



Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Eléctrica

**Diseño e implementación de laboratorios con fines docentes en torno a tecnologías
inalámbricas de última generación: 5G y 6G.**

Eduardo Calderón
Profesor guía: Ignacio Bugueño

Comisión evaluadora: Alejandro Maass, Alfonso Ehijo

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile
Diciembre 2023

Agradecimientos

En primer lugar, quería agradecer a toda mi familia, que siempre han estado ahí para apoyarme en todo sentido, tanto en mi vida académica como personal.

Quiero agradecer a mi madre y a mi hermana, las cuales durante toda mi vida han sido mis pilares fundamentales para seguir siempre adelante. Las que siempre han estado ahí para mí entregándome todo su amor y cariño. Agradecer a mi abuelita Margarita que me apoyo desde el inicio y ahora lo hace desde el cielo.

Agradecer a mis amigos, en especial al Ignacio, Alex, Yersson, Daniel, Nicolás y al Ariel por estos 5 buenos años de amistad.

Agradecer también a mi Profesor guía, Ignacio Bugueño, por todo el apoyo y dedicación a través de estos meses realizando mi memoria de título. También dar gracias al Profesor Alfonso Ehijo, por estar ahí ayudándome y aconsejándome durante este proceso.

Índice

ACRÓNIMOS.....	6
RESUMEN	8
OBJETIVO GENERAL	10
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA	11
<i>FUNDAMENTOS TÉCNICOS DE TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS MÓVILES</i>	<i>11</i>
<i>SEGUNDA GENERACIÓN (2G).....</i>	<i>11</i>
<i>GSM.....</i>	<i>11</i>
<i>TERCERA GENERACIÓN (3G)</i>	<i>12</i>
<i>UMTS.</i>	<i>12</i>
<i>CUARTA GENERACIÓN (4G)</i>	<i>12</i>
<i>LTE.....</i>	<i>12</i>
<i>LTE-A.....</i>	<i>14</i>
<i>QUINTA GENERACIÓN (5G)</i>	<i>15</i>
<i>5G NSA.....</i>	<i>15</i>
<i>5G SA.....</i>	<i>16</i>
<i>5.5G.....</i>	<i>17</i>
<i>SEXTA GENERACIÓN (6G).....</i>	<i>18</i>
<i>SIMULADORES/EMULADORES EXISTENTES.....</i>	<i>19</i>
<i>ANTECEDENTES DE METODOLOGÍAS DOCENTES.....</i>	<i>20</i>
<i>Aprendizaje basado en competencias.....</i>	<i>21</i>
<i>ANTECEDENTES DE CURSOS EXISTENTES.</i>	<i>21</i>
MARCO METODOLÓGICO	22
<i>PROCESOS DE DISEÑO.</i>	<i>23</i>
<i>Planificación curricular.</i>	<i>23</i>
<i>Recolección de información.....</i>	<i>24</i>
<i>Formulación de objetivos del curso.....</i>	<i>24</i>
<i>Diseño del programa de estudios.....</i>	<i>24</i>
<i>Diseño del programa de módulos de instrucción.....</i>	<i>24</i>
<i>Diseño del programa de evaluación.....</i>	<i>25</i>
<i>Implantación del diagnóstico.</i>	<i>25</i>
<i>Clase directa y evaluación formativa.....</i>	<i>25</i>
<i>Evaluación acumulativa.....</i>	<i>25</i>
<i>PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE MÓDULOS TEÓRICOS Y EXPERIENCIAS PRÁCTICAS.....</i>	<i>25</i>

<i>Planificación de módulos y experiencias prácticas.....</i>	<i>25</i>
<i>Diseño de módulos teóricos y prácticos.....</i>	<i>26</i>
<i>METODOLOGÍA DE LABORATORIOS.....</i>	<i>26</i>
RESULTADOS	28
<i>RESULTADOS DOCENTES.</i>	<i>28</i>
<i>Planificación curricular.</i>	<i>28</i>
<i>Material desarrollado.....</i>	<i>32</i>
<i>EXPERIENCIAS PRÁCTICAS.....</i>	<i>34</i>
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
DENTRO DE ESTA SECCIÓN, SE DISCUTEN LA METODOLOGÍA DOCENTE APLICADA, LOS RESULTADOS DOCENTES OBTENIDOS JUNTO CON LOS ASOCIADOS A LAS EXPERIENCIAS PRÁCTICAS REALIZADAS. ADEMÁS, SE EXPONE EL APOORTE QUE ENTREGA EL TRABAJO DE TÍTULO REALIZADO PARA LA AUDIENCIA OBJETIVO.	
<i>METODOLOGÍA DOCENTE APLICADA.....</i>	<i>41</i>
<i>RESULTADOS DOCENTES.....</i>	<i>42</i>
<i>EXPERIENCIAS PRÁCTICAS.....</i>	<i>43</i>
<i>APOORTE FUTURO DEL TRABAJO DE TÍTULO.....</i>	<i>44</i>
CONCLUSIÓN.....	45
REFERENCIAS	47
ANEXOS	50
<i>GPRS.....</i>	<i>51</i>
<i>EDGE.....</i>	<i>52</i>
<i>HSPA.....</i>	<i>53</i>
<i>HSPA+.....</i>	<i>53</i>

Índice de figuras

Figura 1. Arquitectura de red LTE.	14
Figura 2. Arquitectura de red 5G NSA.	16
Figura 3. Arquitectura de red 5G SA.	17
Figura 4. Ciclo de Kolb ejemplificado con el ABC.	22
Figura 5. Metodología asociada a las experiencias de laboratorio.	27
Figura 6. Aspectos relacionados a la carga académica.....	29
Figura 7. Objetivos del curso..	29
Figura 8. Material asociado a la unidad 1.	30
Figura 9. Condiciones de aprobación y evaluaciones.	31
Figura 10. Bibliografía, recursos obligatorios y complementarios..	32
Figura 11. Material asociado a las clases expositivas.	32
Figura 12. Guías de laboratorio.	33

Figura 13. Controles de cátedra.....	33
Figura 14. Controles de lectura.....	34
Figura 15. Resultados asociados a la experiencia N°1 de Matlab.	35
Figura 16. Resultados asociados a la experiencia N°1 de Python.....	37
Figura 17. Resultados asociados a experiencia práctica n°1 de 5G-LENA.	39
Figura 18. Arquitectura de red GSM.	51
Figura 19. Arquitectura de red GPRS.	51
Figura 20. Arquitectura de red UMTS.	53
Figura 21. Material expositivo asociado a la Unidad 2.	62
Figura 22. Material expositivo asociado a la Unidad 3.	62
Figura 23. Material expositivo asociado a la Unidad 4.	63
Figura 24. Material expositivo asociado a la Unidad 5.	63
Figura 25. Resultados asociados a experiencia n°2 de Matlab.....	64
Figura 26. Resultados asociados a experiencia n°3 de Matlab.....	64
Figura 27. Resultados asociados a experiencia n°2 de Python.....	65
Figura 28. Resultados asociados a experiencia n°3 de Python.....	65
Figura 29. Resultados asociados a experiencia n°4 de Python.....	66
Figura 30. Resultados asociados a experiencia n°2 de 5G-LENA.....	66
Figura 31. Resultados asociados a experiencia n°3 de 5G-LENA.....	67

Índice de tablas

Tabla 1.....	23
--------------	----

Acrónimos

- 1G: *First Generation.*
- 2G: *Second Generation.*
- 3G: *Third Generation.*
- 4G: *Fourth Generation.*
- 5G: *Fifth Generation.*
- 6G: *Sixth Generation.*
- GSM: *Global System for Mobile communications*
- GPRS: *General Packet Radio Service*
- EDGE: *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*
- UMTS: *Universal Mobile Telecommunications System*
- HSPA: *High-Speed Packet Access*
- HSPA+: *Evolved High-Speed Packet Access*
- NR: *New Radio*
- BS: *Base Station*
- MS: *Mobile Station*
- ME: *Mobile Equipment*
- BSC: *Base Station Controller*
- MSC: *Mobile Switching Center*
- NMS: *Network Management System*
- VLR: *Visitor Location Register*
- HLR: *Home Location Register*
- GGSN: *Gateway GPRS Support Node*
- GSMC: *GSM Core*
- RNC: *Radio Network Controller*
- IGRP: *Interior Gateway Routing Protocol*
- GRE: *Generic Routing Encapsulation*
- GTP: *GPRS Tunneling Protocol*
- OFDM: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
- OFDMA: *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
- SC-FDMA: *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*
- GMSK: *Gaussian Minimum Shift Keying*
- QPSK: *Quadrature Phase Shift Keying*
- TDD: *Time Division Duplex*
- FDD: *Frequency Division Duplex*
- MIMO: *Multiple Input Multiple Output*
- LTE: *Long-Term Evolution*
- LTE-A: *LTE Advanced*
- IP: *Internet Protocol*
- MME: *Mobility Management Entity*
- SGW: *Serving Gateway*

- PGW: *Packet Data Network Gateway*
- HSS: *Home Subscriber Server*
- PCRF: *Policy and Charging Rules Function*
- eMMB: *Enhanced Mobile Broadband*
- mMTC: *Massive Machine Type Communications*
- URLLC: *Ultra-Reliable Low Latency Communications*
- NB-IoT: *Narrowband Internet of Things*
- IoT: *Internet of Things*
- EPC: *Evolved Packet Core*
- en-gNodeB: *Enhanced Node B*
- 5G NSA: *5G Non-Standalone*
- 5G SA: *5G Standalone*
- AMF: *Access and Mobility Management Function*
- UPF: *User Plane Function*
- XR: *Extended Reality*
- VR: *Virtual Reality*
- AR: *Augmented Reality*
- BLER: *Block Error Rate*
- LAN: *Local Area Network*
- VoLTE: *Voice over LTE*
- VoNR: *Voice over New Radio*
- PDU: *Packet Data Unit*
- QoS: *Quality of Service*
- SINR: *Signal-to-Interference plus Noise Ratio*
- TCP: *Transmission Control Protocol*
- UDP: *User Datagram Protocol*
- 3GPP: *3rd Generation Partnership Project*
- CG: *Charging Gateway*
- SCS: *Subcarrier Spacing*
- SSB: *Synchronization Signal Block*
- PBCH: *Physical Broadcast Channel*
- PDSCH: *Physical Downlink Shared Channel*
- SIB1: *System Information Block Type 1*
- SIB2: *System Information Block Type 2*
- CCE: *Control Channel Element*
- PSS: *Primary Synchronization Signal*
- SSS: *Secondary Synchronization Signal*

Resumen

El uso de tecnologías inalámbricas móviles para diversas aplicaciones ha cobrado fuerza en los últimos años debido a su versatilidad en usos industriales, robóticos, médicos, agrícolas, urbanos, entre otros. Este impulso se debe al hecho de que todo indica una tendencia hacia la automatización de procesos asociados a los ámbitos mencionados anteriormente. Sin embargo, el conocimiento sobre las tecnologías emergentes, como 5G y 6G, es limitado, ya que son novedosas en el campo. Esta falta de conocimiento se ve agravada por la ausencia de programas educativos similares tanto en la universidad como en la región. Es por esto por lo que se necesita capacitar a todos los ingenieros civiles eléctricos e ingenieros en telecomunicaciones. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un curso que se enfoque en todos los aspectos necesarios para el diseño e implementación de laboratorios docentes centrados en 4G, 5G y 6G. Para lograr esto, se aplicó una metodología docente conocida como "Aprendizaje basado en competencias", la cual es ampliamente utilizada en entornos académicos por diversas universidades tanto del país (Universidad de Chile, Universidad de Talca o también la Universidad de O'Higgins) como del mundo (Universidad de Deusto en España, Universidad de Guadalajara en México y Universidad de Costa Rica). La aplicación de esta metodología condujo a la creación de material de cátedra que incluye contenidos relevantes para el curso, un plan de estudios, guías de laboratorios y evaluaciones. Además, se incorporaron experiencias prácticas que se utilizaron para desarrollar las mencionadas guías de laboratorios. Al combinar todos estos elementos, se logra el diseño integral del curso docente, proporcionando a los estudiantes las herramientas necesarias para comprender y aplicar las tecnologías móviles inalámbricas de última generación.

Introducción

Hoy en día se está observando una nueva revolución industrial denominada industria 4.0. Dentro de este contexto, surge el concepto de TICar como tecnologías habilitantes para apoyar la gran necesidad de automatizar la mayoría de los procesos industriales, es por esto por lo que el concepto de industria inteligente va tomando cada vez más peso. Según KLAUS “Estamos al borde de una revolución tecnológica que alterará fundamentalmente la forma en que vivimos, trabajamos y nos relacionamos unos con otros”[1]. Por esta razón, las nuevas tecnologías inalámbricas emergentes, como 5G y 6G, se presentan como protagonistas para abordar este desafío. En consecuencia, resulta esencial entregar una capacitación a todos los ingenieros civiles eléctricos e ingenieros en telecomunicaciones para que estén preparados de buena manera el uso de estas tecnologías.

Este trabajo se centrará en el diseño y la implementación de laboratorios educativos enfocados en tecnologías inalámbricas móviles de última generación, como 5G y 6G. En primer lugar, se abordará la evolución técnica de las redes móviles desde 2G hasta 6G, detallando cada fase para establecer un marco teórico sólido. En una segunda etapa, se explorarán metodologías docentes en ingeniería para diseñar experiencias prácticas que fomenten habilidades y competencias en torno a 5G y 6G, incorporando simuladores y herramientas de medición. La validación técnica y pedagógica se llevará a cabo a través de un curso experimental piloto, donde los estudiantes adquirirán conocimientos y habilidades beneficiosos para su crecimiento académico y profesional. El conocimiento sobre 5G y 6G es bastante poco debido a que son nuevas tecnologías. Esto, sumado a que actualmente ni en la universidad ni en la región existe algo similar que proporcione experiencias prácticas, se genera entonces esta memoria de título.

Objetivo general

Diseñar e implementar un curso enfocado en experiencias prácticas relacionadas con 5G y 6G.

Objetivos específicos

- Estudiar y analizar las tecnologías móviles existentes.
- Implementar una metodología docente aplicable en ingeniería para un curso de redes de comunicaciones móviles.
- Obtener y hacer uso de simuladores.
- Corroborar validez técnicas y pedagógicas de las experiencias prácticas.

Marco teórico y revisión de literatura

Fundamentos técnicos de tecnologías inalámbricas móviles

Dentro del mundo de las telecomunicaciones, encontramos las redes inalámbricas móviles. Mayormente conocidas como 2G, 3G, 4G, 5G y 6G. Cada una con mejores características que la anterior generación, destacándose por mejoras sustanciales en velocidad, capacidad y eficiencia.

En el contexto de la ingeniería eléctrica, estas redes inalámbricas se convierten en elementos esenciales para garantizar el correcto funcionamiento de sistemas cruciales en diversas áreas, tales como el transporte, la energía, la automatización industrial o la inteligencia artificial. Por ejemplo, las redes inalámbricas móviles se utilizan para la conexión de dispositivos y sensores dentro del sector industrial, lo que permite la automatización de procesos junto con la posibilidad de hacer mediciones en tiempo real.

Segunda Generación (2G)

Comenzando con 2G, tecnología que se divide en 3 sub-tecnologías, **GSM**, **GPRS** y **EDGE**.

GSM.

A principios de la década de 1990, la industria de la telefonía móvil experimentó un importante hito con el lanzamiento de **GSM**. Esta red operaba en diversas frecuencias, tales como 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz y 1900 MHz, con un ancho de banda de 25 MHz y 200 kHz por canal en los cuales podían abarcar hasta 100 conexiones. Esto le permitía alcanzar una cobertura máxima de 35 km, la cual sumado a que poseía una velocidad de subida y bajada de hasta 9,6 kbps, la hacía una red esencial para enviar mensajes de texto, mensajes de voz y para roaming. Algo no menor, es que poseía un retraso o latencia de aproximadamente 100 ms, aunque para esos tiempos no entregaba mayores problemas. Funcionaba a partir de modulación digital GMSK.

