



Análisis del diseño y simulación de sistemas 5G utilizando SystemVue

Trabajo Fin de Grado

Realizado en

**Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de
Barcelona**

Universitat Politècnica de Catalunya

por

Ferran Carbajo Roig

**En cumplimiento parcial de los requisitos para
Grau en Enginyeria de Sistemes de Telecomunicació**

Tutora: Anna Umbert Juliana

Barcelona, Enero 2019

Abstract

Since the beginning of digital mobile communications, each generation has been developed to improve efficiency, coverage, spectrum capacity and traffic rate.

The 5G system is the immediate future of telecommunications, and will bring a new radio access technology that will provide a wide range of new services and allow various scenarios of use and applications.

In the context of the new 5G technology, this project will explore and deepen the possibilities offered by the SystemVue program as a tool to explain the theory of mobile communication systems (4G, 5G), in a practical and didactic way.

Through this software simulations of 5G systems will be made, varying different parameters that can influence radio communications. New concepts will be analyzed, such as the different numerologies, the bandwidth by parts and what is its effect on the spectrum and MIMO techniques.

Resum

Des del començament de les comunicacions mòbils digitals, cada generació s'ha desenvolupat per a millorar l'eficiència, cobertura, capacitat de l'espectre i la taxa de tràfic.

El sistema 5G es el futur immediat de les telecomunicacions, i aportarà una nova tecnologia d'accés de ràdio que proporcionarà una ampla gamma de nous serveis i permetrà diversos escenaris d'ús i aplicacions.

En el context de la nova tecnologia del 5G, aquest projecte explorarà i aprofundeix en les possibilitats que ofereix el programa SystemVue com a eina per a poder explicar la teoria dels sistemes de comunicacions mòbils (4G, 5G), de forma pràctica i didàctica.

Mitjançant aquest software es faran simulacions de sistemes 5G, variant diferents paràmetres que influeixen en les radiocomunicacions. S'analitzaran conceptes nous com les diferents numerologies, l'amplada de banda per parts i quin es el seu efecte en l'espectre i les tècniques MIMO.

Resumen

Desde el comienzo de las comunicaciones móviles digitales, cada generación se ha desarrollado para mejorar la eficiencia, cobertura, capacidad del espectro y la tasa de tráfico.

El sistema 5G es el futuro inmediato de las telecomunicaciones, y aportará una nueva tecnología de acceso de radio que proporcionará una amplia gama de nuevos servicios y permitirá diversos escenarios de uso y aplicaciones.

En el contexto de la nueva tecnología del 5G, este proyecto va a explorar y profundizar las posibilidades que ofrece el programa SystemVue como herramienta para poder explicar la teoría de los sistemas de comunicaciones móviles (4G, 5G), de forma práctica y didáctica.

Mediante este software se harán simulaciones de sistemas 5G, variando diferentes parámetros que influyen en las radiocomunicaciones. Se analizarán conceptos nuevos como las diferentes numerologías, el ancho de banda por partes y cuál es su efecto en el espectro y las técnicas MIMO.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi tutora Anna Umbert por su apoyo y dedicación, por su disposición, paciencia y tiempo dedicado a la planificación de este trabajo que lo han hecho posible. También agradecer a Irene Vilà su ayuda y consejos en conceptos del 5G.

También agradecer al servicio técnico de SystemVue su rápida respuesta en las dudas planteadas.

Finalmente, agradecer a mi familia el apoyo incondicional durante estos años de universidad y a los amigos que me han apoyado.

Historial de revisiones y registro de aprobación

Revisión	Fecha	Propósito
0	17/09/2018	Creación del documento
1	19/09/2018	Revisión del documento
2	27/11/2018	Revisión del documento
3	16/01/2019	Corrección del documento
4	21/01/2019	Revisión Final
5	25/01/2019	Entrega del documento

DOCUMENT DISTRIBUTION LIST

Nombre	e-mail
Ferran Carbajo Roig	ferranc93@gmail.com
Anna Umbert Juliana	annau@tsc.upc.edu

Escrito por:		Revisado y aprobado por:	
Fecha	14/01/2019	Fecha	21/01/2019
Nombre	Ferran Carbajo Roig	Nombre	Anna Umbert Juliana
Rol	Autor del proyecto	Rol	Project Supervisor

Índice general

Abstract	1
Resum	2
Resumen	3
Agradecimientos	4
Historial de revisiones y registro de aprobación	5
Índice general	6
Lista de Figuras	8
Lista de Tablas	9
1. Introducción	10
1.1. Objetivo	10
1.2. Requisitos del proyecto	10
1.3. Workplan	11
1.4. Diagrama de Gantt	12
2. Estado del arte	13
2.1. Introducción al 5G	13
2.2. La evolución-normalización de la comunicación móvil	13
2.2.1. Primera Generación (1G)	13
2.2.2. Segunda Generación (2G)	14
2.2.3. Tercera Generación (3G)	16
2.2.4. Cuarta Generación (4G)	18
2.2.5. Conclusión a la evolución-normalización	19
2.3. La futura generación 5G	19
2.4. System Vue	23
2.5. Entorno de SystemVue	24
Workspace tree:	25
Simulation Log:	27
Library:	27
3. Metodología	29
4. Desarrollo del proyecto	30
4.1. Conceptos teóricos	30
4.1.1. Rango de Frecuencias (FR)	30
4.1.2. Numerologías	30
4.1.3. Parte de Ancho de Banda (Bandwidth Part: BWP)	30

4.1.4.	Bloque de recursos.....	31
4.1.5.	Bloque de sincronización de señal (Synchronization Signal Block: SSB)...	31
4.1.6.	Ancho de banda del canal	31
4.2.	New Radio Downlink Transmission (NR_DL_TX)	32
4.2.1.	Sistema NR_DL_TX	32
4.2.2.	Esquema del sistema	33
4.2.3.	Lista de parámetros.....	35
4.2.4.	Como modificar parámetros	36
4.2.5.	Resultados	39
4.3.	New Radio Downlink Throughput (NR_DL_Throughput).....	43
4.3.1.	Sistema NR_DL_Throughput.....	43
4.3.2.	Resultados	44
5.	Presupuesto	46
6.	Conclusiones y líneas futuras	47
	Bibliografía:	48
	Glosario	49

Lista de Figuras

Figura 1: Sectores donde el 5G ofrece nuevos servicios	20
Figura 2: Comparativa entre el IMT advanced (4G) y el IMT-2020 (5G).....	21
Figura 3: Cuadro de ayuda	24
Figura 4: Cuadro de opciones.....	24
Figura 5: Ejemplo de workspace.....	25
Figura 6: Valores de un ejemplo de constelación.....	25
Figura 7: Ejemplo de Schematic. Conjunto de bloques que forman el sistema	26
Figura 8: Ejemplo de parámetros.....	26
Figura 9: Simulación en 3D de la EIRP(Effective Isotropic Radiated Power)	27
Figura 10: Cuadro del explorador de ejemplos de sistemas.....	28
Figura 11: Bloque transmisor.....	33
Figura 12: Bloques del filtro, amplificador de potencia no lineal y ruido	33
Figura 13: Bloque receptor	34
Figura 14: Ejemplo de espectro usado para cada BWP y el SSB según los parámetros de la Tabla.....	38
Figura 15: Ejemplos de diferentes servicios de BWP.....	39
Figura 16: Simulación con SystemVue del Consumo reducido de energía del UE.....	40
Figura 17: Simulación con SystemVue de dos BWP no contiguas de distintas numerologías.....	40
Figura 18: Simulación con SystemVue de un espectro no contiguo donde poder añadir servicios	41
Figura 19: Simulación con SystemVue del ancho de banda libre para nuevos descubrimientos	41
Figura 20: Simulación con SystemVue en FR2.....	42
Figura 21: Relación Tiempo vs Frecuencia en las diferentes numerologías.....	43
Figura 22: BER vs SNR de los 3 posibles casos del SIMO Diversity	44
Figura 23: Throughput(Mbps) de las técnicas MIMO y SIMO.....	45

Lista de Tablas

Tabla 1: Definición rango de frecuencias	30
Tabla 2: Numerologías de transmisión soportadas	30
Tabla 3: Configuración del ancho de banda en transmisión para FR1	31
Tabla 4: Configuración del ancho de banda en transmisión para FR2	31
Tabla 5: Lista de parámetros del sistema NR_DL_TX	35
Tabla 6: Ejemplo de configuración de parámetros	36
Tabla 7: Valores de los parámetros de los diferentes casos	39
Tabla 8: Comparativa BER vs SNR distintas técnicas	44
Tabla 9: Tabla de costos	46

1. Introducción

En las últimas décadas, la demanda de mayores velocidades de datos ha estado creciendo continuamente para satisfacer el deseo de los consumidores de una red inalámbrica más rápida, más fuerte y más segura. Esto es debido a que cada vez se necesita más ancho de banda para el streaming de video, imágenes o para competiciones deportivas donde hay un gran número de dispositivos conectados. Estas necesidades han impulsado la continua evolución de las comunicaciones móviles, desde la 1G hasta la 5G que se plantea para el futuro cercano.

Actualmente nos encontramos en la fase de especificación de lo que deberán ser los futuros sistemas de la 5G. El 20 de diciembre de 2017, el 3GPP (3rd Generation Partnership Project) aprobó, en Lisboa, las especificaciones del interfaz radio para la 5G, conocido como 5G NR (New Radio). Y no ha sido hasta el mes de junio de 2018, cuando se publicó la primera versión de las especificaciones sobre el 5G NR.

Este proyecto se lleva a cabo en el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, con el grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles (GRCM) de la Universidad Politécnica de Catalunya.

El proyecto nace de la necesidad del grupo GRCM, de tener una herramienta de software para poder explicar la teoría de los sistemas de comunicaciones móviles (4G, 5G), de forma práctica. En este sentido el proyecto va a consistir en explorar y profundizar las posibilidades que ofrece el programa SystemVue en el contexto de la nueva tecnología del 5G.

Mediante este software podremos hacer el diseño electrónico de la capa física de los sistemas de comunicación Inalámbricos y hacer su simulación, variando diferentes factores que pueden influir en las radiocomunicaciones.

Una vez hechas estas simulaciones, obtener resultados teóricos y comparar-los con la teoría.

1.1. Objetivo

El propósito final de este proyecto, es investigar y conocer todas las posibilidades que nos puede ofrecer SystemVue, para valorar si en un futuro se puede utilizar como herramienta docente para explicar las comunicaciones móviles.

Los objetivos específicos de este proyecto han sido:

- Aprender los conceptos básicos de 5G y en particular del interfaz radio 5G NR
- Familiarizar-se con el entorno de la herramienta SystemVue
- Simular diferentes escenarios de sistemas 5G
- Evaluar los resultados de las pruebas

1.2. Requisitos del proyecto

- Licencia SystemVue
- Conocimientos sobre el 5G

1.3. Workplan

Project: Análisis del diseño y simulación de sistemas 5G utilizando SystemVue	WP ref: 1	
Major constituent: Búsqueda de información	Sheet 1 of 4	
Short description: Este WP, trata de la recopilación de información relacionada con el proyecto. En concreto, los conceptos del 5G y del software que usaremos, SystemVue.	Planned start date: 17/09/2018 Planned end date: 30/09/2018	
Internal task T1: Obtener información del 5G Internal task T2: Obtener información de SystemVue	Deliverables:	Dates: 30/09/2018

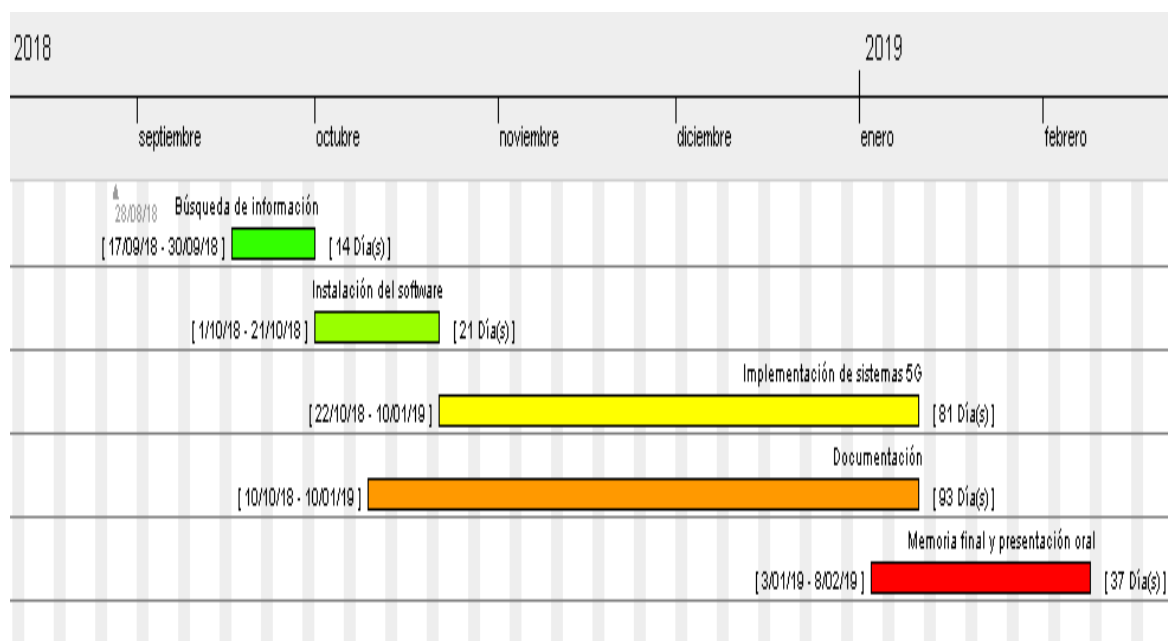
Project: Análisis del diseño y simulación de sistemas 5G utilizando SystemVue	WP ref: 2	
Major constituent: Instalación del software	Sheet 2 of 4	
Short description: En este WP, se instalara el software y se pedirá la licencia. También nos familiarizaremos con el entorno grafico de SystemVue.	Planned start date: 1/10/2018 Planned end date: 21/10/2018	
Internal task T1: Instalación del software Internal task T2: Familiarizarme con SystemVue	Deliverables:	Dates: 21/10/2018

Project: Análisis del diseño y simulación de sistemas 5G utilizando SystemVue	WP ref: 3	
Major constituent: Implementación de sistemas 5G	Sheet 3 of 4	
Short description: Este WP se tratara de Implementar los sistemas 5G, con sus posibles variantes y variaciones de parámetros y hacer un estudio de las posibilidades que nos ofrece SystemVue.	Planned start date: 22/10/2018 Planned end date: 10/01/2019	
Internal task T1: Implementación diferentes sistemas 5G Internal task T2: Estudiar posibilidades que ofrece SystemVue Internal task T3: Obtener conclusiones y validar los resultados	Deliverables:	Dates: 10/01/2019

Project: Análisis del diseño y simulación de sistemas 5G utilizando SystemVue	WP ref: 3	
Major constituent: Documentación	Sheet 3.1 of 4	
Short description: Este WP consistirá en llevarlo a la vez con el WP 3.0 e ir documentando todo lo que hemos ido haciendo y anotar los avances.	Planned start date:10/10/2018 Planned end date:10/01/2019	
Internal task T1: Documentar el proceso realizado con cada test o sistema realizado.	Deliverables:	Dates: 10/01/2019

Project: Análisis del diseño y simulación de sistemas 5G utilizando SystemVue	WP ref: 4	
Major constituent: Memoria final y presentación oral	Sheet 4 of 4	
Short description: En el último WP, se recopila toda la información del proyecto y lo escribimos en una memoria donde encontraremos todo el proceso desde el inicio hasta el final. Por último hay que hacer una presentación oral para explicar el desarrollo del proyecto.	Planned start date:3/01/2019 Planned end date:4-8/02/2019	
Internal task T1: Memoria final Internal task T2: Presentación oral	Deliverables:	Dates: 4-8/02/2019

1.4. Diagrama de Gantt



2. Estado del arte

2.1. Introducción al 5G

5G son las siglas utilizadas para referirse a la quinta generación de tecnologías de comunicaciones móvil. En los últimos años, el mundo ha sido testigo de 4 generaciones de tecnologías en comunicaciones móviles⁴⁸[1].

