

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE LOS CANALES DE LA CAPA
FÍSICA PDSCH Y PUSCH MEDIANTE EL TOOLBOX 5G DE
MATLAB**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

ITALO ALEXANDER CARREÑO MENDOZA

DIRECTOR: Dr. LUIS FELIPE URQUIZA AGUIAR

Quito, julio 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Italo Alexander Carreño Mendoza, bajo mi supervisión.

Dr. LUIS FELIPE URQUIZA AGUIAR
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Italo Alexander Carreño Mendoza, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

ITALO ALEXANDER CARREÑO MENDOZA

DEDICATORIA

A mis padres Italo Carreño y Elizabeth Mendoza, por ser mi ejemplo de superación y apoyo incondicional, a mis hermanos María José e Iker, quienes estuvieron a mi lado y me motivaron siempre a seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

A mis padres por ser las personas que con su ejemplo me han motivado a seguir adelante, siempre pendientes de que no me falte nada, brindándome todo su apoyo y amor. Gracias a ustedes esto es posible.

A mis hermanos Iker, María José y mi tía Charito con quienes he contado y contaré siempre, gracias por cada momento, son parte de mi motivación para seguir triunfando.

A todos los demás integrantes de mi familia por ser un apoyo incondicional, por los buenos consejos y sobre todo por el amor brindado.

A mis amigos Diego, Jonathan y Hugo, personas las cuales tuve el gusto de conocerlas en el colegio y la fortuna de coincidir en mi carrera universitaria, mis mejores deseos de éxitos para ustedes.

A todas mis amistades forjadas en la Escuela Politécnica Nacional especialmente a Frank, Javier, Carlos, Freddy y Allison, quienes han sido apoyo y compañía en toda mi etapa universitaria.

Al Dr. Luis Urquiza, quien me orientó y estuvo siempre dispuesto a ayudarme durante el desarrollo de este proyecto de titulación.

A los docentes de la Escuela Politécnica Nacional por impartirme su conocimiento y forjarme como persona y profesional.

A la Escuela Politécnica Nacional, por ser el lugar donde me he formado como profesional, por las la buenas y malas experiencias, y por todas las amistades logradas durante mi vida universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVO GENERAL	1
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.3. ALCANCE	2
1.4. MARCO TEÓRICO	4
1.4.1. ARQUITECTURA DE LA RED.....	4
1.4.1.1. Núcleo de la red.....	5
1.4.1.2. Red de Acceso de 5G.....	7
1.4.1.3. Protocolos.....	8
1.4.2. ASPECTOS DE LA CAPA FÍSICA.....	10
1.4.2.1. Numerología y estructura de trama	10
1.4.2.2. Acceso inicial y movilidad.....	15
1.4.2.3. MIMO	17
1.4.2.4. Scheduling / HARQ	17
1.4.2.5. Codificación de Canal	18
1.4.2.6. Parte del Ancho de Banda (BWP, Bandwidth part).....	19
1.4.2.7. Esquemas de duplexación	19
1.4.3. CANALES Y SEÑALES DE LA CAPA FÍSICA	19
1.4.3.1. Canales del enlace descendente (Downlink).....	19
1.4.3.2. Canales del enlace ascendente (Uplink)	21
1.4.3.3. Señales físicas.....	22
1.4.4. APLICACIONES ESPERADAS	25
1.4.5. ESQUEMAS DE MODULACIÓN	26

1.4.6.	MODELOS DE CANAL.....	27
1.4.6.1.	TDL (Tapped Delay Line).....	27
1.4.6.2.	CDL (Clustered Delay Line)	28
1.4.7.	PROCESO DE TRANSPORTE DE DATOS DE PDSCH Y PUSCH.....	30
2.	METODOLOGÍA.....	34
2.1.	FUNCIONES DEL TOOLBOX 5G	34
2.1.1.	nrOFDMInfo.....	34
2.1.2.	nrExtractResources	34
2.1.3.	nrEqualizeMMSE.....	35
2.1.4.	nrTBS	36
2.1.4.1.	Determinación del TBS en PDSCH	36
2.1.4.2.	Determinación de TBS en PUSCH.....	40
2.1.5.	nrResourceGrid	40
2.1.6.	nrOFDMModulate	41
2.1.7.	nrOFDMDemodulate.....	41
2.1.8.	getPathFilters	42
2.1.9.	nrPerfectTimingEstimate	42
2.1.10.	nrPerfectChannelEstimate.....	43
2.1.11.	setTransportBlock.....	44
2.1.12.	nrLayerDemap.....	44
2.1.13.	nrPUSCH.....	45
2.1.14.	nrPUSCHDecode	46
2.1.15.	nrPDSCH.....	46
2.1.16.	nrPDSCHDecode	47
2.1.17.	Funciones adicionales de Matlab.....	48
2.2.	OBJETOS DEL TOOLBOX 5G.....	48
2.2.1.	nrCarrierConfig	48
2.2.2.	nrCDLChannel.....	49
2.2.2.1.	Uso del objeto CDL.....	50
2.2.3.	nrTDLChannel	51
2.2.3.1.	Uso del objeto TDL	51
2.2.4.	nrULSCH	52
2.2.4.1.	Uso del objeto nrULSCH.....	52
2.2.5.	nrULSCHDecoder.....	53
2.2.5.1.	Uso del objeto nrULSCHDecoder.....	53

2.2.6.	nrDLSCH	54
2.2.6.1.	Usó del objeto nrDLSCH	54
2.2.7.	nrDLSCHDecoder	55
2.2.7.1.	Usó del objeto nrDLSCHDecoder	55
2.3.	CÓDIGO PARA PDSCH	56
2.3.1.	FUNCIONES PRINCIPALES	56
2.3.1.1.	MainPDSCH	56
2.3.1.2.	ParametersPDSCH	59
2.3.1.3.	ProcessingLoopPDSCH	60
2.3.2.	FUNCIONES SECUNDARIAS	67
2.3.2.1.	getInitialChannelEstimate	67
2.3.2.2.	getPrecodingMatrix	68
2.3.2.3.	hArrayGeometry	68
2.3.2.4.	hNewHARQProcesses	70
2.3.2.5.	hPDSCHResources	70
2.3.2.6.	hPRGPrecode	71
2.3.2.7.	hSkipWeakTimingOffset	72
2.3.2.8.	hSSBurst	72
2.3.2.9.	hSSBurstInfo	73
2.3.2.10.	hUpdateHARQProcess	74
2.3.2.11.	mapNumerology	74
2.3.2.12.	precodeChannelEstimate	75
2.3.2.13.	SSBurstconfiguration	76
2.3.2.14.	validateNLayers	77
2.3.2.15.	validateNumberAnts	77
2.4.	CÓDIGO PARA PUSCH	78
2.4.1.	FUNCIONES PRINCIPALES	78
2.4.1.1.	MainPUSCH	78
2.4.1.2.	ParametersPUSCH	80
2.4.1.3.	ProcessingLoopPUSCH	81
2.4.2.	FUNCIONES SECUNDARIAS	87
2.4.2.1.	hArrayGeometry	87
2.4.2.2.	hNewHARQProcesses	88
2.4.2.3.	hPUSCHResources	89
2.4.2.4.	hSkipWeakTimingOffset	89
2.4.2.5.	hUpdateHARQProcess	90

2.4.2.6. validateNumberAnts.....	90
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	92
3.1. EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL RENDIMIENTO	93
3.2. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN, NÚMERO DE RESOURCE BLOCKS Y SCS	96
3.3. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN Y NÚMERO DE ANTENAS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN	102
3.4. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN Y MODELOS DE CANAL.....	108
3.4.1. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL MODELO CANAL Y ESQUEMAS DE MODULACIONES PDSCH	109
3.4.2. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL MODELO CANAL Y ESQUEMAS DE MODULACIONES PUSCH	111
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	114
4.1. CONCLUSIONES.....	114
4.2. RECOMENDACIONES.....	116
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
ANEXOS.....	124
ANEXO A	124
ANEXO B	127
ANEXO C.....	127
ANEXO D.....	128
ORDEN DE EMPASTADO.....	129

RESUMEN

Las redes celulares siguen evolucionando con el pasar de los años, las características han ido cambiando y cada vez se prioriza más la velocidad de datos. La necesidad de aplicaciones con altas velocidades de datos es solucionada con 5G. El presente trabajo de titulación se centrará en el estudio del rendimiento de los canales físicos compartidos del enlace ascendente y descendente de 5G.

En el primer capítulo se realiza una breve introducción a 5G para comprender el fundamento teórico de la red, en esta sección se incluye la arquitectura de red, tecnologías relacionadas a la transmisión de datos, canales y señales de la capa física, aplicaciones esperadas y modelos de canal.

En el segundo capítulo se realiza la descripción del código utilizado en las simulaciones. Se comienza describiendo las funciones y objetos del *Toolbox 5G* que son usadas en los *scripts*. Posteriormente se pasa a describir los tres *scripts* de cada canal.

En el tercer capítulo se muestran los resultados de las simulaciones. Se realizan comparaciones y análisis de las curvas que están en función de la velocidad vs dB. Los parámetros que se varían en las simulaciones son el número de *resource blocks*, espaciamiento entre subportadoras, esquemas de modulación y número de antenas.

En el cuarto capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas tras el desarrollo del proyecto de titulación.

Finalmente, en anexos se presenta el código descrito línea por línea, los *scripts* con los códigos y los diagramas de flujo.

PALABRAS CLAVE: *resource blocks*, espaciamiento entre subportadoras, ancho de banda, rendimiento, capa física.

ABSTRACT

Cellular networks continue to evolve over the years, features have been changing and data speed is increasingly prioritized. The need for applications with high data rates is solved with 5G. This degree work will focus on the study of the performance of 5G uplink and downlink shared physical channels.

The first chapter provides a brief introduction to 5G to understand the theoretical foundation of the network, including network architecture, technologies related to data transmission, physical layer channels and signals, expected applications and channel models.

The second chapter describes the code used in the simulations. It begins by describing the 5G Toolbox functions and objects that are used in the scripts. Subsequently, the three scripts for each channel are described.

The third chapter shows the results of the simulations. Comparisons and analysis of the curves as a function of speed vs. dB are made. The parameters that are varied in the simulations are the number of resource blocks, spacing between subcarriers, modulation schemes and number of antennas.

The fourth chapter presents the conclusions and recommendations obtained after the development of the degree project.

Finally, the code described line by line, the scripts with the codes and the flow diagrams are presented in annexes.

KEYWORDS: *resource blocks, subcarrier spacing, bandwidth, throughput, physical layer.*

1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones celulares han crecido exponencialmente en los últimos años. Las redes celulares han pasado de una primera generación totalmente análoga que solo permitía llamadas, a estar actualmente en una quinta generación (5G) digital con más características y beneficios.

La demanda de datos del ser humano cada vez es mayor y 5G es un paso hacia delante en este aspecto. Con muchas similitudes a su predecesor 4G, pero con características que hacen que 5G sea especialmente útil para alcanzar altas tasas de datos. Aplicaciones como IoT, conducción autónoma, realidad virtual aumentada y cirugía médica a distancia [1] no serían posibles sin una alta tasa de datos y a un retardo mínimo. Las redes 5G proporcionan un alto grado de confiabilidad que permite el desarrollo de las aplicaciones mencionadas sin inconvenientes.

5G implementa cambios respecto a 4G, hace que la virtualización sea parte del núcleo de la red, optimizando recursos y brindando una mayor eficiencia.

Por otra parte Matlab es un *software* que permite la simulación que cumple con los estándares establecidos por 3GPP. El *toolbox* 5G brinda un amplio número de funciones y ejemplos de referencia que ayudan a la caracterización del tema el cual se vaya analizar.

El inconveniente con 5G es que actualmente no existen gran cantidad de información debido a que es una tecnología en desarrollo. En este contexto el principal objetivo del siguiente trabajo de titulación es dar a conocer la capacidad de las redes 5G y de crear un punto de partida para el estudio de esta nueva red celular. Además el proyecto presenta un análisis de los resultados derivados de las simulaciones con el fin de conocer las capacidades y características de la red 5G.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el rendimiento de los canales de la capa física PDSCH y PUSCH mediante el *Toolbox* 5G de Matlab.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar y describir los conceptos generales de 5G.

- Establecer los parámetros principales de las funciones de configuración de los canales PDSCH y PUSCH en el *Toolbox* 5G de Matlab.
- Realizar las simulaciones del rendimiento para los canales PDSCH y PUSCH considerando modulaciones, número de antenas, SCS, número de RB y modelos de canal.
- Comparar los resultados y establecer los parámetros de mayor incidencia en la tasa de datos.

1.3. ALCANCE

El presente trabajo se propone analizar y documentar el rendimiento de los canales físicos compartidos tanto para el enlace descendente (PDSCH) como para el enlace ascendente (PUSCH).

El *software* que se utilizará es Matlab y la versión es la R2020-B. Los códigos fuente utilizados en la simulación se crearán a partir de los ejemplos presentes en el *Toolbox* 5G. Se realizarán modificaciones para adaptar el código a las necesidades del proyecto y contará con una documentación que permita la descripción.

Las simulaciones permitirán obtener el valor del rendimiento cuantificado en Mbps, las cuáles irán acompañadas de diagramas de flujo, además que se describirán las funciones y objetos utilizados con el fin de tener una ayuda organizada para futuras simulaciones. Con la descripción de las funciones, los objetos y los diagramas de flujos se identificará que datos se pueden cambiar y cuáles no.

Se crearán dos códigos fuente basados en los ejemplos con los que cuenta el Toolbox 5G en la categoría de la simulación extremo a extremo [2]. Los códigos serán para PDSCH y PUSCH, donde los parámetros variables estarán en la función principal y los parámetros fijos en funciones anexadas a la principal. Los parámetros que se asumirán como fijos, pueden ser editados en futuras investigaciones que se basen en el presente trabajo de titulación.

En el código los parámetros que se pueden variar son los siguientes:

- Espaciamiento entre subportadoras (SCS, *Subcarrier Spacing*): 15kHz, 30kHz y 60 kHz [1].
- Modulaciones: Para PDSCH se cuenta con: QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM. mientras que para PUSCH se tiene: pi/2-BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM [1].

- Número de bloques de recursos (RB, *Resource blocks*). El número de *resource blocks* está ligado al ancho de banda y al espaciamiento entre subportadoras. En la Tabla 1.1 colocada a continuación se detalla las variantes que tendrá el número de *resource blocks*.

Tabla 1.1 Número máximo de *resource blocks* en función del ancho de banda y el espaciamiento entre subportadoras [3].

SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	25 MHz	50 MHz
	N _{RB}	N _{RB}	N _{RB}	N _{RB}
15	25	52	133	270
30	11	24	65	133
60	N/A	11	31	65

- Número de antenas: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128.
- Modelo de canal: CDL y TDL. Cada modelo de canal cuenta con cinco diferentes derivaciones. Las derivaciones de TDL son las siguientes: TDL-A, TDL-B, TDL-C, TDL-D y TDL-E. Las derivaciones de CDL son las siguientes: CDL-A, CDL-B, CDL-C, CDL-D Y CDL-E.

Debido a la gran cantidad de posibilidades que existen para realizar pruebas se tomó la decisión de dividir en tres partes las simulaciones, con ello se logra una optimización de recursos y tiempo. Las simulaciones se realizarán tanto para PDSCH como para PUSCH.

Cada una de las tres partes es descrita a continuación:

- A. La primera parte los valores que cambian son: el valor de espaciamiento entre subportadoras de 15, 30 y 60 KHz, el número de *resource blocks* que depende del espaciamiento entre subportadoras tal como se describe en la Tabla 1.1 y los tipos de modulaciones de acuerdo con el PUSCH o PDSCH. Los parámetros fijos son: el número de antenas del UE que será 1 y el del gNB será 8, tanto para el PDSCH como para el PUSCH. El modelo de canal permanecerá fijo con la derivación TDL-A. Se realizarán 32 combinaciones diferentes tanto para PUSCH como para PDSCH.
- B. En la segunda parte los parámetros que van a variar son: el número de antenas con diferentes combinaciones y las modulaciones que dependen si es PUSCH o PDSCH. Los parámetros fijos son: el espaciamiento entre subportadoras que será de 15KHz, número de *resource blocks* será de 133 y el modelo del canal

permanecerá con el valor de derivación fija de TDL-A. Se realizarán 36 combinaciones diferentes tanto para PUSCH como para PDSCH.

- C. En la tercera y última parte los parámetros variables serán: los modelos de canal que varían entre todas las derivaciones de TDL como de CDL y las modulaciones que dependen si es PUSCH o PDSCH. Los parámetros fijos serán: el espaciamiento entre subportadoras que será de 15KHz, número de *resource blocks* será de 133 y el número de antenas del UE será 1 y del gNB será de 8, tanto para el PUSCH como para el PDSCH. Se realizarán 40 combinaciones diferentes tanto para PUSCH como para PDSCH.

En total se realizarán 216 simulaciones, 108 para PUSCH y 108 para PDSCH.

Los resultados serán gráficas en función de la tasa de datos en Mbps y el valor de SNR.

No existe producto final demostrable ya que el Trabajo de Titulación son simulaciones realizadas en el *software* de Matlab.

1.4. MARCO TEÓRICO

La quinta generación de sistemas inalámbricos (5G) es la próxima fase de la estandarización de las telecomunicaciones móviles, también se la conoce como “Nueva Radio” (NR, *New Radio*). La primera especificación de 5G se completó en junio del 2018 y se la denomina *Release 15*, que estuvo a cargo de 3GPP [4]. 5G continúa con el desarrollo ya visto por 4G con velocidades de datos mucho más altas y una mayor eficiencia para anchos de banda móviles. Sin embargo, el alcance de 5G va mucho más allá, queriendo habilitar la conectividad inalámbrica en todas partes, en cualquier momento, para cualquier persona y cualquier cosa (IoT) [4] [5].

Se definen dos etapas para la implementación de 5G:

- La Arquitectura “No autónoma” (NSA, *Non-Stand Alone*): dónde su nueva interfaz de radio y la red de acceso de radio 5G se utilizan juntamente con la infraestructura de la red existente de 4G disfrutando así de servicios de 5G, descrito de otra manera, la red de acceso de 5G se conectan al núcleo y la parte radio de 4G [1].
- La arquitectura “Autónoma” (SA, *Stand-Alone*): dónde la red de acceso 5G se conecta al núcleo de 5G (5GC, *5G Core*) [1].

1.4.1. ARQUITECTURA DE LA RED

La principal característica es la introducción de una nueva interfaz radio. La *New Radio* tiene flexibilidad suficiente para soportar los diferentes tipos de servicio de 5G [1].

1.4.1.1. Núcleo de la red

El “Núcleo de 5G” (5GC) se basa en una arquitectura denominada: “Arquitectura Basada en Servicios” (SBA, *Service-Based Architecture*), dónde a cada elemento se lo define como “Funciones de Red” (NF, *Network Functions*) [1]. En la Figura 1.1 se presenta un diagrama de la arquitectura de 5G.

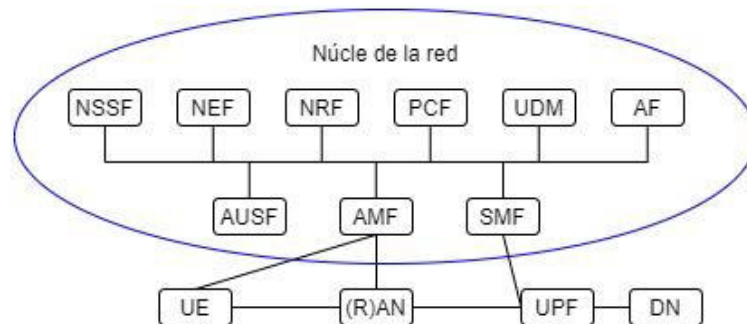


Figura 1.1 La Arquitectura del Sistema 5G [1].

- *Network Functions*, son las funciones que conforman el núcleo de la red:
 - Función de Gestión de Acceso y Movilidad (AMF, *Access and Mobility management Function*); admite UEs con diferentes necesidades de gestión de movilidad. Entre las características se tiene: la seguridad de señalización NAS, control de gestión de la movilidad (suscripción y políticas), protección de integridad, autenticación de acceso, modo inactivo, registro y gestión de conexión, accesibilidad del UE (incluyendo control y ejecución de la retransmisión de “localización” (*paging*)), entre otros [6] [1].
 - Función de Gestión de Funciones (SMF, *Session Management Function*); juntamente con AMF soportan esquemas de administración de movilidad personalizados. Sus características son las siguientes: control de parte de la aplicación de políticas y QoS, asignación y gestión de direcciones IP del UE, Gestión de sesiones, selección y control de la (UPF, *User Plane Function*) etc [6] [1].
 - Función de Repositorio de Red (NRF, *Network Repository Function*); administra los servicios NF, que incluye el registro, la cancelación del registro, la autorización y el descubrimiento [1].

- Función de Exposición de Red (NEF, *Network Exposure Function*); se encarga de la exposición externa de las capacidades de las funciones de la red teniendo como objetivo mejorar el rendimiento de la red con monitoreo y el aprovisionamiento [1].
 - Función de Control de Políticas (PCF, *Policy Control Function*); encargada de funciones tales como: reglas de las políticas para el funcionamiento del plano de control, gestión de la red, gestión de movilidad, etc. [7]
 - Gestión Unificada de Datos (UDM, *Unified Data Management*); es una base de datos maestra encargada de almacenar y gestionar los datos de suscripción del usuario, autorizar el acceso basado en los datos de suscripción [1].
 - Función de Aplicación (AF, *Application Function*); el manejo de la aplicación(es), interactúa con el núcleo de la red para proveerle servicios [1].
 - Función de Selección de Segmento de Red (NSSF, *Network Slice Selection Function*); contiene las políticas de los operadores para la selección de sectores [8].
 - Función de Servidor de Autenticación (AUSF, *Authentication Server Function*); que incluyen el almacenamiento de los datos de autenticación y/o autorización [8].
- Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*); es el dispositivo móvil del usuario.
 - Red de Acceso Radio ((R)AN), (*Radio*) *Access Network*); es la red de acceso, conformado por una única entidad, el gNB. Básicamente es un conjunto de gNBs conectados al núcleo [1]. La red de acceso se puede visualizar en la Figura 1.3.
 - Función de Plano de Usuario (UPF, *User Plane Function*); es manejada por la AMF para el tratamiento de los datos de usuario, enrutamiento y reenvío de paquetes, informes de uso del tráfico, clasificador de enlace ascendente para admitir flujos de tráfico de enrutamiento a una red de datos, QoS [8] [1];
 - Red de Datos (DN, (*external*) *Data Network*);

Especificaciones del núcleo de 5G

- Fragmentación de la Red (*Network Slicing*); es vista como una red lógica de funciones y/o elementos dedicados al aprovisionamiento de cierto tipo de servicios, aplicaciones, tipo de tráfico u otros acuerdos comerciales [8]. En otras palabras, cada segmento está

enfocado en cumplir diferentes requerimientos o funcionalidades. Los segmentos pueden ser usados simultáneamente [1].

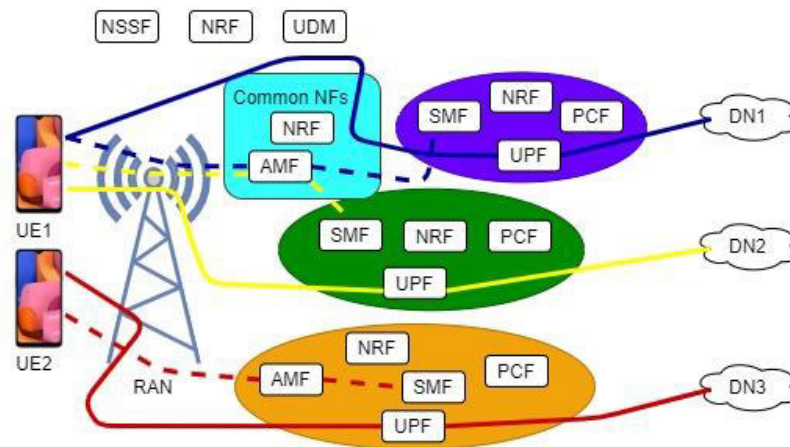


Figura 1.2 Ejemplo de *network slicing* [8]

En la Figura 1.2 se presenta un ejemplo del *network slicing* en el cual existen tres segmentos y dos UE. El primer y segundo segmento tienen un AMF común que sirve a un UE, mientras que para el segundo UE se atiende en otro AMF en el tercer segmento.

- Control de Acceso Unificado (*Unified access control*); esta característica le permite al operador realizar un manejo diferenciado de cada uno de los segmentos de la red [8], permitiendo o negando a los usuarios el acceso. Los criterios utilizados dependen de las políticas del operador, perfil de suscriptores, despliegue de escenarios y servicios disponibles [1].
- Alojamiento local de servicios: maneja una plataforma que permite conocer ciertos requerimientos específicos de los usuarios para mejorar su experiencia durante una comunicación [1].
- Soporte al acceso 3GPP y no 3GPP: en 3GPP se tiene soporte para la red 5G y 4G, para no 3GPP se permite la admisión de tecnologías de acceso diferentes (por ejemplo, Bluetooth) [1].

1.4.1.2. Red de Acceso de 5G

La red de acceso se conoce como NG-RAN. En la Red de Acceso se pueden tener dos tipos de nodos conectados al núcleo de la red:

- El gNB, que sirve a dispositivos NR usando los protocolos NR de plano de usuario y plano de control [9];

- Un ng-eNB, que sirve a dispositivos LTE utilizando los protocolos de plano de usuario y plano de control de LTE [9].

El gNB es el responsable de todas las funciones que se relacionan con la parte radio, establecimiento de conexión, gestión del flujo QoS, administración de los recursos radio, control de admisión, enrutamiento de datos del plano de usuario a la UPF, información de control a la AMF [9].

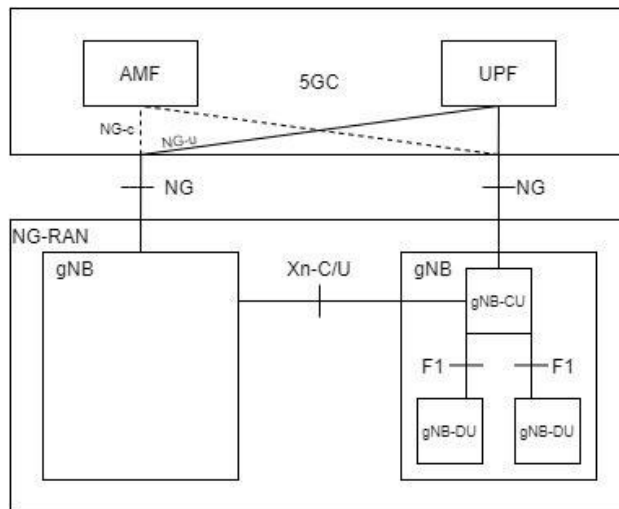


Figura 1.3 Arquitectura general NG-RAN y 5GC [1].

En la Figura 1.3 se describe la arquitectura NG-RAN y 5GC; los gNB se pueden conectar a otra gNB a través de la interfaz Xn. El gNB se divide en una Unidad Central gNB (gNB-CU, *gNB-Central Unit*) y uno o más Unidades Distribuidas gNB (gNB-DU, *gNB-Distributed Unit(s)*). Los gNBs permiten el soporte del *network slicing*, la administración de sesión, el establecimiento de conexión, la configuración de conexión, etc [1]. Unidad Central (CU, *Central Unit*), es un nodo lógico que incluye la transferencia de datos, control de movilidad, administración de sesiones, etc. Unidad Distribuida (DU, *Distributed Unit*), es un nodo lógico que depende de la división funcional, además de que es controlado por el CU [10].

1.4.1.3. Protocolos

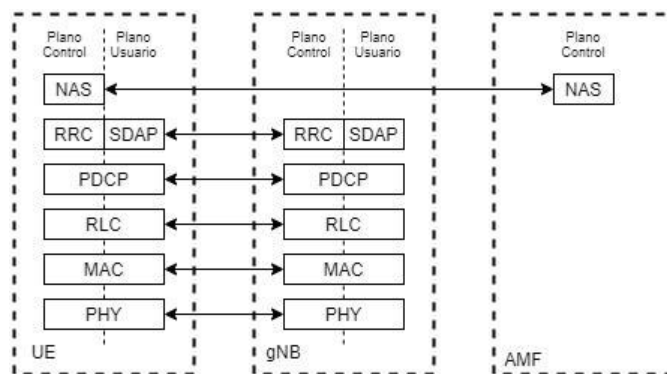


Figura 1.4 Protocolos del Plano de control y usuario [1].

En la Figura 1.4 se presenta los protocolos del UE, gNB y AMF. El UE y gNB tienen plano de control y plano de usuario, mientras que el AMF solo cuenta con plano de control. El protocolo NAS es concluido en la AMF, mientras los protocolos MAC, RLC, PDCP, RRC y SDAP son concluidos en lado de gNB.

- **Plano de Control**

- **Estrato Sin Acceso (NAS, *No-Access Stratum*)**, se refiere a todos los aspectos y protocolos no vinculados a la red de acceso y transportados "transparentemente" por la red de acceso, es decir, sin interpretación. Algunos de los servicios que brinda son la autenticación, administración de movilidad y control de seguridad [1].
- **Control de Recursos Radio (RRC, *Radio Resource control*)**, los principales servicios que da soporte son los siguientes: *paging* iniciado por el 5GC o el NG-RAN, *handover*, funciones de movilidad, funciones de administración de QoS, etc [1].
- **Protocolo de Cobertura de Paquetes de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*)**, realiza la compresión de las cabeceras IP, cifrado y protección de integridad, numeración secuencial, reordenamiento y detección de duplicados [1] [9].
- **Control del Enlace Radio (RLC, *Radio Link Control*)**, responsable del manejo de retransmisiones, segmentación, detección de duplicados, etc [9].
- **Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*)**, maneja el mapeo entre canales lógicos y canales de transporte, planificación (*scheduling*), procesos HARQ, manejo de prioridades de múltiples usuarios [8].

- **Capa física (PHY)**, encargada de la modulación y demodulación de las señales sobre la interfaz radio, codificación/decodificación, mapeo de múltiples antenas además de ofrecer servicios a la capa MAC [1] [9].

- **Plano de usuario**

Similar al plano de control, con la diferencia que en la capa del protocolo RRC se utiliza el protocolo SDAP.

- **Protocolo de Adaptación de Datos de Servicio (SDAP, *Service Data Adaptation Protocol*)**, proporciona la gestión de flujo de QoS. Se encarga de asignar los paquetes IP a los portadores de radio según sus requisitos de QoS [8].

- **Interfaces**

En la Figura 1.3 se presentan las interfaces de la arquitectura de 5G.

- Xn/X2: la interfaz Xn es muy similar en muchos aspectos a la interfaz X2 de 4G [11], principalmente se usa para soportar la movilidad sin pérdidas entre celdas vecinas por medio del reenvío de paquetes, conexión dual, además de interconectar gNBs [9];
- NG/S1, la interfaz NG está estrechamente relacionada a la interfaz S1 de 4G [11] y como función principal es conectar el núcleo de la red con los gNBs.
- F1, esta interfaz se usa cuando el gNB se divide en nodos lógicos (gNB-CU y gNB-DU). Permite la conexión entre el gNB-CU y el o los gNB-DU [1].

Las siglas U y C al final de cada interfaz se refieren al plano de usuario y al plano de control respectivamente. La interfaz entre el gNB y el equipo de usuario se denomina interfaz Uu.

1.4.2. ASPECTOS DE LA CAPA FÍSICA

1.4.2.1. Numerología y estructura de trama

La numerología hace referencia al SCS y los valores que pueden tomar se presentan en la Tabla 1.2 [12]:

Tabla 1.2 Valores de los SCS

μ	Espaciamiento (kHz)	Prefijo Cíclico (CP)
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, extendido
3	120	Normal
4	240	Normal

Por la gran cantidad de escenarios que presenta 5G, admite numerosos anchos de banda de canal y dos rangos de frecuencia que se muestran en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Anchos de banda de canal y rango de Frecuencias

Rango de Frecuencia	Rango de Frecuencia	Ancho de banda de canal soportado [MHz]
FR1	410 MHz – 7125 MHz	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 100
FR2	24250 MHz – 52600 MHz	50, 100, 200, 400

Una trama de radio con una duración de 10 ms consta de diez subtramas y cada subtrama tiene una duración de 1 ms. Cada trama de radio se divide en dos medias tramas de igual tamaño de cinco subtramas, que son media trama “0”, que consta de las subtramas 0 hasta 4 y media trama “1”, que consta de las subtramas 5 hasta 9, cada subtrama tiene una duración de 1ms. En una “ranura” (*slot*) hay 14 símbolos OFDM independientemente del espaciamiento que exista entre subportadoras, esto se cumple siempre y cuando el “Prefijo Cíclico” (CP, *Cyclic Prefix*) sea el normal y no el extendido, para el extendido se tiene 12 símbolos [8]. A diferencia de 4G, 5G soporta OFDM para el enlace ascendente.