Junto con GSM, 2G trajo otras tecnologías que lo mejoraban como lo son GPRS y EDGE. La información acerca de ellas se puede encontrar en **Anexo A**.

Para 2G se integraron servicios tales como SMS, llamadas de voz, mensajes multimedia y navegación móvil en páginas formadas mayormente por textos debido a que usaba datos móviles de baja velocidad. [2]

Tercera Generación (3G)

UMTS.

En el año 2004 se lanza comercialmente la primera versión de **3G**, denominada como **UMTS**. Tecnología definida inicialmente en el Release 99 de 3GPP. Funcionaba con un rango de frecuencia de operación de 1710 hasta 2200 MHz. Su ancho de banda es de 5 MHz por canal al igual que **EDGE** y su cobertura máxima era de 35 km. Esto porque reciclaba ciertos elementos y características de **EDGE**. En esta generación, encontramos el uso de dos técnicas de multiplexación denominadas **TDD** y **FDD**. Estas son usadas en el ámbito de la transferencia de subida y bajada, en las que si se usa **TDD** obtenemos hasta 2 Mbps de bajada y 384 kbps de subida. En cambio, en **FDD** tenemos hasta 2 Mbps de descarga y 128 kbps de subida. En temas de modulación cambia totalmente a lo que ya teníamos, dado que se usa QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Seguimos manteniendo los 100 ms de latencia junto con las 100 conexiones por canal como densidad de conexión.

Al igual que en el caso de 2G, 3G trajo consigo tecnologías como HSPA y HSPA+ las cuales para más información se encuentran en el **Anexo B**.

En tema de servicios habilitados para 3G seguimos teniendo llamadas de voz, SMS, servicios multimedia y un nuevo servicio fue el de localización. Además, se mejoró la velocidad de los datos móviles lo cual conlleva a una navegación fluida, videoconferencias y reproducción de videos. [3]

Cuarta Generación (4G)

La cuarta generación de redes móviles trajo consigo nuevas técnicas en la forma de modular la señal, lo que permite un aprovechamiento mejor del espectro de frecuencia. Lo antes mencionado corresponde a **FDD**, **TDD**, **OFDM**, **OFDMA**, **SC-FDMA**, **MIMO**, **Agregación de portadoras** y **Handover**. Para conocer más sobre las técnicas anteriormente mencionadas, ir a revisar el **Anexo C**.

LTE.

En el año 2009 se lanza comercialmente la cuarta generación de las tecnologías inalámbricas móviles, más conocida como LTE. Se caracteriza por usar una frecuencia de operación que va entre los 700 MHz y los 2600 MHz, junto con un ancho de banda de 5-20 MHz. La cobertura que

posee varía entre 50 a 150 km, un cambio grande en comparación a **2G** o **3G**. La modulación usada es QAM, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM. Además de esto, integra técnicas como **OFDM**, **OFMDA** y **SC-FDMA**. La integración cada una logró obtener una mejora en el *Uplink* de hasta 50 Mbps y un *Downlink* de hasta 150 Mbps.

La arquitectura de red de **LTE** contiene nuevos elementos que los podemos clasificar en:

- Acceso: el **eNodeB** es el elemento único y principal de plano de acceso. Corresponde a la estación encargada de la conectividad con 4G. Esto abarca desde la gestión de recursos de radio, incluido control de portador de radio, control de admisión de radio, control de movilidad de conexión y programación. Compresión y encriptación de paquetes
- Core: como parte de elementos del EPC, encontramos al **MME**, **S-GW**, **P-GW**, **HSS** y al **PCRF**. El **MME** es el responsable de la gestión de movilidad de los dispositivos. Junto con esta función tenemos la autenticación de usuarios y manejo de señalización durante *handovers*. Luego tenemos el **S-GW**, elemento que gestiona la conexión entre la red **LTE** y la red externa. Además, es la entidad responsable del enrutamiento. El **P-GW** es el responsable de asignar direcciones IP a los dispositivos **LTE**. También gestiona el tráfico de datos y la facturación. El elemento encargado de almacenar los datos de autenticación del usuario es el **HSS**. El **PCRF** cumple la función de administrar las reglas de políticas junto con los cobros.

Al igual que todas las arquitecturas de red, los elementos pertenecientes a cada una pueden y deben interactuar entre sí mediante interfaces.

- Uu: interfaz entre el **UE** y el **eNodeB**
- S1-U: interfaz entre **eNodeB** y el **S-GW**.
- S1-MME: permite la conexión entre **eNodeB** y el **MME**.
- X2: interfaz entre los **eNodeB**.
- S5: Interfaz entre **S-GW** y **PGW**.
- S11: interfaz entre **MME** y **S-GW**.
- S6a: Interfaz entre el **MME** y el **HSS**.

Además de las interfaces también encontramos protocolos entre los elementos de la red. Estos son; **GTP-U** el cual es utilizado para el encapsulamiento de paquetes IP y transporte hacia la data de usuario. **GTP-C** su función principal es el transporte datos y señales. **S1-AP** protocolo encargado de la señalización entre el **eNodeB** y el **MME**. **X2-AP** al ser un protocolo utilizado para la interfaz **X2**, se encarga de la señalización entre **eNodeB**. **Diameter** es el responsable de la transferencia de datos de suscripción y autenticación de usuarios.

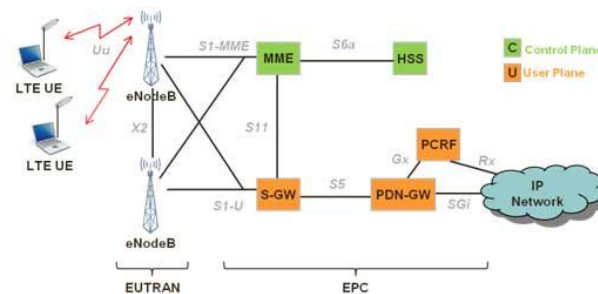


Figura 1. Arquitectura de red LTE.

Fuente: Tomado de [4]

LTE-A.

Durante el mismo año se lanza una versión mejorada denominada como **LTE-A**. Esta tecnología para los expertos es considerada como **4G** puro, dado que **LTE** para muchos no corresponde catalogarlo como **4G**, dado que no cumplía con los requisitos establecidos por el UIT. Estos requisitos era tener una latencia de 10 ms y una velocidad máxima de descarga de 10 Gbps. Por lo que muchos lo llamaron como 3.9G. Sin embargo, **LTE-A** conserva muchas de las especificaciones técnicas de **LTE**, como su frecuencia de operación que se conserva entre los 700 MHz y los 2600 MHz. En temas de ancho de banda, se utiliza un rango de 20 a 100 MHz. Una característica importante que mejoro es la tasa de transferencia de bajada y subida. Donde la primera llega hasta un máximo de 1 Gbps y la segunda hasta 150 Mbps. En esta versión de **LTE**, se usa nuevamente como técnica de modulación 256-QAM y se agrega una nueva que es **MIMO**. La cual corresponde a un tipo de tecnología que utiliza múltiples antenas de entrada y salida para lograr capturar una mayor parte de la señal y aumentar la cobertura. La latencia logro reducirse y dejarla en 10 ms, un avance significativo ya que esto permitiría poder integrarlo para aplicaciones de IoT en minería, industrias, ciudades inteligentes, entre otras.

En cuanto a temas de arquitectura, se conservan los elementos pertenecientes a **LTE**, es decir se mantiene el **eNodeB**, **S-GW**, **MME**, **P-GW** y el **PCRF**. Además, se siguen usando los protocolos e interfaces de **LTE**.

4G ha sido esencial en el desarrollo de aplicaciones industriales como cotidianas. Por ejemplo, gracias a su velocidad mejorada ha impulsado diversas plataformas de streaming de alta calidad, videoconferencias y redes sociales. Junto con esto, ha sido fundamental en campos como lo son la telemedicina, la inteligencia artificial y en IoT.

Quinta generación (5G)

Al igual que en el caso del comienzo de la cuarta generación, el lanzamiento de la quinta generación de tecnologías móviles trajo consigo nuevas técnicas para mejorar el rendimiento. Estas corresponden a mmWave, Beamforming, rangos de frecuencia, network slicing y NR. **Anexo D.**

5G NSA.

Durante el año 2019, se lanzó comercialmente la primera versión de **5G** denominada **5G NSA**, tecnología definida en el Release 15. En cuanto a la frecuencia de operación usa 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1500 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz, 3500 MHz y 26 GHz.

El ancho de banda que es utilizado va desde los 20MHz hasta los 100 MHz. Comparte características técnicas con **LTE-A**, tales como la latencia de 10 ms y la modulación 256-QAM y **MIMO**. La tasa de transferencia de bajada es de 2 Gbps y la de subida es de 200 Mbps. En cuanto a la densidad de conexión, se eleva a 1.000.000 por cada km^2 .

La arquitectura de red también conserva algunos elementos.

- Acceso: se mantiene el **eNodeB** para usarlo en caso de que los dispositivos no admitan conexión a 5G. Un nuevo elemento es el **en-gNB** utilizado como estación base de 5G. Ahora el **en-gNB** cumple las funciones que hacía el **P-GW** en 4G. Las cuales eran, transporte del tráfico entre usuarios y la red, junto con la seguridad.
- Core: en el EPC, se reducen a dos los elementos, estos son el **MME** y el **S-GW**.

Esta simplificación de elementos permite un ahorro de los costos asociados a la instalación de la arquitectura.

Algunas de las interfaces de los elementos de la red se conservan y se agregan algunas nuevas.

- **S1**: interfaz que conecta el **eNodeB** con el EPC.
- **S1-U**: interfaz entre **en-gNB** junto con el EPC.
- **X2**: interfaz que conecta los **eNodeB**.
- **X2-U**: interfaz existente entre los **en-gNodeB**.

Para 5G existen los siguientes protocolos; el **NR-RRC** tiene la función de control de acceso de los recursos radioeléctricos de **5G**. Además, se tiene el protocolo denominado como **NR-NAS**: establece y mantiene las sesiones, la seguridad y la movilidad en la red 5G.

Dado que es una infraestructura compartida, también están presentes los protocolos **RRC**, **NAS** y **PDPC** de 4G.

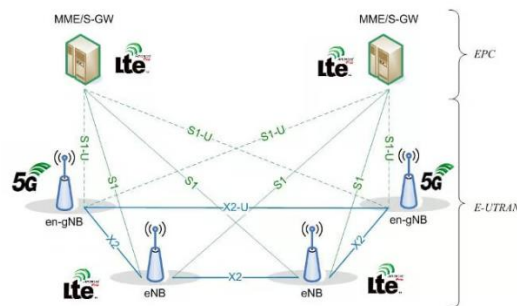


Figura 2. Arquitectura de red 5G NSA.

Fuente: Tomado de [5]

5G SA.

5G SA o 5G+ denominado por algunos expertos, se comienza a definir en el Release 16 de 3GPP entregando información sobre el uso de bandas de frecuencia sub-6GHz y mmWave. Un punto importante de este Release es que se define que 5G SA usaría una arquitectura de red independiente de 4G (como si lo hacía 5G NSA) Esto conlleva un menor costo en la instalación y mantención de la arquitectura.

En cuanto al ancho de banda 5G SA puede utilizar una banda de hasta 20 GHz, junto con una cobertura similar a 4G. Teóricamente alcanza una velocidad de descarga de 20 Gbps y una subida de 10 Gbps.

Como se observa en la figura 6, y como se dijo anteriormente 5G SA hace uso de una arquitectura de red totalmente independiente de tecnologías como 4G o 3G. De igual manera se divide en Acceso y Core.

- Acceso: el único elemento que es parte del acceso es el **gNB**. Corresponde a una versión mejorada del **en-gNB** de **5G NSA**. Funciona como estación base, es decir cumple funciones de control de acceso a la red, transporte de datos y proporcionar servicios de red (voz, datos y mensajería)
- Core: a diferencia de todas las arquitecturas antes vistas, **5G SA** posee solo dos elementos en su Core o 5GC. El primero es el **AMF**, él es responsable de la Función de Gestión de Acceso y Movilidad, gestión de seguridad, gestión de registros, gestión de movilidad y gestión de accesibilidad. El **UPF** es un elemento que funciona para el enrutamiento, reenvío e inspección de paquetes.

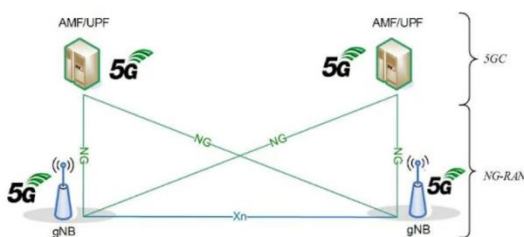


Figura 3. Arquitectura de red 5G SA.

Fuente: Tomado de [5]

5.5G.

5.5G también conocido como 5G Advanced, representa una fase intermedia en la evolución de la tecnología 5G hacia 6G. Esta siguiente etapa en la evolución de la tecnología 5G va más allá de la simple conectividad, ofreciendo capacidades mejoradas. Esto habilitará una amplia gama de aplicaciones relacionadas a sectores como lo son la inteligencia artificial, telemedicina, IoT, smart cities, realidad virtual y aumentada.

Según lo señalado por Huawei es que las especificaciones técnicas de 5G Advanced se están desarrollando en el Release 18 y continuarán en el R19 y R20 [6]. Se espera que esta

tecnología alcance velocidades de 10 Gbps para todos los usuarios, aprovechando al máximo el espectro mediante la implementación de tecnologías como MIMO.

A continuación, se analizarán alguna de las mejoras expuestas por Nokia [7]:

- **XR (AR, VR, juegos):** 5G-Advanced mejorará la experiencia XR al ampliar aplicaciones de VR y AR, así como juegos en la nube. Proporcionará una experiencia de alta velocidad de datos en movimiento y reducirá la carga de procesamiento en los dispositivos XR.
- **Cobertura mejorada y rendimiento MIMO:** 5G-Advanced ofrecerá velocidades de datos más altas y latencias más bajas, lo que es crucial para aplicaciones XR con comunicación bidireccional de alta capacidad de respuesta.
- **Reemplazo de GSM-R con 5G:** 5G-Advanced se utilizará en casos de uso vertical especializados, como ferrocarriles, servicios y seguridad públicos, reemplazando al GSM-R y mejorando la conectividad.
- **Posicionamiento preciso:** 5G-Advanced mejorará el posicionamiento celular en interiores y exteriores, lo que es útil para la automatización industrial, logística, automoción y más.
- **Temporización resiliente:** 5G-Advanced se utilizará para proporcionar sincronización horaria precisa, lo que es esencial para aplicaciones como la automatización industrial y las transacciones financieras en tiempo real.
- **Eficiencia de la operación de la red:** 5G-Advanced introducirá tecnologías de inteligencia artificial y aprendizaje automático para mejorar el rendimiento, la automatización y la eficiencia energética de la red.
- **Movilidad mejorada:** 5G-Advanced apuntará a tiempos de interrupción del servicio prácticamente nulos para dispositivos en movimiento con servicios de latencia crítica.

