



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Técnicas de Transmisión para MIMO Masivo en Bandas Milimétricas: Revisión de los Estándares IMT-2020

Autor: Edgar Emanuel González Malla

Director: Jose Francisco Monserrat del Río

Fecha de comienzo: 09/03/2018

Lugar de trabajo: Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM

Objetivos — El objetivo principal de esta investigación es evaluar las prestaciones de los distintos mecanismos de selección de haz definidos por el 3GPP para 5G NR. Es así que se han definido los siguientes objetivos secundarios:

- Realizar un análisis del estado del arte de las técnicas de transmisión para bandas mmW, definidas en la *Release 15* del 3GPP.
- Definir una metodología para la evaluación de prestaciones de los mecanismos de selección de haz, ya sea mediante el uso de ráfagas SS, así como con la inclusión de señales de referencia CSI.
- Evaluar las prestaciones en el seguimiento de haces entre una estación base y un UE en distintos escenarios, definiendo únicamente el uso de bloques SS.
- Evaluar las prestaciones en el seguimiento de haces entre una estación base y un UE, mediante el uso de bloques SS y señales de referencia CSI.

Metodología — La metodología seguida para cumplir con los objetivos planteados en esta tesina se basó primeramente en la revisión de las especificaciones técnicas del 3GPP para 5G NR *Release 15*. A partir de la información relativa a las técnicas de seguimientos de haz en mmW, se realizó un análisis del uso de recursos en tiempo y frecuencia de las señales especificadas para realizar los procedimientos de *beam management*. Posteriormente, se utilizó el software ns-3 provisto del módulo mmWave para, tras realizar los respectivos cambios de acuerdo a las especificaciones para 5G NR, lanzar simulaciones en distintos escenarios de propagación. Mediante el simulador ns-3 se simularon entornos con velocidades de UE desde 1 m/s hasta 30 m/s, entornos LoS y NLoS, arquitecturas de *beamforming* analógicas y digitales, y uso de bloques SS y señales de referencia CSI con las periodicidades definidas en el estándar. Finalmente, con los resultados obtenidos se comparó la evolución de las tasas binarias alcanzadas en distintos escenarios y con diferentes parámetros de simulación, con el fin de determinar cuáles son los parámetros que garantizan las mejores prestaciones.

Desarrollos teóricos realizados — Se realizó un análisis del estado del estado del arte de las especificaciones técnicas del 3GPP para 5G NR *Release 15*. Mediante la información recopilada se estableció una metodología para la evaluación de prestaciones de los mecanismos de selección de haz mediante bloques SS y señales de referencia CSI. No existe un desarrollo teórico como tal, pero sí una metodología de evaluación.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio — Para cumplir con los objetivos planteados en esta tesina se utilizó principalmente el software ns-3, provisto del módulo mmWave. Es así que se incluyeron librerías y clases con el fin de adaptar las especificaciones técnicas para 5G NR. Posteriormente, se realizaron los cambios correspondientes en la trama de radio, con base en la información recopilada en el estado del arte, en donde se consideró el uso de recursos tanto de los bloques SS como de las señales de referencia CSI. Adicionalmente, se implementaron *scripts* y funciones en Matlab para promediar y graficar los datos generados mediante ns-3. Al ser desarrollado bajo licencia GNU, la extensión del módulo mmWave, incluyendo el uso de bloques SS y señales de referencia CSI para *beam management*, se encuentra disponible en el siguiente repositorio: <https://github.com/carhercl/mmWave-beam-management-ns-3.26>

Resultados — Los resultados demostraron que para mmWave el 3GPP define dos mecanismos de selección de haces. En modo IDLE se especifica el uso de bloques SS mediante el cual la estación base adquiere sincronización con la estación base, y en modo CONNECTED se establece el uso, ya sea de bloques SS como de señales de referencia CSI. Como resultados de esta investigación se obtuvieron distintas gráficas en donde se muestra la evolución en la tasa binaria alcanzada con distintos escenarios y parámetros de simulación. El rendimiento de las diferentes arquitecturas de *beamforming* permitió determinar que, en general, las arquitecturas digitales ofrecen mejores prestaciones que las arquitecturas analógicas en los procedimientos de *beam management*. Inclusive, la respuesta de las arquitecturas digitales es eficiente bajo altas periodicidades de ráfagas SS y en condiciones de alta movilidad. Sin embargo, el mapeo de señales de referencia CSI para *beam tracking* mejora la respuesta de arquitecturas analógicas en altas velocidades de UE, las cuales alcanzan un rendimiento similar al obtenido mediante el uso arquitecturas digitales. Por consiguiente, el uso de las CSI-RS se recomienda en escenarios con velocidades superiores a 10 m/s y siempre que se utilicen arquitecturas analógicas. Esto asegura un adecuado seguimiento de haces manteniendo la máxima tasa binaria posible. Los resultados obtenidos en esta tesina pueden ser considerados en la actualización de los simuladores para sistemas 5G del Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM.

Líneas futuras — Como líneas futuras para nuevas investigaciones se propone, en primer lugar, la actualización del simulador ns3 con el fin de incluir escenarios con múltiples usuarios (MU-MIMO). Además, se plantea estudiar el rendimiento de distintos *arrays* de antenas y esquemas de *beamforming* a los ya empleados. Ya que el 5G NR está de momento en proceso de estandarización en la *Release 16*, se sugiere, de ser necesario, actualizar el simulador ns3 de acuerdo con las modificaciones realizadas al estándar en cuanto a nuevos mecanismos de *beam management*, nuevos criterios de mapeo y periodicidad de bloques SS y CSI-RS, etc. Adicionalmente, ya que el modelo de canal bajo el cual está elaborado el módulo ns-3 mmWave permite operar en frecuencias desde 6 hasta 100 GHz, se recomienda estudiar y comparar la respuesta en la transmisión con otras frecuencias de operación a las que se utiliza en esta tesina (28 GHz).

Publicaciones — Fruto del trabajo desarrollado en esta tesina de máster, se ha redactado un artículo enviado a revisión a la revista IEEE *Communications Standards Magazine*. El artículo titulado *New Radio Beam Management in Release 15* describe el estándar y ofrece resultados de las distintas configuraciones y combinaciones de ambas.

Abstract — Given the propagation conditions of radio signals at high frequencies, the 3GPP has defined a set of techniques and procedures that allow maintaining an adequate connection between the transmitter and the users, known as beam management. Therefore, in this master thesis a performance evaluation of the beam selection mechanisms was carried out, based on the use of SS blocks and CSI reference signals. The results allowed to determine that the best response corresponds to the use of digital beamforming schemes. However, the response of analog architectures can be improved using CSI-RS for tracking.

Autor: González Malla Edgar, email: edgonmal@teleco.upv.es

Director 1: Monserrat del Rfo Jose Francisco, email: jomondel@iteam.upv.es

Fecha de entrega: 11-09-18

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	4
II. GESTIÓN DE HACES EN 5G NR	5
II.1 CAPA FÍSICA 5G NR – DESCRIPCIÓN GENERAL.....	5
II.2 BEAM MANAGEMENT	8
II.2.1 BLOQUES Y RÁFAGAS SS	9
II.2.2. SEÑALES DE REFERENCIA CSI.....	11
III. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE PRESTACIONES DE LOS DISTINTOS MECANISMOS DE SELECCIÓN DE HAZ	19
III.1 SIMULADOR DE RED ns-3	19
III.2 METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR LA CALIDAD DE ENLACE UTILIZANDO BLOQUES SS	21
III.3 METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR LA CALIDAD DE ENLACE UTILIZANDO SEÑALES DE REFERENCIA CSI	23
IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	25
IV.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIONES DE ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENLACE UTILIZANDO BLOQUES SS.....	25
IV.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIONES DE ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENLACE UTILIZANDO SEÑALES DE REFERENCIA CSI	32
V. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	36
VI. AGRADECIMIENTOS	37
VII. BIBLIOGRAFÍA	37

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, con el creciente tráfico generado por nuevos servicios y aplicaciones emergentes, ha sido necesaria la implementación de nuevas redes que permitan solventar esta demanda. Así surgen las redes móviles de Quinta Generación (5G) con el fin, no solamente de incrementar las capacidades de las actuales redes, sino también de atender nuevos requisitos y escenarios de uso, incluyendo: banda ancha móvil mejorada (eMBB, *Enhanced Mobile BroadBand*), comunicaciones masivas tipo máquina (mMTC, *Massive Machine Type Communications*), y comunicaciones ultra fiables y de baja latencia (URLLC, *Ultra Reliable Low Latency Communication*). Una de las tecnologías clave que posibilitan cumplir con los requisitos de las redes 5G es el uso de comunicaciones *mmWave* (en onda milimétrica), que conjuntamente con otras tecnologías, como por ejemplo, *massive Multiple Input Multiple Output* (MIMO) o FD-MIMO (*Full Dimension - MIMO*), permiten alcanzar altas eficiencias espectrales. Sin embargo, dadas las condiciones de propagación de las señales en altas frecuencias, como *mmWave*, es necesario aplicar diferentes técnicas que permitan compensar las elevadas pérdidas que se producen. Una de estas técnicas se conoce como *Beamforming*, mediante la cual se pueden conformar haces y apuntarlos en la dirección deseada, lo que mejora la relación señal a ruido más interferencia (SINR, *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*). Además, con el fin de garantizar el uso de un apuntamiento adecuado entre la estación base y los usuarios, es necesario utilizar nuevas técnicas de gestión de haces, tanto en modo IDLE como en modo CONNECTED, procedimientos conocidos como de *beam management*.

El objetivo de esta tesina de máster es estudiar los procedimientos de gestión de haces especificados en la *Release 15* del 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) para 5G NR (*New Radio*), en el cual se define el uso de señales de sincronización (SS/PBCH) para acceso inicial en modo IDLE, y señales de referencia CSI (*Channel State Information*) tanto en modo CONNECTED, como para el acceso inicial. Además, para verificar la configuración óptima de los distintos modos de mapeo y periodicidad de las señales de referencia y sincronización, en este trabajo se realizan simulaciones con el software ns-3.

El resto del documento se estructura de la siguiente manera. En la sección II se realiza una revisión del estado del arte sobre *beam management* para 5G NR basada, principalmente, en la *Release 15* de NR. En la sección III se define una metodología con el fin de realizar simulaciones en *mmWave* a nivel de capa de enlace, mediante el simulador de red ns-3, el cual permite estimar la calidad de enlace entre 1 estación base y 1 UE, considerando distintos escenarios y parámetros, de acuerdo con el estándar. En la sección IV se realiza una discusión y análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones. En la sección V se indican las respectivas conclusiones obtenidas mediante la presente investigación y, finalmente, se proponen líneas futuras de investigación, ya que el 5G NR está en estos momentos en pleno proceso de estandarización.

II. GESTIÓN DE HACES EN 5G NR

II.1 CAPA FÍSICA 5G NR – DESCRIPCIÓN GENERAL

El esquema de acceso múltiple para capa física de NR es OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) con prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*). Para *uplink* también es opcional el uso de SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) con CP. Con respecto a las técnicas de multiplexación, se definen FDD (*Frequency Division Duplex*) y TDD (*Time Division Duplex*). La nueva estructura de la trama para 5G NR indicada en la especificación 3GPP TS 38.211 [1], tiene algunas variantes con respecto a la trama LTE (*Long Term Evolution*). Principalmente se diferencian por el uso de distintas numerologías, que son básicamente distintas separaciones entre subportadoras (SCS, *Subcarrier Spacing*) y dos tipos de CP: normal o extendido. En la Tabla 1 se indican las numerologías soportadas [1]. La primera numerología corresponde a un SCS de 15 kHz entre subportadoras; igual a la que se utiliza en LTE, y existen 4 numerologías adicionales cuyo aumento es proporcional a 2^μ , donde $\mu=\{0,1,2,3,4\}$, escalable a partir de 15 kHz. El uso de prefijo cíclico extendido es posible para una separación de subportadoras de 60 kHz. No todas las numerologías pueden ser utilizadas para datos y sincronización. Por ejemplo, la tercera numerología ($\mu=2$) no puede ser utilizada para sincronización, y la numerología 5 ($\mu=4$) no puede ser utilizada para datos. Además, dependiendo de la frecuencia de operación, se utiliza ciertas numerologías, como se verá con detalle más adelante.

μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15[\text{kHz}]$	Prefijo Cíclico	Uso para datos	Uso para sincronización
0	15	Normal	Si	Si
1	30	Normal	Si	Si
2	60	Normal, Extendido	Si	No
3	120	Normal	Si	Si
4	240	Normal	No	Si

Tabla 1. Numerologías especificadas por el 3GPP para 5G NR [1].

Las transmisiones tanto para *uplink* como *downlink* son organizadas en tramas con una duración de 10 ms, con 10 subtramas de 1 ms. A diferencia de LTE, el número de slots en cada trama, o subtrama, varía dependiendo de la numerología utilizada, mientras que el número de símbolos en cada slot es 14 si se usa prefijo cíclico normal, o 12 si se usa prefijo cíclico extendido, como se muestra en la Tabla 2.

μ	Símbolos/slot	Símbolos/subframe	Slots/subframe	Slots/frame	Prefijo Cíclico
0	14	14	1	10	Normal
1	14	28	2	20	Normal
2	14	56	4	40	Normal
3	14	112	8	80	Normal
4	14	224	16	160	Normal
2	12	48	4	40	Extendido

Tabla 2. Símbolos por slot/subframe, slots por frame, slots por subframe, para CP normal y extendido [2].

Como ejemplo, en la Fig. 1 se muestra el formato de trama para una separación entre subportadoras de 60 kHz ($\mu=2$) y con prefijo cíclico normal. La duración de cada slot en este caso es de 0.25 ms, mientras que la duración de cada símbolo es de 17.86 μ s para CP normal.

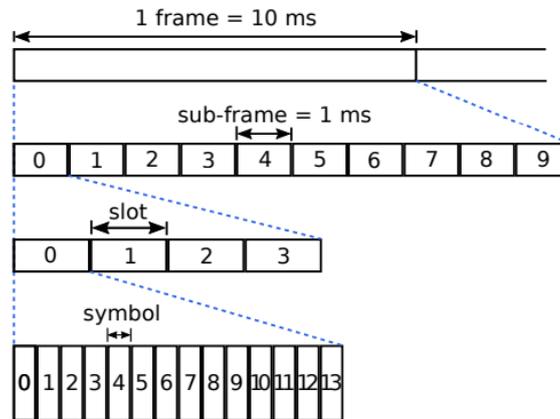


Fig 1. Trama 5G NR para un SCS de 60 kHz y CP normal [3].

Conforme la separación entre subportadoras aumenta, el tiempo de símbolo disminuye, por lo que el número de símbolos que se pueden agrupar en cada subtrama aumenta. Además, con una separación entre subportadoras mayor se asegura robustez frente a los efectos del Doppler shift y ruido de fase, que provocan la pérdida de ortogonalidad, y por lo tanto interferencia entre subportadoras (ICI). Respecto a la longitud del prefijo cíclico normal o extendido, se puede considerar su uso dependiendo del tipo de entorno, por ejemplo, entornos outdoor e indoor.

El bloque de recursos (RB, *Resource Block*) para 5G NR está definido como 12 subportadoras consecutivas en el dominio de la frecuencia, al igual que LTE [2]. El eje y del *Resource Grid*, correspondiente al dominio de la frecuencia, varía dependiendo del número de RBs, y el eje x , correspondiente al tiempo, varía dependiendo de la numerología utilizada, ya que el número de slots/símbolos dentro de cada *subframe* es diferente (Fig. 2).

Hay un *resource grid* por puerto de antena y por configuración de la CP-OFDM. En la TS 38.104 del 3GPP [4] se especifican dos rangos de frecuencias de operación (*carriers*), denominados FR (*Frequency Range*). EL FR1 corresponde a frecuencias de 450 MHz hasta 6 GHz, y el FR2 contempla frecuencias desde 24.25 GHz hasta 52.6 GHz. Por lo tanto, el FR2 es el rango de frecuencias que se deben considerar para *mmWave*. Para transmisión de datos en el FR2 se pueden utilizar las numerologías 3 (60 kHz) y 4 (120 kHz). Para transmitir señales de sincronización se pueden aplicar las numerologías 4 (120 kHz) y 5 (240 kHz) ya que, como se indicó anteriormente, la numerología 3 no se usa sincronización y la numerología 5 no se usa para datos.

