

Anexos

Anexo A

Guías de usuario

En el presente anexo, A, se facilitan las guías de usuario básicas para el correcto manejo de los dos simuladores desarrollados e implementados en este trabajo.

Índice del anexo

A.1	Simulador 5G - NB-IoT	66
A.1.1	Inicio de la aplicación	66
A.1.2	Sistema transmisor	66
A.1.2.1	Generar señal de banda ancha	66
A.1.2.2	Agregar señal de banda estrecha (NB-IoT)	70
A.1.2.3	Modelado de elementos no lineales	72
A.1.3	Canal de transmisión	72
A.1.4	Visualización de resultados del transmisor	74
A.1.5	Sistema receptor	79
A.1.6	Menús	80
A.1.6.1	Menú de ayuda	80
A.1.6.2	Menú de opciones	80
A.2	Simulador 5G-NR	82
A.2.1	Inicio de la aplicación	83
A.2.2	Configuración de la señal	84
A.2.3	Modelo de elementos no lineales	85
A.2.4	Modelo de canal	86
A.2.5	Visualización de resultados	87
A.2.6	Menús	88
A.2.6.1	Menú de ayuda	89
A.2.6.2	Menú de opciones	89

A.1. Simulador 5G - NB-IoT

Este simulador nos permite estudiar el enlace descendente de un sistema de radio 5G, incluyendo agregación de señales de banda estrecha, modelado de elementos no lineales como el amplificador de potencia y condiciones reales de propagación para diversos escenarios.

A.1.1. Inicio de la aplicación

El usuario debe iniciar primeramente la aplicación ejecutando en la ventana de comandos del entorno software MATLAB® la instrucción *DLSimulator*. Esta abrirá el simulador y se mostrará al usuario la interfaz principal del mismo. Como se puede ver en la figura A.1, nos encontramos con las siguientes partes:

- **Sistema transmisor.** Permite generar tanto la señal de banda ancha como las de banda estrecha con una serie de parámetros a configurar por el usuario. Además, permite elegir si se quieren tener en cuenta y modelar los elementos no lineales.
- **Visualización de las señales y otros resultados.** En esta parte se permite representar todos los recursos y señales resultantes de la simulación de la parte del transmisor. Se incluyen visualizaciones de señales en los dominios del tiempo y frecuencia, matrices de recursos o medidas como las de ACLR o EVM.
- **Modelado del canal.** El usuario puede seleccionar diversos escenarios con diferentes modelos de propagación, que modelan situaciones reales concretas.
- **Sistema receptor.** En esta parte se recoge todo lo relacionado con el receptor de la señal 5G. Incluye la demodulación completa de la señal recibida y medidas de calidad de la misma como la constelación o el BER.
- **Menús.** Se ofrece al usuario un menú de ayuda sobre las principales partes del simulador y un menú de opciones en el que cambiar y ajustar parámetros o exportar datos.

A.1.2. Sistema transmisor

A.1.2.1. Generar señal de banda ancha

En esta sección, el usuario puede generar la señal 5G, es decir, la señal de banda ancha. Los parámetros que se permite modificar en su generación son los que se

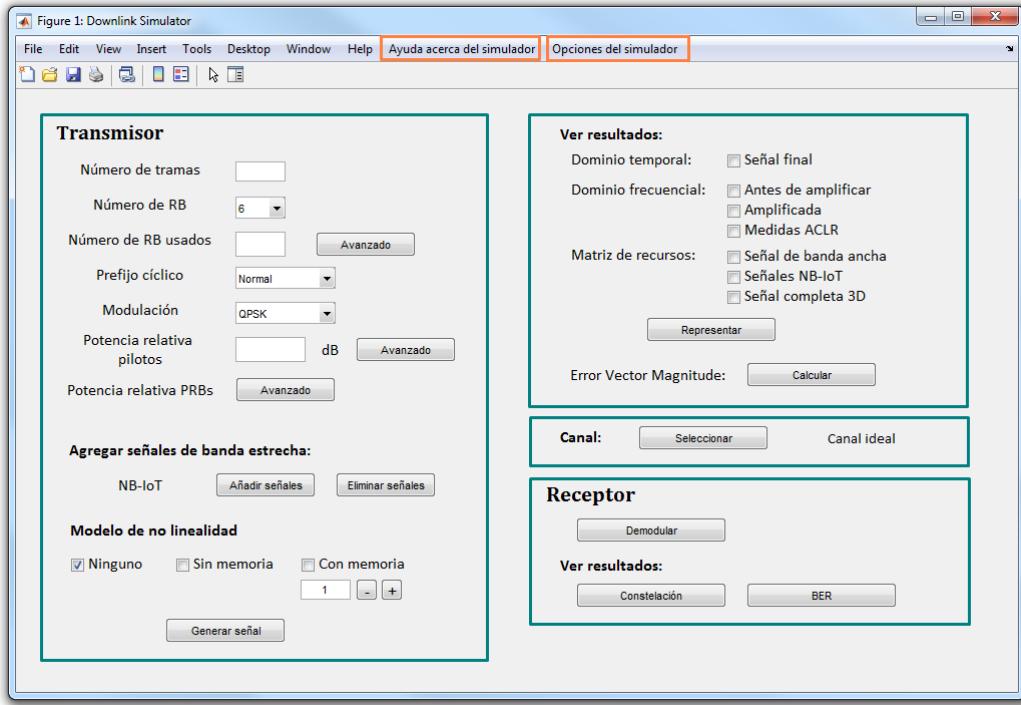


Figura A.1: Interfaz de usuario inicial del simulador 5G – NB-IoT con las partes principales de las que consta.

detallan a continuación.

Número de tramas a generar

Permite definir la longitud de la señal generada tomando las tramas como unidad de medida. Para más información sobre la estructura de tramas, consultar el apartado 1.1.3.

Número de RBs

Define el número de bloques de recursos del sistema de transmisión, es decir, el número máximo de bloques de recursos utilizables. Según el estándar tenemos 6 posibilidades, como se detalla en la tabla A.1.

Número de RBs usados

En este apartado se puede configurar la cantidad de recursos utilizados para realizar la transmisión. Esta asignación la podemos llevar a cabo en el simulador de dos maneras, de un modo simple o de otro avanzado. El modo sencillo de hacerlo consiste, simplemente en introducir en la casilla correspondiente, como se detalla en la figura A.2, el número de RBs a usar. Estos se llenarán consecutivamente empezando por los de frecuencias más bajas.

N.º de RB	Ancho de banda (MHz)
6	1,4
15	3
25	5
50	10
75	15
100	20

Tabla A.1: Anchos de banda y su correspondiente número de RB permitidos según el estándar.

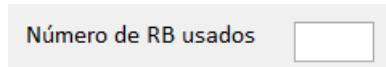


Figura A.2: Configuración del número de bloques usados para el simulador 5G – NB-IoT.

Para una asignación más precisa y con mayor libertad para el usuario se usa el modo avanzado. Accediendo a la pestaña, aparecen una serie de recuadros en los que el usuario puede llenar, para cada subrama los números de bloques que quiere usar, teniendo en cuenta lo siguiente:

- La numeración es *0-based*. Esto conlleva que los números de RB seleccionables serán de 0 a N_{RB}^{DL}
- El formato de los datos a introducir será el siguiente: 0, 3, 4 para indicar que se quieren usar los bloques 0, 3 y 4; 0 – 3 para indicar que se quieren usar los bloques desde el 0 hasta el 3, ambos inclusive.

A continuación, en la figura A.3, se detalla un ejemplo. En este caso, para la subrama 0 se usarían los bloques 0, 3, 4 y 5.

Prefijo cíclico

Como se ha detallado anteriormente, el estándar permite dos longitudes de prefijo cíclico, normal y extendido, para adaptar la señal a las condiciones de transmisión, esta opción permite elegir entre ambas. Resaltar que, si queremos añadir señales de banda estrecha, sólo se podrá utilizar el prefijo normal.

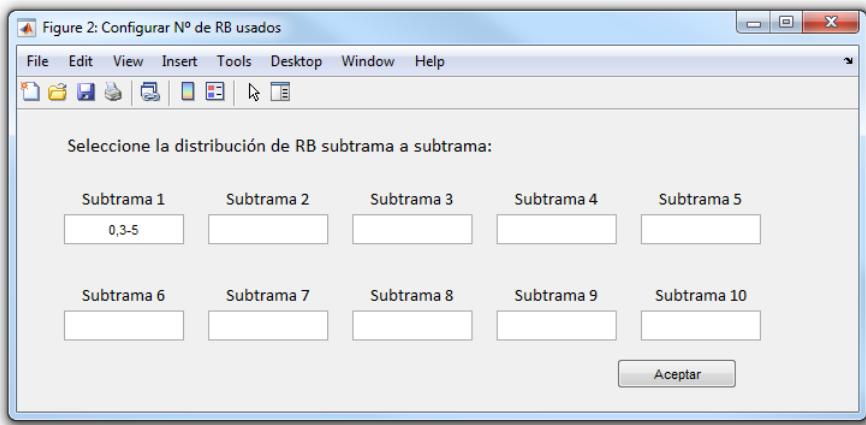


Figura A.3: Configuración del número de bloques usados para el simulador 5G – NB-IoT en modo avanzado (edición subtrama a subtrama).

Modulación

En este apartado, el usuario puede seleccionar entre las distintas modulaciones contempladas en el estándar. Como se ha explicado en el apartado 1.1.1.2, las modulaciones posibles son: QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM y 1024-QAM.

Niveles de potencia relativa de las señales piloto

Permite al usuario variar la potencia relativa de las señales pilotos respecto al resto de la señal. El rango dinámico permitido viene dado por el estándar y va de -3 dB y +6 dB. En este caso, en el modo sencillo podemos seleccionar el incremento de potencia que tendrán todas las señales piloto de la trama, mientras que, en el caso avanzado, podemos variarlo subtrama a subtrama.

En todas las casillas, el valor deberá introducirse en dB.

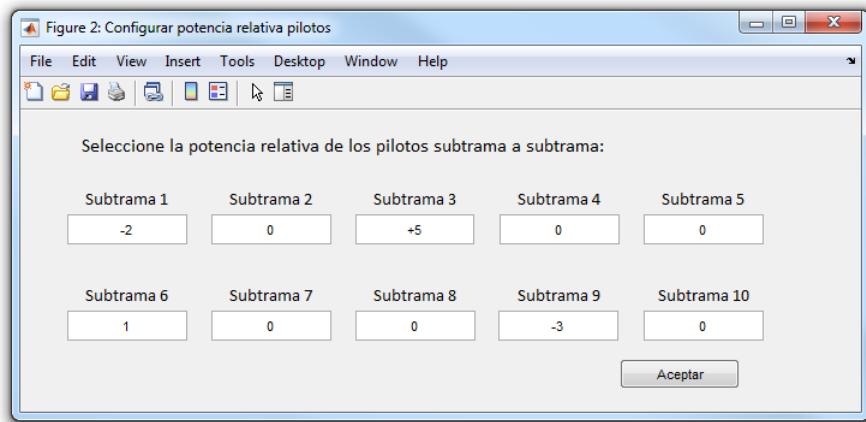


Figura A.4: Configuración de la potencia relativa de las señales piloto en el simulador 5G – NB-IoT en modo avanzado.

Niveles de potencia relativa de cada PRB

Esta opción nos permite variar la potencia relativa de los PRBs con respecto al resto de la señal. El funcionamiento es el mismo que en el caso anterior, con la salvedad de que, en este caso, sólo se da la opción avanzada. En ella se puede modificar la potencia subtrama a subtrama y para cada PRB, escribiendo los valores en dB y separados por comas.

A.1.2.2. Agregar señal de banda estrecha (NB-IoT)

Una vez se han seleccionado los parámetros de la señal de banda ancha, el usuario puede, además, generar otras de banda estrecha e integrarlas con la primera, siempre que la configuración de ambas lo permita. Como se ha explicado, existen dos posibilidades a la hora de integrar las señales de banda estrecha, puede hacerse en banda o en banda de guarda. La distribución de recursos en las tramas generadas no es modificable, debido a que su influencia es mínima en las medidas que se realizan. En la configuración con un ancho de banda de 1.4 MHz no es posible introducir señales NB-IoT en ninguna de las dos posiciones.

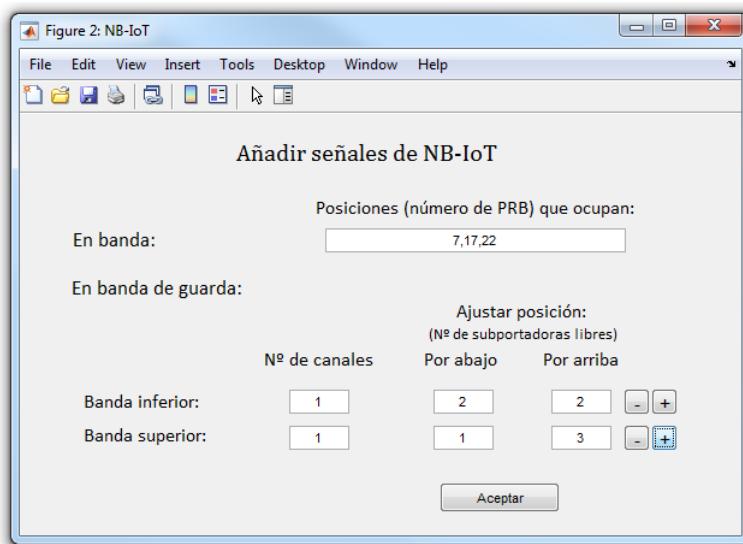


Figura A.5: Ventana de agregación de señales NB-IoT en el simulador 5G – NB-IoT.

Agregar señales NB-IoT en banda

Una vez hemos accedido a la ventana que permite configurar las señales NB-IoT a añadir, simplemente tenemos que introducir las posiciones en las que queremos añadir los canales. Los PRBs posibles para cada configuración son los que se detallan en la tabla A.2.

Ancho de banda del sistema	Índices de los PRBs en los que se pueden introducir las señales NB-IoT
1,4 MHz	—
3 MHz	2, 12
5 MHz	2, 7, 17, 22
10 MHz	4, 9, 14, 19, 30, 35, 40, 45
15 MHz	2, 7, 12, 17, 22, 27, 32, 42, 47, 52, 57, 62, 67, 72
20 MHz	4, 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95

Tabla A.2: PRBs utilizables para transmitir señales NB-IoT en banda.

Agregar señales NB-IoT en banda de guarda

En la segunda mitad de la ventana, tenemos lo relativo a la introducción de canales NB-IoT en las bandas de guarda de la señal 5G. En la primera columna de celdas editables, el usuario puede introducir el número de canales que quiera en cada banda de guarda; el máximo de canales posibles para cada banda de guarda y para cada configuración de ancho de banda viene determinado en la tabla A.3. Como se puede ver, además de la configuración de 1,4 MHz, la de 3 MHz tampoco permite incluir señales NB-IoT en la banda de guarda, debido a que el tamaño de cada una de ellas es menor que el de un canal de IoT.

Ancho de banda del sistema (MHz)	Máximo número de canales que se pueden transmitir en la banda de guarda.
1,4	0
3	0
5	1
10	2
15	3
20	5

Tabla A.3: Número máximo de canales NB-IoT que se pueden transmitir en la banda de guarda

Una vez indicado el número de canales, podemos ajustar su posición dentro de la banda de guarda cambiando el número de subportadoras que quedan libres en torno a los canales IoT; es decir, entre los canales IoT y la señal de banda ancha y entre los canales IoT y el límite permitido para cada caso. El n.º de subportadoras libres por abajo indica el hueco hacia frecuencias bajas y viceversa.

Para borrar todos los canales generados, basta con hacer click en *Eliminar señales*. Al acceder a la ventana de añadir señales NB-IoT, también se hace un reset y se borran las señales IoT que hubiera anteriormente.