Al igual que sus generaciones anteriores 5G trajo consigo servicios como transporte inteligente, IoT, redes de sensores, juegos en la nube, telemedicina, VR y AR. [8]

Sexta Generación (6G)

En el año 2020 se lanzó 5G y siguiendo lo con el patrón visto, cada 10 años aproximadamente se lanzan nuevas tecnologías. Es por esto por lo que se dice que la sexta generación de redes inalámbricas móviles debiese estar comenzando a ser comercializada en el

año 2030. 6G llega para incrementar y mejorar todo lo hecho por la generación anterior. Es decir, se deben presentar mejoras en la velocidad de transmisión de datos, latencia, cobertura, densidad de conexión, bandas del espectro de frecuencia, eficiencia energética y casos de usos. En referencia a esto último, se integrarán servicios y/o aplicaciones como comunicaciones holográficas, inteligencia artificial mejorada, AR y VR mejorado, conducción autónoma, telemedicina avanzada y *Smart Cities* mayormente mejoradas. [9][10]

Para la sexta generación se pretende integrar la banda sub-terahercios, lo que traería consigo un aumento en la velocidad de datos con un máximo de hasta 1 Terabits por segundo, mucho más que lo considerado para 5G. Samsung menciona que se realizará "la reorganización de las bandas existentes utilizadas para las redes 3G, 4G y 5G para la operación 6G como otra forma de obtener todo el espectro necesario para 6G"[11] .

Se espera una latencia aproximada de 0.1 ms, una densidad de conexión de 10 millones de usuarios por km² y una confiabilidad del 99.99% . Dentro de lo más importante que se generará por la mejora de estos parámetros, son las aplicaciones y casos de usos. Huawei expone que esta generación establecerá un antes y un después para diversas aplicaciones, como industria, robótica, *Smart Cities*, salud y la realidad virtual y aumentada [12].

Orange destaca la atención puesta en la eficiencia energética, proyectando una disminución en el consumo energético relacionado con la transmisión de bits y la cobertura total del área. Este enfoque busca evitar un aumento en el consumo de energía en comparación con generaciones anteriores. Además, se busca activamente reducir el impacto ambiental de los elementos a lo largo de su ciclo de vida, promover prácticas de reciclaje y mejorar la reparabilidad. [13]

Simuladores/emuladores existentes

Hoy en día existen diversos simuladores utilizados para realizar experiencias prácticas en base a tecnologías inalámbricas móviles. Dentro de internet encontramos diversos simuladores, los cuales nos permiten hacer simulaciones en entornos en los que podemos controlar todas las variables influyentes para el rendimiento.

Simuladores Open Source.

5G-LENA.

5G-LENA es un simulador de redes 5G respaldado por Interdigital y disponible para la comunidad con el propósito de impulsar la adopción temprana y recibir contribuciones. Ofrece un modelo preciso de canal y capa física, considerando propagación, interferencia y modulación. Implementa las pilas de protocolos LTE y NR según el Release 15 de 3GPP, siendo adaptable a escenarios como 5G NSA, 5G SA y acceso compartido. Además, proporciona herramientas de análisis de rendimiento, cobertura y visualización de tráfico, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la investigación en eficiencia espectral, desarrollo de gestión de recursos y evaluación de la integración de servicios y aplicaciones en entornos 5G.

Matlab.

Corresponde a una plataforma de programación ampliamente utilizado en el mundo de la ciencia y de la ingeniería, ya que permite analizar y diseñar desde sistemas con una baja complejidad hasta sistemas muy complejos. Se basa en un lenguaje de programación propio denominado como M. Contiene una amplia gama herramientas adicionales denominadas como '*Toolbox*'. Éstas le permiten poder incrementar los casos de uso, ya que contiene herramientas de control de sistemas, procesamiento de imágenes, redes neuronales, optimización, simulación de sistemas, redes como 4G y 5G, entre otras. El énfasis del uso de Matlab se basa en que se pueden hacer diferentes simulaciones de red en base a la integración de los *toolbox* de LTE o de 5G. Existen librerías para mediciones de celdas, asignación de recursos, medir la calidad de la red y muchas más.

Antecedentes de metodologías docentes.

Para abordar el objetivo general de la memoria, se debe escoger una metodología docente apta para lo que buscamos. Se describieron un total de cuatro métodos de aprendizaje, los cuales corresponden a aprendizaje basado en proyectos, aprendizaje colaborativo, aprendizaje invertido y aprendizaje basado en competencias. Cabe mencionar que los tres primeramente mencionados, se encuentran descritos en la sección de anexos, más específicamente en el **Anexo E**

Aprendizaje basado en competencias.

Antes de definir lo que es el aprendizaje basado en competencias, se debe explicar que es lo que se entiende por competencias. "Las competencias son habilidades y conocimientos prácticos que se pueden aplicar en situaciones reales, y que están relacionados con un desempeño exitoso en un ámbito específico" [14]

Pearson menciona que "la educación basada en competencias, como estrategia integral de desarrollo humano, apunta a la formación de profesionales que no solo dominan los conocimientos y metodologías propios de su disciplina, sino que cuentan con una serie de recursos transversales y habilidades blandas que les permiten enfrentar retos complejos y adoptar un rol positivo y relevante dentro de su comunidad"[15]

La Escuela de Profesores del Perú expresa que, para poder integrar esta metodología de aprendizaje, se debe por lo menos cumplir con 5 puntos importantes: **identificar las competencias, diseñar actividades de aprendizaje prácticas y relevantes, promover el trabajo en equipo, proporcionar retroalimentación y evaluar el desempeño** [14]

En base a lo expuesto dentro de su página web, Pearson dice que el aprendizaje basado en competencias entrega diversas fortalezas que ayudan a los alumnos a llegar al objetivo. Entre éstas encontramos que, aumenta la motivación en los alumnos dado que gracias a los ejercicios prácticos que se emplean, logran entender de mejor manera los contenidos. También potencia el fortalecimiento de las habilidades blandas. Permite generar actitud y flexibilidad contra retos y cambios [15].

Antecedentes de cursos existentes.

La demanda de profesionales en tecnologías inalámbricas móviles está creciendo, lo que ha generado la creación de cursos especializados para cubrir los aspectos cambiantes de este campo. Entre estos encontramos 5G System Engineering de Mpirical, Learning 5G Networks de Ericsson–Carleton Partnership y 4G–LTE EPC Evolved Packet Core Network de Udemy. Si desea conocer más información sobre estos cursos dirigirse hacia el **Anexo F**.

Marco metodológico

En esta sección, se presentará la metodología propuesta para el diseño del curso. Ésta se basa en el libro 'Diseño de Cursos Universitarios' [16]. Se optó por implementar el aprendizaje basado en competencias en particular debido a las características mencionadas en el marco teórico. Estas particularidades hacen que la metodología propuesta sea la más adecuada para el curso, ya que permite que los alumnos desarrollen las competencias necesarias para su futuro profesional. Además, corresponde a una metodología que ha demostrado ser útil en otros trabajos de diseño de cursos realizados por ex estudiantes de la Universidad de Chile [17][18][19][20].

La elección de esta metodología enfocada en el aprendizaje basado en competencias, es respaldada mediante el ciclo de Kolb, que consta de cuatro etapas. Dos de estas etapas se ajustan perfectamente al perfil de un ingeniero: la primera, llamada experiencia concreta, implica que el estudiante enfrenta desafíos para generar conocimientos aplicables en situaciones reales; la segunda, la experimentación activa, permite al estudiante aplicar las nuevas competencias adquiridas a nuevas situaciones. Esto también permite justificar por qué se optó por esta metodología.



Figura 4. Ciclo de Kolb ejemplificado con el ABC.

Fuente: Tomado de [24]

Esta metodología será aplicada a cuatro procesos importantes correspondientes a: **planificación curricular, elaboración y planificación de módulos de instrucción o material docente, el proceso de diseño de las experiencias prácticas y finalmente, revisión y validación de los**

procesos. Primero se entregará una definición de cada una, para luego explicar cómo se trabajará en cada proceso.

- **Planificación Curricular:** Este proceso se basa en diseñar y organizar la estructura y contenidos asociados al curso académico. Es decir, el formato del curso, los objetivos de aprendizaje, las evaluaciones, el calendario académico y los recursos y materiales necesarios.
- **Módulos de Instrucción:** Este proceso se enfoca en los módulos que cubrirán las áreas temáticas que serán abarcadas durante la realización del curso.
- **Diseño de las experiencias prácticas:** El proceso de diseñar las experiencias prácticas está enfocado en las temáticas relacionadas a las tecnologías inalámbricas móviles de última generación, es decir existirán laboratorios 4G y 5G donde se abarcarán los temas expuestos en la planificación curricular.
- **Revisión y validación:** Corresponde a un proceso iterativo que permitirá poder revisar y validar el diseño que tendrá el curso mediante el uso de agentes externos. Es decir, profesionales del área de las telecomunicaciones y profesionales de áreas carreras afines.

Procesos de diseño.

Planificación curricular.

Como se mencionó anteriormente, en este primer proceso se deben establecer los objetivos generales de aprendizaje, contenido, estructura y los módulos de instrucción. Para esto se definen ocho pasos, los cuales son agrupados en una primera etapa denominada como Planificación y una segunda definida como Desarrollo. Esto se observa en la tabla 1.

Tabla 1.

Etapas asociadas al proceso de diseño en base a la metodología usada.

Planificación	Recolección de información
	Formulación de objetivos del curso
	Diseño del programa de estudios
	Diseño del programa de módulos de instrucción
	Diseño del programa de evaluación

Desarrollo	Implantación del diagnóstico
	Clase directa y evaluación formativa
	Evaluación acumulativa

Recolección de información.

Este primer proceso, se basa en realizar la búsqueda de la información necesaria para el correcto desarrollo del curso. La información considerada, debe abarcar los aspectos técnicos de 2G,3G,4G,5G y 6G (consideraciones futuras). También se debe abarcar la estructura del curso, es decir, la definición del Syllabus, la identificación de la audiencia objetivo, el tiempo disponible para la realización del curso y determinar los medios necesarios para la ejecución del curso (laboratorios, aulas de clases).

Formulación de objetivos del curso.

En este proceso se definen los logros que el estudiante debe alcanzar a lo largo del curso en términos de acciones a realizar, conocimientos a adquirir y valores a apreciar. Asimismo, se detallan subobjetivos que describen las condiciones que el alumno debe satisfacer para alcanzar el objetivo central.

Diseño del programa de estudios.

En este proceso se analiza el programa de estudios, el cual debe representar la interconexión entre el objetivo central y los subobjetivos, incluyendo los contenidos, estrategias y recursos empleados para alcanzarlos. El programa se divide en unidades programáticas o módulos que están intrínsecamente vinculados a cada uno de los subobjetivos establecidos. Esto significa que cada unidad programática se concibe y estructura de manera que su contenido y enfoque estén directamente alineados con los subobjetivos específicos que contribuyen a la consecución del objetivo central del programa.

Diseño del programa de módulos de instrucción.

Dentro de este proceso, el programa de estudios se divide en módulos que deben abarcar todas las partes del programa y hacer uso de todos los recursos disponibles. Un programa de módulos de instrucción debe contener: introducción, objetivo general del módulo, objetivos específicos, actividades, síntesis y bibliografía.

Diseño del programa de evaluación.

Este proceso se relaciona con la creación de un sistema de supervisión para evaluar el logro de los objetivos previamente establecidos. El control debe proporcionar datos cuantificables sobre la eficacia del proceso de aprendizaje y debe centrarse en el objetivo central.

Implantación del diagnóstico.

Esta etapa facilita la identificación precisa de los requisitos previos necesarios para abordar cada módulo, lo que a su vez permite recibir retroalimentación y, en consecuencia, realizar ajustes específicos en los contenidos de cada módulo. Durante este proceso, se abordan cuestiones clave, como los conocimientos previos que el estudiante debe poseer para comprender los contenidos del curso. Además, en caso de ser necesario, se llevan a cabo modificaciones en los contenidos existentes o se incorporan nuevos contenidos de apoyo para mejorar la comprensión y el aprendizaje.

Clase directa y evaluación formativa.

Después de efectuar las modificaciones en el paso anterior, el profesor procede a impartir tanto las clases teóricas como prácticas, guiando el curso en consonancia con la planificación de los módulos y haciendo uso de los instrumentos de evaluación previamente concebidos. Durante estas clases, se enriquecerán con material visual, creando un ambiente de interactividad donde se alienta a los estudiantes a plantear preguntas y ofrecer sugerencias. Esta dinámica favorecerá la posibilidad de explorar en profundidad ciertos temas o abordarlos de manera más detallada.

Evaluación acumulativa.

Este proceso tiene como finalidad evaluar en qué medida se han alcanzado los objetivos de enseñanza y aprendizaje del curso, lo que posibilita una evaluación de la eficacia del sistema y la identificación de áreas que necesitan mejoras en futuras implementaciones.

Planificación y diseño de Módulos Teóricos y Experiencias Prácticas.

Planificación de módulos y experiencias prácticas.

Una primera etapa importante que se debe considerar es la planificación, esto para construir de manera eficiente, tanto los módulos teóricos como los módulos prácticos. En base a esto, se crean grupos de los contenidos que se quieren abarcar. Podemos considerar un grupo de contenido teórico, el cual se desarrollará de manera de clases expositivas realizadas por parte del profesor. Estas clases expositivas contarán con apoyo visual del tipo de diapositivas, para

ayudar al entendimiento de los alumnos. El segundo grupo considerado corresponde a las experiencias de laboratorio, las cuales estarán hechas en base a los contenidos teóricos vistos junto con las actividades prácticas a realizar.

Diseño de módulos teóricos y prácticos.

Todo módulo, ya sea relacionado con contenidos teóricos o prácticos, debe contar con una estructura básica que facilite su ejecución. Este molde o estructura debe contener mínimamente con lo siguiente:

- **Título:** Se presenta un título, el cual debe ser conciso y capaz de describir de manera específica y completa los contenidos de cada uno de los módulos.
- **Índice:** El índice debe estar presentado de una manera muy detallado.
- **Resumen:** En el comienzo de cada módulo, se incluye un resumen que tiene la función de resaltar de forma concisa las ideas fundamentales y los conceptos clave que se abordan en dicho módulo.
- **Objetivos:** En este apartado, se detallan las habilidades y conocimientos que se busca que el alumno adquiera de manera clara al concluir cada módulo.
- **Cuerpo:** Esta sección se enfoca en el desarrollo integral de los temas que se abordan en cada módulo, y constituye la parte más extensa del documento. Aquí se presentan en detalle los fundamentos teóricos de cada módulo.
- **Bibliografía:** Se proporciona un listado que enumera las fuentes de información clave(en caso de ser necesario) para permitir a los estudiantes profundizar de manera autónoma en los temas.

Metodología de laboratorios

Las experiencias prácticas se introducirán a partir de la semana 4. En cada sesión práctica, se seguirá un enfoque de trabajo que comienza con una charla introductoria. Esta charla tiene como objetivo presentar las temáticas que se abordarán en esa sesión y responder a cualquier pregunta o duda que surja antes de empezar. Estos laboratorios se llevarán a cabo de manera gradual a medida que se avancen en los contenidos del curso, lo que permitirá que los estudiantes adquieran familiaridad con el contenido antes de cada sesión práctica.

Las sesiones prácticas serán realizadas por los alumnos en grupos de 3 a 4 miembros, con el propósito de promover la competencia y la colaboración en la resolución de problemas reales. En cada sesión, se establecerán los criterios mínimos que los estudiantes deben cumplir para considerar que han tenido una experiencia exitosa. Esto se llevará a cabo a través de una guía de laboratorio entregada a cada grupo, la cual contendrá los requisitos mencionados, recomendaciones, pasos a seguir y un registro de los resultados obtenidos durante cada simulación.

Dentro de la sesión, los estudiantes deberán desarrollar lo solicitado por el docente y presentar un primer informe de avance. Luego, tendrán hasta el siguiente módulo para entregar todo lo solicitado, incluyendo los resultados de simulación y respuestas a las preguntas, mediante un segundo informe. El docente proporcionará retroalimentación sobre el primer informe, si es necesario, para que los estudiantes lo tengan en cuenta en la entrega final. Este proceso se puede visualizar de manera más detallada en la Figura 5.