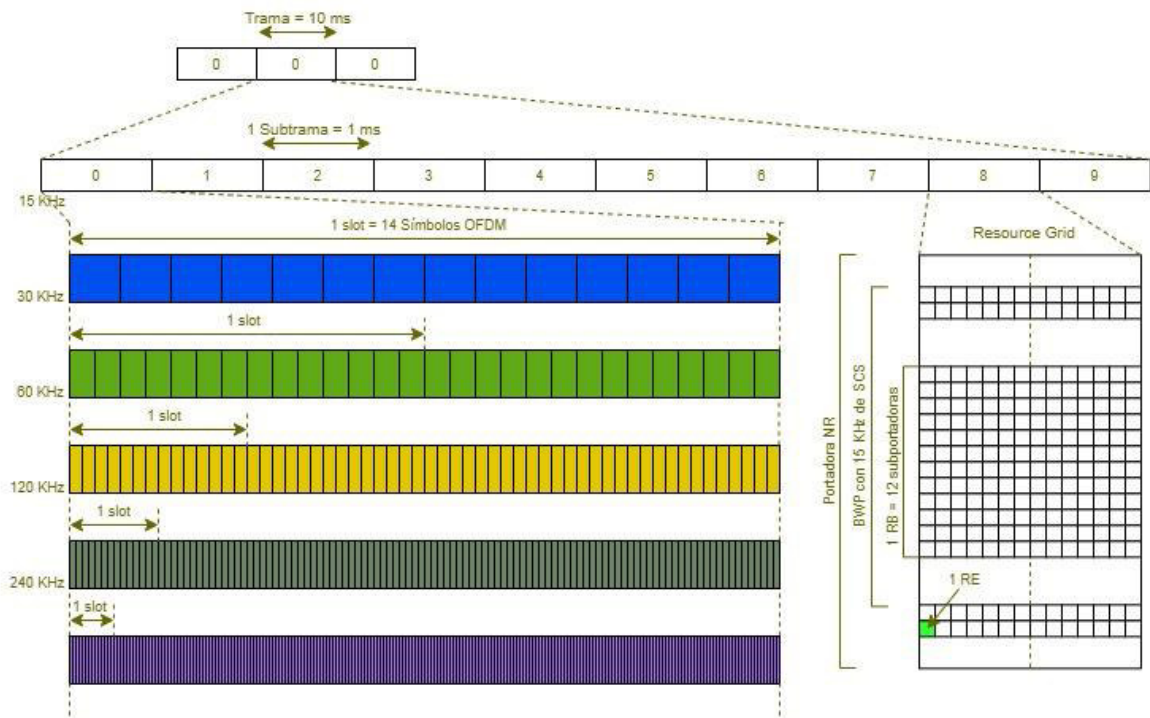


Figura 1.5 Estructura de la trama en la NR

Una serie consecutiva de 12 subportadoras forman un *resource block* en el dominio de la frecuencia. Un ancho de banda de canal consiste en una serie de RBs. El “Elemento Recurso” (RE, *Resource Element*) consiste en un símbolo OFDM (dominio del tiempo) y una subportadora (dominio de frecuencia). La “Red de Recurso” (RG, *Resource Grid*) es un conjunto de recursos para una dirección de transmisión sea de UL o de DL.

La Tabla 1.4 enlista todas las posibilidades de numerología que existen en 5G.

Tabla 1.4 Múltiples numerologías en NR

Prefijo Cíclico	Espaciamiento de subportadoras (SCS) [kHz]	Número de subtramas por trama	Número de Slots por subtrama	Número de símbolos OFDM por slot	Rango de frecuencia aplicable
Normal	15	10	1	14	FR1
Normal	30	10	2	14	FR1
Normal	60	10	4	14	FR1 y FR2
Extendido	60	10	4	12	FR1 y FR2
Normal	120	10	8	14	FR2
Normal	240	10	16	14	FR2

El prefijo cíclico es un intervalo de guarda necesario para reducir la potencia de interferencia entre símbolos (*Intersymbol Interference*, ISI). Consiste en copiar las últimas muestras de la señal y colocarlas al inicio, tal como se muestra en Figura 1.6.

La duración del símbolo (T_s), es T_g+T , donde T_g es la duración del prefijo cíclico y T es la duración útil del símbolo sin prefijo cíclico [13], las partes del símbolo OFDM se presentan en la Figura 1.6 .

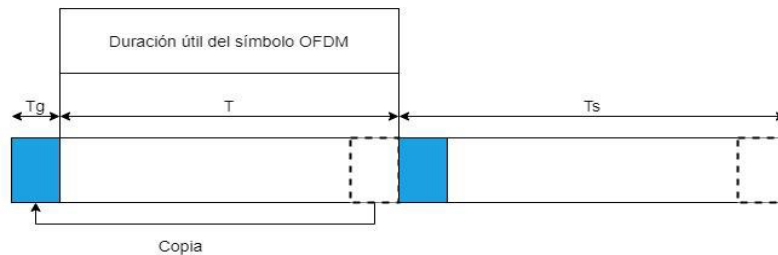


Figura 1.6 Conformación del Símbolo OFDM

Como se mencionó anteriormente con prefijo cíclico normal se tiene 14 símbolos OFDM. Para el cálculo del prefijo cíclico normal se divide a la subtrama en dos partes iguales de 7 símbolos. Para el primer y octavo símbolo de un *slot* se utiliza la Ecuación 1.1 para obtener la duración del prefijo cíclico [14] [15].

$$CP_0 = \left(\frac{9216}{2^\mu} + 1024 \right) \cdot T_c \quad (1.1)$$

Donde,

CP_0 es la duración del prefijo cíclico

T_c es la unidad básica de tiempo de NR

μ es una constante dependiente del SCS, establecida en la Tabla 1.2.

$T_c = 1/(\Delta f_{max} \cdot N_f)$, donde $\Delta f_{max} = 480 \cdot 10^3 \text{ Hz}$ y $N_f = 4096$, es decir T_c es una constante.

Para los restantes símbolos se utiliza la Ecuación 1.2 para el cálculo del prefijo cíclico.

$$CP_i = \frac{9216}{2^\mu} \cdot T_c \quad (1.2)$$

Para el caso del cálculo del prefijo cíclico extendido se utiliza la Ecuación 1.3.

$$Cp = \frac{32768}{2^\mu} \cdot T_c \quad (1.3)$$

En el prefijo cíclico extendido utiliza solo una ecuación para su respectivo cálculo. Hay que recordar que el prefijo cíclico extendido solo se usa cuando SCS = 60 kHz, es decir $\mu = 2$ y consta de 12 símbolos. El prefijo cíclico extendido se utiliza para ambientes difíciles que tienen rutas de transmisión muy variadas. También se aplica en celdas de gran tamaño, por ejemplo, de 100 km de radio [14] [15].

La duración del símbolo OFDM sin el prefijo cíclico (T) es $1/SCS$, es decir la duración útil del símbolo OFDM [13].

La cantidad de *resource blocks* en un ancho de banda de canal depende del SCS. En la Tabla 1.5 y Tabla 1.6 se detalla cual es el número máximo de *resource blocks* en un ancho de banda específico de acuerdo con el SCS, donde N_{RB} es el número de *resource blocks* y N/A significa no disponible.

Tabla 1.5 Número de *resource blocks* máximo para configuraciones de ancho de banda en FR1 [3]

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
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
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 1.6 Número de *resource blocks* máximo para configuraciones de ancho de banda en FR2 [15]

SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
60	66	132	264	N/A
120	32	66	132	264
240	N/A	3800	7720	15560

En cada uno de los anchos de banda de canal se debe tener un mínimo de banda de guarda, el cual se lo especifica en la Tabla 1.7 y Tabla 1.8.

Tabla 1.7 Banda de guarda mínima (kHz) para cada ancho de banda del canal del UE en FR1 [3]

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
15	242.5	312.5	382.5	452.5	522.5	592.5	552.5	692.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	505	665	645	805	785	945	905	1045	825	965	925	885	845
60	N/A	1010	990	1330	1310	1290	1610	1570	1530	1490	1450	1410	1370

Tabla 1.8 Banda de guarda mínima (kHz) para cada ancho de banda del canal del UE en FR2 [15]

SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
60	1210	2450	4930	N/A
120	1900	2420	4900	9860
240	N/A	3800	7720	15560

1.4.2.2. Acceso inicial y movilidad

Conjuntamente a las generaciones pasadas, NR comparte muchas funcionalidades, a continuación, se enlistan:

- Identificar celdas cercanas o puntos de transmisión (descubrimiento de celdas);
- Alinear sus parámetros de transmisión (tiempo y frecuencia) a la referencia (sincronización);
- Leer la configuración del sistema;
- Información sobre el *beamforming*;
- Transmisión del MIB, descrito en la sección 1.4.3.1;
- Realizar el proceso de registro, es decir, realizar el procedimiento de acceso aleatorio y el intercambio de mensajes para la configuración del dispositivo, por ejemplo, en relación con la autenticación y el cifrado [9].

Similar a 4G, las tramas del enlace descendente regularmente llevan las Señales de Sincronización Primarias (PSS, *Primary Synchronization Signals*) y las Señales de Sincronización Secundarias (SSS, *Secondary Synchronization Signal*). Las PSS y SSS se transmiten en 127 subportadoras c/u, aproximadamente 10.5 RBs [9] [1]. El PSS y SSS están diseñados para llevar la ID de la Celda Física (PCID, *Physical cell ID*) que es un número entre 1 y 1008. Cuatro símbolos OFDM junto con 20 RBs (240 Subportadoras) en cada símbolo, forman el denominado “SS Block o SS/PBCH Block (*Synchronization Signals/ Physical Broadcast Channel*)” que se transmite con una periodicidad de 5, 10, 20, 40, 80 y 160ms. Un conjunto de SS Blocks forma un SS Burst, es decir un envío continuo de ráfagas del SS Blocks. [9] [16].

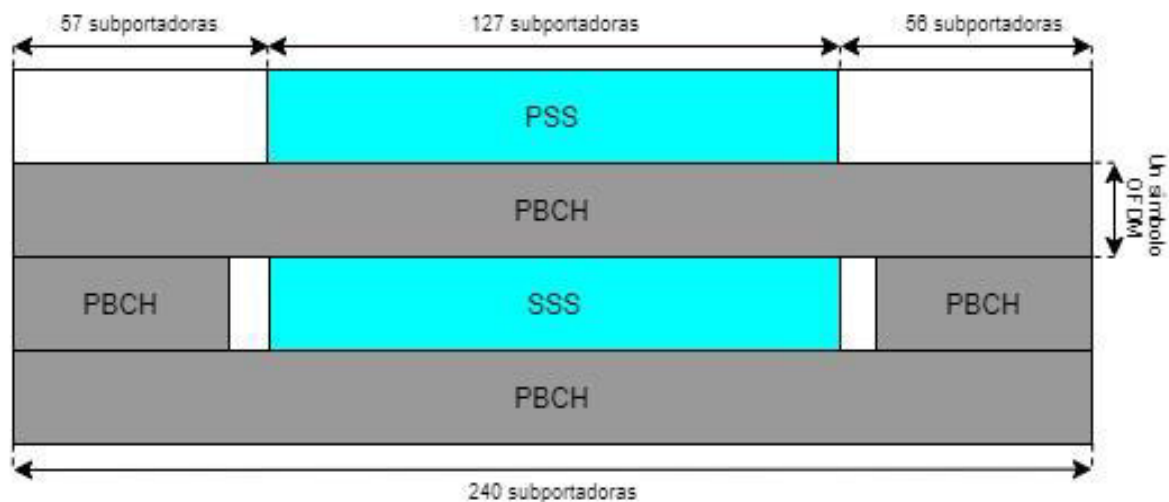


Figura 1.7 Estructura del SS *Block* [9]

- El PSS se transmite en el primer símbolo OFDM y ocupa 127 subportadoras en el dominio de la frecuencia. Con 57 de y 56 subportadoras vacías en cada lado.
- El SSS se transmite en el tercer símbolo OFDM y ocupa las mismas subportadoras que PSS con nueve y ocho subportadoras vacías en cada lado del SSS.
- El PBCH se transmite del segundo al cuarto símbolo OFDM. En el segundo tanto como cuarto símbolo ocupa todas las subportadoras y en el tercer símbolo ocupa 48 subportadoras de cada uno de los lados del SSS. En total se transmiten 576 subportadoras [9]. Aquí se pueden enviar símbolos DM-RS.

En la Figura 1.8 se muestra un ejemplo de SS *Burst* [17]. El ejemplo consta de ocho SS *Blocks*. Como se ve en la gráfica los SS *Blocks* son transmitidos en la primera media trama, es decir se transmite en los primeros cinco *slots* de la trama. Además, en este caso en particular el SCS es 15 kHz ya que se tiene cinco *slots* por media trama. Para un SCS de 30 kHz por cada media trama existen 10 *slots* ya que la trama completa consta de 20 *slots*.

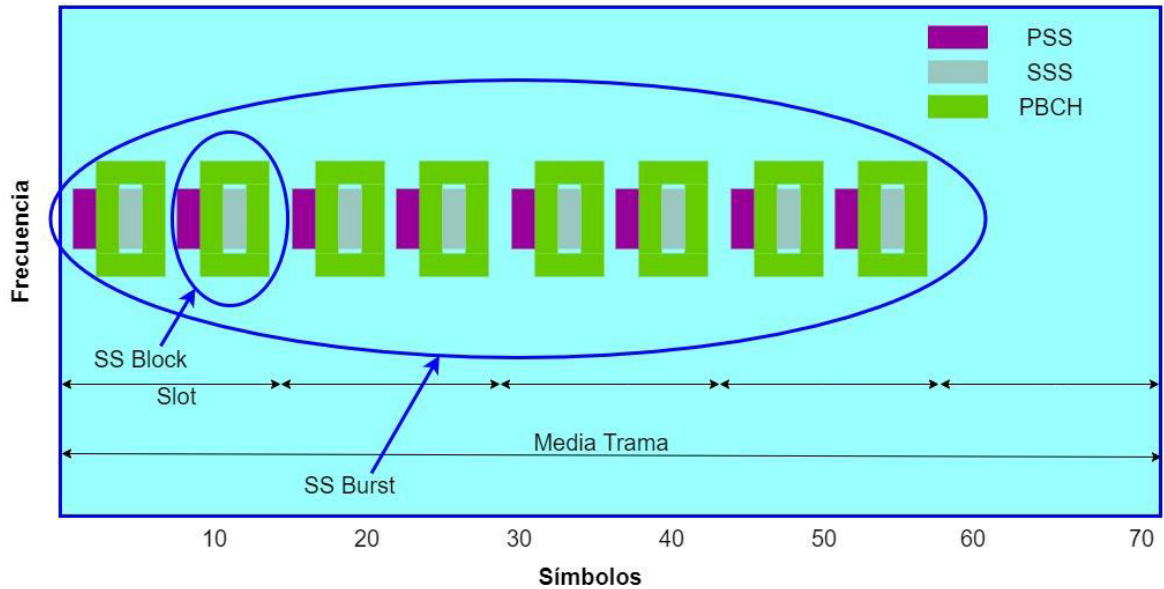


Figura 1.8 Ejemplo de transmisión de un SS *Burst*

1.4.2.3. MIMO

Múltiples entradas múltiples salidas, es una tecnología que mejora el rendimiento con una gran eficiencia espectral. MIMO soporta como máximo ocho antenas en DL y cuatro antenas para UL. Es muy útil ya que compensa las adversidades del ambiente de propagación como, las pérdidas por trayectoria y la atenuación. MIMO masivo es una extensión en la cual se tiene un número mucho mayor a ocho antenas alcanzando hasta 1024 antenas y es ampliamente usada para redes 5G [18].

Juntamente con MIMO trabaja la “Formación de haces” (*Beamforming*). La *Beamforming*, es una técnica importante para lograr un mayor rendimiento y una cobertura suficiente, especialmente en el rango de alta frecuencia. La idea básica es procesar de manera óptima las señales recibidas a través de diferentes antenas, o las señales que se transmitirán a través de diferentes rutas, ajustando las amplitudes y las fases, para formar un haz fuerte hacia la dirección de interés, y al mismo tiempo, para evitar recibir o crear interferencia. El haz se dirige directamente al móvil [5].

5G utiliza *Beamforming* híbrido, es una técnica que divide la formación de lo haces en el dominio digital y de RF, esta técnica ofrece flexibilidad de costos sin verse afectado el rendimiento [9].

1.4.2.4. Scheduling / HARQ

El *scheduling* es la correcta distribución de los recursos para que se compartan dinámicamente entre los usuarios. Controla la asignación de recursos en el “enlace ascendente” (*uplink*) y en el “enlace descendente” (*downlink*), en términos de los llamados *resource blocks* en el dominio de frecuencia y, los símbolos y ranuras OFDM en el dominio del tiempo [9]. En el *scheduling* dinámico, él que toma decisiones es el gNB, típicamente envía información una vez por *slot* a un grupo determinado de dispositivos. Los *scheduling* de *uplink* y *downlink* están separados y cada uno puede tomar decisiones independientes del otro. Se transmite en PUSCH y PDSCH.

Hybrid ARQ (HARQ) permite una robustez en contra de los errores de transmisión. A diferencia de ARQ aquí las retransmisiones son rápidas y no se aplica para todo tipo de tráfico. HARQ utiliza el protocolo de parada y espera para la transmisión de datos. Tras la transmisión de un bloque de transporte, el transmisor se detiene para esperar hasta recibir la confirmación del receptor. El receptor informa al transmisor de un indicador (es decir, ACK o NACK) basado en el resultado de la detección del bloque de transporte. Si se recibe el ACK, el transmisor transmite un nuevo bloque de transporte; en caso contrario, se retransmite el bloque de transporte detectado erróneamente. Esto se realiza si es que no se pudieron corregir los errores utilizando FEC [8] [6].

Se admiten múltiples procesos HARQ paralelos para mejorar el rendimiento global del sistema. El número máximo de procesos HARQ es de 16. 5G utiliza un HARQ asincrónico, esto quiere decir que opera los múltiples procesos HARQ en cualquier orden o que la retransmisión puede ocurrir en cualquier momento [6].

De igual manera que *scheduling* es soportado en PUSCH y PDSCH.

1.4.2.5. Codificación de Canal

NR emplea LDPC para la transmisión de servicios de banda ancha móvil y códigos polares para el control de señales. LDPC es muy atractivo debido a sus velocidades de datos. Para la transmisión de señales físicas donde los bloques de información son pequeños comparados a la transmisión de datos se emplea códigos polares. Mientras LDPC permite la transmisión a diferentes velocidades utilizando HARQ. Para la simulación se utiliza el algoritmo “*Layered Belief Propagation*” porque permite una decodificación eficaz de los códigos LDPC.

LDPC se utilizan en PDSCH y PUSCH. Los códigos polares se utilizan en PBCH y PDCCH [1].

1.4.2.6. Parte del Ancho de Banda (BWP, *Bandwidth part*)

Son un conjunto de Bloques de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resource Blocks*) contiguos. Los *bandwidth part* indican el ancho de banda sobre el cual se supone actualmente que un dispositivo recibe transmisiones de una cierta numerología. Un equipo puede recibir múltiples *bandwidth parts* simultáneamente de una sola portadora. Pueden tener hasta cuatro *bandwidth part* por operador para DL y UL, respectivamente. Cada *bandwidth part* tiene su propio ancho de banda, numerología, tipo de prefijo cíclico [12]. El *bandwidth part* se configura por el UE, ya que depende de la capacidad del ancho de banda máxima que soporte el equipo [1] [9].

1.4.2.7. Esquemas de duplexación

La duplexación se usa generalmente para asignar el espectro disponible. De manera frecuente, para bandas de frecuencias bajas se usa “Duplexación por División de Frecuencia” (FDD, *Frequency Division Duplex*) y opera en el espectro emparejado. Las transmisiones de UL y DL son realizadas por diferentes frecuencias de portadoras. Las transmisiones pueden ocurrir al mismo tiempo, dependiendo de la capacidad del UE [8] [9].

En bandas de frecuencias más altas, se requiere “Duplexación por División de Tiempo” (TDD, *Time Division Duplex*) y opera en el espectro no emparejado, donde las transmisiones de UL y DL ocurren en diferentes instantes de tiempo de la misma frecuencia portadora [8] [9].

1.4.3. CANALES Y SEÑALES DE LA CAPA FÍSICA

La capa física es la encargada de la codificación, del proceso HARQ, procesamiento MIMO, modulación, mapeo de las señales. Además, provee de servicios a la capa MAC en forma de canales de transporte.

1.4.3.1. Canales del enlace descendente (*Downlink*)

- **Canal Compartido del Enlace Descendente Físico (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*)**

Es el principal canal para la transmisión de datos de usuario de manera de unidifusión (*unicast*), también usado para la transmisión de información de *paging*, mensajes de respuesta de acceso aleatorio, envío de partes de la información del sistema. Soporta los siguientes esquemas de modulación, QPSK, 16QAM, 64QAM Y 256QAM [9]. Su esquema de codificación para la transmisión es LDPC [9].

Desde la perspectiva del UE, se soporta la transmisión de hasta ocho capas. El número máximo de “palabras clave” (*codewords*) para la transmisión de PDSCH es dos. Hay solo una *codeword* si el número de capas de transmisión es menor o igual a 4; de lo contrario, el número de *codewords* es 2. El número de capas es sinónimo de flujos y el número de capas casi siempre es menor o igual que el número de antenas para la transmisión [17]. Un *codeword* se genera a la salida de la capa de transporte y son los datos que ingresan a la capa física. Se puede tener dos *codewords* en PDSCH y uno en PUSCH.

Existen dos tipos de mapeo para PDSCH, el *Type A* y el *Type B*; Ambos tipos son para el dominio del tiempo. El mapeo de PDSCH *Type A* se usa para iniciar el PDSCH en los primeros tres símbolos de un *slot* con una duración de tres símbolos o más hasta el final de un *slot*. El mapeo PDSCH *Type B* se utiliza para iniciar el PDSCH en cualquier lugar del *slot*, con una duración de 2, 4 o 7 símbolos OFDM.

Para el dominio de la frecuencia la asignación de recursos soporta dos tipos, el *type 0* asigna recursos con un mapa de *bits* de *Resource Block Groups* (RBG), donde cada RBG es un conjunto de *resource blocks* virtuales consecutivos. Para el *type 1* se asigna recursos como un conjunto de *resource blocks* virtuales contiguos no intercalados o intercalados.

- **Canal de Control del Enlace Descendente Físico (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*)**

Como su nombre lo indica lleva información de control. Esta información se la conoce como “Información de control del Enlace Descendente” (DCI, *Downlink Control information*) que tiene adjunto un CRC de 24 *bits* para detectar errores en la transmisión y se la lleva principalmente para la programación del PDSCH (recepción) y PUSCH (transmisión). Por ejemplo, lleva información del control de potencia y configuración del formato de los *slots* [8]. Utiliza QPSK para su modulación y codificación polar como esquema de modulación, con ciertas restricciones para pequeños paquetes de datos [19].

La unidad de recursos asignada para PDCCH se conoce como “Conjunto de recursos de Control” (CORESET, *Control-resource Set*). Un CORESET consta de *resource blocks* en el dominio de la frecuencia y símbolos en el dominio del tiempo. CORESET es un conjunto de recursos físicos encargados de transportar DCI/PDCCH [17].

- **Canal de Difusión Físico (PBCH, *Physical Broadcast Channel*)**

Lleva parte de la información esencial del sistema requerida para que el equipo pueda acceder a la red [9]. Una función adicional de este canal juntamente con el de control es admitir la sincronización en tiempo y en frecuencia. PBCH lleva el “Bloque de Información Principal” (MIB, *Master Information Block*) el cual incluye información como: “Número de Trama del Sistema” (SFN, *System Frame Number*) que es un número de 10 *bits*, indica la posición de tiempo del primer DM-RS para el enlace descendente o ascendente [9].

Como ya se vio en la sección 1.4.2.2, PBCH es parte del acceso inicial.

1.4.3.2. Canales del enlace ascendente (*Uplink*)

- **Canal de Acceso Aleatorio Físico (PRACH, *Physical Random Access Channel*)**

Es el canal que permite transmitir un preámbulo de acceso aleatorio del UE hacia el gNB para indicarle un intento de acceso aleatorio entre otras opciones. El preámbulo de acceso aleatorio inicial consiste en secuencias que pueden tener dos longitudes diferentes:

- En frecuencias menores a 6 GHz, una secuencia larga de 839 que se aplica a los SCS de 1.25 kHz y 5 kHz, con 1.25 MHz y 5 MHz de ancho de banda respectivamente [12].
- Puede usarse tanto como para frecuencias mayores o menores de 6 GHz, se aplican longitudes de secuencia cortas de 139 con SCS de 15 kHz y 30 kHz (bandas FR1) con 2.5 MHz y 5 MHz de ancho de banda respectivamente, y 60 kHz y 120 kHz (bandas FR2) con 10MHz y 20MHz de ancho de banda respectivamente. [19].

- **Canal Compartido de Enlace Ascendente Físico (PUSCH, *Physical Uplink Shared Channel*)**

Es la contraparte PDSCH, es decir que es el encargado de transportar los datos de usuario y opcionalmente se usa como “Información de Control del Enlace Ascendente” (UCI, *Uplink Control Information*), ya que también puede ser llevado por PUCCH. PUSCH contiene señales DM-RS para soportar estimación del estado del canal y demodulación [8].

PUSCH admite dos tipos de transmisiones, DFT-S-OFDM (solo se utiliza en transmisiones de capa única y en escenarios de potencia limitada) y CP-OFDM (destinado para MIMO y alto rendimiento). DFT-S-OFDM utiliza las siguientes modulaciones, QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM; mientras CP-OFDM soporta $\pi/2$ -

BPSK, 16QAM, 64QAM and 256QAM [12]. Soporta dos esquemas de transmisión: la transmisión basada en “Libro de códigos” (*codebook*) y la transmisión no basada en *codebook* [8].

- **Canal de Control del Enlace Ascendente Físico (PUCCH, *Physical Uplink Control Channel*)**

El PUCCH se usa para el UCI, además, es utilizado por el dispositivo para enviar el HARQ-ACK, indicando al gNB si los “Bloques de Transporte” (TB, *Transport Blocks*) de enlace descendente se recibieron con éxito o no, para enviar informes de estado del canal que ayudan a la programación dependiente del canal de enlace descendente y para solicitar recursos para la transmisión de datos sobre el enlace ascendente [9].

PUCCH utiliza las modulaciones $\pi/2$ -BPSK, BPSK, QPSK dependiendo del formato escogido. PUCCH tiene una transmisión de corta duración de 1 o 2 símbolos OFDM y una transmisión de larga duración de 4 a 14 símbolos OFDM dentro de un *slot* [1].

1.4.3.3. Señales físicas

Los recursos de frecuencia-tiempo utilizados por la capa física que contienen información de las capas superiores se denominan señales físicas. Las señales físicas son referencias utilizadas para diferentes propósitos, por ejemplo, demodulación, estimación de canal, sincronización en tiempo, frecuencia y fase entre transmisores y receptores, información de estado del canal y mediciones de calidad, etc. Hay diferentes señales físicas en el enlace ascendente y el enlace descendente. Una parte de las señales físicas son las señales de referencia que llevan funciones fundamentales para asegurar un rendimiento de adecuado de la capa física y altamente eficiente [8]. En la Tabla 1.9 se detallan las señales de la capa, con sus siglas respectivas.

Tabla 1.9 Señales de la capa física

DL/UL	Señales físicas	Nombre de la señal física
DL/UL	DM-RS	Demodulation reference signals
DL/UL	PT-RS	Phase-tracking reference signals
DL	CSI-RS	Channel-state information reference signal
DL	PSS	Primary synchronization signal
DL	SSS	Secondary synchronization signal
UL	SRS	Sounding reference signal

- **Señales de Referencia de Demodulación (DM-RS, *Demodulation Reference Signals*)**

Se utiliza tanto en el enlace descendente como para el enlace ascendente. En el enlace ascendente se utiliza en los canales PUCCH y PUSCH y para el enlace descendente para los canales PDSCH, PDCCH y PBCH; para cada canal se tiene un diseño específico. Se usa para recibir la estimación del canal de radio, para la demodulación del canal físico asociado, es específica para cada usuario y se transmite únicamente cuando es necesario. El DM-RS se utiliza para la estimación del canal como parte de la demodulación.

Se puede mapear de dos maneras en el dominio del tiempo el DM-RS, el *Type A* y *Type B*. El *Type A* se localiza en el segundo o tercer símbolo del *slot* y pueden existir de uno hasta cuatro DM-RS en un *slot* para escenarios de alta velocidad a esto se lo conoce como posición adicional de DM-RS, mientras el *Type B* está localizado en el primer símbolo del *slot*. En tiempo los símbolos dentro de un *slot* se agrupan de a uno o dos símbolos contiguos, a esto se lo conoce como longitud DM-RS.

Existen dos tipos de DM-RS, *Type 1* y *Type 2* y tienen que ver con la densidad de DMRS en frecuencia. El DM-RS *Type 1* admite seis señales ortogonales cuando se configura un símbolo para la transmisión DM-RS y doce señales ortogonales cuando se configura la longitud de dos símbolos. El DM-RS *Type 2* admite cuatro señales ortogonales cuando se configura un símbolo para la transmisión DM-RS (consisten en dos grupos de dos subportadoras consecutivas.) y ocho señales cuando se configura la longitud de dos símbolos [8].

- **Señales de Referencia de Seguimiento de Fase (PT-RS, *Phase-tracking Reference Signals*)**

PT-RS puede ser visto como una extensión DM-RS para PDSCH/PUSCH y está destinado a la compensación del ruido de fase [9]. Una de las principales degradaciones causadas por el ruido de fase en una señal OFDM es una rotación de fase idéntica de todas las subportadoras, conocida como "Error de fase común" (CPE, *Common Phase Error*). PTRS generalmente se utiliza en la banda de alta frecuencia (FR2) debido a que la rotación afecta en mayor medida a las altas frecuencias [8].

PT-RS es más denso en tiempo, pero más espaciado en frecuencia que DM-RS. La densidad de PT-RS en el dominio de la frecuencia es una subportadora en cada PRB, cada segundo PRB o cada cuarto PRB. La densidad en el dominio del tiempo es cada

símbolo OFDM, cada segundo símbolo OFDM o cada cuarto símbolo OFDM [20]. Como se mencionó en DM-RS, aquí también es específico para cada usuario y sus necesidades

- **Señales de Referencia de la Información del Estado del Canal (*CSI-RS, Channel-State Information Reference Signals*)**

Es una señal de referencia utilizada en el enlace descendente transmitida dentro de un *bandwidth part* para obtener la “Información del Estado del Canal (CSI, *Channel State Information*), gestión de haces, seguimiento de tiempo/frecuencia y control de potencia en el enlace ascendente [20], todos estos parámetros mencionados son reportados al gNB. En la adquisición del CSI se determinan parámetros como el “Indicador de calidad del Canal” (CQI, *Channel Quality Information*) que es necesario para la adaptación de enlace, también para la medición de la interferencia en el equipo de usuario. Para la gestión de haces se usa para evaluar los haces de transmisión, midiendo la “Potencia Recibida de la Señal de Referencia” (RSRP, *Reference Signal Received Power*) para cada haz. Para el seguimiento de tiempo/frecuencia se tiene la “Señal de Referencia de Seguimiento” (TRS, *Tracking Reference Signal*) y se gestiona por el UE [8].

La densidad en el dominio de frecuencia es de {1/2, 1, 3} RE por PRB donde la densidad: 1 se transmite en todos los RB, la densidad: 1/2 se transmite cada 2 RB y la densidad: 3 se usa para señales TRS. La periodicidad configurable es de {4, 5, 8, 10, 16, 20, 32, 40, 64, 80, 160, 320, 640} *slots* así como aperiódico. Puede admitir desde 1 puerto hasta 32 puertos de antena (*antenna ports*) y son los siguientes {1, 2, 4, 8, 12, 16, 24 y 32} [8]. Un puerto de antena es un concepto lógico relacionado con la capa física, y no con la física como la antena de RF que es visible en la torre. Cada transmisión de enlace descendente individual se lleva a cabo desde un puerto de antena específico, cuya identidad es conocida por el UE y el UE puede asumir que dos señales transmitidas han experimentado el mismo canal de radio si y solo si se transmiten desde el mismo puerto de antena. En la práctica, cada puerto de antena, al menos para la transmisión de enlace descendente, puede indicarse como correspondiente a una señal de referencia específica [16].

- **Primary Synchronization Signal (PSS)**

Como se mencionó en la sección 1.4.2.2 el PSS es parte del *SS Block*. Se utiliza para la sincronización de las tramas radio del enlace descendente y llevar parte del PCID. El PSS es la primera señal que buscará un dispositivo que ingresa al sistema para ayudar al UE a obtener el límite de la trama de radio. Existen tres secuencias

diferentes de PSS y ocupa 127 subportadoras, las cuales son mapeadas de la 56 a la 182 del primer símbolo del *SS Block* [9] [12].

- **Secondary Synchronization Signal (SSS)**

SSS también se describe en la sección 1.4.2.2. Al igual que PSS, SSS se utiliza para la sincronización de las tramas radio y además para llevar el PCID. Consta de una secuencia de 127 subportadoras mapeadas de la 56 a la 182 del tercer símbolo del *SS Block* [9].

- **Señal de Referencia de Sondeo (SRS, *Sounding Reference Signal*)**

El SRS se transmite en enlace ascendente para realizar mediciones de CSI principalmente para programación y adaptación de enlace. Es un equivalente al CSI-RS pero del enlace ascendente ya que se utilizan para el sondeo del canal.

Tiene un máximo de 4 puertos de antena a diferencia de CSI-RS que permite hasta 32. En general, un SRS abarca uno, dos o cuatro símbolos OFDM consecutivos y está ubicado en algún lugar dentro de los últimos seis símbolos de una ranura. En el dominio de la frecuencia un SRS puede aparecer cada dos o cada cuatro subportadoras [9].

1.4.4. APLICACIONES ESPERADAS

- **Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB, *enhanced Mobile BroadBand*)**

En general esta aplicación permite volúmenes de datos muy superiores a los vistos por 4G y una experiencia de usuario mejorada [9]. Tiene comunicaciones de alta capacidad y ultrarrápidas para teléfonos móviles, realidad virtual aumentada, videos en UHD, videos 3D; Todo lo anterior disponible para una alta densidad de usuarios [8].

Se considera que el escenario del eMBB aborda la comunicación centrada en el ser humano. Sus capacidades cambian de acuerdo con su área de cobertura o escenario donde se encuentre. En un ambiente "Interior" (indoor) con un punto de acceso cercano alcanza velocidades de 1 Gbps, mientras que en ambientes rurales se estima una velocidad de 50 Mbps, ambas velocidades para el enlace descendente [21].

- **Comunicación Ultrafiable y de Baja Latencia (URLLC, *Ultra-Reliable and Low Latency Communication*)**

Como el nombre lo indica son servicios de muy baja latencia y con una fiabilidad extremadamente alta [20]. No solo está enfocado a la comunicación en el ser humano sino también comunicación tipo máquina. Los ejemplos incluyen comunicaciones

“Vehículo a Vehículo” (*vehicle-to-vehicle*), vehículo de infraestructura (*vehicle-to-infrastructure*), conducción autónoma, cirugía médica a distancia, control inalámbrico de equipo industrial y automatización de la distribución en redes inteligentes [9].