Los anchos de banda de transmisión, así como el número máximo de RBs para SCS de 60 kHz y 120 kHz se indican en la Tabla 3. Para un SCS de 120 kHz se definen anchos de banda de transmisión de 50 MHz, 100 MHz, 200 MHz y 400 MHz. Para el caso de SCS igual a 60 kHz no se utilizan anchos de banda de 400 MHz.

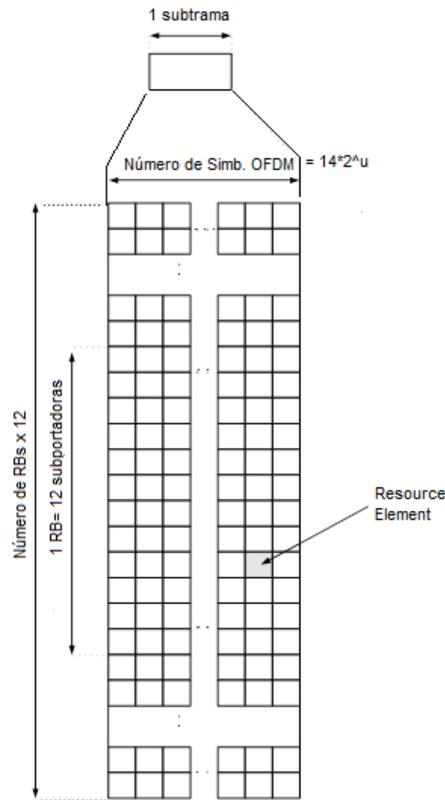


Fig 2. Resource Grid para NR 5G [4].

En la Tabla 3 también se muestra el número de RBs en función de la numerología utilizada y el ancho de banda siendo $N_{RB} = (\text{Ancho de banda}) / (12 \cdot \text{SCS})$ [4].

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

Tabla 3. Ancho de Banda de transmisión y RBs para SCS de 60 kHz y 120 kHz [4].

El número máximo de subportadoras para *mmWave* se puede obtener considerando el número máximo de RBs para el mayor ancho de banda de transmisión permitido. De esta manera, tanto para la numerología de 60 kHz como 120 kHz el número máximo de subportadoras es de $264 \cdot 12 = 3168$. Por lo tanto, la correspondiente IFFT que se aplica es de $2^{12} = 4096$ elementos. Para NR se define el concepto de porción de ancho de banda (BWP, *Bandwidth Part*) que, básicamente, representa un conjunto continuo de RBs seleccionados a partir de un subconjunto de RBs comunes (CRB *Common Resource Blocks*) para una numerología específica. Tanto en *downlink* como en *uplink*, un UE puede ser configurado con hasta 4 BWPs, con la condición de que solo un BWP esté activo a la vez. Fuera del BWP configurado para un UE, este no puede recibir PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*), PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) y CSI-RS (*Channel State Information – Reference Signals*). En *uplink* el UE no debe transmitir PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*) o PUCCH (*Physical Uplink Shared Channel*) fuera del BWP asignado [4].

II.2 BEAM MANAGEMENT

Dadas las condiciones de propagación de las señales a altas frecuencias (*mmWave*), en 5G se propone el uso de técnicas relacionadas al uso de múltiples antenas, conocidas como *Massive MIMO* o *FD-MIMO*. Con la adopción de estas técnicas es posible el uso de técnicas de conformación de haces estrechos conocidas como *beamforming*. En 5G NR, al conjunto de procedimientos que permiten mantener una adecuada sincronización y control entre las estaciones base y los UE (*User Equipment*), se conocen como de *beam management*. Las funciones del *beam management* puede ser el intercambio de señales y mensajes entre la estación base y el UE, con el fin de establecer sincronización, acceso inicial y seguimiento o *tracking* correspondiente. A nivel de capas en la pila de protocolos, *beam management* representa los procedimientos de capa 1 y 2, que permiten establecer y mantener un conjunto de *beams* desde el TRxP (*Transmission Reception Point*) y/o el UE, tanto en *downlink* como en *uplink* [5].

Los aspectos relacionados con el procedimiento de *beam management* se indica en la Fig. 3 [5].

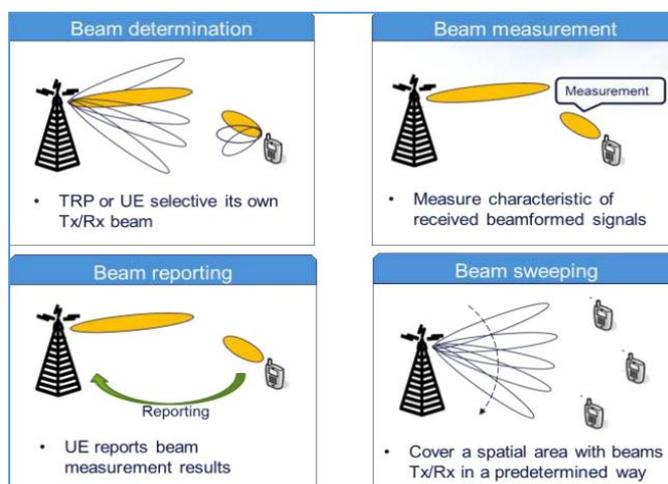


Fig 3. Aspectos relacionados con el *beam management* en 5G NR [6].

En escenarios con uno o más TRxPs se definen tres procedimientos [5] (véase también Fig. 4):

- **P-1:** El UE realiza mediciones en distintos *beams* provenientes desde los TRxP, para mantener la selección de *beams* en TX/RX.
- **P-2:** El UE mide diferentes *beams* provenientes de distintos TRxP, para realizar los respectivos cambios inter/intra *beam*.
- **P-3:** El UE realiza mediciones en el mismo *beam* proveniente de un TRxP con el fin de conmutar, de ser necesario, a otro *beam* del UE, y en caso que este realice *beamforming*.

Para el acceso inicial (modo IDLE UE) se especifica el envío en el enlace *downlink* de *SS burst* (ráfagas SS), que consisten en el envío de bloques SS/PBCH. Para acceso inicial y tracking (CONNECTED UE) es posible el envío en *downlink* de ráfagas SS, así como el uso de las CSI-RS. Para el enlace *uplink*, tanto para acceso inicial como para procedimientos de *tracking*, se especifica el uso de las SRS (*Sounding Reference Signals*).

Por lo tanto, para procedimientos de *beam management* en modo CONNECTED UE, es posible el uso tanto de ráfagas SS como de las CSI-RS en *downlink*.

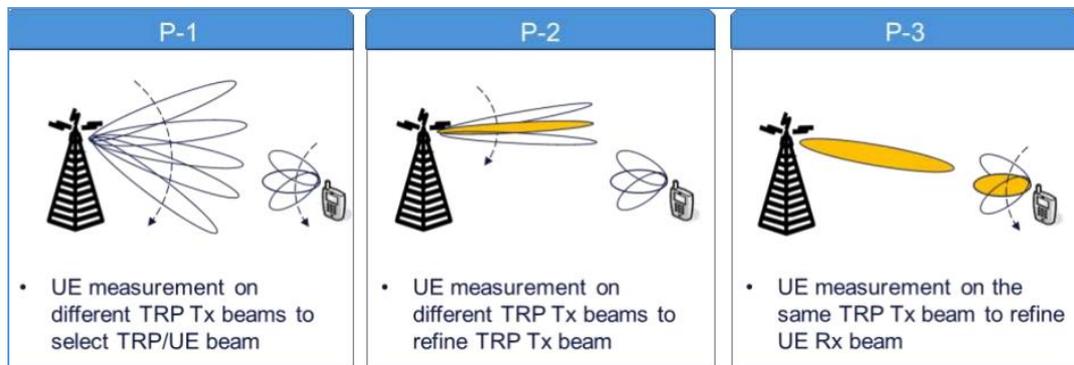


Fig 4. Procedimientos aplicados en *beam management* [6].

II.2.1 BLOQUES Y RÁFAGAS SS

Las señales de sincronización primaria (PSS-*Primary Synchronization Signal*) y secundaria (SSS-*Secondary Synchronization Signal*), al igual que en LTE, se usan para la sincronización de las *Radio Frames* y para la identificación de celda. Para el 5G NR se especifica un bloque que contiene las señales de sincronización y el PBCH (*Physical Broadcast Channel*), conocido como bloque SS. Un bloque SS comprende 4 símbolos OFDM en tiempo y 240 subportadoras en frecuencia; lo que corresponde a 20 RBs. Los símbolos PBCH llevan sus propias señales DMRS (*DeModulation Reference Signals*) multiplexadas en frecuencia. La estructura de un bloque SS en el tiempo y frecuencia se muestra en la Fig. 5, donde los símbolos y portadoras correspondientes son relativos al inicio de un bloque SS en el *Resource Grid* [1].

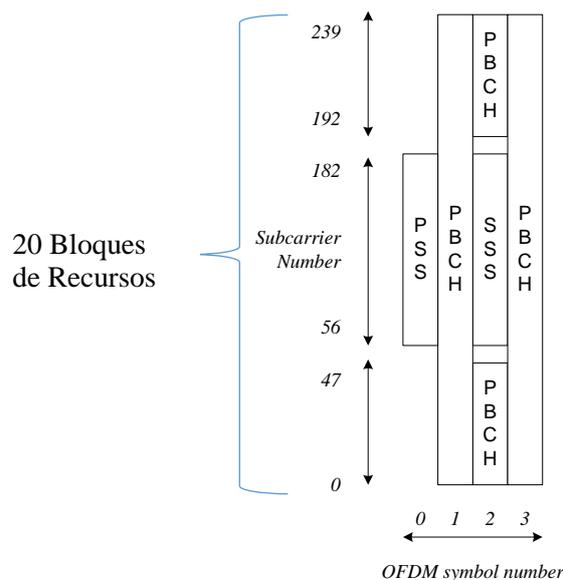


Fig 5. Estructura en Tiempo y Frecuencia de un bloque SS/PBCH [1].

La ubicación y periodicidad con la que se transmiten los bloques SS la determina la red y depende de la numerología empleada. En la especificación TS 38.213 del 3GPP [7] se indican los índices de los símbolos OFDM en los que inicia cada bloque SS para frecuencias superiores a los 6 GHz. Para procedimientos de sincronización en *mmWave* se establecen SCS de 120 kHz y 240 kHz, señalados como casos D y E, respectivamente.

La periodicidad por defecto con la que se envía cada bloque es de 20 ms, es decir, cada dos tramas, aunque este parámetro puede ser modificado por la red. Otras opciones que plantea el estándar son {5, 10, 40, 80, 160} ms. En la Tabla 4 se indican las posiciones de inicio, en tiempo, de un bloque SS dentro de una trama, donde se puede determinar que para los casos D y E, dentro de cada media trama (5 ms), existen hasta 64 bloques SS [7].

SCS	Símbolo OFDM (Inicio del bloque SS/PBCH)
Caso D: 120 kHz	4,8,16,20,32,36,44,48,60,64,72,76,88,92,100,104,144,148,156,160,172,176,184,188,200,204,212,216,228,232,240,244,284,288,296,300,312,316,324,328,340,344,352,356,368,372,380,384,424,428,436,440,452,456,464,468,480,484,492,496,508,512,520,524
Caso E: 240 kHz	8,12,16,20,32,36,40,44,64,68,72,76,88,92,96,100,120,124,128,132,144,148,152,156,176,180,184,188,200,204,208,212,288,292,296,300,312,316,320,324,344,348,352,356,368,372,376,380,400,404,408,412,424,428,432,436,456,460,464,468,480,484,488,492

Tabla 4. Índices del símbolo OFDM en el que se inicia cada bloque SS/PBCH para $f > 6$ GHz [7].

Los UEs deben estar habilitados para identificar los bloques SS en función de los índices de los símbolos OFDM que determinan el inicio de cada bloque. Uno o múltiples bloques SS conforman una ráfaga SS, varias ráfagas SS componen un *SS burst set*.

Para los casos D y E existen hasta 64 bloques dentro de un *SS Burst set*. Los 64 bloques SS para un SCS de 120 kHz se muestran en la Fig. 6. De acuerdo con los índices de la Tabla 4, el último bloque SS ocupa el índice 524. Así pues, considerando que los bloques SS consisten de 4 símbolos, este finalizaría en el símbolo 527. La duración de símbolo para esta numerología es de 8.94 μ s, por lo que el *SS burst set* tiene una duración aproximada de 4.7 ms. En frecuencia los bloques SS ocupan 20 RBs, que es igual a 240 subportadoras.

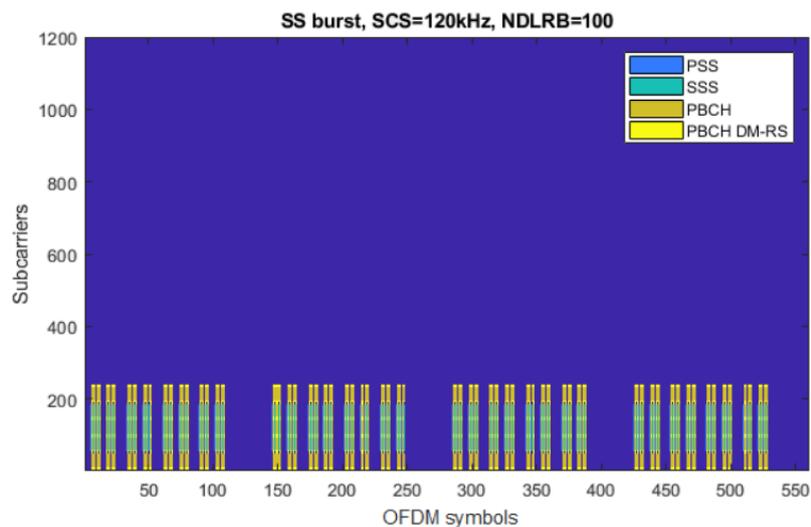


Fig 6. Bloques SS dentro del Resource Grid, para un SCS de 120 kHz [8].

En capa física al menos se soporta una periodicidad de ráfagas SS y el UE puede asumir que el conjunto de ráfagas SS son periódicas. Cada bloque SS lleva información de un *beam*, por lo que los bloques SS dentro de un *SS burst set* no se repiten, como se indica en la Fig. 7. Así pues, mediante el envío de múltiples bloques, la estación base transmite diferentes *beams*, de tal manera que se cubre una determinada área, lo que se conoce como *beam sweeping*. Un *SS burst set* está confinado, como se indicó anteriormente, en 5 ms de la trama y se repite cada cierto periodo, por ejemplo, cada 20 ms, que es la periodicidad por defecto.

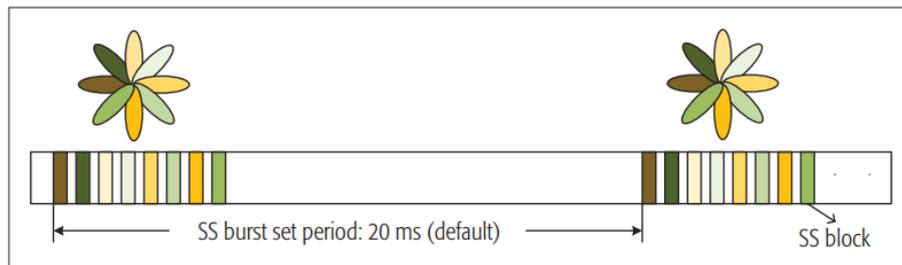


Fig 7. SS burst set con una periodicidad de 20 ms [9].