A.1.2.3. Modelado de elementos no lineales

En esta sección del simulador se puede configurar si se quiere o no considerar los efectos no lineales que causaría el amplificador de potencia, la fibra óptica u otros elementos. En el caso que se tenga en cuenta, se puede elegir entre modelar el dispositivo utilizando un modelo sin memoria o un modelo con memoria. El primero es más simple y da buenos resultados en los casos en que el ancho de banda de la señal es pequeño; para las configuraciones del sistema que requieren mayores anchos de banda se recomienda seleccionar el modelo con una memoria de 1 o 2.

Al elegir una memoria de 1 se usaría un modelo en el que para calcular la muestra de salida en un determinado instante de tiempo se tiene en cuenta la muestra actual de entrada y la anterior; igualmente, al seleccionar memoria igual a 2, se tendrían en cuenta las muestras de entrada de los dos instantes inmediatamente anteriores.

En los casos que se modelan dichos elementos no lineales, se añade también una etapa de linealización mediante predistorsión digital para mejorar las prestaciones. Para más información acerca de los algoritmos de modelado, consultar el apartado 2.2 de la memoria.

El modelado se realiza a partir de señales reales capturadas en el laboratorio a entrada y salida del sistema no lineal (que puede incluir otros elementos adicionales). Estas señales se seleccionan desde el menú "seleccionar señales de entrenamiento". En él se tiene que elegir un fichero .mat en el que tengamos guardadas las señales de entrada y salida, llamadas s_{in} y s_{out} respectivamente, de la misma longitud, además de la frecuencia de muestreo (Fs). Por otra parte, se permiten ajustar las condiciones en las que se han tomado las medidas: atenuación introducida en la medida de s_{in} , atenuación en la medida de s_{out} e impedancia de referencia sobre la que se ha medido. En el caso de que no se modelen estos efectos, se ajusta la potencia de salida a una referencia de -18 dBm.

A.1.3. Canal de transmisión

En esta parte podemos configurar el modelo de canal a aplicar para modelar los efectos de la transmisión. Haciendo click en el botón *Seleccionar*, se accede a la ventana de configuración del canal. En ella, como se puede ver en la figura A.6, se

muestran todos los tipos de canal posibles, divididos en tres grupos: condiciones de propagación sin desvanecimiento, condiciones de propagación con desvanecimiento por multicamino y condiciones de propagación cambiantes.

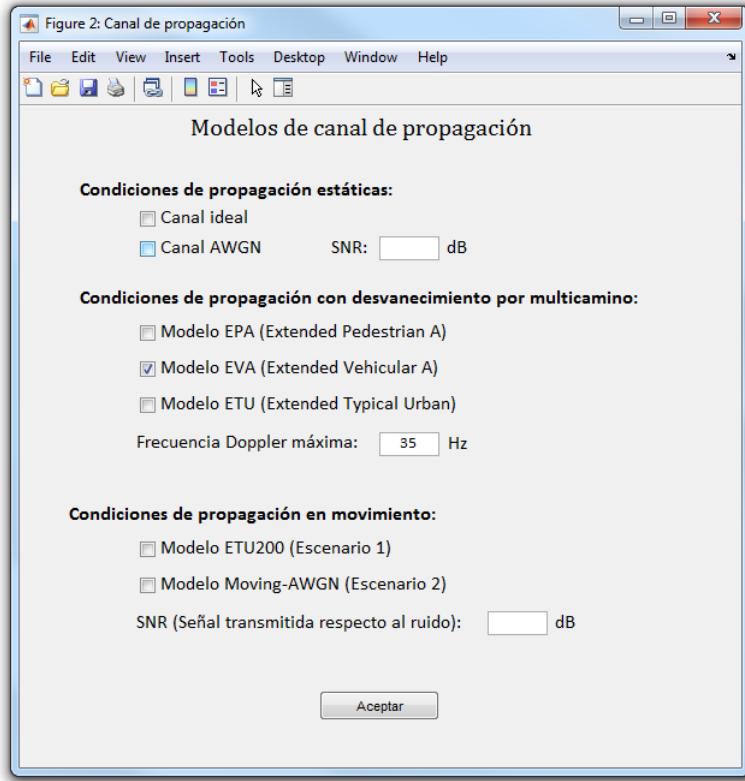


Figura A.6: Ventana de configuración del modelo de canal de propagación en el simulador 5G – NB-IoT.

Condiciones de propagación sin desvanecimiento

En ellos, la potencia media de la señal se mantiene constante. Tenemos dos tipos: el canal ideal y canal AWGN.

- **Canal ideal.** En este modelo de canal, la señal transmitida es igual que la recibida.
- **Canal AWGN.** Este canal añade un ruido aditivo, blanco y Gaussiano (AWGN) a la señal transmitida. La relación señal a ruido de la señal recibida (en dB) puede ser configurada por el usuario. Por defecto, la SNR es de 10 dB.

Condiciones de propagación con desvanecimiento por multicamino

Estos canales modelan utilizando la función de distribución Rayleigh condiciones de

propagación en las que existe un desvanecimiento por multicamino. En este caso, los desvanecimientos según las diferencias de retardo se mantienen constantes. Tenemos tres tipos: modelo EVA, modelo EPA y modelo ETU.

- **Modelo EPA.** El modelo *Extended Pedestrian A* modela condiciones de baja movilidad. La máxima frecuencia Doppler para este caso es de 5 Hz.
- **Modelo EVA.** El modelo *Extended Vehicular A* modela condiciones de movilidad media, típicas para comunicaciones desde vehículos. En este caso, la frecuencia Doppler máxima permitida es de 70 Hz.
- **Modelo ETU.** El modelo *Extended Typical Urban* modela condiciones de alta movilidad en entornos urbanos. Para este caso se permite una frecuencia Doppler de hasta 300 Hz.

Condiciones de propagación cambiantes

Estos modelos implementan canales cuyos perfiles de retardo varían con el tiempo. Tenemos dos modelos: el ETU-200 y un Moving-AWGN.

- **Modelo ETU-200.** Modelo que implementa un canal típico urbano con un desplazamiento Doppler de hasta 200 Hz, retardos variables siguiendo una función senoidal y modelo de desvanecimiento Rayleigh. Modela velocidades del UE de hasta 120 Km/h.
- **Modelo Moving-AWGN.** Modela un canal sin desvanecimiento pero que introduce retardos variables que se traducen en rotaciones de fase. Permite modelar altas velocidades.

A.1.4. Visualización de resultados del transmisor

Para una correcta interpretación y evaluación de la simulación, se ofrecen al usuario una serie de medidas a través de la ventana de comandos y unas representaciones que pretenden ilustrar y cuantificar los resultados obtenidos. Al generar una señal, en la ventana de comandos se puede ver algo similar a lo siguiente:

```
*** Ejecucion del transmisor ***
PAPR = 14,70 dB
Ganancia sin linealizacin : 42,12 dB
Ganancia con linealizacin : 39,39 dB
Diferencia de ganancia : - 2,73 dB
Numero de muestras que sobrepasan el limite : 70 (0,026042%)
```

Las figuras que se ofrecen al usuario son las siguientes:

Señal final

Se representa en el dominio del tiempo la señal que se transmite. En el caso de que se aplique un modelo de amplificador, la que se transmite es la señal linealizada y amplificada; en caso de que no se aplique, directamente es la señal generada.

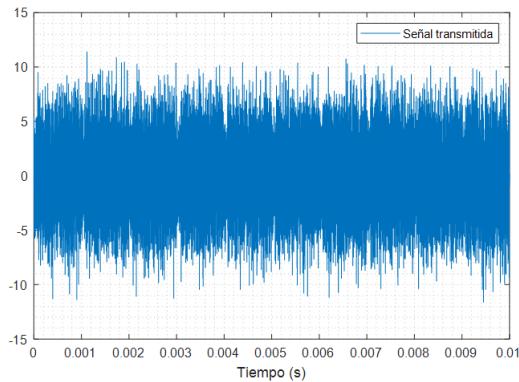


Figura A.7: Representación de la señal final transmitida en el dominio temporal en el simulador 5G–NB-IoT.

Señal antes de amplificar

Se visualiza en el dominio de la frecuencia la señal generada inicialmente, es decir, sin pasar la señal por el predistorsionador ni el modelo de amplificador.

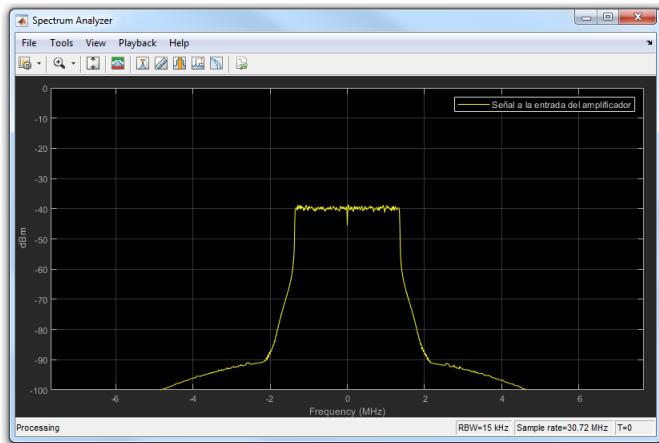


Figura A.8: Representación de la señal generada a la entrada del amplificador en el simulador 5G–NB-IoT.

Señal amplificada

En esta representación, también en el dominio de la frecuencia, se muestra al usuario la señal linealizada tras pasar por el amplificador, comparándola con la señal generada inicialmente. En el caso de que no se use amplificador las dos señales representadas van a ser la misma. En el caso de usar amplificador, se representa

también la señal amplificada sin linealizar, para poder ver el compromiso que existe entre linealidad y ganancia obtenida. Como se puede ver en la figura A.9, tenemos también la medida del ancho de banda ocupado (útil) y la potencia de la señal en ese ancho de banda, por lo que podemos medirlo para todas las señales que se comparan. A la derecha de la representación, se puede cambiar la vista, a como aparece en la figura A.10, donde se muestran los canales adyacentes y el ACLR para cada uno.

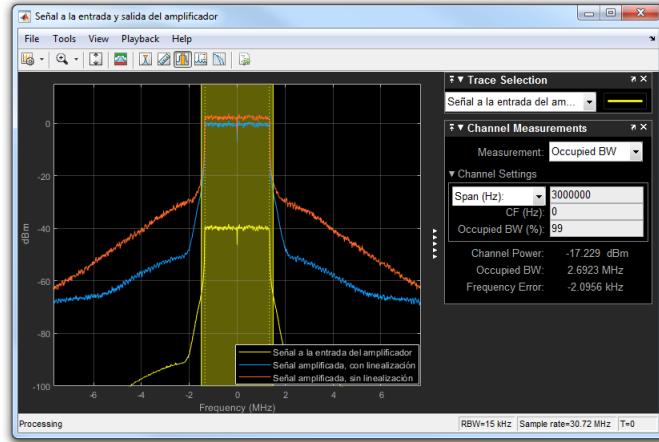


Figura A.9: Representación del espectro de la señal generada antes y después de ser amplificada, con y sin linealización.

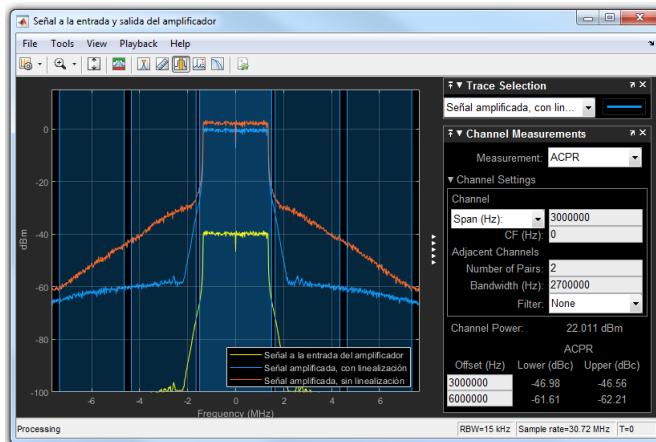


Figura A.10: Representación del espectro de la señal generada antes y después de ser amplificada, con y sin linealización. Se muestran los niveles de ACLR y la posición de los canales adyacentes.

Medidas ACLR

En este apartado aparecen dos representaciones diferentes. En una, aparecen las medidas de *ACLR*, para los cuatro canales adyacentes más cercanos a la señal. En la otra, se muestra una representación en frecuencia de la señal transmitida (la que

se puede ver en tiempo en el primer punto), en la que se indican medidas acerca de la potencia de la señal.

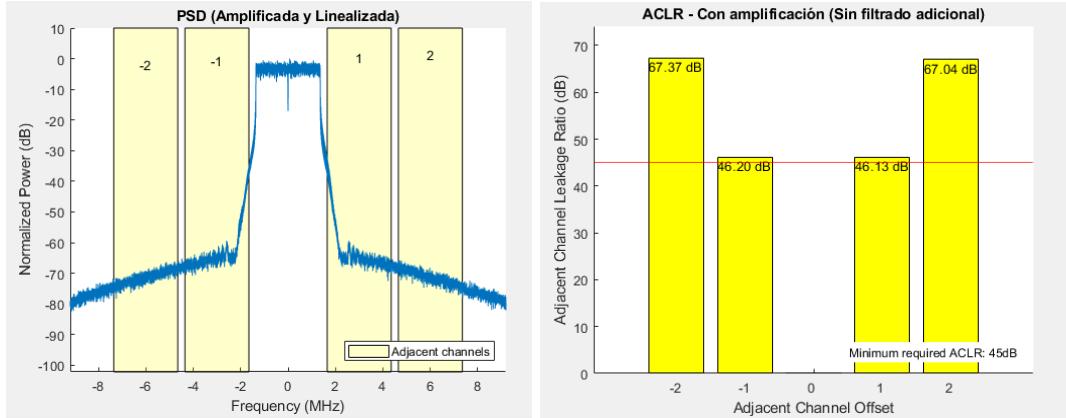


Figura A.11: Gráficas mostradas en el simulador 5G – NB-IoT en relación a las medidas de ACLR.

Además, en la ventana de comandos se ofrece información numérica acerca de las medidas y los parámetros usados para obtenerlas:

```
*** Resultados ACLR ***
Ancho de banda : 1,40 MHz
Ancho de banda util : 1,08 MHz
Frecuencias centrales de los canales adyacentes (MHz) : [- 2,80 - 1,40 1,40 2,80]
Adjatent Channel Leakage Ratio (dB) : [65,70 46,67 45,50 64,68]
```

Señal de banda ancha

Muestra al usuario cómo se rellena la matriz de recursos en una de las tramas de la señal de banda ancha (sin incluir canales NB-IoT) que hemos generado, es decir, dónde se sitúan cada uno de los canales que se están transmitiendo y qué huecos están vacíos, tal y como se puede ver en la figura A.12. Independientemente del número de tramas que se haya indicado generar, se representará solamente una de ellas, ya que la distribución va a ser la misma en todas.