Se estima que requiere una latencia menor a 50 ms extremo a extremo, con una velocidad de hasta 100 Mbps y una confiabilidad del 99.999% [1].

- **Comunicaciones masivas tipo máquina (mMTC, *Massive machine type communications*)**

Son los servicios que se caracterizan por un número masivo de dispositivos, que transmiten información esporádicamente y una cantidad baja de tráfico. Estos dispositivos deben tener una batería de larga duración, por ejemplo, sensores remotos, actuadores y equipos de monitoreo [20]. Tienen un bajo consumo de energía lo que permite una vida larga de la batería de por lo menos varios años. Por esa razón las tasas altas no son un requerimiento para los dispositivos mMTC [9].

IoT es un tipo de MTC con requisitos más estrictos de latencia y fiabilidad, por tal motivo puede incluirse en URLLC [20].

1.4.5. ESQUEMAS DE MODULACIÓN

La modulación es un proceso el cual se usa para transportar información, dicha información se lleva sobre una onda portadora [22].

- **Pi/2-BPSK ($\pi/2$ - *Binary Phase Shift Keying*, Modulación por desplazamiento de fase binaria $\pi/2$),** como su nombre lo indica realiza la modulación variando la fase de la portadora, la portadora se desplaza 180 grados en cada símbolo, por lo que existen dos fases se la llama binaria. Lleva el nombre de $\pi/2$ ya que las fases se encuentran en $\pi/2$ y $-\pi/2$. El número de estados representa la cantidad de combinaciones disponibles para la transmisión de datos. Cada fase representa un *bit* [22] [23].
- **QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*, Modulación por desplazamiento de fase en Cuadratura),** al igual que BPSK, se realiza la modulación variando la fase de la portadora, en este caso la portadora se desplaza 90 grados en cada símbolo, es decir se tiene cuatro fases. Cada fase representa a dos *bits* [22].
- **16QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*, Modulación de amplitud en cuadratura),** la modulación por amplitud de cuadratura realiza una modulación

tanto en amplitud como en fase. 16QAM transmite 4 *bits* por cada símbolo. Un símbolo es una representación de una combinación entre amplitud y fase [22].

- **64QAM**, similar a 16 QAM con la diferencia de que transmite 6 *bits* por cada símbolo
- **256QAM**, de igual manera similar a 16QAM y 64QAM, pero con la diferencia de que transmite 8 *bits* por cada símbolo.

1.4.6. MODELOS DE CANAL

Los modelamientos de canal son una parte esencial de las simulaciones de capa física de las de redes de Telecomunicaciones. Se la define como una representación matemática de los efectos que puede tener un canal de comunicación por el cual se propagan diferentes señales inalámbricas [24].

3GPP publicó un informe técnico sobre los modelos de canales para frecuencia que varían entre ente 0.5 a 100GHz. El objetivo del documento es dar una ayuda para modelar y evaluar el rendimiento de la capa física, utilizando los modelos adecuados. Los dos modelos de canal propuestos para las simulaciones para el nivel de enlace de 5G abarcando todo el rango de frecuencias de 0.5 a 100GHz son: los modelos TDL y CDL, descritos a continuación [25].

Los retrasos de los modelos están escalados en la Tabla 1.10. Estos valores han sido escogidos de propagaciones de retardo de mediciones correspondientes a escenarios típicos de 5G. La propagación del retardo indica cuanto se dispersa la señal en el tiempo [16].

Tabla 1.10 Retardos de propagación deseados

Modelo	Propagación de retardo deseada
Propagación de retardo muy corta	10 ns
Propagación de retardo corta	30 ns
Propagación de retardo normal	100 ns
Propagación de retardo larga	300 ns
Propagación de retardo muy larga	1000 ns

1.4.6.1. TDL (Tapped Delay Line)

Los modelos TDL se definen para el rango de frecuencias de 0.5 a 100 GHz con un ancho de banda máximo de 2GHz, que incluye a evaluaciones no MIMO [26]. TDL preferentemente se usa para SISO, pero existe la posibilidad de ampliarlo para MIMO [27].

TDL tiene 5 perfiles diferentes que dependen de los escenarios ambientales deseados. Para el escenario NLOS, se tiene los perfiles TDL-A, TDL-B y TDL-C, mientras que para el escenario LOS, se tienen los perfiles TDL-D y TDL-E [25] que siguen una distribución Rician [26].

Los perfiles TDL-A, TDL-B y TDL-C siguen una distribución *Rayleigh* [27]. Los perfiles TDL-D y TDL-E únicamente en la primera derivación siguen una distribución Rician, las restantes derivaciones siguen una distribución *Rayleigh* [26]. Los modelos TDL normalmente contienen información de potencia, retardo y espectro *Doppler* [26].

Un TDL tiene al menos una derivación (*tap*). Las tablas con las derivaciones de cada perfil se encuentran en TR 38.901 sección 7.2 [26].

Un ejemplo de una TDL con dos derivaciones internas se muestra en la Figura 1.9. La longitud total de la línea de retardo es de M_3 muestras, y las derivaciones internas están situadas en retrasos de M_1 y M_2 muestras, respectivamente. La señal de salida es una combinación lineal de la señal de entrada $x(n)$, la salida de la línea de retardo $x(n-M_3)$, y las dos señales de derivación $x(n-M_1)$ y $x(n-M_2)$ [28].

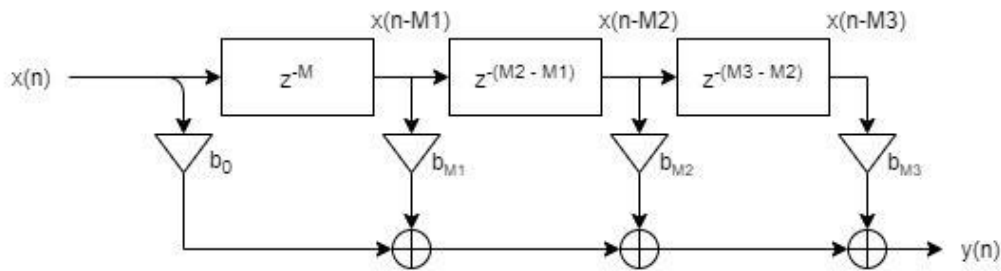


Figura 1.9 Ejemplo del Modelo TDL

La ecuación de la salida de la Figura 1.9 es:

$$y(n) = b_0x(n) + b_{M_1}x(n - M_1) + b_{M_2}x(n - M_2) + b_{M_3}x(n - M_3) \quad (1.4)$$

1.4.6.2. CDL (Clustered Delay Line)

Los modelos CDL se definen en el rango de 0.5 a 100 GHz con un ancho de banda máximo de 2 GHz. Los modelos CDL se implementan a través de la generación de coeficientes [26]

o generando el modelo TDL que utiliza un filtro espacial [26]. Los perfiles CDL se diseñan para canales 3D [25].

CDL posee 5 perfiles diferentes. Para el escenario NLOS, se tiene los perfiles CDL-A, CDL-B y CDL-C, mientras que para el escenario LOS, se tienen los perfiles CDL-D y CDL-E [25].

Los modelos CDL definen potencia, retardo e información angular. En la información angular se toma en cuenta ángulo Azimut de Salida (AOD, *Azimuth angle Of Departure*), Ángulo Azimut de Llegada (AOA, *Azimuth angle Of Arrival*), Ángulo Zenith de salida (ZOD, *Zenith angle Of Departure*) y Ángulo Zenith de Llegada (ZOA, *Zenith angle Of Arrival*) [26].

Actualmente los sistemas inalámbricos hacen uso del *beamforming* para dirigir la energía hacia los receptores deseados y evitar las interferencias. El *beamforming* es posible gracias a la tecnología MIMO. CDL permite representar de mejor manera los enlaces MIMO ya que considera los ángulos de llegada y salida de Azimut y Zenith. Este modelo puede predecir los ángulos de salida y llegada del sistema inalámbrico.

El modelo CDL describe el canal de propagación compuesto por un número de *clusters* separados con diferentes retrasos. Cada grupo, a su vez, se compone de un número de componentes multitrayectoria (rayos) que tienen los mismos valores de retardo, pero difieren en el ángulo de salida y el ángulo de llegada, tal como se aprecia en la Figura 1.10 [29]. Una CDL se utiliza para modelar el canal cuando la señal recibida consta de múltiples grupos retardados.

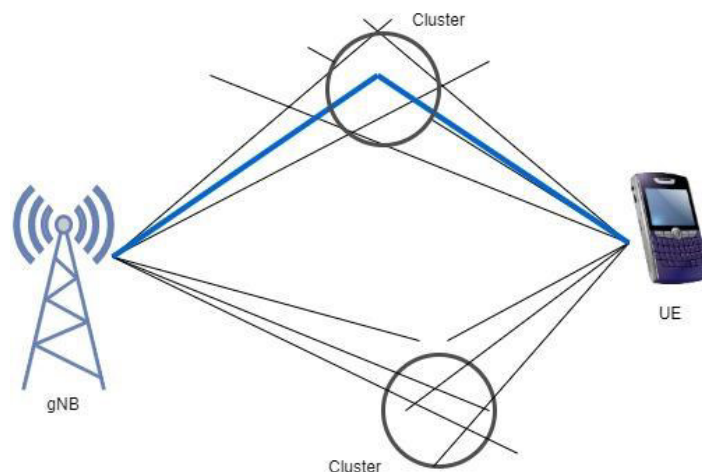


Figura 1.10 Ejemplo de *cluster* en el modelo CDL

Cada perfil cuenta con un número diferente de *clusters*, retardos y ángulos. Los parámetros de cada perfil del modelo de canal son preestablecidos y únicos. Para acceder a las tablas de cada perfil ir a TR 38.901 sección 7.7.1 [26].

1.4.7. PROCESO DE TRANSPORTE DE DATOS DE PDSCH Y PUSCH

A continuación, se presenta el esquema de procesamiento de los datos del usuario para transmitirlos a través de una o varias antenas de transmisión. Este sería uno de los procesos más complicados en el proceso de NR y muchos factores están involucrados en este proceso.

A continuación, se describen cada una de las etapas por las cuales pasan los datos hasta que lleguen al canal por el cual van a ser enviados. Además, en la Figura 1.11 se presenta un diagrama de bloques con las etapas de procesamiento tanto para PDSCH como para PUSCH.

- **Proceso HARQ:** Se obtiene el índice del proceso HARQ y se verifica si se requiere retransmisión. Es parte de las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.
- **CRC:** este bloque es parte del DLSCCH (Downlink Shared Channel) y del ULSCCH (Uplink Shared Channel). A este bloque ingresa los datos en los denominados bloques de transporte. Se realiza la detección de errores en cada bloque de transporte mediante una verificación de redundancia cíclica [30]. DLSCCH y ULSCCH son canales de transporte que son parte de la capa física de 5G
- **Segmentación del bloque de código y adición del CRC:** este bloque es parte del DLSCCH y del ULSCCH. Divide el bloque de datos de entrada en segmentos de bloque de código. También se añade los *bits* de comprobación de redundancia cíclica [30]. A la salida de este bloque se obtiene los bloques de código. La salida de este bloque es el denominado bloques códigos.
- **Codificación de Canal:** este bloque es parte del DLSCCH y del ULSCCH. Se realiza la codificación LDPC de cada bloque de código [30].
- **Adaptación de tasas:** este bloque es parte del DLSCCH y del ULSCCH. Se realiza la adaptación de la tasa para el código LDPC, se define por bloque codificado y consiste en la selección de *bits* y el intercalado de *bits*, es decir los bloques codificados con LDPC se ajustan individualmente a la velocidad [17].
- **Concatenación de bloques código:** este bloque es parte del DLSCCH y del ULSCCH. Por último, se realiza la concatenación de los bloques de código para crear una transmisión en el PDSCH. A la salida de este bloque se tiene los llamados *codewords*.

- **Scrambling:** este bloque es parte del PDSCH y PUSCH. Se realiza un procesamiento a nivel de *bits* que se aplica a la señal de la tasa de transmisión para que la secuencia binaria resultante parezca más aleatoria, se realiza para evitar los errores en ráfagas [17].
- **Modulación:** este bloque es parte del PDSCH y PUSCH. En esta etapa se realiza la modulación, previamente vista en la sección 1.4.5. A la salida de esta etapa se obtiene los símbolos modulados con un valor complejo [17].
- **Mapeo de capas:** este bloque es parte del PDSCH y PUSCH. Se realiza el mapeo de capas de uno o dos *codewords*, tiene el propósito de distribuir los símbolos modulados a través de diferentes capas de transmisión. Para un *codeword* se tiene hasta cuatro capas, y para dos *codewords* es de cuatro capas en adelante hasta ocho [17]. En PUSCH se tiene una etapa adicional después del mapeo de capas y es la etapa denominada “*Transform precoding*” en la cual se decide si se trabaja con ‘*Codebook*’ o con ‘*Non-codebook*’. En *codebook* la matriz de codificación es obtenida del gNB mientras que *Non-codebook* utiliza las medidas del CSI-RS para obtener la matriz de precodificación. La *Transform precoding* cuando está habilitada utiliza DFT-s-OFDM (SC-OFDM) mientras que cuando está deshabilitada se utiliza CP-OFDM [31]. DFT-s-OFDM (DFT-spread), también conocido como SC-OFDM consiste en una precodificación de un módulo adicional con la Transformada de Fourier Discreta.
- **Mapeo de puertos de antena:** es la asignación de una capa a múltiples antenas, lo que permite la formación de haces. En el caso de la transmisión en la línea de visión, esto significaría probablemente apuntar a una dirección concreta. Otro caso de precodificación es la asignación de varias capas a múltiples antenas. Este caso más general se denomina a veces multiplexación espacial. Se usa una matriz de precodificación para transformar los *bits* de datos en otro conjunto de datos que se asignan a cada puerto de antena.
- **Mapeo de recursos:** Los símbolos se asignan primero a bloques de recursos virtuales (VRB). Cuando se asignan al *grid*, los símbolos PDSCH evitan las ubicaciones reservadas para otros fines. El mapeo de bloques de recursos virtuales a físicos puede ser intercalado o no intercalado. El mapeo no intercalado consiste en asignar directamente cada bloque virtual a la misma posición en la red de recursos físicos. El mapeo intercalado proporciona diversidad de frecuencias al distribuir los bloques virtuales en toda la parte del ancho de banda. Para cada paso de antena, se crea un grid de recursos virtuales [17]. En resumen, en esta etapa se pasa los símbolos primero

a los VRB y posteriormente a los PRB. El mapeo se realiza mediante los índices que se obtienen en el proceso.

- **Modulación OFDM:** Se realiza la modulación OFDM de los PRB.
- **Canal multitrayecto:** los datos modulados por OFDM son enviados por un canal CDL o TDL y se les añade ruido.

Cabe mencionar que en la Figura 1.11 solo se presenta la etapa de transmisión de datos de PDSCH y PUSCH. la etapa de recepción de datos es similar, pero aplicando el proceso inverso a lo mencionado, es decir se tendrá lo siguiente:

- Demodulación OFDM
- Demapeo de recursos
- Demapeo de los puertos antena
- Demapeo de capas
- Demodulación
- *Descrambling*
- Desconcatenación de bloques código
- Desadaptación de tasas
- Decodificación de canal
- Separación del bloque de código y del CRC
- Verificación del CRC
- Verificación del proceso HARQ

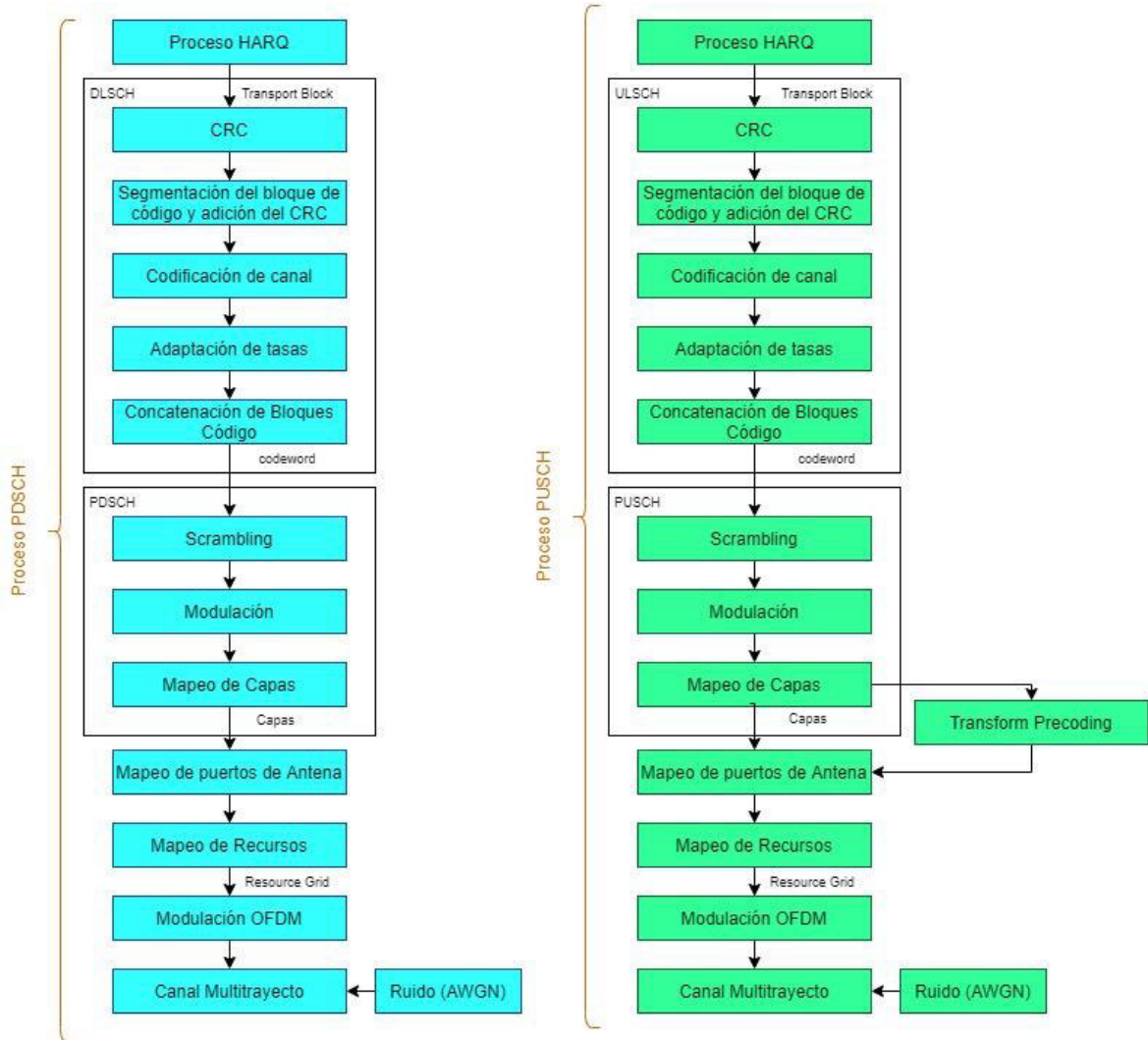


Figura 1.11 Procesamiento de la capa física para PDSCH y PUSCH de 5G NR

2. METODOLOGÍA

La sección presentada a continuación se describen los códigos implementados en las simulaciones, tanto para PDSCH como para PUSCH, además de una breve descripción de las funciones y objetos proporcionadas por el *toolbox* 5G. Los códigos son extraídos del *Toolbox* 5G en el apartado de simulación extremo a extremo y sufren modificaciones para adaptarlo a las necesidades del proyecto de titulación.

2.1. FUNCIONES DEL *TOOLBOX* 5G

Se describen las funciones utilizadas en los tres *scripts* principales de PDSCH o PUSCH. Dichas funciones son parte del *Toolbox* 5G de Matlab.

2.1.1. nrOFDMInfo

Proporciona información adicional para la modulación OFDM para los parámetros de configuración de la portadora [32]. Se utiliza en los *scripts* principales MainPDSCH y MainPUSCH. Utilizada para obtener la frecuencia de muestro.

```
info = nrOFDMInfo(carrier);
```

Elementos de entrada:

- carrier: es un objeto configurado de la salida de nrCarrierConfig. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.

Elementos de salida:

- info: como salida se obtiene una estructura con información adicional para la simulación.

2.1.2. nrExtractResources

Es una función que dados los índices extrae los *resource elements* de una o más matrices de *resource grid*. Los *resources grid* pueden ser de información y de señales de señales de referencia. En 5G *Toolbox*, se generan índices para mapear secuencias de canales físicos y símbolos de señales a una matriz de recursos [33]. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

```
[re1,...,reN,reind1,...,reindN] =  
nrExtractResources(ind,grid1,grid2,...,gridN)
```

Elementos de entrada:

- ind: es una matriz de índices. Puede ser matriz de índices de *uplink*, *downlink*, PT-RS o DM-RS.
- grid: es un arreglo numérico 4D de $M \times N \times R \times P$ de donde se extraen los *resource elements*. M es el número de subportadoras, N es el número de símbolos OFDM, R es el número de antenas de recepción y P es el número de Puertos de Antena. Pueden existir varias matrices 'grid'.

Elementos de salida:

- re: es una matriz o varias matrices de los recursos extraídos y dependen del número de matrices 'grid'. Las matrices son de dimensión $N_{re} \times R \times P$, donde N_{re} es el número de recursos extraídos del plano $M \times N$, M es el número de subportadoras y N es el número de símbolos OFDM. En algunos casos $P=1$ y queda una matriz de dos dimensiones. No es necesario ocupar todas las salidas de la función.

2.1.3. nrEqualizeMMSE

Realiza una ecualización "Error Medio Cuadrático Mínimo" (MMSE, *Minimum mean-squared error*) en los *resource elements* extraídos de un canal físico, utiliza la información estimada del canal 'Hest' y la estimación de la varianza del ruido 'nVar' [34]. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

```
[out,csi] = nrEqualizeMMSE(rxSym,Hest,nVar)
```

Elementos de Entrada:

- rxSym: son los *resource elements* extraídos de un canal físico. Tiene la dimensión $N_{re} \times R$, donde N_{re} es el número de recursos extraídos y R es el número de antenas de recepción. Es una matriz numérica.
- Hest: información del canal estimado, se especifica como una matriz de dimensión $N_{re} \times R \times P$, donde P es el número de planos de transmisión.
- nVar: varianza del ruido estimado, es un número entero escalar no negativo.

Elementos de Salida:

Las dos salidas tienen la dimensión de $N_{re} \times P$.

- out: símbolos ecualizados.

- csi: Brinda información acerca del estado del canal (CSI).

2.1.4. nrTBS

Devuelve el Tamaño del Bloque de Transporte (TBS, *Transport Block Size*) asociado para cada *codeword* en una transmisión de canal compartido [35]. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH. Este cálculo se realiza antes de que los datos pasen al ULSCH o DLSCH.

$tbs = nrTBS(mod, nlayers, nPRB, NREPerPRB, tcr, xOh)$
--

Elementos de entrada:

- mod: Esquema de modulación para cada *codeword*. Debe especificarse como uno de los siguientes 'pi/2-BPSK', 'QPSK', '16QAM', '64QAM', '256QAM'.
- nlayers: Número de capas de transmisión. De 1 a 4 un *codeword*.
- nPRB: Número de PRB asignados para el canal compartido físico. El valor de nPRB está en el rango entre 0 y 275.
- NREPerPRB: Número de *resource elements* asignados para la transmisión de datos dentro de un PRB para un *slot*.
- tcr: es un valor entre 0 y 1. [36].
- xOh: Sobrecarga adicional. Representa la sobrecarga del CSI-RS y el CORESET. El valor nominal es 0, 6, 12, o 18.

Elementos de salida:

- tbs: Se obtiene el TBS asociado a cada *codeword* en la transmisión del canal compartido.

A continuación, se describen los pasos para el cálculo del TBS para PDSCH y PUSCH.

2.1.4.1. Determinación del TBS en PDSCH

El TBS se puede calcular usando las fórmulas del TS 38.214 sección 5.1.3.2 [36]. Se siguen los siguientes pasos.

- 1) Determinar el número de N'_{RE} dentro de un *slot*

Lo que primero hace el UE es determinar el número de REs asignados para PDSCH dentro de un PRB con la Ecuación 2.1.

$$N'_{RE} = N_{sc}^{RB} \cdot N_{symb}^{sh} - N_{DMRS}^{PRB} - N_{oh}^{PRE} \quad (2.1)$$

$N_{sc}^{RB} = 12$, es el número de subportadoras en un RB.

N_{symb}^{sh} : es el número de símbolos PDSCH asignados dentro de un *slot* (12 o 14).

N_{DMRS}^{PRB} : es el número de REs para DMRS por PRB incluyendo la sobrecarga de los DMRS y grupos CDM (*Code Division Multiplexing*).

N_{oh}^{PRE} : es la sobrecarga configurada por la capa superior (0, 6, 12 o 18).

Una vez determinado el número total de REs asignados para PDSCH se realiza lo siguiente, si el valor de N'_{RE} es mayor que 156 se redondea a 156, es decir nunca se va a tener una asignación de recursos mayor a 156, si es menor que 156 se toma el valor menor y se multiplica por el número de PRB.

$$N_{RE} = \min(156, N'_{RE}) \cdot n_{PRB} \quad (2.2)$$

N_{RE} : Número de REs disponibles para la transferencia de datos.

n_{PRB} : Número total de PRBs asignados para el UE.

2) Determinar el “Número intermedio de *bits* de información” (INFO, *Intermediate number of information bits*) N_{info}

$$N_{info} = N_{RE} \cdot R \cdot Q_m \cdot v \quad (2.3)$$

R : TCR

Q_m : Orden de la modulación

v : Número de capas

Los valores R y Q_m se obtienen del TS 38.214 sección 5.1.3.1 [36]. Se establecen en el script 'MainPDSCH'.

Si $N_{info} \leq 3824$

Se utiliza el paso 3 para determinar el TBS

Caso contrario $N_{info} > 3824$

Se utiliza el paso 4 para determinar el TBS

3) Cuando se cumple $N_{info} \leq 3824$ el TBS se determina de la manera siguiente:

$$N'_{info} = \max\left(24, 2^n \cdot \left\lfloor \frac{N_{info}}{2^n} \right\rfloor\right) \quad (2.4)$$

$$n = \max(3, \lfloor \log_2(N_{info}) \rfloor - 6) \quad (2.5)$$

Utilizar la siguiente tabla para calcular el TBS más cercano que no sea menor N'_{info}

Tabla 2.1 TBS para $N_{info} \leq 3824$ [36]

Índice	TBS	Índice	TBS	Índice	TBS	Índice	TBS
1	24	31	336	61	1288	91	3624
2	32	32	352	62	1320	92	3752
3	40	33	368	63	1352	93	3824
4	48	34	384	64	1416		
5	56	35	408	65	1480		
6	64	36	432	66	1544		
7	72	37	456	67	1608		
8	80	38	480	68	1672		
9	88	39	504	69	1736		
10	96	40	528	70	1800		
11	104	41	552	71	1864		
12	112	42	576	72	1928		
13	120	43	608	73	2024		
14	128	44	640	74	2088		
15	136	45	672	75	2152		
16	144	46	704	76	2216		
17	152	47	736	77	2280		
18	160	48	768	78	2408		
19	168	49	808	79	2472		
20	176	50	848	80	2536		
21	184	51	888	81	2600		
22	192	52	928	82	2664		
23	208	53	984	83	2728		
24	224	54	1032	84	2792		
25	240	55	1064	85	2856		
26	256	56	1128	86	2976		
27	272	57	1160	87	3104		
28	288	58	1192	88	3240		
29	304	59	1224	89	3368		
30	320	60	1256	90	3496		

4) Cuando $N_{info} > 3824$, TBS se determina de la siguiente manera:

$$N'_{info} = \max \left(3840, 2^n \times \text{round} \left(\frac{N_{info} - 24}{2^n} \right) \right) \quad (2.6)$$

$$n = \lfloor \log_2(N_{info} - 24) \rfloor - 5 \quad (2.7)$$

Si $R \leq 1/4$

$$TBS = 8 \cdot C \cdot \left\lceil \frac{N'_{info} + 24}{8 \cdot C} \right\rceil - 24 \quad (2.8)$$

$$C = \left\lceil \frac{N'_{info} + 24}{3816} \right\rceil \quad (2.9)$$

Caso Contrario

Si $N'_{info} > 8424$

$$TBS = 8 \cdot C \cdot \left\lceil \frac{N'_{info} + 24}{8 \cdot C} \right\rceil - 24 \quad (2.10)$$

$$C = \left\lceil \frac{N'_{info} + 24}{8424} \right\rceil \quad (2.11)$$

Caso contrario

$$TBS = 8 \cdot \left\lceil \frac{N'_{info} + 24}{8} \right\rceil - 24 \quad (2.12)$$

A continuación, se muestra un diagrama de como calcular el TBS a partir del cálculo del 'INFO'.

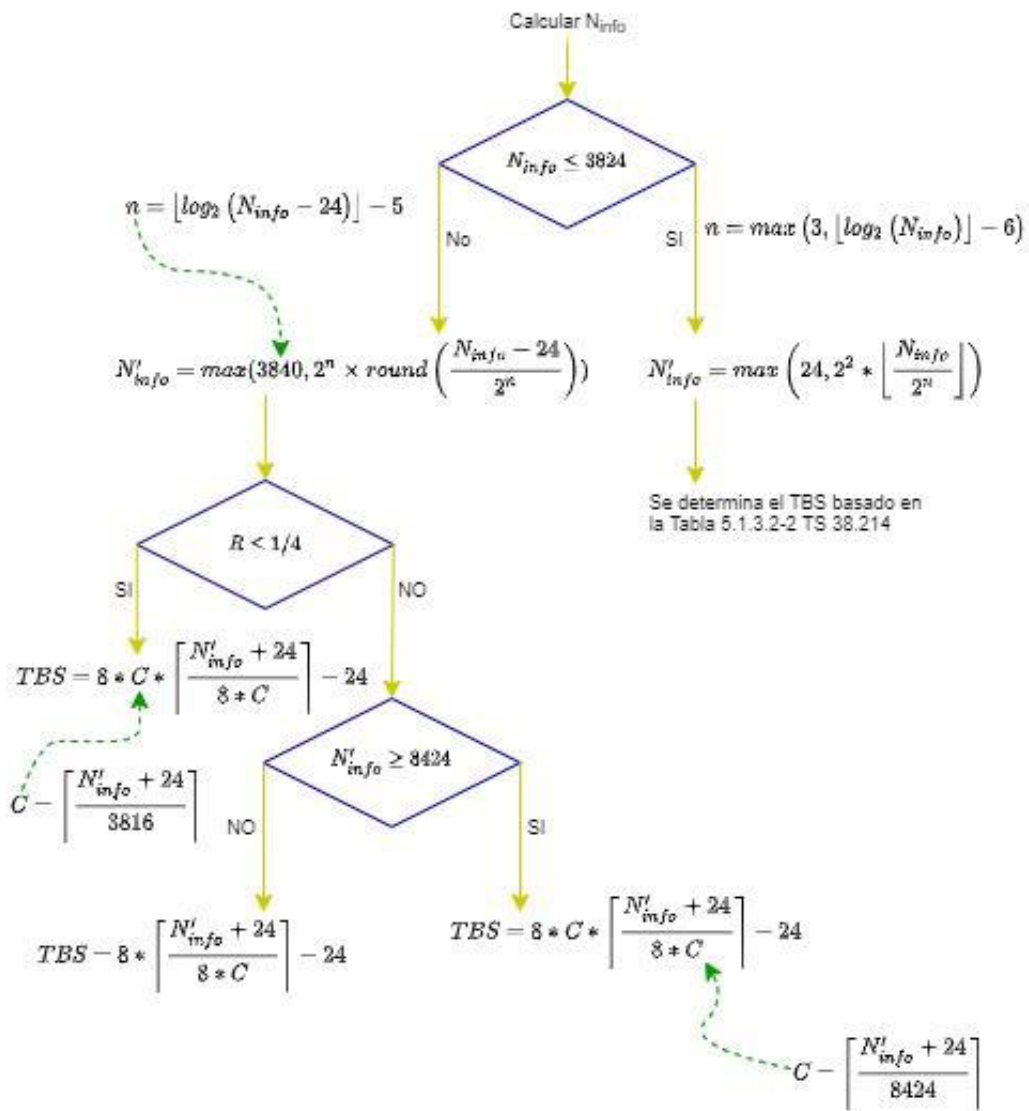


Figura 2.1 Determinación de TBS [37]

2.1.4.2. Determinación de TBS en PUSCH

Para calcular el TBS se sigue el TS 38.214 sección 6.1.4.2 [36].

Es similar al cálculo de PDSCH, cambia el valor del TCR ya que se usan las tablas 6.1.4.1-1 y 6.1.4.1-2 del TS 38.214 [36].

2.1.5. nrResourceGrid

Devuelve un *resource grid* de ranuras de portadoras vacías para un número de antenas o capas especificado [38]. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH. En los bloques de PDSCH y PUSCH.

```
grid = nrResourceGrid(carrier,p)
```

Elementos de entrada:

- carrier: es un objeto configurado de la salida de nrCarrierConfig. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- p: es el número de antenas.

Elementos de salida:

- grid: es un arreglo de dimensiones de $K \times L \times P$, donde K es el número de subportadoras, L es el número de símbolos OFDM por *slot* y P es el número de antenas o capas. Devuelve una matriz compleja de ceros.

2.1.6. nrOFDMModulate

Genera la forma de onda modulada OFDM [39], es decir realiza la modulación OFDM. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

```
[waveform] = nrOFDMModulate(carrier,grid)
```

Elementos de entrada:

- carrier: es un objeto configurado de la salida de nrCarrierConfig. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- grid: es una matriz de recursos portadores, se especifica como un arreglo complejo de $K \times N \times P$, donde K es el número de subportadoras, N es el número de símbolos OFDM y P es el número de antenas de transmisión o capas.