La primera generación de comunicaciones móviles (1G), nace alrededor de 1980, la cual se basaba en una transmisión analógica. Estos primeros sistemas de comunicaciones móviles, únicamente se limitaban a los servicios de voz, y por primera vez, hacían accesible la telefonía móvil a la gente común.

La segunda generación de comunicaciones móviles (2G), comienza a desarrollarse a principios de 1990 y da origen a la transmisión digital en el enlace de radio. Aunque el servicio principal aún era de voz, esta nueva generación también proporciona servicios de datos limitados.

La tercera generación de comunicaciones móviles (3G) se introdujo a partir de los inicios del 2000. Esta generación dio el paso hacia la banda ancha de alta calidad, lo que permitió un rápido acceso a Internet de forma inalámbrica.

La cuarta generación de comunicaciones móviles (4G) se caracteriza por la mayor capacidad de banda ancha para móviles, superior a la anterior generación.

2.2. La evolución-normalización de la comunicación móvil

Las comunicaciones inalámbricas han sido el segmento de mayor y más rápido crecimiento dentro del área de las telecomunicaciones. Sus principales ingredientes han sido el deseo de movilidad en la comunicación y la ruptura de las conexiones físicas a la red. Por otra parte, la visión de los beneficios de los sistemas inalámbricos futuros se resume en escenarios que posibilitarán servicios múltiples impensables hasta el momento.

La telefonía móvil ha tenido distintos grados de evolución y a estas etapas se les ha denominado generaciones, así desde el comienzo de la era de la telefonía celular en 1979, las comunicaciones móviles sin duda alguna han experimentado un enorme crecimiento desarrollándose diversas tecnologías y sistemas para dar servicios de comunicación inalámbrica.

2.2.1. Primera Generación (1G)

Los sistemas móviles de primera generación se caracterizaban por realizar la transmisión analógica de servicios de voz con baja calidad, y utilizando para su funcionamiento la técnica de Acceso Múltiple por División en Frecuencia (FDMA: Frequency Division Multiple Access), lo que hacía a estos sistemas limitados en relación al número de usuarios a los que podía dar servicio.

El primer sistema celular analógico comercial empezó a operar en Japón en 1979 desarrollado por la compañía de Telefonía y Telegrafía de Japón (NTT). En 1981 se introduce el sistema Nordic Mobile Telephone System o NMTS450 que empezó a operar en Dinamarca, Suecia, Finlandia y Noruega en la banda de 450 MHz. Por su parte en Estados Unidos a partir de 1983 comenzó a utilizarse el sistema AMPS (Advanced Mobile Phone Service) que operaba en la banda de los 800 MHz y ofrecía 666 canales divididos en 624 canales de voz y 42 canales de señalización con 30 kHz cada uno. En 1985 Gran Bretaña a partir de AMPS adoptó el sistema TACS (Total Access Communications System), el cual contaba con 1000 canales de 25 kHz cada uno y que operaba en la banda de 900 MHz. Durante la década de los 80 fueron apareciendo otros sistemas de primera generación como el estándar Alemán C-Netz y French Radiocom 2000 de Francia

2.2.2. Segunda Generación (2G)

Ante la limitada cantidad de canales que se pueden tener en un ancho de banda con el método de Acceso Múltiple por División en Frecuencias (FDMA) empleado en la primera generación, se propusieron nuevas alternativas para incrementar la cantidad de usuarios simultáneos en los sistemas. Surge entonces TDMA (Time Division Multiple Access) como tecnología predominante de esta segunda generación.

Esta segunda generación se caracteriza por ser digital, en lugar de analógica como lo fue la primera. De esta forma la digitalización trajo consigo la reducción de tamaño, costo y consumo de potencia en los dispositivos móviles, así como nuevos servicios tales como identificador de llamadas, envío de mensajes cortos (SMS Short Message Service), y conferencia tripartita entre otros.

Además dentro de los sistemas de telefonía celular de segunda generación se logró soportar una velocidad de información de 9.6 kbit/s, siendo esta velocidad más alta para voz con respecto a la primera generación pero muy limitada para la comunicación de datos. Otro punto a destacar de los sistemas de segunda generación es que se tuvo avances significativos en seguridad, calidad de voz y de roaming.

Dentro de los sistemas de telefonía celular de segunda generación destacan los siguientes:

GSM: Europa empezó la era de la telefonía celular con diferentes interfaces aire analógicas e incompatibles entre sí, surgiendo la necesidad de estandarizar todos los sistemas en uno sólo con un roaming transparente entre los países que contasen con este sistema. Ante este problema se impulsó el desarrollo de un nuevo estándar para las comunicaciones móviles. Así en 1982 la CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications), organismo internacional fundado en 1959, que agrupaba a las entidades responsables de la administración pública de cada país europeo y se encargaba de las políticas y la regulación de las comunicaciones, tanto postales como de telecomunicaciones; tomó la iniciativa de poner en marcha un grupo de trabajo llamado Groupe Spécial Mobile(GSM), acrónimo que posteriormente cambió su significado por el

de Global System for Mobile Communications, que se encargó de especificar un sistema de comunicaciones móviles común para Europa en las banda de 900 MHz, banda que había sido reservada por la World Administrative Radio Conference (WARC) en 1978 [2].

En 1988 la CEPT transfirió al ETSI (European Telecommunications Standards Institute) todas las tareas de normalización. Dejaban de llevarse en un club de operadores estatales, y pasaban a un organismo de estandarización más similar al de otros sectores productivos. Como consecuencia de esto, los dispositivos GSM y las suscripciones ya podían operar en un gran número de países que proporcionaban un gran número de usuarios potenciales. Este gran mercado común tuvo un profundo impacto en la disponibilidad del dispositivo, lo que llevó a un gran número de diferentes tipos de dispositivos y a una reducción del coste del mismo. Esta tecnología fue la dominante en gran parte del mundo.

Los países europeos firmaron un acuerdo de intenciones (MOU: Memorandum Of Understanding) en el que se comprometían a cumplir las especificaciones y adoptar el estándar GSM como único, esto después de haberse realizado pruebas de campo al sistema GSM en Francia. Así en enero de 1992 empezó a operar el primer sistema comercial GSM desarrollado por la compañía Oy Radiolinja AB en Finlandia.

Los sistemas GSM usan una combinación de las técnicas de acceso múltiple FDMA, TDMA y SFH (Slow Frequency Hopping) en un espectro total de 25 MHz. FDMA divide esos 25 MHz en 124 frecuencias portadoras de 200 kHz cada una. Cada canal de 200 kHz es entonces dividido en 8 ranuras de tiempo utilizando TDMA. Bajo este esquema los sistemas GSM soportan velocidades de hasta 9.6 kbit/s. Los sistemas basados en GSM operan en la banda de 900 MHz y 1.8 GHz excepto en Estados Unidos donde se opera en la banda de 1.9 GHz. Este sistema celular GSM 1900 ha operado en los EUA desde 1996.

TDMA IS-136: Este sistema fue introducido por la compañía AT&T, siendo el objetivo principal de este estándar digital el aumentar la capacidad dentro de la banda de los 800 MHz respecto al sistema AMPS. Por ello TDMA IS-136 es también conocido como Digital AMPS (DAMPS).

Un prerequisite para el sistema TDMA IS-136 era que los teléfonos móviles debían funcionar con los canales analógicos ya existentes y con los nuevos canales digitales, trabajando en un modo dual (Dual Mode) coexistiendo ambos sistemas. La especificación IS-36 es una evolución completamente digital de AMPS. Por tal motivo el ancho de banda de los canales en IS-136 fue de 30kHz y utiliza la técnica de acceso múltiple TDMA; así en este sistema se transmiten tres canales por cada portadora de 30 kHz incrementando en 3 veces la capacidad con respecto al sistema analógico AMPS. Además TDMA IS-136 permitió velocidades de hasta 9.6 kbps para transferencia de información.

PDC: PDC (Personal Digital Celular) desarrollado y utilizado únicamente por Japón.

IS-95: Sistema basado en CDMA.

A excepción de IS-95 basado en CDMA el resto de estándares utilizan técnicas mixtas de división en tiempo (TDMA) y frecuencia (FDMA) para el multiplexado de usuarios y duplexado de la información.

El auge que tuvo Internet durante la década de los 90, ha influido notablemente en los sistemas de comunicación móviles. Esto se ha podido observar en la última etapa de la segunda generación llamada 2.5G, la cual ofrece servicios de navegación por internet (de manera muy limitada: sólo texto y sin formato) y de envío de mensajes (SMS). De esta forma muchos de los proveedores de servicios de telecomunicaciones han evolucionado hacia las redes 2.5G antes de entrar masivamente a la tercera generación tomando en consideración factores económicos más que por falta de disponibilidad tecnológica. La generación 2.5G corresponde a mejoras tecnológicas en las redes 2G con tendencia a integrar capacidades 3G con una velocidad que puede llegar hasta los 384 kbit/s, ya adecuada para muchas aplicaciones en la transferencia de datos.

2.2.3. Tercera Generación (3G)

La primera y segunda generación de sistemas de comunicación móvil tuvieron como objetivo primordial dar soporte a comunicaciones de voz y aunque pueden ser usadas para transmitir datos a baja velocidad, no satisfacen los requerimientos de transmisión de grandes volúmenes de información a altas velocidades entre terminales inalámbricos y la red fija necesaria para aplicaciones como videoconferencia, conexión a internet, video y audio.

El crecimiento de usuarios que buscan un servicio eficiente ya no sólo de telefonía celular sino además de acceso a servicios multimedia y transferencia de información ha provocado la saturación en la capacidad de los sistemas, es decir, la cantidad de usuarios que pueden compartir simultáneamente el ancho de banda es rebasada para mantener un nivel de calidad adecuado.

Fundamentalmente la manera de atacar el problema de capacidad en un sistema es el tener que hacer uso de otras bandas del espectro para alojar a un mayor número de usuarios, dividir las celdas existentes en otras más pequeñas y utilizar el recurso de reutilización de frecuencias. Dado que el espectro de radio es un recurso limitado y la separación de celdas es muy cara por la infraestructura que se necesita, la única opción viable es el desarrollo de nuevas tecnologías.

De esta forma, los principales motivos que han llevado a la creación de una tercera generación surge de la necesidad de aumentar la capacidad de los sistemas respecto a las redes móviles del momento que permiten un número limitado de usuarios por la técnica de acceso múltiple a utilizar y que en cuanto se sobrepasa ese límite, la

congestión no permite que más usuarios puedan establecer comunicación; además el incremento de tráfico ante la paulatina sustitución del tráfico fijo por el móvil al irse modificando los hábitos de los usuarios, necesitándose entonces mayor espectro y optimización del mismo para proveer de servicio a más usuarios y por último la aparición de nuevos servicios donde la convergencia con Internet y el aumento de aplicaciones multimedia generará un aumento significativo de tráfico.

Todo ello da lugar a la aparición de nuevas tecnologías, entre ellas:

CDMA IS-95: A principios de la década de los 90 la compañía Qualcomm desarrolló un sistema celular basado en la técnica de acceso múltiple CDMA (Code Division Multiple Access). En 1993 el sistema creado por Qualcomm fue modificado y adoptado por la TIA bajo el nombre Interim Standard 95 (IS-95), conocido también como cdmaOne. En 1995 finalmente fue el lanzamiento del primer sistema comercial basado en CDMA IS-95A en Hong Kong por el operador Hutchison Telecom. Este estándar fue creado para trabajar en las bandas de 800 y 1900 MHz. CDMA IS-95 es un sistema que soporta servicios de datos mediante conmutación de circuitos a velocidades entre 9.6 kbit/s y 14.4 kbit/s. Siguiendo la evolución del sistema IS-95 surge el protocolo IS-95B basándose en conmutación de paquetes. El sistema IS-95B ofrece una velocidad máxima de transferencia de datos de 64 kbit/s, manteniendo compatibilidad hacia atrás con los sistemas existentes de IS-95A.

A diferencia del ancho de banda de los canales en los sistemas GSM y TDMA, en CDMA se utiliza un espectro de 1.25 MHz donde cada usuario tiene acceso, contando cada usuario con un código para poderse diferenciar del resto de los usuarios y optimizando de esta forma el uso del espectro. Por lo anterior, con CDMA se incrementa la capacidad del sistema de 10 a 15 veces comparado con AMPS, y más de tres veces comparado con los sistemas basados en TDMA. CDMA además ofrece capacidades de seguridad y privacidad al incorporar un sistema criptográfico de autenticación ya que no sólo hace uso de códigos pseudoaleatorios sino que agrega una máscara mediante el proceso de scrambling para evitar la interceptación de las señales.

WCDMA: UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), que es el estándar de 3G definido en Europa y armonizado con Japón y otros países. Se basa en la técnica de acceso WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), es decir acceso múltiple por división de código de banda ancha. Frente a las tecnologías de acceso anteriores, TDMA y FDMA, WCDMA proporciona una mayor eficiencia espectral, lo que permite proporcionar tipos de servicios en el acceso radio (voz y datos con diferentes tasas binarias). WCDMA forma parte del conjunto de técnicas de acceso múltiple por separación de código (CDMA), que tienen en común que todos los usuarios transmiten simultáneamente, por lo que no existe separación en el tiempo y con el mismo ancho de banda al no existir tampoco separación en frecuencia, pudiendo ser discriminados porque a los usuarios se les asigna un código que los identifica de forma unívoca.

WCDMA tiene dos modos de operación:

- TDD: Se trata de un método bidireccional, en el que las transmisiones de los enlaces de subida y bajada son transportados en la misma banda de frecuencia usando intervalos de tiempo de forma síncrona.
- FDD: Los enlaces de las transmisiones de subida y de bajada emplean dos bandas de frecuencia separadas. Un par de bandas de frecuencia con una separación especificada se asigna para cada enlace.

HSPA: HSPA (High Speed Packet Access) es una mejora del estándar UMTS con el que funcionan las redes 3G. Utiliza de forma más eficiente el espectro radioeléctrico que tienen asignado las operadoras, mejorando la velocidad y latencia en la transferencia de datos.

2.2.4. Cuarta Generación (4G)

Es la sucesora de las tecnologías 2G y 3G, y precede a la próxima generación, la 5G. Al igual que en otras generaciones, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) creó un comité para definir las especificaciones. Este comité es el IMT-Advanced y en él se definen los requisitos necesarios para que un estándar sea considerado de la generación 4G. Entre los requisitos técnicos que se incluyen hay uno muy claro: las velocidades máximas de transmisión de datos deben estar entre 100 Mbp (12,5 MBps) para una movilidad alta y 1 Gbps (125 MBps) para una movilidad baja[3].

Las compañías añadieron el estándar LTE(Long Term Evolution), de la norma 3GPP, 3rd Generation Partnership Project, que se trata de una colaboración de grupos de asociaciones de telecomunicaciones, conocidos como miembros organizados) a la tecnología 4G. El sistema LTE introduce las técnicas de acceso múltiple OFDMA, para el enlace descendente (DL) y SC-FDMA para el enlace ascendente (UL). Esta tecnología permite anchos de banda de transmisión más amplios y estructuras más avanzadas de múltiples antenas móviles[3].