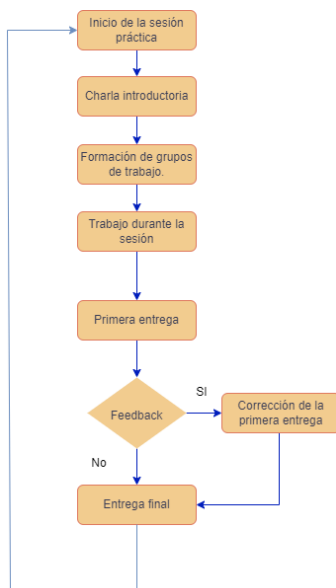


Figura 5. Metodología asociada a las experiencias de laboratorio.

Elaboración propia

Resultados

Dentro de esta sección se abordarán los resultados obtenidos mediante la implementación de la metodología docente adoptada. Estos resultados se dividen en dos categorías: resultados docentes y resultados de experiencias prácticas. Cabe destacar que se mostraran algunos, por lo que si desea verlos todos debe presionar [aquí](#).

Resultados Docentes.

Como primer grupo, analizaremos los resultados docentes obtenidos mediante la aplicación de la metodología. Dentro de esta subsección se entregarán los siguientes resultados: Prerrequisitos básicos del curso, audiencia objetivo, duración del curso, objetivos del curso, objetivos para cada unidad temática, unidades programáticas y material docente preparado.

Planificación curricular.

Prerrequisitos básicos del curso.

Los prerrequisitos para los futuros alumnos del curso son los siguientes:

- Conceptos básicos de telecomunicaciones tales como, Modelo OSI y Modelo TCP, direcciones IP y direcciones MAC, ancho de banda, throughput.
- Conceptos asociados a espectro electromagnético.

Audiencia objetivo.

La potencial audiencia corresponde a los estudiantes de pregrado que se encuentren cursando las carreras de Ingeniería Civil Eléctrica o Ingeniería Civil en Computación. Sin embargo, también se encuentra destinado a profesionales y técnicos en el área de las telecomunicaciones que requieran aprender nuevos conceptos.

Periodo de duración del curso.

La duración del curso corresponde a 14 semanas pedagógicas, donde en cada semana existirán un día de clases con dos módulos. Donde un módulo será teórico y el siguiente será práctico (desde la cuarta semana). Se calculó que el curso constará con un total de 21 horas repartidas entre clases teóricas, laboratorios y evaluaciones. Además, en la figura se logra observar la carga académica relacionada al curso. Esto en base a la plantilla usada en la Universidad de O'Higgins.

Créditos SCT:	6	Tiempo de trabajo sincrónico semanal:	4,5 horas
Carga horaria semestral ¹ :	180 horas	Tiempo de trabajo asincrónico semanal:	6,1 horas
Carga horaria semanal:	10,6 horas		

Figura 6. Aspectos relacionados a la carga académica.

Fuente: Elaboración propia.

Objetivos del curso.

Un punto importante que debe ser considerado en el diseño de un curso son los objetivos de aprendizaje esperados que obtendrá el estudiante.

1)	Comprender los fundamentos de las redes inalámbricas móviles, desde 2G hasta 6G.
2)	Adquirir conocimiento sobre los distintos simuladores o emuladores utilizados habitualmente para experiencias prácticas
3)	Comprender aspectos técnicos básicos relacionados a las redes inalámbricas móviles tales como ancho de banda, latencia, espectros de frecuencia.
4)	Comprender técnicas de modulación como FDM, OFDM, OFDMA, SC-FDMA.
5)	Resolver desafíos prácticos en conjunto de un grupo de trabajo.
6)	Familiarizarse con casos de usos y aplicaciones del presente y futuro, tales como IoT, telemedicina, robótica e industria 4.0 .

Figura 7. Objetivos del curso.

Nota. Dentro de esta figura se entregan los objetivos asociados a la implementación del curso.

Fuente: Elaboración propia.

Objetivos y contenidos por unidad.

En esta sección se expondrán los objetivos esperados para cada unidad del plan del curso. Esto se hará mediante una descripción y una imagen que corresponderá a los contenidos de la unidad.

- Unidad 1: El objetivo primordial de la primera unidad del curso se concentra en la presentación inicial de conceptos fundamentales que jugarán un papel esencial a lo largo de todo el programa. Por esta razón, se le ha otorgado el nombre de **Fundamentos de Tecnologías Inalámbricas**, con el propósito de establecer las bases esenciales de los contenidos.

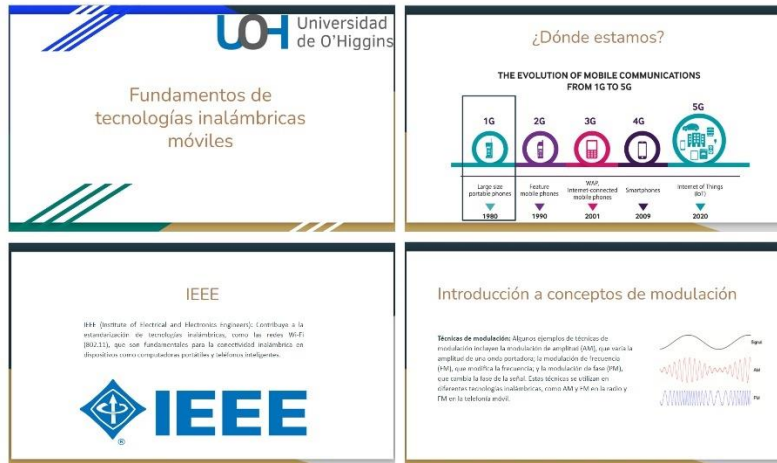


Figura 8. Material asociado a la unidad 1.

Nota. Esta figura muestra la presentación asociada a la primera unidad del curso.

Fuente: Elaboración propia.

- Unidad 2: El objetivo principal de la segunda unidad es que los integrantes del curso adquieran conocimiento de los fundamentos técnicos asociados a la Segunda y Tercera Generación de tecnologías inalámbricas móviles. Los temas tratados se dividen en una introducción a las generaciones, espectro de frecuencia, ancho de banda, cobertura, modulación, protocolos, arquitectura y elementos de la red. La Figura 21 ilustra el formato del material a ser utilizado.
- Unidad 3: El objetivo principal de la tercera unidad es que los alumnos se familiaricen con todos los temas relacionados a 4G. Estos temas están relacionados con las tecnologías de acceso múltiple, técnicas como *Beamforming*, MIMO, *Handover*, mMIMO. Junto con esto, se abarcan los fundamentos técnicos asociados al espectro de frecuencia, ancho de banda, cobertura, modulación, arquitectura elementos y protocolos de red. Además, se expondrán las aplicaciones y servicios habilitados para 4G (IoT, Ciudades Inteligentes, industria 4.0, entre otros). Este material puede ser observado en la Figura 22.
- Unidad 4: El objetivo de la cuarta unidad es análogo a la unidad 3. Es decir, corresponde a la familiarización de temas relacionados con 5G. Tales temas corresponden a los espectros de frecuencia, ancho de banda, cobertura, modulación, arquitectura elementos

y protocolos de red. Junto con esto, se expone mmWave, Network Slicing, HetNets, Edge Computing, rangos de frecuencia y escenarios 5G (eMMB, mMTC, URLLC). Finalmente, se darán a conocer aplicaciones, servicios y usos de 5G en la actualidad y para el futuro. El material visual asociado puede ser observado en la Figura 23.

- Unidad 5: El objetivo planteado para la última unidad es que los alumnos obtengan una visión hacia el futuro de las tecnologías inalámbricas móviles asociados a la Sexta Generación. Para ver la estructura del material de cátedra asociado debe dirigirse a la Figura 24.

Condiciones de aprobación y evaluaciones.

A continuación, se exponen las condiciones que se considerarán para la aprobación del curso. Además, se entregan las ponderaciones de las evaluaciones.

Como se observa, las evaluaciones se encuentran divididas en Controles y Laboratorios. El curso cuenta con dos controles de contenido teórico y 10 laboratorios prácticos.

1. LA ASIGNATURA SE APRUEBA SI: $NF \geq 4.0$ siempre y cuando $NC \geq 4.0$, $NL \geq 4.0$.
La Nota Final del curso (NF) está compuesta por la Nota de Cátedra (NC) y una Nota de Actividades Complementarias (NAC) con las siguientes ponderaciones:
$NF = 0.5 NC + 0.5 NL$
La Nota de Cátedra (NC) está compuesta por el promedio simple de las notas de los tres controles de cátedra.
$NC = (C1 + C2)/2$
La NL está compuesta por las notas de los laboratorios
$NL = (L1 + \dots L10)/10$
INASISTENCIA A EVALUACIONES.
Toda inasistencia a un Control de Cátedra será calificada con la nota mínima (1,0).

Figura 9. Condiciones de aprobación y evaluaciones.

Nota. En esta figura se pueden observar las condiciones básicas para la aprobación del curso.

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía, recursos obligatorios y complementarios.

En la figura n°13 se observan los materiales asociados a los recursos obligatorios y complementarios.

Guía de Laboratorio N°6
Análisis de Ocupación de Recursos en Redes NR

Resumen
En este laboratorio se realizarán cálculos y gráficos para determinar la cantidad de programaciones necesarias en una red 5G, considerando dispositivos por celda y duraciones de llamadas. Luego, se analizará la utilización de PDCCH en relación con el SINR de PDSCH y otras variables. Finalmente, se llevará a cabo un análisis detallado de la utilización de los recursos de control PDCCH, considerando variables como capacidad de datos, usuarios RRC, periodicidad de programación, BLER y nivel de agregación, junto con la evaluación de PDCCH en función del SINR de PDSCH para diferentes configuraciones de ancho de banda y subportadoras.

Objetivo de laboratorio
El objetivo de este laboratorio es entender cómo se analiza la ocupación de recursos en redes de comunicación de próxima generación (NR) y cómo se visualizan los resultados. Se realizará el análisis para dos tipos de bloques de señalización, SIB1 y SIB2, utilizando códigos Python.

Parte 1: Análisis de Ocupación de Recursos para SIB1 (Synchronization Signal Block 1)

<https://github.com/zulfadzrin/nr-dimensioning/tree/master/Part%203%20System%20Information%20SIB1%20Occupancy>

Preguntas

Pregunta 1: ¿Qué hace el código antes de solicitar la entrada del usuario?

Pregunta 2: ¿Por qué se solicita al usuario ingresar el tamaño de los Recursos Elementales (RE) de SIB1?

Pregunta 3: ¿Qué cálculos se realizan para calcular la ocupación de recursos?

Pregunta 4: ¿Cómo se visualizan los resultados en este código?

Pregunta 5: ¿Cómo cambia la ocupación de recursos a medida que varía el número de haces?

Pregunta 6: ¿Cómo influye el tamaño de SIB1 en la ocupación de recursos?

Pregunta 7: ¿Qué información proporciona el gráfico de barras generado?

Figura 12. Guías de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Controles de Cátedra.

En base a la metodología empleada, las evaluaciones hacia el alumnado forman una parte fundamental del aprendizaje. En base a esto, se crearon 2 controles que abarcan las 5 unidades temáticas del curso.

Redes inalámbricas móviles de última generación

Control N°1

Profesores: XXXXXXXX
Fecha XX/XX/XXXX

Preguntas.

P1

- 1) ¿Qué es la modulación en comunicaciones y cómo se relaciona con la transmisión de datos? Explique detalladamente.
- 2) ¿Cuál es la diferencia fundamental entre la modulación QAM (Modulación de Amplitud en Cuadratura) y la modulación PSK (Modulación de Desplazamiento de Fase)?
- 3) ¿Qué ventajas ofrece la modulación GMSK (Modulación de Desplazamiento de Fase de Gaussiana Mínima) en comparación con otras técnicas de modulación? Elabore un cuadro comparativo entre la modulación GMSK y las demás técnicas de modulación.

Redes inalámbricas móviles de última generación

Control N°2

Profesor(es): XXXXXXXX
Fecha XX/XX/XXXX

Preguntas.

P1

1. ¿Cómo se gestionan múltiples conexiones en LTE utilizando tecnologías de acceso múltiple? Explique detalladamente.
2. Describa la arquitectura de red LTE y sus componentes esenciales. Además, explique las funciones de los elementos de red.
3. Explique lo más completo posible los siguientes conceptos:
 - a. Beamforming
 - b. MIMO
 - c. Handover
 - d. Network Slicing

Figura 13. Controles de cátedra.

Fuente: Elaboración propia.

Controles de Lectura.

Como método para evaluar el conocimiento adquirido antes de iniciar los laboratorios, se llevará a cabo una instancia que comprenderá controles de lectura, los cuales estarán directamente relacionados con los temas que se abordarán en cada laboratorio.

**Redes inalámbricas móviles de última generación
MIMO en Redes Inalámbricas
Control de Lectura N°9**

Profesores: XXXXXXXX
Fecha XXX/XX/XXXX

Preguntas.

1. ¿Qué significa la sigla MIMO en comunicaciones inalámbricas?
 - a. Múltiples Indicadores, Múltiples Operaciones.
 - b. Múltiples Ingresos, Múltiples Objetivos.
 - c. Múltiples Inputs, Múltiples Outputs.
 - d. Mínimo Interferencia, Mínimo Overhead.
2. ¿Cuál es uno de los beneficios clave del uso de MIMO en sistemas de comunicación?
 - a. Aumento de la complejidad de la red inalámbrica.
 - b. Mayor interferencia en el enlace ascendente.
 - c. Incremento de la velocidad y la confiabilidad de la transmisión de datos.
 - d. Reducción de la cantidad de información de control transmitida.
3. En un sistema MIMO, ¿qué se refiere a 'Múltiples Inputs'?
 - a. Varios usuarios que reciben datos simultáneamente.
 - b. Diversidad en la señal transmitida desde una única antena.
 - c. Múltiples antenas en la estación base que transmiten datos.
 - d. Mayor cantidad de información en el enlace ascendente.
4. En un sistema MIMO, ¿qué se refiere a Múltiples Outputs?
 - a. Varios dispositivos IoT que transmiten datos simultáneamente.
 - b. Diversidad en la señal recibida por una única antena receptora.
 - c. Múltiples antenas en el dispositivo móvil que reciben señales.
 - d. Mayor cantidad de información en el enlace ascendente.
5. ¿Qué técnica se utiliza en MIMO para mejorar la transmisión de datos al explotar la diversidad espacial?
 - a. Beamforming.
 - b. CDMA.
 - c. Modulación QPSK.
 - d. SISO.
6. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera acerca de MIMO?
 - a. MIMO solo se utiliza en redes fijas, no en redes móviles.
 - b. MIMO se utiliza principalmente para transmitir voz en lugar de datos.
 - c. MIMO puede mejorar la velocidad y la confiabilidad de la transmisión de datos al utilizar múltiples antenas en la estación base y el dispositivo móvil.
 - d. MIMO es una técnica que no tiene aplicación en comunicaciones inalámbricas.

Figura 14. Controles de lectura.

Fuente: Elaboración propia.

Experiencias prácticas.

Dentro de esta sección abarcaremos las 10 experiencias prácticas preparadas para ser usadas en los laboratorios docentes. Éstas se dividen en 3 simuladores; Matlab, 5G-LENA y Python. Por lo que se entregarán los resultados separados por simulador.

Matlab.

Los laboratorios asociados al simulador de MATLAB incluyen tres experiencias prácticas centradas en temas como Beamforming, SINR, arquitecturas de red, parámetros de equipos de usuario y antenas, y modulación OFDM.

Experiencia N°1.

Dentro de la primera experiencia práctica, se lleva a cabo una simulación de comunicación inalámbrica entre una BS y un UE. Al observar los resultados obtenidos, se logra ver que las ganancias de camino y la respuesta en frecuencia resaltan la variabilidad del canal, permitiendo comprender su robustez en condiciones dinámicas. Además, se presenta un análisis de las capacidades de Beamforming, basado en los patrones de radiación proporcionados por las antenas, que ofrecen información sobre la dirección del haz y la eficacia en la comunicación. La eficiencia espectral se evalúa para comprender cómo se utiliza el ancho de banda disponible, y la sensibilidad del canal a cambios ambientales subraya la necesidad de consideraciones adaptables en entornos dinámicos. En conjunto, estos resultados ofrecen una comprensión

detallada y aplicable del comportamiento del canal, sirviendo como base para decisiones en el diseño y optimización de sistemas de comunicación inalámbrica.