El objetivo del *beam sweeping* es obtener el mejor *beam* con el cual el UE se sincronizará con la estación base. Las señales PSS, SSS y el PBCH que conforman un bloque SS comparten un mismo puerto de antena. Así pues, tanto en modo CONNECTED como IDLE, la red debe proporcionar información de la periodicidad de las ráfagas SS, así como una ventana de tiempo para la detección de las señales de sincronización PSS y SSS. Esta información se entrega al UE por cada frecuencia de portadora, por lo que el UE asume que es la misma información para todas las celdas que usan esa misma portadora. El puerto 4000 está definido para la transmisión de PBCH, PSS y SSS [2].

II.2.2. SEÑALES DE REFERENCIA CSI

En modo CONNECTED es posible usar para la gestión de los recursos de radio o RRM (*Radio Resource Management*), además de los bloques SS, señales de referencia CSI, conocidas como CSI-RS. A diferencia del uso de ráfagas SS, mediante las CSI-RS se puede lograr mejores resultados de las mediciones, ya que permiten formar *beams* más estrechos y con una mejor SINR. En la Fig. 8 se muestra como, mediante las CSI-RS, se logra una mayor resolución y granularidad en los *beams*. Considerando la misma energía por RE que con bloques SS, con las CSI-RS se logra cubrir mayores distancias, lo que permite realizar un mejor control de los usuarios, especialmente de los que se encuentran en los bordes de las celdas [9].

Considerando que un TRxP configura A *beams*, y el receptor B *beams*, en total existen $k=A*B$ pares de *beams* que pueden ser utilizados. Las mediciones que realiza el UE se basan en señales de referencia (CSI-RS) para realizar dicha gestión de *beams*. Asumiendo que k *beams* pueden ser configurados en total, y el reporte de los resultados de las mediciones se realiza respecto a N *beams* ($N < k$) seleccionados dentro de un cierto umbral, el valor de N no necesariamente debe ser un valor

fijo, sino que depende de los mejores *beams* que el UE recibe. Debido a que el TRxP utiliza hasta A *beams*, es posible configurar hasta A CSI-RS, es decir, una señal de referencia por *beam*.

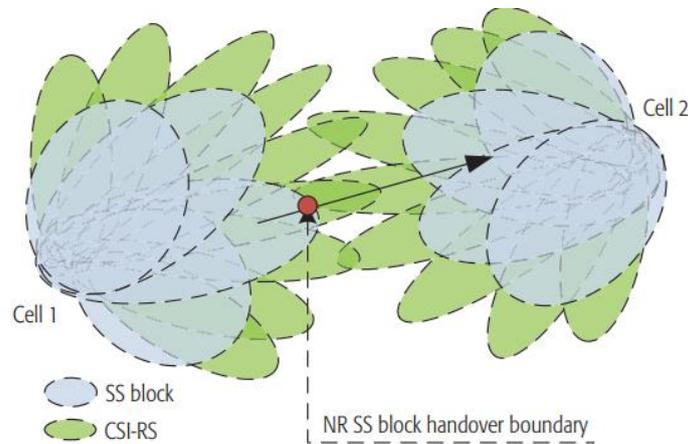


Fig 8. Diferencias de las CSI-RS como alternativa al uso de Bloques SS en modo CONNECTED [9].

Las CSI-RS se pueden transmitir de forma aperiódica o periódica. Por ejemplo, una configuración aperiódica es suficiente en áreas pequeñas y con pocos usuarios, en donde se realiza un barrido de pocos *beams*. Por otro lado, en entornos con alta densidad de usuarios lo mejor es utilizar una transmisión periódica de señales CSI-RS sobre un área amplia con el fin de alcanzar a un alto número de usuarios. Adicionalmente, se puede realizar la transmisión de señales CSI de forma semi-persistente, lo que significa que la transmisión de estas señales puede ser activada/desactivada por la red de forma dinámica [10].

Las señales específicas que el gNB (Nodo B en 5G NR) puede solicitar al UE medir, ya sea basada en CSI-RS y/o mediante bloques SS son: RSRP (*Reference Signal Received Power*), RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) y SINR (*Signal to Interference & Noise Ratio*). Todas estas medidas se realizan diferenciando celdas y frecuencias de la portadora utilizadas. De forma general, los recursos en tiempo y frecuencia que el UE debe utilizar para los reportes del CSI los controla el gNB. Además, los parámetros que definen al CSI pueden ser CQI (*Channel Quality Indicator*), PMI (*Precoding Matrix Indicator*), CRI (*CSI-RS Resource Indicator*), LI (*Layer Indication*), RI (*Rank Indication*) y/o RSRP. Como se usan *beamformed* CSI-RS, el CRI hace referencia al recurso CSI-RS que se está reportando, es decir, al *beam* específico al que se asocian los parámetros CQI, PMI, LI, RSRP reportados. Mediante la información reportada por el UE, el gNB realiza los procedimientos de adaptación de enlace y *scheduling* correspondientes. Los reportes pueden ser enviados por el UE mediante el PUCCH o el PUSCH, cuyos recursos específicos a utilizar son configurable desde el gNB.

Los símbolos OFDM soportados para el mapeo de las CSI-RS pueden ser adyacentes o no en frecuencia. Además, los símbolos OFDM se pueden configurar para contener únicamente CSI-RS, y la densidad de REs por puerto y por PRB es también configurable. Para procedimientos de *beam management* se definen las *beamformed* CSI-RS, lo que significa que a las señales CSI-RS se les

aplica un *precoder*, y son enviadas a un UE específico dentro de la celda, como se indica en la Fig. 9. Los UEs realizan las medidas en los recursos CSI-RS que se les han asignado y envían los reportes correspondientes [10].

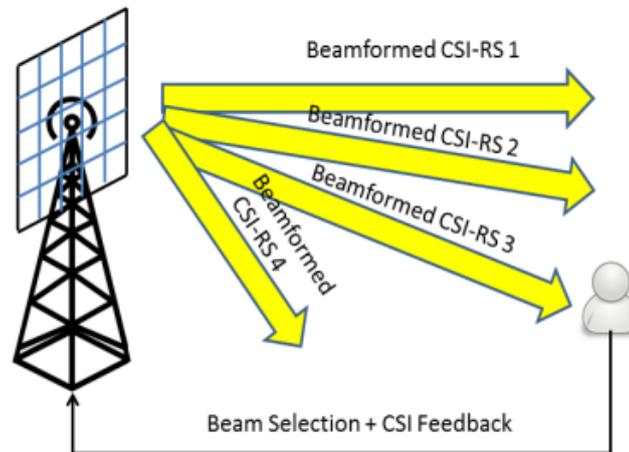


Fig 9. *Beamformed* CSI Reference Signals [11].

La ventaja de utilizar CSI-RS aplicando procedimientos de *beamforming*, además de mejorar la SNR, es que se reduce el *overhead*, lo cual es útil en *mmWave* en donde se hace uso de una gran cantidad de antenas. Si no se utilizaran las *beamforming* CSI-RS, el mapeo que se debería realizar es por cada elemento de antena. Por ejemplo, en una agrupación o *array* de antenas de 32 elementos se deberían mapear 32 CSI-RS. En 5G NR, mediante el uso, por ejemplo, de un *array* de antenas 2D de dimensiones 16 x 4 (64 elementos), se pueden mapear 16 *beamformed* CSI-RS a los 64 elementos de la agrupación. Está claro entonces que en el caso de mapeo de una CSI-RS por elemento de antena, la complejidad aumenta con el número de antenas y, por lo tanto, los reportes que el UE debe retroalimentar al gNB también serán más complejos.

El mapeo de las CSI-RS en un RB, a diferencia de LTE, no se basa en un patrón definido, sino que se definen un conjunto de combinaciones y condiciones que se deben cumplir, en donde se asume que no se mapearán CSI-RS en los REs utilizados para mapear DM-RS, PBCH, PSS, SSS, o PDCCH. A pesar de que para NR no existe un patrón fijo donde se deban mapear las CSI-RS, se manejan muchos conceptos similares a LTE. A modo de ejemplo, en LTE el mapeo en tiempo debe hacerse a nivel de *subframe*, lo que corresponde a dos slots y 14 símbolos OFDM, mientras que en 5G la asignación se realiza a nivel de slot, y cada slot, independientemente de la numerología, está formado por 14 símbolos OFDM. Tanto en LTE como en NR, el mapeo en frecuencia se realiza a nivel de RB, dependiendo del número de RBs asignados, o en la terminología utilizada en 5G, dependiendo del BWP asignado.

Cada beam que se forma equivale a un recurso CSI-RS, el cual puede ser mapeado con 1 o más puertos. Por lo tanto, la selección de un beam específico está asociada a la selección de un conjunto de REs, o en el caso de múltiples beams, equivale a la selección de un recurso CSI-RS dentro de un conjunto de recursos, como se indica en la Fig. 10.

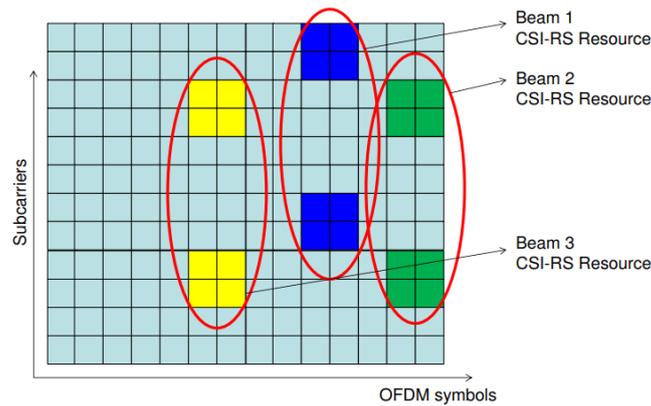


Fig 10. Puertos de antena asociados a un recurso CSI-RS [11].

El mapeo de las CSI-RS para NR está definido en la especificación TS 38.211 del 3GPP [2], en la cual se indican los REs que deben ser utilizados en función del BWP asignado. Cada RE, y por lo tanto cada *resource grid*, es diferente en función de la numerología y el puerto de antena utilizado. Además, se entiende que todas las CSI-RS para un UE específico estarán contenidas dentro de los RB que se le han asignado. En NR se definen hasta 32 puertos CSI-RS. En la Tabla 5 se indican las configuraciones posibles que se pueden considerar para mapear las CSI-RS dentro de un slot (14 símbolos).

En esta tabla se definen los siguientes parámetros [2]:

- Número de puertos CSI-RS: 1, 2, 4, 8, 16, 24 o 32.
- Cuatro tipos de *bitmap* dependiendo de la fila seleccionada en la Tabla 5, 1 *bitmap* corresponde a la fila 1, otro *bitmap* para la fila 2, otro para la fila 4, y un cuarto *bitmap* para las 15 filas restantes. El tipo de *bitmap* se indica mediante señalización RRC (*Radio Resource Control*).
- La densidad que básicamente define el número de REs utilizados por RB y por puerto. Se definen densidades de 3, 1 y 0,5. Una densidad de 3 equivale a utilizar 3 REs para mapear un puerto dentro de un RB, con densidad 1 se mapea 1 puerto por RE dentro de un mismo RB, y con densidad 0.5 es posible mapear 1 puerto por RE, cada 2 RB.
- La multiplexación de los puertos: Como se indicó anteriormente, permite evitar interferencia entre las señales que se envían por cada puerto, para ello es posible utilizar TDM, FDM, CDM, o una combinación entre ellas. La ventaja de utilizar CDM frente a TDM/FDM es que permite balancear en frecuencia la potencia de la transmisión de las señales CSI. En la Tabla 5 se especifica CDM2, CDM4 y CDM8 para el mapeo de los puertos CSI-RS.

Es posible aplicar diferente multiplexado CDM para un mismo número de puertos CSI-RS. Por ejemplo, en la fila 11 de la Tabla 5 se define CDM2 para 16 puertos, por lo que existen 8 grupos CDM2. Asimismo, en la fila 12 en cambio se define CDM4 para el mismo número de puertos, es así que el número de grupos CDM4 es 4.

Row	Ports	Density ρ	CDMtype	(\bar{k}, \bar{l})	k'	l'
1	1	3	No CDM	$(k_0, l_0), (k_0 + 4, l_0), (k_0 + 8, l_0)$	0	0
2	1	1, 0.5	No CDM	(k_0, l_0)	0	0
3	2	1, 0.5	FD-CDM2	(k_0, l_0)	0, 1	0
4	4	1	FD-CDM2	$(k_0, l_0), (k_0 + 2, l_0)$	0, 1	0
5	4	1	FD-CDM2	$(k_0, l_0), (k_0, l_0 + 1)$	0, 1	0
6	8	1	FD-CDM2	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0), (k_3, l_0)$	0, 1	0
7	8	1	FD-CDM2	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_0, l_0 + 1), (k_1, l_0 + 1)$	0, 1	0
8	8	1	CDM4 (FD2,TD2)	$(k_0, l_0), (k_1, l_0)$	0, 1	0, 1
9	12	1	FD-CDM2	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0), (k_3, l_0), (k_4, l_0), (k_5, l_0)$	0, 1	0
10	12	1	CDM4 (FD2,TD2)	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0)$	0, 1	0, 1
11	16	1, 0.5	FD-CDM2	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0), (k_3, l_0),$ $(k_0, l_0 + 1), (k_1, l_0 + 1), (k_2, l_0 + 1), (k_3, l_0 + 1)$	0, 1	0
12	16	1, 0.5	CDM4 (FD2,TD2)	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0), (k_3, l_0)$	0, 1	0, 1
13	24	1, 0.5	FD-CDM2	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0), (k_0, l_0 + 1), (k_1, l_0 + 1), (k_2, l_0 + 1),$ $(k_0, l_1), (k_1, l_1), (k_2, l_1), (k_0, l_1 + 1), (k_1, l_1 + 1), (k_2, l_1 + 1)$	0, 1	0
14	24	1, 0.5	CDM4 (FD2,TD2)	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0), (k_0, l_1), (k_1, l_1), (k_2, l_1)$	0, 1	0, 1
15	24	1, 0.5	CDM8 (FD2,TD4)	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0)$	0, 1	0, 1, 2, 3
16	32	1, 0.5	FD-CDM2	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0), (k_3, l_0),$ $(k_0, l_0 + 1), (k_1, l_0 + 1), (k_2, l_0 + 1), (k_3, l_0 + 1),$ $(k_0, l_1), (k_1, l_1), (k_2, l_1), (k_3, l_1),$ $(k_0, l_1 + 1), (k_1, l_1 + 1), (k_2, l_1 + 1), (k_3, l_1 + 1)$	0, 1	0
17	32	1, 0.5	CDM4 (FD2,TD2)	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0), (k_3, l_0), (k_0, l_1), (k_1, l_1), (k_2, l_1), (k_3, l_1)$	0, 1	0, 1
18	32	1, 0.5	CDM8 (FD2,TD4)	$(k_0, l_0), (k_1, l_0), (k_2, l_0), (k_3, l_0)$	0, 1	0, 1, 2, 3

Tabla 5. Localización de los puertos CSI-RS dentro de un slot [2].

Las posiciones en frecuencia y tiempo de un RE a utilizar para las CSI-RS se definen con los índices k y l , en donde k representa la posición en frecuencia de un RE dentro de un RB, es decir, la subportadora correspondiente dentro del RB, y l representa la posición en tiempo del RE, es decir, el símbolo correspondiente dentro del slot.

El índice k se denota por:

$$k = nN_{SCxRB} + \bar{k} + k' \quad (1)$$

Donde el valor de n depende del número del número de RBs asignados, N_{SCxRB} es el número de subportadoras por RB (12) y los valores de \bar{k} y k' se determinan mediante la Tabla 5. Además el índice l se representa como $l = \bar{l} + l'$, donde \bar{l} y l' se determinan mediante la Tabla 5.