Señales NB-IoT

Se representa la distribución de las tramas de los canales NB-IoT que se hayan generado, una representación para cada tipo de canal (en banda, en banda de guarda, *anchor*, *non-anchor*). Como en el caso anterior, cada tipo de canal tiene una distribución fija, por lo que sólo se mostrará la configuración de cada uno de los tipos de trama generados una vez, indicando las posiciones en las que se sitúa ese

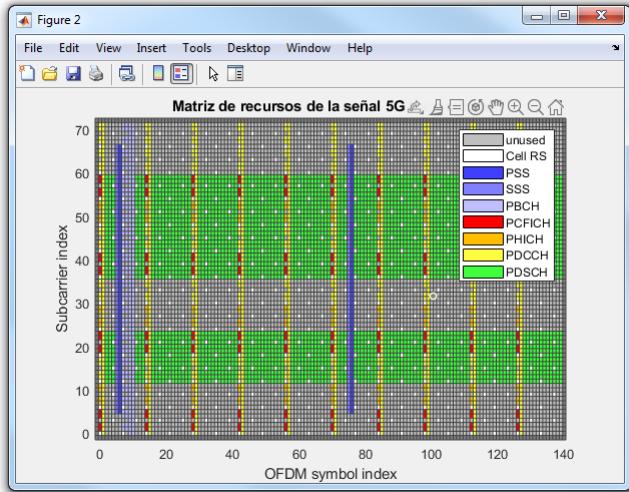


Figura A.12: Representación de la matriz de recursos de la señal 5G generada en el simulador 5G–NB–IoT. Se usa una configuración con un BW de 1,4 MHz, utilizándose los RB 1, 3 y 4.

canal. Como en este caso las tramas pares son distintas de las impares, se muestran dos tramas de cada tipo:

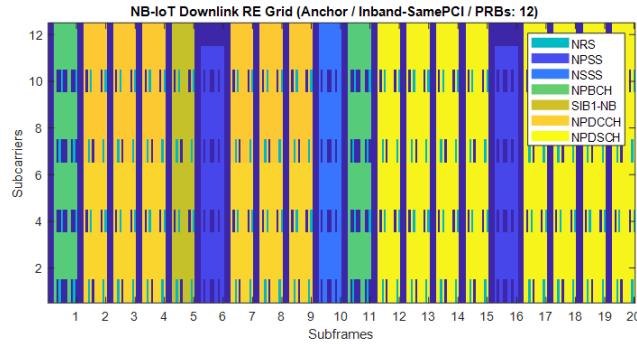


Figura A.13: Representación de la matriz de recursos de un canal IoT generado en el simulador 5G–NB–IoT.

Señal completa 3D

En este apartado aparecen dos representaciones. Por un lado el usuario puede ver la distribución en 3D de la señal de banda ancha, de manera que puede apreciar más claramente su distribución y, además, la potencia de cada símbolo transmitido, medida en dBm. Como en casos anteriores y por la misma razón, el eje de tiempos abarca únicamente una trama. Por otro lado, se muestra al usuario, tal y como se ve en la figura A.14, la configuración global de toda la señal transmitida, incluyendo tanto las señales de banda ancha como las de banda estrecha. Es importante tener en cuenta que, en este caso, para poder incluir las señales de banda estrecha que

se encuentran en banda de guarda, se toma como referencia para etiquetar las subportadoras la matriz con el número de puntos para los que se hace la IFFT en cada caso, en vez de la matriz reducida con solamente las portadoras activas.

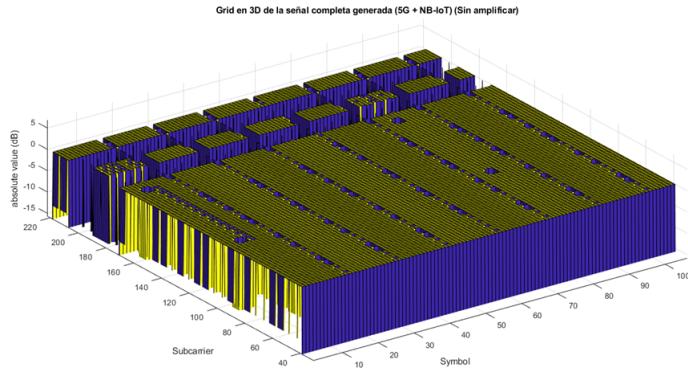


Figura A.14: Representación en 3D de la señal generada, agregando señales 5G y NB-IoT, antes de pasar por el amplificador. Se muestra una señal 5G con un BW de 15 RB, usándose del 0 al 10 y el 14, con transmisión IoT en banda en el PRB 12.

Por último, se pueden calcular los valores de EVM mostrados en %, normalizando al valor del módulo de la potencia media de los símbolos de la constelación ideal. Las representaciones exponen la evolución del EVM con respecto a las dimensiones del tiempo y de la frecuencia, en concreto, según el símbolo OFDM, el número de slot, el número de RB y el número de subportadora. Además, en todos los casos se muestra el valor rms y el valor de pico alcanzado. Para las señales de banda estrecha transmitidas se muestra también el EVM, en este caso, en función del símbolo OFDM y en función del número de subportadora.

Además de las representaciones, se muestran los valores numéricos por la ventana de comandos.

A.1.5. Sistema receptor

El sistema receptor simula la demodulación de la señal. Para ello, realiza las pertinentes ecualizaciones y corrección de offsets y extrae los símbolos recibidos. Una vez se ha llevado a cabo la demodulación, se ofrece información para la evaluación de la transmisión que se ha simulado. Por un lado, se puede ver cualitativamente la calidad de la misma mediante la constelación y, por otro, se muestra una cuantificación de esta degradación mediante el BER, ofrecido a través de la ventana de comandos.

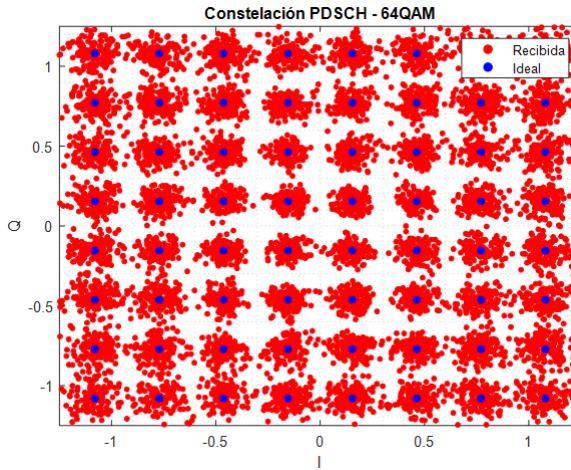


Figura A.15: Representación la constelación recibida para una simulación con modulación 64-QAM.

A.1.6. Menús

En la barra de herramientas de la ventana principal del simulador se incluyen dos menús: "Ayuda acerca del simulador" y "Opciones del simulador". El primero, ofrece al usuario una ayuda básica sobre el simulador y, el segundo, permite cambiar el modo de funcionamiento del simulador, ajustar parámetros y exportar señales, como se va a detallar a continuación.

A.1.6.1. Menú de ayuda

Para cada una de las secciones relevantes, se ofrece una pequeña ayuda, con los aspectos más relevantes de la presente guía, para poder acceder a ellos de una manera más ágil.

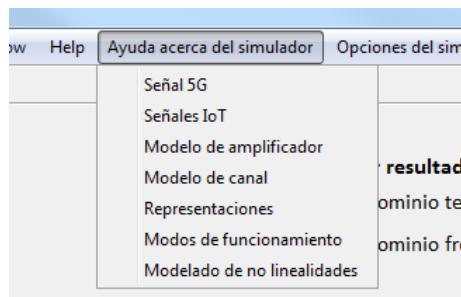


Figura A.16: Menú de ayuda en el simulador 5G-NB-IoT.

A.1.6.2. Menú de opciones

Modo de evaluación

En el submenú "Modo de evaluación", el usuario puede cambiar el modo de

funcionamiento del simulador entre: evaluar integración de señales y evaluar efectos de cumplimiento de máscara.

- **Evaluar integración de señales.** Funcionamiento según lo descrito en la guía hasta este punto. Permite ver cómo se ve afectada la calidad de la señal en diversas configuraciones y agregando señales de diferente naturaleza.
- **Evaluar efectos de cumplimiento de máscara.** En este modo, se simulan los efectos que aparecen en la señal si nos centramos en cumplir la máscara y niveles de ACLR requeridos. Para ello, se aplica a la señal un filtrado bastante restrictivo antes del amplificador.

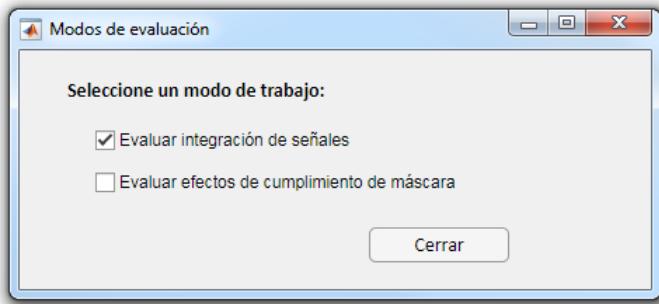


Figura A.17: Ventana de modos de funcionamiento en el simulador 5G–NB-IoT.

Ajustar señales de entrenamiento

En el submenú "ajustar señales de entrenamiento", se puede seleccionar las señales de entrada y salida con las que modelar el sistema no lineal (amplificador o amplificador + fibra), como se puede ver en la figura A.18. Además, se permite el ajuste de varios parámetros en función de las condiciones de medida en las que se hayan tomado las señales. La atenuación en la medida habría que tenerla en cuenta si se ha utilizado un atenuador como protección a la hora de realizar las medidas y la impedancia de referencia es la impedancia sobre la que se realizan las medidas, por defecto $50\ \Omega$. De este modo, se tiene total libertad sobre el sistema a modelar.

Para el correcto funcionamiento, dentro del fichero de matlab (.mat), las señales de entrada y salida deben estar guardadas como s_in y s_out , respectivamente, y tener la misma dimensión.

Exportar señales

En este submenú, el usuario puede guardar señales generadas durante la simulación en su espacio de trabajo, tal y como se indica en la figura A.19. Las señales

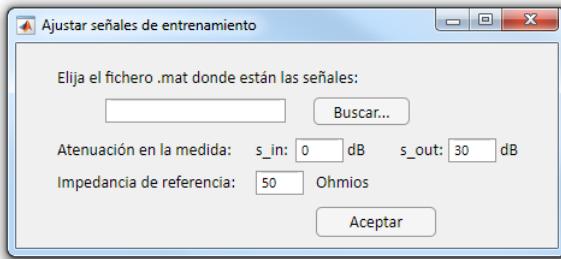


Figura A.18: Ventana que permite seleccionar las señales usadas para el modelado de los elementos no lineales en el simulador 5G–NB-IoT.

que se permiten guardar son las correspondientes a antes y después de la etapa predistorsión-amplificación. Se puede elegir qué señal, o ambas, guardar en un fichero cuyo nombre es elegido también por el usuario. Además de las señales seleccionadas, en el fichero se guarda también la frecuencia de muestreo de dichas señales. Cada una de estas variables, se almacena en el fichero ".mat" con los siguientes nombres:

- **txWaveform**: Hace referencia a la señal sin amplificar.
- **txAmpWaveform**: Hace referencia a la señal amplificada y linealizada.
- **Fs**: Frecuencia de muestreo.

Es importante destacar que, si estamos en el segundo modo de evaluación del simulador, las señales que se exportarán serán las filtradas.



Figura A.19: Ventana de exportación de señales en el simulador 5G – NB-IoT.

A.2. Simulador 5G-NR

Esta segunda parte del simulador nos permite estudiar el enlace descendente de un sistema de radio 5G-NR, en este caso no nos centramos en el estudio de los efectos de integrar señales de diferente naturaleza, sino en los efectos que se introducen debido a las nuevas numerologías o anchos de banda. Además, se incluye modelado de elementos no lineales como el amplificador de potencia y condiciones reales de propagación para diversos escenarios.

A.2.1. Inicio de la aplicación

Lo primero de todo, debemos iniciar el simulador, ejecutando en la ventana de comandos del entorno software MATLAB® la instrucción *DL_5GNR_Simulator*. Esta abrirá la aplicación y se mostrará al usuario la interfaz principal de la misma. Como se puede ver en la figura A.20, nos encontramos con las siguientes partes:

- **Configuración de la señal.** Permite ajustar los parámetros característicos de la señal que queremos simular.
- **Selección del modelo de no linealidad.** En ella, se puede elegir el modelo que queremos utilizar para el modelado de elementos no lineales.
- **Selección del modelo de canal.** En esta sección, se puede configurar el modelo de canal de transmisión que queremos aplicar.
- **Visualización de resultados.** Permite al usuario, mediante una serie de representaciones, ver los resultados de la simulación.
- **Menús.** Hay un menú de ayuda con las pautas básicas para el manejo del simulador y otro de opciones que permite ajustar parámetros o exportar señales.

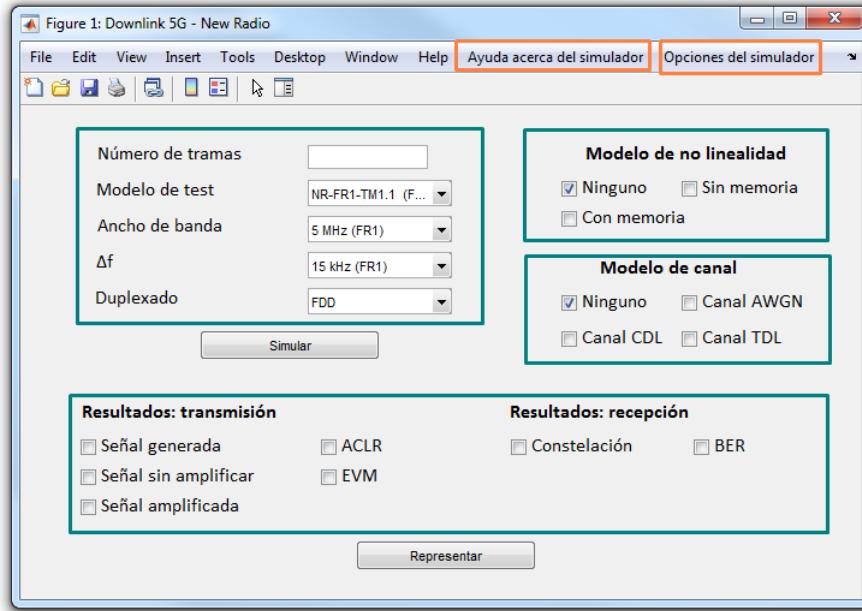


Figura A.20: Interfaz de usuario inicial y partes del simulador 5G-NR.

A.2.2. Configuración de la señal

Número de tramas

El usuario puede configurar la longitud temporal de la señal que se genera. Esta longitud influirá para realizar las representaciones o a la hora de exportarla, sin embargo, los cálculos de EVM y BER se harán solo con la primera trama.

Modelo de test

Como se ha apuntado previamente, existen dos rangos de frecuencia definidos para señales 5G-NR, uno sub-6GHz y otro en la banda de las ondas milimétricas:

Frequency Range 1	Frequency Range 2
450 MHz - 6000 MHz	24520 MHz - 52600 MHz

Tabla A.4: Rangos de frecuencia definidos para señales 5G-NR.

Para cada una de las dos bandas se proponen una serie de modelos definidos en el estándar para la evaluación de prestaciones. Dichos modelos de test se explican con un mayor detalle en [31, pp. 44-94] para las frecuencias FR1 y los definidos en [32, pp. 50-53] para FR2.

En el simulador, al seleccionar el desplegable, aparece cada uno de ellos, indicándose el FR en el que se encuentra, la modulación utilizada, el ancho de banda rellenado y como se distribuye la potencia. En los casos *full band*, se rellena todo el ancho de banda mientras que en los *single PRB* se transmite solamente un PRB. Por otra parte, en los casos *uniform* la potencia se distribuye uniformemente, pero en los *boosted/deboosted* hay PRBs con más potencia que otros.

Separación entre subportadoras. Numerología.

En este apartado podemos elegir entre las diferentes numerologías 5G permitidas, que determinan la separación entre subportadoras (SCS). Esta separación viene definida por:

$$SCS = 2^\mu \cdot 15kHz, \text{ con } \mu = 0, 1, 2, 3 \quad (\text{A.1})$$

Para cada numerología se definen el resto de parámetros según lo especificado a continuación. Resaltar que, aunque la numerología hace variar la duración de la ráfaga de información, no vamos a entrar en ello en este trabajo porque en cada modelo de test se define como se rellena la matriz de recursos.

Ancho de banda

Según el rango de frecuencias (FR1 o FR2) en el que trabajamos, se definen una serie de anchos de banda y numerologías permitidas. Las cuales se recogen en las tablas A.5 para FR1 y A.6 para FR2.