Elementos de salida:

- waveform: es una matriz de $T \times P$, donde T es el número de muestras en el dominio de tiempo y P es el número de antenas de transmisión.

2.1.7. nrOFDMDemodulate

Realiza la demodulación OFDM de la forma de onda [40], es decir realiza la demodulación OFDM. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

```
grid = nrOFDMDemodulate(carrier,waveform)
```

Elementos de entrada:

- carrier: es un objeto configurado de la salida de nrCarrierConfig. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- waveform: es una matriz compleja de TxNr donde T es el número de muestras en el dominio del tiempo y Nr es el número de antenas de recepción. La variable 'waveform' se obtiene de la salida de las funciones creadas a partir de los objetos nrCDLChannel o nrTDLChannel, es la primera variable de salida a la cual se le añade ruido.

Elementos de salida:

- grid: es una matriz de KxLxR, donde K es el número de subportadoras, L es el número de símbolos OFDM y R es el número de antenas de recepción.

2.1.8. getPathFilters

Obtiene la respuesta impulso del filtro de trayectoria para el canal de desvanecimiento MIMO a nivel de enlace [41]. Se utiliza cuando la variable estimación de canal perfecta habilitada. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

```
pathFilters = getPathFilters(channel)
```

Elementos de entrada:

- channel: objeto configurado con el canal de desvanecimiento seleccionado. Se configura en nrCDLChannel o nrTDLChannel.

Elementos de salida:

- pathFilters: se obtiene una respuesta impulso de filtro de trayectoria, es una matriz real de Nh x Np, donde Nh es el número de muestras de respuesta al impulso y Np es el número de rutas.

2.1.9. nrPerfectTimingEstimate

Realiza una estimación de tiempo perfecta. Devuelve el desplazamiento de tiempo estimado y la magnitud de la respuesta impulso [42]. Se utiliza cuando la variable estimación de canal perfecta está habilitada. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

```
[offset,mag] = nrPerfectTimingEstimate(pathGains,pathFilters)
```

Elementos de entrada:

- pathGains: es un arreglo complejo con las ganancias de trayectoria de cuatro dimensiones $N_{cs} \times N_{px} \times N_{tx} \times N_r$, donde N_{cs} es el número de instantáneas del canal, N_p es el número de rutas, N_t es el número de antenas de transmisión y N_r es el número de antenas de recepción. 'pathGains' se obtiene de la segunda variable de salida de las funciones creadas a partir de los objetos nrCDLChannel o nrTDLChannel.
- pathFilters: es una matriz compleja con las respuestas impulso del filtro de trayectoria de $N_h \times N_p$ donde N_h es el número de muestras de respuestas impulso. 'pathFilters' se obtiene de la salida de getPathFilters.

Elementos de salida:

- offset: es un número escalar que indica el desplazamiento de tiempo estimado.
- mag: es una matriz de dimensiones $N_h \times N_r$, es la magnitud de respuesta impulso para cada antena receptora.

2.1.10. nrPerfectChannelEstimate

Realiza una estimación canal perfecta [43]. Se utiliza cuando la variable estimación de canal perfecta está habilitada. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

```
H=nrPerfectChannelEstimate(carrier,pathGains,pathFilters,toffset,sampleTimes)
```

Elementos de entrada:

- carrier: es un objeto configurado de la salida de nrCarrierConfig. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- pathGains: es una matriz compleja de ganancias de la trayectoria del canal del proceso de desvanecimiento $N_{cs} \times N_{px} \times N_{tx} \times N_r$, donde N_{cs} es el número de instantáneas del canal, N_p es el número de rutas, N_t es el número de antenas de transmisión y N_r es el número de antenas de recepción. 'pathGains' se obtiene de la segunda variable de salida de las funciones creadas a partir de los objetos nrCDLChannel o nrTDLChannel.
- pathFilters: es una matriz real de $N_h \times N_p$, donde N_h es el número de muestras de respuestas impulso y N_p el número de rutas. 'pathFilters' se obtiene de la salida de getPathFilters.

- `toffset`: desplazamiento de tiempo en muestras, especificado como un entero no negativo. 'toffset' se obtiene de la primera variable de salida de `nrPerfectTimingEstimate`.
- `sampleTimes`: especifica el momento de aparición de cada instantánea de canal. Es un vector de números reales no negativos de $NCS \times 1$, donde Ncs es el número de instantáneas de canal. 'sampleTimes' se obtiene de la salida de las funciones creadas a partir de los objetos `nrCDLChannel` o `nrTDLChannel`., es la tercera variable de salida de las funciones.

Elementos de salida:

- `h`: es un arreglo complejo $K \times N \times N_r \times N_t$, donde K es el número de subportadoras y N es el número de símbolos OFDM, N_t es el número de antenas de transmisión y N_r es el número de antenas de recepción.

2.1.11. `setTransportBlock`

Es una función sin parámetros de salida que carga el TB dentro del codificador `nrDLSCH` o `nrULSCH` [44]. Se utiliza en las funciones `ProcessingLoopPDSCH` y `ProcessingLoopPUSCH`.

```
setTransportBlock(encDL, trblk, trblkID, harqID)
```

Elementos de entrada:

- `encDL`: es el objeto codificador `nrDLSCH` o `nrULSCH`.
- `trblk`: es el TB, es un vector binario o una matriz de una o dos columnas binarias.
- `trblkID`: utilizado únicamente en PDSCH, es el número de TB especificado como 0 o 1.
- `harqID`: es el número de proceso HARQ. Es un entero entre 0 y 15.

2.1.12. `nrLayerDemap`

Devuelve una o dos *codewords* después de haber realizado el demapeo de los símbolos de las capas recibidas [45]. En las simulaciones se usa una sola *codeword*, por lo tanto, no se van a utilizar más de cuatro capas. Se utiliza en las funciones `ProcessingLoopPDSCH` y `ProcessingLoopPUSCH`.

```
out = nrLayerDemap(in)
```

Elementos de entrada:

- in: es una matriz de $M \times N_{\text{layers}}$, donde M es el número de símbolos de modulación por capa de transmisión y N_{layers} el número de capas de transmisión. El número de capas puede variar entre 1 y 8.

Elementos de salida:

- out: retorna una matriz de celdas de uno o dos vectores de columna complejos. Cada vector corresponde a una palabra código.

2.1.13. nrPUSCH

Genera los símbolos de modulación PUSCH [46]. Se utiliza en la función ProcessingLoopPUSCH. Esta función realiza el *scrambling*, la modulación y mapeo de capas.

```
sym =
nrPUSCH(cw,mod,nLayers,nid,rnti,transformPrecode,mrb,txScheme,nPorts,tpmi)
```

Elementos de entrada:

- cw: es un vector columna obtenido de la salida de ULSCH. Se lo obtiene de la salida del objeto nrULSCH.
- mod: especifica el esquema de modulación, 'pi/2-BPSK','QPSK','16QAM','64QAM'
- nLayers: número de capas, es un escalar entre 1 y 4.
- nid: "identidad de los codificadores" (*scrambling identity*), número entero entre 0 y 1023. En la simulación establecido en 0.
- rnti: "Identificador Temporal de la Red de Radio" (RNTI, *radio network temporary identifier*), número entero entre 0 y 65535. En la simulación establecido en 1.
- transformPrecode: habilita o deshabilita la 'TransformPrecoding'. En la simulación está deshabilitada.
- mrb: es el ancho de banda de PUSCH asignado en *resource blocks*. Número entero entre 1 y 275.
- txScheme: establece si se utiliza '*nonCodebook*' o '*codebook*'. En la simulación se utiliza en '*nonCodebook*'.
- nPorts: número de puertos de antena, especificado como 1, 2 o 4.

- `tpmi`: indicador de la matriz de precodificación transmitida, especificado como un número entero entre 0 y 27. En la simulación establecido en 0.

Elementos de salida:

- `sym`: son los símbolos modulados PUSCH, devuelto como una matriz compleja.

2.1.14. nrPUSCHDecode

Decodifica los símbolos de modulación PUSCH [47]. Se utiliza en la función `ProcessingLoopPUSCH`. Hace el proceso inverso de `nrPUSCH`.

```
[cw, symbols] = nrPUSCHDecode(sym, mod, nid, rnti, nVar, transformPrecode, mrb)
```

Elementos de entrada:

- `sym`: es una matriz compleja de símbolos para ser demodulados, se obtiene de la primera variable de salida de `nrEqualizeMMSE`.
- `mod`: especifica el esquema de modulación, 'pi/2-BPSK', 'QPSK', '16QAM', '64QAM'.
- `nid`: *scrambling identity*, número entero entre 0 y 1023. En la simulación establecido en 0.
- `rnti`: RNTI, número entero entre 0 y 65535. En la simulación establecido en 1.
- `nVar`: permite especificar la variación del ruido blanco gaussiano añadido a los símbolos PUSCH recibidos. Se lo obtiene de la salida de la función `nrOFDMDemodulate`
- `transformPrecode`: habilita o deshabilita la 'TransformPrecoding'. En la simulación está deshabilitada.
- `mrb`: es el ancho de banda de PUSCH asignado en *resource blocks*. Número entero entre 1 y 275.

Elementos de salida:

- `cw`: devuelve un vector de columna real con *bits*.
- `symbols`: devuelve un vector columna complejo que contiene los símbolos de constelación para una *codeword*.

2.1.15. nrPDSCH

Genera los símbolos de modulación PDSCH [48]. Se utiliza en la función ProcessingLoopPDSCH. Esta función realiza el *scrambling*, la modulación y mapeo de capas.

```
Sym = nrPDSCH(cws,mod,nlayers,nid,rnti)
```

Elementos de entrada:

- cws: es un vector columna obtenido de la salida nrDLSCH. Se lo obtiene de la salida del objeto nrDLSCH.
- mod: especifica el esquema de modulación, 'QPSK','16QAM','64QAM','256QAM'.
- nlayers: número de capas, es un escalar entre 1 y 4.
- nid: *scrambling identity*, número entero entre 0 y 1023. En la simulación establecido en 1.
- rnti: RNTI, número entero entre 0 y 65535. En la simulación establecido en 1.

Elementos de salida:

- sym: son los símbolos modulados PDSCH, devuelto como una matriz compleja.

2.1.16. nrPDSCHDecode

Decodifica los símbolos de modulación PDSCH [49]. Se utiliza en la función ProcessingLoopPDSCH. Hace el proceso inverso de nrPDSCH.

```
[cws,symbols] = nrPDSCHDecode(sym,mod,nid,rnti,nVar)
```

Elementos de entrada:

- sym: es una matriz compleja de símbolos para ser demodulados de $N_{RE} \times N_{Layers}$, donde N_{RE} es el número de *resource elements* y N_{Layers} es el número de capas.
- mod: especifica el esquema de modulación, 'QPSK','16QAM','64QAM','256QAM'.
- nid: *scrambling identity*, número entero entre 0 y 1023. En la simulación establecido en 1.
- rnti: RNTI, número entero entre 0 y 65535. En la simulación establecido en 1.

- `nVar`: permite especificar la variación del ruido blanco gaussiano añadido a los símbolos PDSCH recibidos. Se lo obtiene a partir de `nrOFDMDemodulate` si la estimación de canal perfecta está habilitada.

Elementos de Salida:

- `cws`: devuelve un vector de columna real con *bits*.
- `symbols`: devuelve un vector columna complejo que contiene los símbolos de constelación para una *codeword*.

2.1.17. Funciones adicionales de Matlab

Las funciones presentadas a continuación son parte del código, pero no se utilizan en las simulaciones realizadas:

- **`nrTimingEstimate`**, realiza una estimación de tiempo práctica [50]. Se utiliza únicamente cuando la variable estimación de canal perfecta está deshabilitada.
- **`nrChannelEstimate`**, realiza una estimación de canal práctica [51]. Se utiliza únicamente cuando la variable estimación de canal perfecta está deshabilitada.
- **`nrTransformDeprecode`**, retorna la transformación de los símbolos deprecodificados [52]. Solo se utiliza en PUSCH y si la variable 'TransformPrecoding' está habilitada.
- **`nrPUSCHCodebook`**, Genera una matriz de precodificación PUSCH [53]. Se utiliza solo si la estimación de canal perfecta está habilitada y cuando el esquema de transmisión está configurado como '*codebook*'.

2.2. OBJETOS DEL TOOLBOX 5G

2.2.1. nrCarrierConfig

Es un objeto encargado de configurar la portadora [54]. Los primeros cuatro parámetros se configuran en la simulación y otros cinco se configuran a partir de los cuatro primeros y es por defecto. Se utiliza en los *scripts* principales MainPDSCH y MainPUSCH.

- `SubcarrierSpacing`, SCS: 15, 30, 60, 120 y 240 KHz.
- `NcellID`, Identificador de celda de la capa física: entero entre 0 y 1007.
- `CyclicPrefix`, Prefijo Cíclico: '*Normal*' o '*Extended*'. El prefijo cíclico extendido solo se usa con un SCS de 60 KHz.

- NSizeGrid, Número de *resource blocks* en una portadora de *resource grid*: entero entre 1 y 275.
- SlotsPerSubframe, es el número de *slots* por una subtrama de 1 ms: 1, 2, 4, 8 y 16. Se configura de acuerdo con los valores de la propiedad 'SubcarrierSpacing': 15, 30, 60, 120 y 240, respectivamente.
- SlotsPerFrame, es el número de *slots* por una trama de 10ms: 10, 20, 40, 80, 160 y 240. Se configura basada en los valores de la propiedad 'SubcarrierSpacing': 15, 30, 60, 120 y 240, respectivamente.
- NSlot, es un número no negativo utilizado para simulación en Matlab. Se utiliza para configurar un número mayor de *slots* por trama.
- NStartGrid, indica el comienzo del *resource grid*, es un número entero entre 0 y 2199. Es un parámetro heredado de la capa superior.
- SymbolsPerSlot, es una propiedad de lectura, ya que se especifica como 14 para prefijo cíclico normal o 12 para prefijo cíclico extendido. Se basa en la propiedad 'CyclicPrefix'.

Número de identidad de la celda (N_{ID}^{cell}) de la capa física, especificado como un número entero de 0 a 1007. Se utiliza en señales de sincronización (acceso inicial), para el PSS y SSS. También se lo conoce como PCID. Se compone de dos partes.

- $N_{ID}^{(1)}$ = Señales de sincronización Secundaria (SSS) y está en el rango de {0, 1....335}.
- $N_{ID}^{(2)}$ = Señales de Sincronización Primaria (PSS) y está en el rango {0, 1, 2}.

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)} \quad (2.13)$$

2.2.2. nrCDLChannel

Configura una señal de entrada que pasa por un modelo de canal CDL para obtener una señal deteriorada. El objeto tiene varios parámetros, a continuación, se describen los que se configuran en la simulación [55]. Se utiliza en los *scripts* principales MainPDSCH y MainPUSCH.

- DelayProfile, perfil de retardo CDL: CDL-A, CDL-B, CDL-C, CDL-D y CDL-E. Se especifican en la sección 1.4.6.2.
- DelaySpread, retardo RMS deseado en segundos, para más información consultar TR 38.901 Sección 7.7.3, Tablas 7.7.3-1 y 7.7.3-2.
- SampleRate, frecuencia de muestreo de la señal de entrada especificada en Hz. Parámetro creado por defecto y obtenido de la función nrOFDMInfo.
- TransmitAntennaArray, es una estructura que contiene características del panel de antenas para la transmisión. El único parámetro de la estructura utilizado en la simulación es la dimensión del arreglo. Se obtiene a partir del número de antenas ingresados para la simulación. Se genera en la función del programa 'hArrayGeometry'.
- ReceiveAntennaArray, similar al 'TransmitAntennaArray' pero configurada para antenas de recepción.
- MaximumDopplerShift, frecuencia *Doppler* máxima expresada en Hz.

2.2.2.1. Uso del objeto CDL

Después de haber creado el objeto, varios parámetros se colocan por defecto, ya que dependen de los parámetros previamente establecidos. Una vez completada la configuración del objeto se lo asigna a una variable, la cual se convierte en una función parametrizable descrita a continuación.

```
cdl = nrCDLChannel
[signalOut,pathGains,sampleTimes] = cdl(signalIn)
```

Elementos de entrada:

- signalIn: es una señal modulada, salida de nrOFDMModulate.

Elementos de salida:

- signalOut: es la señal de salida que pasó por el canal CDL, es decir es una señal deteriorada.
- pathGains: es un vector con las ganancias de la ruta del canal MIMO del proceso de desvanecimiento. Retorna una matriz 4D $N_{cs} \times N_{p} \times N_{t} \times N_{r}$ donde N_{p} es el número de rutas, N_{cs} es el número de instantáneas del canal, N_{t} es el número de antenas de transmisión y N_{r} es el número de antenas de recepción.

- `sampleTimes`: devuelve los tiempos de muestreo de las instantáneas del canal. Es una matriz que tiene la dimensión `Ncsx1`.

2.2.3. nrTDLChannel

Configura una señal de entrada que pasa por un modelo de canal TDL para obtener una señal deteriorada. El objeto tiene varios parámetros, a continuación, se describen los que se configuran en la simulación, similar al objeto de CDL [56]. La principal diferencia es que no utiliza un arreglo de antenas si no antenas por separado. Se utiliza en los *scripts* principales `MainPDSCH` y `MainPUSCH`.

- `DelayProfile`, perfil de retardo TDL: TDL-A, TDL-B, TDL-C, TDL-D y TDL-E. Se especifican en la sección 1.4.6.1.
- `DelaySpread`, retardo RMS deseado en segundos, para más información consultar TR 38.901 Sección 7.7.3 y Tablas 7.7.3-1 y 7.7.3-2.
- `SampleRate`, frecuencia de muestreo de la señal de entrada especificada en Hz.
- `NumTransmitAntennas`, número de antenas de transmisión.
- `NumReceiveAntennas`, número de antenas de recepción.
- `MaximumDopplerShift`, frecuencia *Doppler* máxima en Hz.

2.2.3.1. Uso del objeto TDL

Después de haber creado el objeto, varios parámetros se colocan por defecto, ya que dependen de los parámetros previamente establecidos. Una vez completada la configuración del objeto se lo asigna a una variable, la cual se convierte en una función parametrizable descrita a continuación.

```
tdl = nrTDLChannel
[signalOut,pathGains,sampleTimes] = tdl(signalIn)
```

Elementos de entrada:

- `signalIn`: es una señal modulada, salida de `nrOFDMModulate`.

Elementos de salida:

- `signalOut`: es la señal de salida que pasó por el canal TDL, es decir es una señal deteriorada.

- `pathGains`: es un vector con las ganancias de la ruta del canal MIMO del proceso de desvanecimiento. Retorna una matriz 4D $N_s \times N_p \times N_t \times N_r$ donde N_p es el número de rutas, N_s es el número de muestras, N_t es el número de antenas de transmisión y N_r es el número de antenas de recepción.
- `sampleTimes`: devuelve los tiempos de muestreo de las instantáneas del canal. Es una matriz que tiene la dimensión $N_s \times 1$.

2.2.4. nrULSCH

Es un objeto del sistema del canal compartido *uplink* (ULSCH). Este objeto toma un bloque de transporte y lo procesa a través de los componentes del canal compartido de enlace ascendente [57]. Se utiliza únicamente en PUSCH en la función `ProcessingLoopPUSCH`. El objeto consta de cuatro parámetros, pero se configuran únicamente dos que se muestran a continuación, los otros dos quedan por defecto.

- `MultipleHARQProcesses`: habilita los múltiples procesos HARQ puede tomar los valores `'true'` o `'false'`. En la simulación se establece como `'true'`
- `TargetCodeRate`: especifica el TCR. Valor entre 0 y 1.

2.2.4.1. Uso del objeto nrULSCH

Una vez creado el objeto, se lo asigna a una variable, la cual se convierte en una función parametrizable descrita a continuación. La función a partir de un bloque de transporte da como resultado un codeword. Realiza los procesos de CRC, segmentación del bloque de código y adición del CRC, codificación de canal, adaptación de tasas y concatenación de bloques código.

```
encUL = nrULSCH
codedBits = encUL(mod,nLayers,outlen,rv,harqID)
```

Elementos de entrada:

- `mod`: especifica el esquema de modulación, `'pi/2-BPSK'`, `'QPSK'`, `'16QAM'`, `'64QAM'`
- `nLayers`: número de capas, es un escalar entre 1 y 4.
- `outlen`: es un entero positivo que especifica la longitud de la *codeword* de salida en *bits*.
- `rv`: es un entero positivo entre 0 y 3, para especificar que “Versión de Redundancia” (RV, *Redundancy Version*) se utilizará en la transmisión.

- harqID: es un entero positivo entre 0 y 15 que especifica el ID del proceso HARQ utilizado en el actual bloque de transporte. Se utiliza únicamente cuando se habilita la variable 'MultipleHARQProcesses'.

Elementos de salida:

- codedBits: es un vector columna binario de longitud 'outlen'. La salida es un *codeword*.

2.2.5. nrULSCHDecoder

Crea un objeto del sistema de decodificación del canal compartido del enlace ascendente [58]. Se utiliza solo en PUSCH y a continuación se describen sus parámetros configurables en el programa. Se utiliza únicamente en PUSCH en la función ProcessingLoopPUSCH. Realiza el proceso inverso del nrULSCH.

- MultipleHARQProcesses: habilita los múltiples procesos HARQ puede tomar los valores 'true' o 'false'.
- TargetCodeRate: especifica el TCR. Valor entre 0 y 1.
- LDPCDecodingAlgorithm: es el algoritmo de decodificación LDPC, puede ser, 'Belief propagation', 'Layered belief propagation', 'Normalized min-sum' y 'Offset min-sum'.
- MaximumLDPCIterationCount: es el número de iteraciones máximas de decodificación LDPC.
- TransportBlockLength: longitud del bloque de transporte decodificado en *bits*. Es el resultado de la salida de la función nrTBS.

2.2.5.1. Uso del objeto nrULSCHDecoder

Una vez creado el objeto, se lo asigna a una variable, la cual se convierte en una función parametrizable descrita a continuación.

```
decUL = nrULSCHDecoder
trblk = decUL(softbits,mod,nLayers,rv,harqID)
```

Elementos de entrada:

- softbits: es un vector columna de *bits* correspondientes al bloque de transporte codificado UL-SCH, es un vector real. Se lo obtiene de la primera variable de salida de nrPUSCHDecode.
- mod: especifica el esquema de modulación, 'pi/2-BPSK','QPSK','16QAM','64QAM'

- `nLayers`: número de capas, es un escalar entre 1 y 4.
- `rv`: es un entero positivo entre 0 y 3 para especificar que RV se utilizará en la transmisión.
- `harqID`: es un entero positivo entre 0 y 15 que especifica el ID del proceso HARQ utilizado en el actual bloque de transporte. Se utiliza únicamente cuando se habilita la variable 'MultipleHARQProcesses'.

Elementos de salida:

- `trblk`: es un vector columna binario de longitud del parámetro 'TransportBlockLength', que representa los *bits* decodificados.

2.2.6. nrDLSCH

Es un objeto del sistema del canal compartido *downlink* (DLSCH). Este objeto toma un bloque de transporte y lo procesa a través de los componentes del canal compartido de enlace descendente [59]. Se utiliza únicamente en PDSCH en la función ProcessingLoopPDSCH. El objeto consta de tres parámetros, pero se configuran únicamente dos que se muestran a continuación, el otro queda por defecto.

- `MultipleHARQProcesses`: habilita los múltiples procesos HARQ puede tomar los valores 'true' o 'false'.
- `TargetCodeRate`: especifica el TCR. Valor entre 0 y 1.

2.2.6.1. Uso del objeto nrDLSCH

Una vez creado el objeto, se lo asigna a una variable, la cual se convierte en una función parametrizable descrita a continuación. La función a partir de un bloque de transporte da como resultado una o dos codewords. Realiza los procesos de CRC, segmentación del bloque de código y adición del CRC, codificación de canal, adaptación de tasas y concatenación de bloques código.

```
encDL = nrDLSCH
codedBits = encDL(mod,nLayers,outlen,rv,harqID)
```

Elementos de entrada:

- `mod`: especifica el esquema de modulación, 'QPSK','16QAM','64QAM','256QAM'.
- `nLayers`: número de capas, es un escalar entre 1 y 4.

- outlen: es un entero positivo que especifica la longitud de la *codeword* de salida en *bits*.
- rv: es un entero positivo entre 0 y 3, para especificar que RV se utilizará en la transmisión. Si se tiene dos *codewords* se especifican dos enteros positivos.
- harqID: es un entero positivo entre 0 y 15 que especifica el ID del proceso HARQ utilizado en el actual bloque de transporte. Se habilita únicamente cuando se configura como *'true'* la variable *'MultipleHARQProcesses'*.

Elementos de salida:

- codedBits: es un vector columna binario de longitud *'outlen'*. La salida puede ser uno o dos *codewords*.

2.2.7. nrDLSCHDecoder

Crea un objeto del sistema de decodificación del canal compartido del enlace descendente [60]. Se utiliza solo en PDSCH y a continuación se describen sus parámetros configurables en el programa. Se utiliza únicamente en PUSCH en la función ProcessingLoopPDSCH. Realiza el proceso inverso del nrDLSCH.

- MultipleHARQProcesses: habilita los múltiples procesos HARQ puede tomar los valores *'true'* o *'false'*.
- TargetCodeRate: especifica el TCR. Valor entre 0 y 1.
- LDPCDecodingAlgorithm: es el algoritmo de decodificación LDPC, puede ser, *'Belief propagation'*, *'Layered belief propagation'*, *'Normalized min-sum'* y *'Offset min-sum'*.
- MaximumLDPCIterationCount: es el número de iteraciones máximas de decodificación LDPC.
- TransportBlockLength: longitud del bloque de transporte decodificado en *bits*. Es el resultado de la salida de la función nrTBS.

2.2.7.1. Uso del objeto nrDLSCHDecoder

Una vez creado el objeto, se lo asigna a una variable, la cual se convierte en una función parametrizable descrita a continuación.

```
decDL = nrDLSCHDecoder
trblk = decDL(softbits,mod,nLayers,rv,harqID)
```

Elementos de entrada:

- `softbits`: es un vector columna o un conjunto de dos vectores columna de *bits* correspondientes a los bloques de transporte codificados DL-SCH, se compone de valores reales. Se lo obtiene de la primera variable de salida de `nrPDSCHDecode`.
- `mod`: especifica el esquema de modulación, 'QPSK','16QAM','64QAM','256QAM'.
- `nLayers`: número de capas, es un escalar entre 1 y 4.
- `rv`: es un entero positivo entre 0 y 3, para especificar que RV se utilizará en la transmisión.
- `harqID`: es un entero positivo entre 0 y 15 que especifica el ID del proceso HARQ utilizado en el actual bloque de transporte. Se habilita únicamente cuando se configura como *'true'* la variable `'MultipleHARQProcesses'`.

Elementos de salida:

- `trblk`: es un vector columna o conjunto de dos vectores columna binario de longitud del parámetro `'TransportBlockLength'`, que representa los *bits* decodificados.

2.3. CÓDIGO PARA PDSCH

El código consta de 18 *scripts*. El script principal es `'MainPDSCH'`, en este *script* se llama a otras funciones y además se establecen los parámetros configurables de la simulación.

2.3.1. FUNCIONES PRINCIPALES

A continuación, se describen las tres funciones de mayor importancia en el código, `'MainPDSCH'`, `'ParametersPDSCH'` y `'ProcessingLoopPDSCH'`.

2.3.1.1. MainPDSCH

Es el *script* principal donde se llaman a las otras funciones. En el *script* se realizan las configuraciones de los parámetros variables de la simulación y se asignan otros parámetros adicionales. Otros parámetros que se encuentran fijos en la simulación se configuran en la función `'ParametersPDSCH'`. Para facilitar la comprensión del código se ha dividido en partes, la cual se encuentra descrita en la Figura 2.2. A continuación, se describe cada bloque del diagrama.

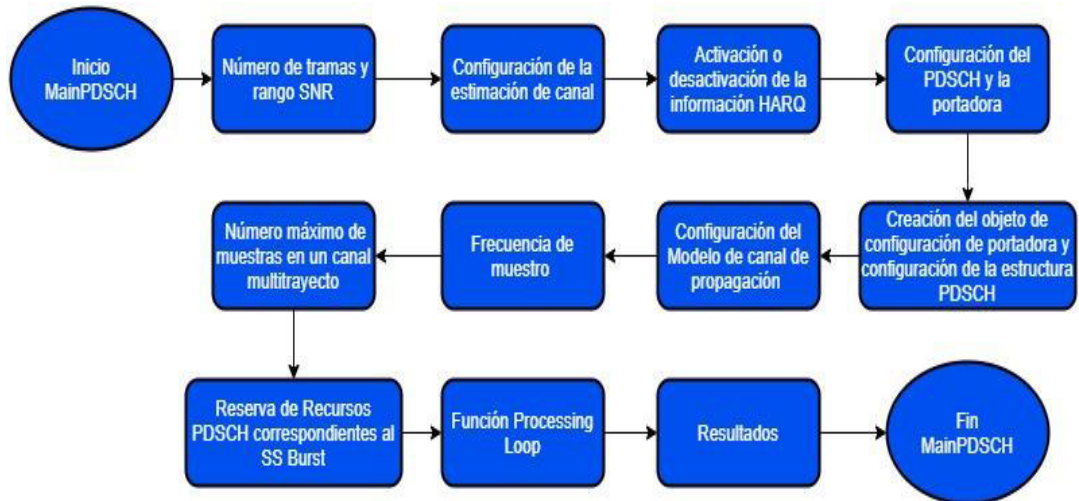


Figura 2.2 Descripción del *script* 'MainPDSCH'.

Número de tramas y rango SNR

Se tienen tres variables; como el nombre lo indica en este bloque se realiza la configuración del número de tramas utilizadas en la simulación, el rango de SNR y se crea una variable para almacenar los valores posteriormente configurados.

Configuración de la estimación de canal

Es una variable que va a estar configurada como *'true'* para todas las simulaciones, esto quiere decir que no se utilizará la estimación generada por las señales DM-RS. Se usará una estimación perfecta del canal.

Activación o desactivación de la información HARQ

Se tiene una variable la cual imprime la información generada por los procesos HARQ si está configurada como *'true'*. Para la simulación la variable se configura como *'false'*.

Configuración del PDSCH y la portadora

Aquí se establecen los cinco parámetros variables de la simulación. Se configuran el número de *resource blocks*, el SCS, el tipo de modulación, el número de antenas tanto en transmisión como en la recepción y el modelo de canal escogido.

Además, se configura el prefijo cíclico que permanecerá en *'normal'* y el identificador de celda. Además, se llama a las funciones del programa que son: *'ParametersPDSCH'*, *'SSBurstconfiguration'*, *'validateNLayers'* y *'validateNumberAnts'*.

Creación del objeto de configuración de portadora y configuración de la estructura PDSCH

Se crea el objeto 'nrCarrierConfig' y se le establecen los parámetros configurados previamente. Además, se configura el RNTI y la sobrecarga generada por PT-RS que va a tener un valor de '0' ya que se deshabilita PT-RS para las simulaciones implementadas.

Configuración del Modelo de canal de propagación

En este bloque se crea el objeto para la configuración del canal de propagación. Puede ser el canal CDL (nrCDLChannel) o TDL (nrTDLChannel).

Frecuencia de muestreo

Se utiliza la función 'nrOFDMInfo' para obtener la frecuencia de muestreo del programa.

Número máximo de muestras en un canal multitrayecto

Se obtiene el número máximo de muestras con retraso que se tiene en una componente multitrayecto del canal. Se puede calcular a partir del canal con mayor retardo y el retardo que se obtiene de la implementación del filtro del canal. Es un valor necesario para obtener la señal recibida.

Reserva de Recursos PDSCH correspondientes al SS *Burst*

En esta sección se reservan los recursos SS *Burst*. Se crea la estructura SS *Burst*, se asigna los valores de identificador de celda y la frecuencia de muestreo.

Posteriormente se utiliza la función 'hSSBurstInfo' para obtener valores adicionales de la configuración del SS *Burst*.

Se asignan las subportadoras y símbolos transmitidos en el SS *Burst* mediante la función 'mapNumerology' a los PRBs.

Finalmente se configura la PDSCH para que los recursos de la transmisión no se superpongan al SS *Burst*.

Función ProcessingLoopPDSCH

Es una función que será descrita posteriormente en la cual se calcula el valor del rendimiento en cada punto SNR configurado para las simulaciones.

Resultados

En este bloque se muestra las medidas del rendimiento obtenidas de cada valor de SNR. Además de que se realiza una gráfica en función del valor de SNR (dB) con el rendimiento (Mbps) y se almacenan los valores obtenidos.

Para ver la descripción línea a línea del código acudir al Algoritmo 1 del Anexo B y para visualizar el diagrama de flujo acudir al Anexo C.

2.3.1.2. ParametersPDSCH

Es una función en la cual se establecen parámetros que permanecerán como fijos en la simulación, pero pueden ser cambiados en futuros usos si se lo requiere para otras pruebas.

La configuración de esta función se divide en grupos, la Figura 2.3 muestra la distribución.

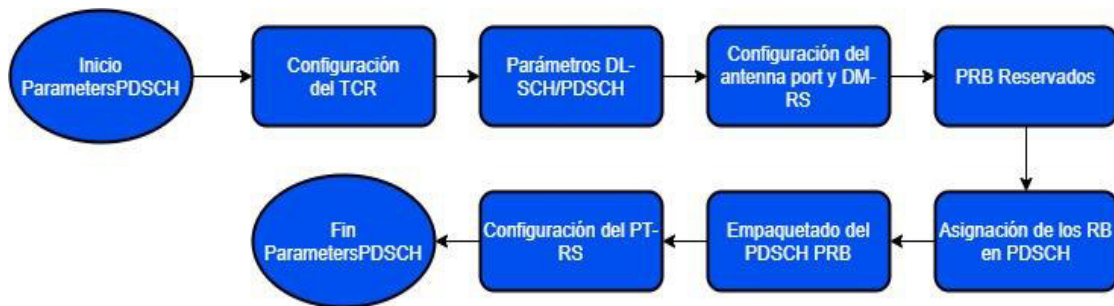


Figura 2.3 Descripción de la función 'ParametersPDSCH'

'ParametersPDSCH' configura parámetros adicionales del canal de transporte DL-SCH, del canal físico PDSCH, configuración del DM-RS y del PT-RS.

```
simParameters = ParametersPDSCH(simParameters, modulation, NRxAnts, NTxAnts)
```

Elementos de entrada:

- simParameters: es una estructura, que almacena los valores previamente ya asignados.
- modulation: variable que almacena el esquema de modulación.
- NRxAnts variable que almacena el número de antenas de recepción.
- NTxAnts: variable con el número de antenas de transmisión.

