: ESCENARIO CON INTERFAZ S1 SOBRE MISMO EQUIPO

Para ejecutar este escenario se debe iniciar con el *kernel 3.19 lowlatency*.

Configurar el FQDN en el archivo *hosts* de acuerdo al nombre de usuario y dominio local: `sudo gedit /etc/hosts`

```
1 127.0.0.1 localhost
2 127.0.1.1 hanier.openair4G.eur hanier
```

Figura D. 1. Configuración de FQDN. Por los autores.

Guardar el archivo y reiniciar el equipo para hacer efectivos los cambios, luego, abrir un terminal y digitar el comando `hostname -f`, que mostrará el FQDN correspondiente:

```
hanier@hanier:~$ hostname -f
hanier.openair4G.eur
```

Figura D. 2. Información de host. Por los autores.

Para la compilación por primera vez de *openair-cn* se debe realizar la instalación con la rama maestra, esto debido a que el *OPc* generado con esta rama coincide con la compilación de *OASIM*:

- Ingresar a la ruta: `cd ~/openair-cn/SCRIPTS`
- Construir el ejecutable hss: `./build_hss -i -c`.

Editar el archivo *hss.conf*.

```
21 HSS :
22 {
23 ## MySQL mandatory options
24 MYSQL_server = "127.0.0.1";      # HSS S6a bind address
25 MYSQL_user   = "root";          # Database server login
26 MYSQL_pass   = "grial";        # Database server password
27 MYSQL_db     = "oai_db";        # Your database name
28
29 ## HSS options
30 OPERATOR_key = "1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3";
31 #OPERATOR_key = "11111111111111111111111111111111";
32
33 RANDOM = "true";
34
35 ## Freediameter options
36 FD_conf = "/usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss_fd.conf";
37 };
```

Figura D. 3. Archivo HSS editado. Por los autores.

Realizar la compilación del HSS: `./build_hss -c`

Ingresa al *localhost* <http://127.0.0.1/phpmyadmin>, las bases de datos asociadas se muestran a continuación:

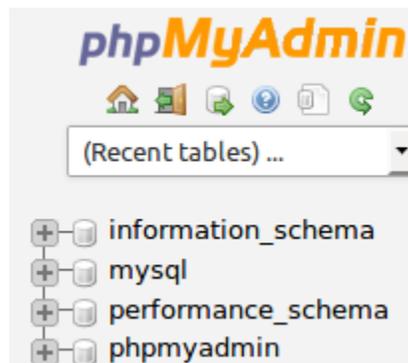


Figura D. 4. Bases de datos de localhost por defecto. Por los autores.

Si la base de datos *oai_db* no se encuentra, se debe crear:

- `./hss_db_create 127.0.0.1 root grial root grial oai_db`

```
eutran@eutran:~/oai/openair-cn/SCRIPTS$ ./hss_db_create 127.0.0.1 root grial root
grial oai_db
HSS: root permissions creation succeeded
HSS: oai_db creation succeeded
HSS: oai_db tables creation succeeded
```

Figura D. 5. Creación de base de datos oai_db. Por los autores.

Ingresar nuevamente al *localhost* y revisar las bases de datos asociadas.

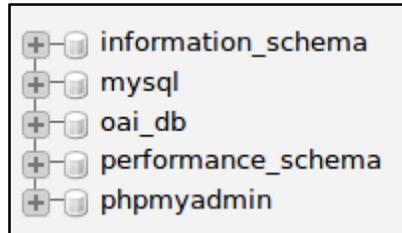


Figura D. 6. Bases de datos de localhost. Por los autores.

Ingresar a la tabla *users* de la base de datos *oai_db* y realizar una búsqueda ingresando el IMSI del UE. Se observa que el *OPc* coincide con el generado en la compilación de *OAISIM*.

imsi IMSI is the main reference key.	mmeidentity_key UE security key	OPc Can be computed by HSS
208930100001111	1 8baf473f2f8fd09487cccbd7097c6862	e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c

Figura D. 7. Tabla users. Por los autores.

```
usim_api_k: 8b af 47 3f 2f 8f d0 94 87 cc cb d7 09 7c 68 62
opc       : e7 34 f8 73 40 07 d6 c5 ce 7a 05 08 80 9e 7e 9c
```

Figura D. 8. key y OPc generados en la compilación de OAISIM. Por los autores.

Una vez se hayan generado los parámetros correctamente, se procede a realizar lo específico del escenario:

- Ingresar al directorio de *openair-cn*: `~/openair-cn`
- Habilitar las variables de entorno: `source oaienv`
- Verificar la versión del módulo *openair-cn*, puede escoger entre las dos que se mencionan a continuación:



- `git checkout v0.3.2`
- `git checkout -b groupakacn 1f905b800d8d7398f974741be9c9cf3abe75ad18`
- Situarse en la carpeta SCRIPTS: `cd SCRIPTS`
- Construir el ejecutable hss: `./build_hss -i -c`
- Construir el ejecutable epc: `./build_epc -i -c`

Revisar la configuración del archivo `CMakeLists.txt` ubicado en la ruta `~/openair-cn/BUILD/HSS`, por defecto este archivo tiene la siguiente configuración:

```
set(MYSQL_server "127.0.0.1" CACHE STRING "Database server IP address")
set(MYSQL_admin root CACHE STRING "Database admin login")
set(MYSQL_admin_pass linux CACHE STRING "Database admin password")
set(MYSQL_user hssadmin CACHE STRING "Database username login")
set(MYSQL_pass admin CACHE STRING "Database username password")
set(MYSQL_db oai_db CACHE STRING "Database name")
set(TRANSPORT_option "#No_TCP" CACHE STRING "No_TCP or No_SCTP or comment")
set(TRANSPORT_PREFER_TCP_option "#Prefer_TCP" CACHE STRING "Prefer_TCP or comment")
set(AppServThreads 2 CACHE STRING "FreeDiameter AppServThreads count")
set(OPERATOR_key "" CACHE STRING "LTE operator clear text key")
set(RANDOM_boolean "true" CACHE STRING "If false, random function return")
set(REMOTE_PEER_WHITELIST ".*${REALM}" CACHE STRING "Remote peer whitelist (separated by space)")
IF( FD_SERVER_IP_BIND_LIST )
```

Figura D. 9. Información por defecto del archivo `CMakeLists.txt`. Por los autores.