El LTE se convirtió en la modalidad de 4G más consistente y más rápida, compitiendo contra otras tecnologías como WiMax. Era importante crear un estándar que todo el mundo pudiese usar. Eso es lo que consiguió el LTE, y provocó además que la tecnología 4G fuese aun más rápida.

La 4G está basada en el protocolo IP, siendo un sistema y una red, que se alcanza gracias a la convergencia entre las redes de cable e inalámbricas. Esta tecnología podrá ser usada por módems inalámbricos, móviles inteligentes y otros dispositivos móviles. La principal diferencia con las generaciones predecesoras es la capacidad para proveer velocidades de acceso mayores, manteniendo una calidad de servicio de punta a punta de alta seguridad que permitirá ofrecer servicios de cualquier clase en cualquier momento, en cualquier lugar, con el mínimo coste posible.

El WWRF (Wireless World Research Forum) pretende que 4G sea una fusión de tecnologías y protocolos, no solo un único estándar, similar a 3G, que actualmente incluye tecnologías como los son GSM y CDMA.

La empresa NTT DoCoMo en Japón fue la primera en realizar experimentos con las tecnologías de cuarta generación, alcanzando 100 Mb/s (12,5 MB/s) en un vehículo a 200 km/h. La firma lanzó los primeros servicios 4G basados en tecnología LTE en diciembre de 2010.

2.2.5. Conclusión a la evolución-normalización

El acuerdo en los estándares y especificaciones de tecnología multinacional ha sido clave para el éxito de la comunicación móvil. Esto ha permitido la implementación e interoperabilidad de dispositivos e infraestructuras de diferentes proveedores, así como dispositivos y suscripciones habilitados para operar a nivel global.

El éxito de GSM en términos de disponibilidad y costo del dispositivo, abre las puertas a un gran mercado, donde la comunicación móvil se impone.

La creación del 3GPP con el objetivo de finalizar el desarrollo de la tecnología 3G basada en WCDMA y que llegó a dominar completamente las tecnologías alternativas como cdma2000, evolución de la segunda generación del IS-95, ha dado paso a que 3GPP haya continuado en el desarrollo de las tecnologías 4G (LTE y 5G). Es la única organización significativa que desarrolla especificaciones técnicas para comunicaciones móviles.

2.3. La futura generación 5G

El 5G está construido sobre los cimientos del 4G LTE, y el término se usa para referirse a una nueva tecnología de acceso de radio que podrá proporcionar una amplia gama de nuevos servicios.

La rama de Radiocomunicaciones de la unión internacional de telecomunicaciones (ITU-R) es la que se encarga de definir los requerimientos mínimos que deberán cumplir los estándares de sistemas de comunicaciones móviles para mantener una homogeneidad a nivel internacional. En 2012 publicó las Recomendaciones del IMT-Advanced para los sistemas de 4G y empezó a definir la recomendación visión de los sistemas IMT-2020 para los sistemas de 5G.

Se prevé que los sistemas de 5G ampliarán y admitirán diversos escenarios de uso y aplicaciones que continuarán más allá de la IMT-Advanced. En concreto se plantean los tres casos de uso siguientes:

- eMBB (enhanced mobile broadband). Banda ancha móvil mejorada. Casos de uso basados en datos que requieren altas tasas de datos en un área de cobertura amplia. Esto ayudará a desarrollar los casos de uso de banda ancha móvil de hoy en día, hasta la creciente gama de dispositivos con capacidad de video, UltraHD, transmisión de video en 360 grados o las gafas VR (Virtual Reality) y AR (Artificial Reality) que con el tiempo se generalizarán en la sociedad y nuestra vida laboral.

- mMTC (massive machine-type communication). Comunicaciones masivas tipo máquina. Deben admitir una gran cantidad de dispositivos en un área pequeña, que solo pueden enviar datos de forma esporádica, como los casos de uso de Internet de las cosas (IoT). Este tipo de servicios incluyen un costo del dispositivo y un consumo de energía muy bajos, lo que permite una duración muy prolongada de la batería del dispositivo. El soporte para altas tasas de datos es de menor importancia [4].
- URLLC (ultra-reliable and low-latency communication). Comunicaciones de baja latencia ultra confiables. Requisitos estrictos de latencia y confiabilidad para comunicaciones de misión crítica, como cirugía remota, vehículos autónomos o internet táctil.

En la Figura 1 se muestran algunos de los sectores donde 5G ofrecerá nuevos servicios.

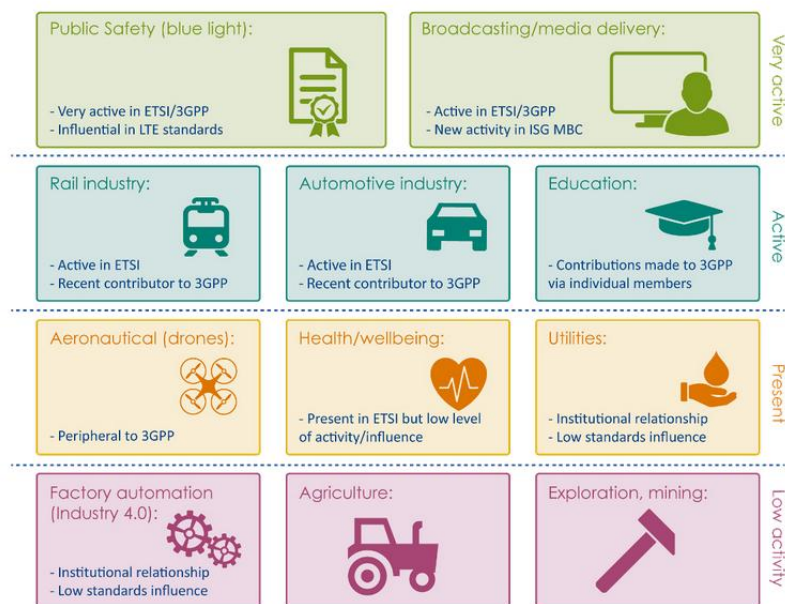


Figura 1: Sectores donde el 5G ofrece nuevos servicios

5G será impulsado por software. Se espera que las funciones de red se ejecuten en un sistema operativo unificado. Como resultado, dependerá en gran medida de tecnologías emergentes como redes definidas por software (SDN), virtualización de funciones de red (NFV), Mobile Edge Computing (MEC) y Fog Computing (FC) para lograr el rendimiento, la escalabilidad y la agilidad requeridos.

En 2015, la ITU identificó tres bandas de espectro que se utilizarán para 5G, y en 2016, depuró los criterios para selección de tecnologías de interfaz de radio 5G. Se espera que las redes de acceso 5G para algunos servicios requieran anchuras de banda de portadora contiguas muy grandes (por ejemplo, cientos de MHz hasta varios GHz) que proporcionarán una capacidad general del sistema muy alta. Para soportar los requisitos de anchos de banda contiguos amplios, se deben considerar frecuencias de portadora superiores a 6 GHz.

A finales de 2016, un grupo especial de la ITU concluyó un estudio preliminar sobre los estándares necesarios para cumplir con los objetivos de rendimiento de 5G, incluidas las concentraciones en la arquitectura de la red, la convergencia inalámbrica fija, los requisitos de gestión de la red y el marco de gestión de la red [5].

Como parte de la nueva tecnología 5G, se está desarrollando una nueva interfaz radio para la red 5G, denominada 5G New Radio (NR). El 20 de diciembre de 2017, el 3GPP aprobó, en Lisboa, las especificaciones de 5G NR. Así la primera versión de las especificaciones del 3GPP para el 5G NR se publicaron en junio de 2018.

NR debe admitir una amplia gama de frecuencias, anchos de banda y opciones de implementación. NR debe admitir por supuesto los 3 casos de uso presentados. Estos requisitos requieren una forma de onda, numerología y estructura de trama flexibles.

Existen compañías como Samsung, que en agosto de 2018, dio a conocer que tenía listo el Samsung Exynos Modem 5100, su primer modem 5G, compatible con las especificaciones finales de la 3GPP. Está construido con tecnología de 10nm y está preparado para las especificaciones más actuales, 5G-NR, y para versiones anteriores de radio 4G, 3G, GSM, etc.

El hecho de que NR reutilice muchas de las estructuras y características de LTE, no garantiza la compatibilidad con lo realizado hasta ahora, pues NR es una nueva tecnología de acceso por radio con soluciones técnicas diferentes a las actuales.

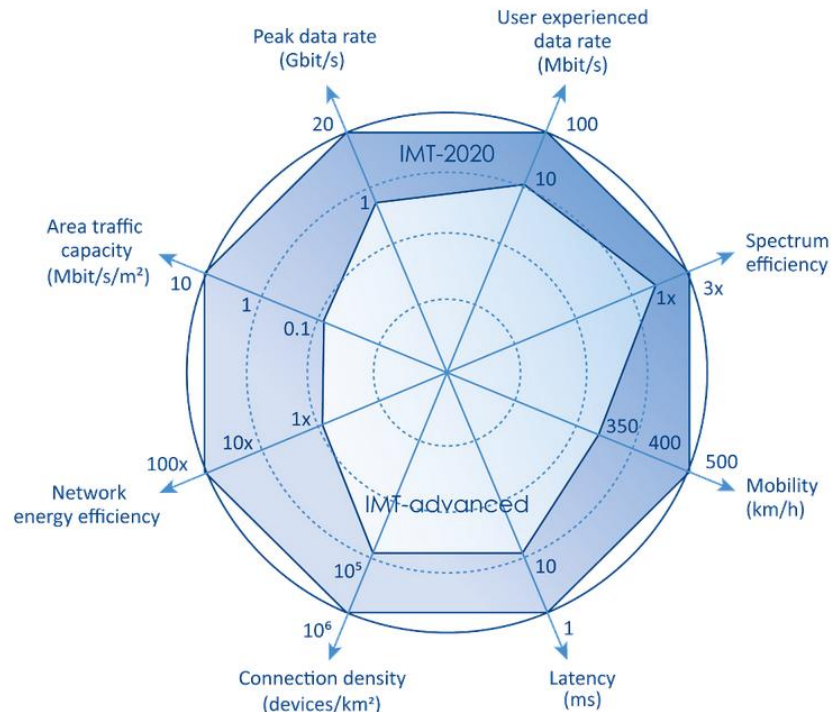


Figura 2: Comparativa entre el IMT advanced (4G) y el IMT-2020 (5G)

Como se puede ver en la Figura 2 el 5G mejora las capacidades del 4G. Aunque según en el escenario en que se encuentre, unas capacidades tendrán más relevancia y se perderán de otras. Por ejemplo, en el escenario eMMB, el Peak data rate, User

experienced data rate, spectrum efficiency, area traffic capacity, Mobility tienen una gran importancia en comparación con la latencia y la densidad. En otros escenarios como el URLLC la baja latencia es de mayor importancia que tener altas tasas de datos [6].

La frecuencia a la que trabajara el 5G estará entre dos rangos de frecuencias muy diferenciados: por debajo de los 6GHz, FR1 y por encima de 6 GHz, FR2. La verdadera innovación del 5G está ocurriendo en frecuencias más altas, conocidas como ondas milimétricas. En las frecuencia bajas, por debajo de 6GHz, es la gama de frecuencia donde operan los móviles y donde solo hay canales relativamente estrechos disponibles porque ese espectro está muy ocupado y muy usado. Pero hasta a 28 GHz y 39 GHz, hay grandes franjas amplias de espectro disponibles para crear grandes canales para velocidades muy altas.

Claramente, la primera necesidad es que 5G brinde los servicios que ya usamos, pero mejor, sin problemas de latencia, conectividad intermitente o conexiones caídas, incluso en condiciones de red difíciles como ubicaciones atestadas de usuarios o en vehículos en movimiento.

La parte que se ha estudiado se explicara en el desarrollo del proyecto.

2.4. **System Vue**

Keysight Technologies es una empresa proveedora de software de automatización de diseño electrónico, que ayuda a los ingenieros a diseñar productos como teléfonos, redes inalámbricas, radares, sistemas de comunicaciones por satélite e infraestructuras de telefonía digital de alta velocidad.

Estas aplicaciones incluyen un nivel de sistema electrónico, señal digital de alta velocidad, señal mixta de Radiofrecuencia (RF), modelado de dispositivos y diseño de microondas para mercados comerciales inalámbricos, aeroespaciales y de defensa.

Una de las aplicaciones de Keysight Technologies es SystemVue. Esta, trata de simular un entorno enfocado en la automatización del diseño electrónico (EDA - electronic design automation) y el diseño a nivel de sistema electrónico (ESL - Environment for electronic system-level).

Permite a los arquitectos de sistemas y desarrolladores de algoritmos innovar la capa física (PHY - Physical layer) de los sistemas de comunicaciones inalámbricos y aeroespaciales y proporciona un valor único a los implementadores de RF, DSP (Procesador Digital de Señales) y FPGA (Matriz de puertas programables). Como plataforma dedicada al diseño de ESL y a la realización del procesamiento de señales, SystemVue reemplaza los entornos digitales, analógicos y matemáticos.

En el mundo de las Telecomunicaciones, SystemVue se puede usar para simulaciones y pruebas de comunicaciones orientadas al 5G-NR, LTE, LTE- Advance, HSPA+, DC-HSPDA, MIMO y radio multiestándar junto con soluciones 2G/3G para I+D, fabricación y despliegue.

Un aspecto a destacar, es que el lenguaje de programación que se usa en SystemVue es Matlab, el cual es muy común en las universidades de ingenierías.

El resultado es que SystemVue, reduce el tiempo de desarrollo y verificación de PHY de forma muy importante.

2.5. Entorno de SystemVue

Al ejecutar la aplicación de SystemVue lo primero que aparece es una ventana, orientada a los usuarios nuevos de esta aplicación. En la Figura 3 podemos encontrar videos explicativos y tutoriales de cómo se usa SystemVue.

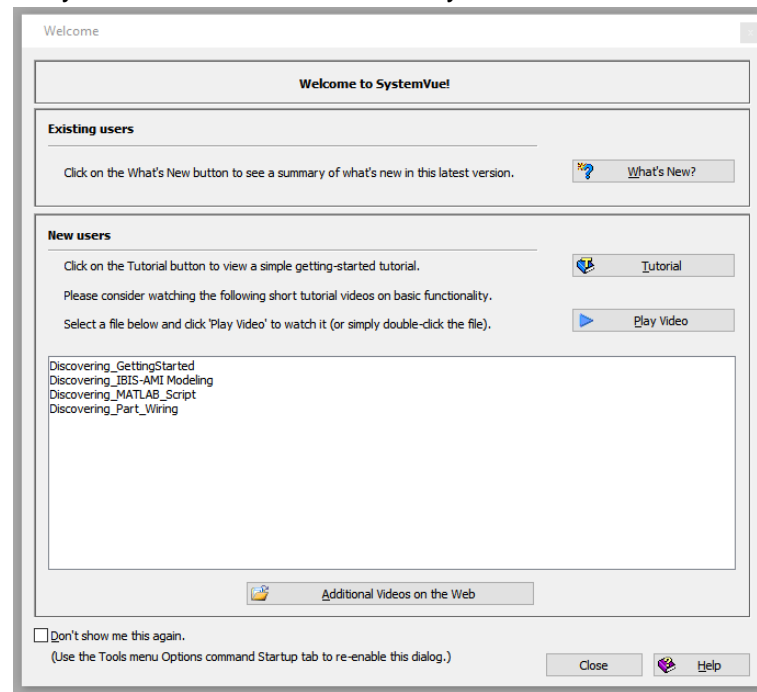


Figura 3: Cuadro de ayuda

En caso de conocer la aplicación y activado la casilla “Don’t show me this again”, la primera pantalla que se visualiza al iniciar el programa sería un cuadro de dialogo que proporciona una serie de opciones:

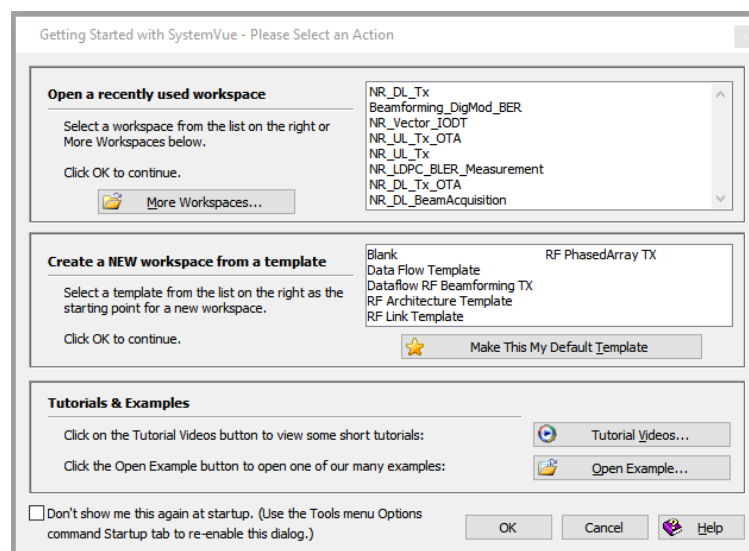


Figura 4: Cuadro de opciones

De las opciones propuestas se puede destacar dos: la creación de un nuevo “workspace” a partir de una plantilla ya creada. Tutoriales y ejemplos que ayudan a entender mejor el funcionamiento de esta herramienta.