Básicamente los pares (\bar{k}, \bar{l}) indican la posición en frecuencia y tiempo de un grupo CDM dentro de un RB, el valor de \bar{k} , según la Tabla 5, puede tomar las posiciones k_0, k_1, k_2 , o k_3 , según

la fila seleccionada. Además, los valores de k_i tiene una relación directa con el bitmap aplicado, como se indica a continuación:

- $[b_3 \cdots b_0]$, $k_i = f(i)$ para la fila 1 de la Tabla 5.
- $[b_{11} \cdots b_0]$, $k_i = f(i)$ para la fila 2 de la Tabla 5.
- $[b_2 \cdots b_0]$, $k_i = 4f(i)$ para la fila 4 de la Tabla 5.
- $[b_5 \cdots b_0]$, $k_i = 2f(i)$ para el resto de casos.

El término $f(i)$ indica el número de bit configurado como 1 dentro del bitmap. Por ejemplo, para la fila 1, $f(i)$ puede ser 0, 1, 2 o 3. En este caso $f(i) = k_i$ de manera que se puede concluir que para la fila 1 de la Tabla 5 el valor máximo de k_0 es 3 para cumplir con el valor de densidad especificado. Como otro ejemplo se puede indicar que la fila 4 de la Tabla 5 especifica 4 puertos agrupados en dos grupos consecutivos CDM2, y utilizando un único símbolo, para cumplir con los parámetros de densidad señalados el valor máximo de k_0 es 8, ya que el valor máximo de $f(i)$ es 2.

El valor de \bar{l} puede tomar las posiciones en tiempo l_0 o l_1 , y son definidas relativas al inicio del slot con respecto a la posición de una CSI-RS dentro de ese slot. El valor de l_0 y l_1 se configura mediante señalización RRC.

Por otro lado, los índices k' y l' indican la posición de un RE dentro de un grupo CDM.

La mejor manera de realizar el mapeo de las CSI-RS es ubicar primeramente las posiciones en tiempo y frecuencia de un grupo CDM (\bar{k}, \bar{l}) , y posteriormente seleccionar las posiciones en tiempo y frecuencia de los RE dentro de ese grupo CDM (k', l') . El mapeo del resto de RBs dependerá del BWP asignado y de la densidad.

Para dejar claro el procedimiento de mapeo de las CSI-RS para 5G NR, a continuación, se indican algunos casos. Algunos de los parámetros se asignarán arbitrariamente, ya que estos pueden ser configurados por la red.

Ejemplo 1: Las filas 1 y 2 de la Tabla 5 corresponden al mapeo de un puerto CSI-RS dentro de un slot. Como se trata únicamente de un puerto no es necesaria la multiplexación CDM y la densidad soportada para un puerto es 1/2, 1, o 3. En la Fig. 11 se indica el mapeo correspondiente para un puerto CSI-RS. La Fig. 11 a) y Fig. 11 b) corresponden al mapeo de las filas 1 y 2 de la Tabla 5, respectivamente. Se considera prefijo cíclico normal y 1 RB por simplicidad.

Para la fila 2, densidad 1/2, el mapeo debe realizarse de forma similar a la Fig. 11 b), pero la diferencia es que en frecuencia solo se mapea en RBs pares o impares, lo cual es configurable mediante señalización RRC, es decir, se mapea en uno de cada dos RBs. Nótese que, para la fila 1, Fig. 11 a), el valor máximo de k_0 es 3, de lo contrario no se cumple con los parámetros de densidad de la Tabla 5. Para el caso de la fila 2, representado en la Fig. 11 b), k_0 puede tomar valores desde 0 hasta 11. Para ambos casos de la Fig. 11 se seleccionó un valor de l_0 igual a 9.

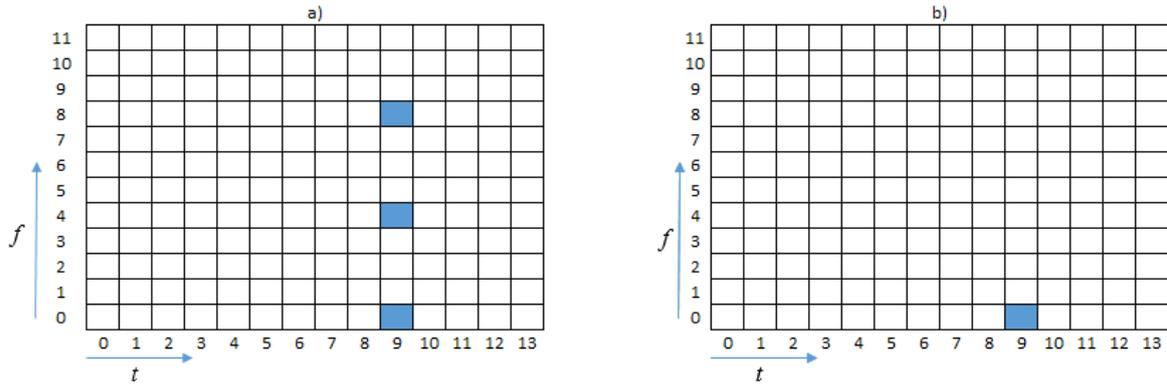


Fig 11. Mapeo de un puerto CSI-RS, a) fila 1, $k_0=0, l_0=9$, densidad 3. b) fila 2, $k_0=0, l_0=9$, densidad 1.

Ejemplo 2: Las filas 16, 17 y 18 de la Tabla 5 corresponden al mapeo de 32 puertos CSI-RS dentro de un slot, con multiplexación CDM2, CDM4, CDM8, respectivamente. Para los tres casos se puede configurar densidad 1/2 o 1. En la Fig. 12 se muestra el mapeo de 32 puertos CSI-RS aplicando CDM8, por lo que se obtienen 4 grupos. En las distintas filas de la Tabla 5, además de indicar la multiplexación CDM, se indica la correspondiente División en Frecuencia (FD) y/o División en Tiempo (TD) de los RE utilizados para el mapeo. Por ejemplo, en la fila 18 de la Tabla 5 se indica: CDM8 (FD2, TD4), lo que representa que por cada grupo CDM8, 2 RE consecutivos se dividen en frecuencia o se usan dos subportadoras distintas, y 4 RE consecutivos se dividen en tiempo, es decir, utilizan 4 símbolos OFDM, tal como se puede observar en la Fig. 12.

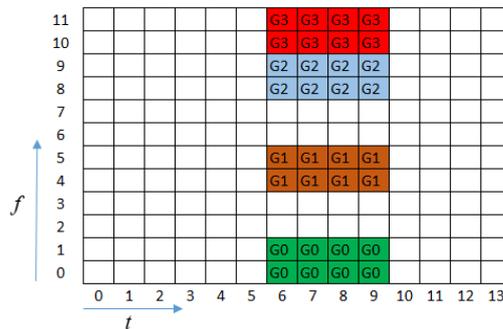


Fig 12. Mapeo de 32 puertos CSI-RS, con $k_0=0, k_1=4, k_2=8, k_3=10, l_0=6$, densidad 1.

En 5G NR los puertos utilizados para las CSI-RS son diferentes. En este caso la numeración de los mismos se realiza a partir del puerto 3000, y se enumeran en función del grupo CDM y el número total de puertos. Básicamente, la numeración se realiza a partir del primer grupo CDM mapeado en el RB, por lo que el máximo número de puertos será de 32. En este caso la numeración se realizará iniciando por el primer grupo CDM mapeado, en donde se encontrará el puerto 3000, hasta el último grupo CDM, en donde se encontrará el puerto 3031 en caso de que se utilicen 32 puertos. Es importante recordar que el número de puertos CSI-RS especificados para 5G NR puede ser 1, 2, 4, 8, 12, 16, 24, o 32.

El ancho de banda de los recursos CSI lo define la red y el número máximo de RBs es de 52. Por lo tanto, el ancho de banda máximo para los recursos CSI-RS será de 37,44 MHz y 74,88 MHz, para SCS de 60 kHz y 120 kHz, respectivamente [10].

Para la configuración de CSI-RS ya sea de forma periódica o semipersistente, el UE debe asumir que las señales CSI-RS son transmitidas con una periodicidad de $T_{\text{CSI-RS}}$ slots y con el valor de offset T_{offset} que defina la red. La periodicidad mínima, en slots, que se puede configurar, independiente de la numerología, es de 10 ms, correspondiente a la duración de una trama. Para un SCS de 60 kHz, las posibles periodicidades que se pueden configurar son: 40, 80, 160 y 320 slots, mientras que para un SCS de 120 kHz se pueden definir las periodicidades de: 80, 160, 320 y 640 slots. Debido a que distintas numerologías representan distintos slots dentro de cada trama, la periodicidad en milisegundos de los recursos CSI-RS depende del SCS empleado [10].

Para procedimientos de *tracking* en modo CONNECTED, en el estándar se especifica el mapeo de 2 recursos CSI-RS periódicos en 1 slot para FR1, o de 4 recursos CSI-RS en dos slots consecutivos para FR2 [10]. Es decir, en mmWave hasta 4 recursos CSI-RS periódicos se mapean en dos slots contiguos de la trama de radio. En los dos slots adyacentes que se utilizan para el mapeo de los recursos CSI-RS se ocuparán los mismos símbolos y, por consiguiente, las mismas posiciones en el tiempo.

En la Fig. 13 se muestra un ejemplo donde se indican los slots en los que el UE asume que contienen CSI-RS, considerando una periodicidad de 40 slots y diferentes *offsets*. Si se asume un SCS de 60 kHz, la periodicidad con la que se repiten slots mapeados con CSI-RS es de 10 ms, es decir, en cada trama, como se muestra en la Fig. 13 a). En la Fig. 13 b) se considera un offset de 3 slots, pero se mantiene la periodicidad de 40 slots, por lo que el tiempo en el que se repiten las CSI-RS es igual al caso a), pero mapeadas en distintos slots. Si se utiliza un SCS de 120 kHz, la periodicidad mínima es de 80 slots, es decir, el tiempo en que se repite un slot mapeado con CSI-RS es de 10 ms, ya que el número de slots por trama es de 80.

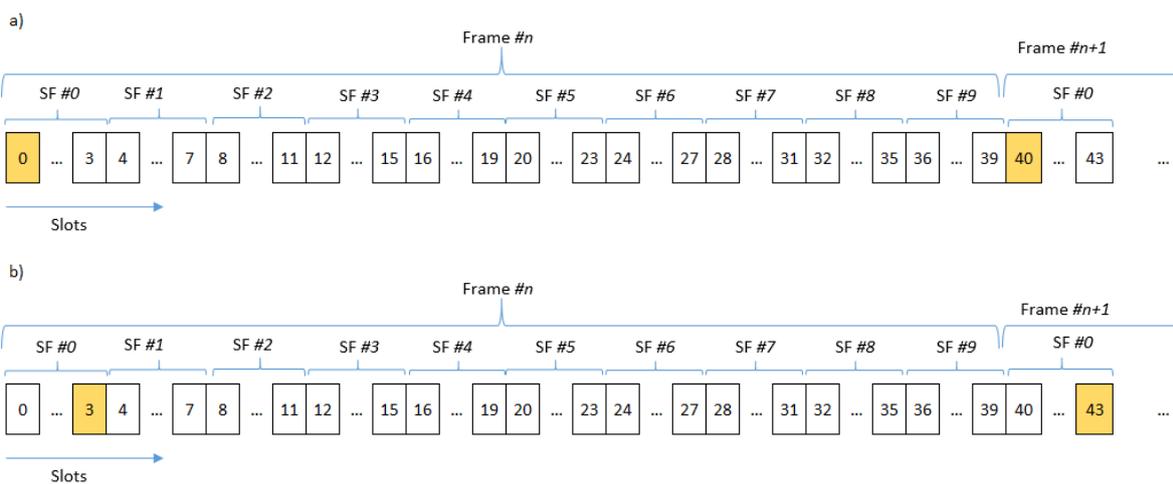


Fig 13. Periodicidad de las CSI-RS. a) $T_{\text{CSI-RS}}= 40$ slots, $T_{\text{offset}}= 0$, b) $T_{\text{CSI-RS}}= 40$ slots, $T_{\text{offset}}= 3$.

Dentro de los slots donde se transmiten CSI-RS, se asume que todos los símbolos OFDM dentro de ese slot han sido configurados como *downlink*. El patrón de mapeo de las CSI-RS que se realice

en dicho slot depende del número de puertos, multiplexación CDM y densidad, como se indicó previamente.

III. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE PRESTACIONES DE LOS DISTINTOS MECANISMOS DE SELECCIÓN DE HAZ

III.1 SIMULADOR DE RED *ns-3*

ns-3 es un simulador de red basado en eventos discretos, es de software libre y se encuentra bajo la versión 2 de la GNU General Public License. Su uso está indicado principalmente en ambientes educativos y de investigación. *ns-3* permite simular tanto redes IP como no IP, y soporta diferentes protocolos de tipo *unicast* o *multicast*, ya sea en redes cableadas o inalámbricas. Mediante *ns-3* es posible definir un ambiente de trabajo incluyendo la configuración de la simulación, hasta la obtención y análisis de resultados. *ns-3* se utiliza principalmente para la simulación de redes inalámbricas y redes basadas en el protocolo IP, lo que incluye redes Wi-Fi, WiMAX o LTE (Capas 1 y 2) [12].

El entorno de trabajo de *ns-3* está organizado como un conjunto de carpetas, en donde las carpetas *src* contienen diferentes clases C++. Mediante las distintas clases disponibles es posible configurar diferentes módulos de simulación, utilizando protocolos de red, de acuerdo con el escenario de aplicación. Gracias al diseño modular de *ns-3* es posible incorporar fácilmente nuevos algoritmos, lo que facilita la experimentación. En *ns-3* cada módulo representa básicamente un conjunto de múltiples subcarpetas, las que a su vez contienen el código fuente de los distintos módulos.

Uno de los módulos disponibles en *ns-3* es el módulo *mmWave* [13], el cual se diseñó para realizar simulaciones *end-to-end* de redes celulares LTE, y que se puede adaptar a las especificaciones del 3GPP para las redes 5G NR. En la Fig. 14 se muestra la estructura del módulo *ns-3* LTE, impulsado por el proyecto LENA. Mediante este módulo es posible utilizar todas las implementaciones desarrolladas a nivel de protocolos LTE/EPC, siendo que este módulo ofrece capas PHY y MAC personalizadas [14].

En la Fig. 14 se pueden observar la composición de las clases *MmWaveEnbNetDevice* y *MmWaveUeNetDevice*, que representan básicamente las pilas de protocolo para el eNB y el UE, respectivamente.

Dentro del módulo *ns-3* *mmWave* los usuarios pueden elegir entre diferentes opciones de modelos de canal. Cada uno de ellos ofrece diferente complejidad computacional, flexibilidad y precisión en la estimación del canal. Específicamente se puede optar por tres tipos de modelos de canal [13]: El primero, el cual se utiliza en las simulaciones realizadas en este trabajo, es el modelo especificado por el 3GPP, y que se encuentra detallado en la TS-38.900 [15]. El segundo modelo, denominado de *ray-tracing*, se basa en el uso de trazas con muestras que contienen el número de caminos, pérdidas de propagación, retardos, ángulos de llegada y salida, para cada camino. El

tercer modelo es de tipo estadístico y es basado en trazas de MATLAB, pero tiene el inconveniente de que solo permite simular en frecuencias de 28 GHz y 73 GHz al basarse en unas medidas concretas realizadas por la Universidad de Nueva York (NYU – *New York University*). El modelo de canal estadístico del 3GPP considera escenarios de movilidad y proporciona un modelo de bloqueo aleatorio, así como también considera comunicaciones en entornos *outdoor* o *indoor*. Este modelo está especificado para frecuencias entre 6-100 GHz, es decir, longitudes de onda entre 50-3 mm, respectivamente. En la estructura del simulador ns-3 se encuentran implementadas diferentes clases que modelan pérdidas de propagación (*Pathloss*), atenuación a pequeña escala (*small-scale fading*), consistencia espacial (*Spatial Consistency*) y bloqueo (*Blockage*) [14].