Las variables `admin password`, `username login`, `username password` y `operator key` deben cambiarse por las que se desee configurar, el archivo nuevo queda de la siguiente forma:

```
set(MYSQL_server "127.0.0.1" CACHE STRING "Database server IP address")
set(MYSQL_admin root CACHE STRING "Database admin login")
set(MYSQL_admin_pass grial CACHE STRING "Database admin password")
set(MYSQL_user root CACHE STRING "Database username login")
set(MYSQL_pass grial CACHE STRING "Database username password")
set(MYSQL_db oai_db CACHE STRING "Database name")
set(TRANSPORT_option "#No_TCP" CACHE STRING "No_TCP or No_SCTP or comment")
set(TRANSPORT_PREFER_TCP_option "#Prefer_TCP" CACHE STRING "Prefer_TCP or comment")
set(AppServThreads 2 CACHE STRING "FreeDiameter AppServThreads count")
set(OPERATOR_key "1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3" CACHE STRING "LTE operator clear text key")
set(RANDOM_boolean "true" CACHE STRING "If false, random function return")
set(REMOTE_PEER_WHITELIST ".*${REALM}" CACHE STRING "Remote peer whitelist (separated by space)")
IF( FD_SERVER_IP_BIND_LIST )
```

Figura D. 10. Información del archivo `CMakeLists.txt` modificado. Por los autores.

Revisar la información del archivo `hss.conf.in` ubicado en la ruta `~/openair-cn/BUILD/HSS`, por defecto este archivo tiene la siguiente configuración:

```
HSS :
{
  ## MySQL mandatory options
  MYSQL_server = "@MYSQL_server@";
  MYSQL_user   = "@MYSQL_user@";
  MYSQL_pass   = "@MYSQL_pass@";
  MYSQL_db     = "@MYSQL_db@";

  ## HSS options
  OPERATOR_key = "@OPERATOR_key@";

  RANDOM = "@RANDOM_boolean@";
```

Figura D. 11. Información por defecto del archivo `hss.conf.in`. Por los autores.

Revisar la configuración del archivo `epc.conf.in` ubicado en la ruta `~/openair-cn/BUILD/EPC`.

Para ello se debe revisar primero que la PLMN corresponda a la que se va a emular:

```
TAI_LIST = (
  {MCC="208" ; MNC="93" ; TAC = "1" ; }
);
```

Figura D. 12. PLMN generada en el archivo `epc.conf.in`. Por los autores.

En la versión 0.3.2 se debe revisar la salida que por defecto es la dirección de `localhost` y el puerto 5656:

```
LOGGING :
{
  # OUTPUT choice in { "CONSOLE", "`path to file`", "`IPv4@`:`TCP port num`" }
  # `path to file` must start with `.` or `/`
  # if TCP stream choice, then you can easily dump the traffic on the remote
  OUTPUT = "127.0.0.1:5656";
```

Figura D. 13. Salida por defecto del archivo `epc.conf.in`. Por los autores.

Esta salida se debe cambiar por `CONSOLE` ya que la salida por defecto no genera ninguna conexión y se queda en un bucle:



```
LOGGING :
{
  # OUTPUT choice in { "CONSOLE", "`path to file`", "IPv4@`:`TCP port num`"}
  # `path to file` must start with `.` or `/`
  # if TCP stream choice, then you can easily dump the traffic on the remote
  #OUTPUT
    = "127.0.0.1:5656";
  OUTPUT
    = "CONSOLE";
}
```

Figura D. 14. Salida del archivo epc.conf.in modificada. Por los autores.

Revisar la configuración de las interfaces de la MME:

```
NETWORK_INTERFACES :
{
  MME_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME      = "eth0:1";
  MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME        = "192.170.0.1/24";

  MME_INTERFACE_NAME_FOR_S11_MME     = "none";
  MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S11_MME      = "0.0.0.0/24";
};
```

Figura D. 15. Interfaces virtuales generadas para la MME. Por los autores.

Revisar la configuración de las interfaces de la S-GW, las direcciones IP de las interfaces S11, S5 y S8 no se deben cambiar y se prefiere también dejar el puerto por defecto 2152:

```
S-GW :
{
  NETWORK_INTERFACES :
  {
    SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S11      = "none";
    SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11        = "0.0.0.0/24";

    SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S1U_S12_S4_UP = "eth0:2";
    SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U_S12_S4_UP = "192.170.1.1/24";
    SGW_IPV4_PORT_FOR_S1U_S12_S4_UP   = 2152;

    SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8_UP  = "none";
    SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8_UP    = "0.0.0.0/24";
  };
};
```

Figura D. 16. Interfaces virtuales generadas para la S-GW. Por los autores.

Revisar la configuración de las interfaces de la P-GW, las direcciones IP de las interfaces S5 y S8 no se deben cambiar, configurar la dirección IP para la interfaz



SGi, correspondiente a la eth0 del equipo, luego, configurar las direcciones IP para los DNS, por facilidad se usan los de google.

```
P-GW =
{
  NETWORK_INTERFACES :
  {
    PGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8      = "none";
    PGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8        = "0.0.0.0/24";

    PGW_INTERFACE_NAME_FOR_SGI        = "eth0";
    PGW_IPV4_ADDRESS_FOR_SGI          = "192.168.125.43/24";
    PGW_MASQUERADE_SGI                 = "yes";
  };

  IP_ADDRESS_POOL :
  {
    IPV4_LIST = (
      "192.188.0.0/24",
      "192.188.1.0/24"
    );
    IPV6_LIST = (
      "2014:02:26::0/120"
    );
  };

  DEFAULT_DNS_IPV4_ADDRESS      = "8.8.8.8";
  DEFAULT_DNS_SEC_IPV4_ADDRESS = "8.8.4.4";
};
```

Figura D. 17. Interfaces generadas para la P-GW. Por los autores.

Revisar el archivo s6a.conf.in, en el cual se muestra la identidad, el dominio local y el puerto de la MME, además muestra el FQDN y la dirección IP del HSS:

```
Identity = "@MME_FQDN@";
Realm = "@REALM@";
@ConnectPeer@ = "@HSS_FQDN@" { ConnectTo = "@HSS_IP@"; No_IPv6;
  No_TLS ; port = 3868; Realm = "@REALM@"; };
```

Figura D. 18. Información del archivo s6a.conf.in. Por los autores.