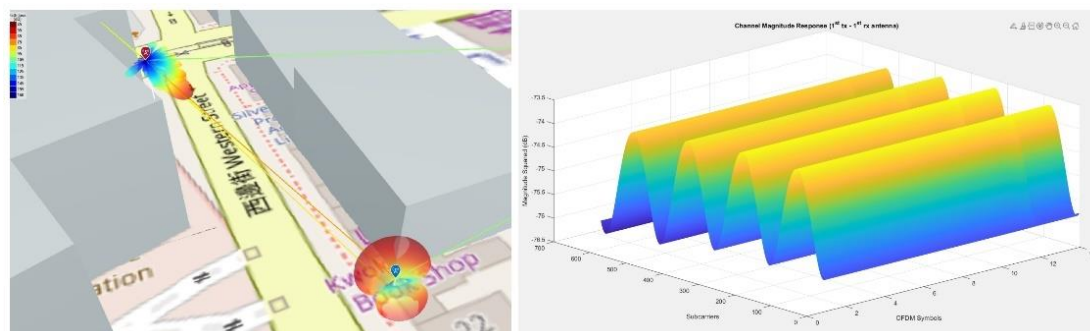


Figura 15. Resultados asociados a la experiencia N°1 de Matlab.

Experiencia N°2.

El análisis de los resultados obtenidos entrega una comprensión profunda de la calidad de la señal y la eficiencia espectral del sistema de antenas simulado. La introducción de patrones de antenas personalizados muestra una correlación clara con la variación del SINR, evaluado tanto en condiciones de espacio libre como cercanas, proporcionando una métrica cuantitativa esencial para la robustez del sistema ante interferencias y ruido. La eficiencia espectral se ve afectada por la variación del SINR, indicando la capacidad del sistema para aprovechar eficientemente el espectro radioeléctrico. La exploración de conceptos avanzados, como matrices de antenas de arreglo y la inclinación de antenas, mejora notablemente la cobertura y eficiencia espectral. La evaluación de elementos de antena de parche destaca cambios significativos en la ganancia y directividad, evidenciando la adaptabilidad del sistema a diferentes diseños de antena. Estos resultados subrayan la importancia crítica del SINR y la influencia de estrategias avanzadas en la optimización del sistema para diversas condiciones. Si desea observar el resultado asociado a esta experiencia debe dirigirse a la Figura 25.

Experiencia N°3.

En los resultados obtenidos, se determina la altura necesaria para establecer la línea de visión entre antenas transmisoras y receptoras, obteniendo valores específicos para distintas ubicaciones. Los análisis de patrones de radiación revelaron direcciones e intensidades de señal transmitida y recibida, proporcionando datos detallados sobre cobertura y calidad en diversas direcciones. Se evaluaron pérdidas de señal por obstáculos naturales, ofreciendo información cuantitativa sobre el impacto de condiciones meteorológicas y vegetación. Se hicieron mediciones sobre la capacidad del sistema para adaptarse a cambios en la frecuencia de operación, destacando la flexibilidad del diseño de antenas. La estimación de cobertura y ganancia del receptor proporciona una visión completa de la eficacia del sistema en áreas específicas. Estos resultados cuantitativos son cruciales para comprender la eficiencia y confiabilidad del enlace en entornos diversos. Para conocer los resultados de esta experiencia práctica debe dirigirse a la Figura 26.

Python.

Experiencia práctica N°1.

En el análisis de los gráficos resultantes, se observa la asignación de bloques de recursos en función del ancho de banda y la separación entre subportadoras para la tecnología 5G NR. Los datos revelan la distribución de recursos bajo diferentes condiciones de red, proporcionando información valiosa para la optimización de la configuración y el rendimiento de la red 5G NR. Específicamente, se examinó el impacto de la elección del valor de SCS en la eficiencia espectral, la capacidad de soporte para diferentes servicios (como voz, video o datos), y la capacidad para cumplir con requisitos específicos de latencia. Se observa que un SCS más estrecho ofrece mayor precisión temporal, pero con un mayor consumo de ancho de banda, mientras que un SCS más amplio puede ser más eficiente espectralmente, pero con menor precisión temporal. Estos resultados son esenciales para comprender la dinámica de la red 5G.

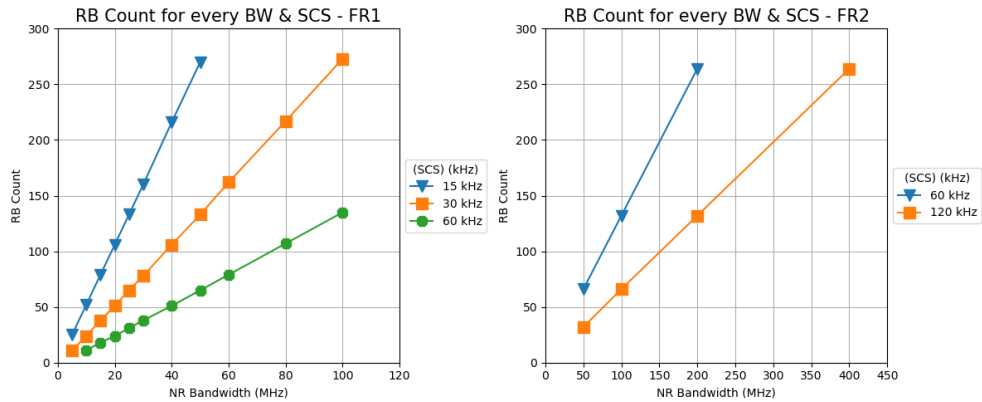


Figura 16. Resultados asociados a la experiencia N°1 de Python.

Experiencia práctica N°2.

Los gráficos generados por el código revelan patrones significativos en la ocupancia de PSS+SSS para tecnologías 5G en diferentes configuraciones de frecuencia y tamaños de banda. La variación de la ocupancia en función de la periodicidad del SSB y el número de SSB en un conjunto es claramente visible, brindando observaciones valiosas sobre la eficiencia espectral. Estos gráficos permiten identificar configuraciones óptimas que maximizan la ocupancia y, por ende, la utilización eficiente del espectro. La comparación entre bandas de frecuencia FR1 y FR2 también se presenta, proporcionando una visión para la toma de decisiones en la implementación y optimización de redes 5G, considerando las características específicas de despliegue y las capacidades de la red. Los resultados los puede observar en la Figura 27.

Experiencia práctica N°3.

El gráfico generado por el código revela cómo la ocupación del recurso en una red NR se ve afectada por la variación en el número de haces y la periodicidad de actualización, específicamente para SIB1 con una periodicidad de 20 ms. Se observa que a medida que aumenta el número de haces, la ocupación tiende a incrementar, sugiriendo una mayor demanda de recursos. La periodicidad de 20 ms se utiliza como referencia, y los valores de ocupación en porcentaje indican la proporción del recurso utilizado en cada escenario. Este análisis visual permite comprender mejor cómo la asignación de recursos se adapta a diferentes configuraciones, proporcionando información valiosa para la optimización de la red NR en

términos de ocupación del recurso. Para observar los resultados obtenidos debe dirigirse a la Figura 28.

Experiencia práctica N°4.

El gráfico ofrece una representación detallada de la dinámica de la red 5G NR al explorar la relación entre el número de usuarios por celda y la cantidad de recursos de programación necesarios. Cada curva en el gráfico refleja distintas duraciones de conexión de usuarios (corta, media y larga), revelando cómo estas afectan la carga de programación. Factores críticos, como la utilización del periodo RRC, que indica el tiempo de uso de recursos de conexión descendente y ascendente, y el número de eventos RRC por usuario por hora, son elementos esenciales que influyen en la necesidad de programación. Además, la periodicidad de programación y la tasa de error de bloqueo también desempeñan un papel crucial al determinar la eficiencia de la asignación de recursos. En otras palabras, el gráfico proporciona una detallada representación de cómo las fluctuaciones en la cantidad de usuarios y sus patrones de conexión afectan la complejidad en la gestión de recursos en entornos 5G NR. Dentro de la Figura 29 pueden observarse los resultados asociados a esta experiencia práctica.

5G LENA

Experiencia práctica N°1

La simulación proporciona una evaluación detallada del rendimiento de la red NR, abordando ocho parámetros clave. La identificación de flujos y tipos de tráfico distingue entre aplicaciones generadoras de tráfico. La carga generada se caracteriza por el número total de paquetes y bytes transmitidos. La eficiencia de la transmisión se evalúa a través de la tasa de transmisión ofrecida y la tasa de transferencia efectiva. La confiabilidad se examina mediante el recuento de paquetes recibidos y transmitidos. El retardo promedio y el *jitter* promedio ofrecen información crítica sobre la latencia y la variabilidad temporal. Además, se proporciona una visión específica para un dispositivo individual, permitiendo ajustes y optimizaciones precisas de la configuración de red para satisfacer requisitos específicos de aplicaciones y servicios.

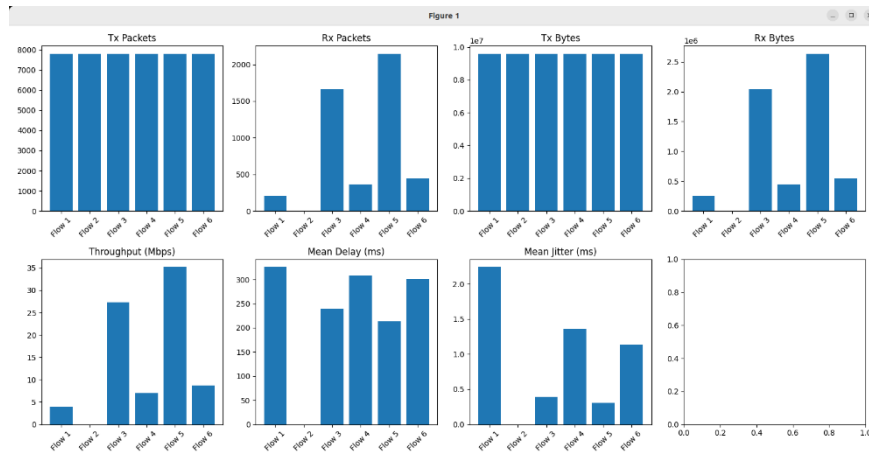


Figura 17. Resultados asociados a experiencia práctica n°1 de 5G-LENA.

Experiencia práctica N°2

Los resultados obtenidos del análisis del código proporcionado revelan un rendimiento robusto en la simulación NR, reflejado en los parámetros de salida clave. La observación detallada de las métricas, como Tx *Packets*, Tx Bytes y Rx *Packets*, proporciona una visión integral de la transmisión y recepción de datos en la red. La consistencia en los valores de *Throughput* indica una eficiente entrega de datos, mientras que la baja variabilidad en Rx *Packets* y Mean *Delay* sugiere una comunicación estable y confiable. Además, el análisis del *jitter* muestra una mínima fluctuación en los tiempos de llegada, contribuyendo a la coherencia en la calidad de la comunicación. Los resultados asociados a esta experiencia práctica están ubicados en Figura 30.

Experiencia práctica N°3

Los resultados de la simulación indican un rendimiento generalmente sólido de la red. La cantidad de paquetes transmitidos y bytes enviados revela la carga de trabajo generada por la aplicación, mientras que la eficiencia real de la transmisión, representada por el rendimiento ofrecido y el rendimiento real, muestra la capacidad de la red para utilizar el ancho de banda disponible. La cantidad de bytes recibidos refleja la eficacia de la recepción de datos. En cuanto a la latencia promedio, este parámetro mide el tiempo medio que tarda un paquete en viajar desde el emisor hasta el receptor. Una latencia promedio mayor podría indicar posibles cuellos de botella o congestiones en la red. La variabilidad en los tiempos de llegada, conocida como *jitter*, afecta la consistencia en la entrega de paquetes. Un *jitter* menor sugiere una transmisión

más constante. La cantidad de paquetes recibidos exitosamente evidencia la fiabilidad de la transmisión. Estos resultados proporcionan una visión del rendimiento de la red, siendo esenciales para evaluar su eficiencia y confiabilidad en función de las necesidades específicas de las aplicaciones y los requisitos de rendimiento. Para observar los resultados asociados a esta última experiencia práctica, deben dirigirse a la Figura 31.

Discusión de resultados

Dentro de esta sección, se discuten la metodología docente aplicada, los resultados docentes obtenidos junto con los asociados a las experiencias prácticas realizadas. Además, se expone el aporte que entrega el trabajo de título realizado para la audiencia objetivo.

Metodología docente aplicada.

En el desarrollo del trabajo de título, se utilizó la metodología docente adoptada dentro del marco metodológico para llevar a cabo los pasos relacionados con la planificación curricular. Todo esto comenzó con la recolección de la información a ser usada, con el enfoque de sentar las bases teóricas del curso. Luego se llevó a cabo la formulación de objetivos del curso, lo cual permitió definir los alcances que iba a tener el syllabus, así como los objetivos necesarios para ser alcanzados. Gracias a este segundo paso, se logró el diseño del programa de estudios que contiene todo lo relacionado con los contenidos, estrategias y recursos empleados para cumplir con los objetivos planteados anteriormente. Después de esto, se procedió al diseño del programa de módulos de instrucción, el cual plantea lo mínimo que debe contener cada módulo de instrucción que sea utilizado dentro del marco del curso. Luego se diseñó el programa de evaluación, que permitió cuantificar la eficacia del proceso de aprendizaje y corroborar si estaba enfocado en el objetivo central. El paso asociado a la implantación del diagnóstico se desarrolló de manera idónea abordando los conocimientos previos que debe contener el alumno, junto con modificaciones de contenidos o incorporación de éstos mismos. El penúltimo paso corresponde a las clases directas y evaluación formativa, que tiene por objetivo la transmisión de la información y los tópicos establecidos en los pasos previos. Finalmente, se llega a las evaluaciones acumulativas que permitieron evaluar en qué medida se han alcanzado los objetivos de enseñanza y aprendizaje del curso.

Esta metodología, basada en competencias, resulta idónea para el enfoque de esta memoria, ya que desde el principio se pretendía que los alumnos generen la capacidad de adquirir competencias en el ámbito práctico y generar habilidades que les permitan desarrollarse cada vez más en el ámbito laboral. Algunas de estas son trabajo en equipo, liderazgo, comunicación efectiva, resolución de problemas y pensamiento crítico.

Resultados docentes

Con respecto a los resultados docentes obtenidos, estos abarcan la planificación curricular, la cual comienza con la audiencia objetivo. Esta audiencia incluye a los estudiantes de ingeniería civil eléctrica que estén cursando su octavo semestre, así como a los alumnos pertenecientes a la carrera de ingeniería civil en computación que estén en su noveno semestre. Por otro lado, también está enfocado en los profesionales que deseen adquirir nuevos conocimientos relacionados con el tema principal del curso.

Otro resultado docente corresponde al periodo de duración del curso, el cual se basa en 14 semanas pedagógicas. En este periodo, se destina un día dividido en dos bloques en el cual la clase expositiva tenga una duración máxima de una hora, entre 15 a 20 minutos se dedican a los controles de lectura, y el resto del tiempo se asigna a las experiencias prácticas o a las evaluaciones según sea el caso. Cabe mencionar que se contemplan 12 clases teóricas acompañadas con material expositivo, junto con 10 experiencias prácticas a ser realizadas con la ayuda de guías de laboratorio.

Los objetivos del curso se basan fundamentalmente en la adquisición de conocimientos asociados a la información teórica entregada, junto con el conocimiento generado a partir de las experiencias prácticas.