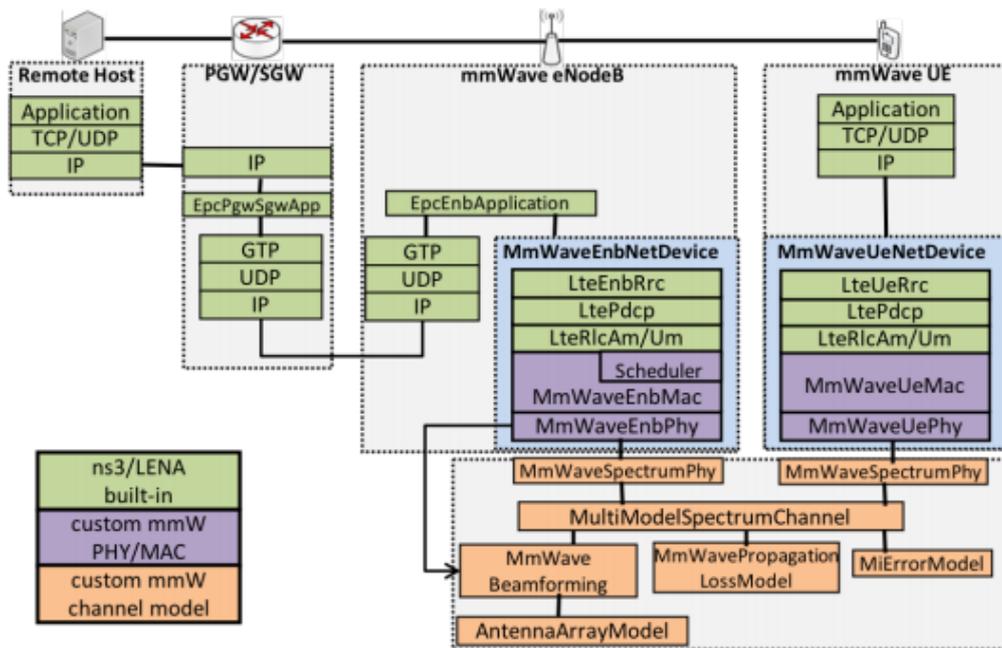


Fig 14. Diagrama de clases para el módulo *end-to-end* ns-3 mmWave [14].

Para proceder a realizar simulaciones mediante el módulo ns-3 mmWave se debe configurar, en primer lugar, los atributos que se requieren en la simulación. Existen distintas opciones de atributos en los repositorios del módulo. A continuación, se deben definir distintas condiciones y escenarios de la simulación, por ejemplo, definiendo las posiciones y velocidades entre el gNB y los UEs, o añadiendo obstáculos al escenario de simulación con el fin de simular condiciones de pérdida de línea de vista (NLoS). Mediante el módulo ns-3 se pueden simular procedimientos de *scheduling* en escenarios multi-usuario, evaluar la latencia considerando TTIs (*Transmission Time Interval*) fijos o variables, o estudiar las prestaciones de distintos esquemas de movilidad en redes LTE o 5G.

Como se observa en la Fig. 14, mediante el módulo ns-3 mmWave se puede integrar a la simulación distintos esquemas de *beamforming*, utilizando diferentes modelos de *arrays* de antenas. Esto es muy útil en *mmWave*, ya que este tipo de tecnologías son claves para explotar

adecuadamente las futuras redes 5G. Los esquemas de *beamforming* que soporta ns-3 mmWave pueden ser analógicos o digitales [14].

Dadas las características del simulador ns-3 descritas anteriormente y sus módulos integrados, en esta Tesina de Máster se utiliza este programa para estudiar las dos opciones de *beam management* especificadas por el 3GPP, es decir, mediante el uso de bloques SS y/o señales de referencia CSI, tal y como se describió en la sección II. Debido a que el mapeo de los bloques SS y las señales CSI, así como su periodicidad, es diferente, se pretende determinar la calidad de enlace entre estación base y UE al utilizar uno u otro tipo de señales, considerando diferentes tipos de escenarios y parámetros de movilidad.

La plataforma seleccionada en el presente trabajo para arrancar ns-3 es la distribución UBUNTU de Linux, en su versión 16.04. El procedimiento de instalación de ns-3 en UBUNTU se inicia con la descarga de las librerías C++ y Python:

```
>> apt-get install gcc g++ Python.
```

La herramienta Waf ha sido utilizada en el proceso de configuración de la compilación e instalación de bibliotecas, necesarias para la correcta ejecución del módulo ns-3 mmWave:

```
>> $ ./waf configure -d debug
```

```
>> $ ./waf build
```

Finalmente, desde la consola de comandos, se lanza la simulación definiendo el escenario y los parámetros en los que se desea estudiar el proceso de *tracking*:

```
>> $ ./waf --run "programa" --var1= --var2=
```

III.2 METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR LA CALIDAD DE ENLACE UTILIZANDO BLOQUES SS

Para proceder con las simulaciones fue necesario modificar y añadir algunas clases al módulo *mmWave*, con el fin de integrar las especificaciones del 3GPP para NR. La estructura de trama fue modificada con el fin de adaptarla a la TS 38.211, descrita brevemente en la sección II.1 de este documento, de manera que se establecieron las numerologías $\mu=\{2, 3, 4\}$ para *mmWave*, es decir, SCS de {60 kHz, 120 kHz, 240kHz}, respectivamente. Se tuvo en cuenta que la numerología $\mu=2$ no puede ser utilizada para sincronización y que la numerología $\mu=4$ no puede ser utilizada para datos (Tabla 1).

Con el fin de simular el respectivo *tracking* que debe existir entre las estaciones base y los UEs, se ha añadido al módulo *mmWave* una nueva clase, denominada “MmWaveBeamManagement”, mediante la cual se realizan mediciones entre las distintas combinaciones de *beams*, hasta seleccionar el mejor par de *beams* con el cual se realizará la transmisión en cada momento. Existe una clase “MmWaveBeamManagement” independiente para las clases “MmWaveEnbPhy” y “MmWaveUePhy”; indicadas en la Fig. 14. Además, la información actualizada de las mediciones

en los pares de *beams* se utiliza únicamente en capa física y el UE también hará uso de ella para el envío de reportes a la estación base.

Los parámetros y consideraciones definidos para las simulaciones se muestran en la Tabla 6. Se considera únicamente una estación base y un usuario.

PARÁMETROS /CONSIDERACIONES PARA LANZAR LAS SIMULACIONES	
Número de estaciones base y UEs	1 estación base y 1 UE
Modelo de canal	Modelo de canal definido por el 3GPP
Altura de la estación base	25 metros
Altura del UE	1.5 metros
Frecuencia de operación	28 GHz
Ancho de banda	1 GHz
Versión TCP	TCP Cubic
Señal de referencia a medir	SINR
SCS	120 kHz ($\mu=3$)
Velocidad del UE	1 m/s – 30 m/s
Entornos de simulación	LoS, NLoS
Arquitecturas de beamforming	Analógica, Digital
Periodicidad de bloques SS	5, 10, 20, 40, 80 y 160 ms

Tabla 6. Parámetros y consideraciones seguidas para lanzar las simulaciones.

El modelo de canal, como se indicó previamente, corresponde al modelo de propagación definido por el 3GPP y detallado en la TS-38.900. La versión TCP es TCP Cubic, adecuada para redes con grandes anchos de banda, como lo son las redes 5G. La señal de referencia a medir para realizar la selección y actualización de *beam* es la SINR, la cual se puede convertir directamente al CQI, que es el parámetro que el UE retroalimenta a la estación base. La separación entre subportadoras (SCS) utilizada para las simulaciones es de 120 kHz, correspondiente a la numerología $\mu=3$, con prefijo cíclico normal, y definida por el 3GPP para mmWave. Distintos entornos y escenarios de movilidad se pueden simular con velocidades de UE entre 1 m/s y 30 m/s, considerando condiciones de LoS o NLoS. Las arquitecturas de beamforming disponibles en ns-3 pueden ser analógicas o digitales, con la consideración de que las dos arquitecturas no pueden coexistir en el mismo emplazamiento.

Los procedimientos de sincronización y *tracking* entre la estación base y los UEs mediante bloques SS se pueden definir para distintas periodicidades, definidas por el estándar, siendo la periodicidad mínima de 5 ms y la máxima de 160 ms, y la periodicidad por defecto de 20 ms.

Como se indicó en la sección II.2.1, hasta 64 bloques SS se pueden configurar en la estación base por *SS burst set*. Cada bloque SS contiene información de un *beam* que apunta en una dirección definida por un *codeword*, por lo que el *codebook* utilizado en la estación base, para transmitir 64 bloques SS, es de 64 *codewords*. El número de *codewords* en transmisión está

relacionado directamente con el *array* de antenas utilizado en la estación base, es decir, en la estación base se utiliza un UPA (*Uniform Planar Array*) de 64 antenas isotrópicas, distribuidas como 16 elementos de antena en el plano horizontal y 4 elementos de antena en el plano vertical. En recepción, el UE utiliza un *array* de antenas de 16 elementos, distribuidos como 8 elementos de antena en el plano horizontal y 2 en el plano vertical, por lo que el UE utiliza un *codebook* de 16 *codewords*. Los *codebooks* aplicados se han calculado mediante el producto *Kronecker*, lo que posibilita implementar *beamforming* en 3 dimensiones, es decir, la dirección varía en azimut y elevación.

Mediante la arquitectura analógica de *beamforming*, por cada *beam* que el UE utiliza se realizan medidas secuencialmente en todos los *beams* que el UE transmite, como se indica en el procedimiento 1 de la Fig. 4. Considerando que en un *SS burst set* se puede medir un *codeword* y que cada *SS burst set* se repite cada x ms, el tiempo aproximado en el que el UE mide todos los pares de *beams* es de $16 * x$ ms. Por ejemplo, con una periodicidad de *SS burst set* de 5 ms, el tiempo en el que el UE realiza el barrido de todos los *beams* que transmite la estación base es de aproximadamente 80 ms. Por otro lado, si la periodicidad de *SS burst set* se configura en 160 ms, el tiempo que le constará al UE realizar la medición y, por consiguiente, realizar la actualización de *beam*, es de aproximadamente 2,5 segundos.

A diferencia de la arquitectura analógica, mediante la arquitectura digital de *beamforming* el UE puede medir simultáneamente en todos los *beams* que la estación transmite. Esto significa que el UE realiza la primera medición y actualización de todos los pares de *beams* en menos de 5 ms, que es la duración de un *SS burst set*. La actualización, en el tiempo, de los pares de *beams*, se realizaría cada x ms, definidos como la periodicidad de una *SS burst set*, por ejemplo, cada 20 ms.

Adicionalmente, en la clase “MmWaveBeamManagement” se ha configurado una versión “rápida” de la arquitectura analógica, que consiste en que el UE realiza un barrido en cada par de *beams*, hasta encontrar una mejor SINR, sin necesidad de completar los $16 * x$ ms, es decir, no necesariamente se debe completar la medición en todos los pares de *beams*.

De lo mencionado anteriormente, lo que se espera obtener como resultados en las simulaciones es que la respuesta de la arquitectura digital sea relativamente mejor a la analógica, ya que el tiempo de medición y actualización de *beams* es más rápido. Por otro lado, el utilizar distintas periodicidades de *SS burst set* influye directamente en el *overhead*, que implica enviar con mayor frecuencia bloques SS.

III.3 METODOLOGÍA PARA ESTUDIAR LA CALIDAD DE ENLACE UTILIZANDO SEÑALES DE REFERENCIA CSI

Para proceder a realizar las simulaciones mediante las CSI-RS se realizaron cambios en el módulo *mmWave*, de acuerdo con lo descrito en la sección II.2.2 de esta tesina. Los cambios consistieron, principalmente, en el mapeo de las señales de referencia CSI en la trama de radio, las

cuales se utilizaron para realizar el procedimiento de *tracking*, de acuerdo a lo definido en el estándar. Es decir, en los procedimientos de *beam management* que se simularon en esta sección se utilizaron tanto CSI-RS como bloques SS.

Se consideró el mapeo de cuatro recursos CSI-RS en dos slots consecutivos utilizando un solo puerto y una densidad de 3 REs/RB/Puerto. Además, se consideró que los slots donde se mapearon bloques SS no se pueden utilizar para mapear CSI-RS, tal como lo define el estándar. El resto de parámetros con los que se configuró el simulador son los mismos que se utilizaron en las simulaciones mediante bloques SS, detallados en la Tabla 6. En cuanto a las periodicidades de las CSI-RS, se consideraron los valores definidos en el estándar. Como se expuso en la sección II.2.2, las posibles periodicidades de las CSI-RS que se pueden configurar para un SCS de 120 kHz son 80, 160, 320 y 640 slots. Por consiguiente, las periodicidades utilizadas fueron de 10, 20, 40 y 80 ms.

Para realizar los procedimientos de tracking mediante las CSI-RS se utilizan los 4 recursos CSI-RS mapeados en la trama de radio; un recurso CSI equivale a un beam que apunta en una dirección definida por un *codeword*. En la Fig. 15 se representa, en una escala de tiempo aproximada, el mapeo de los recursos CSI-RS dentro de la trama, para una periodicidad de bloques SS de 160 ms y una periodicidad de CSI-RS de 80 ms. En este estado de la transmisión se asume que ya se realizó el procedimiento de acceso inicial correctamente, es decir, el UE se encuentra en modo CONNECTED. En este modo las CSI-RS se utilizan para realizar el procedimiento de *tracking* de una forma eficiente. Como se indica en la Fig. 15, mediante el mapeo de recursos CSI-RS es posible establecer un mejor seguimiento entre pares de beams, lo cual es útil en situaciones de alta movilidad. Por consiguiente, conforme el UE se desplaza, la estación base actualiza constantemente los pares de *beams*, basándose en las medidas de SINR. Debido a que la estación base utiliza un codebook de hasta 64 codewords, el UE selecciona y reporta dinámicamente los 4 *beams* correspondientes a las mejores SINR recibidas. Es decir, el UE selecciona los 4 mejores *beams* con los cuales se realiza el seguimiento. Es importante dejar claro que, cada vez que el UE vuelve a recibir las ráfagas SS, este reporta la medida de los 64 beams que transmite la estación base.

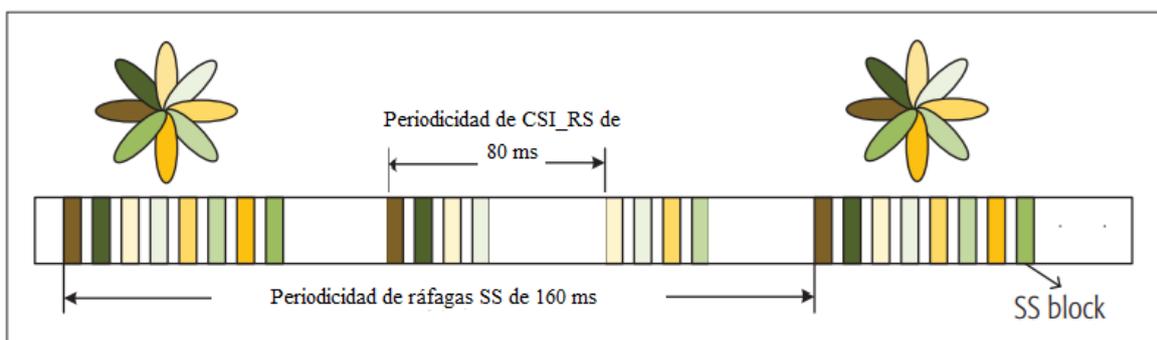


Fig 15. Mapeo de ráfagas SS y recursos CSI-RS para beam *tracking* en modo CONNECTED.

Lo que se espera con el uso de las CSI-RS en los procedimientos de tracking es mejorar el seguimiento entre pares de beams. Es decir, en modo IDLE el UE primeramente se sincroniza con una estación base mediante los bloques SS. A continuación, en modo CONNECTED se mapean las CSI-RS en donde el UE reporta información únicamente de los mejores *beams* en un determinado tiempo.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez revisado el estado del arte relacionado con los procedimientos de *Beam Management* para 5G NR definidos por el 3GPP, y tras haber definido una metodología de simulación, a continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos. Se han separado los mismos en dos secciones, en función de con qué señales se realice el seguimiento de *beam*.