BW (MHz)	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	90	100
$\mu = 0$	25	52	79	106	133	160	216	270	—	—	—	—
$\mu = 1$	11	24	38	51	65	78	106	133	162	217	245	273
$\mu = 2$	—	11	18	24	31	38	51	65	79	107	121	135

Tabla A.5: Anchos de banda definidos para las diferentes numerologías en señales 5G-NR en FR1. Se especifica para ellas el número de RB.

BW (MHz)	50	100	200	400
$\mu = 2$	66	132	264	—
$\mu = 3$	32	66	132	264

Tabla A.6: Anchos de banda definidos para las diferentes numerologías en señales 5G-NR en FR2. Se especifica para ellas el número de RB.

Duplexado

Permite seleccionar el tipo de duplexado utilizado en la transmisión, pudiendo elegir entre duplexado en el dominio de la frecuencia (FDD) o duplexado en el dominio del tiempo (TDD);

A.2.3. Modelo de elementos no lineales

En esta parte del simulador, se puede elegir si tener en cuenta o no los efectos que causarían los elementos no lineales en el transmisor, como pueden ser el amplificador de potencia o la fibra óptica, igual que en el simulador anterior, pudiendo elegir entre un modelado con memoria o sin memoria. El primero es más simple y da buenos resultados en los casos en que el ancho de banda de la señal es pequeño; para las configuraciones del sistema que requieren mayores anchos de banda se recomienda seleccionar el modelo con una memoria de 1 o 2.

Por ejemplo, al elegir una memoria de 1 se usaría un modelo en el que para calcular la muestra de salida en un determinado instante de tiempo se tiene en cuenta la muestra actual de entrada y la anterior y, análogamente para memoria igual a 2, influirían las muestras de dos instantes anteriores.

En los casos que se utiliza un modelo de amplificador, se añade también una etapa de linealización mediante DPD para mejorar las prestaciones. Para más información acerca de los algoritmos de modelado, consultar el apartado 2.2 de la memoria.

El modelado se lleva a cabo usando señales reales capturadas previamente a entrada y salida del sistema no lineal (que puede incluir otros elementos adicionales) y almacenadas en un fichero .mat. Este archivo se selecciona desde el menú "seleccionar señales de entrenamiento". Es importante guardar las señales como s_{in} y s_{out} , respectivamente, y con la misma longitud, además de la frecuencia de muestreo (Fs). Por otra parte, se permiten ajustar las condiciones en las que se han tomado las medidas: atenuación introducida en la medida de s_{in} , atenuación en la medida de s_{out} e impedancia de referencia sobre la

A.2.4. Modelo de canal

En esta parte se puede configurar el modelo de canal a aplicar. Haciendo click en el modelo deseado, se abre una ventana donde poder ajustar algunos parámetros adicionales o elegir el submodelo deseado según lo detallado a continuación. Para obtener más información acerca de los mismos, consultar [29, pp. 65-72].

Canal ideal (Ninguno)

Este es un modelo meramente teórico, en el que la señal recibida es igual a la transmitida, es decir, se eliminan los efectos que pueda causar el canal.

Canal AWGN

En este canal, la señal recibida es la transmitida más un ruido aditivo, blanco y Gaussiano (AWGN). La relación señal a ruido en recepción (en dB) puede ser configurada por el usuario. Por defecto, la SNR es de 10 dB.

Canales CDL

Los modelos *Clustered Delay Line* se utilizan especialmente para el simular entornos de propagación en transmisiones MIMO. Existen cinco modelos dentro de este grupo. Los modelos CDL-A, CDL-B y CDL-C, modelan condiciones NLOS, mientras que los CDL-D y los CDL-E, simulan condiciones de LOS.

Canales TDL

Son modelos *Tapped Delay Line*, que buscan representar canales con desvanecimiento usando la función de distribución Rayleigh. Dentro de este grupo, existen también

cinco modelos. Los tres primeros TDL-A, TDL-B y TDL-C, se han diseñado para simular condiciones NLOS, mientras que los otros dos, TDL-D y TDL-E, hacen lo propio con condiciones LOS. En los modelos TDL-D y TDL-E, debido a las condiciones de visión directa, también se incluye modelado utilizando la distribución Rice.

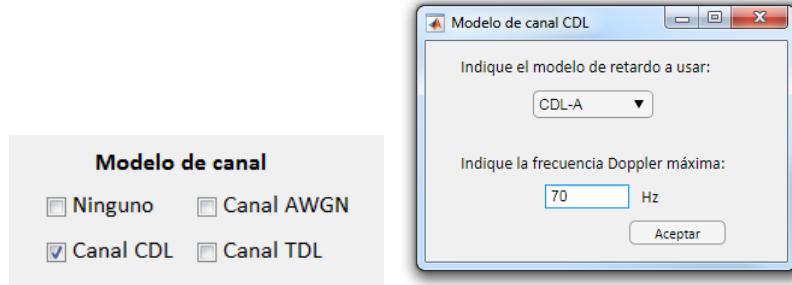


Figura A.21: Ventana de configuración de los modelos de canal de propagación en el simulador 5G-NR.

A.2.5. Visualización de resultados

En este apartado se ofrecen al usuario una serie de representaciones que buscan ilustrar y cuantificar los resultados obtenidos, facilitando así la interpretación y evaluación de los resultados de la simulación. Las figuras ofrecidas son las siguientes:

Señal generada

Se representa en el dominio del tiempo la señal generada por el transmisor, antes de realizarse la predistorsión y amplificación.

Señal sin amplificar y amplificada

Se muestran en el dominio de la frecuencia las señales antes y después de pasar por la etapa de predistorsión-amplificación. Se puede seleccionar qué señales se quieren ver en la misma figura, si se seleccionan las dos, se mostrará una comparativa de ambas. En el caso de haber seleccionado no usar amplificador, ambas señales serán iguales; en caso de aplicar un modelo, se mostrará también la señal sin linealizar, para poder ver la comparativa entre ellas y el compromiso que existe entre linealidad y ganancia. Además, se ofrece la medida de ancho de banda útil del canal y potencia dentro de la misma para cada señal.

Medidas de ACLR

En este caso, se ofrecen dos figuras diferentes. En la primera, aparece la densidad

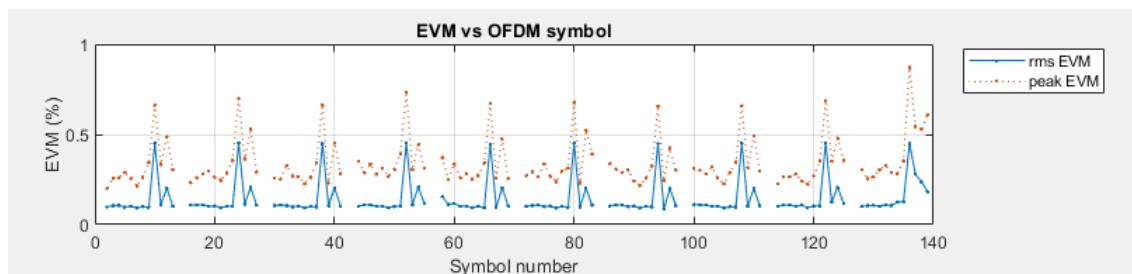
espectral de potencia de la señal transmitida (la amplificada si se modela el amplificador o la generada directamente si no) en la que se indica la posición de los canales adyacentes y, en la segunda, un diagrama de barras que indica el ACLR para cada uno de estos canales adyacentes.

Constelación

Se muestra una representación en la que aparecen superpuestas la constelación ideal y la recibida para el canal de datos PDSCH. La forma de esta constelación coincide con la típica para la modulación seleccionada en la configuración de la señal transmitida. En el caso de que se hubieran combinado dos modulaciones diferentes, las constelaciones de ambas se dibujan superpuestas.

Medidas de EVM

Se ofrecen al usuario diferentes medidas de EVM para la señal 5G-NR enviada. Los valores se muestran en %, normalizando al valor del módulo de la potencia media de los símbolos de la constelación ideal. Las representaciones exponen la evolución del EVM con respecto al tiempo para las dimensiones del tiempo y de la frecuencia, en concreto, según el símbolo OFDM, el número de slot y el número de subportadora. Además, en todos los casos se muestra el valor rms y el valor de pico alcanzado, de la forma en que se puede ver en la figura A.22.



A.2.6. Menús

En la barra de herramientas de la ventana principal del simulador se incluyen dos menús: "Ayuda acerca del simulador" y "Opciones del simulador". El primero, contiene una ayuda básica para facilitar el uso del simulador y, el segundo, permite cambiar algunos parámetros o exportar señales, como se detalla a continuación.

A.2.6.1. Menú de ayuda

Para cada una de las secciones que intervienen en el simulador se ofrecen al usuario las claves básicas para el correcto uso y funcionamiento del mismo, basadas en las explicaciones recogidas en esta guía.

A.2.6.2. Menú de opciones

Modo de evaluación

En este menú, como se ha mencionado, en el submenú "Modo de evaluación" se puede cambiar el modo de funcionamiento del simulador entre: evaluar configuración de las señales 5G-NR y evaluar efectos de cumplimiento de máscara.

- **Evaluar configuración de las señales 5G-NR.** El funcionamiento es tal cual se ha descrito en la guía hasta este punto. Nos centramos sólamente en los efectos que producen elementos como el amplificador en la señal en función de la configuración de la misma, sin exigir requerimientos adicionales.
- **Evaluar efectos de cumplimiento de máscara.** En este caso, exigimos que la señal cumpla con los requerimientos de máscara de potencia necesarios, así como de ACLR. Para ello, se aplica un filtrado exigente antes de la etapa linealización-amplificación, de manera que se puedan ver los efectos que esto conlleva y comparar los resultados con los obtenidos en el otro modo.

Ajustar señales de entrenamiento

Por otra parte, en el submenú "ajustar señales de entrenamiento", se puede seleccionar las señales de entrada y salida con las que modelar el sistema no lineal (amplificador, amplificador + fibra, u otros) de manera análoga a como se ha explicado para el simulador 5G-NB-IoT.

Exportar señales

Igual que en el caso anterior, este menú permite al usuario exportar la señal antes y después de pasar por la etapa no lineal al directorio deseado. En función del modo de evaluación elegido, las señales exportadas estarán o no filtradas (primer y segundo modo, respectivamente).

Anexo B

Resultados de las simulaciones

En este anexo se recogen en formato tabla todas las medidas experimentales realizadas en el presente TFG, y a partir de las cuales se extrae todo lo expuesto en el capítulo 3. Además, se incluyen una serie de figuras representativas de los resultados que no se hayan incluido previamente en la memoria.

Índice del anexo

B.1	Escenario 1: PRB en el medio del BW, no adyacente con canales IoT	92
B.2	Escenario 2: PRB en el medio del BW, adyacente a un canal IoT	93
B.3	Escenario 3: PRB en el extremo del BW, con canales IoT en banda de guarda.	94
B.4	Escenario 4: Canal IoT transmitido en banda	96
B.5	Escenario 5: Canal IoT transmitido en banda de guarda	97
B.6	Escenario 6: Evaluación del compromiso EVM/ACLR	99
B.7	Escenario 7: Evaluación de los efectos al cambiar de numerología	101
B.8	Escenario 8: Simulación de modelos de canal	104

B.1. Escenario 1: PRB en el medio del BW, no adyacente con canales IoT

Situación	EVM avg. (%)	EVM max. (%)
A	0,095	0,101
B.1	0,123	0,153
B.2	0,114	0,132
C.1	0,122	0,131
C.2	0,111	0,123
D	0,214	0,234

Tabla B.1: EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 1, todos los PRB con la misma potencia.

Situación	EVM avg. (%)			
	$\Delta P = 0\text{dB}$	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$
B.2	0,111	0,152	0,110	0,105
C.2	0,109	0,100	0,100	0,095
D	0,211	0,227	0,220	0,220

Tabla B.2: EVM(%) promedio para el PRB de referencia en el escenario 1, variando su potencia.

Situación	EVM avg-max (%)			
	$\Delta P = 0\text{dB}$	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$
B.2	0,130	0,120	0,130	0,120
C.2	0,120	0,110	0,105	0,105
D	0,230	0,255	0,250	0,240

Tabla B.3: EVM(%) máximo para el PRB de referencia en el escenario 1, variando su potencia.

Situación	EVM avg (%)			
	$\Delta P = 0\text{dB}$	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$
B.2	0,112	0,125	0,135	0,151
C.2	0,113	0,115	0,144	0,167
D	0,211	0,229	0,281	0,352

Tabla B.4: EVM(%) promedio para el PRB de referencia en el escenario 1, variando la potencia de los PRBs adyacentes.

Situación	EVM avg. (%)			
	$\Delta P = 0\text{dB}$	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$
B.2	0,131	0,136	0,138	0,165
C.2	0,122	0,119	0,161	0,181
D	0,233	0,249	0,309	0,451

Tabla B.5: EVM(%) máximo para el PRB de referencia en el escenario 1, variando la potencia de los PRBs adyacentes.

B.2. Escenario 2: PRB en el medio del BW, adyacente a un canal IoT

Situación	EVM avg. (%)	EVM max. (%)
A	0,095	0,101
B.1	0,123	0,153
B.2	0,105	0,109
D	0,150	0,160

Tabla B.6: EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 2, todos los PRB con la misma potencia.

Situación	EVM avg. (%)			
	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$
B.2	0,120	0,128	0,111	0,143
C.2	0,115	0,141	0,109	0,135
D	0,201	0,200	0,192	0,181

Tabla B.7: EVM(%) promedio para el PRB de referencia en el escenario 2, variando su potencia.

Situación	EVM max. (%)			
	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$
B.2	0,137	0,140	0,150	0,170
C.2	0,131	0,151	0,125	0,156
D	0,220	0,213	0,202	0,195

Tabla B.8: EVM(%) máximo para el PRB de referencia en el escenario 2, variando su potencia.

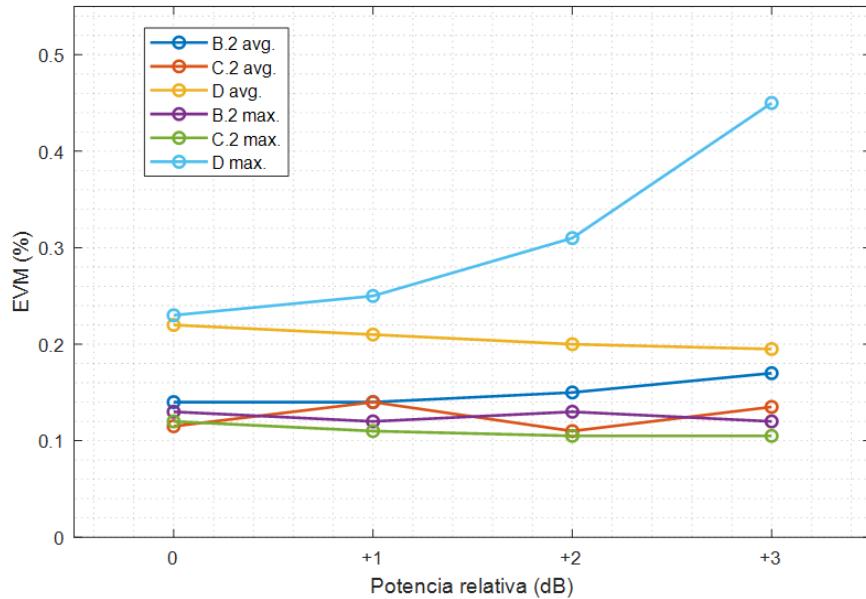


Figura B.1: EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 2, variando su potencia.

B.3. Escenario 3: PRB en el extremo del BW, con canales IoT en banda de guarda.

Situación	EVM avg. (%)	EVM max (%)
A	0.110	0.142
B.2	0,138	0,151
C.2	0,129	0,137
D	0,158	0,171

Tabla B.9: EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 3, todos con la misma potencia.