En la Figura 5 se puede observar como es un workspace y que se compone de varias partes.

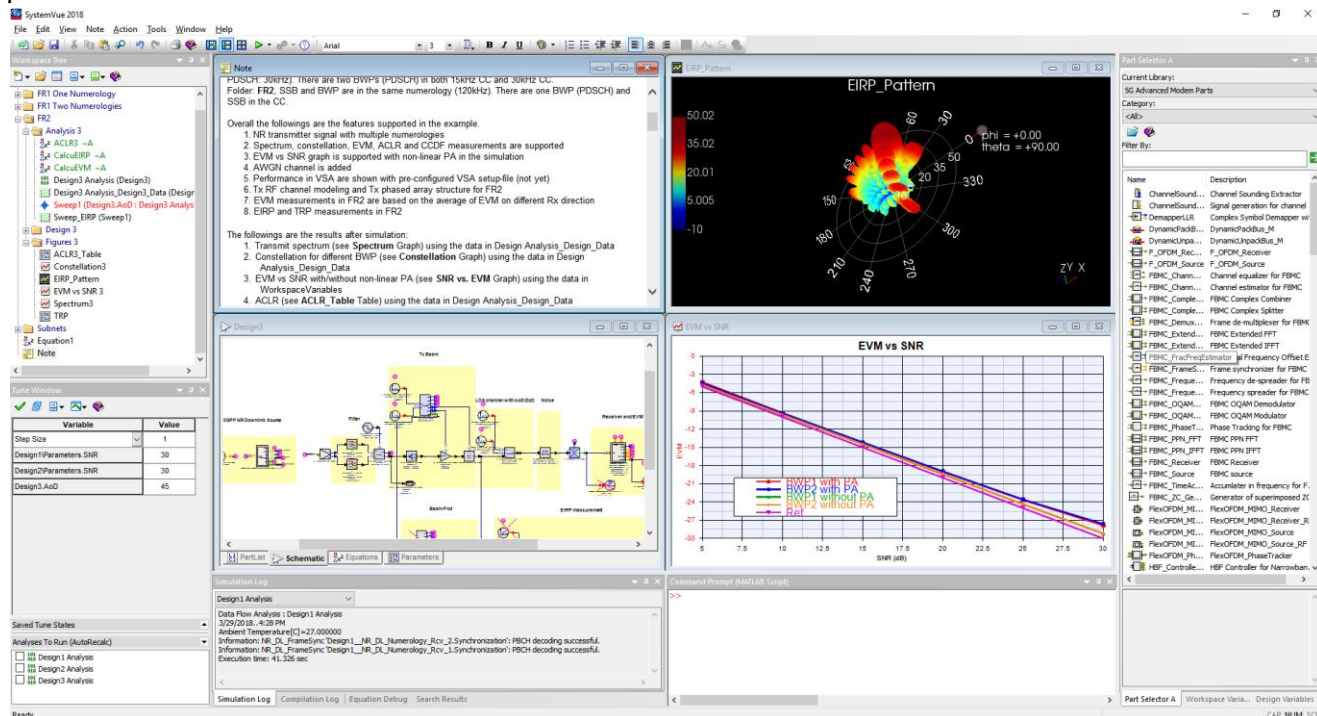


Figura 5: Ejemplo de workspace

Workspace tree: que es donde se encuentran todos los archivos que componen el escenario que se va a estudiar. La gran mayoría de escenarios/ejemplos que nos proporciona SystemVue se dividen en 3 carpetas:

-La carpeta “Analysis”: donde se encuentran las ecuaciones(en Matlab) para calcular diferentes tipos de pruebas según lo que nos interese(Espectro, constelación, Adjacent Channel power/Leakage (ACLR),...), sweeps.. y el resultado numérico de las pruebas. Ejemplo:

Index	BWP1_Constellation_Index	re(BWP1_Constellation)	im(BWP1_Constellation)
1	0	-0.719	0.753
2	1	0.687	-0.733
3	2	0.706	0.68
4	3	0.704	-0.692
5	4	0.714	-0.713
6	5	0.717	-0.726
7	6	0.657	-0.693
8	7	0.711	-0.653
9	8	0.676	-0.694
10	9	-0.698	0.717
11	10	0.69	-0.708
12	11	0.74	0.692
13	12	0.704	-0.7
14	13	-0.694	-0.689

Figura 6: Valores de un ejemplo de constelación

-La carpeta "Design": Aquí se encuentra el schematic del escenario que estudiaremos con todos sus componentes y los parámetros que lo forman, que podrán ser modificados para obtener diferentes resultados.

En cada bloque del schematic, haciendo doble-clic sobre él, se abre una pestaña donde se pueden ver sus parámetros y los valores que tiene por defecto. Existe una ayuda que nos explica cómo funciona y en algunos casos, la teoría previa necesaria para saber cómo se debe cambiar estos parámetros.

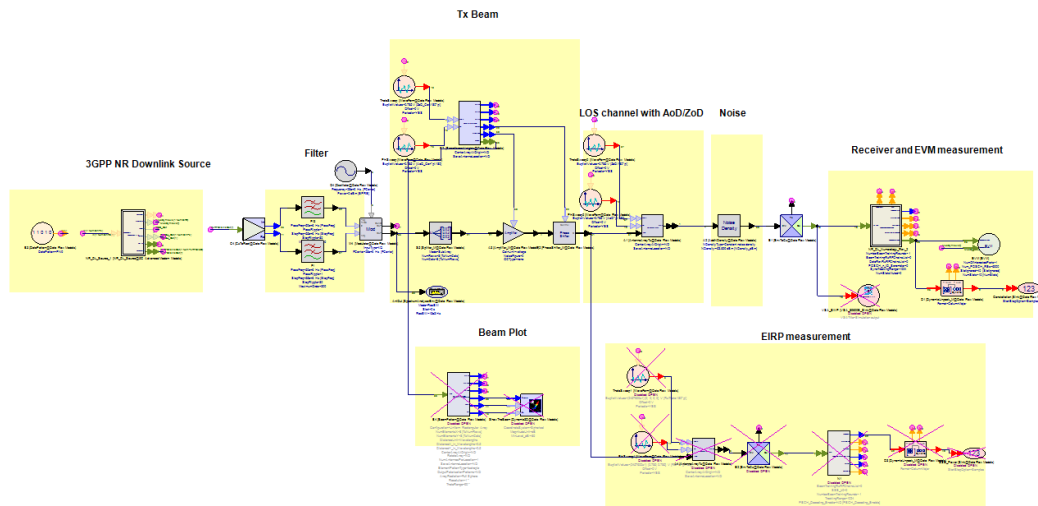


Figura 7: Ejemplo de Schematic. Conjunto de bloques que forman el sistema

Debajo de la ventana del Schematic, existe una pestaña llamada *parameters*, cuyo contenido se puede ver en la siguiente imagen, donde se pueden modificar los parámetros más relevantes del sistema y que a su vez modifica en todos los bloques y ecuaciones realizadas en Matlab.

Name	Description	Default Value
FCarrier	range of frequency carrier	2e9
NumTxRFChains	number of Tx RF chains	1
PortstoRFMatrix	unique ports to RF Chains matrix	[1, 1]
CarrierNumRBs	number of RBs in one component carrier based on sp	[270]
Numerology_k0	the lowest numbered subcarrier in a common resour	[0]
OversamplingOption	oversampling option	2:Ratio 4
NumBWPs	number of BWPs	2
Numerology	numerology(0: 15kHz; 1:30kHz; 2:60kHz; 3:120kHz; 4:24	[0]
CellID	the index of cell identity	0
CyclicPrefix	normal CP or extended CP(0: Normal; 1: Extended)	0
SSB_Enable	enable or disable SS/PBCH blocks transmission	1: YES
SSB_Numerology	numerology of SSB	0: 15kHz
SSB_Lmax	number of SS/PBCH block candidates for a half frame	0: L = 4
SSB_RBOffset	the starting RB index of resource blocks allocated to	40
SSB_k0	Which subcarrier subcarrier 0 in an SS/PBCH block c	0
SSB_Periodicity	SS/PBCH block transmission period	0: 5 ms
SSB_SymStartOption30K	SS/PBCH block candidates configuration options for 3	0: Option 1
SSB_TimeOffset	SS/PBCH block transmission offset in each transmissi	0
BWP_RBOffset	the starting RB index of resource blocks allocated to	[0, 60]
BWP_NumRBs	number of PRB in BWP based on different SCS of diffe	[40, 210]
BWP_NumPorts	number of ports for each BWP	[1]
BWP_PortList	ports index, the range of each element should be in r	[1000]
PDSCH_Enable	enable or disable PDSCH and its DMRS transmission	1: YES
TransBlockSize	transport block size for each slot. Only valid when th	[2555, 20000]
Modulation	modulation orders in each slot. (2: QPSK, 4: 16QAM, 6:	[2]
PDSCH_RBOffset	the starting RB index of resource blocks allocated to t	[0, 0]
PDSCH_NumRBs	number of resource blocks (RBs) for each PDSCH.	[40, 210]
PDSCH_StartOFDMSym	the index for the first OFDM symbol allocated to each	[1]
PDSCH_NumOFDMSyms	number of OFDM symbols for each PDSCH.	[13]
NumSlots	number of slots to simulate	10
PBCH_Decoding_Enable	enable or disable PBCH decoding.	1: YES
SNR	signal noise ratio in dB	30

Figura 8: Ejemplo de parámetros

-La carpeta “Figures”: Aquí se encuentran el resultado de las simulaciones, ya sean gráficas, constelaciones, plots en 3D,...

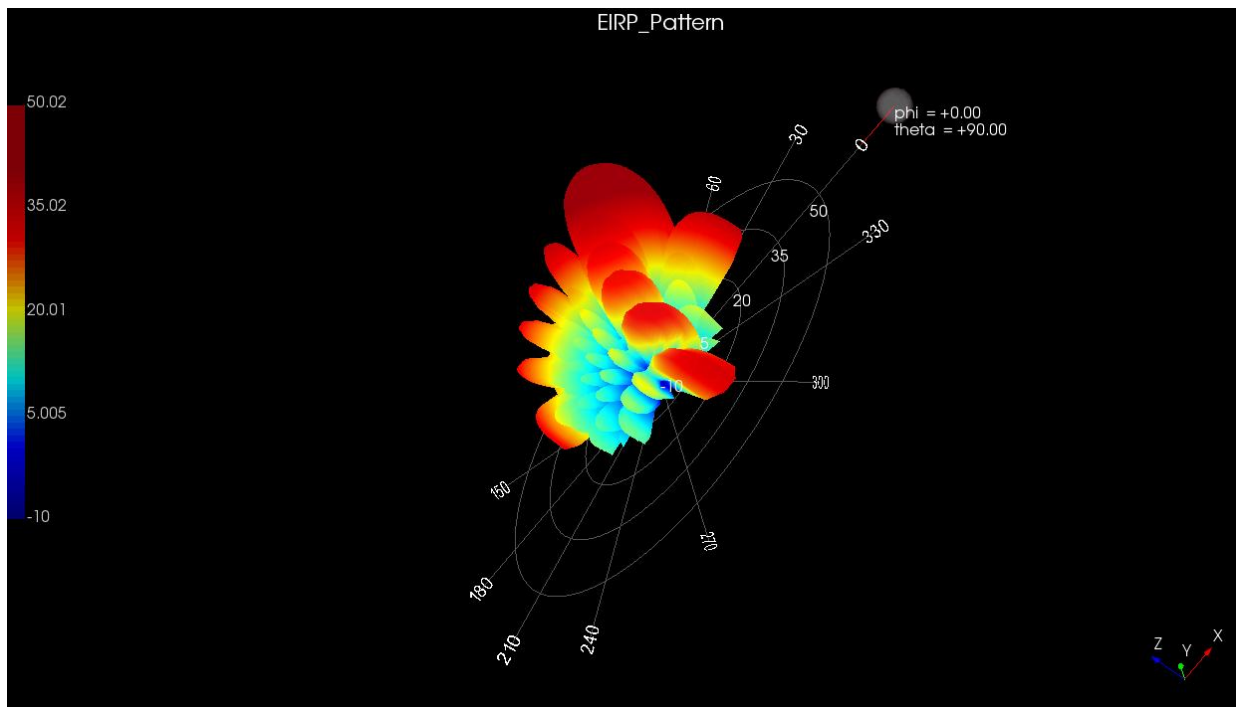


Figura 9: Simulación en 3D de la EIRP (Effective Isotropic Radiated Power)

Simulation Log: Es una ventana donde se puede ver cómo evoluciona la simulación, y si existen errores, cuales son y donde están. Permite debugar y detectar errores. Un aspecto a destacar, debido a su gran uso en carreras de ingeniería, es que incorpora de forma predeterminada la aplicación Matlab.

Library: El entorno de SystemVue proporciona más de 300 librerías para poder añadir bloques o crear nuevos sistemas.

Todos los ejemplos tienen una nota explicativa de ayuda donde se comenta que es lo que hace el sistema, cómo está compuesto y los diferentes resultados que se pueden obtener.

Otro aspecto, muy importante a destacar, es su gran número de ejemplos de diferentes tipos de escenarios que proporciona SystemVue. Pulsando en Help → Example explorer, se abre una ventana, en la que se puede ver una serie de desplegables con diferentes temáticas. Cada desplegable tiene a su vez, un conjunto de desplegables que representan posibles escenarios referidos a la temática escogida en el primer desplegable. Gran parte de estas simulaciones han seguido los estándares del 3GPP o de organizaciones de referencia en el sector. Como se puede observar, en la imagen contamos con un total de 942 ejemplos con las diferentes temáticas y un buscador.

Example Explorer

Search:

Selected example: BlindEqLms

Blind Equalisation Example - LMS

This example implements a blind equaliser. The adaptive filter LMS core block is used as the adaptive algorithm. Note that in this case the desired signal is the output of the non linearity block. This means that no training sequence is required.

The input signal to the system is a set of random symbols. These are produced with the combination the IID Uniform Noise Waveform and the Uniform Quantizer parts. These symbols are mapped using the modulation mapping in the symbol modulator part. These complex symbols are then sent through the channel, which is represented as a complex FIR filter.