IV.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIONES DE ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENLACE UTILIZANDO BLOQUES SS

Los parámetros utilizados en estas simulaciones están recogidos en la Tabla 6. Básicamente, se han lanzado diferentes simulaciones variando un conjunto de parámetros como se recoge en la Tabla 7. El parámetro --protocol define el protocolo de red a utilizar que, como se indicó previamente, es TcpCubic, ya que es el adecuado para escenarios con elevado ancho de banda. Mediante --arch se configura la arquitectura de beamforming a utilizar, que puede ser Analógica, Analógica rápida o Digital. --ssburstset define la periodicidad de un *SS burst set*, siendo los parámetros definidos en el estándar de 5, 10, 20, 40, 80 y 160 ms, en donde 20 ms es la periodicidad por defecto. El parámetro --speed define la velocidad del UE, en donde se pueden configurar velocidades entre 1 m/s (3,6 km/h) hasta 30 m/s (108 km/h). Para definir entornos con Línea de Vista (LoS) se define un 1 en el parámetro --obstacle, o un 0 para configurar un entorno sin Línea de vista (NLoS).

PARÁMETRO	OPCIONES DE CONFIGURACIÓN
--protocol	TcpCubic
--arch	Analog, Analog_fast, Digital
--ssburstset	5, 10, 20, 40, 80 y 160 ms
--speed	1 m/s – 30 m/s
--obstacle	1 (NLoS), 0 (LoS)

Tabla 7. Parámetros para lanzar las simulaciones utilizando bloques SS.

Adicionalmente, para garantizar resultados adecuados en las simulaciones, se pueden configurar distintas semillas y diferentes flujos de datos, mediante los parámetros --seed y --flows, respectivamente. Luego de realizar las configuraciones previas, un ejemplo de una línea de

comandos para lanzar una simulación con arquitectura Analógica, periodicidad de *SS burst set* de 20 ms, 4 flujos, velocidad de 1 m/s y entorno con LoS, sería:

```
>> $ ./waf --run "scratch/tcp-wireless --protocol=TcpCubic --
arch=Analog_fast --ssburstset=ms20 --flows=4 --speed=1 --
obstacle=0 --seed=0"
```

En los resultados de las simulaciones que se presentan a continuación se han definido 4 flujos y 5 semillas diferentes de datos, por lo que se ha calculado el promedio correspondiente. En primer lugar, se pretende estudiar el comportamiento de las arquitecturas de *beamforming* analógicas considerando la periodicidad de bloques SS más alta especificada en el estándar, esto es 160 ms, y con velocidades del UE de 1 m/s hasta 30 m/s. En la Fig. 16 se representa la tasa binaria o *throughput* en enlace descendente para periodicidades de bloques SS de 160 ms, y mediante arquitecturas de *beamforming* analógicas. El tiempo de simulación se ha definido de 10 segundos, y se han considerado velocidades del UE de 1 m/s, 10 m/s y 30 m/s. Velocidades de 1 m/s pueden corresponder, por ejemplo, a la velocidad en la que se mueve un peatón, y velocidades de 10 m/s o 30 m/s, corresponde a velocidades en vehículos. Como se observa en la Fig. 16, conforme aumenta la velocidad del UE, las arquitecturas de *beamforming* analógicas tienen problemas para mantener el enlace entre la estación base y el UE. En el caso extremo, con velocidades de 30 m/s, el UE no puede actualizar eficientemente el par de *beams*, y es necesario pasar al procedimiento de “beam failure recovery”. Para velocidades de 1 m/s, el UE realiza adecuadamente la actualización del par de *beams* tras realizar la medición completa entre todas las combinaciones de pares de *beams* posibles, esto es, pasados 2,5 segundos. Para velocidades de 10 m/s el UE tiene problemas para realizar la actualización de *beams* tras el primer barrido, por lo que el tiempo de estabilización de la tasa de datos es lento. Las distintas fluctuaciones y tiempo en el que se alcanza la estabilización a la tasa máxima son debidas a las características de funcionamiento del protocolo TCP Cubic.

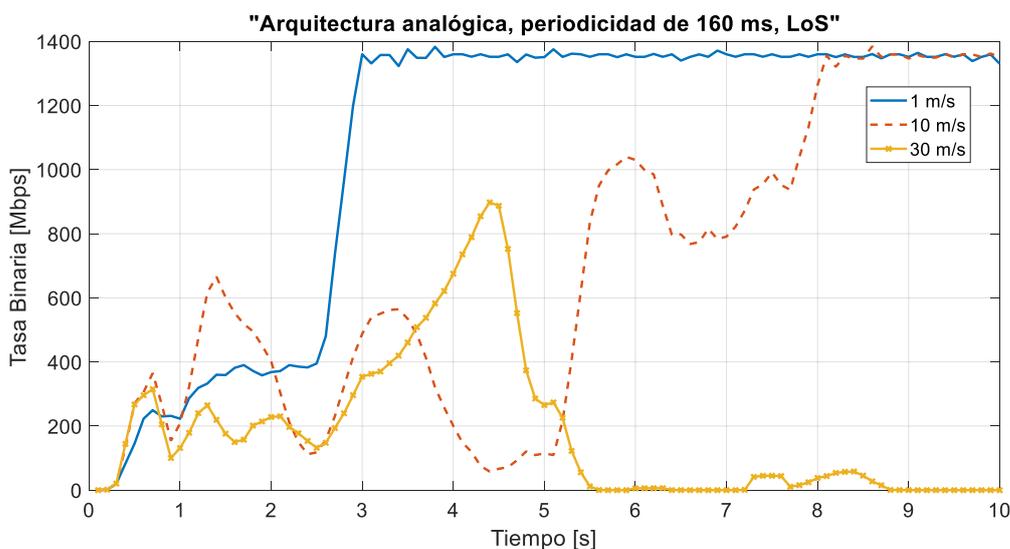


Fig 16. Evolución de la tasa binaria entre 1 estación base y 1 UE, con una periodicidad de bloques SS de 160 ms, utilizando arquitecturas de *beamforming* analógicas.

En la Fig. 17 se muestra la evolución en la tasa binaria que mantiene la estación base y 1 UE, bajo los mismos parámetros que la simulación anterior, pero considerando una arquitectura analógica “fast”. Mediante esta variante se obtienen mejores prestaciones. Por un lado, a velocidades de 1 m/s, el tiempo en el que se estabiliza el enlace en la máxima tasa es menor comparado con la arquitectura analógica. Esto se debe a que, como se indicó previamente, mediante la arquitectura analógica rápida la actualización a un mejor par de *beams* se hace no necesariamente al completar la medición entre todos los pares de *beams*, sino cuando se encuentra un par de *beams* con una mejor SINR. En la Fig. 17 se verifica que el tiempo de estabilización del enlace a la máxima tasa es de 1,5 segundos, es decir, 1000 milisegundos más rápido que con la arquitectura analógica. Por otro lado, para velocidades de 10 m/s, a pesar de que existen problemas de *tracking* a un mejor par de *beams*, el tiempo en el que se estabiliza el enlace a la máxima tasa es menor que en la arquitectura analógica, existiendo una diferencia de 2,5 segundos.

Para velocidades de 30 m/s, se puede destacar que, a pesar de que la tasa de transferencia desciende a cero en un intervalo de tiempo, el UE sigue midiendo la SINR entre los pares de *beams* y existe una recuperación en la transmisión.

La arquitectura de *beamforming* digital, a diferencia de las arquitecturas analógicas, presenta un rendimiento similar a distintas velocidades de UE. En la Fig. 18 se muestra una comparación en la respuesta obtenida utilizando arquitecturas analógicas y digitales en el peor de los casos, es decir, 160 ms de periodicidad de bloques SS y 30 m/s de velocidad de UE. La arquitectura digital ofrece una respuesta óptima a altas velocidades de UE, en donde la arquitectura analógica tiene problemas para alcanzar la máxima tasa de transferencia, además, el tiempo de estabilización es lento. Por otro lado, la arquitectura digital presenta un comportamiento similar a distintas velocidades, por lo que se puede concluir que la respuesta en el proceso de *tracking* entre pares de *beams* es eficiente.

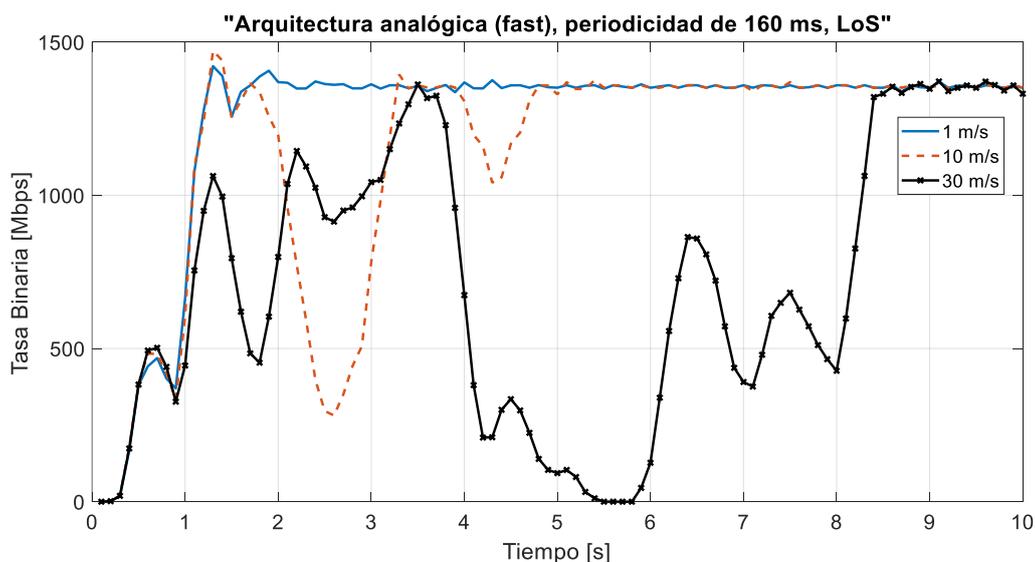


Fig 17. Evolución de la tasa binaria entre 1 estación base y 1 UE, con una periodicidad de bloques SS de 160 ms, utilizando arquitecturas de *beamforming* analógicas (*fast*).

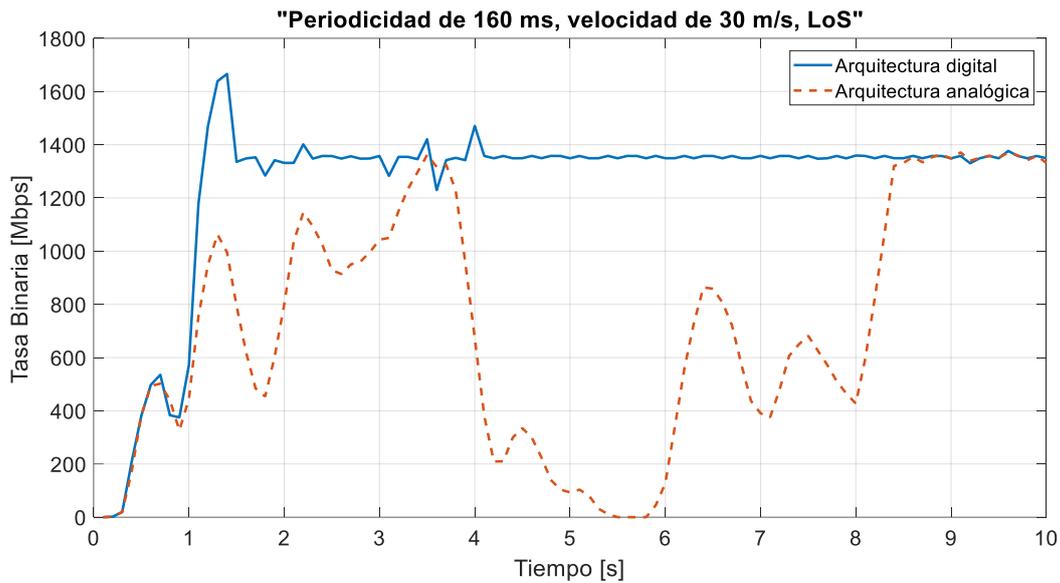


Fig 18. Comparación de la respuesta de las arquitecturas analógicas y digitales, a altas velocidades de UE.

A bajas velocidades de UE, la respuesta de la arquitectura analógica se aproxima a la respuesta de la arquitectura digital, en donde el tiempo de estabilización a la tasa máxima es similar. Como se muestra en la Fig. 19, a velocidades de UE de 1 m/s, tanto con la arquitectura analógica como con la digital, el tiempo de estabilización es menor a 2 segundos.

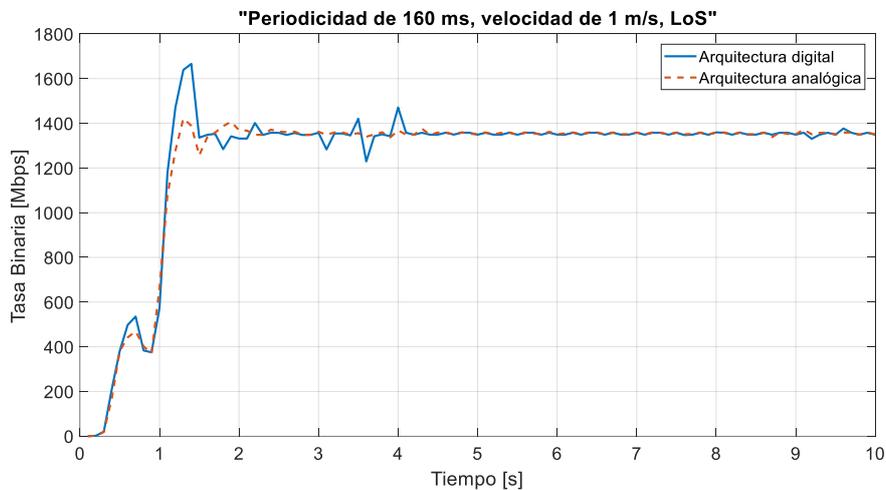


Fig 19. Comparación de la respuesta de las arquitecturas analógicas y digitales, a bajas velocidades de UE.

Diferentes periodicidades de *SS burst set* representan diferentes *overheads* en la transmisión, por lo que, al aumentar la frecuencia con la que se envían los bloques SS, se utiliza una mayor cantidad de recursos de la trama de radio. En la Fig. 20 se representa la tasa binaria alcanzada con diferentes periodicidades de bloques SS, utilizando arquitecturas de *beamforming* digitales, a velocidades de UE de 1 m/s. Considerando una periodicidad de 5 ms, existe una disminución aproximada del 39,6% del *throughput* alcanzado con respecto a la periodicidad por defecto de 20 ms. Por otro lado, definiendo la máxima periodicidad de *SS burst set* contemplada en el estándar, es decir, 160 ms, el *throughput* alcanzado con respecto a la periodicidad de 20 ms aumenta en un

10,3%. En la Fig. 20 se puede constatar además que, respecto a la máxima periodicidad, un aumento en la periodicidad hasta 5 ms proporciona una respuesta similar en cuanto al *tracking* entre pares de beams, pero el gasto debido al *overhead* ocasiona una disminución de un 45% del *throughput*.

En arquitecturas analógicas, un aumento en la periodicidad con la que se transmiten los bloques SS, a altas velocidades de UE, mejora la respuesta del sistema en los procedimientos de tracking. Esto se traduce en que, a expensas de aumentar el *overhead* con la correspondiente disminución en el *throughput*, utilizar una periodicidad más alta permite realizar una mejor medición y actualización de los *beams* que la estación base transmite, tal como se observa en la Fig. 21. En este resultado se ha considerado una velocidad de 10 m/s y periodicidades de bloques SS de 5, 10, 20 y 160 ms. Este efecto se debe a que el UE recibe con mayor frecuencia información de los *beams* que la estación base transmite, por lo que puede hacer un cambio de pares de *beams* más rápido.