Situación	EVM avg. (%)			
	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$
B.2	0,331	0,321	0,320	0,350
C.2	0,300	0,313	0,332	0,323
D	0,387	0,410	0,405	0,400

Tabla B.10: EVM(%) promedio para el PRB de referencia en el escenario 3, variando la potencia del PRB de referencia.

Situación	EVM max. (%)			
	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$
B.2	0,401	0,380	0,400	0,379
C.2	0,392	0,382	0,373	0,387
D	0,450	0,550	0,461	0,481

Tabla B.11: EVM(%) máximo para el PRB de referencia en el escenario 3, variando la potencia del PRB de referencia.

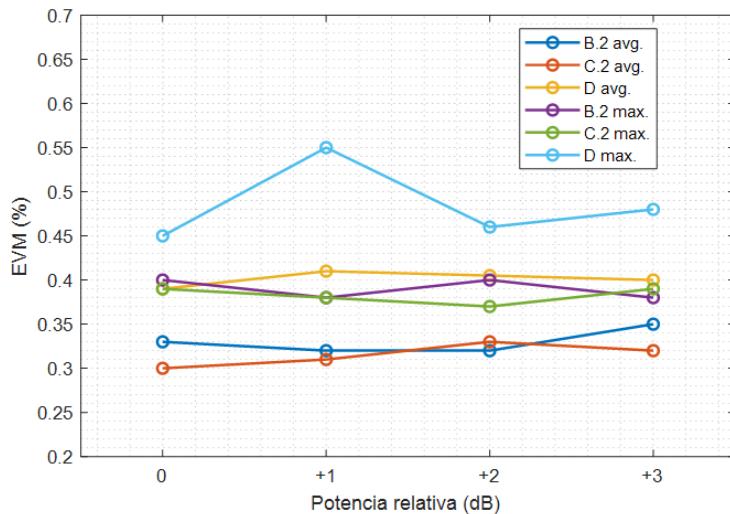


Figura B.2: EVM(%) para el PRB de referencia en el escenario 3, variando la potencia del PRB de referencia.

B.4. Escenario 4: Canal IoT transmitido en banda

Situación	EVM avg. (%)	EVM max. (%)
A	0,097	0,106
B.1	0,106	0,120
B.2	0,105	0,124
D	0,115	0,135

Tabla B.12: EVM(%) para un canal de IoT en el escenario 4, manteniendo constante la potencia de los PRBs adyacentes.

Situación	EVM avg. (%)			
	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$
B.2	0,109	0,130	0,155	0,203
C.2	0,115	0,127	0,142	0,149
D	0,140	0,151	0,155	0,150

Tabla B.13: EVM(%) promedio para un canal de IoT en el escenario 4, variando la potencia de los PRBs adyacentes.

Situación	EVM max. (%)			
	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$
B.2	0,125	0,161	0,201	0,348
C.2	0,135	0,150	0,209	0,180
D	0,152	0,180	0,196	0,193

Tabla B.14: EVM(%) máximo para un canal de IoT en el escenario 4, variando la potencia de los PRBs adyacentes.

B.5. Escenario 5: Canal IoT transmitido en banda de guarda

Separación (subportadoras)	EVM avg. (%)				
	$\Delta P = 0\text{dB}$	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$
0	0,113	0,149	0,151	0,214	0,207
1	0,123	0,128	0,146	0,201	0,200
2	0,111	0,122	0,145	0,172	0,185
3	0,112	0,115	0,140	0,163	0,199
4	0,122	0,111	0,133	0,155	0,205
5	0,121	0,115	0,135	0,152	0,184

Tabla B.15: EVM(%) promedio para un canal de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cambiando la separación con la señal de banda ancha.

Separación (subportadoras)	EVM peak. (%)				
	$\Delta P = 0\text{dB}$	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$
0	0,603	0,901	1,912	1,497	1,152
1	0,652	0,510	1,322	1,110	1,103
2	0,612	0,852	0,400	1,612	1,033
3	0,721	0,733	0,353	1,033	1,378
4	0,652	0,912	0,803	0,821	0,901
5	0,650	0,601	0,602	1,232	1,221

Tabla B.16: EVM(%) máximo para un canal de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cambiando la separación con la señal de banda ancha.

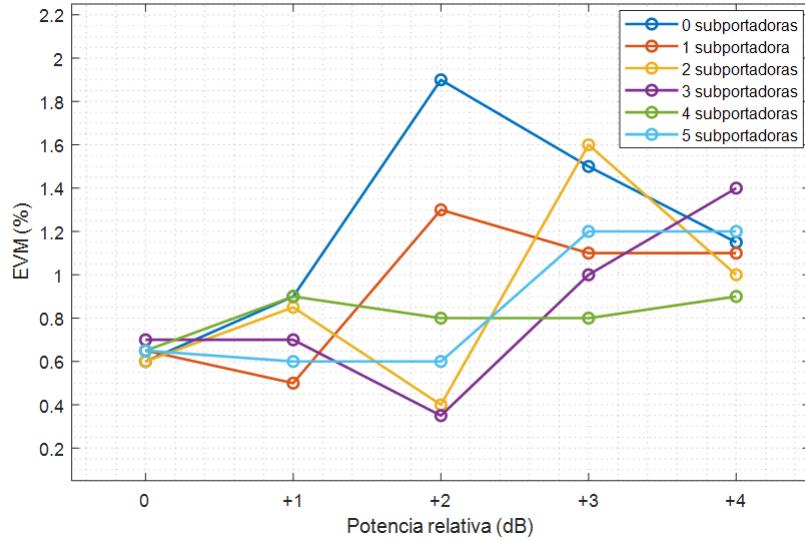


Figura B.3: EVM(%) máximo para un canal de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes y cambiando la separación con la señal 5G.

Canal NB-IoT	EVM avg. (%)				
	$\Delta P = 0\text{dB}$	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$
Canal 0	0,161	0,210	0,251	0,309	0,517
Canal 1	0,163	0,221	0,250	0,321	0,520

Tabla B.17: EVM(%) promedio en canales de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes. Se transmiten dos canales en la banda de guarda.

Canal NB-IoT	EVM max. (%)				
	$\Delta P = 0\text{dB}$	$\Delta P = 1\text{dB}$	$\Delta P = 2\text{dB}$	$\Delta P = 3\text{dB}$	$\Delta P = 4\text{dB}$
Canal 0	0,183	0,222	0,301	0,361	0,578
Canal 1	0,212	0,231	0,300	0,398	0,591

Tabla B.18: EVM(%) máximo en canales de IoT en el escenario 5, variando la potencia de los PRBs adyacentes. Se transmiten dos canales en la banda de guarda.

B.6. Escenario 6: Evaluación del compromiso EVM/ACLR

Separación (en subportadoras)	EVM avg. (%)		EVM max. (%)	
	Señal 5G	Señal IoT	Señal 5G	Señal IoT
0	0,138	0,823	0,154	0,976
2	0,136	0,721	0,145	0,865
4	0,141	0,744	0,156	0,813
6	0,132	0,589	0,155	0,634
8	0,136	1,222	0,205	1,325
10	0,133	2,523	0,234	2,734
12	0,138	4,485	0,376	5,234
14	0,134	8,992	0,432	9,656
16	0,154	19,892	0,476	22,153

Tabla B.19: EVM (%) en el escenario 6 en el caso en que no se modelan los efectos del amplificador.

Situación	ACLR(dB)			
	Canal -2	Canal -1	Canal 1	Canal 2
Sin IoT, sin filtrar	79,25	50,04	51,46	79,23
Con IoT pegada, sin filtrar	78,87	45,22	45,65	78,88
Con IoT centrada, sin filtrar	78,91	45,61	44,21	78,91
Sin IoT, filtrado	128,21	120,39	121,30	128,48
Con IoT pegada, filtrado	129,48	121,02	120,80	129,38
Con IoT centrada, filtrado	128,60	120,00	120,06	128,61

Tabla B.20: ACLR en el escenario 6 en el caso en que no se modelan los efectos del amplificador.

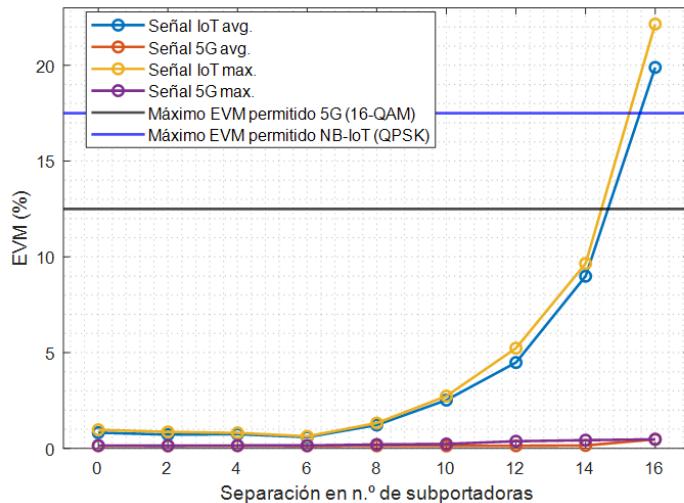


Figura B.4: EVM (%) en el escenario 6 en el caso en que no se modelan los efectos del amplificador.

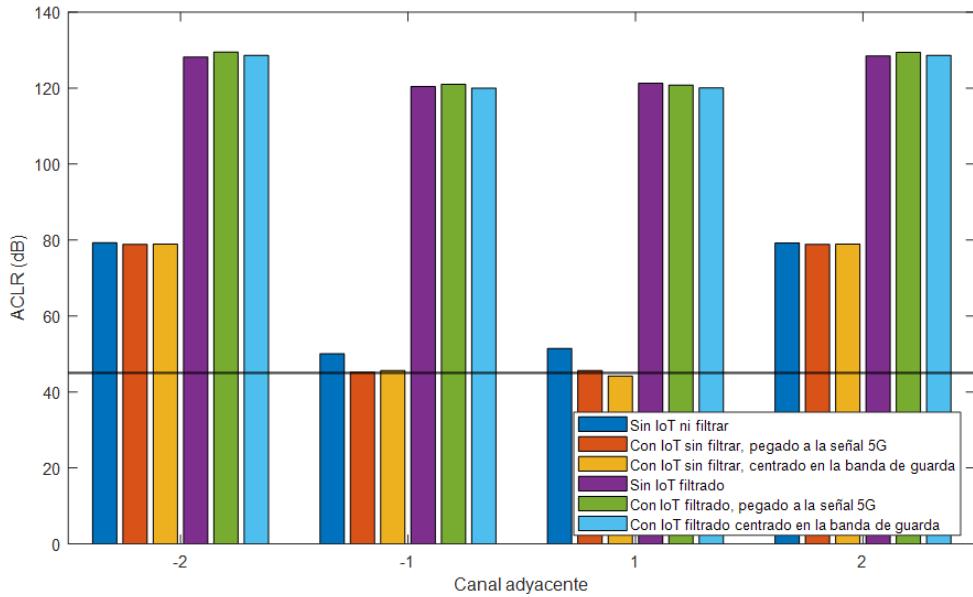


Figura B.5: ACLR en el escenario 6 en el caso en que no se modelan los efectos del amplificador.

Separación (en subportadoras)	EVM avg. (%)		EVM max. (%)	
	Señal 5G	Señal IoT	Señal 5G	Señal IoT
0	0,521	1,409	0,723	1,717
2	0,535	1,338	0,681	1,523
4	0,344	1,124	0,547	1,421
6	0,401	0,952	0,542	1,325
8	0,581	1,483	0,676	1,565
10	0,547	2,953	0,673	3,213
12	0,487	5,067	0,589	5,213
14	0,398	9,434	0,602	10,547
16	0,449	22,721	0,734	26,432

Tabla B.21: EVM (%) en el escenario 6 en el caso en que se utiliza un modelo de amplificador con memoria 1.

Situación	ACLR (dB)			
	Canal -2	Canal -1	Canal 1	Canal 2
Sin IoT, sin filtrar	67,26	50,10	49,94	67,21
Con IoT pegada, sin filtrar	65,27	44,10	43,51	64,98
Con IoT centrada, sin filtrar	64,81	41,90	42,72	64,81
Sin IoT, filtrado	63,91	55,43	55,33	63,70
Con IoT pegada, filtrado	62,95	55,00	55,10	63,03
Con IoT centrada, filtrado	63,03	52,90	53,62	63,23

Tabla B.22: ACLR en el escenario 6 en el caso en que se usa un modelo de amplificador con memoria de 1.

B.7. Escenario 7: Evaluación de los efectos al cambiar de numerología

NR-FR1-TM3.1						
BW (MHz)	EVM avg. (%)			EVM max. (%)		
	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$
10	0,097	0,093	0,103	0,471	0,323	0,546
15	0,130	0,106	0,112	1,907	0,985	0,794
20	0,098	0,100	0,093	0,430	0,864	0,341
25	0,160	0,098	0,100	1,747	0,644	0,527
30	0,122	0,109	0,108	1,673	1,032	1,139
40	0,113	0,106	0,104	1,125	1,164	1,492

Tabla B.23: EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1, no se modelan los efectos del amplificador.

NR-FR1-TM3.2						
BW (MHz)	EVM avg. (%)			EVM max. (%)		
	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$
10	0,167	0,154	0,179	0,803	0,960	0,746
15	0,266	0,162	0,206	5,300	2,382	0,952
20	0,152	0,190	0,156	0,731	3,763	1,167
25	0,203	0,152	0,259	1,681	2,401	1,701
30	0,187	0,246	0,155	1,059	3,255	2,383
40	0,159	0,153	0,171	1,445	0,908	3,765

Tabla B.24: EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2, no se modelan los efectos del amplificador.

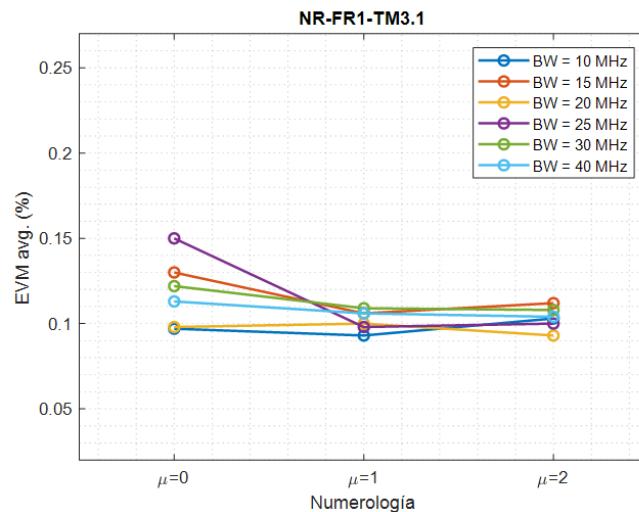


Figura B.6: EVM(%) promedio al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1, no se modelan los efectos del amplificador.

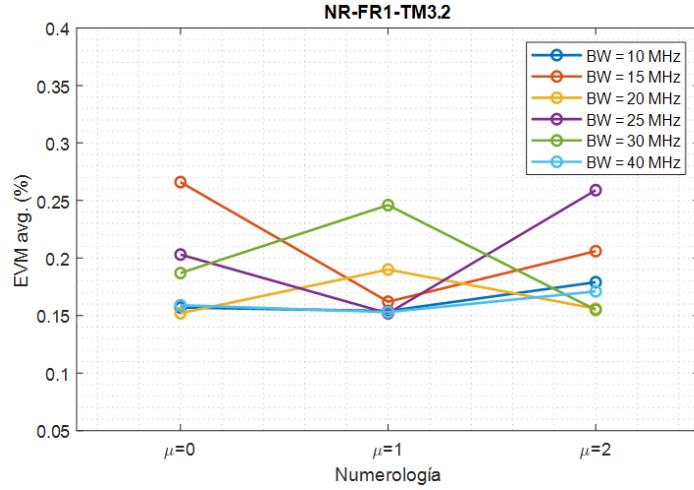


Figura B.7: EVM(%) promedio al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2, no se modelan los efectos del amplificador.