Revisar el archivo hss_fd.conf.in en el cual se muestran la identidad, el dominio local y el puerto del HSS, además el FQDN y dirección IP de la MME:



```
Identity = "@HSS_FQDN@";  
Realm = "@REALM@";  
@ConnectPeer@ = "@MME_FQDN@" { ConnectTo = "@MME_IP@"; Realm = "@REALM@";  
No_IPv6; No_TLS ; port = 3870; };
```

Figura D. 19. Información del archivo hss_fd.conf.in. Por los autores.

Se debe compilar los ejecutables, para ello se debe ejecutar los siguientes comandos dentro de `~/openair-cn/SCRIPTS`: `./build_hss -l -c` y `./build_epc -l -c`, las opciones `l` y `c` son para tener la base de datos local, o sea en el mismo host y para limpiar compilaciones anteriores respectivamente.

Revisar los archivos `hss.conf` y `epc.conf` ubicados en la ruta `/usr/local/etc/oai/` y asegurarse que corresponden a los archivos de entrada `hss.conf.in` y `epc.conf.in`.

```
21 HSS :  
22 {  
23 ## MySQL mandatory options  
24 MYSQL_server = "127.0.0.1";  
25 MYSQL_user   = "root";  
26 MYSQL_pass   = "grial";  
27 MYSQL_db     = "oai_db";  
28  
29 ## HSS options  
30 OPERATOR_key = "1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3";  
31  
32 RANDOM      = "true";  
33  
34 ## Freediameter options  
35 FD_conf     = "/usr/lib/./etc/freeDiameter/hss_fd.conf";
```

Figura D. 20. Información del archivo hss.conf. Por los autores.

```
MME :  
{  
  
REALM                               = "openair4G.eur";
```

Figura D. 21. Dominio local escogido en el archivo epc.conf. Por los autores.

El archivo `acl.conf` debe aparecer el dominio local escogido.

```
19 ALLOW_OLD_TLS *.openair4G.eur
```

Figura D. 22. Dominio local escogido en el archivo acl.conf. Por los autores.

Revisar la configuración de los archivos `mme_fd.conf` y `hss_fd.conf`, teniendo en cuenta su identidad y su dominio local, además los FQDNs y las direcciones IP de la MME y el HSS deben ser iguales:

```
7 Identity = "hanier.openair4G.eur"; 11 Realm = "openair4G.eur";  
106 ConnectPeer = "hanier.openair4G.eur" { ConnectTo = "127.0.1.1";  
107     Realm = "openair4G.eur"; No_IPv6; No_TLS ; port = 3870; };
```

Figura D. 23. Información del archivo `hss_fd.conf`. Por los autores.

```
4 Identity = "hanier.openair4G.eur";  
5 Realm = "openair4G.eur";  
97 #ConnectPeer = "hanier.openair4G.eur" { ConnectTo = "127.0.1.1"; No_IPv6;  
98     No_TLS ; port = 3868; Realm = "openair4G.eur"; };
```

Figura D. 24. Información del archivo `mme_fd.conf`. Por los autores.

Finalmente, en la ruta `/usr/etc/freeDiameter/` deben aparecer los archivos `acl.conf`, `hss_fd.conf`, `mme_fd.conf` y los certificados generados.

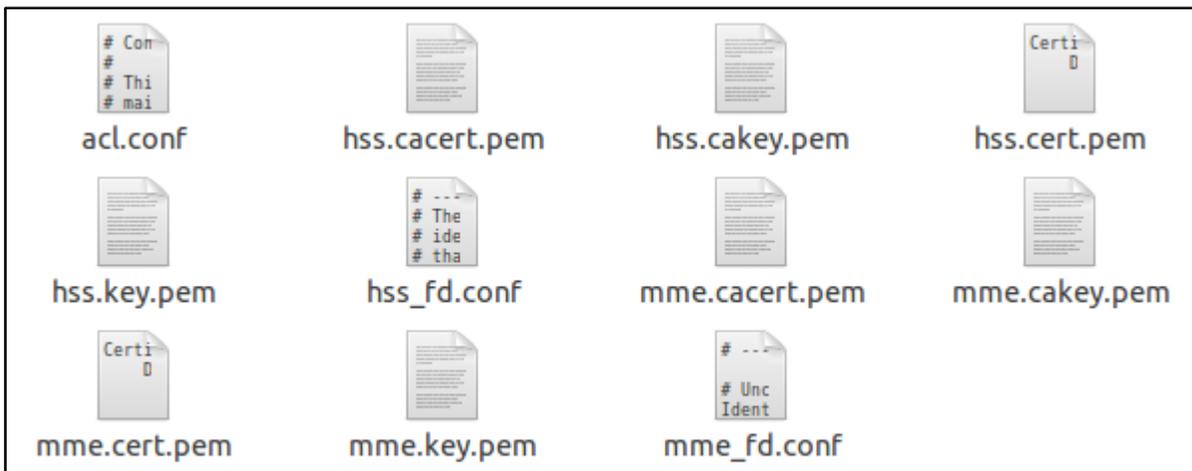


Figura D. 25. Contenido de la carpeta `freeDiameter`. Por los autores.

Para la parte de EUTRAN se debe configurar el archivo **`enb.band7.generic.oaisim_local_mme.conf`** teniendo en cuenta que la PLMN y la dirección IP de la MME deben coincidir con las del archivo `epc.conf`, además, se debe configurar las direcciones del eNB para las interfaces S1-C y S1-U.

```
tracking_area_code = "1";  
mobile_country_code = "208";  
mobile_network_code = "93";
```

Figura D. 26. PLMN generada por el archivo de configuración. Por los autores.

```
////////// MME parameters:  
mme_ip_address = ( { ipv4 = "192.170.0.1";  
                    ipv6 = "192:168:30::17";  
                    active = "yes";  
                    preference = "ipv4";  
                    }  
);  
  
NETWORK_INTERFACES :  
{  
    ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME = "eth0:3";  
    ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME = "192.170.0.2/24";  
  
    ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U = "eth0:4";  
    ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U = "192.170.1.2/24";  
    ENB_PORT_FOR_S1U = 2152; # Spec 2152  
};
```

Figura D. 27. Configuración de direcciones del archivo de configuración. Por los autores.