The blind equaliser is implemented with a complex LMS adaptive filter core and a non linearity part. The non linearity is used to operate at the output of the LMS part in order to produce the desired signal. This in turn is used to generate the error signal required by the LMS adaptive filter core block.

The complex error filter block performs a Gaussian filtering operation on the norm (square of the modulus) of the error signal. The effect is a smoothing of the norm of the error.

Models used by selected example:

Data Flow Models:
Delay, FIR_Cx, Mapper, RandomBits, Sink, Sub

EqLib Models:
AdptFitCoreLMS_Cx, ErrorFilterCx, NonLinearityCx

942 items

Open Workspace Open Folder

Figura 10: Cuadro del explorador de ejemplos de sistemas

Finalmente comentar, que SystemVue, tiene un servicio de soporte técnico, al cual puedes enviar un correo electrónico exponiendo tus dudas o problemas, y en un breve periodo de tiempo te responden.

3. Metodología

En este apartado se explica cómo se han estudiado algunos de los nuevos aspectos más importantes del 5G con SystemVue.

Es importante tener en cuenta que antes de empezar a realizar pruebas y simulaciones con el programa, ha habido un periodo de documentación y estudio del 5G, pues se trata de una tecnología muy reciente, de la cual la publicación del estándar fue realizada en junio de 2018, y por lo tanto la información que existe es muy reciente. Este proceso se ha realizado con el objetivo de conocer y familiarizarse con los diversos parámetros de esta nueva tecnología.

De forma paralela a esta primera fase, se han estudiado las facilidades que nos ofrece SystemVue y su uso mediante tutoriales y videos proporcionados por el mismo, con la finalidad de familiarizarse con el software.

Una vez finalizado el periodo de documentación, se empezó por ver ejemplos simples con la ayuda de los video-tutoriales que nos ofrece el programa.

La segunda etapa de este proyecto fue ver que sistemas se podían estudiar. Tal y como se ha comentado anteriormente, SystemVue tiene un gran número de ejemplos (942), y referentes al 5G tiene 44. Estos 44 ejemplos se han analizado de forma general para ver que nos ofrecía SystemVue, pero hemos preferido centrarnos en algunos con cierta relevancia en esta nueva tecnología.

Una vez decididos los sistemas que se iban a estudiar, modificando los parámetros necesarios, se han hecho y planteado diferentes escenarios, con la finalidad de obtener resultados y ver la flexibilidad que tiene SystemVue a la hora de plantear y simular diferentes escenarios.

Finalmente, la última etapa de este proyecto fue la obtención de resultados, su interpretación y relación con la teoría.

4. Desarrollo del proyecto

4.1. Conceptos teóricos

En esta sección se presenta la teoría de los conceptos del NR que se han estudiado en los sistemas detallados a continuación.

4.1.1. Rango de Frecuencias (FR)

FR es el rango de frecuencia en el que el NR puede operar de acuerdo con las especificaciones [7].

Designación del Rango de Frecuencia	Rango de Frecuencias correspondiente
FR1	450 MHz – 6000MHz
FR2	24250 MHz – 52600 MHz

Tabla 1: Definición rango de frecuencias

4.1.2. Numerologías

El espaciado entre subportadoras, se denomina Numerología. En el NR se admiten múltiples numerologías donde μ (configuración del espaciado de subportadoras) y el prefijo cíclico para la parte de ancho de banda se obtienen de la capa superior. [8]

μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15[\text{KHz}]$	Prefijo cíclico
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Extended
3	120	Normal
4	240	Normal

Tabla 2: Numerologías de transmisión soportadas

La diferencia más notable entre LTE y el NR, es que el Δf ya no se fija en 15KHz como ocurre en LTE.

El espaciado de las subportadoras de 15 KHz, 30KHz y 60KHz se usa en las bandas de frecuencia más bajas y las de 120KHz y 240 KHz pertenecen a las bandas de alta frecuencia. [9]

4.1.3. Parte de Ancho de Banda (Bandwidth Part: BWP)

El BWP, parte de ancho de banda, es un subconjunto de bloques de recursos comunes (RB) contiguos para una numerología determinada en la parte de ancho de banda de una portadora. La posición inicial $N_{\text{BWP},i}^{\text{start},\mu}$ y el número de RB's $N_{\text{BWP},i}^{\text{size},\mu}$, en una parte de ancho de banda deberán cumplir[8]:

$$N_{\text{grid},x}^{\text{start},\mu} \leq N_{\text{BWP},i}^{\text{start},\mu} < N_{\text{grid},x}^{\text{start},\mu} + N_{\text{grid},x}^{\text{size},\mu} \quad \text{y} \quad N_{\text{grid},x}^{\text{start},\mu} < N_{\text{BWP},i}^{\text{size},\mu} + N_{\text{BWP},i}^{\text{start},\mu} \leq N_{\text{grid},x}^{\text{start},\mu} + N_{\text{grid},x}^{\text{size},\mu}$$

El UE (equipo de usuario), se puede configurar con un máximo de 4 BWP para el enlace ascendente y el enlace descendente, pero solo un BWP está activo para el enlace ascendente y el otro para el enlace descendente.

4.1.4. Bloque de recursos

Un bloque de recursos se define como $N_{\text{sc}}^{\text{RB}} = 12$ subportadoras consecutivas en el dominio de la frecuencia[9].

4.1.5. Bloque de sincronización de señal (Synchronization Signal Block: SSB)

SSB significa Bloque de sincronización de señal y también se le puede llamar SS/PBCH(Signal Synchronization/ physical broadcast channel). Como indica el nombre, este bloque se encarga de la sincronización de la señal y el canal de PBCH.

En el dominio de la frecuencia, un bloque SS/PBCH consta de 240 subportadoras contiguas, con las subportadoras numeradas en orden creciente de 0 a 239 dentro del bloque SS/PBCH. Estas 240 subportadoras equivalen a 20RB's [7].

4.1.6. Ancho de banda del canal

La configuración de ancho de banda de transmisión NRB para cada ancho de banda de canal y espaciado de subportadora se especifica en las siguientes tablas, tanto para FR1 y FR2 [8].

SCS (KHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	N.A	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135

Tabla 3: Configuración del ancho de banda en transmisión para FR1

SCS (KHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400MHz
	NRB	NRB	NRB	NRB
60	66	132	264	N.A
120	32	66	132	264

Tabla 4: Configuración del ancho de banda en transmisión para FR2

4.2. New Radio Downlink Transmission (NR_DL_TX)

De los ejemplos que se estudiaron, este ha sido el primer ejemplo que hemos escogido para analizar porque nos pareció el más interesante para explicar con detalle, debido a que contiene nuevos aspectos del 5G.

4.2.1. Sistema NR_DL_TX

Este sistema estudia la transmisión del enlace entre la estación base y el móvil (DL:downlink) del New Radio. En concreto vamos a ver cómo afecta el espaciado de las subportadoras, llamado Numerologías, el cual es uno de los aspectos más importantes e innovadores del 5G respecto del 4G.

Las características del sistema que veremos son las siguientes:

- Transmisión de señal con múltiples numerologías.
- Medición del espectro, constelación, Error Vector Magnitude (EVM), ACLR i Complementary Cumulative Density Function (CCDF).
- La grafica EVM vs SNR es compatible con la amplificación de potencia no lineal.
- Se ha añadido un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise)
- Modelado de canales de RF en Tx y estructura de matriz en fases de Tx para FR2
- Las mediciones de EVM en FR2 se basan en el promedio de EVM en diferentes direcciones de Rx.

Estos serán los resultados que obtendremos después de la simulación:

- Espectro transmitido
- Constelación
- EVM vs SNR con/sin amplificación de potencia no lineal
- ACLR
- Forma del haz (en 3D)

Existen 3 posibles escenarios, estos son:

- FR1 1 Numerología
- FR1 2 Numerologías
- FR2

Previamente al análisis del sistema, necesitamos saber ciertos aspectos técnicos teóricos para poder entender la explicación.

4.2.2. Esquema del sistema

Todo sistema de comunicaciones consta de 3 partes, transmisor, canal y receptor. La parte transmisora, como vemos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se generan los bits y luego se pasan por la fuente donde mediante diferentes procesos que adaptan los bits de información según las técnicas de transmisión empleadas (codificación de canal, mapeo de bits,...) para generar la señal en banda base.

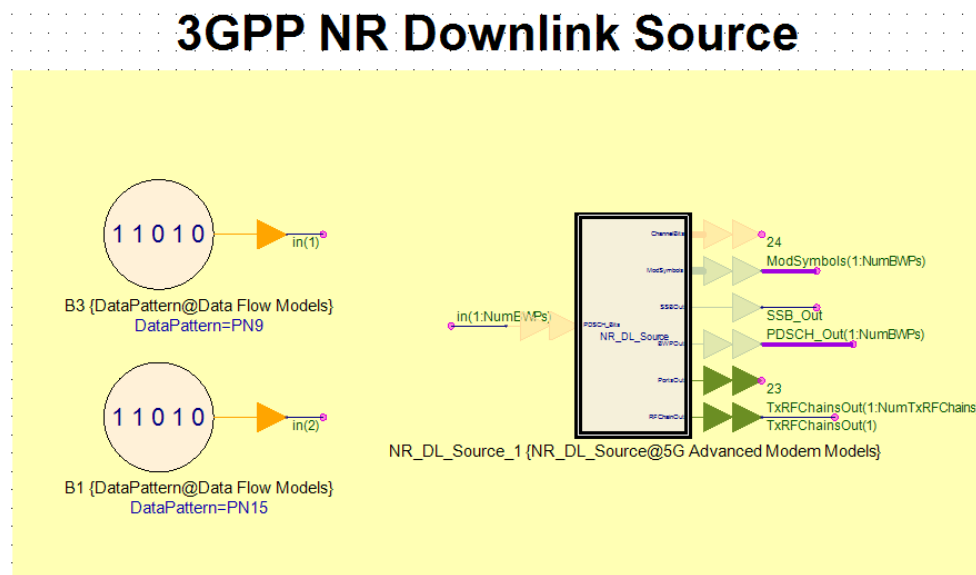


Figura 11: Bloque transmisor

Una vez generada la señal en banda base, se muestrea y se divide en dos componentes, en fase (Real) y cuadratura (Imaginaria) y se pasan por un filtro FIR paso bajo (Figura 12). Una vez filtradas las componentes se modula la señal que contiene la información a transmitir sobre una onda radioeléctrica portadora de soporte a la frecuencia portadora. Para finalizar la parte de transmisión de la señal, se amplifica la señal modulada para que disponga del nivel de potencia suficiente que le permita ser radiada y alcanzar el receptor. En la salida del demodulador medimos el espectro antes de la señal ser enviada por el canal.

El módulo de "Noise Density" emula el canal, añadiéndole ruido Gaussiano blanco a la señal de entrada.

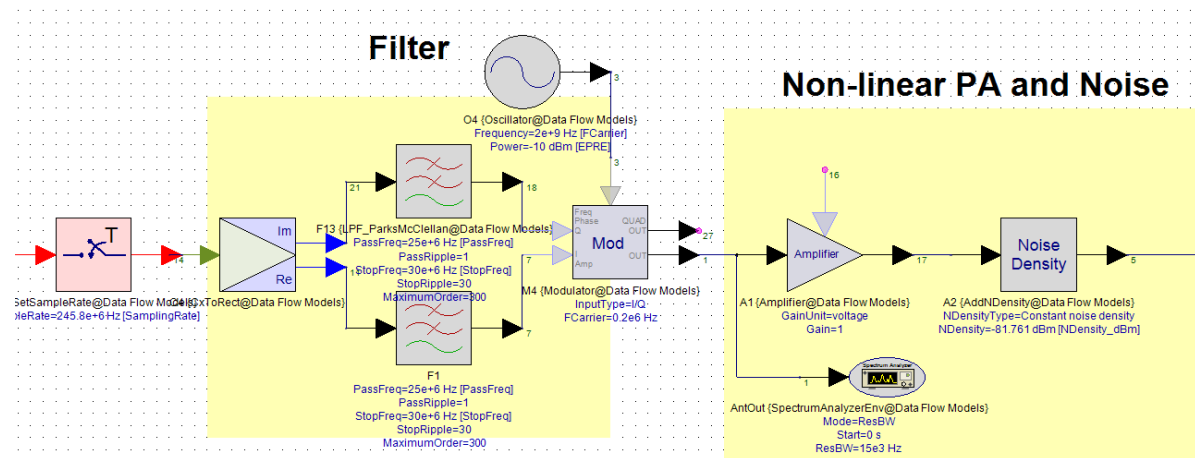


Figura 12: Bloques del filtro, amplificador de potencia no lineal y ruido

Finalmente en el receptor se encarga de demodular la señal, que en su salida es una señal compleja formada por las componentes I/Q de la señal recibida. Como podemos ver en la Figura 13 hay dos demoduladores, esto es porque usamos un demodulador por cada BWP que tenemos, en este caso BWP es igual a 2.

Para finalizar, podemos obtener distintos resultados como la constelación, EVM, ACLR,...

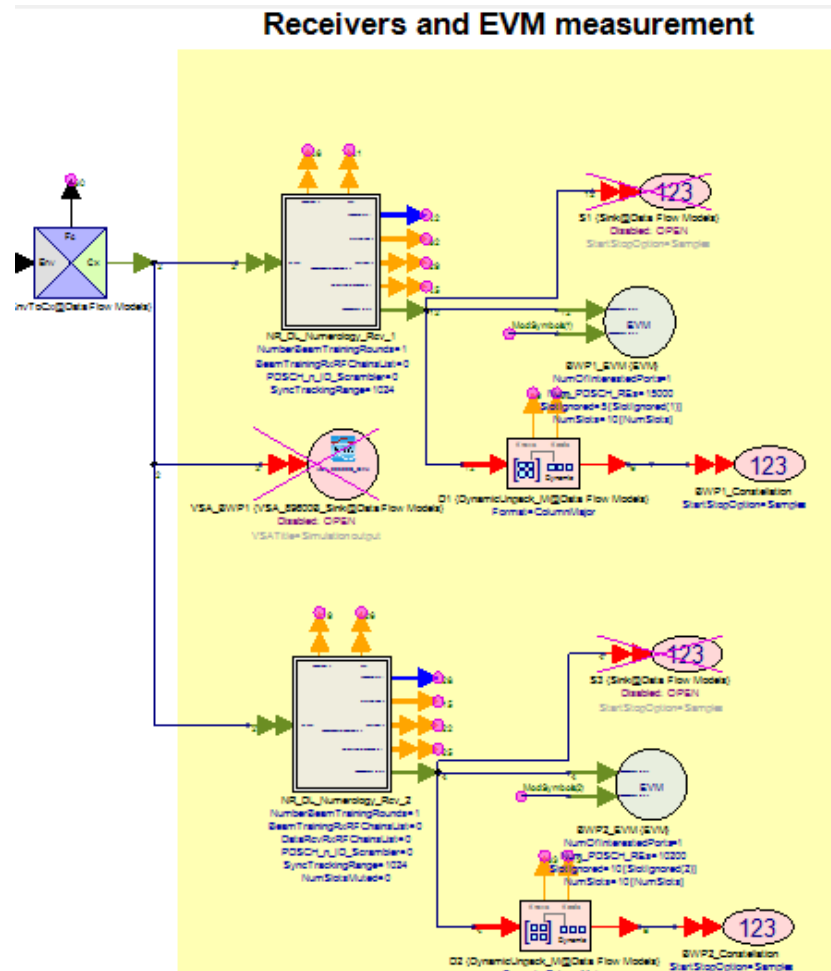


Figura 13: Bloque receptor

4.2.3. Lista de parámetros

Esta es la lista de los parámetros más relevantes del sistema. Cuando se modifica un valor de esta tabla, se modifica automáticamente en todos los módulos.