NR-FR1-TM3.1						
BW (MHz)	EVM avg. (%)			EVM max. (%)		
	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$
10	0,108	0,118	0,113	0,464	0,564	0,541
15	0,136	0,118	0,123	1,932	0,955	0,809
20	0,110	0,113	0,117	0,432	0,768	0,564
25	0,152	0,114	0,108	1,597	0,682	0,515
30	0,127	0,113	0,120	1,647	0,623	1,003
40	0,121	0,117	0,115	1,237	1,073	1,416

Tabla B.25: EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1 y un modelado de amplificador con memoria de 1.

NR-FR1-TM3.2						
BW (MHz)	EVM avg. (%)			EVM max. (%)		
	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$
10	0,175	0,178	0,192	0,962	1,330	0,795
15	0,264	0,181	0,233	5,034	2,297	1,108
20	0,159	0,192	0,178	0,898	3,219	1,330
25	0,204	0,166	0,265	1,363	2,005	1,652
30	0,190	0,261	0,177	0,840	3,049	2,300
40	0,168	0,160	0,179	1,371	0,898	3,221

Tabla B.26: EVM(%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2 y un modelado de amplificador con memoria de 1.

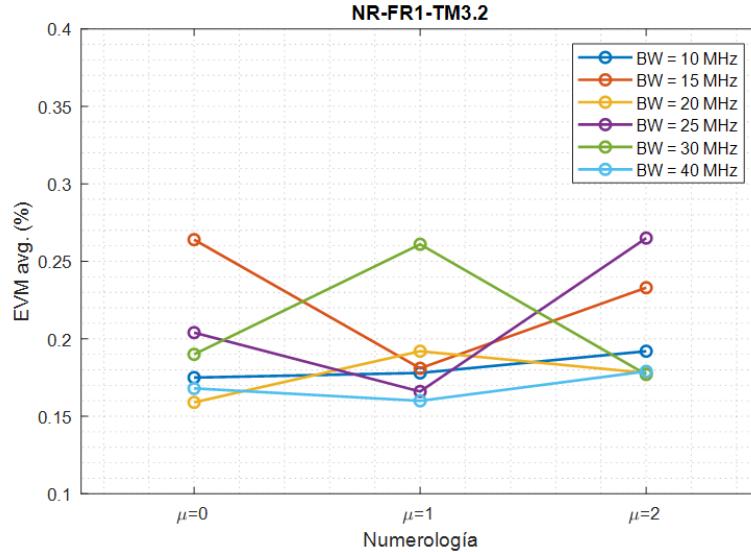


Figura B.8: EVM (%) al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2 y un modelado de amplificador con memoria de 1.

NR-FR1-TM3.1; ACLR (dB)												
BW (MHz)	Ch. -2			Ch. -1			Ch. 1			Ch. 2		
	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$
10	68,31	68,82	70,31	48,62	48,50	51,22	47,41	51,71	51,11	68,91	68,57	71,19
15	66,52	65,25	69,22	46,11	46,42	51,11	46,03	47,47	50,42	67,02	65,29	69,89
20	67,42	68,47	68,83	46,15	45,40	48,43	50,89	48,41	52,68	67,68	69,31	68,72
25	65,44	68,71	68,61	48,09	46,91	49,90	48,41	51,67	53,78	65,48	69,31	69,33
30	64,31	66,31	65,29	48,42	45,09	45,23	46,22	49,69	45,89	64,38	66,78	65,49
40	67,89	67,38	68,47	48,77	46,20	45,34	47,19	46,71	48,41	68,41	67,71	69,29

Tabla B.27: ACLR al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.1 y un modelado de amplificador con memoria de 1.

NR-FR1-TM3.2; ACLR (dB)												
BW (MHz)	Ch. -2			Ch. -1			Ch. 1			Ch. 2		
	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$
10	66,71	69,43	69,82	45,88	50,78	51,21	49,19	54,27	54,21	67,31	70,48	70,56
15	66,10	65,32	69,21	44,81	46,32	50,84	44,91	46,32	52,52	66,44	66,08	70,01
20	64,09	65,21	69,43	46,02	49,27	50,71	47,62	45,19	51,31	64,77	64,69	70,48
25	66,62	68,22	69,10	48,62	49,78	52,22	46,55	50,57	51,64	67,21	68,78	69,12
30	63,08	66,45	65,07	47,13	44,69	45,07	48,28	44,82	46,12	63,31	66,58	65,90
40	64,78	64,19	65,19	48,71	46,72	49,09	48,89	47,18	45,11	65,32	64,91	64,68

Tabla B.28: ACLR al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2 y un modelado de amplificador con memoria de 1.

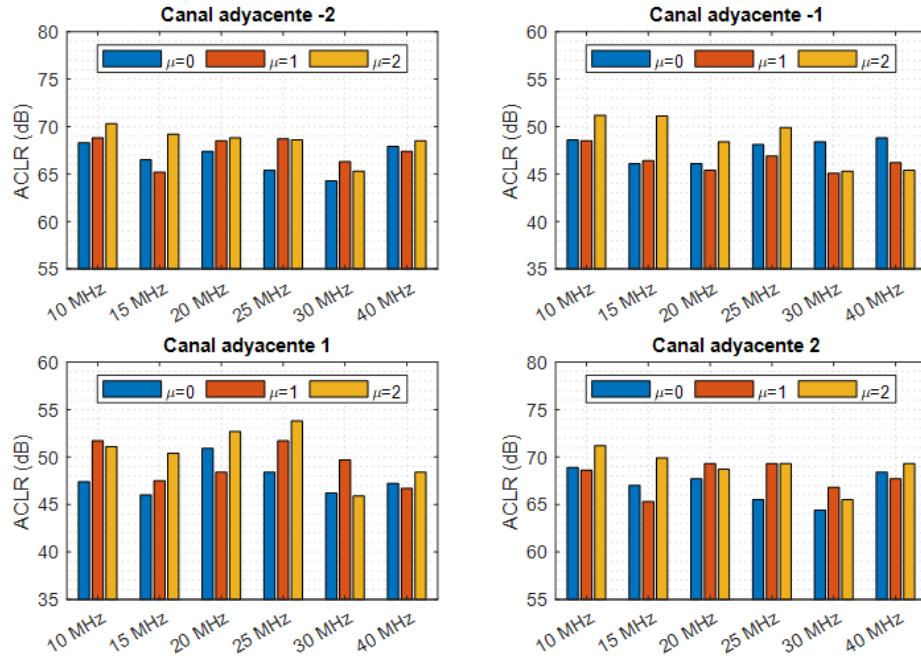


Figura B.9: ACLR al cambiar numerología y ancho de banda usando el modelo de test NR-FR1-TM3.2 y un modelado de amplificador con memoria de 1.

B.8. Escenario 8: Simulación de modelos de canal

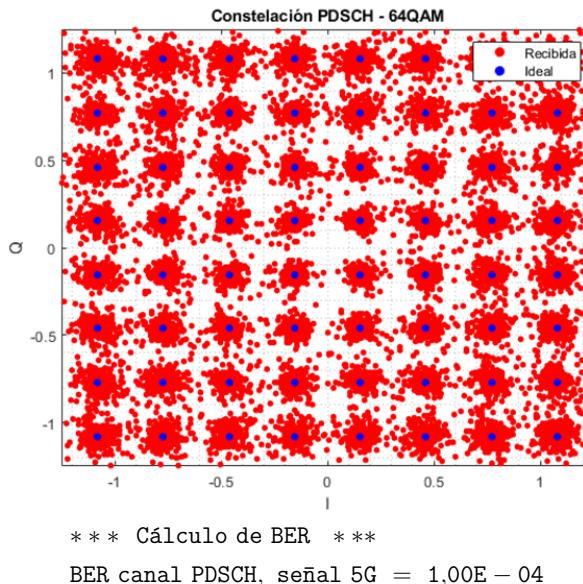


Figura B.10: Constelación recibida para una transmisión a través de un modelo de canal ETU con frecuencia Doppler máxima de 70 Hz y utilizando modulación 64-QAM (arriba). Resultados de BER obtenidos para dicha transmisión (abajo).

Anexo C

Códigos de MATLAB[®]

En el presente anexo, C, se recoge una parte del código desarrollado en el entorno MATLAB[®] para la obtención de los resultados recogidos en este TFG. Este código desarrollado para simulador constituye, además, un segundo resultado fundamental del TFG, ya que puede ser especialmente útil para trabajos futuros.

Por un lado, se recogen primero las funciones auxiliares llamadas por los simuladores. Son las siguientes:

1. calcPRB.m
2. calPAMPM.m
3. calPAPM.m
4. correctoNBIoT.m
5. corrPow.m
6. corrPow2.m
7. generateNBIoT.m
8. matrix_data_pseudoM.m
9. trainKDriver.m
10. trainPM.m
11. trainMPM.m
12. trainPDPM.m
13. trainPDMPM.m

Y, por otro, una estructura del código de los dos simuladores. No se incluye en este caso la totalidad del código porque alargaría excesiva e innecesariamente la memoria.

13. DLSimulator.m

14. DL_5GNR_Simulator.m

Además, se utilizan una serie de funciones de MATLAB® ligeramente modificadas para adaptarlas a nuestros supuestos. Estas pueden ser consultadas junto con el código completo.

El código utilizado es el siguiente:

1. Función: calcPRB.m

```

1 % Hace el parsing de la cadena introducida por el usuario indicando los
2 % PRBs a utilizar y comprueba que los valores introducidos son correctos
3 %
4 % [PRB,correcto] = calcPRB(input,nRB,link,prbsIot)
5 % Parámetros de ENTRADA:
6 % - input: Cadena introducida por el usuario
7 % - nRB: Número de bloques de recursos para los que se configura en enlace
8 % - link: Indica si se trata de enlace ascendente 'UL' o descendente 'DL'
9 % - prbsIot: Indica los PRBs asignados para transmitir señales NB-Iot y que
10 % no podrán rellenarse
11 %
12 % Parámetros de Salida
13 % - PRB: String con los PRBs que se van a usar
14 % - correcto: Indica si el resultado de la asignación es correcto o no
15 %
16
17 function [PRB,correcto] = calcPRB(varargin)
18
19 % Obtener algunos parámetros de entrada
20 a = cell2mat(varargin(2));
21 b = nargin;
22 PRB = [];
23 correcto = true;
24 cad = char(strsplit(char(varargin(1)),','));
25 nprb = cell2mat(varargin(2));
26 [n,m] = size(cad);
27
28 if(strcmp(char(varargin(3)), 'DL')) % Calculo para el DL
29 % Obtenemos PRBs usados por señales IoT
30 prbIot = cell2mat(varargin(4));
31
32 % Realizamos el parsing de la cadena introducida por el usuario
33 % para obtener los numeros de PRB utilizados
34 for j=1:n
35 if(strfind(strrep(cad(j,:),' ','-'),'-'))
36 aux = strsplit(char(cad(j,:)),'-');
37 PRB = [PRB str2num(char(aux(1))):str2num(char(aux(2)))];
38 else
39 PRB = [PRB str2num(char(cad(j,:)))];
40 end
41 end
42
43 % Comprobamos que los PRBs son correctos
44 if(~isempty(PRB))
45 if(max(PRB)>=nprbmin(PRB)<0)
46 correcto = false;
47 end
48 if(~isempty(prbIot))
49 for ii=1:length(prbIot)
50 if(PRB(PRB==prbIot(ii)))
51 correcto = false;
52 break
53 end
54 end
55 end

```

```

57 elseif(strcmp(char(varargin(3)), 'UL'))
58     for j=1:n
59         slotsLim = cell2struct(varargin(4), 'aux');
60         slotsLim = slotsLim.aux;
61         iniSlot1 = slotsLim.ini1
62         finSlot1 = slotsLim.fin1
63         iniSlot2 = slotsLim.ini2
64         finSlot2 = slotsLim.fin2
65
66     if(strfind(strrep(cad(j,:),' ',' ','-'))
67         aux = strspli(cad(j,:));
68         aux2 = [iniSlot1+str2num(char(aux(1))) : iniSlot1+str2num(char(aux(2)));
69         iniSlot2+str2num(char(aux(1))) : iniSlot2+str2num(char(aux(2))]];
70         PRB = [PRB aux2];
71     else
72         aux = [iniSlot1 + str2num(char(cad(j,:)));
73                 iniSlot2 + str2num(char(cad(j,:))]];
74         PRB = [PRB aux];
75     end
76 end
77
78 if(~isempty(PRB))
79     if( (max(PRB(1,:)) > (nprb-finSlot1)) (max(PRB(2,:)) > (nprb-finSlot2)) ...
80         (min(PRB(1,:)) < iniSlot1) (min(PRB(1,:)) > iniSlot2) )
81         correcto = false;
82     end
83 end
84 PRB = PRB';
85 end

```

2. Función: calPAMPM.m

```

1 % Calcula la salida de aplicar un modelo polinomial con memoria
2 %
3 % [y_est] = calPAMPM(buffin,memoria,a)
4 % Parámetros de ENTRADA:
5 % - buffin: señal de entrada
6 % - memoria: memoria del modelo (1 es sin memoria)
7 % - a: coeficientes del modelo
8 % Parámetros de SALIDA:
9 % - y_est: señal tras aplicar el modelo
10
11 function y_est = calPAMPM(buffin,memoria,a)
12     % Calculamos el orden del modelo
13     orden = length(a)/memoria;
14
15     % Ponemos la señal de entrada en formato matricial, segun lo
16     % especificado en la teoria
17     espacio = matrix_data_pseudoM_v(buffin,orden,memoria);
18
19     % Calculamos la señal de salida
20     y_est = espacio*a;
21
22 end

```

3. Función: calPAPM.m

```

1 % Calcula la salida de aplicar un modelo polinomial sin memoria
2 %
3 % [y_est] = calPAPM(sigin,a)
4 % Parámetros de ENTRADA:
5 % - signin: señal de entrada
6 % - a: coeficientes del modelo
7 % Parámetros de SALIDA:

```

```

8 % - y_est: señal tras aplicar el modelo
9
10 function sigout = calPAPM(sigin,a)
11 % Aplicamos ecuación del modelo
12 sigout = sign.*polyval(flip(a),abs(sign));
13 end