Puesta en marcha de los ejecutables

Ingresa al *localhost* <http://127.0.0.1/phpmyadmin> para corroborar las configuraciones anteriormente realizadas, las bases de datos asociadas se muestran a continuación:

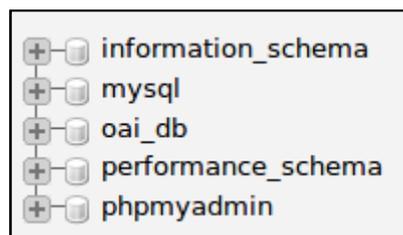


Figura D. 28. Bases de datos de localhost. Por los autores.

La base de datos *oai_db* trae por defecto un grupo de tablas configuradas.

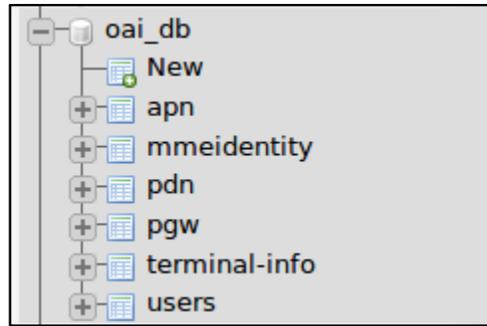


Figura D. 29. Tablas asociadas a la base de datos oai_db. Por los autores.

Ingresar en la tabla *mmeidentity* y corrobore que su *mmehost* y su *mmerealm* correspondan a los valores definidos para su MME, y el *idmmeidentity* corresponda al IMSI de la tabla *users*.

idmmeidentity	mmehost	mmerealm
1	grial.openair4G.eur	openair4G.eur
4	ng40-erc.openair4G.eur	openair4G.eur
3	ABEILLE.openair4G.eur	openair4G.eur
43	hanier.openair4G.eur	openair4G.eur

Figura D. 30. Tabla mmeidentity. Por los autores.

Ingresar a la tabla *pdn* y busque su IMSI.

id	apn	pdn_type	users_imsi	pgw_id	qci
33	oai.ipv4	IPv4	208930100001111	3	9
46	operator	IPv4	208930100001111	3	9

Figura D. 31. Tabla pdn. Por los autores.

Ingresar a la tabla *users* y realizar una búsqueda ingresando su IMSI correspondiente:

imsi	mmeidentity_idmmeidentity	key	OPc
<small>IMSI is the main reference key.</small>		<small>UE security key</small>	<small>Can be computed by HSS</small>
208930100001111	43	8baf473f2f8fd09487cccbd7097c6862	e734f8734007d6c5ce7a0508809e7e9c

Figura D. 32. Tabla users. Por los autores.



Construir las interfaces virtuales:

- `sudo ifconfig eth0:1 192.170.0.1/24 up`
- `sudo ifconfig eth0:2 192.170.1.1/24 up`
- `sudo ifconfig eth0:3 192.170.0.2/24 up`
- `sudo ifconfig eth0:4 192.170.1.2/24 up`

Para el rango de *loopback* no hay necesidad de construir interfaces, basta con utilizar direcciones que se encuentren dentro del rango 127.0.0.0 - 127.255.255.255.

Realizar una nueva compilación de los ejecutables: `./build_hss -l -c` y `./build_epc -l -c`.

Correr el HSS: `./run_hss`, se observa el *STATE_CLOSED*, ya que la MME todavía no se está ejecutando:

```
DBG Connection to 'hanier.openair4G.eur' failed: All connection attempts failed, will retry later
DBG 'STATE_WAITCNXACK' -> 'STATE_CLOSED' 'hanier.openair4G.eur'
```

Figura D. 33. Inicio del hss. Por los autores.

Ejecutar la MME: `./run_epc`, esto mostrará una tabla con los UE y portadores asociados.

```
Initializing SPGW-APP task interface: DONE
===== Statistics =====
UE      | Global | Since last display |
Bearers |        |                     |
```

Figura D. 34. Inicio del EPC. Por los autores.

Cuando el HSS y la MME estén conectados, aparecerá el estado OPEN, tanto en el terminal del HSS como en el del EPC.



```
AVP: 'Vendor-Id'(266) l=12 f=-M val=10415 (0x28af)
AVP: 'Supported-Vendor-Id'(265) l=12 f=-M val=10415 (0x28af)
No TLS protection negotiated with peer 'hanier.openair4G.eur'.
'STATE_WAITCEA' -> 'STATE_OPEN' 'hanier.openair4G.eur'
RCV from 'hanier.openair4G.eur': (no model)0/280 f:R--- src:'hanier.openair4G.eur'
```

Figura D. 35. Asociación del hss y la mme. Por los autores.

Ejecutar E-UTRAN en la ruta `~/openair-cn/cmake_targets/tools: sudo -E ./run_enb_ue_virt_s1 -x`. Se puede ver en la terminal del EPC que hay un equipo de usuario conectado.

```
Leaving slap_handle_conn_est_cnf()
===== Statistics =====
UE          | Global | Since last display |
Bearers    | 1      | 0                   |
           | 1      | 0                   |
```

Figura D. 36. Asociación de EUTRAN y EPC. Por los autores.

Ejecutar el comando `ifconfig` y observar las interfaces creadas junto con las que vienen por defecto en el equipo, además se muestra la interfaz `oip1` que hace las veces de la interfaz radio.

```
eth0:1  Link encap:Ethernet direcciónHW 00:23:18:e2:4b:96
        Direc. inet:192.170.0.1 Difus.:192.170.0.255 Másc:255.255.255.0
        ACTIVO DIFUSIÓN MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
        Interrupción:20 Memoria:d4700000-d4720000

eth0:2  Link encap:Ethernet direcciónHW 00:23:18:e2:4b:96
        Direc. inet:192.170.1.1 Difus.:192.170.1.255 Másc:255.255.255.0
        ACTIVO DIFUSIÓN MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
        Interrupción:20 Memoria:d4700000-d4720000

eth0:3  Link encap:Ethernet direcciónHW 00:23:18:e2:4b:96
        Direc. inet:192.170.0.2 Difus.:192.170.0.255 Másc:255.255.255.0
        ACTIVO DIFUSIÓN MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
        Interrupción:20 Memoria:d4700000-d4720000

eth0:4  Link encap:Ethernet direcciónHW 00:23:18:e2:4b:96
        Direc. inet:192.170.1.2 Difus.:192.170.1.255 Másc:255.255.255.0
        ACTIVO DIFUSIÓN MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
        Interrupción:20 Memoria:d4700000-d4720000

oip1    Link encap:AMPR NET/ROM direcciónHW
        Direc. inet:192.188.0.2 Difus.:192.188.0.255 Másc:255.255.255.0
        ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO NOARP MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
        Paquetes RX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
        Paquetes TX:17 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
        colisiones:0 long colaTX:100
        Bytes RX:0 (0.0 B) TX bytes:2359 (2.3 KB)
```

Figura D. 37. Interfaces creadas. Por los autores.