Los objetivos y contenidos asociados a cada unidad comprenden una parte fundamental del curso, dado que serán entregados directamente a los alumnos y, por consiguiente, deben abordarse de la manera más clara y concisa posible para que los objetivos generales del curso se cumplan completamente. Cabe destacar que el curso se divide en 5 unidades, comenzando con la primera unidad asociada a los fundamentos de tecnologías inalámbricas, luego la segunda unidad que contempla segunda y tercera generación, la tercera unidad que contiene a la cuarta generación, la penúltima unidad asociada a la quinta generación y finalmente, la quinta unidad la cual se basa en la sexta generación.

Dado que se trata de un curso docente, se deben establecer condiciones de aprobación basadas en la ponderación de notas asociadas a informes relacionados a las experiencias prácticas, y los controles. Como se acaba de mencionar, también se cuentan con evaluaciones,

las cuales se dividen en controles de cátedra, que son los que posibilitan la evaluación del conocimiento adquirido por parte de los estudiantes en función de los módulos teóricos impartidos. Asimismo, se incluyen los controles de lectura, que permitirán evaluar la comprensión de los alumnos sobre ciertos temas tratados previamente a los laboratorios prácticos.

Finalmente, se presenta la bibliografía junto con los recursos obligatorios y complementarios en los cuales se basa el curso.

Todos estos elementos, junto con el material desarrollado y las experiencias prácticas, posibilitaron el diseño completo de un curso con recursos tanto teóricos como prácticos.

Experiencias prácticas

Una parte fundamental para el desarrollo del curso son las ya mencionadas experiencias prácticas, las cuales corresponden a un total de 10 dispuestas cada una en las semanas 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14. Estas se basan en contenidos vistos previamente dentro de las clases expositivas. El núcleo principal de las experiencias está enfocado en técnicas como Beamforming, MIMO y OFDM. También se abordan métricas relacionadas con la cuantificación de la calidad y eficiencia de las señales, tales como SINR, *jitter*, *throughput*, y, además, términos y modulaciones como PSS, BSS, PBCH, SSB, FR1, FR2, entre otros. Todo esto destinado a ser utilizado en simulaciones asociadas a tecnologías inalámbricas móviles como 4G y 5G. Además, cabe mencionar que las experiencias prácticas se realizan gracias a tres simuladores en particular, los cuales corresponden a Matlab, Python y 5G-Lena, dividiéndose las 10 experiencias prácticas en 3, 4 y 3, respectivamente.

Dentro de lo obtenido mediante la ejecución de las simulaciones se logran observar resultados relacionados con los tópicos mencionados en el párrafo anterior, los cuales permiten tener una visión de la eficiencia y de la calidad de las redes en diferentes ambientes. Esto, además, se suma al hecho de que, dentro de los laboratorios prácticos, se modifican los ambientes para obtener resultados con distintas combinaciones de valores asociados a parámetros como la potencia de transmisión, el ancho de banda, la frecuencia espectral, la cantidad de datos enviados, el número de antenas y de equipos de usuario.

Las experiencias prácticas están guiadas por una guía de laboratorio que contiene el paso a paso a seguir, las actividades, las preguntas que deben ser respondidas y los criterios a considerar para la presentación de los informes de laboratorio, conocidos como las denominadas notas de laboratorios.

Finalmente, para la validación de las experiencias se llevó a cabo mediante diversas simulaciones, modificando varios parámetros que fueron probados en distintos ambientes dentro de cada software. La combinación de todos estos elementos permitió validar las experiencias prácticas.

Aporte futuro del trabajo de título

Para concluir esta sección, es pertinente mencionar que el presente trabajo de título se considera un aporte al aprendizaje tanto de los estudiantes de ingeniería civil eléctrica como de ingeniería civil en computación, junto con los profesionales que deseen profundizar en el tema. En última instancia, también se valora como un aporte significativo para la universidad, ya que no cuenta con ningún curso que tenga un enfoque similar; siendo los más cercanos el curso de ingeniería civil eléctrica denominado como ELE4301 y el afín de ingeniería civil en computación denominado como COM4102.

Conclusión

El presente trabajo de título que propone el diseño e implementación de laboratorios docentes en torno a tecnologías inalámbricas móviles de última generación: 5G y 6G, ha arrojado resultados satisfactorios de acuerdo con lo propuesto al inicio de este. Es decir, se han cumplido los objetivos específicos y, por ende, se ha alcanzado el objetivo principal de la memoria de título. Además, es importante agregar los resultados que se fueron desarrollando a medida que el trabajo avanzaba.

La información abordada en el marco teórico ha sentado las bases del contenido proporcionado en la memoria de título. Además, ha contribuido a generar el conocimiento necesario para que cualquier persona, independientemente de si posee o no conocimientos sobre el tema, pueda contextualizar y comprender todo lo planteado en el documento.

El material docente desarrollado junto con las experiencias prácticas refleja el cumplimiento de los objetivos establecidos al inicio de esta sección. Es decir, se ha logrado el cumplimiento del objetivo principal mediante la realización de los cuatro objetivos específicos.

Es relevante señalar que, en función de los resultados obtenidos, la metodología propuesta se implementó de manera correcta y permitió alcanzar resultados satisfactorios. Con base en esta metodología, se ha construido un programa de estudios para un curso teórico y práctico sobre redes inalámbricas móviles, con especial énfasis en 4G, 5G y 6G. Este programa incluye los recursos necesarios para su implementación en un contexto académico, ya que consta de una estructura básica del curso en todos los aspectos, presentaciones de cátedra que cubren todo el contenido necesario para un curso de estas características, guías de laboratorio que facilitan hacer simulaciones en diferentes ambientes y aterrizar lo aprendido durante los módulos teóricos, y evaluaciones que permiten a los alumnos medir su aprendizaje y el conocimiento adquirido.

Se espera que este aporte beneficie a estudiantes y futuros profesionales interesados en el campo de las redes inalámbricas móviles, proporcionándoles las herramientas necesarias para comprender, aplicar y avanzar en este ámbito en constante evolución.

Finalmente, basándonos en los resultados obtenidos se sugiere como consideración futura, la continuidad y actualización constante del programa de estudios desarrollado, con el objetivo de incorporar los avances que surjan en las tecnologías inalámbricas móviles, especialmente en lo referente a 6G, que está en constante desarrollo. Mantenerse al día con las últimas tendencias y estándares en el campo permitirá que el curso siga siendo relevante y beneficioso para los estudiantes.

Referencias

- [1] K. Schwab, "La Cuarta Revolución Industrial," Futuro Hoy, vol. 1, no. 1, pp. 6–10, 2020. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.52749/fh.v1i1.1>
- [2] Entel, "2G – Entel," [Online]. Disponible en: <https://www.entel.cl/2g/>
- [3] Selectra, "3G – Selectra México," [Online]. Disponible en: <https://selectra.mx/celular/3g/>
- [4] IPv6go, "Arquitectura de una red LTE – IPv6," [Online]. Disponible en: http://www.ipv6go.net/lte/arquitectura_red_lte.php
- [5] 3GPP, "5G System Overview," [Online]. Disponible en: <https://3gpp.alch.me/technologies/5g-system-overview>
- [6] Huawei, "Huawei proposes certainty in industry development to jointly stride to the 5.5G era," [Online]. Disponible en: <https://www.huawei.com/en/news/2023/3/mwc2023-5-point-5g-era-huawei>
- [7] Nokia, "5G Advanced explained," [Online]. Disponible en: <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/5g-advanced-explained>
- [8] ITU, "5G: fifth generation of mobile technologies," [Online]. Disponible en: <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>
- [9] Arsys, "¿Qué nos aportará la próxima generación de redes móviles?" [Online]. Disponible en: <https://www.arsys.es/blog/6g-redesmoviles>
- [10] Digital Trends, "¿Qué es 6G? Todo lo que debes saber sobre esta red del futuro" [Online]. Available: <https://es.digitaltrends.com/celular/que-es-la-red-6g/>
- [11] Samsung, "Samsung Unveils 6G Spectrum White Paper and 6G Research Findings," [Online]. Disponible en: <https://news.samsung.com/global/samsung-unveils-6g-spectrum-white-paper-and-6g-research-findings>
- [12] Huawei, "6G: The Next Horizon," Huawei Technologies Co., Ltd., Tech. Rep., 2020. [Online]. Disponible en: <https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/tech-insights/1/6g-white-paper-en.pdf?la=en>

- [13] Orange, "Orange's Vision for 6G," Orange, Tech. Rep., March 2022. [Online]. Disponible en: <https://hellofuture.orange.com/app/uploads/2022/03/White-Paper---Oranges-vision-for-6G---March-2022.pdf>
- [14] Escuela de Profesores del Perú, "Aprendizaje por competencias," [Online]. Disponible en: <https://epperu.org/aprendizaje-por-competencias>
- [15] I. Pearson, "4 estrategias pedagógicas para la educación basada en competencias," Pearson Latam, 2022. [Online]. Disponible en: <https://blog.pearsonlatam.com/educacion-del-futuro/estrategias-pedagogicas-para-la-educacion-basada-en-competencias>
- [16] V. Soto, "Diseño de Cursos Universitarios," Santiago de Chile: Editorial Universitaria, 1978
- [17] P. Wolff, "Diseño e implementación de un curso de servicios sobre redes," Tesis de maestría, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2009
- [18] J. Oliva, "Diseño e implementación de un curso y un laboratorio de servicios sobre acceso LTE y Packet Core IMS," Tesis de maestría, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2012
- [19] A. Espinoza, "Diseño e implementación de un curso para la gestión/tipificación de proyectos en telecomunicaciones," Tesis de maestría, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2007
- [20] A. Cea, "Diseño e implementación de un curso teórico y de un laboratorio sobre calidad en redes 3G y LTE," Tesis de maestría, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2013
- [21] Nimubu, "Ciclo de Kolb ejemplificado con el aprendizaje basado en competencias," 2021. [Online]. Disponible en: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ciclo_de_Kolb_ejemplificado_con_ABC.jpg
- [22] P. Gutierrez and R. Olarra, "Análisis del desempeño del algoritmo LMS en sistemas WCDMA con antenas inteligentes," Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2011. [Online]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10475/9.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [23] D. Shingate, "GPRS (General Packet Radio Services) Architecture," 2018. [Online]. Disponible en: <https://dattashingate.wordpress.com/2018/09/18/gprs-general-packet-radio-services-architecture/>

- [24] RF Wireless World, "UMTS Network Architecture," [Online]. Disponible en: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/UMTS-Network-Architecture.html>
- [25] D. Recuenzo, "Estudio y planificación radio de sistemas 5G mediante un simulador comercial basado en trazado de rayos," Tesis de Máster, E.T.S.I. Telecomunicaciones (UPM), 2021. [Online]. Disponible en: https://oa.upm.es/67418/1/TESIS_MASTER_DAVID_RECUENZO_BERMEJO_2021.pdf
- [26] S. Javidmehr, "La tecnología 5G requiere las frecuencias de ondas milimétricas (mmWave)," En Adler Instrumentos, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.adler-instrumentos.es/wp-content/uploads/2019/01/DVTEST_La-Tecnologia-5G-Requiere-las-frecuencias-de-miliOndas.pdf
- [27] Universidad Icesi, "Aprendizaje invertido," 2014. [Online]. Disponible en: <https://eduteka.icesi.edu.co/pdfdir/edutrends-aprendizaje-invertido.pdf>
- [28] Gobierno de Canarias, "Aprendizaje basado en proyectos," [Online]. Disponible en: <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoescuela/pedagogic/aprendizaje-basado-proyectos/>
- [29] Mpirical, "5G System Engineering," 2023. [Online]. Disponible en: <https://www.mpirical.com/courses/5g-system-engineering?pdf=true>
- [30] Ericsson-Carleton Partnership, "Learning 5G Networks," [Online]. Disponible en: <https://carleton.ca/ericsson/5g-learning/>
- [31] Udemy, "4G-LTE EPC: Evolved Packet Core Network," 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.udemy.com/course/4g-lte-epc-evolved-packet-core-network/>

Anexos

Anexo A. GPRS y EDGE.

Como todas las tecnologías que veremos, **GSM** posee una arquitectura de red que se divide en acceso y Core.

- Acceso: acá encontramos al **MS** el cual corresponde al dispositivo por el cual el usuario logra conectarse a la red. También se encuentra la **BS** encargada de transmitir y recibir las señales de radio entre los **MS** y la red. Como tercer equipo presente, encontramos al **BSC** que se encarga de controlar la o las estaciones bases presentes.
- Core: en esta parte de la arquitectura de red, se presenta el **MSC**. Equipo encargado de controlar y realizar la conmutación de llamadas entre los **MS**. Además de esto, es el elemento central de la red **GSM**. También se ubica el **HLR**, el cual funciona como base datos para almacenar información como número de serie y número de teléfono del **MS**. Otro equipo es el **VLR**, el cual también corresponde a una base de datos pero que a diferencia del **HLR**, almacena la ubicación de los **MS**. Finalmente, encontramos al **NMS**, equipo encargado de gestionar y monitorear la red (entre otras funciones).

Todos los elementos de la arquitectura de red, posee conexiones con otros elementos. Estas conexiones se llaman interfaces, y encontramos las siguientes:

- U_m : Interfaz entre el **MS** y el **BSC**.
- A_{bis} : Interfaz entre el **BSC** y el **BTS**.
- G_n : Interfaz entre Core y gateway.
- G_p : Entre gateway e internet.

Parte importante de la comunicación entre dispositivos internos y externos de la arquitectura, son los protocolos de ruteo y de transporte. Dentro de los protocolos de ruteo encontramos a **IGRP** para la conexión entre **BTS** y **BSC**, junto con **GRE** el cual se utiliza entre los elementos del Core e Internet. Para los protocolos de transporte encontramos **GTP** entre los dispositivos móviles y la red.

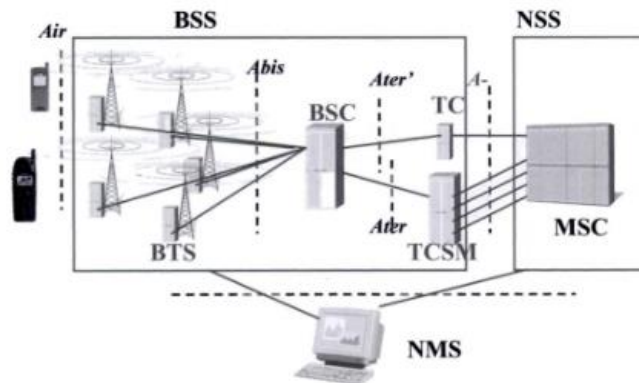


Figura 18. Arquitectura de red GSM.

Fuente: Tomado de [22]

GPRS.

La segunda tecnología parte de 2G, es **GPRS**. Lanzada a finales de la década de 1990, funcionaba con una frecuencia de operación y ancho de banda igual que **GSM**. Es decir, 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz y 1900 MHz junto con un ancho de banda de 25 MHz y una división de 200 kHz por canal. En cuanto a cobertura, se sigue manteniendo los mismo 35 km. A diferencia de **GSM**, **GPRS** tiene un máximo de velocidad de bajada de 114 kbps y de subida de 28.8 kbps. Otro punto que se sigue manteniendo es la modulación, la latencia y la densidad de conexión.

En cuanto a la arquitectura de red se conservan los mismos elementos, pero se adiciona uno denominado **PSS**. El cual se encarga en la transferencia de datos mediante la conmutación de paquetes. Este elemento pasa a formar parte del Core de la arquitectura. Las interfaces entre cada elemento se conservan junto con los protocolos de ruteo.

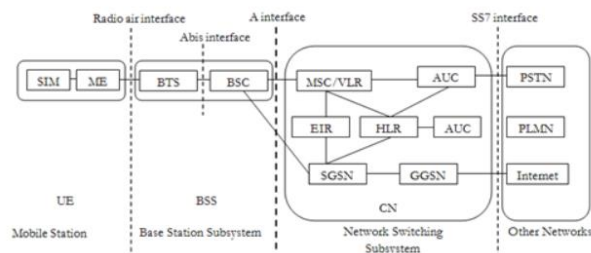


Figura 19. Arquitectura de red GPRS.