Elementos de salida:

- simParameters: es una estructura en la cual se almacenan parámetros de configuración de PDSCH.

A continuación, se describe cada bloque de la función.

Configuración del TCR

En el bloque se configura automáticamente el TCR de acuerdo con la modulación establecida en 'MainPDSCH'.

Parámetros DL-SCH/PDSCH

En el bloque se asignan los PRBs al PDSCH, los símbolos PDSCH en cada *slot*, se habilitan los procesos HARQ, se establece el número de capas (máximo 4), el número *codewords* (1), se asigna el tipo de esquema de modulación, el número de antenas de transmisión y recepción.

Configuración del *antenna port* y DM-RS

Se realiza la configuración de la señal de referencia DM-RS y se asigna el *scrambling identity*.

PRB Reservados

Se reservan ciertos PRBs. Esto se lo hace para un uso futuro, aún no especificado.

Asignación de los *resource blocks* en PDSCH

En esta sección se habilita o se deshabilita la asignación de recursos de "Intercalado" (*interleaved*). Es un parámetro opcional y en la simulación se encuentra desactivado.

Empaquetado del PDSCH PRB

Es una variable utilizada para el cálculo de las matrices de precodificación Grupo de Bloques de Recursos Físicos (PRG, *Physical Resource Block Group*) de acuerdo con la función 'getPrecodingMatrix'.

Configuración del PT-RS

Se realiza la configuración de la señal de referencia PT-RS. Para la simulación las señales PT-RS se encuentran deshabilitadas.

Para ver la descripción línea a línea del código acudir al Algoritmo 2 del Anexo B y para visualizar el diagrama de flujo acudir al Anexo C.

2.3.1.3. ProcessingLoopPDSCH

Es la función donde se realiza el cálculo del rendimiento, tiene una gran cantidad de datos que procesar. La función comienza con una configuración de parámetros para la simulación, posteriormente hay un bucle donde se recorre cada valor SNR y dentro del bucle existe otro bucle el cual recorre cada *slot* de las tramas configuradas.

```
[snrIn, simThroughput, maxThroughput, nTxAnts, nRxAnts, carrier_init, simParameters  
] =  
ProcessingLoop(carrier, channel, channelType, maxChDelay, nRxAnts, nTxAnts, pdsch, p  
erfectChannelEstimator, simParameters, snrIn, ssbInfo, ssburst, waveformInfo, Xoh_P  
DSCH, displaySimulationInformation)
```

Elementos de entrada:

Todos los elementos de entrada fueron configurados en la función 'MainPDSCH'.

- carrier: es un objeto configurado de la salida de 'nrCarrierConfig'. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- channel: objeto configurado con el canal de desvanecimiento seleccionado. Se configura en 'nrCDLChannel' o 'nrTDLChannel'.
- channelType: variable con el tipo de canal seleccionado.
- maxChDelay: variable con el número máximo de muestras que se retrasan por componente en un canal multitrayecto.
- nRxAnts: variable con el número de antenas de recepción.
- nTxAnts: variable con el número de antenas de transmisión.
- pdsch: estructura con parámetros para la simulación que se obtiene en 'MainPDSCH' y la función 'ParametersPDSCH'.
- perfectChannelEstimator: variable lógica que controla la estimación y sincronización de los canales.
- simParameters: estructura que almacena parámetros para la simulación.
- snrIn: variable que almacena el rango de SNR.
- ssbInfo: estructura que almacena parámetros para la simulación.
- ssburst: estructura que almacena parámetros para la simulación.
- waveformInfo: estructura que almacena parámetros para la simulación.
- Xoh_PDSCH: variable que configura la sobrecarga adicional cuando se habilita PT-RS. En la simulación esta variable permanece en 0.
- displaySimulationInformation: variable lógica que controla la impresión de los valores de información de simulación del proceso HARQ para cada subtrama.

Elementos de salida:

- snrIn: valor SNR usado para la simulación
- simThroughput: valor del rendimiento en cada punto SNR.
- maxThroughput: valor del máximo rendimiento en cada punto SNR.
- nTxAnts: variable con el número de antenas de transmisión.
- nRxAnts: variable con el número de antenas de recepción.
- carrier_init: variable con parámetros configurados dentro de la función.
- simParameters: variable con parámetros configurados dentro de la función.

A continuación, se describe el código de la función 'ProcessingLoopPDSCH' mediante un diagrama de bloques presentado en la Figura 2.4. Además, cada bloque es brevemente descrito.

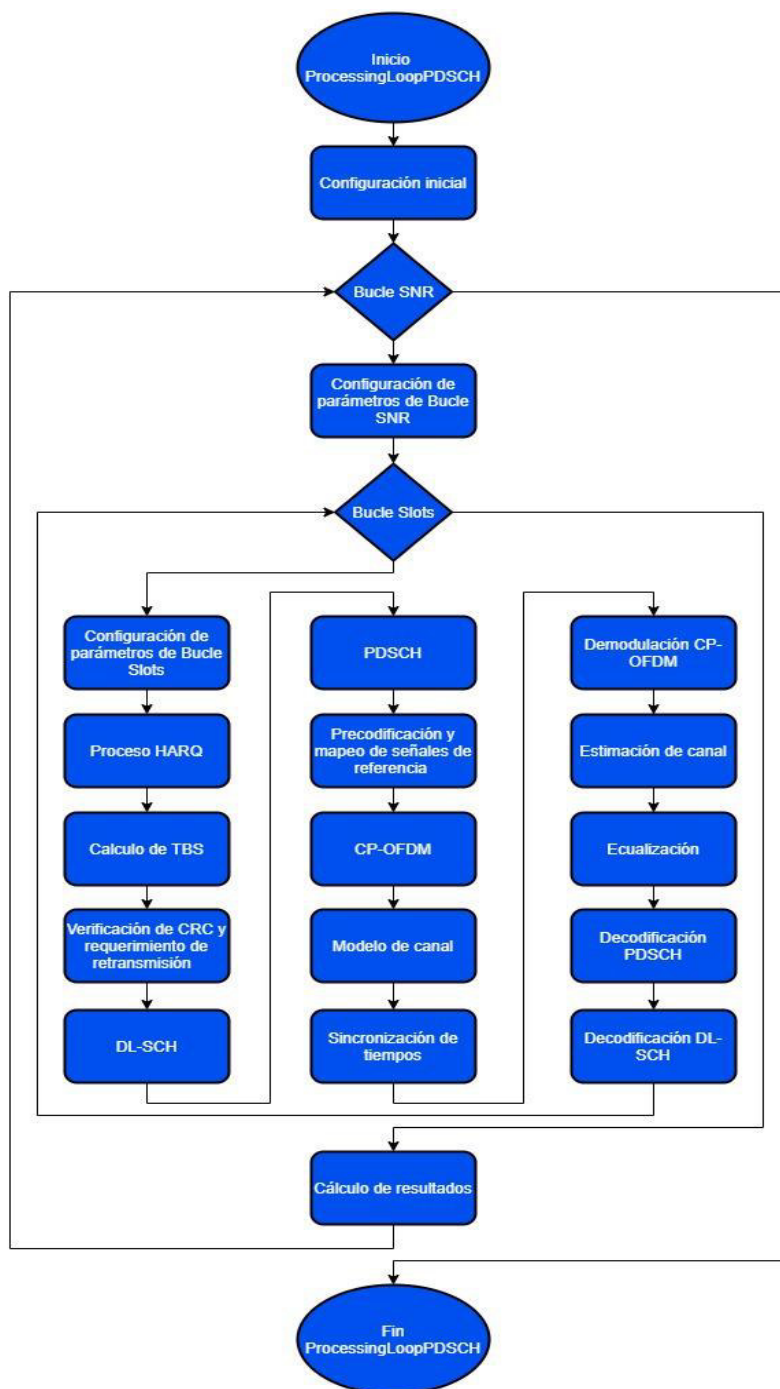


Figura 2.4 Diagrama general de la función 'ProcessingLoopPDSCH'

Configuración inicial

En este primer bloque se realizan configuraciones y asignaciones necesarias para la simulación.

- Creación de matrices de ceros encargadas de almacenar el rendimiento.
- Configuración de la secuencia de la RV necesaria para los procesos HARQ.

- Creación del objeto del sistema codificador (nrDLSCH), habilitación del proceso HARQ y establecimiento del TCR.
- Creación del objeto del sistema decodificador (nrDLSCHDecoder), habilitación del proceso HARQ, establecimiento del TCR, establecimiento del algoritmo de decodificación (*'Layered belief propagation'*) y configuración del número máximo del contador de iteraciones LDPC.
- Creación de variables temporales utilizadas dentro del bucle SNR.
- Asignación del número de tramas y número de *codewords* que previamente ya previamente establecidos.

Bucle SNR

El siguiente bucle recorre cada uno de los puntos SNR establecidos en el *script* 'MainPDSCH'. A continuación, se presenta un diagrama con los bloques del bucle SNR en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Diagrama de bloques del bucle SNR

Configuración de parámetros de Bucle SNR

En este bloque se asignan parámetros utilizados por el Bucle *Slots*, que deben ser restablecidos para que no se generen valores duplicados. A continuación, se describen que parámetros son establecidos.

- Establecimiento de una semilla para la generación de números aleatorios.
- Actualización de las variables temporales.
- Creación de variables para el almacenamiento de los resultados de las funciones 'getPathFilters' y 'hSSBurst'.
- Establecimiento del valor de SNR.
- Impresión de las características principales de la simulación.
- Inicialización de variables utilizadas en la simulación; el número de *bits* recibidos con éxito por transmisión y el número de *bits* de información recibidos por transmisión.
- Especificación del número máximo de proceso HARQ.

- Inicialización de los procesos HARQ mediante la función 'hNewHARQProcesses' e inicialización del contador de los procesos HARQ.
- Restablecimiento del canal para que cada punto experimente los mismos efectos de canal.
- Establecimiento del número total de *slots* en un periodo de simulación.
- Creación de una estructura encargada de almacenar el número de *resource blocks*, el prefijo cíclico y el SCS.
- Establecimiento del índice de *SS Burst*.
- Obtención de una matriz de precodificación para ser usada en la primera transmisión del primer *transport block*. Se obtiene con las funciones 'getInitialChannelEstimate' y 'getPrecodingMatrix'.
- Inicialización del desplazamiento en tiempo.

Bucle *Slots*

El siguiente bucle recorre cada uno de los *slots* de las tramas destinadas para la simulación.

A continuación, se presenta un diagrama de bloques con los procesos seguidos en la simulación por el Bucle *Slots* en la Figura 2.6. Cada bloque es descrito posteriormente.

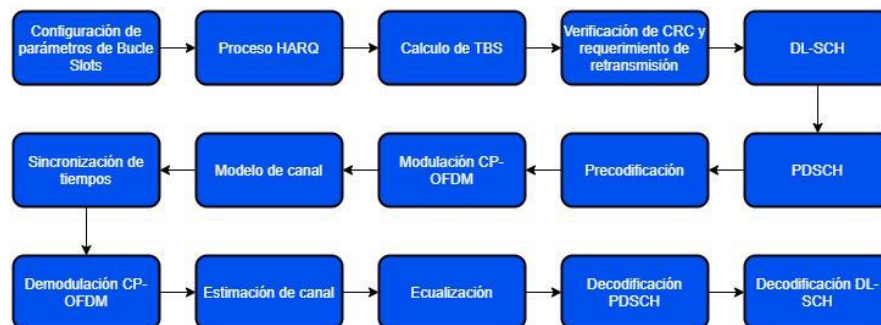


Figura 2.6 Diagrama general del Bucle *Slots*

Configuración inicial

En este bloque se comienza por establecer el número de *slots* en el cual se está trabajando y se genera un *SS Burst* cuando es necesario.

Proceso HARQ

Se obtiene el índice del proceso HARQ actual y se actualiza la información de RV.

Cálculo de TBS

Se calcula el TBS con la función nrTBS para el *codeword* de cada *slot*.

Además, se generan los símbolos e índices DM-RS y PT-RS con la función 'hPDSCHResources'.

Verificación de CRC y requerimiento de retransmisión

En este bloque se realiza la verificación del CRC de la transmisión anterior para un proceso HARQ. Además, determina si se requiere una retransmisión. En el caso de no requerir retransmisión se generan nuevos datos.

DL-SCH

Realización de la codificación de los *transport blocks* llamando al objeto 'nrDLSCH'. Transporta los datos de usuario, este bloque se incluye la codificación LDPC que permite el uso de transmisiones en paralelo (capas). Obtiene un bloque de transporte y da como salida una o dos *codewords*.

PDSCH

Se realiza la aleatorización/codificación (*Scrambling*), modulación de los *bits*, el mapeo que consiste en una operación que pasa el *codeword* al número de capas establecidas en la simulación y se realiza la precodificación de los datos de usuario (consiste en una operación que mapea las capas a tantas o más paneles de antenas) utilizando la función 'nrPDSCH'.

Se generan los símbolos PDSCH, para mapearlos en los "Bloques de recursos virtuales" (VRB, *Virtual Resource Blocks*) y se finaliza mapeándolos en los PRB.

Precodificación y mapeo de señales de referencia

Se mapean los símbolos e índices en los VRB y se finaliza mapeándolos en los PRB.

Se realiza la precodificación de las señales de referencia PT-RS y DM-RS.

Modulación CP-OFDM

Se realiza la modulación OFDM con la función 'nrOFDMModulate' y se añade el SS *Burst* apropiado.

Modelo de canal

Los datos pasan por el modelo de canal escogido y además se añade ruido gaussiano.

Sincronización de tiempos

Se realiza la estimación de tiempo perfecta con la función 'nrPerfectTimingEstimate'.

Demodulación CP-OFDM

Se realiza la demodulación OFDM con la función 'nrOFDMDemodulate'.

Estimación de canal

Se realiza una estimación de canal perfecta con la función 'nrPerfectChannelEstimate' para poder sincronizar la onda recibida, con la ayuda de la salida de la sincronización de tiempos.

Ecuación

Se realiza una ecuación con la función 'nrEqualizeMMSE'.

Decodificación PDSCH

Se realiza la decodificación el canal físico con la función 'nrPDSCHDecode' de todos los pares de antenas de transmisión y recepción, junto con la estimación del ruido.

Decodificación DL-SCH

Se realiza la decodificación con el objeto 'nrDLSCHDecoder'. Almaceno los valores para calcular el rendimiento después de calcular el CRC. Además, se actualiza el contador de procesos HARQ.

Cálculo de resultados

Se realiza un promedio para calcular el máximo rendimiento posible y el rendimiento en cada punto SNR simulado.

Para ver la descripción línea a línea del código acudir al Algoritmo 3 del Anexo B y para visualizar el diagrama de flujo acudir al Anexo C.

2.3.2. FUNCIONES SECUNDARIAS

2.3.2.1. getInitialChannelEstimate

Es una función que permite obtener la estimación del canal antes de la primera transmisión. Puede ser usado para la obtención de la matriz de precodificación para el primer *slot*. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en la función ProcessingLoopPDSCH.

```
estChannelGrid = getInitialChannelEstimate(carrier,nTxAnts,channel)
```

Elementos de entrada:

- carrier: es un objeto configurado de la salida de 'nrCarrierConfig'. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- nTxAnts: variable con el número de antenas de transmisión.
- channel: objeto configurado con el canal de desvanecimiento seleccionado. Se configura en 'nrCDLChannel' o 'nrTDLChannel'.

Elementos de salida:

- estChannelGrid: es un arreglo complejo de cuatro dimensiones donde se obtiene la estimación del canal.

2.3.2.2. getPrecodingMatrix

Es una función que calcula las matrices de precodificación para todos los PRG de la portadora que se superponen a la asignación de PDSCH. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en la función ProcessingLoopPDSCH.

```
wtx = getPrecodingMatrix(carrier,pdsch,hestGrid)
```

Elementos de entrada:

- carrier: es un objeto configurado de la salida de 'nrCarrierConfig'. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- pdsch: estructura con parámetros para la simulación que se obtiene en 'MainPDSCH' y la función 'ParametersPDSCH'.
- hestGrid: es un arreglo de cuatro dimensiones con la estimación de canal, que se obtiene de la salida de la función 'getInitialChannelEstimate'.

Elementos de salida:

- wtx: matriz de precodificación para un *slot* de RxP. Donde R es el número de antenas de recepción y P es el número de antenas de transmisión.

2.3.2.3. hArrayGeometry

Es una función utilizada únicamente para la configuración del modelo CDL. Convierte el número total de antenas en una geometría específica de panel de antenas es decir permite crear un arreglo de antenas a partir del número de antenas ingresado. Para visualizar el

diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en los *scripts* principales MainPDSCH y MainPUSCH.

```
[txArrayGeometry,rxArrayGeometry] = hArrayGeometry(nTxAnts,nRxAnts,varargin)
```

Elementos de entrada:

- nTxAnts: variable con el número de antenas de transmisión.
- nRxAnts: variable con el número de antenas de recepción.
- varargin: es una variable que permite a la función aceptar cualquier número de argumentos de entrada.

Elementos de salida:

- txArrayGeometry: es una variable de dimensión 1x5. Para la configuración del panel se tiene el siguiente formato de fila: [M N P Mg Ng], donde:

M: número de filas en cada panel de antena

N: número de columnas en cada panel de antena

P: número de polarizaciones (1 o 2)

Mg: número de filas en el conjunto de paneles

Ng: número de columnas en el conjunto de paneles

A continuación, se presenta la matriz con los valores de los cinco parámetros de fila que pueden tomar dependiendo del número de antenas.

M N P Mg Ng

(1 1 1 1 1) → 1 antena

(1 1 2 1 1) → 2 antenas

(2 1 2 1 1) → 4 antenas

(2 2 2 1 1) → 8 antenas

(2 4 2 1 1) → 16 antenas

(4 4 2 1 1) → 32 antenas

(4 4 2 1 2) → 64 antenas

(4 8 2 1 2) → 128 antenas

(4 8 2 2 2) → 256 antenas

(8 8 2 2 2) → 512 antenas

(8 16 2 2 2) → 1024 antenas

Por ejemplo, si el número de antenas ingresado es 64 la variable de salida `txArrayGeometry` será el vector [4 4 2 1 2].

Al multiplicar cada uno de los argumentos de la fila debo obtener el número total de antenas.

- `rxArrayGeometry`: es una variable de dimensión 1x5. Se configura de la siguiente manera: el número de filas en el sistema de antenas es $n_{RxAnts} / 2$, el número de columnas en el sistema de antenas es 1, el número de polarizaciones es 2, el número de paneles del sistema de filas es 1 y el número de paneles del sistema de columnas es 1.

2.3.2.4. `hNewHARQProcesses`

Es una función que crea un nuevo proceso HARQ. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en las funciones `ProcessingLoopPDSCH` y `ProcessingLoopPUSCH`.

```
harqProcesses = hNewHARQProcesses(numHARQProcesses,rvsequence,ncw)
```

Elementos de entrada:

- `numHARQProcesses`: es una variable que establece el número máximo de procesos HARQ a realizar.
- `rvsequence`: vector que almacena la secuencia de RV.
- `ncw`: variable que almacena el número de *codewords*.

Elementos de salida:

- `harqProcesses`: es una estructura que genera un conjunto de nuevos procesos HARQ.

2.3.2.5. `hPDSCHResources`

Es una función que devuelve los índices de los RE para una transmisión PDSCH, junto con los asociados PDSCH DM-RS y PT-RS, para una asignación de tiempo (símbolos) y frecuencia (PRBs) dados de la configuración de PDSCH, DM-RS y PT-RS. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en la función `ProcessingLoopPDSCH`.

```
[pdschIndices,dmrsIndices,dmrsSymbols,ptrsIndices,ptrsSymbols,info] =  
hPDSCHResources(gnb,pdsch)
```

Elementos de entrada:

- `gnb`: estructura configurada con los parámetros de número de *resource blocks*, prefijo cíclico y SCS.
- `pdsch`: estructura con parámetros para la simulación que se obtiene en 'MainPDSCH' y la función 'ParametersPDSCH'.

Elementos de salida:

- `pdschIndices`: matriz de índices de PDSCH. De dimensión `indxR`, donde `ind` es el número de índices y `R` es el número de antenas de recepción.
- `dmrsIndices`: matriz de índices DM-RS. De dimensión `indxR`, donde `ind` es el número de índices y `R` es el número de antenas de recepción.
- `dmrsSymbols`: matriz compleja de dimensión `indxR`, donde `ind` es el número de índices y `R` es el número de antenas de recepción.
- `ptrsIndices`: matriz de índices PT-RS. De dimensión `indxR`, donde `ind` es el número de índices y `R` es el número de antenas de recepción. No utilizada en la simulación.
- `ptrsSymbols`: matriz compleja de dimensión `indxR`, donde `ind` es el número de índices y `R` es el número de antenas de recepción. No utilizada en la simulación.
- `info`: es una estructura con información adicional acerca de DM-RS y PT-RS.

2.3.2.6. hPRGPrecode

Es una función que realiza la precodificación para el empaquetado del PDSCH PRG. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en la función `ProcessingLoopPDSCH`.

```
[antsym,antind] = hPRGPrecode(siz,nstartgrid,portsym,portind,F)
```

Elementos de entrada:

- `siz`: es la dimensión de los recursos *Grid* de portadores de dimensión $K \times L \times P$, donde K es el número de subportadoras, L el número de símbolos OFDM y P el número de antenas de transmisión.
- `nstartgrid`: es una variable que indica el *resource block* inicial de los recursos *grid* del portador. Se obtiene del parámetro 'NStartGrid' del objeto 'nrCarrierConfig'.

- portsym: es una matriz de símbolos precodificados de dimensión NRExNLayers, donde NRE es el número de REs y NLayers es el número de capas.
- portind: es una matriz de la misma dimensión que portsym que contiene los índices de los símbolos de portsym.
- F: es un conjunto de dimensión NLayersxPxNPRG, donde NLayers es el número de capas, P es el número de antenas de transmisión y NPRG es el número de PRGs en el portador obtenido de la salida de la función 'getPrecodingMatrix'.

Elementos de salida:

- antsym: es una matriz de tamaño NRExP, donde NRE es el número de elementos de recurso de PDSCH, y P es el número de antenas.
- antind: es una matriz con los índices de antsym, es decir de las mismas dimensiones.

2.3.2.7. hSkipWeakTimingOffset

Es una función que se utiliza cuando la estimación de canal está deshabilitada. Se encarga de omitir las estimaciones de compensación de tiempo con correlación débil. No se utiliza en la simulación. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Es parte de las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

```
offset = hSkipWeakTimingOffset(offset,t,mag)
```

Elementos de entrada:

- offset: variable que almacena el desfase introducido o calculado.
- t: es un escalar que indica el desplazamiento de tiempo estimado obtenido de la primera salida de 'nrTimingEstimate'.
- mag: es la magnitud de correlación expresado en una matriz real de TxNr, donde T es el número de muestras en el dominio del tiempo y Nr es el número de antenas de recepción, que da la magnitud estimada de la respuesta impulso para cada antena. Que se obtiene de la segunda salida de 'nrTimingEstimate'.

Elementos de salida:

- offset: retardo de tiempo del receptor.

2.3.2.8. hSSBurst

Es una función que crea una forma de onda SS *Burst* y una subportadora *grid* dada la estructura de configuración *Burst* (información obtenida de la función *SSBurstconfiguration*). Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en la función *ProcessingLoopPDSCH*.

```
[waveform,grid,info] = hSSBurst(burst)
```

Elementos de entrada:

- *burst*: es una estructura obtenida en 'MainPDSCH' y configurada por la función 'SSBurstconfiguration'. Consta de los parámetros siguientes:
 - *BlockPattern*; asignado de acuerdo con el SCS.
 - *SSBTransmitted*; el mapa de *bits* que indica los bloques transmitidos *Burst*.
 - *SSBPeriodicity*; que indica la periodicidad del SS *Burst*, puede tomar los valores de 5, 10, 20, 40, 80 o 160 ms.
 - *NCellID*; Identificador de celda de la capa física: entero entre 0 y 1007.
 - *SampleRate*; tasa de muestreo.
 - *NFrame*: número de trama.
 - *NHalfFrame*; número de media trama.

Elementos de salida:

- *waveform*: es una matriz de $T \times 1$, donde T es el número de muestras en el dominio del tiempo.
- *grid*: es una matriz de $K \times L$, donde K es el número de subportadoras y L es el número de símbolos OFDM.
- *info*: información sobre la estructura y el contenido *Burst*.

2.3.2.9. hSSBurstInfo

Es una función que crea una estructura con información adicional acerca de la configuración del SS *Burst*. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en el *script* principal *MainPDSCH*.

```
info = hSSBurstInfo(burst)
```

Elementos de entrada:

- `burst`: es una estructura que contiene los siguientes parámetros:
 - `BlockPattern`; asignado de acuerdo con el SCS.
 - `SSBTransmitted`; el mapa de *bits* que indica los bloques transmitidos *Burst*.
 - `SSBPeriodicity`; que indica la periodicidad del SS *Burst*, puede tomar los valores de 5, 10, 20, 40, 80 o 160 ms.
 - `NCellID`; Identificador de celda de la capa física: entero entre 0 y 1007.
 - `SampleRate`; tasa de muestreo.

Elementos de salida:

- `info`: Es la estructura con información adicional de la configuración del SS *Burst*, Los parámetros utilizados de la estructura son: el SCS, los símbolos que ocupan los SS *Blocks*, las portadoras que ocupan los SS *Blocks* y el número máximo de *resources blocks* para transmitir los SS *Burst*.

2.3.2.10. `hUpdateHARQProcess`

Es una función que actualiza la RV del proceso HARQ. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en las funciones `ProcessingLoopPDSCH` y `ProcessingLoopPUSCH`.

```
harqProcess = hUpdateHARQProcess(harqProcess,ncw)
```

Elementos de entrada:

- `harqProcess`: estructura que almacena los procesos HARQ con sus respectivos parámetros.
- `ncw`: variable que almacena el número de *codewords*.

Elementos de salida:

- `harqProcess`: estructura con el campo actualizado del respectivo proceso HARQ.

2.3.2.11. `mapNumerology`

Es una función que mapea la numerología SS *Burst* a la numerología PDSCH. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en el *script* principal `MainPDSCH`.

```
[mappedPRB,mappedSymbols] =  
mapNumerology(subcarriers,symbols,nrbs,nrbt,fs,ft)
```

Elementos de entrada:

- subcarriers: subíndices de fila para un recurso *grid SS Burst*.
- symbols: subíndices de columna para un recurso *grid SS Burst*, es una matriz de Nx4, donde N es el número *SS Blocks* transmitidos.
- nrbs: número de *resource blocks* del *SS Burst*.
- nrbt: número de *resource blocks* establecidos en 'MainPDSCH'.
- fs: SCS del *SS Burst*.
- ft: SCS establecido en 'MainPDSCH'.

Elementos de salida:

- mappedPRB: índices PRB para *un resource Grid* de una portadora.
- mappedSymbols: índices de los símbolos OFDM en un *slot* para un *resource Grid* de una portadora.

2.3.2.12. precoderChannelEstimate

Es una función que se utiliza únicamente cuando la variable estimación de canal perfecta habilitada. Permite una precodificación a la matriz W a la última dimensión de la estimación del canal. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Es parte de la función ProcessingLoopPDSCH.

```
estChannelGrid = precoderChannelEstimate(carrier,estChannelGrid,W)
```

Elementos de entrada:

- carrier: es un objeto configurado de la salida de 'nrCarrierConfig'. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- estChannelGrid: es la estimación de canal, un arreglo de $K \times N \times R \times P$, donde K es el número de subportadoras, N es el número de símbolos OFDM, R es el número de antenas de recepción y P es el número de puertos de señal de referencia. Se obtiene de la primera salida de 'nrChannelEstimate'. En varias ocasiones R y P son 1 y se convierte en un arreglo de $K \times N$.

- W : matriz de precodificación para un *slot* de $R \times P$. Donde R es el número de antenas de recepción y P es el número de antenas de transmisión.

Elementos de salida:

- `estChannelGrid`: es una matriz que se le aplica una precodificación de una matriz W . Arreglo de cuatro dimensiones $K \times N \times R \times P$, donde K es el número de subportadoras, N es el número de símbolos OFDM, R es el número de antenas de recepción y P es el número de antenas de transmisión.

2.3.2.13. SSBurstconfiguration

Es una función que realiza la configuración de tres parámetros del SS *Burst*. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en el *script* principal MainPDSCH.

```
simParameters = SSBurstconfiguration(simParameters)
```

Elementos de entrada:

- `simParameters`: es una estructura de la cual se utiliza la variable de SCS, que ha sido configurada en 'MainPDSCH'.

Elementos de salida:

- `simParameters`: es una estructura que almacena los siguientes parámetros de configurados.
 - `BlockPattern`; asignado de acuerdo con el SCS, 'Case A' para SCS=15, 'Case B' para SCS=30, 'Case C' para SCS=60, 'Case D' para SCS=120, 'Case E' para SCS=240,
 - `SSBTransmitted`; el mapa de *bits* que indica los bloques transmitidos *Burst*. Cuando se tienen los casos: 'Case A', 'Case B' y 'Case C', se tiene un mapa de *bits* tiene 4 u 8 *bits*. Cuando los casos son 'Case D' y 'Case E' se tiene un mapa de *bits* de 64 *bits*.
 - `SSBPeriodicity`; que indica la periodicidad del SS *Burst*, puede tomar los valores de 5, 10, 20, 40, 80 o 160 ms. Para la simulación se establece en 20.

El mapa de *bits* indica los SS *Blocks* transmitidos en un SS *Burst*. Cuando se tienen los casos: 'Case A', 'Case B' y 'Case C', se tiene un mapa de *bits* tiene 4 u 8 bits. Cuando los casos son 'Case D' y 'Case E' se tiene un mapa de bits de 64 *bits*. El mapa de *bits* no es más que un conjunto de *bits* que determinan si se transmite o no se transmite un SS *Block*. Por ejemplo, si los ocho *bits* que se configuran están en 1, se va a tener ocho SS *blocks*,

en cambio sí se configura cuatro de los ocho *bits* en uno, únicamente se va a tener cuatro *SS Blocks*. El *SS Busrt* se transmite siempre en la primera media trama.

En la Figura 1.8 se muestra un ejemplo de la transmisión. El mapa de *bits* de la Figura 1.8 en sus ocho valores es "1" ya que se transmiten todos los *SS Blocks*. Además, el "BlockPattern" es el 'Case A' ya que el SCS es 15 kHz.

2.3.2.14. validateNLayers

Es una función que valida el número correcto de capas. No tiene elementos de salida. Se utiliza en la función ProcessingLoopPDSCH. La función verifica que el número de capas sea menor o igual que el menor número de antenas sea en transmisión o recepción. El número de capas siempre va a estar en proporción de 2^n , donde n puede ser: 0, 1, 2 y 3. Si el número de capas ingresado es diferente a 2^n no se procederá con la simulación. El número máximo de capas será 8. Para la simulación el número de capas máximo es de 4.

Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C.

En el caso de que el número de capas sea mayor, no se continuará con la simulación.

```
validateNLayers(simParameters)
```

Elementos de entrada:

- simParameters: es una estructura de la cual se utilizan los siguientes parámetros, NTxAnts, NRxAnts y PDSCH.NLayers.

2.3.2.15. validateNumberAnts

Es una función que valida el número correcto de antenas. No tiene elementos de salida. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

Para las antenas de transmisión valida que el número de antenas sea 1,2,4,8,16,32,64 o 128.

Para las antenas de recepción valida que el número de antenas sea 1, 2 o 4.

En el caso de que no se cumplan las dos condiciones no se continúa con la simulación.

```
validateNumberAnts(simParameters)
```

Elementos de entrada:

- `simParameters`: Es una estructura de la cual se utilizan los siguientes parámetros, `NTxAnts` y `NRxAnts`.

2.4. CÓDIGO PARA PUSCH

El código consta de 9 *scripts*. El *script* principal es 'MainPUSCH', en este *script* se llama a otras funciones y además se establecen los parámetros configurables de la simulación.

2.4.1. FUNCIONES PRINCIPALES

A continuación, se describen las tres funciones de mayor importancia en el código 'MainPUSCH', 'ParametersPUSCH' y 'ProcessingLoopPUSCH'.

2.4.1.1. MainPUSCH

Es el *script* principal donde se llaman a las otras funciones. En el *script* se realizan las configuraciones de los parámetros variables de la simulación y se asignan otros parámetros adicionales. Otros parámetros que se encuentran fijos en la simulación se configuran en la función 'ParametersPUSCH'. Para facilitar la comprensión del código se ha dividido en partes, la cual se encuentra descrita en la Figura 2.7. A continuación, se describe cada bloque del diagrama.

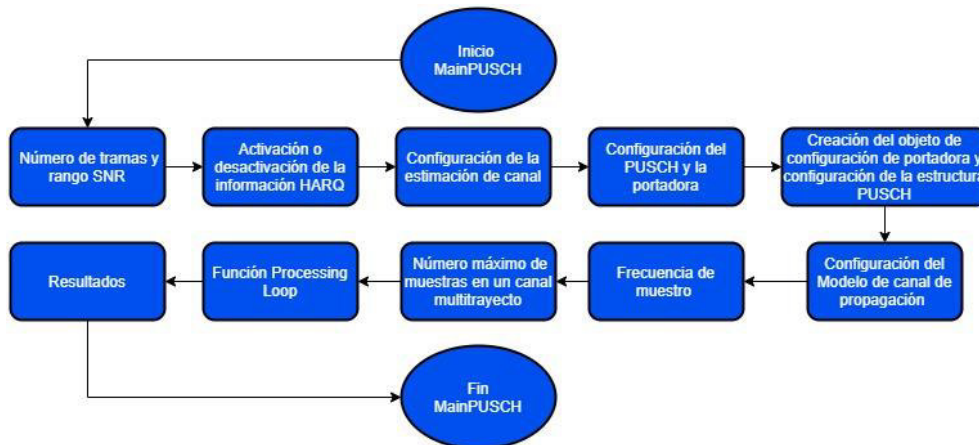


Figura 2.7 Descripción del *script* 'MainPUSCH'

Número de tramas y rango SNR

Se tienen tres variables; como el nombre lo indica en este bloque se realiza la configuración del número de tramas utilizadas en la simulación, el rango de SNR y se crea una variable para almacenar los valores posteriormente configurados.