Para una mejor visualización de los mensajes entre las entidades utilizar `wireshark`.



APÉNDICE E: ESCENARIO CON INTERFAZ S1 EN DISTINTOS ÉQUIPOS

Este tutorial utiliza la última rama de desarrollo con el módulo de núcleo GTP del *kernel 4.7.x*.

Configurar el FQDN en el archivo `hosts` de acuerdo al nombre de usuario y dominio local: `sudo gedit /etc/hosts`.

```
1 127.0.0.1 localhost
2 127.0.1.1 grial.openair4G.eur grial
3 127.0.1.1 hss.openair4G.eur hss
```

Figura E. 1. Configuración de FQDN. Por los autores.

Guarde el archivo y reinicie el equipo para hacer efectivos los cambios, luego abra un terminal y digite el comando `hostname -f`, en el cual le aparecerá el FQDN correspondiente.

```
hanier@hanier:~$ hostname -f grial@grial:~$ hostname -f
hanier.openair4G.eur grial.openair4G.eur
```

Figura E. 2. Información generada por el comando `hostname -f`.

Para la configuración del *openair-cn*, los primeros procedimientos siguen la misma dinámica que el APÉNDICE D, hasta el punto de verificar la versión del módulo *openair-cn*, puesto que los escenarios se ejecutan con diferente versión.

Verificar la versión del módulo en *~/openair-cn*: `git checkout develop`.

Revisar el archivo `hss.conf` situado en la ruta *dir_openair-cn/etc*. Este cuenta con las variables utilizadas al momento de la instalación de la base de datos MySQL y `phpmyadmin`.



```
21 HSS :
22 {
23 ## MySQL mandatory options
24 MYSQL_server = "127.0.0.1";      # HSS S6a bind address
25 MYSQL_user   = "@MYSQL_user@";  # Database server login
26 MYSQL_pass   = "@MYSQL_pass@";  # Database server password
27 MYSQL_db     = "oai_db";        # Your database name
28
29 ## HSS options
30 OPERATOR_key = "1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3";
31 #OPERATOR_key = "11111111111111111111111111111111";
32
33 RANDOM = "true";
34
35 ## Freediameter options
36 FD_conf = "/usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss_fd.conf";
37 };
```

Figura E. 3. Información mostrada por el archivo `hss.conf`. Por los autores.

Ingresar en la carpeta scripts: `cd scripts`, e instalar los paquetes necesarios para la construcción y funcionamiento de las entidades. Cada instalación pedirá confirmación.

- `./build_hss -i -c`
- `./build_mme -i -c`
- `./build_spgw -i -c`

Compilar los módulos:

- `./build_hss -c`
- `./build_mme -c`
- `./build_spgw -c`

Luego de la compilación se genera la carpeta `build` en las siguientes rutas:

- `dir_openair-cn/build/hss/`
- `dir_openair-cn/build/mme/`



- ***dir_openair-cn/build/spgw/***

Copiar los archivos de configuración que se encuentran en la ruta ***dir_openair-cn/etc*** a ***/usr/local/etc/oai***:

- Crear una carpeta nueva llamada freeDiameter: `mkdir -p /usr/local/etc/oai/freeDiameter`
- Ingresar a la ruta ***dir_openair-cn/etc***.
- Copiar los archivos de la carpeta *etc*:
 - `sudo cp hss.conf mme.conf spgw.conf /usr/local/etc/oai`
 - `sudo cp hss_fd.conf mme_fd.conf acl.conf /usr/local/etc/oai/freeDiameter`

Modificar los parámetros que sean necesarios de los archivos que se encuentran en la ruta ***/usr/local/etc/oai*** de acuerdo a la configuración deseada.

- hss.conf.

```
21 HSS :
22 {
23 ## MySQL mandatory options
24 MYSQL_server = "127.0.0.1"; # HSS S6a bind address
25 MYSQL_user = "root"; # Database server login
26 MYSQL_pass = "grial"; # Database server password
27 MYSQL_db = "oai_db"; # Your database name
28
29 ## HSS options
30 OPERATOR_key = "1006020f0a478bf6b699f15c062e42b3";
31 #OPERATOR_key = "11111111111111111111111111111111";
32
33 RANDOM = "true";
34
35 ## Freediameter options
36 FD_conf = "/usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss_fd.conf";
37 };
```

Figura E. 4. Archivo del HSS. Por los autores.

- mme.conf



```
152     MME_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME           = "eth0";
153     MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME             = "192.168.121.73/24";
154
155     # MME binded interface for S11 communication (GTPV2-C)
156     MME_INTERFACE_NAME_FOR_S11_MME          = "lo";
157     MME_IPV4_ADDRESS_FOR_S11_MME            = "127.0.11.1/8";
158     MME_PORT_FOR_S11_MME                    = 2123;
159 };
166     OUTPUT                                   = "CONSOLE";
167     #OUTPUT                                   = "SYSLOG";
168     #OUTPUT                                   = "/tmp/mme.log";
169     #OUTPUT                                   = "127.0.0.1:5656";
203 S-GW :
204 {
205     # S-GW binded interface for S11 communication (GTPV2-C),
206     SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11                 = "127.1.11.1/8";
207
208 };
```

Figura E. 5. Archivo de la MME. Por los autores.

- spgw.conf

```
26     SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S11               = "lo";
27     SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S11                 = "127.1.11.1/8";
30     SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S1U_S12_S4_UP    = "eth0";
    GW run on eNB host
31     SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U_S12_S4_UP      = "192.168.121.73/24";
32     SGW_IPV4_PORT_FOR_S1U_S12_S4_UP         = 2152;
35     SGW_INTERFACE_NAME_FOR_S5_S8_UP         = "none";
36     SGW_IPV4_ADDRESS_FOR_S5_S8_UP           = "0.0.0.0/24";
37 };
50     OUTPUT                                   = "CONSOLE";
51     #OUTPUT                                   = "SYSLOG";
52     #OUTPUT                                   = "/tmp/spgw.log";
53     #OUTPUT                                   = "127.0.0.1:5656";
88     IP_ADDRESS_POOL :
89     {
90         IPV4_LIST = (
91             "172.16.0.0/12"
92         );
93     };
94
95     # DNS address communicated to UEs
96     DEFAULT_DNS_IPV4_ADDRESS                 = "8.8.8.8";
97     DEFAULT_DNS_SEC_IPV4_ADDRESS             = "8.8.4.4";
```

Figura E. 6. Archivo de la SPGW. Por los autores.