Fuente: Tomado de [22]

EDGE.

Finalmente, la última tecnología es **EDGE**. Lanzada en el año 2003, la cual sigue manteniendo la frecuencia de operación de las dos tecnologías previas. A diferencia de las anteriores, el ancho de banda aumenta a 5 MHz por canal y la velocidad de subida cambia a 384 kbps en la descarga y 236 kbps en la subida. La técnica de modulación sigue siendo **GMSK** y se agrega otra nueva denominada 8PSK.

En base a la arquitectura de red, interfaces y protocolos, se mantienen las mismas características que su tecnología antecesora. **EDGE** permitió integrar las aplicaciones basadas en IP y entregó mejoras en la navegación web.

Anexo B. Tercera Generación.

Arquitectura de red de UMTS

Si dividimos la arquitectura de red de **UMTS** en Core y acceso nos queda de la siguiente manera:

- Acceso: encontramos dos elementos. El primero de estos es el **NodeB**, el cual funciona como la estación base y se encarga del control de la calidad de servicio, control de acceso de los dispositivos móviles y la transmisión junto con la recepción de datos. El segundo elemento es el **RNC**, el cual permite la a los dispositivos de red tener acceso a los datos y voz. Además, tiene funciones de control de recursos de radio, seguridad y gestión de movilidad.
- Core: como se dijo anteriormente, se reciclan algunos elementos de **2G** como el **HLR**, **MSC**. Esto porque se utilizan ambas arquitecturas para funcionar de una mejor manera. Existen dos nuevos elementos denominados como **SGSN** y **GMSC**. El primero se encarga de la gestión de las conexiones, en temas de control de acceso, control de sesiones y la transmisión y recepción de datos. Por otro lado, el **GMSC** es el responsable de la conmutación de llamadas de voz entre las redes, localización de suscriptores.
- Para la conexión y comunicación de los elementos de red, encontramos las siguientes interfaces; **Uu** entre **UE** y **NodeB**, **Iu-PS** entre **NodeB** y **RNC**, **Iu-CS** entre **RNC** y **MSC**, **S1** entre **RNC** y **MSC**, **Cx** entre **MSC** y **HLR**, **Gx** entre **MSC** y **GMSC**.

Los protocolos de ruteo que encontramos presentes en esta generación es **IGRP** entre el **BTS** y **BSC**, junto con **GRE** que funciona entre los elementos del **CORE** e Internet. El protocolo de transporte utilizado es **GTP** entre los **UE** y la red.

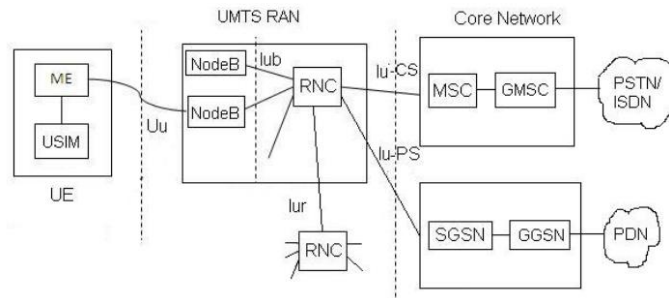


Figura 20. Arquitectura de red UMTS.

Fuente: Tomado de [24].

HSPA.

En el año 2007 se lanza la evolución de **UMTS**, conocido como **HSPA**. Tecnología descrita en el Release 5. Hace uso de una frecuencia de operación de 850, 900, 1900 y 2100 MHz. Con un ancho de banda de 5 MHz por canal y una cobertura máxima de 35 km. En cuanto a términos de tasa de transferencia, se nota un cambio notable a comparación de 2G, dado que la velocidad de bajada aumenta a 14,4 Mbit/s y la subida a 5,76 Mbit/s. Como técnica de modulación se mantiene QPSK, 16-QAM para el enlace ascendente y 64-QAM para el enlace descendente. La latencia también se ve disminuida a un rango de 10-50 ms. Un factor que aumento fue la densidad de conexión, ya que ahora soporta un máximo de 100.000 usuarios por celda.

En cuanto a arquitectura de red, interfaces y protocolos de ruteo y transporte se mantienen los mismos que ya estaban para **UMTS**.

HSPA+.

Al año siguiente del lanzamiento de **HSPA**, se lanzó comercialmente **HSPA+**. Tecnología que conservaba varios aspectos técnicos de su versión anterior como la frecuencia de operación, ancho de banda y cobertura. Ahora aumenta la velocidad de bajada hasta 28 Mbps y la subida a 11,5 Mbps. Otro parámetro que se mantiene es la modulación QPSK, 16-QAM en enlace ascendente y 64-QAM en enlace descendente. Sumado a esto, la latencia se mantiene en el rango de 10-50 ms, la densidad de conexión en 100.000 usuarios por celda.

En temas de arquitectura de red, las interfaces y los protocolos de ruteo y transporte se mantienen.

En sí esta versión mejorada de HSPA, mejora la velocidad de bajada y subida, además de agregar soporte para nuevas tecnologías de modulación como **MIMO**. También trajo consigo acceso a internet de alta velocidad, servicios de tráfico y clima, telemedicina, juegos y una mejora de la navegación por internet.

La integración de tecnologías como UMTS, HSPA y HSPA+ permitieron la implementación a diversas aplicaciones que para esa época eran bastante novedosas. Entre las más reconocidas encontramos la telefonía y el internet móvil, aplicaciones multimedia, el desarrollo de aplicaciones de navegación y mapas en tiempo real en dispositivos móviles, correos electrónicos, juegos, entre otros.

Anexo C. Descripción de técnicas utilizadas en 4G.

OFDM: La modulación OFDM corresponde a una técnica de modulación mediante la división del espectro de frecuencia en n subportadoras ortogonales entre sí.

Dos términos no menos importantes que se presentan en **OFDM** son **símbolo OFDM** y **Prefijo cíclico**. El primero definido la unidad de datos transmitidas en cada subportadora y el segundo término como una técnica usada en los símbolos **OFDM** para evitar el **ISI** copiando parte del tramo final del símbolo y colocándolo al principio de este. Esto ayudará a que el eco que se genera al final de cada símbolo no interfiera al símbolo siguiente, dado que afectará una parte no importante.

OFDM-A: Corresponde a una técnica análoga a OFDM, pero a diferencia de ésta, puede lograr una transmisión hacia más de un usuario a la vez. Es decir, consta con la característica de simultaneidad. Esto permite que múltiples usuarios logren compartir el espectro de frecuencia de manera más eficiente. Es usada para enlace descendente y es ideal para escenarios en los cuales se encuentran una gran densidad de usuarios.

A diferencia de **OFDM**, **OFDMA** tiene dos características significativas:

- Acceso múltiple: **OFDMA** entrega la flexibilidad para que múltiples dispositivos compartan el mismo canal de comunicación de manera eficiente. Dado que cada uno, puede transmitir datos en su propia subportadora.
- Adaptación dinámica: **OFDMA** es una técnica de modulación flexible que puede adaptarse a las condiciones cambiantes de la red. Esto permite una utilización eficiente del espectro de frecuencia y una mejor calidad de servicio.

SC-FDMA: Corresponde a una técnica muy parecida a **OFDMA**, pero la diferencia radica en que **SC-FDMA** utiliza una sola portadora de frecuencia la cual utiliza para transmitir los datos. Se usa para enlace ascendente (desde el dispositivo al punto de acceso). Es ideal para escenarios en los cuales se quiera ahorrar eficiencia energética y potencia. Además de esto es más fácil de implementar y decodificar que otras técnicas de acceso múltiple.

La propiedad de solo usar una portadora permite una más baja **PAPR** a diferencia de **OFDM** que posee un alto **PAPR**.

FDD: Dentro de un sistema FDD, se emplean frecuencias separadas para la transmisión y la recepción. Esto implica la existencia de dos bandas de frecuencia distintas: una destinada a la comunicación ascendente y otra para la comunicación descendente. La principal ventaja de FDD radica en la posibilidad de llevar a cabo transmisiones y recepciones simultáneas sin interferencias, gracias al uso de frecuencias diferentes para ambas direcciones. Sin embargo, FDD requiere dos bandas de frecuencia separadas y una banda de guarda suficiente para prevenir interferencias entre canales de transmisión y recepción, asegurando una comunicación clara e ininterrumpida. Aunque una banda de protección grande no afecta la capacidad, la asignación de frecuencia para la capacidad ascendente y descendente está predeterminada, sin posibilidad de ajuste dinámico. FDD garantiza una transmisión continua y un alto rendimiento, siendo un ejemplo de esta técnica en comparación con la Duplexación por División de Tiempo.

TDD: El funcionamiento de un sistema TDD, es mediante la utilización de la misma banda de frecuencia tanto para transmitir como para recibir, pero en momentos distintos mediante intervalos de tiempo separados. Esto implica que el sistema se configura en un instante para la transmisión y en otro para la recepción. Sin embargo, para evitar interferencias entre ambas

operaciones en la misma frecuencia, se requiere una sincronización precisa entre el dispositivo y la red en el contexto del TDD. En este enfoque, una sola banda de frecuencia se comparte para ambas funciones, asignando intervalos de tiempo alternativos para transmisión y recepción.

MIMO: Corresponde a una tecnología que permite una mayor cobertura debido al uso de varias antenas que funcionan de manera simultánea, lo que genera que se emita una mayor señal inalámbrica. Otra característica importante que posee es que logra capturar los rebotes de las señales.

Handover: Dentro del mundo de las telecomunicaciones el término de Handover corresponde a una técnica en la cual se hace el traspaso de una estación base a otra cuando la calidad del enlace perteneciente a la estación inicial es insuficiente. Este proceso posee la propiedad de poder hacer esta transferencia sin la necesidad de interrumpir el servicio (llamadas o conexión hacia una estación base).

Agregación de Portadora: La estrategia de agregación de portadoras en LTE-Advanced y NR tiene como objetivo ampliar la capacidad del ancho de banda en las redes móviles. En lugar de depender de una única portadora de frecuencia, ambas tecnologías permiten el uso simultáneo de varios canales de frecuencia, mejorando significativamente la velocidad de descarga y carga de datos al aprovechar de manera eficiente el espectro disponible. Esta optimización resulta en un aumento notable de la tasa de bits transmitida. Además, en NR, la posibilidad de agregar múltiples portadoras ya sea contiguas o no contiguas en frecuencia, tanto dentro de la misma banda como en bandas diferentes, brinda flexibilidad en la asignación de espectro, contribuyendo así a un rendimiento óptimo en términos de velocidad y capacidad de la red.

PBCH: El PBCH corresponde a un canal de difusión física presente en el enlace descendente de LTE. Su función principal es facilitar la sincronización y el acceso de los dispositivos de usuario a la red LTE.

PDCCH: Este canal es responsable de llevar la información conocida como *Downlink Control Information*, la cual abarca detalles sobre la asignación de recursos para los canales de aviso y para el tráfico compartido. Además, transmite información relacionada con los mecanismos de retransmisión.

VoLTE: El significado de VoLTE proviene de Voz sobre LTE y se refiere a una tecnología que permite llevar a cabo llamadas de voz a través de una red 4G LTE. Tradicionalmente, las llamadas de voz se manejaban en redes separadas, como 2G o 3G. Esto generaba problemas ya que, al momento de realizar llamadas, los datos no eran enviados de manera correcta debido a esta separación y porque no pueden funcionar de manera simultánea.

Anexo D. Tecnologías utilizadas en 5G.

- ***Edge Computing:*** Es una tecnología que permite el procesamiento de datos en el borde de la red, es decir, en ubicaciones cercanas a los dispositivos que generan los datos. Esto se diferencia del procesamiento tradicional en la nube, que se realiza en centros de datos remotos. El uso de *Edge Computing* junto con 5G permite la implementación en diferentes aplicaciones, tales como: Algunas aplicaciones que se benefician de la combinación de Edge Computing y 5G incluyen:
 - **Integración para ámbitos de IoT:** Al tener un procesamiento de datos de forma local, es ideal para aplicaciones de IoT en las cuales los dispositivos deban hacer sincronizaciones con la menor latencia.
 - **Realidad virtual y aumentada:** Al igual que en el caso anterior, *el Edge Computing* permitirá reducir la latencia en temas de realidad virtual y aumentada.
- ***HetNets:*** Una red heterogénea es una red inalámbrica que utiliza una combinación de diferentes tecnologías de acceso y estaciones base para proporcionar una cobertura más amplia y una capacidad de red más alta.
- ***Network Slicing:*** La segmentación de redes, conocida como "*Network Slicing*", representa la estrategia óptima que los operadores utilizan para construir y gestionar una red que no solo satisfaga, sino que supere los crecientes requisitos de una diversa gama de usuarios. Este enfoque implica transformar una red en múltiples redes lógicas que comparten una infraestructura subyacente. Cada una de estas redes lógicas está diseñada para cumplir con un propósito comercial específico y abarca todos los recursos de la red necesarios, configurados y conectados de manera integral de un extremo al otro.

- **Escenarios 5G:** Dentro de lo que se conoce como 5G encontramos 3 escenarios particulares definidos como; eMMB, mMTC y URLLC. Recuerdo dentro su trabajo expresó que, el primero se enfoca en mejorar tanto el servicio como la calidad de la experiencia del usuario, lo que entrega una mejor y mayor cobertura para todos y junto con esto, además permite una mejora en la velocidad de carga y descarga hasta de 10 Gbps. El segundo escenario es ampliamente utilizado para casos en los cuales se encuentren una gran cantidad de dispositivos (sensores, ordenadores, móviles, robots, automóviles) conectados. En base a esto, es perfecto para ser utilizado en aplicaciones de industria, IoT, Smart cities, Smart agricultura y NB-IoT. Finalmente, el URLLC corresponde al escenario que agrupa a todas las aplicaciones que deben funcionar en torno a latencias menores a 1 ms. En otras palabras, para aplicaciones en tiempo real, tales como vehículos autónomos, cirugía remota, servicios de emergencia y automatización industrial. [25]
- **Massive MIMO:** Corresponde a una tecnología clave de la red 5G que permite ofrecer velocidades de datos más rápidas, una mayor capacidad y una mejor cobertura. Permite a la estación base mejorar la fiabilidad de la red además de la cobertura. Al crear haces de señal dirigidos a los dispositivos móviles, la estación base puede reducir la interferencia de otros dispositivos y señales. Esto ayuda a mejorar la recepción de datos en zonas con obstáculos o con mucho ruido.

Podemos considerar que posee ciertas ventajas que su versión normal. Esto porque tiene un rendimiento superior al lidiar con dispositivos que logran operar a frecuencias muy elevadas. Al igual que su primera versión, Massive MIMO es bastante resistente a las interferencias.
- **mmWave:** El 5G utiliza diversas bandas de frecuencia, una de las cuales se llama mmWave u onda milimétrica, con un rango de 24–100 GHz. Esta frecuencia puede transmitir grandes cantidades de datos y, combinada con mejoras en codificación, puede transportar significativamente más información que las señales de banda baja. El mmWave se considera esencial en las redes 5G, ya que revoluciona su rendimiento.

Debido a su capacidad para gestionar volúmenes masivos de datos, los operadores de redes móviles pueden aprovechar el mmWave en situaciones donde se requiere un rendimiento excepcional, ya sea en entornos interiores o exteriores. Los lugares interiores pueden experimentar velocidades de varios gigabits, bajos tiempos de latencia y un rendimiento excepcional en espacios como aeropuertos, estaciones de tren, áreas de eventos y estadios deportivos. Por otro lado, los lugares al aire libre se benefician de una implementación rápida y un aumento de la capacidad, lo que mejora significativamente las redes existentes, especialmente en áreas urbanas.