Activación o desactivación de la impresión de información HARQ

Se tiene una variable la cual imprime la información generada por los procesos HARQ si está configurada como *'True'*. Para la simulación la variable se configura como *'False'*.

Configuración de la estimación de canal

Es una variable que va a estar configurada como *'True'* para todas las simulaciones, esto quiere decir que no se utilizará la estimación generada por las señales DM-RS. Se usará una estimación perfecta del canal.

Configuración del PUSCH y la portadora

Aquí se establecen los cinco parámetros variables de la simulación. Se configuran el número de *resource blocks*, el SCS, el tipo de modulación, el número de antenas tanto en transmisión como en la recepción y el modelo de canal escogido.

Se configura el prefijo cíclico que permanecerá en *'normal'*, el identificador de celda. Además, se llama a las funciones del programa que son: *'ParametersPUSCH'* y *'validateNumberAnts'*.

Creación del objeto de configuración de portadora y configuración de la estructura PUSCH

Se crea el objeto *'nrCarrierConfig'* y se le establecen los parámetros configurados previamente (SCS, prefijo cíclico, número de *resource blocks* e identificador de celda).

Configuración del Modelo de canal de propagación

En este bloque se crea el objeto para la configuración del canal de propagación. Puede ser el canal CDL (*nrCDLChannel*) o TDL (*nrTDLChannel*).

Frecuencia de muestro

Se utiliza la función *'nrOFDMInfo'* para obtener la frecuencia de muestreo del programa.

Número máximo de muestras en un canal multitrayecto

Se obtiene el número máximo de muestras con retraso que se tiene en una componente multitrayecto del canal. Se puede calcular a partir del canal con mayor retardo y el retardo que se obtiene de la implementación del filtro del canal. Es un valor necesario para obtener la señal recibida.

Función *'ProcessingLoopPUSCH'*

Es una función que será descrita posteriormente en la cual se calcula el valor del rendimiento en cada punto SNR configurado para las simulaciones.

Resultados

En este bloque se muestra las medidas del rendimiento obtenidas de cada valor de SNR. Además de que se realiza una gráfica en función del valor de SNR (dB) con el rendimiento (Mbps) y se almacenan los valores obtenidos.

Para ver la descripción línea a línea del código acudir al Algoritmo 4 del Anexo B y para visualizar el diagrama de flujo acudir al Anexo C.

2.4.1.2. ParametersPUSCH

Es una función en la cual se establecen parámetros que permanecerán como fijos en la simulación, pero pueden ser cambiados en futuros usos si se lo requiere para otras pruebas.

La configuración de esta función se divide en grupos, la Figura 2.8 muestra la distribución.



Figura 2.8 Descripción de la función 'ParametersPUSCH'

'ParametersPUSCH' configura parámetros adicionales del canal de transporte UL-SCH, del canal físico PUSCH y configuración del DM-RS

```
simParameters = ParametersPUSCH (simParameters, modulation)
```

Elementos de entrada:

- simParameters: es una estructura, que almacena los valores previamente ya asignados.
- modulation: variable que almacena el esquema de modulación.

Elementos de salida:

- simParameters: es una estructura a la cual se le anexan más parámetros de configuración de PUSCH.

A continuación, se describe cada línea del código de la función.

Configuración automática de TCR

En el bloque se configura automáticamente el TCR de acuerdo con la modulación establecida en 'MainPUSCH'.

Parámetros UL-SCH/PUSCH

En el bloque se asignan el TCR, los PRB al PDSCH, los símbolos PDSCH en cada *slot*, se establece la sobrecarga adicional, se habilitan los procesos HARQ, se asigna el tipo de esquema de modulación, el número de capas, se deshabilita la "precodificación por transformación" (*transform precoding*), se configura el esquema de transmisión como 'nonCodebook', el número de *antennas ports* y se asigna el Indicador de la "Matriz de Precodificación Transmitida" (TPMI, *Transmitted Precoding Matrix Indicator*). El TPMI Se utiliza únicamente cuando habilito *codebook* y es número entre 0 y 27 que depende del número de capas y el número de puertos de antena.

Configuración del DM-RS PUSCH

Se realiza la configuración de la señal de referencia DM-RS, se asigna el *scrambling identity* y se deshabilita el "Grupo de saltos" (*Group Hopping*).

Para ver la descripción línea a línea del código acudir al Algoritmo 5 del Anexo B y para visualizar el diagrama de flujo acudir al Anexo C.

2.4.1.3. ProcessingLoopPUSCH

Es la función donde se realiza el cálculo del rendimiento, tiene una gran cantidad de datos que procesar. La función comienza con una configuración de parámetros para la simulación, posteriormente hay un bucle donde se recorre cada valor SNR y dentro del bucle existe otro bucle el cual recorre cada *slot* de las tramas configuradas.

```
[snrIn, simThroughput, maxThroughput, pusch_init, carrier_init, nTxAnts, nRxAnts, simParameters] =  
ProcessingLoopPUSCH(carrier, channel, channelType, maxChDelay, nRxAnts, nTxAnts, pusch, perfectChannelEstimator, simParameters, snrIn, displaySimulationInformation, waveformInfo)
```

Elementos de entrada:

- *carrier*: es un objeto configurado de la salida de 'nrCarrierConfig'. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- *channel*: objeto configurado con el canal de desvanecimiento seleccionado. Se configura en 'nrCDLChannel' o 'nrTDLChannel'.

- channelType: variable con el tipo de canal seleccionado.
- maxChDelay: variable con el número máximo de muestras que se retrasan por componente en un canal multitrayecto.
- nRxAnts: variable con el número de antenas de recepción.
- nTxAnts: variable con el número de antenas de transmisión.
- pusch: estructura con parámetros para la simulación que se obtiene en 'MainPUSCH' y la función 'ParametersPUSCH'.
- perfectChannelEstimator: variable lógica que controla la estimación y sincronización de los canales.
- simParameters: estructura que almacena parámetros para la simulación.
- snrIn: variable que almacena el rango de SNR.
- displaySimulationInformation: variable lógica que controla la impresión de los valores de información de simulación del proceso HARQ ID para cada subtrama.
- waveformInfo: estructura que almacena parámetros para la simulación.

Elementos de salida:

- snrIn: valor SNR usado para la simulación.
- simThroughput: Valor del rendimiento en cada punto SNR.
- maxThroughput: valor del máximo rendimiento en cada punto SNR.
- pusch_init: estructura con parámetros para la simulación que se obtiene en 'MainPUSCH' y la función 'ParametersPUSCH'.
- carrier_init: es un objeto configurado de la salida de 'nrCarrierConfig'. Configura una portadora para una numerología OFDM específica.
- nTxAnts: variable con el número de antenas de transmisión.
- nRxAnts: variable con el número de antenas de recepción.
- simParameters: variable con parámetros configurados dentro de la función.

A continuación, se describe el código de la función 'ProcessingLoopPUSCH' mediante un diagrama de bloques presentado en la Figura 2.9. Además, cada bloque es descrito.

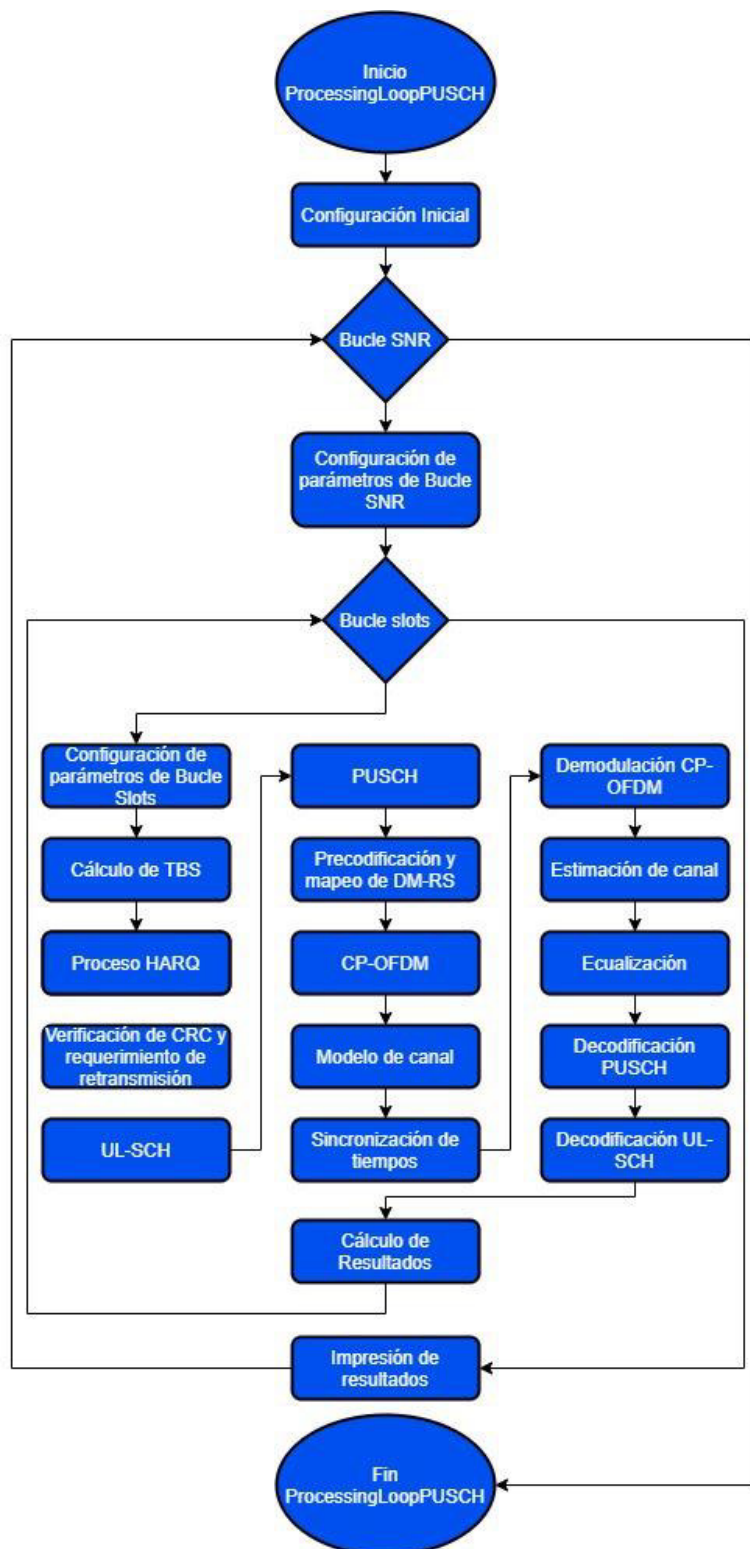


Figura 2.9 Diagrama general de la función 'ProcessingLoopPUSCH'

Configuración inicial

En este primer bloque se realizan configuraciones y asignaciones necesarias para la simulación.

- Creación de matrices de ceros encargadas de almacenar el rendimiento.
- Configuración de la secuencia de la RV necesaria para los procesos HARQ.
- Creación del objeto del sistema codificador (nrULSCH), habilitación del proceso HARQ y establecimiento del TCR.
- Creación del objeto del sistema decodificador (nrULSCHDecoder), habilitación del proceso HARQ, establecimiento del TCR, establecimiento del algoritmo de decodificación (*'Layered belief propagation'*) y configuración del número máximo del contador de iteraciones LDPC.
- Creación de variables temporales utilizadas dentro del bucle SNR.
- Asignación del número de tramas.

Bucle SNR

El siguiente bucle recorre cada uno de los puntos SNR establecidos en el *script* 'MainPUSCH'. A continuación, se presenta un diagrama con los bloques del bucle SNR en la Figura 2.10.



Figura 2.10 Diagrama de bloques del bucle SNR

Configuración de parámetros del Bucle SNR

En este bloque se asignan parámetros utilizados por el Bucle *Slots*, que deben ser restablecidos para que no se generen valores duplicados. A continuación, se describen que parámetros son establecidos.

- Establecimiento de una semilla para la generación de números aleatorios.
- Restablecimiento del canal para que cada punto experimente los mismos efectos de canal.
- Actualización de las variables temporales.

- Creación de variable para el almacenamiento de los resultados de la función 'getPathFilters'.

Bucle *Slots*

El siguiente bucle recorre cada uno de los *slots* de las tramas destinadas para la simulación.

A continuación, se presenta un diagrama de bloques con los procesos seguidos en la simulación por el Bucle *Slots* en la Figura 2.11. Cada bloque es descrito posteriormente.

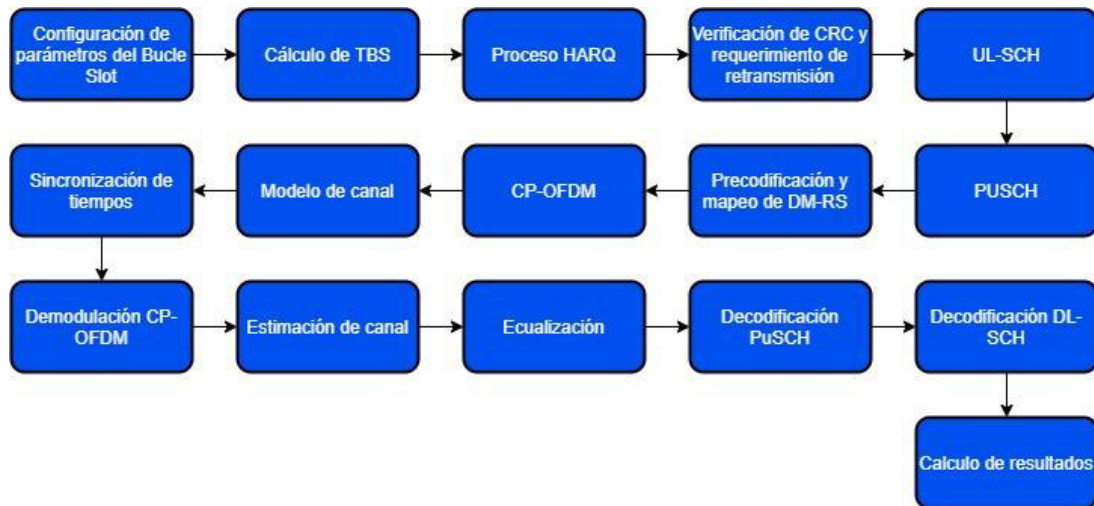


Figura 2.11 Diagrama general del bucle *slots*

Configuración de parámetros del Bucle *Slots*

En este bloque se comienza por establecer el número de *slots*.

Cálculo de TBS

Se calcula el *TBS* para el *codeword* de cada *slot*.

Además, se generan los símbolos e índices DM-RS.

Proceso HARQ

Se obtiene el índice del proceso HARQ actual y se actualiza la información de RV.

Verificación de CRC y requerimiento de retransmisión

En este bloque se realiza la verificación del CRC de la transmisión anterior para un proceso HARQ. Además, determina si se requiere una retransmisión. En el caso de no requerir retransmisión se generan nuevos datos.

UL-SCH

Realización de la codificación de los *transport blocks* llamando al objeto 'nrULSCH' y se obtiene la matriz de precodificación del *slot*. Transporta los datos de usuario, este bloque se incluye la codificación LDPC que permite el uso de transmisiones en paralelo (capas).

PUSCH

Se realiza la aleatorización/codificación (*Scrambling*), modulación de los *bits*, el mapeo (consiste en una operación de pasar el *codeword* al número de capas establecidas en la simulación), precodificación por transformación (convierte la modulación OFDM en OFDM de una sola portadora o SC-OFDM, es un parámetro opcional), se realiza la precodificación de los datos de usuario (consiste en una operación que mapea las capas a tantas o más paneles de antenas) utilizando la función 'nrPUSCH'.

Se generan los símbolos PDSCH, para mapearlos en los "Bloques de recursos virtuales" (VRB, *Virtual Resource Blocks*) y se finaliza mapeándolos en los PRB.

Precodificación y mapeo de DM-RS

Se mapean los símbolos e índices en los VRB, y se finaliza mapeándolos en los PRB.

Se realiza la precodificación de la señal DM-RS.

CP-OFDM

Se realiza la modulación OFDM con la función 'nrOFDMModulate' y se añade a la forma de onda el SS *Burst* apropiado.

Modelo de canal

Los datos pasan por el modelo de canal escogido y además se añade ruido gaussiano.

Sincronización de tiempos

Se realiza la estimación de tiempo perfecta con la función 'nrPerfectTimingEstimate'.

Demodulación OFDM

Se realiza la demodulación OFDM con la función 'nrOFDMDemodulate'.

Estimación de canal

Se realiza una estimación de canal perfecta con la función 'nrPerfectChannelEstimate' para poder sincronizar la onda recibida, con la ayuda de la salida de la sincronización de tiempos.

Ecuación

Se realiza una ecualización con la función 'nrEqualizeMMSE'.

Decodificación PUSCH

Se realiza la decodificación el canal físico con la función 'nrPUSCHDecode' de todos los pares de antenas de transmisión y recepción, junto con la estimación del ruido.

Decodificación UL-SCH

Se realiza la decodificación con el objeto 'nrULSCHDecoder' y se actualiza el contador del proceso HARQ.

Cálculo de resultados

Se realiza un promedio para calcular el máximo rendimiento posible y el rendimiento en cada punto SNR simulado.

Impresión de resultados

Se realiza la impresión de los resultados, detallando el rendimiento y su valor de SNR.

Para ver la descripción línea a línea del código acudir al Algoritmo 6 del Anexo B y para visualizar el diagrama de flujo acudir al Anexo C.

2.4.2. FUNCIONES SECUNDARIAS

2.4.2.1. hArrayGeometry

Es una función utilizada únicamente cuando el canal escogido es CDL. Convierte el número total de antenas en una geometría específica de panel de antenas es decir permite crear un arreglo de antenas a partir del número de antenas ingresado. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en los *scripts* principales MainPDSCH y MainPUSCH.

```
[txArrayGeometry,rxArrayGeometry] = hArrayGeometry(nTxAnts,nRxAnts,varargin)
```

Elementos de entrada:

- nTxAnts: variable con el número de antenas de transmisión.
- nRxAnts: variable con el número de antenas de recepción.
- varargin: es una variable que permite a la función aceptar cualquier número de argumentos de entrada.

Elementos de salida:

- `txArrayGeometry`: es una variable de dimensión 1x5. Es creada para la estación base.

Para la configuración del panel de la estación base, se tiene el siguiente formato de fila: [M N P Mg Ng], donde:

M: número de filas en cada panel de antena

N: número de columnas en cada panel de antena

P: número de polarizaciones (1 o 2)

Mg: número de filas en el conjunto de paneles

Ng: número de columnas en el conjunto de paneles

Al multiplicar cada uno de los argumentos de la fila debo obtener el número total de antenas.

- `rxArrayGeometry`: es una variable de dimensión 1x5. Se configura de la siguiente manera: el número de filas en el sistema de antenas es $n_{RxAnts} / 2$, el número de columnas en el sistema de antenas es 1, el número de polarizaciones es 2, el número de paneles del sistema de filas es 1 y el número de paneles del sistema de columnas es 1.

2.4.2.2. `hNewHARQProcesses`

Es una función que permite crear un nuevo proceso HARQ. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en las funciones `ProcessingLoopPDSCH` y `ProcessingLoopPUSCH`.

```
harqProcesses = hNewHARQProcesses(numHARQProcesses,rvsequence,ncw)
```

Elementos de entrada:

- `numHARQProcesses`: es una variable que establece el número máximo de procesos HARQ a realizar.
- `rvsequence`: vector que almacena la secuencia de RV.
- `ncw`: variable que almacena el número de *codewords*.

Elementos de salida:

- harqProcesses: es una estructura que genera un conjunto de nuevos procesos HARQ.

2.4.2.3. hPUSCHResources

Es una función que devuelve los índices de los RE para una transmisión PUSCH, junto con los asociados PUSCH DM-RS, para una asignación de tiempo (símbolos) y frecuencia (PRBs) dados de la configuración de PUSCH, DM-RS. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en la función ProcessingLoopPUSCH.

```
[puschIndices,dmrsIndices,dmrsSymbols,info] = hPUSCHResources(ue,pusch)
```

Elementos de entrada:

- ue: estructura configurada con los parámetros de número de *resource blocks*, prefijo cíclico, SCS y la identidad de celda.
- pusch: estructura con parámetros para la simulación que son establecidos en 'MainPUSCH' y la función 'ParametersPUSCH'.

Elementos de salida:

- puschIndices: matriz de índices de PUSCH. De dimensión indxR , donde ind es el número de índices y R es el número de antenas de recepción.
- dmrsIndices: matriz de índices DM-RS. De dimensión indxR , donde ind es el número de índices y R es el número de antenas de recepción.
- dmrsSymbols: matriz compleja de dimensión indxR , donde ind es el número de índices y R es el número de antenas de recepción.
- info: es una estructura con información adicional acerca de DM-RS.

2.4.2.4. hSkipWeakTimingOffset

Es una función que se utiliza cuando la estimación de canal perfecta está deshabilitada. Se encarga de omitir las estimaciones de compensación de tiempo con correlación débil. No se utiliza en la simulación. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Es parte de las funciones ProcessingLoopPDSCH y ProcessingLoopPUSCH.

```
offset = hSkipWeakTimingOffset(offset,t,mag)
```

Elementos de entrada:

- `offset`: variable que almacena el desfase introducido o calculado.
- `t`: es un escalar que indica el desplazamiento de tiempo estimado obtenido de la primera salida de `'nrTimingEstimate'`.
- `mag`: es la magnitud de correlación expresado en una matriz real de $T \times N_r$, donde T es el número de muestras en el dominio del tiempo y N_r es el número de antenas de recepción, que da la magnitud estimada de la respuesta impulso para cada antena. Que se obtiene de la segunda salida de `'nrTimingEstimate'`.

Elementos de salida:

- `offset`: retardo de tiempo del receptor.

2.4.2.5. `hUpdateHARQProcess`

Es una función que actualiza la RV del proceso HARQ. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en las funciones `ProcessingLoopPDSCH` y `ProcessingLoopPUSCH`.

```
harqProcess = hUpdateHARQProcess(harqProcess,ncw)
```

Elementos de entrada:

- `harqProcess`: estructura que almacena los procesos HARQ con sus respectivos parámetros.
- `ncw`: variable que almacena el número de *codewords*.

Elementos de salida:

- `harqProcess`: estructura con el campo actualizado del respectivo proceso HARQ.

2.4.2.6. `validateNumberAnts`

Es una función que valida el número correcto de antenas. No tiene elementos de salida. Para visualizar el diagrama de flujo ir al Anexo C. Se utiliza en las funciones `ProcessingLoopPDSCH` y `ProcessingLoopPUSCH`.

Para las antenas de transmisión valida que el número de antenas sea 1, 2 o 4. Para las antenas de recepción valida que el número de antenas sea 1,2,4,8,16,32,64 o 128.

En el caso de que no se cumplan las dos condiciones no se continúa con la simulación

```
validateNumberAnts(simParameters)
```

Elementos de entrada:

- simParameters: Es una estructura de la cual se utilizan los siguientes parámetros, NTxAnts y NRxAnts.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de analizar los códigos para PDSCH y PUSCH se realizaron las simulaciones del rendimiento de los canales. Los resultados se presentan en gráficas, con curvas de Rendimiento (Mbps) vs. SNR (dB). Los valores que varían en las simulaciones son los siguientes:

- SCS.
- Número de *resource blocks*.
- Esquemas de modulación.
- Número de antenas de transmisión (nTxAnts) y número de antenas de recepción (nRxAnts).
- Modelos de canal (CDL y TDL).

Los valores que puede tomar cada variable se describen en la sección 1.3. Se presentarán comparaciones entre el canal ascendente y descendente.

El TCR es un parámetro que cambia de acuerdo con la modulación y se utiliza la especificación TS 38.214 [36] para establecer el valor correspondiente. En la simulación el proceso de obtención del TCR se realiza de manera automática dependiendo del esquema de modulación utilizado. A continuación, en la Tabla 3.1 se presenta el valor del TCR de cada esquema de modulación implementado.

Tabla 3.1 Valor de TCR para cada esquema de modulación

Canal	Modulación	TCR x 1024
PDSCH	QPSK	120
	16QAM	378
	64QAM	466
	256QAM	682,5
PUSCH	pi/2-BPSK	60
	QPSK	120
	16QAM	378
	64QAM	567

En el caso de las simulaciones con el esquema de modulación 256QAM se utiliza únicamente para el enlace descendente y el esquema de modulación pi/2-BPSK se utiliza solo para el enlace ascendente.

El cambio más evidente de 4G hacia 5G es el incremento de las velocidades de datos. Existen varias tecnologías y estrategias que hacen posible este aumento. En concreto

analizaremos dos, que son el aumento del ancho de banda y el uso de la tecnología MIMO. Para lo cual se realizaron tres tipos de agrupaciones en el siguiente capítulo. En cada agrupación se espera variar un parámetro que afecte de diferente manera al rendimiento de los canales. En la primera agrupación las variaciones que se realizan son para cambiar el ancho de banda, en la segunda agrupación se varía el parámetro del número de antenas (MIMO) y en la tercera y última se varía el tipo de canal. Cabe mencionar que para cada agrupación de variación también se altera el esquema de modulación. Se escogieron estas agrupaciones para comprobar los efectos de estos parámetros sobre el rendimiento.

3.1. EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL RENDIMIENTO

Se tomará los siguientes valores para realizar el cálculo del rendimiento, a manera de ejemplo.

- SCS = 15kHz.
- NRB = 133.
- NTxAnts = 8.
- NRxAnts = 1.
- TCR = 466/1024
- Sobrecarga adicional = 0.
- Modulación = 64QAM.

Para el cálculo se seguirán los pasos presentados en la sección 2.1.4 para PDSCH.

Primero se comenzará por obtener el número de *resource elements* disponibles (N'_{RE}) para la transmisión con la ayuda de la Ecuación 2.1, para lo cual se debe considerar los siguientes parámetros:

$N_{sc}^{RB} = 12$, es el número de *resource elements* que pertenecen a un *resource blocks*.

$N_{symb}^{sh} = 14$, número de símbolos por un *slot*.

$N_{DMRS}^{PRB} = 8$. Este parámetro viene dado por la configuración del DM-RS y PT-RS, para efectos del cálculo tendrá el valor de 8. Es el mismo valor utilizado para las simulaciones para el enlace descendente.

$N_{oh}^{PRE} = 0$ =, denominada sobrecarga adicional.

$$N'_{RE} = N_{sc}^{RB} \cdot N_{symb}^{sh} - N_{DMRS}^{PRB} - N_{oh}^{PRE}$$

$$N'_{RE} = 12 \cdot 14 - 8 - 0 = 168 - 8 = 160$$

Una vez determinado el N'_{RE} se procede a continuar con la Ecuación 2.2 permite calcular el número de *resource elements* asignados para la transmisión.

$$n_{PRB} = NRB = 133$$

$$N_{RE} = \min(156, N'_{RE}) \cdot n_{PRB}$$

$$N_{RE} = \min(156, 160) \cdot 133$$

$$N_{RE} = 156 \cdot 133 = 20748$$

Se continúa con el cálculo del INFO con la Ecuación 2.3, para ello se debe obtener el valor del número de capas (v). Siempre para asignar el número de capas se debe tomar el menor número de antenas, el cual puede estar en el gNB o el equipo de usuario, recordar que se tiene un máximo de 8 capas. En la gran mayoría de casos el menor número de antenas pertenece al equipo de usuario. Además, se debe obtener el orden del esquema de modulación (Q_m).

$$Q_m: \sqrt{64} = 6$$

$v = 1$, número de capas

$$R = \text{TCR} = \frac{466}{1024}$$

$$N_{info} = N_{RE} \cdot R \cdot Q_m \cdot v$$

$$N_{info} = 20748 \cdot \frac{466}{1024} \cdot 6 \cdot 1 = 56651.766$$

Como $N_{info} > 3824$, se continúa con la Ecuación 2.7.

$$n = \lceil \log_2(N_{info} - 24) \rceil - 5$$

$$n = \lceil \log_2(56651.766 - 24) \rceil - 5$$

$$n = \lceil \log_2(56627.766) \rceil - 5$$

$$n = \lceil 15.78 \rceil - 5 = 15 - 5 = 10$$

Posteriormente se utiliza la Ecuación 2.6.

$$N'_{info} = \max\left(3840, 2^n \times \text{round}\left(\frac{N_{info} - 24}{2^n}\right)\right)$$

$$N'_{info} = \max\left(3840, 2^{10} \times \text{round}\left(\frac{56651.766 - 24}{2^{10}}\right)\right)$$

$$N'_{info} = \max(3840, 2^{10} \times \text{round}(55.30)) = \max(3840, 2^{10} \cdot 55) = 56320$$

Como $R > 1/4$ se procede a utilizar la Ecuación 2.11.

$$C = \left\lceil \frac{N'_{info} + 24}{8424} \right\rceil$$

$$C = \left\lceil \frac{56320 + 24}{8424} \right\rceil = \lceil 6.69 \rceil = 7$$

Se continúa con la ecuación 2.10.

$$TBS = 8 \cdot C \cdot \left\lceil \frac{N'_{info} + 24}{8 \cdot C} \right\rceil - 24$$

$$TBS = 8 \cdot 7 \cdot \left\lceil \frac{56320 + 24}{8 \cdot 7} \right\rceil - 24$$

$$TBS = 56 \cdot \left\lceil \frac{56344}{56} \right\rceil - 24$$

$$TBS = 56 \cdot \lceil 1006.14 \rceil - 24 = 56 \cdot 1007 - 24 = 56392 - 24 = 56368$$

Para realizar el cálculo del rendimiento se asume que todos los datos enviados por el transmisor fueron recibidos correctamente por el receptor, con esto se evita introducir el uso de procesos HARQ.

Para obtener el rendimiento se debe dividir el TBS para 1ms, que es la duración de una subtrama. Del resultado de esta división se obtiene el rendimiento bps.

$$\text{Rendimiento} = \frac{TBS}{\text{Duración de una subtrama}} \quad (3.1)$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{TBS}{\text{Duración de una subtrama}} = \frac{56368}{1e-3} = 56368000 = 56,368\text{Mbps}$$

3.2. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN, NÚMERO DE *RESOURCE BLOCKS* Y SCS

En la siguiente sección, las gráficas varían el esquema de modulación, el número de *resource blocks* y el SCS; mientras que los parámetros fijos son el número de antenas del gNB que permanecerá en 8, el número de antenas del equipo de usuario que permanecerá en 1 y el modelo de canal es TDL-A. El variar el número de *resource blocks* y SCS permitirá el cambio del ancho de banda.

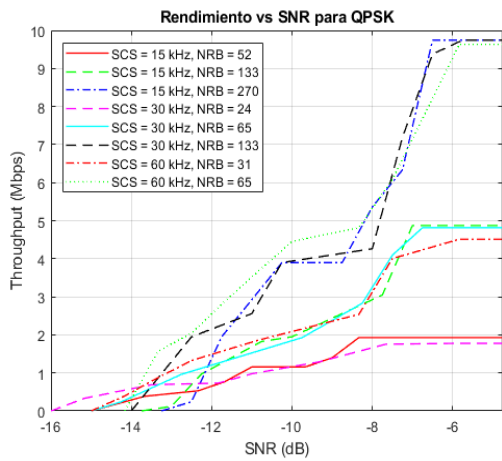
En la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 se presentan los parámetros utilizados en las ocho simulaciones realizadas por cada esquema de modulación. Los resultados de las ocho simulaciones con el mismo esquema de modulación se presentan en una sola gráfica. También se incluye el ancho de banda correspondiente al NRB.