```

4. Función: correctoNB IoT.m

```

1 % Hace el parsing de la cadena introducida por el usuario indicando la
2 % posición de los canales de NB-IoT y comprueba que es correcta.
3 %
4 % [correcto, pos] = correctoNB IoT(type, input, NDLRB, prbsUsed, varargin)
5 % Parámetros de ENTRADA:
6 % - type: Indica si se está trabajando en modo en banda 'In-band' o en
7 % banda de guarda 'GuardBand'
8 % - input: Cadena introducida por el usuario indicando la posición de
9 % los canales de NB-IoT
10 % - NDLRB: Número de bloques de recursos para los que se ha configurado
11 % el enlace
12 % - prbsUsed: PRBs usados en la señal de banda ancha, los cuales no
13 % podrán ser asignados al canal de IoT
14 % - varargin: Permite discriminar si estamos en la banda de guarda
15 % superior o inferior en el caso de IoT en banda de guarda
16 % Parámetros de SALIDA:
17 % - correcto: Indica si la cadena introducida por el usuario es o no
18 % correcta
19 % - pos: Recoge las subportadoras en las que se transmitiría el canal y
20 % los PRBs a los que corresponden en el caso de transmisión en
21 % banda.
22
23 function [correcto, pos] = correctoNB IoT(type, input, NDLRB, prbsUsed, varargin)
24
25 % Definimos algunos parámetros
26 pos = [];
27 correcto = true;
28
29 % numero máximo de canales por banda de guarda y posicion (en subportadoras)
30 NB_IoT_GB = struct();
31 NB_IoT_GB.RB25 = struct('nChan', 1, 'LowGB', 100, 'HighGB', 412);
32 NB_IoT_GB.RB50 = struct('nChan', 2, 'LowGB', 206, 'HighGB', 818);
33 NB_IoT_GB.RB75 = struct('nChan', 4, 'LowGB', 568, 'HighGB', 1480);
34 NB_IoT_GB.RB100 = struct('nChan', 5, 'LowGB', 418, 'HighGB', 1630);
35
36 % limites de la banda (en subportadoras) y prbs utilizables para señales IoT
37 NB_IoT_IB = struct();
38 NB_IoT_IB.RB15 = struct('limInf', 39, 'prb', [2 12]);
39 NB_IoT_IB.RB25 = struct('limInf', 107, 'prb', [2 7 17 22]);
40 NB_IoT_IB.RB50 = struct('limInf', 213, 'prb', [4 9 14 19 30 35 40 45]);
41 NB_IoT_IB.RB75 = struct('limInf', 575, 'prb', ...
42 [2 7 12 17 22 27 32 42 47 52 57 62 67 72]);
43 NB_IoT_IB.RB100 = struct('limInf', 425, 'prb', ...
44 [4 9 14 19 24 29 34 39 44 55 60 65 70 75 80 85 90 95]);
45
46 if(strcmp(type,'GuardBand')) %Guardband
47 % Obtenemos la información necesaria
48 info = NB_IoT_GB.(strcat('RB',num2str(NDLRB)));
49
50 % Error si se quieren introducir más canales de los permitidos
51 if(input>info.nChan)
52 correcto = false;
53 end
54
55 % Calculamos la posición (en subportadoras) que ocuparían los
56 % canales en banda de guarda
57 if(correcto)
58 if(~isempty(input))
59 if(~varargin{1})

```

```

60         % Si el argumento adicional es un 0 estamos en la banda de
61         % guarda inferior
62         pos.subcarriers = info.LowGB-12*(input-1): 12: info.LowGB;
63     else
64         % Si el argumento adicional es un 1 estamos en la banda de
65         % guarda superior
66         pos.subcarriers = info.HighGB : 12 : info.HighGB+12*(input-1);
67     end
68 end
69 end
70
71 else %Inband
72     correcto_aux = true;
73
74     % Obtenemos la informacion necesaria
75     info = NB_IoT_IB.(strcat('RB',num2str(NDLRB)));
76     prbs = info.prbs;
77
78     % Ordenamos los prbs introducidos por el usuario
79     prbs_iot = unique(str2num(char(split(char((input)),','))));
```

80

```

81     % Comprobamos que son correctos, viendo que todos los prbs
82     % introducidos están entre los permitidos
83     for ii = 1:length(prbs_iot)
84         correcto_aux = correcto_aux && ismember(prbs_iot(ii),prbs);
85     end
86     correcto = correcto_aux;
87
88     % En caso de que lo anterior sea válido, comprobar que los prbs no
89     % están siendo utilizados para transmitir datos
90     if(correcto)
91         for i = 1:10
92             auxUsed = prbsUsed.(['st' num2str(i)]);
93             contain = ismember(prbs_iot, auxUsed);
94             if(contain)
95                 correcto = false;
96                 break
97             end
98         end
99     end
100
101     % Si se han pasado todas las comprobaciones guardar las posiciones,
102     % tanto en prb como en subportadoras
103     if(correcto)
104         pos.subcarriers = info.limInf + 5 + prbs_iot*12;
105         pos.prb = prbs_iot;
106     end
107
108 end
109
110 end

```

5. Función: corrPow.m

```

1 % Corrige en recepción las diferencias de potencia entre prbs y pilotos introducidas
2 % en transmisión para evaluar el comportamiento del amplificador.
3 % Función adaptada para su llamada directamente desde la demodulación hecha
4 % en el simulador. (Recibe como entrada la señal completa)
5 %
6 % [rxGridLTE]=corrPow(enb, rxGridLTE,powerFactor_pilots,powerFactor_PRBs,indices,nTramas)
7 % Parámetros de ENTRADA:
8 %   - enb: Parametros del enodeB.
9 %   - rxGridLTE: grid de la señal de banda ancha recibido.
10 %   - powerFactor_pilots: potencias relativas aplicadas a los pilotos
11 %   - powerFactor_PRBs: potencias relativas aplicadas a los PRBs
12 %   - indices: indices de cada uno de los canales que forman la señal
13 %   - nTramas: número de tramas de las que consta la señal
14 % Parámetros de SALIDA:
```

```

15 % - rxGridLTE: grid de la señal de banda ancha con las diferencias de
16 % potencia introducidas en transmisión corregidas.
17
18
19 function [rxGridLTEcorr] = corrPow(enb, rxGridLTE,powerFactor_pilots, ...
20                                 powerFactor_PRBs,indices,nTramas)
21     % Ver si tenemos prefijo normal o extendido
22     u = 7*2;
23     if(strcmp(enb.CyclicPrefix,'Extended'))
24         u = 6*2;
25     end
26
27     % Calcular tamaños (total y por subtrama)
28     [a,b] = size(rxGridLTE);
29     tamMax = a*b;
30     tamSf = a*u;
31
32     corr = 1;
33     rxGridLTEcorr = [];
34     % Recorrer cada trama y subtrama y realizar la corrección
35     for ii =1:nTramas
36         for jj=0:9
37
38             fin = corr+u-1;
39             if(fin
40                 sfGrid = rxGridLTE(:,corr:fin);
41             else
42                 sfGrid = rxGridLTE(:,corr:end);
43             end
44             nSubframe_str = strcat('Subframe',num2str(jj));
45             indsAnt0 = indices.(nSubframe_str).ant0;
46             indsAnt0(indsAnt0>fin*a) = [];
47
48             % Obtenemos los indices de cada canal en cada subtrama
49             [mm,nn] = size(sfGrid);
50             powF = powerFactor_PRBs.(strcat('st',num2str(jj+1)));
51             powF = repmat(powF,12,1);
52             powF = reshape(powF,[mm,1]);
53             powF = repmat(powF,1,nn);
54             powF(indsAnt0) = powerFactor_pilots.(['st' num2str(jj+1)]);
55
56             rxGridLTEcorr = [rxGridLTEcorr sfGrid./powF];
57
58             % Añadir el offset del tamaño de una subtrama para actualizar
59             % los índices. (Los índices recogidos en la estructura indices
60             % no son absolutos, si no relativos para cada subtrama).
61             corr = corr + u;
62
63         end
64     end
65 end

```

6. Función: corrPow2.m

```

1 % Corrige en recepción las diferencias de potencia entre prbs y pilotos introducidas
2 % en transmisión para evaluar el comportamiento del amplificador.
3 % Función adaptada para su llamada desde la función de matlab que demodula y calcula
4 % las medidas de EVM. (Recibe como entrada sólo una subtrama)
5 %
6 % [rxGridLTE] = corrPow(enb, rxGridLTE,powerFactor_pilots,powerFactor_PRBs,indices,nTramas)
7 % Parámetros de ENTRADA:
8 % - rxGridLTE: grid de la señal de banda ancha recibido.
9 % - powerFactor_pilots: potencias relativas aplicadas a los pilotos
10 % - powerFactor_PRBs: potencias relativas aplicadas a los PRBs
11 % - indices: indices de cada uno de los canales que forman la señal
12 % - jj: número de subtrama en la que nos encontramos
13 % Parámetros de SALIDA:
14 % - rxGridLTE: grid de una subtrama la señal de banda ancha con las diferencias de

```

```

15 %      potencia introducidas en transmisión corregidas.
16
17
18 function [rxGridLTEcorr] = corrPow2(rxGridLTE,powerFactor_pilots,powerFactor_PRBs,indices,jj)
19 % Calcular tamaño de la matriz-subtrama
20 [a,b] = size(rxGridLTE);
21
22 % Obtenemos los indices de cada canal en la subtrama
23 nSubframe_str = strcat('Subframe',num2str(jj));
24 indsAnt0 = indices.(nSubframe_str).ant0;
25
26 % Obtenemos los indices de cada canal en cada subtrama
27 powF = powerFactor_PRBs.(strcat('st',num2str(jj+1)));
28 powF = repmat(powF,12,1);
29 powF = reshape(powF,[a,1]);
30 powF = repmat(powF,1,b);
31 powF(indsAnt0) = powerFactor_pilots.(['st' num2str(jj+1)]);
32
33 rxGridLTEcorr = rxGridLTE./powF;
34
end

```

7. Función: generateNB IoT.m

```

1 % A partir de la información de posición, número de tramas y configuración
2 % del enlace, genera las formas de onda de los canales NB-IoT
3 %
4 % [txWaveform, grid, gridMask, info, ngend] = generateNB IoT (position, pos,nFrames, ...
5 %           RB, offsetInf, offsetSup)
6 %
7 % Parámetros de ENTRADA:
8 %   - position: Modo de operación en banda o en banda de guarda
9 %   - pos: Indica las subportadoras en las que se sitúa el canal de
10 %         NB-IoT, y los PRBs en el caso de modo de operación en banda.
11 %   - nFrames: Número de tramas a generar
12 %   - RB: Número de bloques de recursos para los que está configurado el
13 %         enlace
14 %   - offsetInf: Permite controlar la posición de los canales de la
15 %         banda de guarda inferior mediante un offset.
16 %   - offsetSup: Permite controlar la posición de los canales de la
17 %         banda de guarda superior mediante un offset.
18 %
19 % Parámetros de SALIDA:
20 %   - txWaveform: Forma de onda correspondiente al canal generado
21 %   - grid: Matriz de recursos de dos subtramas del canal
22 %   - gridMask: Máscara que indica las posiciones del canal dentro de la
23 %             matriz global.
24 %   - info: Estructura con información acerca de la modulación
25 %   - ngend: Objeto que recoge toda la información de los generadores de
26 %             los canales NB-IoT
27 %
28 %
29 % NOTA: Se podría configurar cómo se llena la subtrama de NB-IoT, pero por
30 % simplicidad, se ha elegido una configuración fija, ya que la influencia
31 % que tendría en los resultados sería mínima.
32 %
33 function [txWaveform,grid,gridMask,info,ngend] = generateNB IoT(position, pos, nFrames, ...
34 %           RB, offsetInf, offsetSup)
35 %
36 % Definimos tamaños de fft
37 NB_IoTnFFT = struct('RB15', 256, 'RB25', 512, 'RB50', 1024, 'RB75', 2048, ...
38 %           'RB100', 2048);
39 %
40 % Las tramas de IoT se generan de dos en dos, si el numero de tramas a
41 % generar es impar, generar una más
42 nFramesAux = nFrames;
43 if(rem(nFrames,2)==1)
44     nFramesAux = nFrames+1;
45 end

```

```

46 % Definimos el grid y el objeto para generar la señal
47 grid = zeros(NB_IoTnFFT.(['RB' num2str(RB)]),nFramesAux*140);
48 gridMask = grid;
49 ngen = NB IoT DownlinkWaveformGenerator_V;
50
51 % Definimos el tipo de canal, si es in-band elegimos una 'Anchor' y el
52 % resto 'NonAnchor', si es guardband, todas 'NonAnchor'
53 if(strcmp(position,'GuardBand'))
54     ngen.Config.CarrierType = 'NonAnchor';
55 else
56     ngen.Config.CarrierType = 'Anchor';
57 end
58
59 % Definir todos los parámetros del objeto generador
60 ngen.Config.OperationMode = position;
61 ngen.Config.DownlinkBitmap = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; %Subframes used
62 ngen.Config.TotSubframes = nFramesAux*10;
63
64 % Configure the parameters of the first NPDCCH
65 npdcch1.Enable = 'On';
66 npdcch1.Power = 0;
67 npdcch1.NCCE = 1; % NPDCCH format 0 with NCCE 1
68 npdcch1.NRep = 6;
69 npdcch1.Rmax = 16;
70 npdcch1.RNTI = 0;
71 npdcch1.StartSubframe = 0;
72 npdcch1.DataBlkSize = 23;
73 npdcch1.DataSource = randi([0 1],npdcch1.DataBlkSize,1);
74
75 % Configure the parameters of the second NPDCCH
76 npdcch2.Enable = 'On';
77 npdcch2.Power = 0;
78 npdcch2.NCCE = 0; % NPDCCH format 0 with NCCE 0
79 npdcch2.NRep = 6;
80 npdcch2.Rmax = 16;
81 npdcch2.RNTI = 1;
82 npdcch2.StartSubframe = 0;
83 npdcch2.DataBlkSize = 23;
84 npdcch2.DataSource = randi([0 1],npdcch2.DataBlkSize,1);
85
86 % Configure the parameters of the first NPDSCH
87 npdsch1.Enable = 'On';
88 npdsch1.Power = 0;
89 npdsch1.NPDSCHDataType = 'BCCHNotSIB1NB';
90 npdsch1.NSF = 2;
91 npdsch1.NRep = 4;
92 npdsch1.Rmax = npdcch1.Rmax;
93 npdsch1.RNTI = 0;
94 npdsch1.StartSubframe = 10;
95 npdsch1.DataBlkSize = 616;
96 npdsch1.DataSource = randi([0 1],npdsch1.DataBlkSize,1);
97
98 % Configure the parameters of the second NPDSCH
99 npdsch2.Enable = 'On';
100 npdsch2.Power = 0;
101 npdsch2.NPDSCHDataType = 'NotBCCH';
102 npdsch2.NSF = 2;
103 npdsch2.NRep = 7;
104 npdsch2.Rmax = npdcch2.Rmax;
105 npdsch2.RNTI = 1;
106 npdsch2.StartSubframe = 20;
107 npdsch2.DataBlkSize = 616;
108 npdsch2.DataSource = randi([0 1],npdsch2.DataBlkSize,1);
109
110 for i=1:length(pos.subcarriers)
111     if(strcmp(ngen.Config.CarrierType , 'Anchor'))
112         if(strcmp(ngen.Config.OperationMode, 'Guardband'))
113             npdcch1.NRep = 6;
114             npdcch2.NRep = 6;
115             npdsch1.NRep = 4;
116             npdsch2.NRep = 6;

```

```

117     else
118         npdcch1.NRep = 6;
119         npdcch1.NRep = 6;
120         npdsch1.NRep = 4;
121         npdsch2.NRep = 3;
122     end
123 else
124     if(strcmp(ngen.Config.OperationMode, 'Guardband'))
125         npdcch1.NRep = 10;
126         npdcch2.NRep = 10;
127         npdsch1.NRep = 5;
128         npdsch2.NRep = 8;
129     else
130         npdcch1.NRep = 10;
131         npdcch2.NRep = 10;
132         npdsch1.NRep = 5;
133         npdsch2.NRep = 7;
134     end
135
136 end
137
138
139 % Prepare NPDSCH and NPDCCH structure vectors
140 ngen.Config.NPDCCH = [npdcch1 npdcch2];
141 ngen.Config.NPDSCH = [npdsch1 npdsch2];
142
143 % Generar grid
144 [grid_aux,sftypes] = ngen.generateGrid;
145
146 % Ver si tenemos que aplicar el offset superior o el inferior
147 % dependiendo de en qué banda nos encontramos
148 if(pos.subcarriers(i)>size(grid_aux)/2)
149     offset = offsetSup;
150 else
151     offset = offsetInf;
152 end
153
154 % Colocar los grid generados en el lugar que corresponde en el grid
155 % global
156 grid(pos.subcarriers(i)-6+1+offset:pos.subcarriers(i)+6+offset,:) = grid_aux;
157 gridMask(pos.subcarriers(i)-6+1+offset:pos.subcarriers(i)+6+offset,:) = ...
158     ones(size(grid_aux));
159
160
161 % Guardar el objeto generador y las posiciones en la estructura
162 % ngend.
163 if(strcmp(position,'Inband-SamePCI'))
164     if(strcmp(ngen.Config.CarrierType,'Anchor'))
165         ngend.Anchor = ngen;
166         ngend.Anchor.Config.prb = pos.prb(1);
167     else
168         ngend.NonAnchor = ngen;
169         ngend.NonAnchor.Config.prb = pos.prb(2:end);
170     end
171 else
172     ngend.NonAnchor = ngen;
173 end
174
175
176 % Cambiar los canales que no son el primero a NonAnchor
177 ngen.Config.CarrierType = 'NonAnchor';
178 end
179
180 % Si el número de tramas a generar era impar, eliminar la última
181 if(rem(nFrames,2)==1)
182     grid = grid(:,1:end-140);
183     gridMask = gridMask(:,1:end-140);
184 end
185
186 % Modular y generar la señal en tiempo
187 enb = ngen.Config;