Revisar el archivo `hss_fd.conf` en el cual se muestran la identidad, el dominio local, el puerto, el dominio local y la dirección IP del HSS

```
7 Identity = "hss.openair4G.eur";  
8  
9 # In Diameter, all peers also be  
10 # the framework uses the part of  
11 Realm = "openair4G.eur";  
72 Port = 3868;  
73 SecPort = 5868;
```

Figura E. 7. Archivo `hss_fd.conf` . Por los autores.

Revisar el archivo `mme_fd.conf` en el cual se muestran la identidad, el dominio local, el puerto y la dirección IP de la MME

```
4 Identity = "grial.openair4G.eur";  
5 Realm = "openair4G.eur";  
55 Port = 3870;  
56 SecPort = 5870;  
103 ConnectPeer= "hss.openair4G.eur" { ConnectTo = "127.0.0.1"; No_SCTP ;  
104                                     No_IPv6; Prefer_TCP; No_TLS; port = 3868;  
105                                     realm = "openair4G.eur";};
```

Figura E. 8. Archivo `mme_fd.conf`. Por los autores.

Revisar el archivo `acl.conf` debe aparecer el dominio local escogido.

```
19 ALLOW_OLD_TLS *.openair4G.eur
```

Figura E. 9. Archivo `acl.conf` . Por los autores.

Generar los certificados para el HSS y la MME:

- `cd ~/openair-cn/scripts`
- `./check_hss_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.openair4G.eur`
- `./check_mme_s6a_certificate /usr/local/etc/oai/freeDiameter/grial.openair4G.eur`

Finalmente en la ruta `/usr/local/etc/freeDiameter/` deben aparecer los archivos `acl.conf`, `hss_fd.conf`, `mme_fd.conf` y los certificados generados.

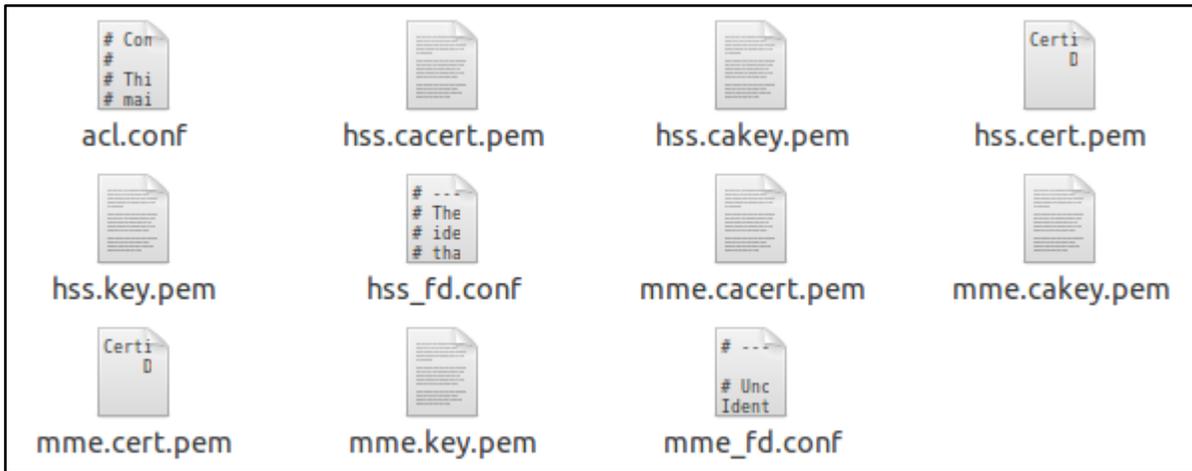


Figura E. 10. Contenido de la carpeta freeDiameter. Por los autores.

Para la ejecución de E-UTRAN se configura el mismo archivo del APÉNDICE D, diferenciado en las interfaces utilizadas en la MME y en el eNB para las interfaces S1-C y S1-U.

```
140 ////////////// MME parameters:
141 mme_ip_address = ( { ipv4 = "192.168.121.73";
142                       ipv6 = "192:168:30::17";
143                       active = "yes";
144                       preference = "ipv4";
145                       }
146                   );
147
148 NETWORK_INTERFACES :
149 {
150     ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME = "eth0";
151     ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME = "192.168.121.30/24";
152
153     ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U = "eth0";
154     ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U = "192.168.121.30/24";
155     ENB_PORT_FOR_S1U = 2153; # Spec 2152
156 };
```

Figura E. 11. Interfaces de archivo de configuración. Por los autores.

Puesta en marcha de los ejecutables



Los primeros procedimientos, correspondientes a la verificación de los datos contenidos en el *localhost*, siguen el mismo proceso que el APENDICE D. En la parte que difieren es desde el manejo de las interfaces.

Debido a que la emulación se realiza en diferentes máquinas las interfaces a utilizar son interfaces reales eth o wlan, para ello revisar las direcciones con las que cuenta el equipo con el comando **ifconfig**:

```
eth0    Link encap:Ethernet direcciónHW 00:25:64:8c:9b:c7
        Direc. inet:192.168.121.73 Difus.:192.168.121.255 Másc:255.255.255.0
        Dirección inet6: fe80::225:64ff:fe8c:9bc7/64 Alcance:Enlace
        ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
        Paquetes RX:19408 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
        Paquetes TX:7150 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
        colisiones:0 long.colaTX:1000
        Bytes RX:21830061 (21.8 MB) TX bytes:728257 (728.2 KB)
        Interrupción:16

lo      Link encap:Bucle local
        Direc. inet:127.0.0.1 Másc:255.0.0.0
        Dirección inet6: ::1/128 Alcance:Anfitrión
        ACTIVO BUCLE FUNCIONANDO MTU:65536 Métrica:1
        Paquetes RX:919 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
        Paquetes TX:919 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
        colisiones:0 long.colaTX:1
        Bytes RX:102126 (102.1 KB) TX bytes:102126 (102.1 KB)

gtp0   Link encap:UNSPEC direcciónHW 00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00
        Direc. inet:172.16.0.1 P-t-P:172.16.0.1 Másc:255.240.0.0
        Dirección inet6: fe80::4154:f7aa:8eae:855/64 Alcance:Enlace
        ACTIVO PUNTO A PUNTO FUNCIONANDO NOARP MULTICAST MTU:1500 Métrica:1
        Paquetes RX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
        Paquetes TX:0 errores:151 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
        colisiones:0 long.colaTX:1
        Bytes RX:0 (0.0 B) TX bytes:0 (0.0 B)
```

Figura E. 12. Direcciones de Interfaces. Por los autores.