- ***Beamforming***: Corresponde a una tecnología que optimiza la transmisión de datos en las redes celulares. Dirige los datos a los dispositivos de los usuarios de forma precisa, lo que reduce la interferencia para otros usuarios.

La forma de implementación depende de la situación y la tecnología disponible.

Es especialmente útil en las redes 5G, que utilizan estaciones base con muchas antenas, esto se debe a que el *Beamforming* puede ayudar a reducir la interferencia entre las señales de las múltiples antenas.

- **Rangos de frecuencia**: Dentro de la tecnología 5G, encontramos dos rangos de frecuencia bastante conocidos. Según Javidmehr la banda asociada a FR1, contiene un rango destinado por el TS 30.101-1 para aquellas bandas que se encuentran según lo definido por el 3GPP entre 450 MHz y 6000 MHz[26]. FR1 se utiliza en distintas tecnologías como 2G, 3G, 4G y 5G, debido a su buena penetración de señal y cobertura[26]. El rango FR2 se encuentra definido en el TS 38.101-2 para las bandas consideradas como milimétricas, es decir, bandas de frecuencia más altas que las pertenecientes a FR1 [26], por ejemplo, frecuencias de que van desde los 24250 MHz hasta los 52600 MHz definidos por el 3GPP. Al trabajar con frecuencias más altas que FR1, se necesita aplicar técnicas como MIMO y Beamforming, para lograr compensar las pérdidas por propagación radioeléctricas.
- **NR**: NR se refiere a la componente de la tecnología 5G dedicada a la comunicación inalámbrica y la transferencia de datos mediante ondas de radio. Además, se utiliza para diferenciar la nueva tecnología de radio de generaciones anteriores.

Anexo E. Otras metodologías de aprendizaje.

Aprendizaje Invertido

Corresponde a una innovadora metodología de estudio, en el cual la mayor parte del aprendizaje se ubica en el hogar. La Universidad Icesi en su reporte acerca del aprendizaje invertido, expone que esta metodología consta de 3 etapas fundamentales[27]. Éstas son; **Antes de la clase**: esta etapa se basa en que cada estudiante estudia y se prepara antes del día que se tiene la clase. Esto permite que el estudiante llegue con un conocimiento previo de la información y le permita poder ejecutar de manera correcta la actividad. **Durante la clase**: el/los estudiantes al llegar con un conocimiento previo de la información podrán desarrollar los problemas que el profesor entregue. Es decir, logran aplicar conceptos claves aprendidos y, además, cuentan con una retroalimentación de parte del profesor. **Después de la clase**: luego de haber aplicado el conocimiento que obtuvieron, cada estudiante evalúa lo aprendido y puede seguir adquiriendo conocimiento extra.

Se pueden considerar las siguientes ventajas que tiene este tipo de aprendizaje; La flexibilidad al momento de adquirir conocimiento permite crear mejores ambientes de estudio. Se logran mejorar habilidades de aprendizaje autónomo de parte del estudiante. El estudiante madura en el sentido de que el único responsable de su aprendizaje es él.

Aprendizaje basado en proyectos.

Corresponde a una metodología docente la cual se enfoca en la aplicación tanto de la investigación como de la colaboración, para poder resolver el problema entregado. Una característica importante es que este aprendizaje permite que los estudiantes mejoren sus habilidades y conocimientos mediante la resolución de diferentes problemas.

Según el Gobierno de Canarias, el ABP el proceso consta de cuatro etapas: **Activación**, donde se introduce el problema y las herramientas a utilizar; **Investigación**, donde se interactúa para nivelar el conocimiento entre alumnos y profesor; **Realización o desarrollo**, donde los participantes

aplican sus conocimientos para elaborar el proyecto; y **Presentación o difusión**, donde se muestra el resultado final al público[28].

Anexo F. Descripción de cursos existentes.

- **5G System Engineering:** Dentro de la página de MIPRICAL [29] podemos observar que este curso alineado con la normativa 3GPP, explora de manera completa la tecnología 5G. Examina detalladamente la arquitectura del sistema 5G, considerando tanto perspectivas no autónomas como independientes. Además, proporciona una perspectiva práctica de las actividades cotidianas de un dispositivo 5G, describiendo procesos como el registro, la seguridad, el establecimiento de sesión PDU y la movilidad
- **Learning 5G Networks:** Ericsson–Carleton Partnership expresan que su curso se centra en los principios esenciales de las comunicaciones 5G, abarcando los protocolos de capa física, de enlace y de red. El temario incluye aspectos como la evolución desde 1G hasta 5G, estandarización, planificación del espectro, fundamentos de 4G LTE, mejoras en 5G New Radio, 5G Core y aspectos futuros más allá de 5G [30].
- **4G-LTE EPC Evolved Packet Core Network:** Curso dictado por Udemy, consta con 3 horas de videos explicando diferentes puntos del EPC de LTE. Ellos lo describen como un curso de EPC cubre la red central de paquetes 4G LTE, incluidos MME, SGW, PGW, HSS, flujo de llamadas, roaming y protocolos, etc. Abarca temas como, red de arquitectura, descripción general de la arquitectura EUTRAN, descripción de elementos de red tales como MME, HSS, SGW, PGW, arquitectura EPC, interfaces EPC, portadores del EPC, roaming LTE, flujo de llamadas LTE. Además, expone 2 videos sobre la evolución de 4G a 5G. Al completar el curso se entrega una certificación denominada como 4G-LTE EPC [31].

Anexo G. Resultados docentes

Dentro de este anexo se presentarán figuras asociadas a los resultados docente que dentro del texto no pudieron ser mostradas.

• Unidad 2:

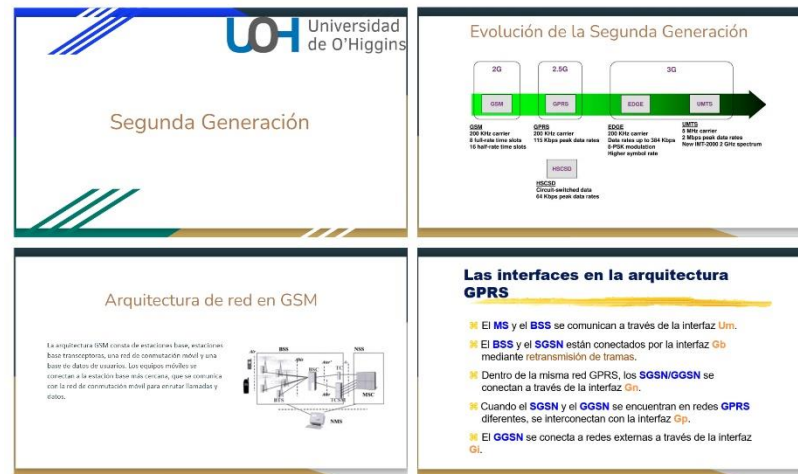


Figura 21. Material expositivo asociado a la Unidad 2.

Fuente: Elaboración propia.

• Unidad 3:



Figura 22. Material expositivo asociado a la Unidad 3.

Fuente: Elaboración propia.

- Unidad 4:



Figura 23. Material expositivo asociado a la Unidad 4.
Fuente: Elaboración propia.

- Unidad 5:



Figura 24. Material expositivo asociado a la Unidad 5.
Fuente: Elaboración propia.

Anexo H. Resultados asociados a experiencias prácticas.

Dentro de este anexo se presentarán los resultados de las experiencias prácticas que no pudieron colocarse dentro del texto principal.

1. Resultados asociados a Matlab:

- Experiencia n°2:

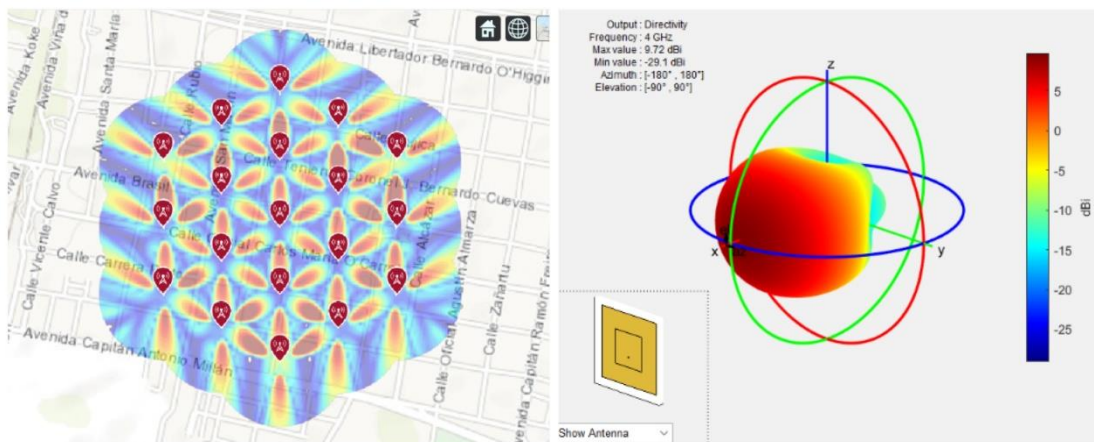


Figura 25. Resultados asociados a experiencia n°2 de Matlab.

- Experiencia n°3:



Figura 26. Resultados asociados a experiencia n°3 de Matlab.

2. Resultados asociados a Python:

- Experiencia n°2:

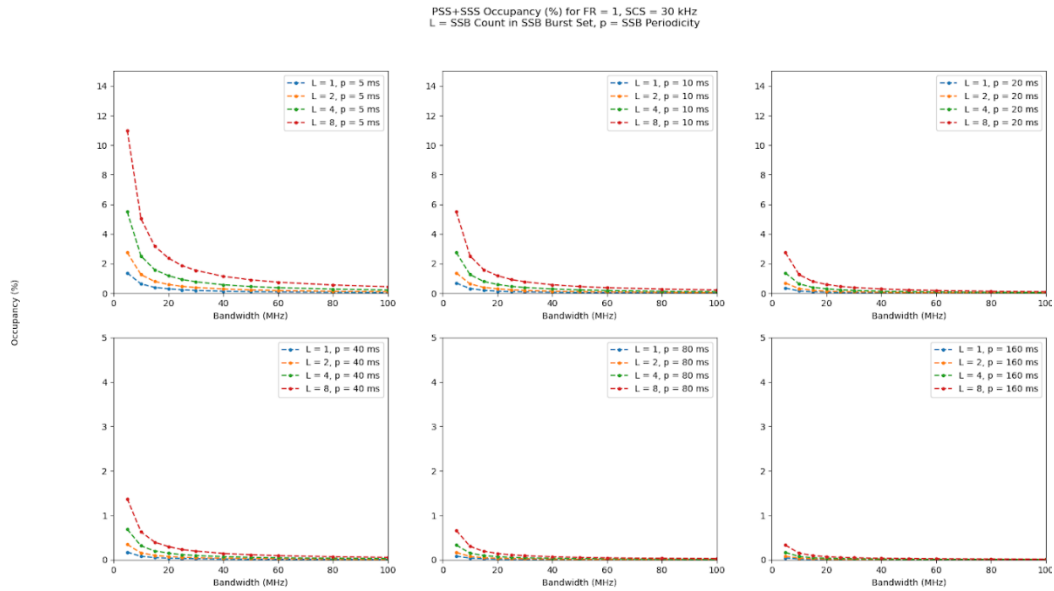


Figura 27. Resultados asociados a experiencia n°2 de Python.

- Experiencia n°3:

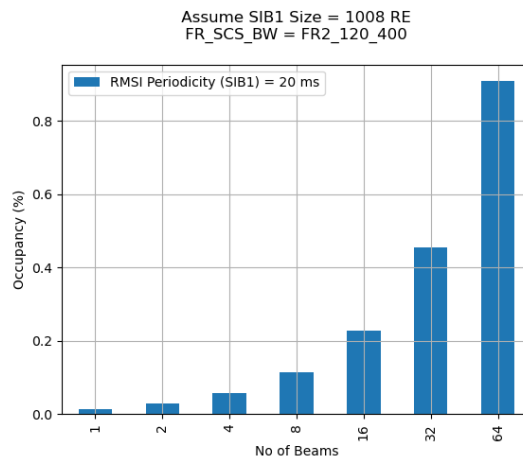


Figura 28. Resultados asociados a experiencia n°3 de Python.

- Experiencia n°4:

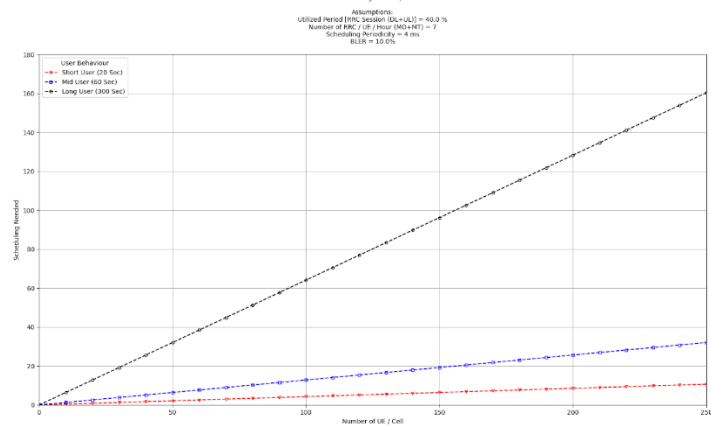


Figura 29. Resultados asociados a experiencia n°4 de Python.

3. Finalmente, presentaremos los resultados asociados a 5G-LENA:

- Experiencia n°2:

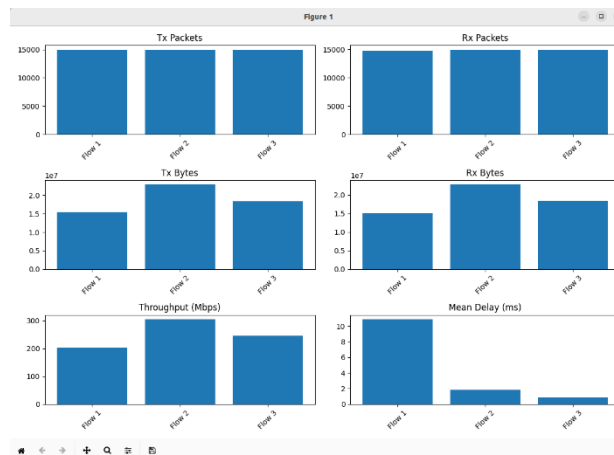


Figura 30. Resultados asociados a experiencia n°2 de 5G-LENA.

- Experiencia n°3:

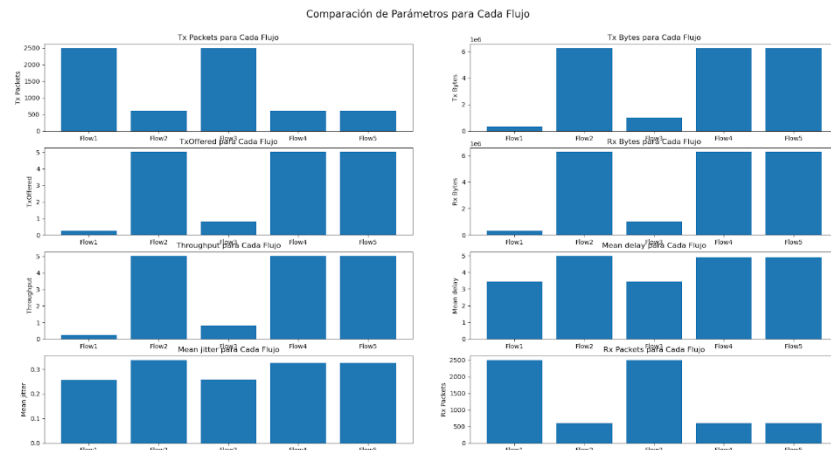


Figura 31. Resultados asociados a experiencia n°3 de 5G-LENA.