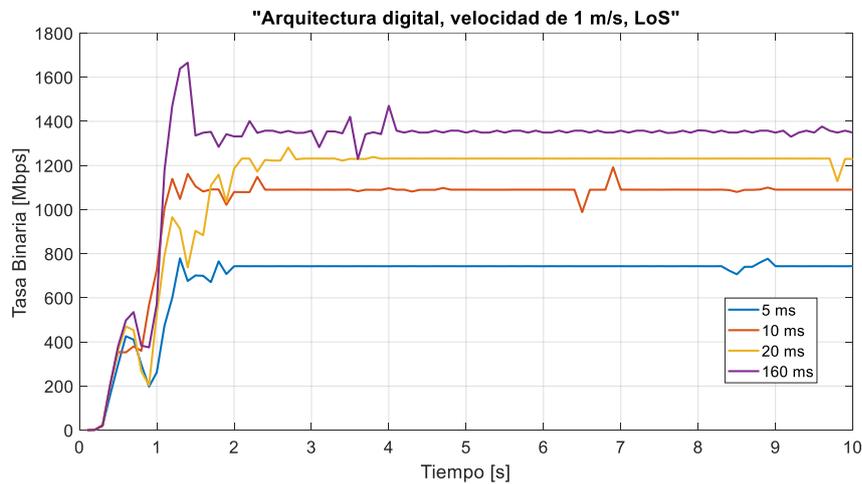


Fig 20. Efectos de aumentar la periodicidad de los SS *burst set*, en la tasa de datos alcanzada en la transmisión.

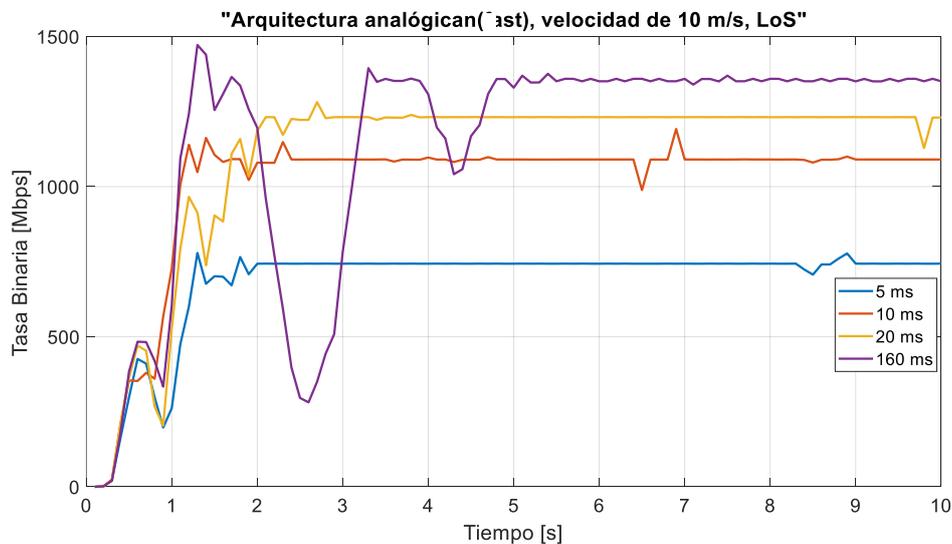


Fig 21. Efectos de aumentar la periodicidad de los SS *burst set*, utilizando arquitecturas analógicas.

Cuando el UE se desplaza a altas velocidades, respecto a la estación base, se presentan efectos no deseados que afectan a la transmisión. Uno de estos efectos se conoce como *doppler spread*. El cual provoca un desplazamiento en el espectro de la señal recibida dependiendo si el UE se acerca o se aleja del transmisor.

El inverso del *doppler spread* se denomina tiempo de coherencia. El tiempo de coherencia del canal en un sistema de comunicaciones inalámbrico en condiciones de movilidad, especialmente en altas velocidades, debe estar relacionado con el tiempo en que se realizan las estimaciones del canal entre el transmisor y receptor. Por consiguiente, a altas velocidades del UE es necesario que la estación base envíe con mayor frecuencia ráfagas SS, con el fin de obtener la información del canal oportunamente. Específicamente, en la Fig. 21 se observa que la máxima periodicidad de transmisión de ráfagas SS, definida en el estándar (160 ms), ocasiona caídas en la tasa binaria transmitida. Por otro lado, periodicidades de 5, 10 y 20 ms no se ven afectadas por las altas velocidades a las que desplaza el UE. El desplazamiento *doppler*, en Hz, se puede calcular aproximadamente aplicando la ecuación 2 [16]:

$$fd \approx \frac{1}{1080} \cdot f_0 \cdot v \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

En donde f_0 corresponde a la frecuencia, en MHz, de la portadora utilizada; v es la velocidad del UE, en km/h; y α es el ángulo entre la dirección de la señal recibida y la dirección de movimiento del UE, definido entre 0 y π . Los valores máximos del *doppler spread* se alcanzan cuando α toma valores de 0 o π .

Para la frecuencia de portadora definida en los parámetros de simulación de esta tesina (28 GHz), y considerando una velocidad del UE de 10 m/s (36 km/h), el valor máximo del *doppler spread* es de aproximadamente 933 Hz. Por lo tanto, el tiempo de coherencia del canal, la inversa del *doppler spread*, es de alrededor de 1 ms. Este valor puede considerarse pequeño con respecto a las periodicidades de envío de bloques SS definidas en el estándar. Sin embargo, es importante señalar que este valor tiende a ser mayor, ya que mediante el uso de técnicas como *beamforming* y *beam tracking* existe un apuntamiento entre transmisor y receptor que hace que predominen las contribuciones de línea de vista. De este modo, los ángulos de llegadas de las señales al receptor pueden ser tales que disminuyan el *doppler spread*, y, por lo tanto, el tiempo de coherencia de canal es mayor.

De la ecuación 2 se puede deducir que mayores velocidades de movimiento del UE y un aumento en la frecuencia de portadora, representan una disminución en el tiempo de coherencia del canal. Es decir, en *mmWave* es necesario hacer estimaciones de canal con mayor frecuencia que en sistemas que utilizan espectro de frecuencias por debajo de los 6 GHz. Adicionalmente, es necesario el uso de nuevas técnicas que permitan contrarrestar los efectos que se presentan como resultado de las rápidas variaciones del canal.

El éxito en el mejor rendimiento de las arquitecturas digitales de *beamforming*, frente a las analógicas, radica en que son arquitecturas más rápidas que permiten una actualización de pares de *beams* sin necesidad de realizar un barrido completo. Por lo tanto, el *tracking* entre *beams* se realiza cada vez que exista un par de *beams* con mejor SINR. De los resultados mostrados en la Fig. 21 se puede concluir que una periodicidad de ráfagas SS de 160 ms no es recomendable en entornos con velocidades superiores a 10 m/s, debido a que los efectos del *doppler spread* producen una notable disminución en la tasa binaria transmitida entre la estación base y el UE.

Las simulaciones y resultados mostrados previamente han sido realizadas considerando entornos con línea de vista (LoS), es decir no existen obstáculos entre la estación base y el UE. Para estudiar los efectos en la tasa de transmisión debidos a la propagación de señales milimétricas en entornos sin línea de vista (NLoS), se realizaron simulaciones considerando distintas periodicidades y velocidades de UE. En la Fig. 22 se observa una comparación entre las variaciones en la tasa binaria considerando entornos sin línea de vista (NLoS), con distintas periodicidades y arquitecturas de *beamforming*.

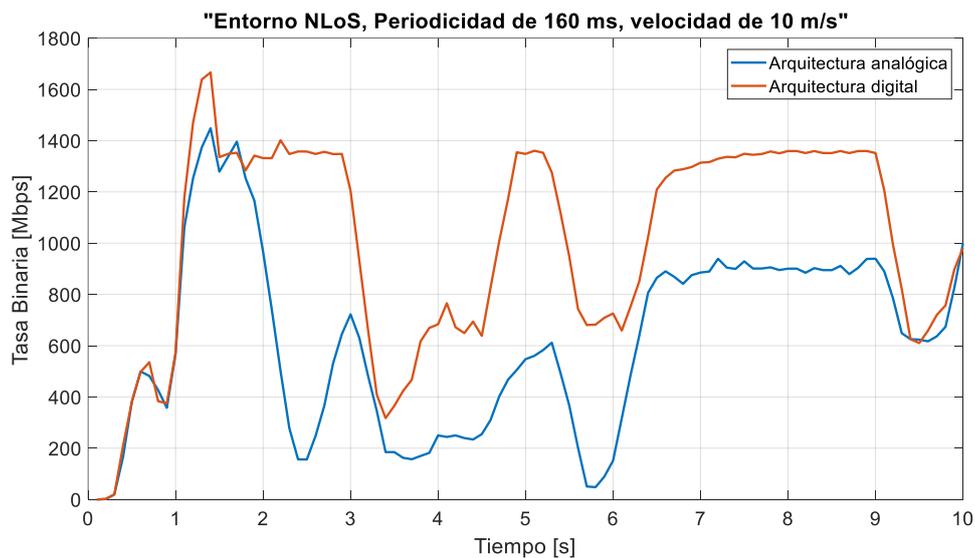


Fig 22. Variaciones en la tasa de bits transmitida en entornos sin línea de vista (NLoS).

En entornos NLoS la tasa binaria recibida por el UE depende, además de la periodicidad de ráfagas SS utilizada, del nivel de SINR. En entornos NLoS el UE experimenta, en algunos instantes de tiempo, caídas importantes en la tasa binaria debido a que el nivel de SINR disminuye, producto de los obstáculos entre la estación base y el UE. Por otro lado, existen intervalos de tiempo en donde se alcanza la máxima tasa binaria para la periodicidad de ráfagas SS definida, esto es 160 ms. Adicionalmente, se puede observar que, a pesar de que en ambas arquitecturas existen caídas en la tasa binaria transmitida debido a obstáculos entre la estación base y el UE, las arquitecturas digitales ofrecen un mejor rendimiento, ya que, en promedio, la tasa binaria transmitida es mayor. Además, con la arquitectura digital la tasa de transmisión nunca se anula por lo que parece una opción más robusta.

IV.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIONES DE ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENLACE UTILIZANDO SEÑALES DE REFERENCIA CSI

Para lanzar las simulaciones mediante la adición de las señales de referencia CSI, se utilizaron los parámetros indicados en las Tablas 7 y 8. Adicionalmente, se añadieron dos campos que permiten configurar la activación/desactivación de las CSI-RS y su periodicidad. Es así que, mediante el parámetro `--csi= true/false`, se activa o desactiva el uso de CSI-RS; y con el comando `--csiPeriodicity`, se configura la periodicidad de envío de las CSI-RS (10, 20, 40 o 80 ms).

Con el fin de garantizar resultados adecuados en las simulaciones, se configuraron distintas semillas y diferentes flujos de datos. Tras realizar las configuraciones previas, un ejemplo de una línea de comandos para lanzar una simulación con arquitectura analógica rápida, periodicidad de CSI-RS de 10 ms, periodicidad de *SS burst set* de 160 ms, 4 flujos de datos, velocidad de 10 m/s, entorno con LoS, es:

```
>> $ ./waf --run "scratch/tcp-wireless --csi=true --
csiPeriodicity=ms10 --protocol=TcpCubic --arch=Analog_fast --
ssburstset=ms160 --flows=4 --speed=10 --obstacle=0 --seed=0"
```

Ya que lo que se pretende es verificar las implicaciones que tiene el utilizar las CSI-RS en la transmisión, en los resultados que se muestran a continuación se compara la evolución en la tasa binaria entre la estación base y 1 UE, activando y desactivando el uso de las CSI-RS, en distintos escenarios.

En la Fig. 23 se presentan los resultados obtenidos mediante el uso de CSI-RS con arquitecturas de *beamforming* analógicas. Al comparar con los resultados obtenidos en la sección IV.1 (sin CSI-RS), se concluye que el uso de CSI-RS para realizar el *beam tracking* no representa mejoras significativas en la transmisión. Los resultados presentados en la Fig. 23 corresponden a un escenario donde se configuró una periodicidad de bloques SS de 160 ms, periodicidad de CSI-RS de 10 ms, y velocidades de UE de 1, 10 y 30 m/s. Además, se observó que las fluctuaciones en la tasa de transmisión son idénticas con todas las periodicidades de CSI-RS definidas en el estándar (10, 20, 40 y 80 ms).

La razón por la que la arquitectura de *beamforming* analógica no mejora la respuesta mediante la adición de las CSI-RS es debido a que, como se explicó en la sección IV.1, dada una periodicidad de bloques SS de 160ms, esta arquitectura tarda alrededor de 2,5 segundos en realizar las medidas de SINR en todos los pares de *beams*. Por consiguiente, a pesar de que se mapean CSI-RS para mejorar el seguimiento, el UE prioriza la información que recibe mediante las ráfagas SS y por tanto no saca el máximo provecho del esquema de CSI-RS.

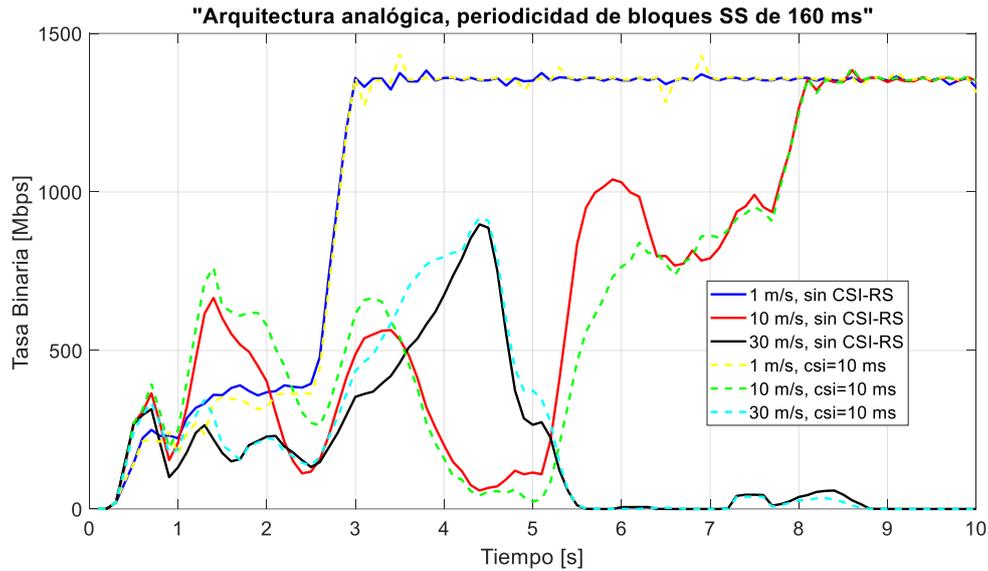


Fig 23. Evolución de la tasa binaria mediante el uso de bloques SS y CSI-RS, con arquitecturas analógicas y entornos LoS.

Al igual de lo que ocurre con las arquitecturas de beamforming analógicas, la respuesta obtenida con arquitecturas analógicas *fast*, a bajas velocidades de UE, no mejora con la transmisión de las CSI-RS. Sin embargo, en escenarios con velocidades de UE por encima de 10 m/s y con altas periodicidades de bloques SS, se observó que el uso de las CSI-RS mejora notablemente el seguimiento entre pares de *beams*. En la Fig. 24 se muestran los resultados obtenidos con arquitecturas analógicas *fast*, con 160 ms de periodicidad de bloques SS, 80 ms de periodicidad de CSI-RS, y velocidades de UE de 10 y 30 m/s. Los resultados indican que la arquitectura analógica *fast*, al ser una versión rápida de *beamforming*, hace posible el uso de las CSI-RS con el fin de mejorar el proceso de *tracking* entre *beams*. Por lo tanto, la tasa binaria transmitida entre la estación base y el UE no presenta caídas. Estas caídas en la transmisión que el UE experimenta son debidas a las altas velocidades de desplazamiento. Por lo tanto, el canal cambia con una mayor rapidez y es necesario el uso de información adicional del canal que permita mejorar el seguimiento. Es así que las CSI-RS que la estación base transmite aportan al UE la información necesaria para el *beam tracking*. Los resultados presentados en la Fig. 24 muestran que el uso de las CSI-RS a velocidades de 30 m/s proporcionan mejoras significativas con respecto a transmisiones donde se utilizan únicamente bloques SS.