Tal y como podemos ver, hay muchas posibles combinaciones y opciones para modificar los valores, de tal manera que podamos estudiar distintos escenarios o como variando un parámetro afecta de una forma u otra al conjunto del sistema.

Name	Description	Default value
FCarrier	range of frequency carrier	2e9
NumTxRFChains	number of Tx RF chains	1
PortstoRFMatrix	unique ports (include SSB ports) to RF Chains matrix	[1,1]
CarrierNumRBs	number of RBs in one component carrier based on specific numerology	[270,133]
Numerology_k0	the lowest numbered subcarrier in a common resource block for specific numerology	[0]
OversamplingOption	oversampling option	0:Ratio 1
NumBWPs	number of BWPs	2
Numerology	numerology(0: 15kHz;1:30kHz;2:60kHz;3:120kHz;4:240kHz;5:480kHz)	[0,1]
CellID	the index of cell identity	0
CyclicPrefix	normal CP or extended CP(0: Normal; 1: Extended)	0
SSB_Enable	enable or disable SS/PBCH blocks transmission	0: NO
SSB_Numerology	numerology of SSB	0:15kHz
SSB_Lmax	number of SS/PBCH block candidates for a half frame with SS/PBCH blocks	0:L= 4 1:L= 8 2:L = 64
SSB_RBOffset	the starting RB index of resource blocks allocated to SSB in the whole bandwidth based on 15kHz or 60kHz	100
SSB_k0	Which subcarrier subcarrier 0 in an SS/PBCH block corresponds to in the first common resource block where SSB is allocated.	0
SSB_Periodicity	SS/PBCH block transmission period	0:5 ms
SSB_SymStartOption30K	SS/PBCH block candidates configuration options for 30 kHz numerology	0: Option1 1: Option2
SSB_TimeOffset	SS/PBCH block transmission offset in each transmission period	0
BWP_RBOffset	the starting RB index of resource blocks allocated to BWP in the whole bandwidth based on specific SCS	[0,65]
BWP_NumRBs	number of PRB in BWP based on different SCS of different numerology	[100,68]
BWP_NumPorts	number of ports for each BWP	[1]
BWP_PortList	ports index, the range of each element should be in range of [1000 ~ 1011]	[1000]
PDSCH_Enable	enable or disable PDSCH and its DMRS transmission	0:NO 1:YES
TransBlockSize	transport block size for each slot. Only valid when the TBS port is unconnected.	[10000,800]
Modulation	modulation orders in each slot. (2:QPSK, 4:16QAM, 6:64QAM, 8:256QAM)	[2]
PDSCH_RBOffset	the starting RB index of resource blocks allocated to the user	[0,0]
PDSCH_NumRBs	number of resource blocks (RBs) for each PDSCH.	[100,68]
PDSCH_StartOFDMSym	the index for the first OFDM symbol allocated to each PDSCH.	[1]
PDSCH_NumOFDMSyms	number of OFDM symbols for each PDSCH.	[13]
NumSlots	number of slots to simulate	10
PBCH_Decoding_Enable	enable or disable PBCH decoding.	0:NO 1:YES
SNR	signal noise ratio in dB	30

Tabla 5: Lista de parámetros del sistema NR_DL_TX

4.2.4. Como modificar parámetros

Tal como hemos visto anteriormente hay muchos parámetros que se pueden modificar, pero hemos decidido centrarnos en estudiar cómo afectan las diferentes numerologías al ancho de banda asignado a cada bandwidth part, por lo tanto debemos saber qué parámetros hay que modificar y cómo hacerlo.

Antes de empezar a explicar qué parámetros modificar y cómo, hay que entender la sintaxis de SystemVue. Los posibles valores de los parámetros están separados por comas y se relacionan entre sí. Por ejemplo el valor 0 del parámetro “Numerology” de la Tabla 6 se corresponde con el valor 270 del parámetro “CarrierNumRBs”, por estar los dos en la primera posición antes de la coma. De la misma manera el valor 1 del parámetro “Numerology” corresponde con el valor 133 del parámetro “CarrierNumRBs” y así consecutivamente con todos los parámetros.

Parámetro	Valor
NumBWPs	2
Numerology	[0,1]
CarrierNumRbs	[270,133]
SSB_Numerology	0
SSB_RBOffset	100
BWP_RBOffset	[0,65]
BWP_NumRBs	[100,68]
PDSCH_NumRBs	[100,68]
Numerology_k0	0

Tabla 6: Ejemplo de configuración de parámetros

Los parámetros que hay en la Tabla 6 son los que hay que modificar para estudiar el ancho de banda.

En este ejemplo se ha dividido la portadora en 2, en el BWP1 y en el BWP2, esto significa que se puede configurar dos numerologías, iguales o distintas, en la misma portadora.

Conociendo la sintaxis que usa SystemVue, vemos que al BWP1 se le ha asignado la numerología 0 (15kHz), con 270 RB's y al BWP2 se le ha asignado la numerología 1 (30kHz) con 133 RB's.

Los valores de 270 RB's y 133 RB's, hacen referencia al ancho de banda del canal, tal y como se ha visto en Tabla 3. Para la numerología 0, si se usan 270 RB's implica que se trabaja con un canal de 50MHz, el más grande de esta numerología. Para comparar las dos numerologías con el mismo ancho de banda de canal, en la numerología 1 utilizaremos 133 RB's, que implica un canal de 50MHz, aunque en esa numerología el

canal más grande con el que se puede trabajar es de 100MHz, el doble que con la numerología 0.

Toda portadora tiene un bloque de sincronización de señal (Synchronization Signal Block: SSB), y hay que reservar 20RB's en la portadora, ya que es el tamaño de este bloque. En este ejemplo, systemVue únicamente permite 1 bloque SSB por portadora y para la numerología 4 (240kHz) no está disponible. El parámetro SSB_Numerology indica respecto que numerología se va a hacer la asignación de estos 20 RB's, aunque en SystemVue el inicio de los RB's del SSB toma como referencia el SCS de 15 o 60kHz, esto es importante tenerlo en cuenta por si se trabaja con numerologías distintas de este espaciado entre subportadoras.

Una vez definidas las BWP y el bloque SSB, se debe especificar cuántos recursos se utilizan en cada numerología. Hay que tener en cuenta que los recursos del BWP1 y del BWP2 no pueden solaparse con el SSB. En este ejemplo se van a utilizar 100 RB's para el BWP1 y 68 RB's para BWP2. El inicio de estos recursos que se van a utilizar viene marcado por el parámetro BWP_RBOffset, que como se puede observar, para el BWP 1 empezaran en 0 y para el BWP2 empezaran en 65. Por lo tanto se puede deducir que el inicio y fin de los recursos que se utilizaran para un BWP se calcula de la siguiente manera:

$$\text{BWP}=[\text{BWP_RBOffset}, \text{BWP_RBOffset} + \text{BWP_NumRBs} - 1]$$

que en nuestro ejemplo seria $\text{BWP1}=[0,0+100-1]=[0,99]$ y el mismo procedimiento para BWP2, $\text{BWP2}=[65,65+68-1]=[65,132]$, para la numerología 1. Si se observan los números absolutos parece que las dos BWP se solapan, pero no es así, pues la BWP2 cuenta con los RB's de 30kHz, mientras que la BWP1 lo hace con 15kHz, por lo que el RB 65 de la BWP2 corresponde con el RB 132 de la BWP1.

Teniendo en cuenta que el SSB no puede solaparse con ningún BWP, y que se toma como referencia la numerología0 para el SSB, hay que encontrar un valor que cumpla con el no solapamiento. En nuestro ejemplo se ha elegido el $\text{SSBOffset}=100$, porque es donde terminan los recursos del BWP1, de esta forma ya aseguramos que con la BWP1 no tendremos problemas. Por lo tanto se puede deducir el inicio y fin del bloque SSB de la siguiente manera $\text{SSB}=[\text{SSB_RBOffset}, \text{SSB_RBOffset} + 20 \text{ RB's} - 1]$, aplicado a nuestro ejemplo $\text{SSB}=[100,100+20-1]=[100,119]$.

En la siguiente figura se muestra el espectro usado por cada BWP y por el SSB en este ejemplo.

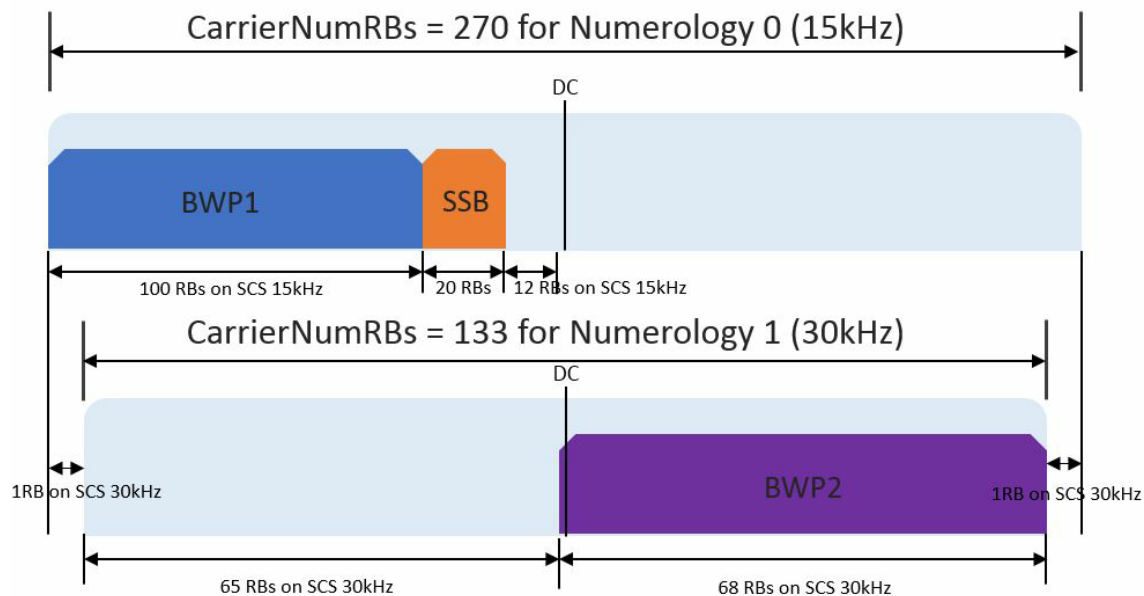


Figura 14: Ejemplo de espectro usado para cada BWP y el SSB según los parámetros de la Tabla

Para poder comparar las distintas BWP hay que ver la relación que existe entre ellas, si nos fijamos $RB_{BWP2} = \left(\frac{RB_{BWP1}}{2}\right) - 2$ (hay que quitar 1RB por el inicio y otro por el final).

Sabiendo esta relación ya podemos calcular a partir de qué valor podemos poner los recursos de la BWP2 cumpliendo con los requisitos. En nuestro ejemplo sabemos que los recursos utilizados en el BWP1 mas el bloque SSB finalizan en 119, por lo tanto si esto lo equiparamos con la BWP2, ya que para comparar ambos anchos de banda tienen que tener las mismas medidas/unidades, se obtendría que $BWP1 = (120/2) - 2 = 58$ recursos, es decir el BWP1 de numerología 0 si se pasa a numerología 1, ocupa de 0-58 recursos. Quiere decir que a partir del recurso 59 de la BWP2 ya se puede poner los recursos que se quieran utilizar, sabiendo que no habrá solape. En este ejemplo hemos dejado un margen de 6 RB's, aunque no sería necesario.

Sabiendo la relación existente entre las BWP, también se puede ver donde finaliza el BWP2 respecto del BWP1, de la siguiente manera $BWP2 = (65+68+2)*2=270$, por lo tanto ocupamos todos los recursos del canal.

El parámetro PDSCH_NumRBs debe tener los mismos valores BWP_NumRBs para que la simulación se haga correctamente. El canal de PDSCH es el principal canal portador de datos e indica el número de RB's por canal. Y por último el parámetro Numerology_k0, indica a que subportadora corresponde el primer bloque de recursos del bloque SS/PBCH y el desplazamiento se mide en recursos. Si tenemos Numerology_k0=0 conseguimos que las portadoras sean simétricas en DC.

Finalmente comentar que hay muchas maneras de llevar a cabo la configuración de las BWP. En este ejemplo se ha optado por ocupar gran parte de todo el canal y poner el SSB entre medio de los recursos de la BWP1 y BWP2, pero no es necesario, también se puede poner al inicio o al final, indistintamente. Igualmente tampoco es necesario ocupar la totalidad del ancho de banda. Los recursos de las BWP1 y BWP2 se pueden superponer. Hay mucha flexibilidad a la hora de modificar el ancho de banda y hacer diferentes pruebas en escenarios para estudiar cómo afectan las numerologías o que uso se les puede dar.

4.2.5. Resultados

Como ya se ha comentado anteriormente, el ancho de banda se puede dividir en partes (BWP) y utilizar para diferentes propósitos. Cada BWP tiene su propia numerología, lo que significa que cada BWP se puede configurar de manera diferente al resto, lo que permite un uso más eficiente del espectro y un uso más eficiente de la energía. Un BWP puede tener requisitos de energía reducidos, mientras que otro puede soportar diferentes funciones o servicios, y otro puede proporcionar la coexistencia con otros sistemas. A continuación se muestran algunos de los ejemplos de cómo las partes de ancho de banda pueden admitir diferentes servicios y como se pueden representar en SystemVue [10][11]. Estos servicios son:

1. Consumo reducido de energía del UE
2. Tener dos BWP no contiguas de distintas numerologías
3. Espectro no contiguo donde poder añadir servicios
4. Ancho de banda libre para nuevos descubrimientos o aun sin definir.

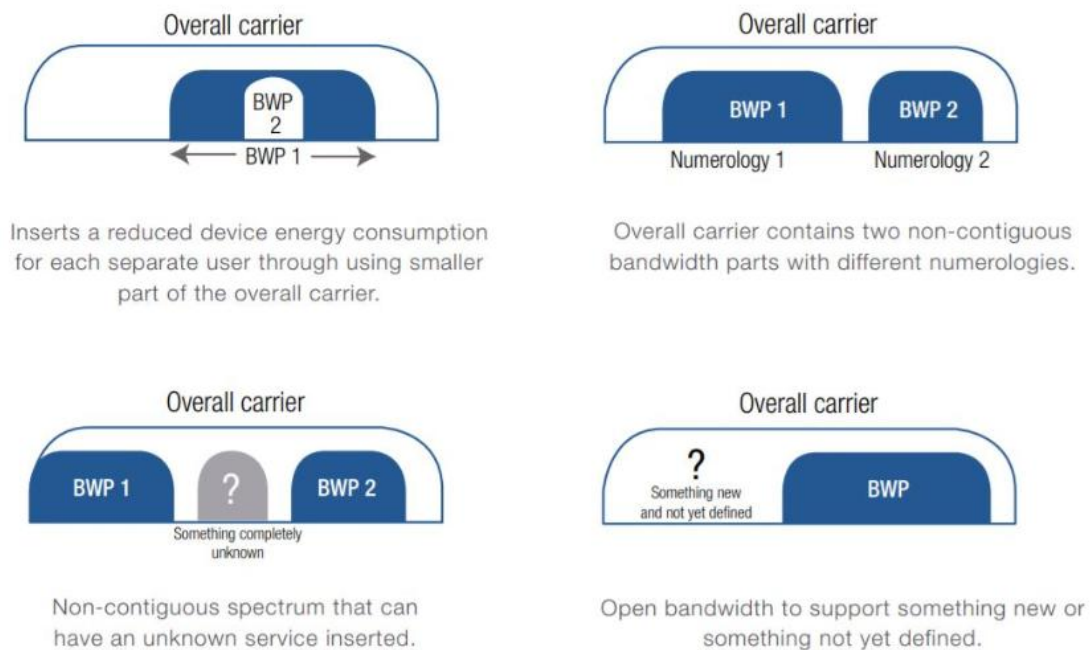


Figura 15: Ejemplos de diferentes servicios de BWP

Ahora se mostraran estos 4 servicios simulados con systemVue, para los cuales se usaran los parámetros que se indican en la siguiente tabla

Parámetros	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
NumBWPs	2	2	2	2
Numerology	[0]	[0,1]	[0]	[0]
CarrierNumRbs	[270]	[270,133]	[270]	[270]
SSB_Numerology	0	0	0	0
SSB_RBOffset	250	100	40	40
BWP_NumRBs	[250,80]	[70,68]	[40,70]	[40,40]
BWP_RBOffset	[0,60]	[0,65]	[0,200]	[0,60]
PDSCH_NumRBs	[250,80]	[70,68]	[40,70]	[40,40]

Tabla 7: Valores de los parámetros de los diferentes casos

Caso 1: Consumo reducido de energía del UE

Si nos fijamos en los valores de la tabla, el BWP2 está dentro del BWP1. En la imagen se puede ver como el BWP2 es el que mayor potencia tiene y el BWP1 es el que ocupa gran parte del canal pero con menor potencia.