Tabla 3.2 Parámetros SCS y NRB configurados en la simulación del enlace descendente

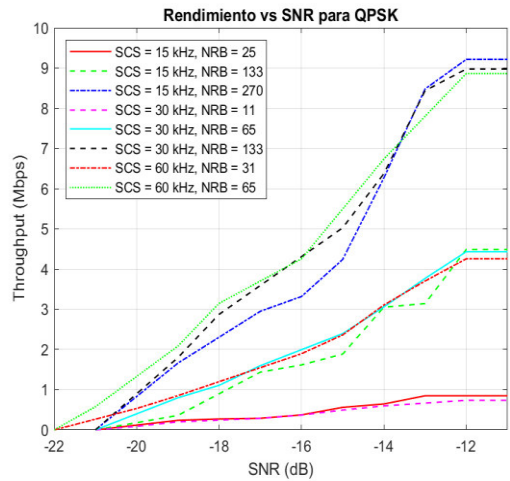
	#	NRB	SCS (kHz)	AB (MHz)
Figura 3.1 (a), (c) y (e)	1	52	15	10
	2	133	15	25
	3	270	15	50
	4	24	30	10
	5	65	30	25
	6	133	30	50
	7	31	60	25
	8	65	60	50

Tabla 3.3 Parámetros SCS y NRB configurados en la simulación del enlace ascendente

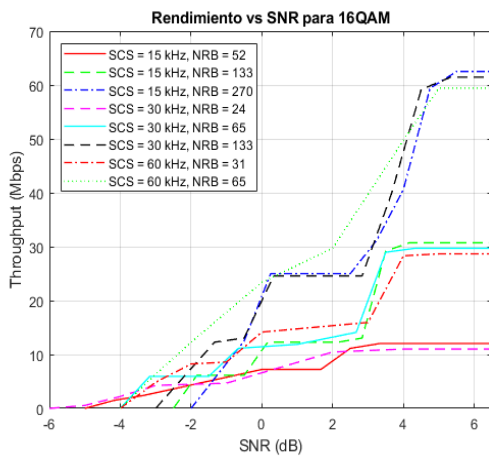
	#	NRB	SCS (kHz)	AB (MHz)
Figura 3.1 (b), (d) y (f)	1	25	15	5
	2	133	15	25
	3	270	15	50
	4	11	30	5
	5	65	30	25
	6	133	30	50
	7	31	60	25
	8	65	60	50



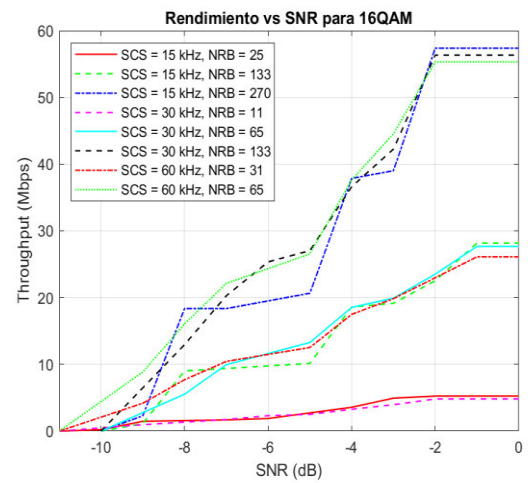
(a)



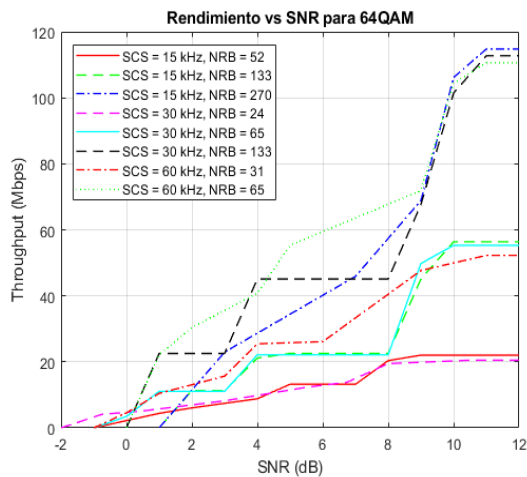
(b)



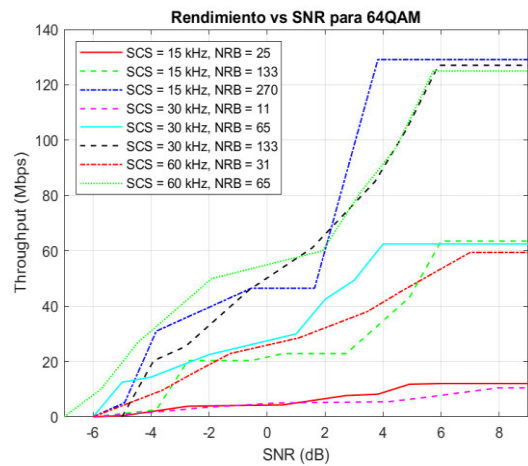
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.1 Rendimiento de los canales variando el SCS, modulaciones y el NRB ((a) Enlace descendente QPSK, (b) Enlace ascendente QPSK, (c) Enlace descendente 16QAM, (d) Enlace ascendente 16QAM, (e) Enlace descendente 64QAM, (f) Enlace ascendente 64QAM)

En la Figura 3.1 se presenta el rendimiento del PUSCH y PDSCH con las diferentes combinaciones de NRB, SCS y modulaciones. Tienen similares rendimientos ambos canales, aunque se aprecia que PDSCH tiene un rendimiento ligeramente superior en las modulaciones QPSK y 16QAM comparado con PUSCH cuando se tienen los mismos parámetros de configuración (mismo número de *resource blocks* y SCS). Por ejemplo, el caso de SCS = 30 kHz, NRB = 65 y modulación=64QAM, en PUSCH casi se llega a 60 Mbps y PDSCH es ligeramente superior a 60 Mbps.

Hay que recordar que el número de *resource blocks* es directamente proporcional con el ancho de banda, entonces al tener un mayor número de *resource blocks* se obtendrá un mayor rendimiento porque aumenta el ancho de banda. El número de *resource blocks* máximo con su correspondiente ancho de banda se encuentra en la Tabla 1.5 y Tabla 1.6.

Se debe destacar que el rendimiento en PUSCH necesita una relación de potencia menor que PDSCH para alcanzar su máximo rendimiento, además cuando se tiene un número menor de *resource blocks* se alcanza el máximo rendimiento con una menor relación de potencia.

Para el esquema de modulación 64QAM se tiene un caso particular, ya que se utiliza un TCR diferente para cada canal. La consecuencia directa de esto es que el rendimiento del canal PUSCH será superior al del canal PDSCH debido a que el TCR del PUSCH es mayor. Los TCR utilizados para cada canal se especifican en la Tabla 3.1. Hay una excepción para las configuraciones siguientes:

- PUSCH: SCS = 15kHz con NRB = 25 y SCS = 30kHz y NRB=11.

En este caso el rendimiento de PUSCH no es superior debido a que el número de *resource blocks* equivalen a un ancho de banda de 5MHz mientras que el número de *resource blocks* de PDSCH equivale a un ancho de banda de 10MHz. Para todos los demás casos de la modulación 64QAM en PUSCH y PDSCH se tiene el mismo número de *resource blocks*, por lo tanto, poseen el mismo ancho de banda.

Cada que se aumenta el esquema de modulación el rango de dBs para alcanzar el máximo rendimiento aumenta, por ejemplo, en QPSK se tiene un rango de alrededor de 10 dBs mientras que para 64QAM el rango se aproxima a los 14 dBs.

En la Tabla 3.4, Tabla 3.5 y Tabla 3.6 se presenta el valor máximo del rendimiento de acuerdo con el número de *resource blocks* y SCS, aplicando los diferentes esquemas de modulación.

Tabla 3.4 Rendimiento máximo de los canales con modulación QPSK variando SCS y NRB

SCS (kHz)	NRB		Rendimiento máximo PUSCH (Mbps)	Rendimiento máximo PDSCH (Mbps)
	PUSCH	PDSCH		
15	25	52	0,848	1,928
15	133		4,488	4,872
15	270		9,216	9,744
30	11	24	0,736	1,776
30	65		4,432	4,816
30	133		8,976	9,744
60	31		4,256	4,512
60	65		8,864	9,632

Tabla 3.5 Rendimiento máximo de los canales con modulación 16QAM variando SCS y NRB

SCS (kHz)	NRB		Rendimiento máximo PUSCH (Mbps)	Rendimiento máximo PDSCH (Mbps)
	PUSCH	PDSCH		
15	25	52	5,248	12,04
15	133		28,168	30,728
15	270		57,376	62,504
30	11	24	4,816	11,008
30	65		27,664	29,712
30	133		56,336	61,456
60	31		26,112	28,672
60	65		55,328	59,424

Tabla 3.6 Rendimiento máximo de los canales con modulación 64QAM variando SCS y NRB

SCS (kHz)	NRB		Rendimiento máximo PUSCH (Mbps)	Rendimiento máximo PDSCH (Mbps)
	PUSCH	PDSCH		
15	25	52	12,04	22,032
15	133		63,528	56,368
15	270		129,128	114,776
30	11	24	10,496	20,496
30	65		62,48	55,312
30	133		127,056	112,736
60	31		59,424	52,256
60	65		124,96	110,624

A continuación, en la Figura 3.2 se presenta la gráfica del rendimiento del PDSCH con el esquema de modulación 256QAM.

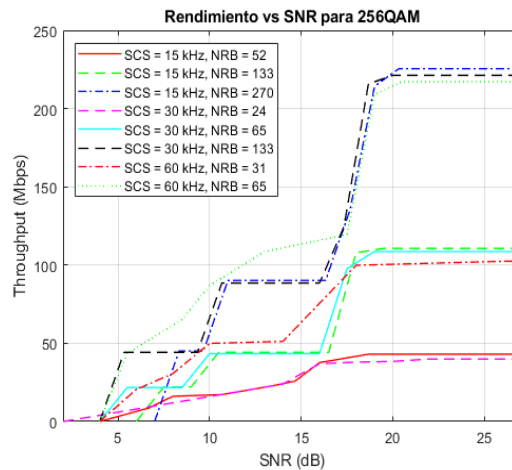


Figura 3.2 Rendimiento de PDSCH para 256QAM variando el SCS y el NRB

Para el esquema de modulación de 256QAM se alcanzan velocidades bastante superiores a las demás. Comparando 256QAM con 64QAM con los mismos valores de SCS y NRB, el rendimiento duplica su valor, pero comparado con QPSK es más de 20 veces superior, esto es debido a que el esquema de modulación inferior y que el TCR también tiene un valor inferior.

Para alcanzar el máximo rendimiento en esta modulación se requiere una alta relación potencia.

En la Tabla 3.7 se presenta el valor máximo del rendimiento para el mismo número de *resource blocks* y SCS, aplicando el esquema de modulación 256QAM.

Tabla 3.7 Rendimiento máximo del PDSCH para 256QAM variando SCS y NRB

SCS (kHz)	NRB	AB (MHz)	Rendimiento máximo PDSCH (Mbps)
15	52	10	43,032
15	133	25	110,632
15	270	50	225,48
30	24	10	39,936
30	65	25	108,592
30	133	50	221,264
60	31	25	102,432
60	65	50	217,184

A continuación, en la Figura 3.3 se presenta la gráfica del rendimiento del PUSCH con el esquema de modulación pi/2-BPSK

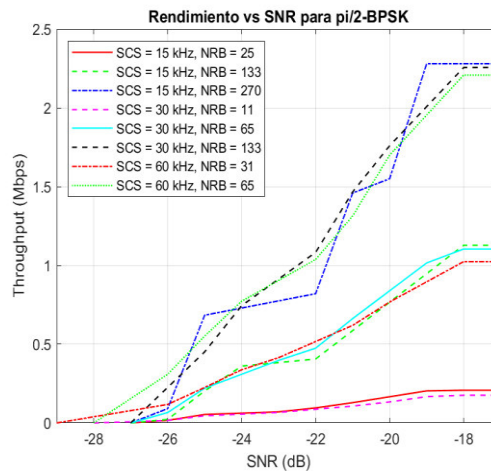


Figura 3.3 Rendimiento de PUSCH para pi/2-BPSK variando el SCS y el NRB

El esquema de modulación pi/2-BPSK solo es válido para PUSCH. Su rendimiento es bajo comparado con los demás esquemas de modulación. La ventaja de esta modulación es que para alcanzar su máximo rendimiento necesita una relación de potencia bastante inferior a la de las demás modulaciones.

En la Tabla 3.8 se presenta el valor máximo del rendimiento para el mismo número de *resource blocks* y SCS, aplicando el esquema de modulación pi/2-BPSK.

Tabla 3.8 Rendimiento máximo del PUSCH para pi/2-BPSK variando SCS y NRB

SCS (kHz)	NRB	AB (MHz)	Rendimiento máximo PUSCH (Mbps)
15	52	5	0,208
15	133	25	1,128
15	270	50	2,28
30	24	5	0,176
30	65	25	1,104
30	133	50	2,256
60	31	25	1,024
60	65	50	2,208

Es importante mencionar que a pesar de que se cambie el SCS, si se mantiene el ancho de banda para un esquema de modulación, el rendimiento es muy similar. Esto se cumple en todas las gráficas de esta sección. Se puede tomar como ejemplo los resultados de la Figura 3.3 y la Tabla 3.8, cuando hay un ancho de banda de 50 MHz el valor del rendimiento máximo es:

- 2,28 Mbps con SCS = 15kHz,
- 2,256 Mbps con SCS = 30kHz,
- 2,208 Mbps con SCS = 60kHz.

Otra característica ligada a la última mencionada es que se puede notar que, en todas las gráficas de esta sección, a medida que se aumenta el SCS, pero se mantiene el ancho de banda máximo de acuerdo con el NRB, el rendimiento disminuye muy levemente. Se toma a la Figura 3.1 (c) y valores de la Tabla 3.5 como ejemplo. La disminución es de alrededor de 1% de un SCS al otro.

- 57,376 Mbps con SCS = 15kHz, NRB = 270 y AB = 10MHz.
- 56,336 Mbps con SCS = 30 kHz, NRB = 133 y AB = 25MHz.
- 55,328 Mbps con SCS = 60 kHz, NRB = 65 y AB = 50MHz.

Al cambiar de un ancho de banda a otro con el mismo SCS, el rendimiento aproximadamente incrementa en el mismo porcentaje en que se incrementó el ancho de banda. Es decir, si se aumenta el ancho de banda de 25MHz a 50MHz, el rendimiento se duplicará, debido a que se duplicó el ancho de banda.

Se evidencia claramente que el NRB y el esquema de modulación son los que influyen directamente en el rendimiento de los canales.

3.3. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN Y NÚMERO DE ANTENAS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN

En la siguiente sección, las gráficas varían el esquema de modulación, el número de antenas de transmisión y el número de antenas de recepción; mientras que los parámetros fijos son el SCS = 15 kHz, el NRB = 133 y el modelo de canal es TDL-A. Se estableció el SCS = 15 kHz debido a que es el establecido en 4G, por tal motivo presenta características de confiabilidad ya que ha sido utilizado en la tecnología predecesora a 5G. Además de que con 15 kHz se tienen anchos de bandas no tan exigentes, máximo 50 MHz, es decir se busca robustez en las simulaciones, cabe mencionar que con NRB = 133 se tiene un ancho de banda de 25 MHz tal como se aprecia en la Tabla 1.5.

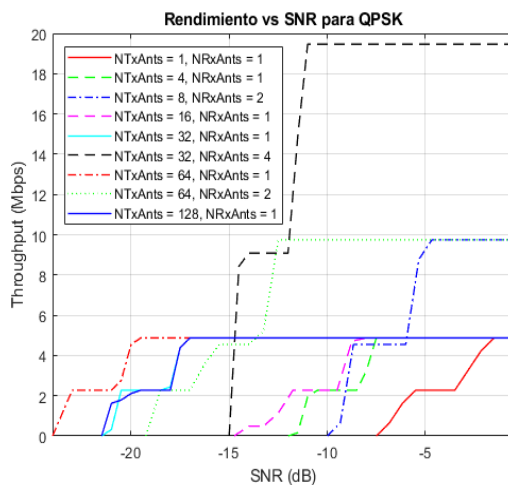
En la Tabla 3.9 se presentan los parámetros o combinaciones utilizadas en las nueve simulaciones realizadas por cada esquema de modulación. Los resultados de las nueve

simulaciones con el mismo esquema de modulación se presentan en una sola gráfica. Cabe mencionar que en la Tabla 3.9 se presenta el número de antenas del gNB y del equipo de usuario, por ejemplo, en PDSCH las antenas de transmisión (nTxAnts) serán las del gNB y las antenas de recepción (NRxAnts) serán las del equipo de usuario. Para PUSCH se cumple la misma tabla, la diferencia es que en transmisión se tiene el equipo de usuario y en la recepción el gNB.

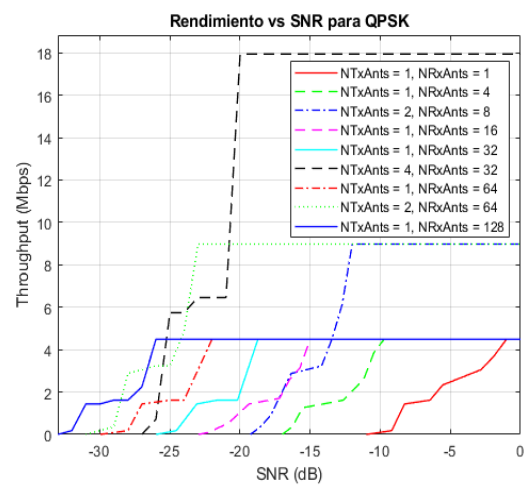
Tabla 3.9 Número de antenas configurados en la simulación

#	Antenas del gNB	Antenas del equipo de usuario
1	1	1
2	4	1
3	8	2
4	16	1
5	32	1
6	32	4
7	64	1
8	64	2
9	128	1

En la Figura 3.4 se presentan las gráficas de PDSCH y PUSCH, en las cuales se varía el número de antenas del gNB y del equipo de usuario.



(a)



(b)

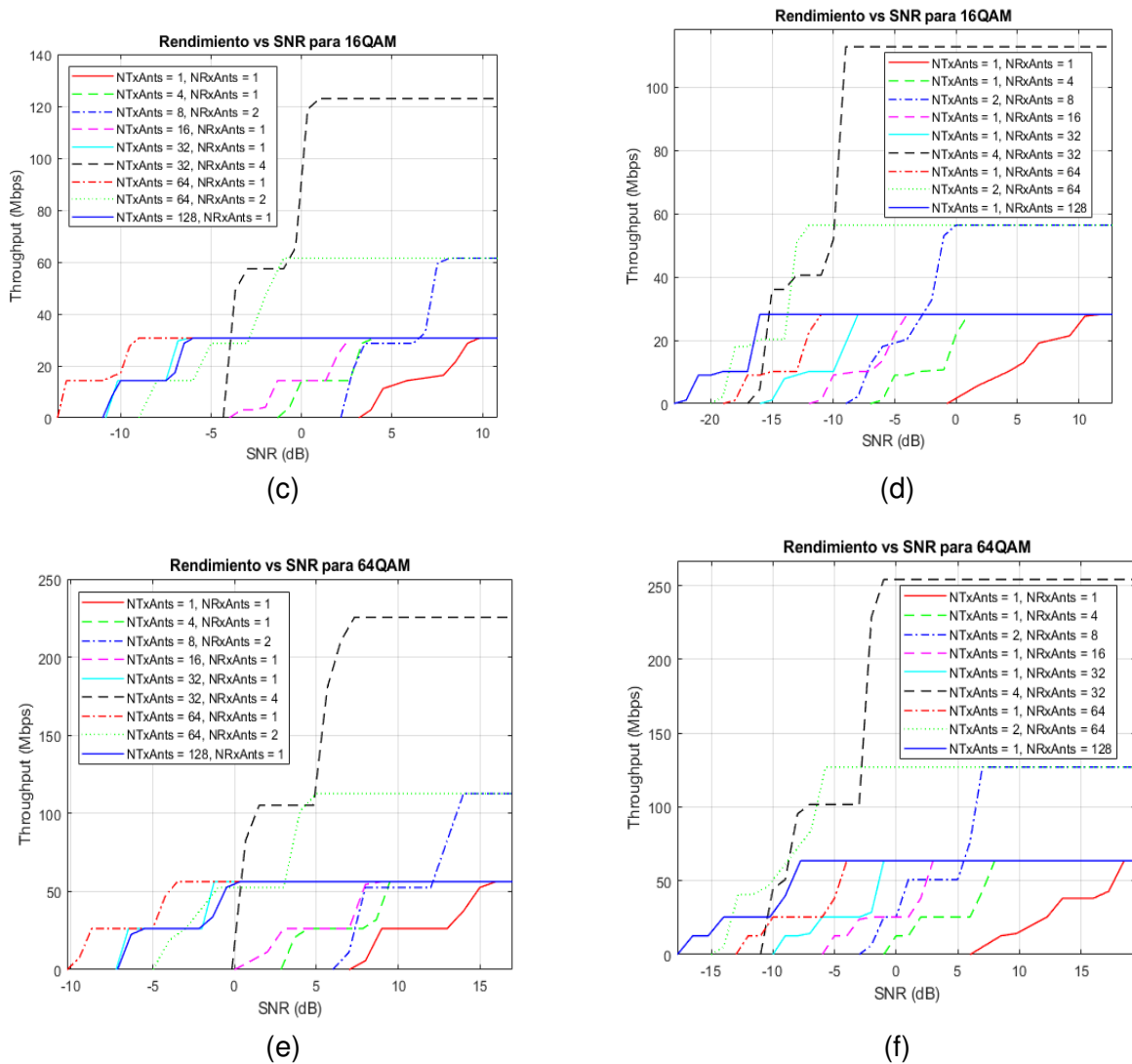


Figura 3.4 Comparación del rendimiento de los canales variando la modulación, el NTxAnts y NRxAnts ((a) Enlace descendente QPSK, (b) Enlace ascendente QPSK, (c) Enlace descendente 16QAM, (d) Enlace ascendente 16QAM, (e) Enlace descendente 64QAM, (f) Enlace ascendente 64QAM)

En PDSCH el número de antenas de transmisión es muy superior al de recepción, ya que en transmisión se tiene el gNB y en el estándar nos permite alcanzar hasta 1024 antenas, pero en las simulaciones el valor máximo es de 128; mientras que para las antenas de recepción del equipo de usuario no pasa de 4 antenas, aunque el estándar permite hasta 8.

Como se evidencia en la Figura 3.4 al variar el número de antenas se espera conseguir un mejor rendimiento, lo cual es cierto, pero tiene sus limitaciones.

Analizando PDSCH, la principal ventaja de tener gran cantidad de antenas en el gNB es que ya no se requerirá tanta potencia para que la información llegue al equipo de usuario,

lo mismo ocurre para PUSCH, el equipo de usuario requerirá aún menor potencia para llegar al gNB. Cabe recalcar que esto también se debe al *beamforming* mencionado en la sección 1.4.2.3.

Si se desea aumentar el rendimiento sin variar los parámetros de SCS, NRB, modulaciones o TCR, se debe aumentar el número de antenas del equipo de usuario ya que esto incrementa el número de capas y como consecuencia directa se aumenta el número de transmisiones en paralelo. En todos los gráficos de la Figura 3.4 se aprecia claramente que el mayor rendimiento se produce cuando se tiene cuatro antenas en el equipo de usuario. Mientras tanto todos los gráficos que tengan dos antenas en el equipo de usuario tendrán el mismo rendimiento, en un diferente rango de dBs.

En la Tabla 3.10, Tabla 3.11 y Tabla 3.12 se presenta el valor máximo del rendimiento de acuerdo con el número de antenas de transmisión y recepción, aplicando los diferentes esquemas de modulación.

Tabla 3.10 Rendimiento máximo de los canales con modulación QPSK variando el NTxants y NRxAnts

Antenas del gNB	Antenas del equipo de usuario	Rendimiento máximo PUSCH (Mbps)	Rendimiento máximo PDSCH (Mbps)
1	1	4,488	4,872
4	1	4,488	4,872
8	2	8,976	9,744
16	1	4,488	4,872
32	1	4,488	4,872
32	4	17,936	19,464
64	1	4,488	4,872
64	2	8,976	9,744
128	1	4,488	4,872

Tabla 3.11 Rendimiento máximo de los canales con modulación 16QAM variando el NTxants y NRxAnts

Antenas del gNB	Antenas del equipo de usuario	Rendimiento máximo PUSCH (Mbps)	Rendimiento máximo PDSCH (Mbps)
1	1	28,168	30,728
4	1	28,168	30,728
8	2	56,368	61,48
16	1	28,168	30,728
32	1	28,168	30,728
32	4	112,648	122,976
64	1	28,168	30,728
64	2	56,368	61,48
128	1	28,168	30,728

Tabla 3.12 Rendimiento máximo de los canales con modulación 64QAM variando el NTxants y NRxAnts

Antenas del gNB	Antenas del equipo de usuario	Rendimiento máximo PUSCH (Mbps)	Rendimiento máximo PDSCH (Mbps)
1	1	63,528	56,368
4	1	63,528	56,368
8	2	127,08	112,648
16	1	63,528	56,368
32	1	63,528	56,368
32	4	254,176	225,48
64	1	63,528	56,368
64	2	127,08	112,648
128	1	63,528	56,368

En la Tabla 3.10, Tabla 3.11 y Tabla 3.12 se observa el máximo rendimiento alcanzado para cada canal cuando se varía el número de antenas. Aumentando el número de antenas del equipo de usuario se puede llegar a velocidades muy altas, pero la mayoría de los terminales en la actualidad solo cuentan con dos antenas y muy pocos con cuatro.

En las gráficas de PUSCH se nota claramente que tiene una menor relación de potencia que PDSCH. Esto se debe a que en PUSCH en el lado de recepción se tiene al gNB, el cual es mucho más sensible que el equipo de usuario, además que el equipo de usuario debido a su portabilidad no cuenta con altas potencias para la transmisión.

A continuación, en la Figura 3.5 se presenta la gráfica del rendimiento del PDSCH con el esquema de modulación 256QAM.

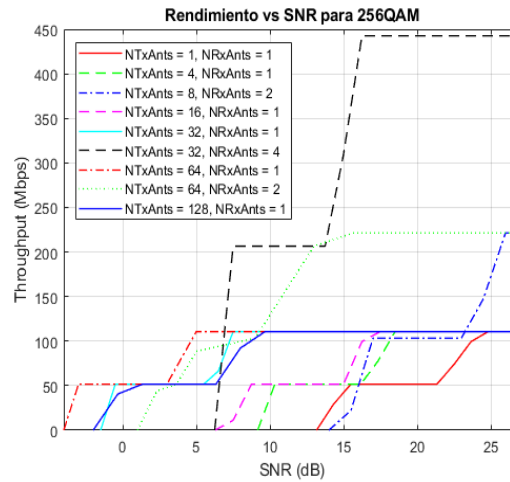


Figura 3.5 Rendimiento de PDSCH para 256QAM variando el número de antenas de transmisión y recepción

En la Tabla 3.13 se presenta el valor máximo del rendimiento para las combinaciones del número de antenas, aplicando el esquema de modulación 256QAM.

Tabla 3.13 Rendimiento máximo del PDSCH para 256QAM variando el número de antenas de transmisión y recepción

Antenas del gNB	Antenas del equipo de usuario	Rendimiento máximo PDSCH (Mbps)
1	1	110,632
4	1	110,632
8	2	221,376
16	1	110,632
32	1	110,632
32	4	442,632
64	1	110,632
64	2	221,376
128	1	110,632

En la Figura 3.5 se aprecia el rendimiento de PDSCH con una modulación 256QAM. Como ya se mencionó el mayor rendimiento se lo obtiene cuando la configuración de las NTxAnts = 32 y NRxAnts = 4. Es un rendimiento muy alto, en gran parte debido al esquema de modulación.

A continuación, en la Figura 3.6 se presenta la gráfica del rendimiento del PUSCH con el esquema de modulación $\pi/2$ -BPSK.

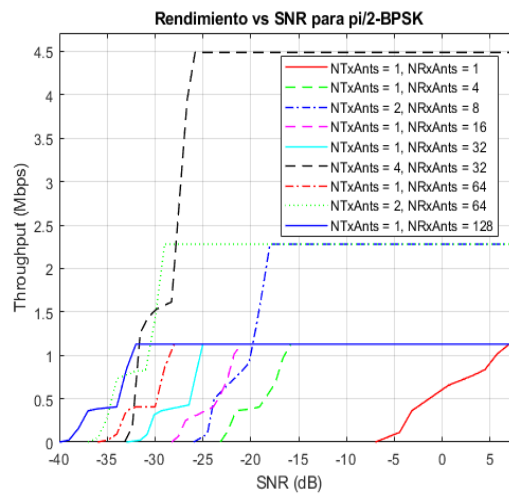


Figura 3.6 Rendimiento de PUSCH para $\pi/2$ -BPSK variando el número de antenas de transmisión y recepción

La modulación $\pi/2$ -BPSK se caracteriza básicamente por tener un rendimiento muy bajo pero la ventaja es que trabaja con una relación de potencia muy baja en comparación a los demás esquemas de modulación.

Una característica que se presenta en todas las gráficas de esta sección es que la curva de rendimiento es escalonada para cuando se tiene una alta diversidad de antenas; muy notorio cuando se tiene 64 y 128 antenas en el gNB.

3.4. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN Y MODELOS DE CANAL

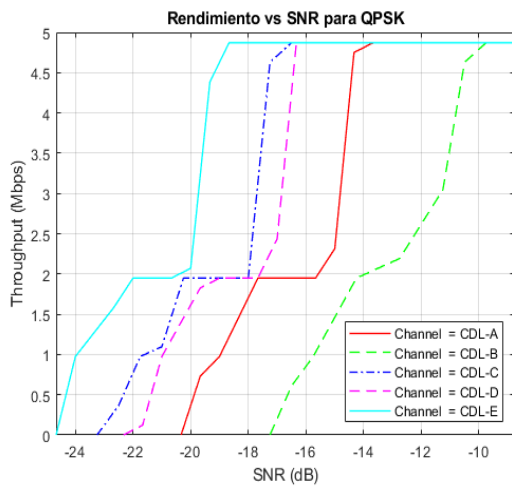
En la siguiente sección, las gráficas varían el esquema de modulación y modelo de canal; mientras que los parámetros fijos son el número de antenas del gNB que permanecerá en 8, el número de antenas del equipo de usuario que permanecerá en, el SCS = 15kHz y el NRB = 133. Se estableció el SCS = 15 kHz debido a que es el establecido en 4G, por tal motivo presenta características de confiabilidad ya que ha sido utilizado en la tecnología predecesora a 5G. Además de que con 15 kHz se tienen anchos de bandas no tan exigentes de, máximo 50 MHz, es decir se busca robustez en las simulaciones, cabe mencionar que con NRB = 133 se tiene un ancho de bando de 25 MHz tal como se aprecia en la Tabla 1.5.

El modelo CDL, va a variar entre los siguientes: CDL-A, CDL-B, CDL-C, CDL-D y CDL-E. Mientras el modelo TDL, va a variar de la siguiente manera: TDL-A, TDL-B, TDL-C, TDL-D

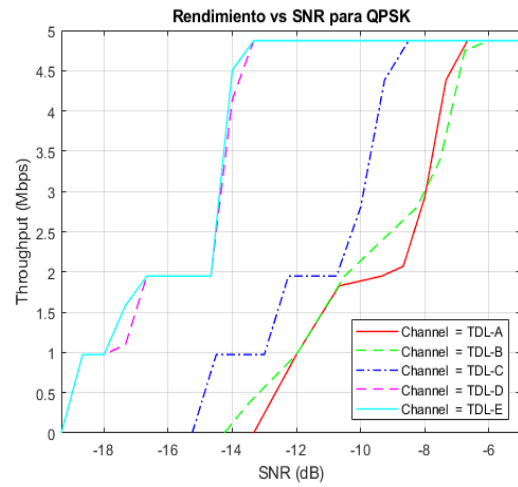
y TDL-E. Por cada esquema de modulación se realizan cinco simulaciones, una por cada perfil de cada esquema de modulación. Los cinco perfiles del mismo esquema de modulación y modelo de canal se presentan en una sola gráfica.

3.4.1. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL MODELO CANAL Y ESQUEMAS DE MODULACIONES PDSCH

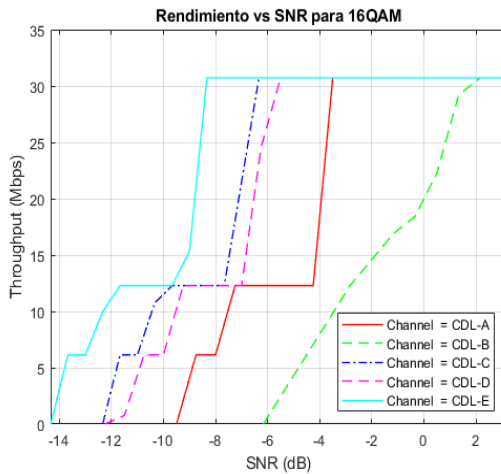
En la Figura 3.7 se presentan gráficas en las cuales se varía el esquema de modulación y el perfil con el modelo de canal.



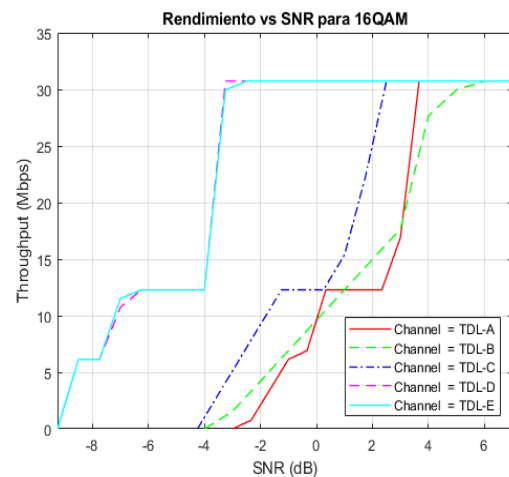
(a)



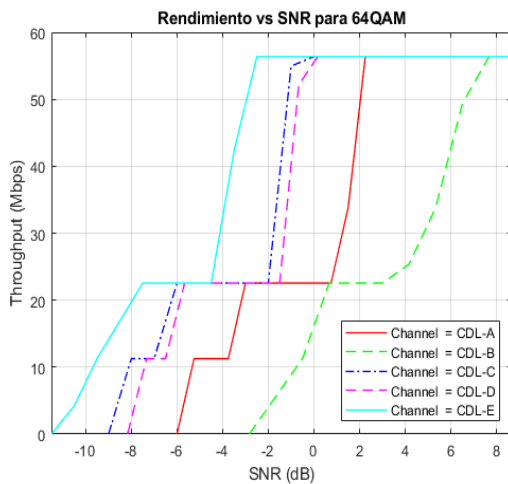
(b)



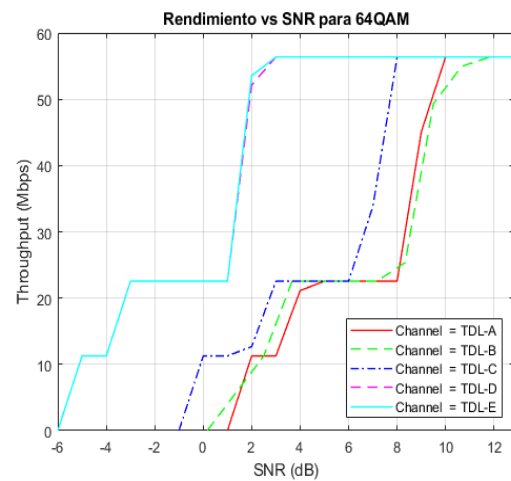
(c)



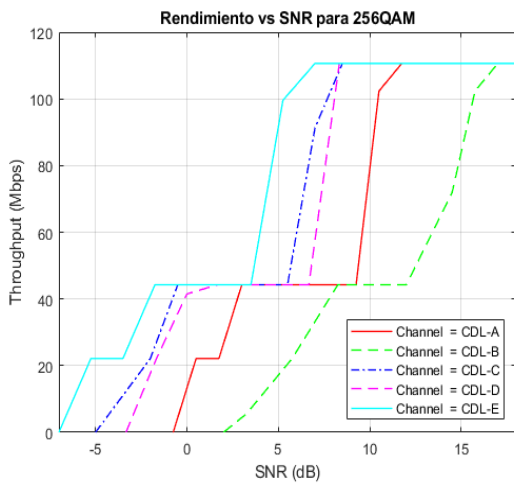
(d)



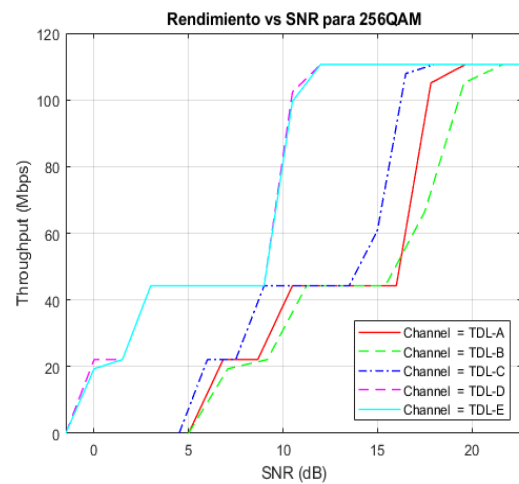
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3.7 Rendimiento del Canal PDSCH variando el modelo de canal ((a) Modulación QPSK modelo CDL (b) Modulación QPSK modelo TDL (c) Modulación 16QAM modelo CDL (d) Modulación 16QAM modelo TDL (e) Modulación 64QAM modelo CDL (f) Modulación 64QAM modelo TDL (g) Modulación 256QAM modelo CDL (h) Modulación 256QAM modelo TDL)

Como se aprecia en la Figura 3.7 En todos los perfiles del modelo de canal TDL que se caracterizan por ser NLOS (A, B y C) están mucho más a la derecha que los perfiles LOS (D y E). En otras palabras, los perfiles NLOS necesitan una mayor relación de potencia para alcanzar el máximo rendimiento.