Realice una nueva compilación de los ejecutables: **./build_hss -c**, **./build_mme -c** y **./build_spgw -c**.

Correr el HSS: **./run_hss**



```
DBG Core state: 0 -> 1
NOTI libfdcore '1.2.0' initialized.
DBG Generating fresh Diffie-Hellman parameters of size 1024 (this takes some time)...
DBG Loading : /usr/local/lib/freeDiameter/acl_wl.fdx
NOTI Extension ACL_wl initialized with configuration: '/usr/local/etc/oai/freeDiameter/acl.conf'
DBG Loading : /usr/local/lib/freeDiameter/dict_nas_mipv6.fdx
DBG Dictionary Extension 'MIPv6 NAS-to-HAAA Interaction' initialized
DBG Loading : /usr/local/lib/freeDiameter/dict_s6a.fdx
NOTI Dictionary Extension 'S6A from 3GPP standard v.10.5' initialized
NOTI All extensions loaded.
NOTI freeDiameter configuration:
NOTI Default trace level .... : +1
NOTI Configuration file ..... : /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss_fd.conf
NOTI Diameter Identity ..... : hss.openair4G.eur (l:17)
NOTI Diameter Realm ..... : openair4G.eur (l:13)
NOTI Tc Timer ..... : 30
NOTI Tw Timer ..... : 30
NOTI Local port ..... : 3868
NOTI Local secure port ..... : 5868
NOTI Number of SCTP streams .. : 3
NOTI Number of clients thr .. : 5
NOTI Number of app threads .. : 4
NOTI Local endpoints ..... : Default (use all available)
NOTI Local applications ..... : (none)
NOTI Flags : - IP ..... : Enabled
NOTI - IPv6 ..... : DISABLED
NOTI - Relay app .... : DISABLED
NOTI - TCP ..... : Enabled
NOTI - SCTP ..... : DISABLED
NOTI - Pref. proto .. : TCP
NOTI - TLS method ... : Separate port
NOTI TLS : - Certificate .. : /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cert.pem
NOTI - Private key .. : /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.key.pem
NOTI - CA (trust) ... : /usr/local/etc/oai/freeDiameter/hss.cacert.pem (1 certs)
NOTI - CRL ..... : (none)
NOTI - Priority ..... : (default: 'NORMAL')
NOTI - DH bits ..... : 1024
NOTI Origin-State-Id ..... : 1533250484
NOTI Loaded extensions: '/usr/local/lib/freeDiameter/acl_wl.fdx'[/usr/local/etc/oai/freeDiameter/acl.conf], loaded
NOTI Loaded extensions: '/usr/local/lib/freeDiameter/dict_nas_mipv6.fdx'[(no config file)], loaded
NOTI Loaded extensions: '/usr/local/lib/freeDiameter/dict_s6a.fdx'[(no config file)], loaded
DBG Core state: 1 -> 2
NOTI Local server address(es): 192.168.121.73{---L-}
DBG Core state: 2 -> 3
```

Figura E. 13. Inicio del HSS. Por los autores.

Correr la MME: `./run_mme`. Luego de un momento se muestra `STATE_OPEN` indicando que se logró la conexión con el HSS. También se muestra una tabla con estadísticas actuales sobre la cantidad de eNB y UE vinculados o conectados.



```
No TLS protection negotiated with peer 'hss.openair4G.eur'.
'STATE_WAITCEA' -> 'STATE_OPEN' 'hss.openair4G.eur'
Peer timeout reset to 30 seconds (+/- 2)
'hss.openair4G.eur' in state 'STATE_OPEN' waiting for next event

Diameter identity of MME: grial.openair4G.eur with length: 19
S6a peer connection attempt 1 / 8
Peer hss.openair4G.eur is now connected...
===== STATISTICS =====
```

	Current Status	Added since last display	Re
Connected eNBs	0	0	
Attached UEs	0	0	
Connected UEs	0	0	
Default Bearers	0	0	
S1-U Bearers	0	0	

Figura E. 14. Inicio de la MME. Por los autores.

Ejecutar la SPGW: `./run_spgw`.

```
Tx UDP_INIT IP addr 127.1.11.1
Initializing S11 interface: DONE
Initializing SPGW-APP task interface
Initializing GTPV1U interface
Creating new listen socket on address 127.1.11.1 and port 2123
Inserting new descriptor for task 6, sd 31
Received 1 events
Using the GTP kernel mode (genl ID is 27)
Setting route to reach UE net 172.16.0.0 via gtp0
GTP kernel configured
Initializing GTPV1U interface: DONE
Initializing SPGW-APP task interface: DONE
```

Figura E. 15. Inicio de la SPGW. Por los autores.

En otra ventana ejecutar E-UTRAN ubicándose en la ruta `dir_openair/cmake_targets/tools`: `sudo -E ./run_enb_ue_virt_s1 -x`.

Se podrá ver en el terminal de la MME, que hay un eNB y UE conectado. También se muestra las direcciones de la MME y del eNB cuando se realiza la asociación.



	Current Status	Added since last display
Connected eNBs	1	0
Attached UEs	1	0
Connected UEs	1	0
Default Bearers	1	0
S1-U Bearers	1	0

Figura E. 16. Asociación de eNB y MME. Por los autores.

```
SCTP association change event received
-----
Local addresses:
- [::ffff:192.168.121.73]
-----
Peer addresses:
- [::ffff:192.168.121.30]
-----
'STATE_OPEN' <-- 'FDEVP_CNX_MSG_RECV'
```

Figura E. 17. Direcciones asociadas de eNB y MME . Por los autores.

Ejecutar el comando `ifconfig` y observar que además de las interfaces iniciales también aparecen las interfaces `oip1` en el equipo que se está ejecutando EUTRAN y `gtp0` en el equipo que se está ejecutando las entidades del EPC.