Un mayor ancho de banda puede implicar un mayor consumo de energía, en cambio hay ocasiones en las que no es necesario anchos de banda grandes y gracias a las numerologías podemos reducir el ancho de banda, lo que se convierte en una solución energética. En este caso el SSB lo hemos situado al final de canal. Al ser un bloque de sincronización no requiere tanta potencia.

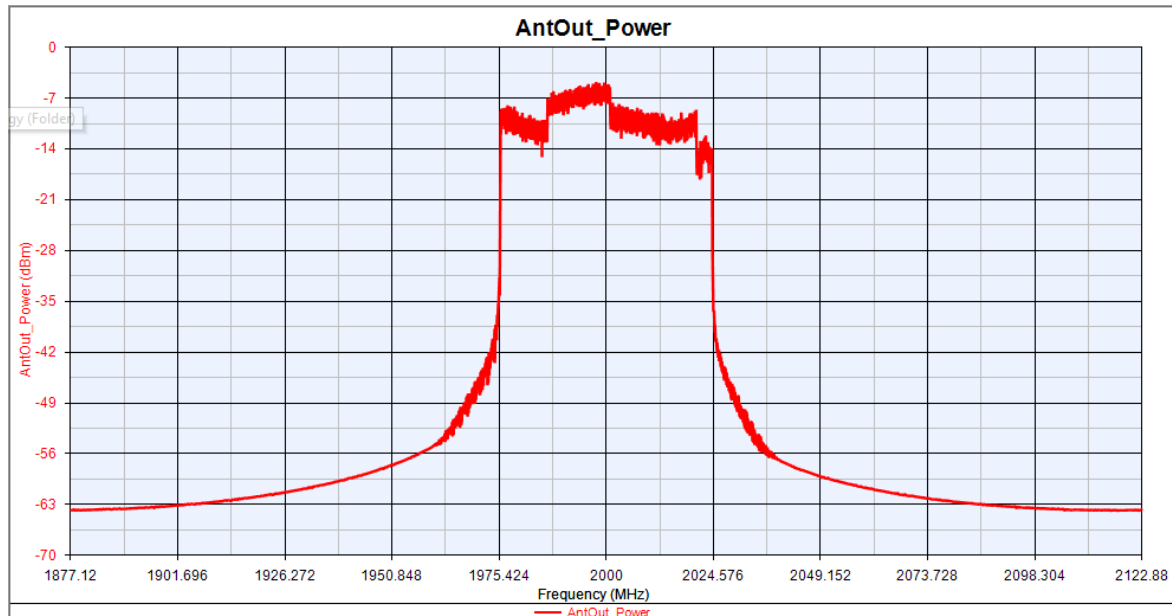


Figura 16: Simulación con SystemVue del Consumo reducido de energía del UE

Caso 2: Tener dos BWP no contiguas de distintas numerologías

Claramente se pueden distinguir en la imagen el BWP1 del BWP2. Entre medio de los BWP, hemos situado el bloque SSB. Se puede apreciar en esta imagen que no estamos usando todo el ancho de banda.

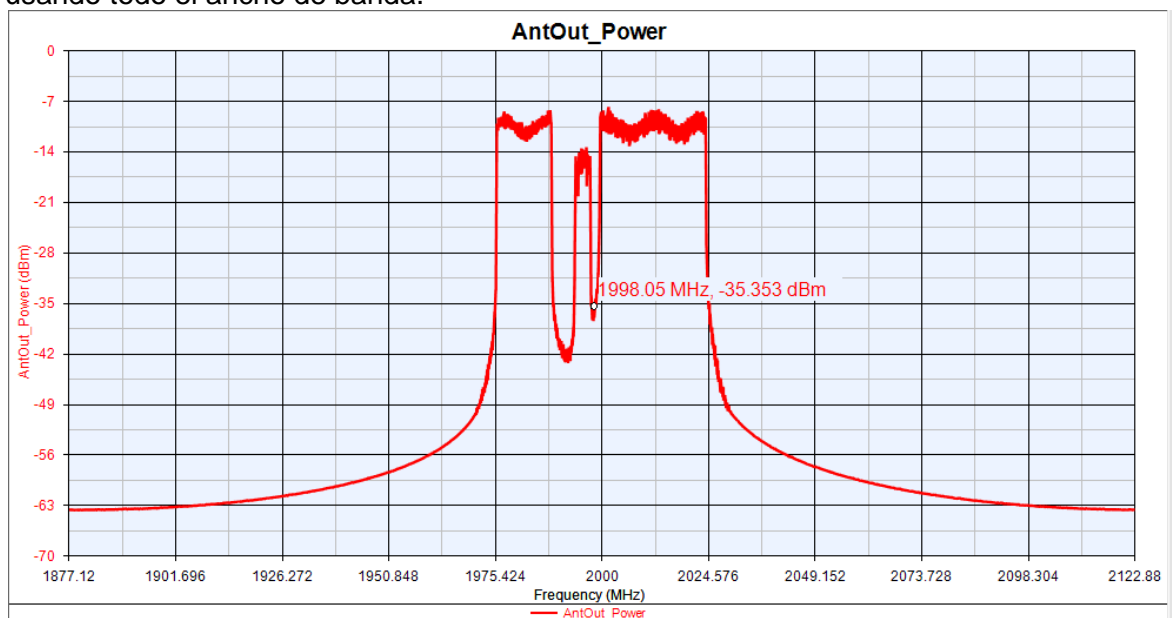


Figura 17: Simulación con SystemVue de dos BWP no contiguas de distintas numerologías

Caso 3: Espectro no contiguo donde poder añadir servicios

En este caso hemos reducido mucho el ancho de banda de cada BWP, para que en el centro del canal podamos añadir servicios. En el inicio del canal se puede ver el BWP1 junto con el bloque SSB y al final del canal el BWP2.

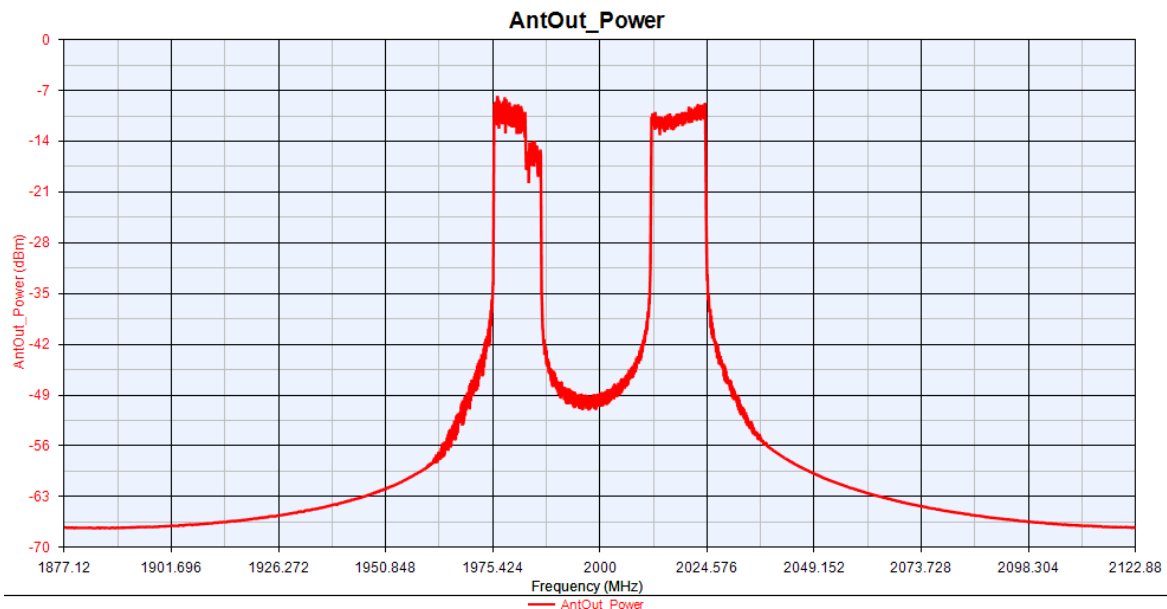


Figura 18: Simulación con SystemVue de un espectro no contiguo donde poder añadir servicios

Caso 4: Ancho de banda libre para nuevos descubrimientos o aun sin definir.

Como se puede ver en la imagen, en este caso no se ocupa la totalidad del ancho de banda. Se centran los BWP's y el bloque SSB al inicio del canal, dejando gran parte de él libre para futuros descubrimientos. En esta imagen se tiene 2 BWP, pero también podría ser una única BWP y el bloque SSB.

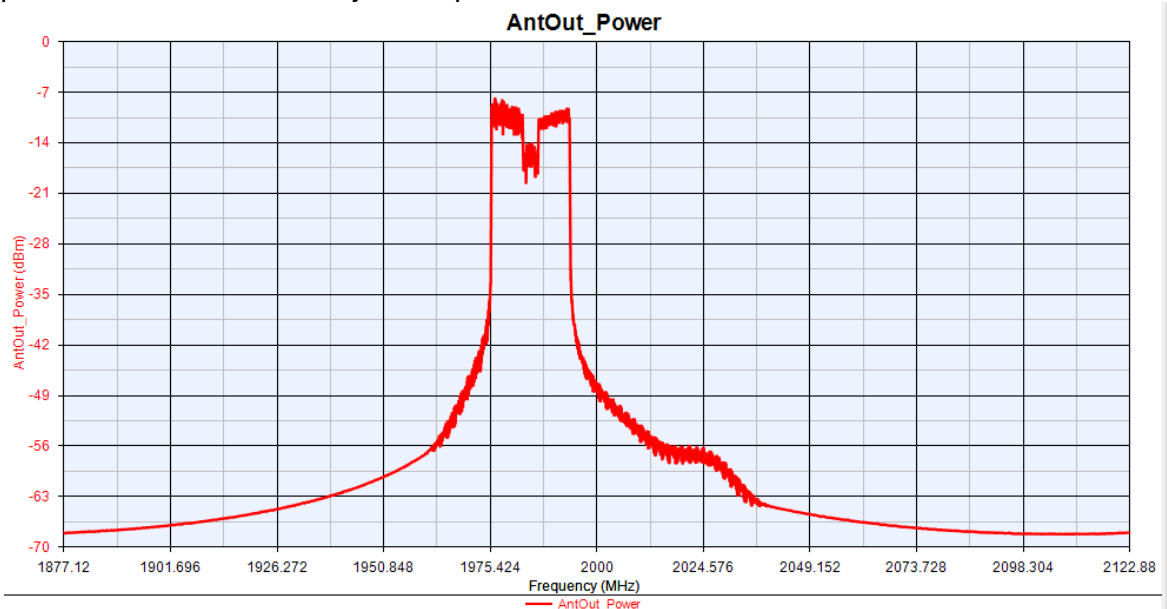


Figura 19: Simulación con SystemVue del ancho de banda libre para nuevos descubrimientos

Además, comentar que en las simulaciones que se han mostrado se ha elegido una canalización de 50 MHz, pero se puede modificar y hacer pruebas con la canalización variando el parámetro CarrierNumRBs según la Tabla 3 y Tabla 4 .

Por otra parte si nos fijamos en las simulaciones presentadas, se puede observar que la frecuencia central está en 2GHz ya que en estos ejemplos hemos optado por trabajar con las numerologías 0 y 1 y por lo tanto se trabaja en FR1, pero SystemVue también permite hacer simulaciones a altas frecuencias trabajando en FR2, tal y como podemos ver en la siguiente imagen. En este caso el bloque SSB está al inicio de la portadora (es la parte con menor potencia) y el resto de ancho de banda es ocupado por los recursos.

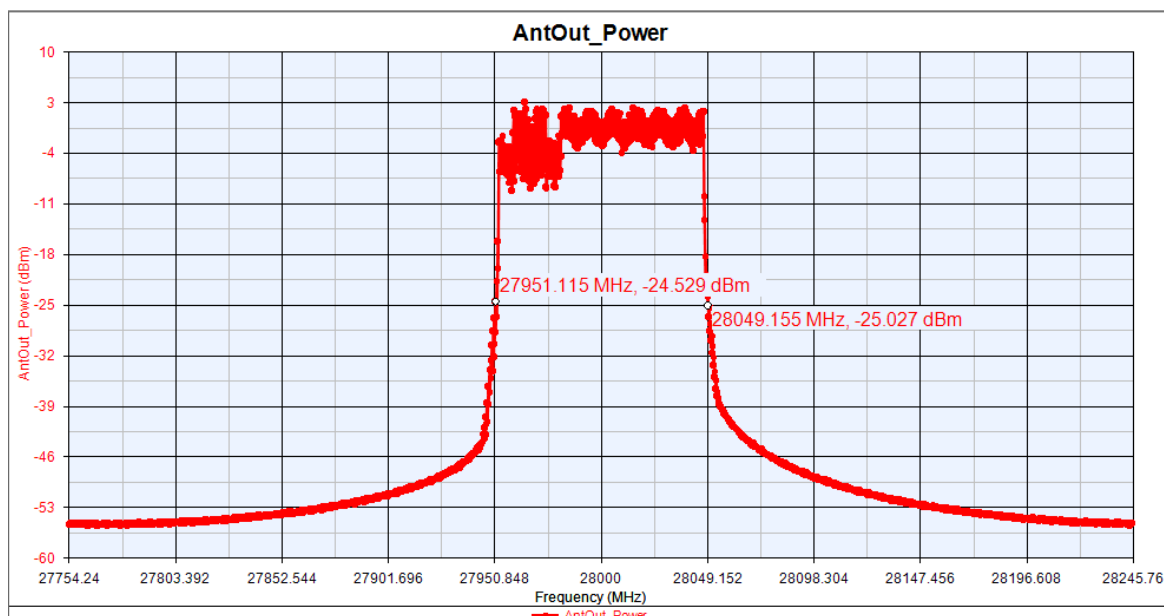


Figura 20: Simulación con SystemVue en FR2

Finalmente, comentar que la modificación del ancho de banda junto con las múltiples opciones de SCS permiten que el sistema NR funcione de manera eficiente y flexible desde la banda sub-6GHz (FR1) hasta la banda mmWave (FR2) y permite admitir altas velocidades de datos para varios servicios con diferentes requisitos de latencia. Además con el nuevo concepto de BWP, permite un funcionamiento eficiente del UE y por lo tanto un menor consumo energético. En la siguiente imagen se puede apreciar la relación tiempo-frecuencia de las numerologías 0,1 y 2, donde se observa que a menor espaciado entre subportadoras más tiempo se necesita y menor es el ancho de banda necesario y por consiguiente, cuanto mayor sea el espaciado entre subportadoras menor

es el tiempo y mayor el ancho de banda necesario[12].