Para el caso de los perfiles CDL (A y B) si se encuentran a la derecha, mientras que el perfil (C) se encuentra más a la izquierda que el perfil (D) que es un perfil LOS. Quiere

decir que, a pesar de tener línea de vista entre emisor y receptor, las condiciones del canal son variables y pueden afectar de manera diferente a cada transmisión.

En la Tabla 3.14 se presenta el valor máximo del rendimiento máximo de acuerdo con el esquema de modulación.

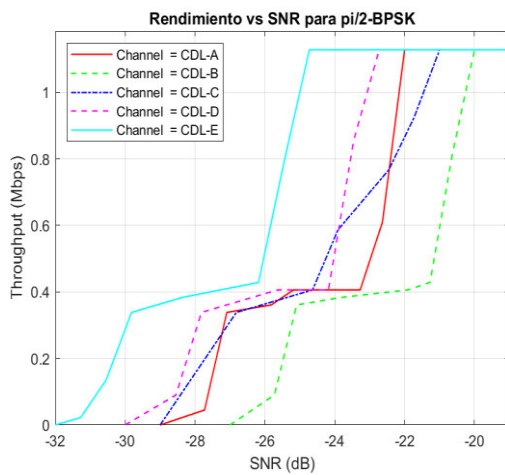
Tabla 3.14 Rendimiento máximo para PDSCH de los modelos CDL y TDL

	QPSK	16QAM	64QAM	256QAM
Rendimiento (Mbps)	4,87	30,7	56,4	111

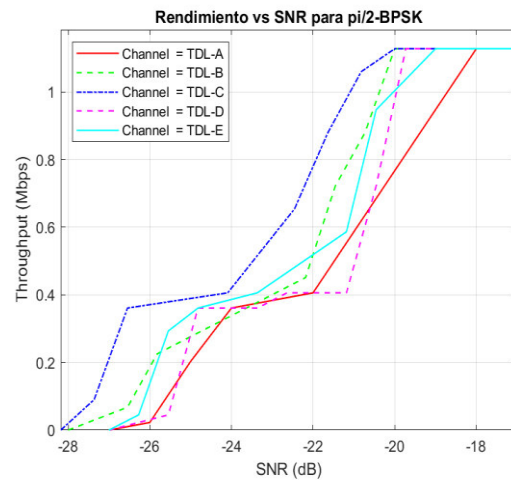
El rendimiento máximo cambia notablemente del esquema de modulación QPSK a 16QAM.

3.4.2. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL MODELO CANAL Y ESQUEMAS DE MODULACIONES PUSCH

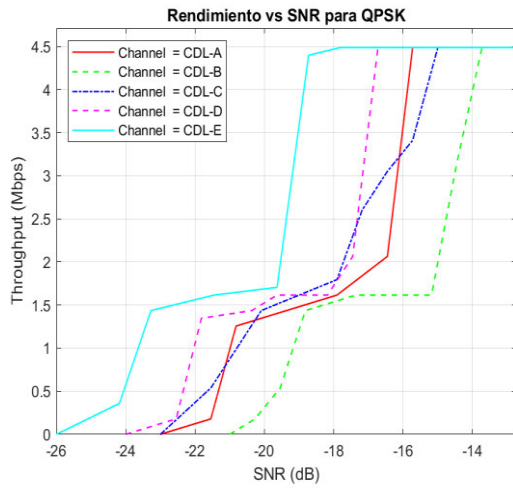
En la Figura 3.8 se presentan gráficas en las cuales se varía el número de esquema de modulación y el perfil del modelo de canal.



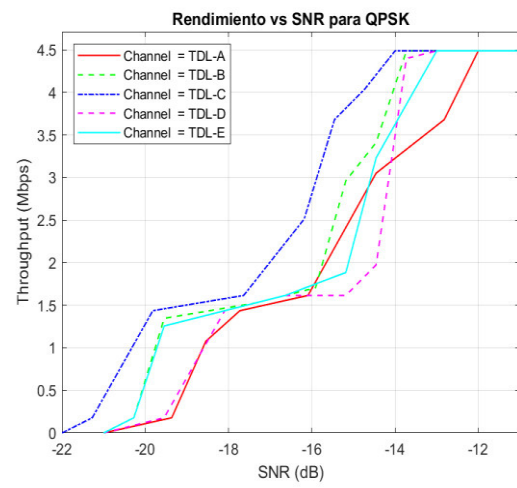
(a)



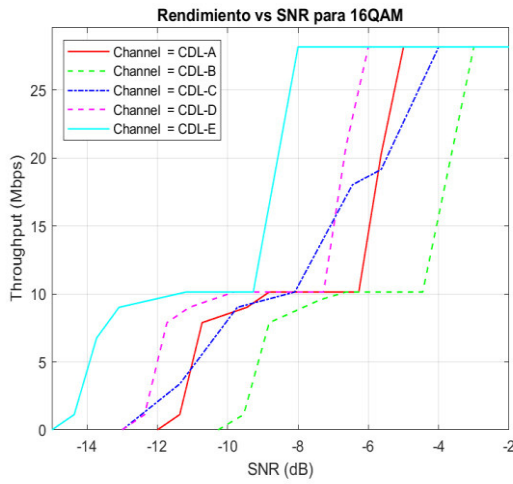
(b)



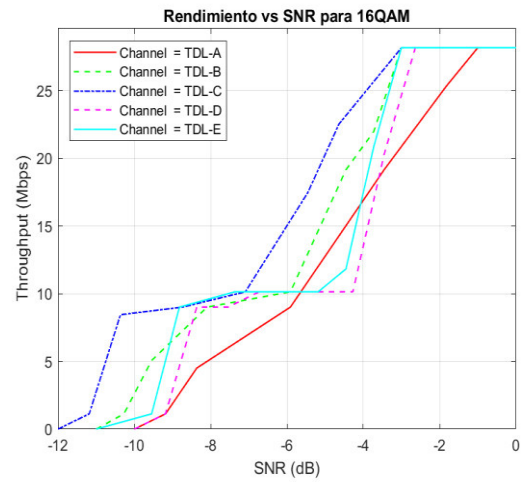
(c)



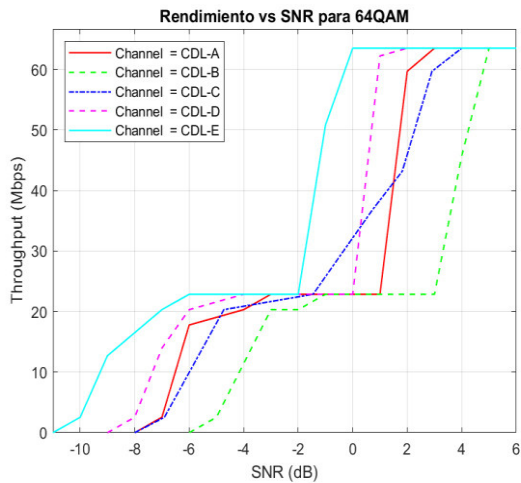
(d)



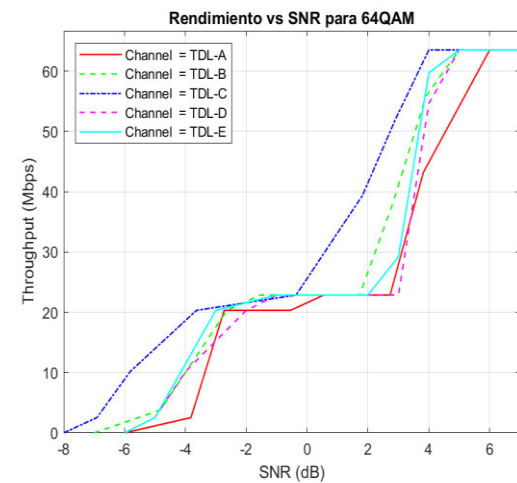
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3.8 Rendimiento del Canal PUSCH variando el modelo de canal ((a) Modulación $\pi/2$ -BPSK modelo CDL (b) Modulación $\pi/2$ -BPSK modelo TDL (c) Modulación QPSK modelo CDL (d) Modulación QPSK modelo TDL (e) Modulación 16QAM modelo CDL (f) Modulación 16QAM modelo TDL (g) Modulación 64QAM modelo CDL (h) Modulación 64QAM modelo TDL)

Modulación 16QAM modelo TDL (g) Modulación 64QAM modelo CDL (h) Modulación 64QAM modelo TDL)

Como se evidencia en la Figura 3.8 el principal efecto de canal es que desplaza las curvas del rendimiento de acuerdo con las propias configuraciones de cada perfil.

Los resultados de PUSCH son bastantes diferentes a los PDSCH.

Los perfiles (D) y (E) del modelo CDL están mucho más a la izquierda lo cual quiere decir que necesitan una menor relación de potencia para llegar a su máximo rendimiento posible. El perfil (B) del modelo CDL es el que se encuentra más a la derecha en la gráfica.

A diferencia de PDSCH, en PUSCH los perfiles de TDL se encuentran muy apegados y no es reconocible a simple vista cuales son NLOS y cuales LOS. El perfil (A) se encuentra más a la derecha y es el único perfil NLOS que requiere una mayor relación de potencia que los perfiles LOS para alcanzar su rendimiento máximo.

El perfil (C) en el modelo TDL es construida a partir de NLOS, teóricamente debe ser un perfil que necesite mayor relación de potencia, pero en todas las gráficas de la Figura 3.8 requiere la menor relación de potencia, incluso menor que en los perfiles de LOS. Se debe añadir que el perfil (C) en el modelo TDL es la curva más variable y no concuerda con lo establecido en la teoría. El comportamiento de los perfiles del modelo TDL puede deberse a que el escenario de simulación no es el apropiado, además de que es más inestable debido a que se transmite del UE al gNB.

En la Tabla 3.15 se presenta el valor máximo del rendimiento máximo de acuerdo con el esquema de modulación y modelo de canal.

Tabla 3.15 Rendimiento máximo para PUSCH de los modelos CDL y TDL

	pi/2-BPSK	QPSK	16QAM	64QAM
Rendimiento (Mbps)	1,128	4,488	28,17	63,53

El rendimiento máximo de cada esquema de modulación siempre es el mismo en cada modelo de canal. Los rendimientos en los esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM son similares, la variación que sufren es muy pequeña. En lo que si varían es en el rango de potencia en el cual alcanzan el máximo rendimiento.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Las redes 5G son una mejora importante a lo que se tenía con 4G. 5G proporciona una gran flexibilidad para la transmisión de datos. Se puede partir de que existen anchos de banda superiores, utilización de tecnologías como MIMO y *beamforming*, un espaciado entre subportadoras variable (4G tiene un espaciado fijo de 15kHz) y sobre todo que existe una red lógica que se encarga de cumplir requerimientos específicos de cada usuario, además de que también cuenta con las características de 4G. La gran ventaja es que se elimina parte del *hardware* y se lo reemplaza por la virtualización controlada por *software* que permite el funcionamiento en simultáneo de diversos servicios.
- 5G es una red en la cual su núcleo es controlado por *software* mediante una arquitectura basada en servicios, donde cada servicio se lo conoce como funciones de red donde se gestionan de manera independiente dentro del núcleo.
- Debido a que la demanda de datos de 5G es mucho mayor a 4G, el uso del espectro en frecuencias más altas es visto con buenos ojos ya que permite anchos de banda más grandes. 5G trabaja con ondas milimétricas (Hasta 52GHz). Además de las ondas milimétricas también se aumenta el esquema de modulación de 256QAM para alcanzar mejores tasas de transmisión de datos. OFDM también se utiliza en el canal ascendente algo que no ocurría en 4G.
- Una estrategia para mejorar el rendimiento de los canales es aumentando el ancho de banda el cual se lo puede conseguir de dos maneras. La primera es aumentando el número de *resource blocks* y la segunda es aumentando el espaciado entre subportadoras (SCS). Otra estrategia es cambiando el esquema de modulación a uno superior.
- Una manera de aumentar el rendimiento de los canales sin necesidad de cambiar el ancho de banda o el esquema de modulación, es incrementar el TCR (*Target Code Rate*). Un ejemplo claro se encuentra en la sección 3.2, donde para el esquema de modulación 64QAM en el canal descendente se usa un TCR de 466/1024 y en el canal ascendente un TCR de 567/1024, mencionando que el SCS y el número de *resource blocks* es el mismo para los dos canales; el rendimiento del canal ascendente es mayor

que el canal descendente, siendo superior aproximadamente en un 12%, para todos los demás casos donde el TCR es el mismo, el rendimiento del canal descendente es superior al canal ascendente aproximadamente en un 8.5%.

- El esquema de modulación más robusto para la transmisión y recepción de datos es $\pi/2$ -BPSK. La principal ventaja es la baja relación de potencia que requiere para la transmisión de datos y la principal desventaja es su baja tasa de datos. Ideal para escenarios rurales donde no se puede tener una alta densidad de gNB. Así un canal con esta modulación podría ser capaz de alcanzar 2.28 Mbps con una relación de potencia de -19dB, mientras que para la modulación QPSK se necesitaría alrededor de -11.5dB para alcanzar dicho rendimiento.
- Se realizaron pruebas con dos diferentes canales (CDL y TDL) y características dadas por los perfiles, en las que se evidenció que cada uno de los mismos necesitaba diferentes relaciones de potencia dependiendo de los parámetros configurados para que en la simulación se pueda alcanzar el máximo rendimiento. Son especialmente útiles para la simulación de sistemas de comunicación 5G ya que presentan características para ambientes LOS y NLOS, un rango de operación se sitúa entre los 0.5 y 100 GHz, además de que le dan importancia al retardo sufrido en las transmisiones.
- El *Toolbox* 5G aporta funciones y ejemplos que permiten la caracterización de escenarios de sistemas de comunicaciones de 5G. Permite el cálculo del rendimiento de PDSCH y PUSCH conformes a los estándares establecidos por 3GPP, sus ejemplos fueron usados como referencia para la realización de las simulaciones extremo a extremo.
- El número de antenas es un factor determinante para 5G. Actualmente la tecnología MIMO proporciona flexibilidad. Por ejemplo, si se tiene una antena en el UE y en el gNB un número mayor, no importa cuál sea el número de antenas del gNB, el rendimiento va a ser el mismo siempre, con la diferencia que al aumentar el número de antenas del gNB la relación de potencia para alcanzar su máximo rendimiento será menor. Mientras que si aumento el número de antenas en el UE, como por ejemplo de una antena a dos el rendimiento se duplicará ya que se crea otra capa para la transmisión de datos, tal como se aprecia en la sección 3.3.

4.2. RECOMENDACIONES

- Al no tener ninguna referencia del rango de SNR en el que se encuentran las curvas del rendimiento, se recomienda realizar pruebas previas con diversas configuraciones para comprobar el rango en el cual se encuentra la curva del rendimiento de cada una de las simulaciones implementadas en el trabajo de titulación.
- Debido a que el número de tramas está directamente relacionado con los datos a procesar en la simulación, es importante establecer este parámetro en el mínimo requerido para tener las gráficas adecuadas, una cantidad exagerada de tramas puede ocasionar que las simulaciones tarden un tiempo considerable en terminar dependiendo de las características del equipo disponible.
- Dado que el número de antenas en 5G puede llegar a 1024 de acuerdo con el estándar, se recomienda no realizar simulaciones con un número de antenas mayor a 256 si se tiene un equipo con memoria RAM limitada, debido a que la carga computacional es demasiado alta y se va a requerir una gran cantidad de memoria RAM, además que hay pocos escenarios con un número tan elevado de antenas.
- Las simulaciones presentan una carga computacional elevada por tal motivo se recomienda utilizar un computador con al menos 8 GB de memoria RAM y procesador de mínimo 1.7 GHz para evitar que existan complicaciones y restricciones a la hora de realizar las simulaciones.
- El código fuente es un conjunto de funciones con un *script* principal de una extensión bastante considerable. Se recomienda que para analizar el código se divida al *script* principal en funciones y además apartar en *scripts* secundarios los parámetros fijos y dejar en el principal los parámetros variables. De esta manera se facilita el entendimiento del código.
- Se recomienda utilizar la simulación en paralelo (*parfor*) de los *scripts* en equipos que posean varios núcleos en el procesador. Esta funcionalidad de Matlab resulta muy útil ya que ayuda a que el tiempo para las simulaciones se reduzca. Su manera de uso es muy sencilla ya que solo es necesario cambiar la instrucción “for” por la instrucción “parfor”.
- Matlab es un *software* que continuamente se encuentra actualizando. Es indispensable utilizar la versión 2020-B o superiores, ya que si se utiliza versiones anteriores no se

podrá correr los *scripts* debido a que hay funciones específicas que se encuentran a partir de la versión mencionada.

- Para asegurarse de que los valores del rendimiento son los correctos se puede realizar la comprobación del cálculo del TBS, un ejemplo de cómo se calcula se encuentra en la sección 3.1. Con ello se verifica que el rendimiento calculado por el programa es correcto.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 3GPP, "Release description; Release 15". Patent TR 21.915, 1 Octubre 2019.
- [2] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/5g/end-to-end-simulation.html?s_tid=CRUX_lftnav. [Accessed 10 Octubre 2020].
- [3] 3GPP, "User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone". Patent TS 38.101-1, 8 Abril 2020.
- [4] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/ebook/gated/5G_ebook.pdf. [Accessed 1 Junio 2020].
- [5] MathWorks, "MathWorks," Marzo 2020. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/5g/index.html. [Accessed 1 Junio 2020].
- [6] M. Vaezi , Z. Ding and H. V. Poor, Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond, Springer, 2019.
- [7] E. Helix, "Medium," 20 Octubre 2018. [Online]. Available: <https://medium.com/5g-nr/5g-service-based-architecture-sba-47900b0ded0a>. [Accessed 20 Junio 2020].
- [8] W. Lei, A. C. K. Soong, B. Classon, L. Jianghua, W. Yong, W. Xiao, D. Mazzaresse, Z. Yang and T. Saboorian, 5G System Design And End to End Perspective.
- [9] E. Dahlman, S. Parkvall and J. Sköld, 5G NR The Next Generation Wireless Access Technology, Academic Press, 2018.
- [10] "Techplayon," 12 Octubre 2017. [Online]. Available: <http://www.techplayon.com/5g-nr-gnb-logical-architecture-functional-split-options/>. [Accessed 15 Junio 2020].
- [11] "Techplayon," 24 Mayo 2019. [Online]. Available: <http://www.techplayon.com/5g-nr-interfaces-x2-xn-s1-ng-f1-and-e1-functions/>. [Accessed 15 Junio 2020].
- [12] J. Campos, "Keysight," 1 Noviembre 2017. [Online]. Available: https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Understanding_the_5G_NR_Physical_Layer.pdf. [Accessed 6 Junio 2020].
- [13] "3GPP". Patent TR 25.892, Marzo 2004.
- [14] Techplayon, "Tecplayon," 14 Diciembre 2019. [Online]. Available: <https://www.techplayon.com/5g-nr-cyclic-prefix-cp-design/>. [Accessed 18 Julio 2021].

- [15] 3GPP, "User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone". Patent TS 38.101-2, 9 Abril 2020.
- [16] 3GPP, "NR; Physical channels and modulation". Patent TS 38.211, 03 Abril 2020.
- [17] X. Lin, J. Li, R. Baldemair, J.-F. (. Cheng, S. Parkvall, D. C. Larsson, H. Koorapaty, M. Frenne, S. Falahati, A. Grövlén and K. Werner, "5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 30-37, 2019.
- [18] Y. Yuan and X. Wang, "ZTE," 14 Junio 2017. [Online]. Available: https://res-www.zte.com.cn/mediares/magazine/publication/com_en/article/2017S1/464711/P020170724607695463008.pdf. [Accessed 1 Junio 2020].
- [19] Electronics notes, "Electronics notes," [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/data-channels-physical-transport-logical.php#:~:text=Physical%20channel%20%3A%20The%20physical%20channels,of%20provide%20a%20specific%20service..> [Accessed 10 Junio 2020].
- [20] A. Zaidi , F. Athley, J. Medbo, U. Gustavsson, G. Durisi and X. Chen, 5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components, Academic Press, 2018.
- [21] 3GPP, "Service requirements for the 5G system". Patent TS 22.261, 27 Marzo 2020.
- [22] D. J. W. Andrew S. Tanenbaum, *Redes de computadoras*, vol. Quinto, Ciudad de México: Pearson, 2012.
- [23] D. Ashwini Ningdalli, "International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)," Junio 2015. [Online]. Available: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38089554/lrjet-v2i3109-with-cover-page.pdf?Expires=1621255871&Signature=F7odljt1zRf1f9lCrGTEM~PvDhtm6O1lpS7sUhvMKYTUdGXJBCRWNVcQiRLF2omO4i8fmpQzRypbvtp29wDmXQXUP6CsxP5BrmzomdoMKthY~fAgndqwb~qkBvhJfV4Yq6sRMx3igLiqMAAJT>. [Accessed 21 Abril 2021].
- [24] Mathworks, "Mathworks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/discovery/channel-model.html>. [Accessed Noviembre 2020].
- [25] G. Barb and M. Otesteanu, "On the Influence of Delay Spread in TDL and CDL Channel Models for Downlink 5G MIMO Systems," *2019 IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON)*, pp. 0958-0962, 10 Octubre 2019.

- [26] 3GPP, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz". Patent TR 38.901, 11 Enero 2020.
- [27] B. Gordana-Raluca, M. Otesteanu, G. Budura and C. Balint, "Performance Evaluation of TDL Channels for Downlink 5G MIMO Systems," *2019 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pp. 1-4, 11 Julio 2019.
- [28] J. O. Smith, "CCRMA," 2010. [Online]. Available: https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Example_Tapped_Delay_Line.html. [Accessed 10 Julio 2021].
- [29] Mathworks, "Mathworks," [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/discovery/channel-model.html>. [Accessed 18 Julio 2021].
- [30] 3GPP, "Multiplexing and channel coding". Patent TS 38.212, Marzo 2020.
- [31] K. Technologies, "Keysight Technologies," [Online]. Available: https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsystems/newradio/content/newradio_dlg_config_pusch.htm. [Accessed 18 Julio 2021].
- [32] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrofdminfo.html?searchHighlight=2.1.4.%09nrOFDMInfo&s_tid=srchtitle#mw_d2634b63-5df4-468b-ba17-792c6099995a. [Accessed 23 Diciembre 2020].
- [33] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrextractresources.html?searchHighlight=nrExtractResources&s_tid=srchtitle. [Accessed 23 Diciembre 2020].
- [34] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrequalizemmse.html>. [Accessed 23 Diciembre 2020].
- [35] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrtbs.html>. [Accessed 23 Diciembre 2020].
- [36] 3GPP, "NR; Physical layer procedures for data". Patent TS 38.214, 3 Abril 2020.
- [37] ShareTechnote, "ShareTechnote," 2020. [Online]. Available: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_MCS_TBS_CodeRate.html. [Accessed 24 Diciembre 2020].
- [38] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrresourcegrid.html#mw_ab24d212-105a-4712-8d37-ec42847d95f9. [Accessed 26 Diciembre 2020].

- [39] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrofdmmodulate.html#mw_da463997-554f-4cfc-aea2-c93ebde72709. [Accessed 26 Dicembre 2020].
- [40] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrofdmdemodulate.html#mw_519080e3-a073-44f1-9844-f8ad29607ad3. [Accessed 5 Enero 2021].
- [41] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrcdlchannel.getpathfilters.html>. [Accessed 7 Enero 2021].
- [42] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrperfecttimingestimate.html#mw_a11e466a-53cc-4771-bbf5-352ac9012ae7. [Accessed 5 Enero 2021].
- [43] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrperfectchanneleestimate.html#description>. [Accessed 5 Enero 2021].
- [44] MathWorks, "Mathworks," 2020. [Online]. Available: https://es.mathworks.com/help/5g/ref/nrulsch.settransportblock.html?searchHighlight=setTransportBlock&s_tid=srchtitle. [Accessed 7 Enero 2021].
- [45] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrlayerdemap.html>. [Accessed 5 Enero 2021].
- [46] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrpusch.html>. [Accessed 7 Enero 2021].
- [47] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrpuschdecode.html>. [Accessed 7 Enero 2021].
- [48] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdsch.html?searchHighlight=nrPDSCH&s_tid=srchtitle. [Accessed 7 Enero 2021].
- [49] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdschdecode.html>. [Accessed 7 Enero 2021].
- [50] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrtimingestimate.html>. [Accessed 21 Enero 2021].

- [51] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrchanneleestimate.html>. [Accessed 5 Enero 2021].
- [52] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrtransformdeprecode.html>. [Accessed 6 Enero 2021].
- [53] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrpuschcodebook.html>. [Accessed 7 Enero 2021].
- [54] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrcarrierconfig.html>. [Accessed 22 Diciembre 2020].
- [55] MathWorks, "MathWorks," [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrcdlchannel-system-object.html?searchHighlight=2.1.2.%09nrCDLChannel&s_tid=srchtitle. [Accessed 22 Diciembre 2020].
- [56] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrtdlchannel-system-object.html?searchHighlight=nrtdlchannel&s_tid=srchtitle. [Accessed 22 Diciembre 2020].
- [57] Mathworks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrulsch-system-object.html>. [Accessed 6 Enero 2021].
- [58] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrulschdecoder-system-object.html>. [Accessed 21 Enero 2021].
- [59] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrdlsch-system-object.html>. [Accessed 7 Enero 2021].
- [60] MathWorks, "MathWorks," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/5g/ref/nrdlschdecoder-system-object.html>. [Accessed 7 Enero 2021].
- [61] "NR; Physical layer; General description". Patent TS 38.201, 11 Enero 2020.
- [62] "NR; Services provided by the physical layer". Patent TS 38.202, 11 Enero 2020.

[63] MathWorks, "Mathworks," 2020. [Online]. Available:
<https://la.mathworks.com/help/5g/ug/nr-pdsch-throughput.html;jsessionid=abddc08e20b6ab9ac5741f7cfada>. [Accessed 30
Noviembre 2020].

ANEXOS

ANEXO A: Abreviaciones

ANEXO B: Algoritmos

ANEXO C: Diagramas de flujo

ANEXO D: Código

Anexo A

En el siguiente anexo se adjuntan las abreviaciones utilizadas en el proyecto de titulación.

5GC	5G Core
AF	Application Function
AMF	Access and Mobility Management Function
AOA	Azimuth angle Of Arrival
AOD	Azimuth angle Of Departure
AUSF	Authentication Server Function
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BWP	Bandwidth Part
CDL	Clustered Delay Line
CDM	Code Division Multiplexing
CORESET	Control-resource Set
CP	Cyclic Prefix
CPE	Common Phase Error
CQI	Channel Quality Information
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSI	Channel Statte Information
CSI-RS	Channel-state Information Reference Signal
CU	Central Unit
DCI	Dowlink Control information
DL	Downlink
DLSCH	Downlink Shared Channel
DM-RS	Demodulation Reference Signals
DN	Data Network
DU	Distributed Unit

eMBB	enhanced Mobile BroadBand
FDD	Frequency Division Duplex
gNB-CU	gNB-Central Unit
gNB-DU	gNB-Distributed Unit(s)
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
ISI	Intersymbol Interference
INFO	Intermediate Number of Information Bits
IoT	Internet of Things
LDPC	Low Density Parity Check
LOS	Line Of Sight
MAC	Medium Access Control
MIB	Master Information Block
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MMSE	Minimum mean-squared Error
mMTC	Massive Machine Type Communications
N/A	Not Available
NAS	No-Access Stratum
NEF	Network Exposure Function
NF	Network Functions
NLOS	Non-line-of-sight
NR	New Radio
NRB	Number of Resource Blocks
NRF	Network Repository Function
NSA	Non-Stand Alone
NSSF	Network Slice Selection Function
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCF	Policy Control Function
PCID	Physical cell ID
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCCP	Packet Data Convergence Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Blocks

PRG	<i>Physical Resource Block Group</i>
PSS	Primary Synchronization Signals
PT-RS	Phase-tracking reference signals
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Blocks
RBG	Resource Block Groups
RE	Resource Element
RG	Resource Grid
RLC	Radio Link Control
RNTI	Radio Network Temporary Identifier
RRC	Radio Resource Control
RSRP	Reference Signal Received Power
RV	Redundancy Version
SA	Stand-Alone
SBA	Service-Based Architecture
SCS	Subcarrier Spacing
SDAP	Service Data Adaptation Protocol
SFN	System Frame Number
SISO	Single-Output Single-Output
SMF	Session Management Function
SNR	Signal-to-noise Ratio
SRS	Sounding reference signal
SS Block	Synchronization Signals Block
SS/PBCH	Synchronization Signals/ Physical Broadcast Channel
SSS	Secondary Synchronization Signal
TB	Transport Blocks
TBS	Transport Block Size
TCR	Target code Rate
TDD	Time Division Duplex

TDL	Tapped Delay Line
TPMI	Transmitted Precoding Matrix Indicator
TRS	Tracking Reference Signal
UCI	Uplink Control Information
UDM	Unified Data management
UE	User Equipment
UL	Uplink
ULSCH	Uplink Shared Channel
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communication
VRB	Virtual Resource Blocks
ZOA	Zenith angle Of Arrival
ZOD	Zenith angle Of Departure

Anexo B

En el siguiente anexo se adjuntan la descripción línea a línea de los algoritmos de las funciones principales del Capítulo 2. Este anexo se adjunta en un CD.

Anexo C

Nomenclatura para los diagramas de flujo

Los diagramas de flujo seguirán la misma nomenclatura presentada a continuación. Es importante mencionar que las funciones proporcionadas por el *Toolbox 5G* de Matlab tienen la nomenclatura de proceso.

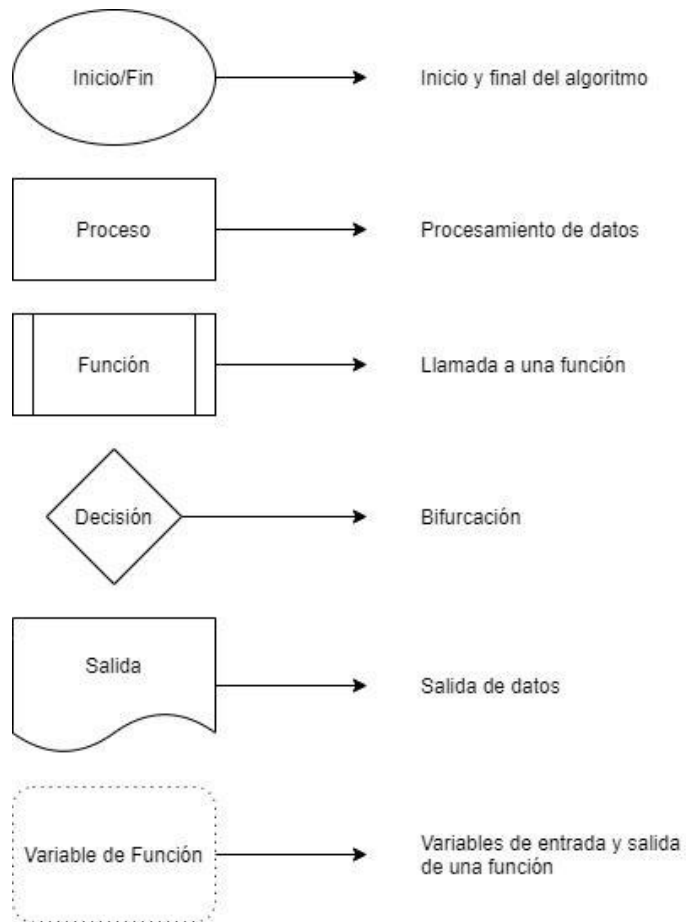


Figura C.1 Nomenclatura para los diagramas de flujo

Este anexo se adjunta en un CD con los diagramas de flujo de los *scripts* de las funciones principales y secundarias.

Anexo D

Este anexo se adjunta en un CD con los *scripts* de las funciones principales y secundarias.

ORDEN DE EMPASTADO