Para que los paquetes vuelvan al UE, se debe configurar el enrutamiento utilizando los siguientes comandos:

- `sudo ip rule add from 172.16.0.2/32 table 200`
- `sudo ip rule add to 172.16.0.2/32 table 200`

Realizar un `ping` hacia un servidor de Google: `ping 216.58.222.238 -m 1 -I oip1`.



```
ue@ue:~/oai/openairinterface5g/cmake_targets/tools$ ping 216.58.222.238 -m 1 -I oip1
PING 216.58.222.238 (216.58.222.238) from 172.16.0.8 oip1: 56(84) bytes of data.
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=1 ttl=52 time=128 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=2 ttl=52 time=88.7 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=3 ttl=52 time=61.8 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=4 ttl=52 time=99.8 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=5 ttl=52 time=116 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=6 ttl=52 time=111 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=7 ttl=52 time=74.4 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=8 ttl=52 time=48.3 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=9 ttl=52 time=81.5 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=10 ttl=52 time=105 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=11 ttl=52 time=62.8 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=12 ttl=52 time=110 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=13 ttl=52 time=110 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=14 ttl=52 time=95.5 ms
64 bytes from 216.58.222.238: icmp_seq=15 ttl=52 time=133 ms
^C
--- 216.58.222.238 ping statistics ---
15 packets transmitted, 15 received, 0% packet loss, time 14012ms
```

Figura E. 18. Respuesta a ping. Por los autores.

Luego de desconectar E-UTRAN, desconectar la SPGW, la MME y el HSS. Se podrá ver en el terminal que pasa de *STATE_OPEN* a *STATE_CLOSE* y luego de *STATE_CLOSE* a *STATE_ZOMBIE*, esto debido a que se cerró la conexión entre las entidades de red.

```
Peer 'grial.openair4G.eur' sent a DPR with cause: REBOOTING
'STATE_OPEN' -> 'STATE_CLOSING' 'grial.openair4G.eur'
SENT to 'grial.openair4G.eur': 'Disconnect-Peer-Answer'0/282 f:----

'STATE_CLOSING' -> 'STATE_CLOSED' 'grial.openair4G.eur'
grial.openair4G.eur: Going to ZOMBIE state (no more activity)
'STATE_CLOSED' -> STATE_ZOMBIE (terminated) 'grial.openair4G.eur'
```

Figura E. 19. STATE_ZOMBIE. Por los autores.

Para una mejor visualización de los mensajes entre las entidades de red utilice *wireshark*.



APÉNDICE F: EXPERIMENTACIÓN CON PLATAFORMAS DE RF

HOST 1

En este host se ejecuta todo lo relacionado con el EPC y se utilizará la versión 0.3.2 de *openair-cn*, por esta razón, el procedimiento que se realiza sigue los mismos pasos del APÉNDICE D.

Compilar los ejecutables:

- `./build_hss -l -c`
- `./build_epc -l -c`

Correr el HSS y el EPC:

- `./run_hss`
- `./run_epc`

HOST 2

Este host va a hacer las veces de eNB, y puesto que este escenario se pone en funcionamiento en diferentes hosts, el proceso para la configuración de interfaces sigue la misma dinámica que se muestra en el APÉNDICE E, diferenciándose en el archivo de configuración. en este escenario, dicho archivo es **enb.band13.tm1.usrpb210.conf**

Ejecutar el eNB en la ruta `~/openairinterface5g/targets/bin`:

- `sudo -E ./lte-softmodem.Rel8 -O /home/eutran/oai/openairinterface5g/targets/PROJECTS/GENERIC-LTE-EPC/CONF/enb.band13.tm1.usrpb210.conf -d 2>&1 | tee eNB.log`

Se podrá ver en la terminal del eNB que se asoció con la MME.

HOST 3

Ejecutar el UE:



- Ubicarse en la ruta `~/openairinterface5g`
- Habilitar las variables de entorno: `source oaienv`.
- Ingresar a la ruta: `cd targets/bin`.
- Crear la interfaz virtual: `sudo ./init_nas_s1 UE`.

```
ue@ue:~/oai/openairinterface5g/targets/bin$ sudo ./init_nas_s1 UE
[sudo] password for ue:
loading ue_ip
bring up oip1 interface for UE
net.ipv4.conf.all.log_martians = 1
Disabling reverse path filtering
net.ipv4.conf.all.rp_filter = 0
```

Figura F. 1. Creación de interfaz virtual. Por los autores.

- Verificar que se haya creado la interfaz: `ifconfig`.

```
oip1      Link encap:AMPR NET/ROM  direcciónHW
          ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO NOARP MULTICAST  MTU:1500  Métrica:1
          Paquetes RX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0
          Paquetes TX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0
          colisiones:0 long.colaTX:100
          Bytes RX:0 (0.0 B)  TX bytes:0 (0.0 B)
```

Figura F. 2. Verificación de interfaz virtual. Por los autores.

- Ejecutar el UE: `sudo -E ./lte-softmodem.Rel8 -U -C 751000000 -r 25 --ue-scan-carrier --ue-txgain 70 --ue-rxgain 80 2>&1 | tee UE.log`.
- Agregar la ruta predeterminada: `sudo ip route add default via 192.188.0.1`.

```
Leaving s1ap_handle_conn_est_cnf()
===== Statistics =====
      |   Global   | Since last display |
-----|-----|-----|
UE    |         1 |           0         |
Bearers |         1 |           0         |
```

Figura F. 3. Asociación de eNB con MME. Por los autores.

Evidenciar que hay una dirección asignada por la MME al UE: `ifconfig`



```
oip1 Link encap:AMPR NET/ROM direcciónHW  
Direc. inet:192.188.0.2 Difus.:192.188.0.255 Másc:255.255.255.0  
ACTIVO DIFUSIÓN FUNCIONANDO NOARP MULTICAST MTU:1500 Métrica:1  
Paquetes RX:0 errores:0 perdidos:0 overruns:0 frame:0  
Paquetes TX:17 errores:0 perdidos:0 overruns:0 carrier:0  
colisiones:0 long.colaTX:100  
Bytes RX:0 (0.0 B) TX bytes:2359 (2.3 KB)
```

Figura F. 4. Dirección asignada al UE. Por los autores.

Para una mejor visualización de los mensajes entre las entidades utilizar *wireshark*.