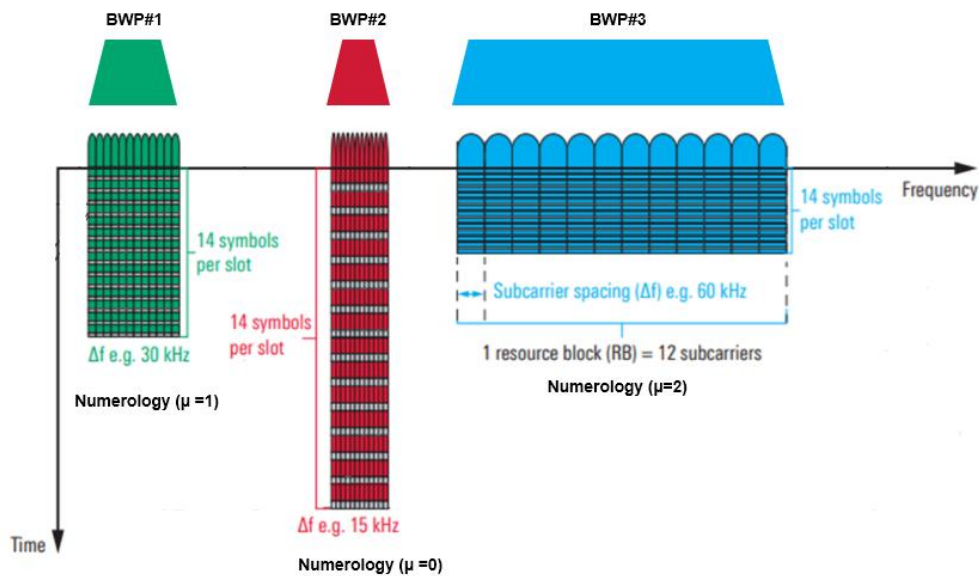


Figura 21: Relación Tiempo vs Frecuencia en las diferentes numerologías

4.3. New Radio Downlink Throughput (NR_DL_Throughput)

El siguiente sistema se analizará como el anterior, pero no será objeto de este estudio el volver a repetir todo el proceso, pasando directamente a comentar los resultados de las simulaciones.

4.3.1. Sistema NR_DL_Throughput

En este nuevo sistema se muestra también el enlace descendente New Radio en el FR1, aunque en este ejemplo, se mide la BER y el throughput en las diferentes técnicas MIMO. El sistema permite configurar 4 posibles escenarios:

- Single-Input Single-Output (SISO): se usa un canal AWGN para ayudar a medir el rendimiento, bajo diferentes valores de SNR.
- Multiple-Input Multiple-Output (MIMO): Se simula un caso MIMO 2x2 con un modelo de canal 3D para emular un canal MIMO, donde se usa por defecto Urban-Micro escenario(UMi). En este caso se mejora la capacidad.
- Single-Input Multiple-Output (SIMO) diversity: En recepción hay dos ramas que se implementan para cambiar dinámicamente la ruta de recepción efectiva en la estimación de potencia. En este caso hay un parámetro "Diversity Option" para elegir qué efecto toma la diversidad. La diversidad se utiliza para mejorar la fiabilidad de la comunicación.
- SISO beamforming: Se introduce la arquitectura de conformación de haz. Tanto Rx como Tx apuntan el haz al mismo tiempo.

En estos diseños se tratará de medir el throughput y la BER. En concreto se obtiene los siguientes resultados: BER sin codificar vs SNR y Throughput vs SNR.

4.3.2. Resultados

De los escenarios que se han comentado, se espera que MIMO sea un componente fundamental para el 5G. Una de las funciones claves del 5G es que debe admitir gran cantidad de usuarios, esto se puede conseguir gracias a la capacidad masiva de MIMO para servir a múltiples usuarios, y múltiples dispositivos, simultáneamente dentro de un área condensada, al mismo tiempo que mantiene velocidades de datos rápidas y un rendimiento constante. Gracias a todo esto, la convierte en la tecnología perfecta para satisfacer las necesidades del 5G.

Con SystemVue hemos podido estudiar estos escenarios, aunque se ha centrado el estudio en el Throughput y la BER del MIMO, SIMO con Diversity, SISO Beamforming y SISO.



Figura 22: BER vs SNR de los 3 posibles casos del SIMO Diversity

En la Figura 22 se pueden ver los resultados obtenidos de calcular la BER en los diferentes casos del SIMO diversity, donde el eje horizontal es la SNR en dB's. En la grafica, *switch* se refiere a elegir la rama con mayor potencia, *branch1* la rama 1 y *branch2* la rama 2.

Se ha realizado un estudio de la BER vs SNR de los distintos escenarios, donde se ha medido la BER en el mínimo y máximo de la SNR y se ha obtenido la siguiente tabla

Técnicas	Mínimo		Máximo	
	SNR	BER(dB)	SNR	BER(dB)
MIMO 2x2	4	0.25	14	0.063
SIMO (Switch)	7	0.013	15	164.9e-6
SIMO(branch1)	7	0.026	15	1.082e-3
SIMO(branch2)	7	0.023	15	701.4e-6
SISO BF	7	0.013	12	43.49e-6
SISO	7	0.013	14	269.5e-9

Tabla 8: Comparativa BER vs SNR distintas técnicas

Observando los valores, el sistema con mejor SNR y BER es el SIMO (Switch), este es en el que la diversidad se habilita para la “rama” con mayor potencia, en vez que el MIMO. Esto es debido a que con SIMO se mejora la calidad de la comunicación porque se elige el camino que se recibe con mayor potencia.

Por otra parte, si se compara el throughput en los 4 escenarios, claramente el sistema SIMO diversity y MIMO son los mejores. Pero en la escala que se muestra en SystemVue, en porcentaje, parece que throughput del SIMO Diversity es mejor que el del MIMO. Pero si se compara en Mbps, y se hace en un valor concreto, el rendimiento de la MIMO es mejor. Esto es debido a que en MIMO al haber múltiples antenas transmisoras y receptoras, se envía más información y esto hace que mejore la capacidad.

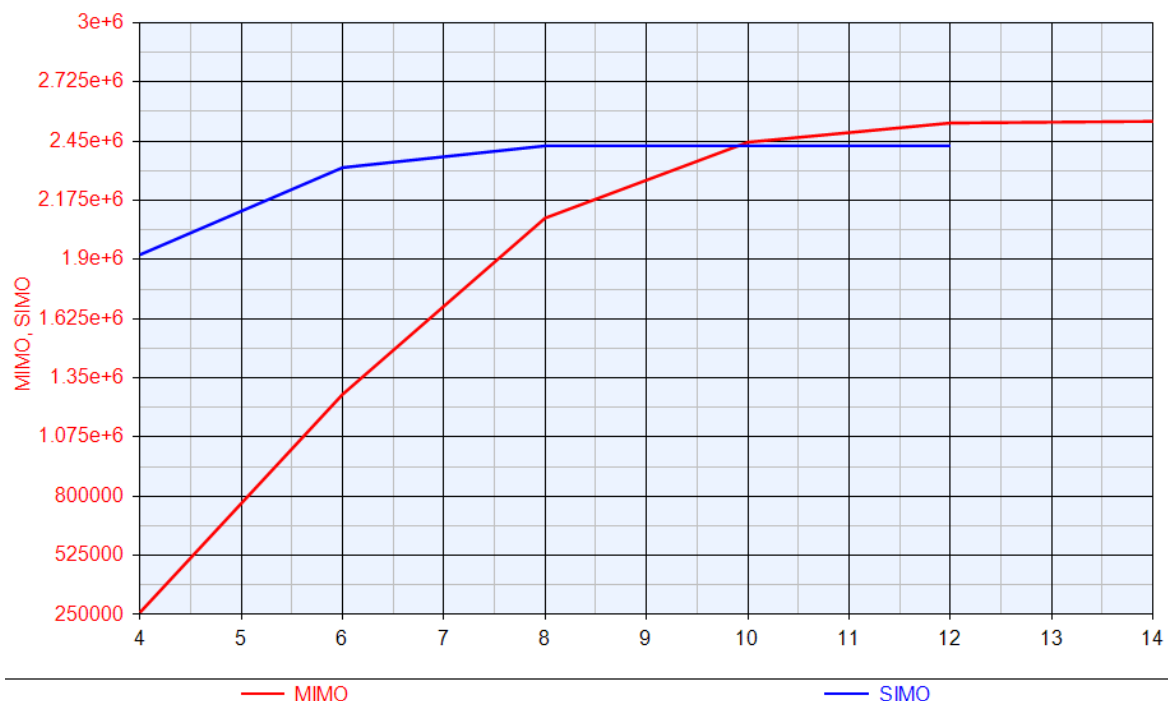


Figura 23: Throughput(Mbps) de las técnicas MIMO y SIMO

5. Presupuesto

El presupuesto total de este proyecto consta de:

- La licencia de SystemVue, la cual ha sido proporcionada por la universidad Politècnica de Catalunya y se desconoce el valor.
- Las horas que he dedicado a este proyecto como ingeniero junior.

Nº de horas dedicadas	€/h	Coste total
450 h (18 semanas, 25h semana)	8	3600€

Tabla 9: Tabla de costos

6. Conclusiones y líneas futuras

El objetivo principal de este proyecto es el de estudiar la simulación del interfaz radio de los sistemas 5G con la herramienta SystemVue y ver la flexibilidad de esta aplicación en la simulación de diferentes escenarios modificando sus parámetros. El propósito principal de éste trabajo es la de comprobar si SystemVue es una herramienta que facilite o ayude a entender los conceptos teóricos de esta nueva tecnología 5G de una forma práctica y didáctica.

En este proyecto, se han aplicado algunos de los conceptos más innovadores del 5G, como sería la posibilidad de diferentes espaciados entre subportadoras (Numerologías) o poder dividir la totalidad del ancho de banda en partes (BWP) y cada una de estas partes tener una numerología distinta, hecho que hace que cada BWP pueda soportar diferentes funciones y servicios. Esto permite un uso más eficiente del espectro y de la energía.

La modificación del ancho de banda junto con las múltiples numerologías permite que el sistema NR funcione de manera eficiente y flexible desde la banda sub-6GHz hasta la banda mmWave, esto permite admitir altas velocidades de datos para varios servicios con diferentes requisitos de latencia. La verdadera innovación del 5G está ocurriendo en la banda mmWave, ya que estas altas frecuencias no están tan explotadas como las bajas, por los móviles, y se podrán crear grandes canales para velocidades muy altas.

La posibilidad de modificar el ancho de banda, ayudara a optimizar el consumo de energía, pues se podrá adecuar el ancho de banda a la necesidad del servicio y por lo tanto no consumir más de lo debido.

También se ha visto el impacto de las técnicas MIMO en el 5G, y cuál de ellas tiene mejor rendimiento con esta nueva tecnología.

Un aspecto a destacar, es que el lenguaje de programación que se usa en SystemVue es Matlab y lo tiene integrado en el mismo programa, por lo que no es necesario tener instalado previamente Matlab. Lenguaje de programación muy común en las universidades de ingenierías, hecho que hace que sea más fácil la familiarización con SystemVue.

Como mejoras o líneas futuras se propone seguir estudiando más prestaciones de los sistemas 5G, pues aun quedan muchos conceptos por analizar y por descubrir, ya que este proyecto no podía abarcar todo el sistema 5G. En este proyecto se han explicado algunas de las características más relevantes.

Una de las posibilidades, es la de profundizar más en un sistema determinado, modificando parámetros del sistema para ver como varían las simulaciones. Así poder obtener conclusiones, que luego puedan ser trabajadas con los estudiantes de forma más práctica.

Bibliografía:

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld. 5G NR: The next Generation Wireless Access Technology 1st ed. Elsevier Ltd 2018 doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814323-0.00001-6>
- [2] Margaret Rouse, WhatIs, "GSM (Global System for Mobile communication)". September 2018. [Online] Available: <https://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/GSM>, [Accessed: November 2018].
- [3] GSA (Global mobile for Suppliers Association), "Evolution from LTE to 5G". April 2018. [Online] Available: <https://gsacom.com/paper/evolution-lte-5g/>, [Accessed: November 2018].
- [4] Ian F. Akyildiz, Shuai Nie, Shih-Chun Lin, Manoj Chandrasekaran, "5G Roadmap: 10 Key Enabling Technologies". June 2016. [Online] Available: https://www.researchgate.net/publication/304144353_5G_Roadmap_10_Key_Enabling_Technologies, [Accessed: November 2018].
- [5] ETSI (European Telecommunications Standards Institute), " 5th Generation". [Online] Available: <https://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/5g>, [Accessed: December 2018].
- [6] COIT (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación), " Modulación y multiacceso en 5G". [Online] Available: <https://www.coit.es/sites/default/files/informes/pdf/modulacion-y-multiacceso-en-5g.pdf>, [Accessed: January 2019].
- [7] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) "Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15)", Technical Specification 38.104, ver 15.3.0 Sep. 2018.
- [8] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) "Physical channels and modulation (Release 15)", Technical Specification 38.211, ver 15.3.0 Sep. 2018.
- [9] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) "Physical layer procedures for data (Release 15)", Technical Specification 38.214, ver 15.2.0 Jun. 2018.
- [10] Sheri DeTomas, Keysight Technologies, "Understanding 5G New Radio Bandwidth Parts". [Online] Available: https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2018/10/31/understanding_5gnew-r15.html, [Accessed: January 2019].
- [11] Jeongho Jeon, Intel Corporation, " NR Wide Bandwidth Operations" [Online] Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiRi5Oyn_3fAhVjxYUKHRPyAJ4QFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Farxiv.org%2Fpdf%2F1712.09724&usq=AOvVaw3WeTJvc9QTmlgslYWbtqzr, Accessed: January 2019].
- [12] TechPlayon, " 5G NR Bandwidth Part (BWP)". [Online] Available: <http://www.techplayon.com/5g-nr-bandwidth-part-bwp/>, [Accessed: January 2019].

Glosario

1G	1st Generation
2G	2nd Generation
3G	3rd Generation
4G	4th Generation
5G	5th Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACLR	Adjacent Channel power/Leakage
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BWP	Bandwidth Part
CCDF	Complementary Cumulative Density Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	Conférence Européenne des Postes et Télécommunications
DL	Downlink
DSP	Digital Signal Processor
EDA	Electronic Design Automation
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
eMBB	enhanced Mobile Broadband
ESL	Environment for electronic system-level
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EVM	Error Vector Magnitude
FC	Fog Computing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FPGA	Field Programmable gate array
GRCM	Mobile Communications Research Group
GSM	Global system for Mobile communications
HSPA	High Speed Packet Access
IETF	Internet Engineering Task Force
LTE	Long Term Evolution
MEC	Mobile Edge Computing
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
mMTC	massive machine-type communication

NFV	Network Functions Virtualization
NMTS450	Nordic Mobile Telephone System
NTT	Telefonía y Telegrafía de Japón
NR	New Radio
OFDMA	Orthogonal Frequency- Division Multiple Acces
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PHY	Physical layer
RB	Resource Block
RF	Radio Frequency
SCS	Subcarrier Spacing
SDN	Software Defined Networking
SFC	Funtion Chaining
SFH	Slow Frequency Hopping
SIMO	Single-Input Multiple-Output
SISO	Single-Input Single-Output
SSB	Synchronization Signal Block
SS/PBCH	Signal Synchronization/ physical broadcast channel
TACS	Total Access Communications System
TDMA	Time Division Multiple Access
Tx	Transmission
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UL	Uplink
URLLC	ultra-reliable and low-latency communication
VNF	Virtual Network Funtions
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WWRF	Wireless World Research Forum