En las simulaciones realizadas se observó también que los resultados obtenidos son similares bajo diferentes periodicidades de CSI-RS. Por lo que una periodicidad de 80 ms es suficiente, y no es necesario el envío de CSI-RS con una periodicidad más alta. Es decir, el uso de las CSI-RS es necesario en entornos con condiciones de altas velocidades de UE, con el fin de asegurar el adecuado seguimiento entre *beams*. Por otro lado, en entornos con bajas velocidades de UE, una periodicidad de ráfagas SS de 160 ms y sin CSI-RS, asegura una transmisión óptima a la máxima

tasa binaria. El uso de periodicidades de bloques SS más bajas, como se indicó en la sección IV.1, representa alcanzar tasas de transmisión más bajas, como consecuencia del *overhead*.

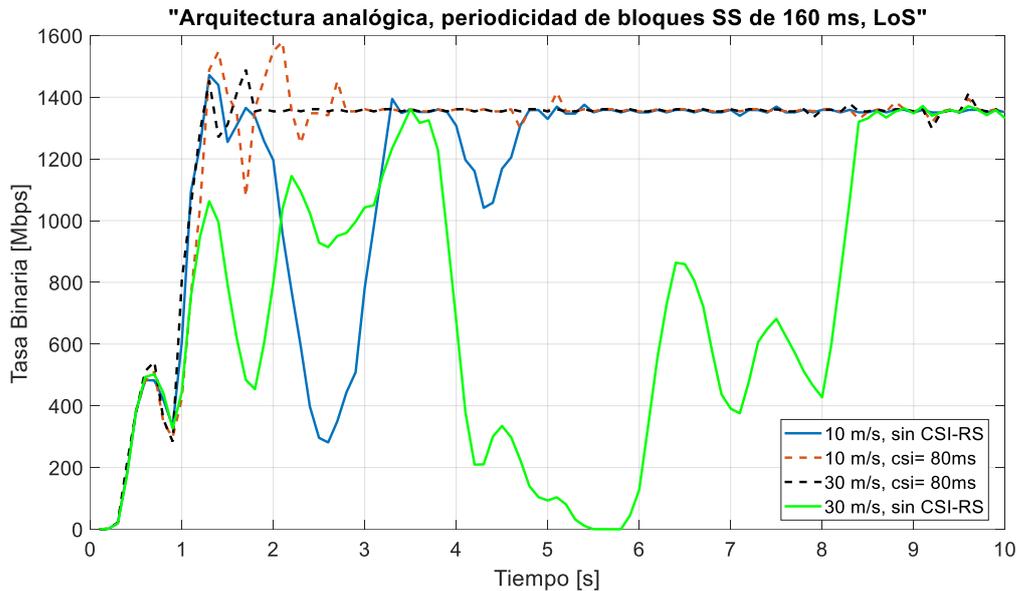


Fig 24. Efectos del uso de las CSI-RS para realizar el *beam tracking* con arquitecturas analógicas (*fast*).

Con arquitecturas de *beamforming* digitales, los resultados presentados en la sección VI.1, mostraron que es suficiente utilizar únicamente bloques SS para realizar el procedimiento de *beam tracking*. Por consiguiente, el uso de CSI-RS no es necesario con estas arquitecturas. La razón es que las arquitecturas de *beamforming* digitales ofrecen una rápida medición entre pares de *beams*, por lo tanto, el tiempo de actualización a un mejor *beam* se realiza adecuadamente sin necesidad de información adicional. Además, la buena respuesta que ofrece la arquitectura digital se mantiene a altas velocidades y bajas periodicidades de envío de bloques SS. Como se muestra en la Fig. 25, para velocidades de UE de 30 m/s, la respuesta de la arquitectura de *beamforming* digital es la misma, tanto con el uso de bloques SS como con la adición de las CSI-RS para *tracking*.

Las diferencias en las tasas binarias alcanzadas utilizando las CSI-RS y sin estas son mínimas debido a que los recursos que se utilizan para su mapeo en la trama de radio son muy pocos. Por ejemplo, para los parámetros definidos en la simulación cuyos resultados se muestran en la Fig. 25, se ocupan hasta 1600 símbolos por segundo para el mapeo de las ráfagas SS, mientras que para el mapeo de las CSI-RS se ocupan como máximo 50 símbolos en 1 segundo. En periodicidades de bloques SS más altas, el uso de los recursos para mapear las CSI-RS es aún menor, ya que símbolos donde se mapean las ráfagas SS no se utilizan para mapear CSI-RS.

En escenarios de simulación NLoS, el uso de las CSI-RS en el seguimiento de *beams*, con arquitecturas digitales, no mejora la respuesta obtenida en la transmisión. Sin embargo, con arquitecturas analógicas la información de los *beams* transmitida en las CSI-RS mejora notablemente el seguimiento entre pares de *beams*, tal como se indica en la Fig. 26. Además, se

observa que la tasa binaria alcanzada con la arquitectura analógica mediante el uso de las CSI-RS, se aproxima a la tasa alcanzada con la arquitectura digital.

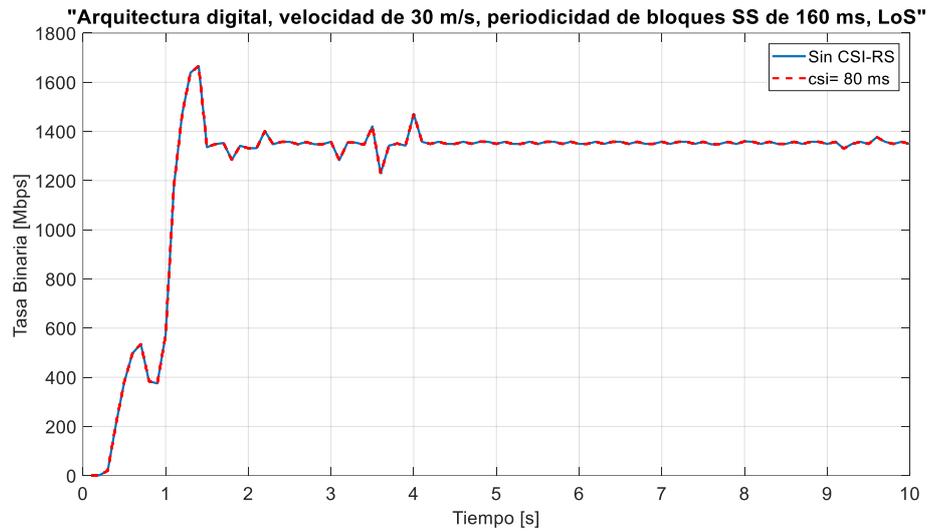


Fig 25. Respuesta de la arquitectura de *beamforming* digital en altas velocidades de UE.

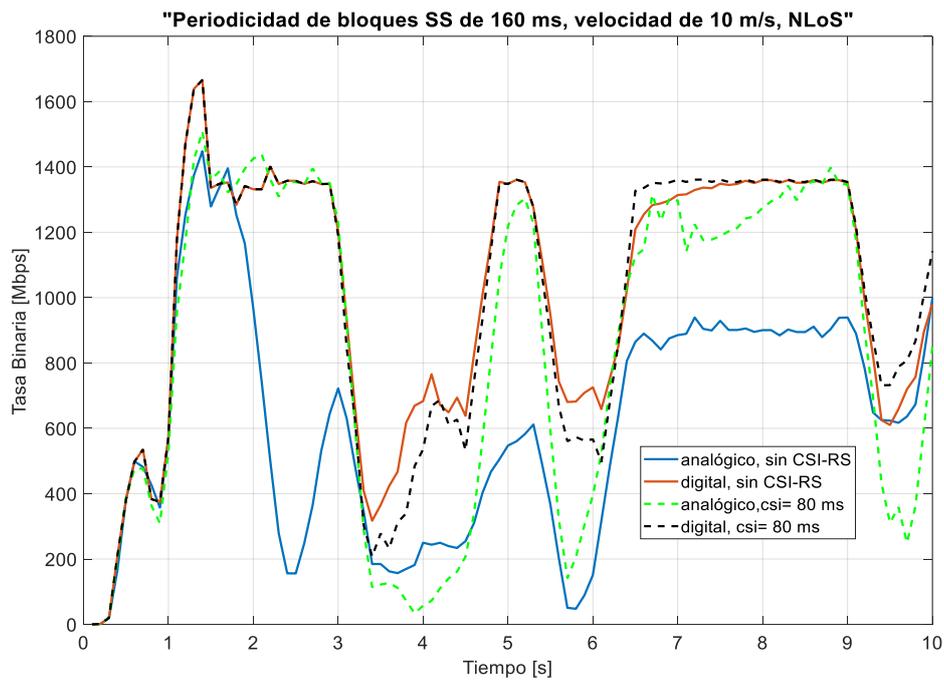


Fig 26. Evolución de la tasa binaria alcanzada en entornos NLoS mediante arquitecturas analógicas y digitales.

V. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En la presente tesina de máster se realizó una evaluación de los mecanismos de selección haz definidos por el 3GPP en las especificaciones técnicas para 5G NR, recogidas en la *Release 15*. Mediante la revisión y análisis del estado del arte, se ha podido concluir que existen dos tipos de mecanismos para realizar los procedimientos de *beam management*. Es así que, en estado inicial, modo IDLE UE, se define el uso de ráfagas SS mediante las cuales el UE adquiere sincronización con la estación base. Por otro lado, en modo CONNECTED UE, se especifica el uso tanto de ráfagas SS como de señales de referencia CSI. El tipo de señales a utilizar, los métodos de mapeo, periodicidad, y los criterios de selección y actualización de haces son definidos por la red. Las simulaciones de calidad de enlace realizadas con el simulador ns3 nos han permitido concluir que las arquitecturas de *beamforming* digitales son más robustas frente a arquitecturas analógicas, especialmente en entornos de alta movilidad y condiciones NLoS. Sin embargo, mediante el uso de las CSI-RS para *tracking*, las arquitecturas analógicas mejoran su rendimiento, llegando a ser similar al alcanzado con arquitecturas digitales. Además, a pesar de que con arquitecturas digitales el *overhead* producido por el mapeo de las CSI-RS tiene una mínima influencia en la tasa binaria alcanzada, no es necesario el uso de información adicional a la obtenida mediante las ráfagas SS para realizar un seguimiento óptimo de haces.

Finalmente, se determinó que, en bajas velocidades y condiciones LoS, los valores de periodicidades de bloques SS y CSI-RS, tanto en arquitecturas analógicas como digitales, pueden ser los máximos definidos en el estándar, con el fin de asegurar la máxima tasa de transferencia y reducir el *overhead*. Por otro lado, si no se utilizan CSI-RS con arquitecturas analógicas operando en altas velocidades y entornos NLoS, lo óptimo es utilizar periodicidades de ráfagas SS altas.

Como líneas futuras para nuevas investigaciones se propone la actualización del simulador ns3 con el fin de incluir escenarios con múltiples usuarios (MU-MIMO). Además, se plantea estudiar el rendimiento de distintas agrupaciones de antenas y esquemas de *beamforming* a los que se han utilizado en este trabajo. Ya que el 5G NR está de momento en proceso de estandarización en la *Release 16*, se sugiere, de ser necesario, actualizar el simulador ns3 de acuerdo con las modificaciones realizadas al estándar en cuanto a nuevos mecanismos de *beam management*, nuevos criterios de mapeo y periodicidad de bloques SS y CSI-RS, etc. Adicionalmente, ya que el modelo de canal bajo el cual está elaborado el módulo ns-3 mmWave permite operar en frecuencias desde 6 hasta 100 GHz, se recomienda estudiar y comparar la respuesta en la transmisión con otras frecuencias de operación a las que se ha utilizado en esta tesina (28 GHz).

Como último apunte, cabe destacar que los resultados de esta tesina y el conocimiento adquirido han servido para la redacción de un artículo científico titulado *New Radio Beam Management in Release 15* y que en estos momentos está siendo evaluado para su publicación en la revista *IEEE Communications Standards Magazine*.

VI. AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a mi tutor de trabajo de fin de máster, José Francisco Monserrat, por la confianza depositada al asignarme este trabajo de investigación, así como también por sus acertados consejos y ayuda en el desarrollo de esta tesina.

Agradezco a Carlos Herranz Claveras, por su valiosa ayuda brindada en el uso del simulador ns3.

Deseo expresar mi agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador, por el apoyo brindado como parte del programa de becas Convocatoria Abierta 2016.

Finalmente, mis profundos agradecimientos a mi familia, quienes son mi principal motivación y apoyo en cada meta que me propongo. A mis padres, Agustina y Galo. A mis queridos hermanos, Franklin, Sonia, Susana, Galo, Ramiro. Al pequeño Alejandro, que es nuestro consentido. A Arianita, por su paciencia, apoyo y carisma. Y, por supuesto, a mi novia Andrea, por su amor, paciencia, cariño y motivación permanente para alcanzar esta meta.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] 3GPP, “NR and NG-RAN; Overall Description; Stage 2”, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.300, Junio 2018, versión 15.2.0. [En línea]. Disponible: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38300.htm>
- [2] 3GPP, “NR; Physical channels and modulation”, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.211, Junio 2018, versión 15.2.0. [En línea]. Disponible: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38211.htm>
- [3] C. Herranz, «Analog Vs. Digital mmWave Radios: Directional Synchronization and Network Performance Comparison» Marzo 2018.
- [4] 3GPP, “NR; Base Station (BS) radio transmission and reception”, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.104, Junio 2018, versión 15.2.0. [En línea]. Disponible: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38104.htm>
- [5] 3GPP, “NR; Study on New Radio Access Technology”, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.804, Marzo 2017, versión 15.1.0. [En línea]. Disponible: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38804.htm>
- [6] Chunghwa Telecom, “3GPP NR MIMO Introduction”, Mayo 2017. [En línea]. Disponible: <http://std-share.itri.org.tw/Content/Files/Event/Files/2.3GPP%20NR%20MIMO%20introduction.pdf>
- [7] 3GPP, “NR; Physical layer procedures for control”, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.213, Junio 2018, versión 15.2.0. [En línea]. Disponible: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38213.htm>
- [8] Sharetechnote, “5G/NR - Frame Structure ”, Marzo 2018. [En línea]. Disponible: http://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure.html
- [9] J. Liu et al., "Initial Access, Mobility, and User-Centric Multi-Beam Operation in 5G New Radio," in

- IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 3, pp. 35-41, MARCH 2018. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8316764&isnumber=8316570>
- [10] 3GPP, “NR; Physical layer procedures for data”, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.214, Junio 2018, versión 15.2.0. [En línea]. Disponible: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38214.htm>
- [11] ITRI, “An overview of New 3GPP RAN1 Features and FD-MIMO Technologies for LTE”, Octubre 2015. [En línea]. Disponible: <http://3gpptrend.cm.nctu.edu.tw>
- [12] NSNAM.org, “WHAT IS NS-3”, Acceso: 17-05-2018. [En línea]. Disponible: <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>
- [13] Gitub.com, “ns-3 mmwave”, Acceso: 17-05-2018. [En línea]. Disponible: <https://github.com/nyuwireless-unipd/ns3-mmwave>
- [14] M. Mezzavilla, M. Zhang, M. Polese, R. Ford, S. Dutta, M. Zorzi, and S. Rangan, “End-to-End simulation of 5G mmWave Networks” in IEEE Communications Surveys & Tutorials. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8344116/>
- [15] 3GPP, “NR; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz”, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.900, Julio 2017, versión 14.3.1. [En línea]. Disponible: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38900.htm>
- [16] F. Valera, “OFDMA y SC-FDMA en la Interfaz Radio de LTE” en e-reding – Universidad de Sevilla. [En línea]. Disponible: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12081/direccion/OFDMA+y+SCFDMA+en+la+Interfaz+Radio+de+LTE%252F>