```

```

188 enb.CyclicPrefixUL = 'Normal';
189
190 if(~isfield(enb,'Windowing'))
191 enb.Windowing = 6;
192 end
193
194 if(strcmp(position,'Inband-SamePCI'))
195 aux = (NB_IoTnFFT.(['RB' num2str(RB)])- RB*12)/2+1;
196 grid = grid(aux:aux+RB*12-1,:);
197 gridMask = gridMask(aux:aux+RB*12-1,:);
198
199 end
200
201 [txWaveform,info] = lteOFDMModulate(enb,grid,6);
202 info.SubframeChannelTypes = sftypes;
203 end

```

8. Función: matrix_data_pseudoM.m

```

1 % Permite calcular la matriz necesaria para aplicar el modelo polinomial
2 % con memoria a partir de la señal de entrada y los parámetros del modelo.
3 %
4 %
5 % [ U ] = matrix_data_pseudoM_v(sigin,orden,memoria)
6 % Parámetros de ENTRADA:
7 % - signin: señal de entrada
8 % - orden: orden del modelo
9 % - memoria: memoria del modelo
10 % Parámetros de SALIDA:
11 % - U: Señal de entrada en formato matricial.
12 %
13
14 function [ U ] = matrix_data_pseudoM(sigin,orden,memoria)
15 % Definimos los parametros
16 M = memoria;
17 N = orden;
18 long = length(sigin);
19 U = zeros(length(sigin),M*N); % Señal de entrada en forma matricial
20 aux = zeros(long,M); % Submatriz con los valores de x(n-m)
21
22 % Hacemos un padding al inicio de la señal de entrada para que poder
23 % tener memoria en las primeras muestras
24 auxsig = [zeros(M,1); signin];
25
26 % Rellenamos los valores de x(n-m)
27 for ii=0:M-1
28     aux(:,ii+1) = auxsig(M-ii+1:M-ii+long);
29 end
30
31 % Calculamos los valores Xk y los ponemos en la matriz U
32 for ii=1:N
33     U(:,M*(ii-1)+1:M*(ii-1)+M) = aux.*abs(aux).^(ii-1);
34 end
35
36 end

```

9. Función: trainKDriver.m

```

1 % Calcula el factor de ganancia k del driver para poner al amplificador en
2 % el punto de trabajo que queremos
3 %
4 %
5 % [k] = trainKDriver (sigin)
6 % Parámetros de ENTRADA:
7 % - signin: Señal de entrada de referencia al sistema no lineal que se
8 % quiere modelar

```

```

9  % Parámetros de SALIDA:
10 % - k: factor de ganancia a aplicar a la señal generada si se ocupara
11 % todo el ancho de banda del sistema para que sea de la misma
12 % potencia que la señal de referencia
13 %
14
15 function [k] = trainKDriver(sigin)
16     % Definimos parámetros
17     k = struct('RB6',[],'RB15',[],'RB25',[],'RB50',[],'RB75',[],'RB100',[]);
18     RB = [6 15 25 50 75 100];
19     rc = {'R.4' 'R.5' 'R.6' 'R.7' 'R.8' 'R.9'};
20     Pin = potenciade(reshape(sigin,1,length(sigin)));
21
22     % Para cada ancho de banda, calculamos el factor k
23     for i=1:6
24         rmc = lteRMCDL(rc{i});
25         [stx,~,~]=lteRMCDLTool(rmc,[1;0;0;1]);
26         [~,ki] = ajustapotencia(reshape(stx,1,length(stx)),Pin);
27
28         k.(['RB' num2str(RB(i))]) = ki;
29
30     end
31 end

```

10. Función: trainPM.m

```

1 % Calcula el modelo del amplificador usando un modelo polinomial con
2 % memoria.
3 %
4 % [a,error,y_est] = trainMPM (sigin,sigout,orden,memoria,vis)
5 % Parámetros de ENTRADA:
6 % - signin: Señal de entrada de entrenamiento
7 % - sigout: Señal de salida de entrenamiento
8 % - orden: Orden del modelo
9 % - memoria: Memoria del modelo (1 es sin memoria)
10 % - vis: Permite visualizar el resultado (1) o no (0)
11 % Parámetros de SALIDA:
12 % - a: Coeficientes del modelo
13 % - error: Error cometido en la estimación de la señal de salida
14 % - y_est: Señal de salida estimada con el modelo calculado
15
16 function [a,error,y_est] = trainMPM(sigin,sigout,orden,memoria,vis)
17     % Ponemos la señal de entrada en formato matricial
18     espacio = matrix_data_pseudoM_v(sigin,orden,memoria);
19
20     % Calculamos los coeficientes del modelo
21     a = pinv(espacio)*sigout;
22     y_est = espacio*a;
23
24     % Visualización del resultado del modelado
25     if(vis)
26         figure, scatter(abs(sigin),abs(sigout),'.');
27         hold on, scatter(abs(sigin),abs(y_est),'k','.');
28     end
29
30     % Calculamos el error en la estimación
31     error = 10*log10(mean(abs(sigout-y_est).^2)/mean(abs(sigout).^2));
32
33 end

```

11. Función: trainMPM.m

```

1 % Calcula el modelo predistorsionador del modelo polinomial con memoria.
2 %

```

```

3    % [b,error2,y_DPD,Gcas,u,v] = trainPDMPM (sigin, sigout, orden, memoria, FactorG, vis)
4    % Parámetros de ENTRADA:
5    % - sigin: Señal de entrada de entrenamiento
6    % - sigout: Señal de salida de entrenamiento
7    % - orden: Orden del modelo
8    % - memoria: Memoria del modelo (1 es sin memoria)
9    % - FactorG: Factor de ganancia
10   % - vis: Permite visualizar el resultado del modelado (1) o no (0)
11   % Parámetros de SALIDA:
12   % - b: Coeficientes del modelo
13   % - error2: Error cometido
14   % - y_DPD: Señal de salida predistorsionada estimada
15   % - Gcas: Ganancia obtenida
16   % - u: Señal de entrada
17   % - v: Señal de salida normalizada por la ganancia
18
19 function [b,error2,y_DPD,Gcas,u,v] = trainPDMPM(sigin,sigout,orden,memoria,FactorG,vis)
20 % Estimamos la ganancia promedio
21 Glina=mean(abs(sigout./sigin));
22 Glinp=mean(angle(sigout./sigin));
23 Glin=Glina*exp(j*Glinp);
24 Gcas=FactorG*Glin;
25
26 fprintf('Ganancia sin linealización: %0.2f dB \n', 20*log10(Glina));
27 fprintf('Ganancia con linealización: %0.2f dB \n', 20*log10(Gcas));
28 fprintf('Diferencia de ganancia: %0.2f dB \n', 20*log10(Gcas/Glina));
29
30 % Cambiamos las señales y calculamos el modelo
31 v=sigin;
32 u=sigout/Gcas;
33 [b,error2,y_DPD]=trainMPM_v(u,v,orden,memoria,vis);
34
35 end

```

12. Función: trainPDPM.m

```

1 % Calcula el modelo predistorsionador del modelo polinomial sin memoria.
2 %
3 % [b,error2,y_DPD,Gcas,u,v] = trainPDPM(sigin, sigout, orden, FactorG, vis)
4 % Parámetros de ENTRADA:
5 % - sigin: Señal de entrada de entrenamiento
6 % - sigout: Señal de salida de entrenamiento
7 % - orden: Orden del modelo
8 % - FactorG: Factor de ganancia
9 % - vis: Permite visualizar el resultado del modelado (1) o no (0)
10 % Parámetros de SALIDA:
11 % - b: Coeficientes del modelo
12 % - error2: Error cometido
13 % - y_DPD: Señal de salida predistorsionada estimada
14 % - Gcas: Ganancia obtenida
15 % - u: Señal de entrada
16 % - v: Señal de salida normalizada por la ganancia
17
18 function [b,error2,y_DPD,Gcas,u,v] = trainPDPM( sigin,sigout, orden,FactorG, vis )
19 % Estimamos la ganancia promedio
20 Glina=mean(abs(sigout./sigin));
21 Glinp=mean(angle(sigout./sigin));
22 Glin=Glina*exp(j*Glinp);
23 Gcas=FactorG*Glin;
24
25 fprintf('Ganancia sin linealización: %0.2f dB \n', 20*log10(Glina));
26 fprintf('Ganancia con linealización: %0.2f dB \n', 20*log10(Gcas));
27 fprintf('Diferencia de ganancia: %0.2f dB \n', 20*log10(Gcas/Glina));
28
29 % Cambiamos las señales y calculamos el modelo
30 v=sigin;
31 u=sigout/Gcas;
32 [b,error2,y_DPD]=trainPM_v(u,v,orden,vis);

```

```
33 | end
```

13. Función: trainPDMPM.m

```
1 % Calcula el modelo del amplificador usando un modelo polinomial con
2 % memoria.
3 %
4 % [a,error,y_est] = trainPM (sigin,sigout,orden,memoria,vis)
5 % Parámetros de ENTRADA:
6 %     - signin: Señal de entrada de entrenamiento
7 %     - sigout: Señal de salida de entrenamiento
8 %     - orden: Orden del modelo
9 %     - vis: Permite visualizar el resultado (1) o no (0)
10 % Parámetros de SALIDA:
11 %     - a: Coeficientes del modelo
12 %     - error: Error cometido en la estimación de la señal de salida
13 %     - y_est: Señal de salida estimada con el modelo calculado
14
15
16 function [a, error,y_est ] = trainPM(sigin,sigout,orden,vis )
17 % Ponemos la señal de entrada en formato matricial. La matriz tendrá k
18 % columnas, y en cada una de ellas tendremos signin.*abs(signin).^k
19 ex = 0:orden-1;
20 X = signin.*abs(signin).^ex;
21
22 % Calculamos los coeficientes del modelo
23 a = pinv(X)*sigout;
24 y_est = X*a;
25
26 % Visualizamos el resultado del modelo
27 if (vis)
28     figure, scatter(abs(signin),abs(sigout));
29     hold on, scatter(abs(signin),abs(y_est),'k');
30 end
31
32 % Calculamos el error cometido
33 error = 10*log10(mean(abs(sigout-y_est).^2)/mean(abs(sigout).^2));
34
35 end
```

14. Función: DLSimulator.m

```
1 close all,
2 dlSimulator();
3
4 function dlSimulator ()
5
6 % Ajuste del path, declaracion de variables y de la interfaz
7 ...
8
9 % Definicion de menus
10 function men5G_Callback(src,event)
11     % Menu de ayuda acerca de las posibilidades de generacion de la señal
12     % de banda ancha 5G
13     ...
14
15 function menIoT_Callback(src,event)
16     % Menu de ayuda acerca de la generacion de la señal de banda estrecha
17     % NB-IoT y de las posibilidades permitidas
18     ...
19
20 function menAmp_Callback(src,event)
21     % Menu de ayuda acerca de los modelos de amplificador disponibles en
```

```

400      % el simulador
401      ...
447      function menCan_Callback(src,event)
448          % Menu de ayuda acerca de los modelos de canal disponibles para simular
449          % una transmision real completa
450          ...
451
452      function menRepr_Callback(src,event)
453          % Menu con la informacion acerca de las representaciones y resultados
454          % ofrecidos al usuario
455          ...
456
457      function Modes_Callback(src,event)
458          % Menu que recoge la ayuda sobre los modos de funcionamiento del simulador
459          % y los objetivos de cada uno
460          ...
461
462      function NoLin_Callback(src,event)
463          % Menu que recoge la ayuda sobre el modelado de los elementos no lineales
464          ...
465
466      function CloseMen_Callback(source,fig)
467          % Funcion para cerrar las ventanas de los menus
468          ...
469
470      function Preferencias_Callback(src,event)
471          % Ventana que permite seleccionar el modo de trabajo del simulador
472          ...
473
474      function trainSignals_Callback(src,event)
475          % Ventana que permite cambiar las señales utilizadas para el modelado
476          % de los elementos no lineales
477          ...
478
479
480          % Definir configuracion por defecto del transmisor
481          ...
482
483      function nFrames_Callback(source,eventdata)
484          % Funcion que gestiona el cambio en el numero de tramas
485          ...
486
487      function nBlocks_Callback(source,eventdata)
488          % Funcion que gestiona cambios en la configuracion de ancho de banda del
489          % sistema
490          ...
491
492      function nBlocksUsed_Callback (source,eventdata)
493          % Funcion que gestiona los cambios en el numero de bloques usados, en el modo
494          % de configuracion no avanzado
495          ...
496
497      function nBlocksUsedAdv_Callback (source,eventdata)
498          % Funcion que gestiona cambios en el numero de bloques usados en el modo
499          % avanzado
500          ...
501
502      function cpLength_Callback (source,eventdata)
503          % Funcion que gestiona los cambios en el prefijo ciclico
504          ...
505
506      function Modulation_Callback(source,eventdata)
507          % Funcion que permite los cambios en la modulacion utilizada para el canal de
508          % datos
509          ...
510
511      function PilotsPow_Callback(source,eventdata)
512          % Funcion que gestiona cambios en la potencia de las señales piloto, en el modo
513          % de configuracion no avanzado
514

```

```

1045      ...
1057      function PilotsPowAdv_Callback(source,eventdata)
1058          % Funcion que gestiona cambios en la potencia de las señales piloto, en el modo
1059          % de configuracion avanzado
1060      ...
1061
1150      function PRBsPowAdv_Callback(source,eventdata)
1151          % Funcion que permite ajustar la potencia de los PRBs transmitidos
1152      ...
1153
1260      function NB_Iot_Callback(source,eventdata)
1261          % Funcion para generar e integrar las señales NB-IoT
1262      ...
1263
1617      function NB_Iot_Del_Callback(source,eventdata)
1618          % Funcion para borrar las señales NB-IoT generadas
1619      ...
1620
1624      function ModAmpli_Callback(source,eventdata,opt)
1625          % Funcion que gestiona la elección del modelo de amplificador
1626      ...
1627
1638      function EditMem_Callback(source,eventdata)
1639          % Funcion que permite ajustar la memoria en el modelo de amplificador
1640          % con memoria
1641      ...
1642
1646      function ModMem_Callback(source,eventdata,opt)
1647          % Funcion que gestiona los botones que permiten ajustar la memoria del
1648          % modelo de amplificador con memoria
1649      ...
1650
1655      function Generate_Callback(source,eventdata)
1656          % Funcion que permite generar la señal 5G
1657      ...
1658
2043      function TxResults_Callback(source,eventdata,opt)
2044          % Funcion que gestiona las graficas que se desea dibujar
2045      ...
2046
2053      function TxResultsPlot_Callback(source,eventdata)
2054          % Funcion que realiza los plots seleccionados por el usuario
2055      ...
2056
2392      function TimeDomExport_Callback(source,eventdata)
2393          % Funcion que permite exportar señales generadas
2394      ...
2395
2541      function Channel_Callback(source,eventdata)
2542          % Funcion que gestiona la elección del modelo de canal
2543      ...
2544
2798      function Demodulate_Callback(source,eventdata)
2799          % Funcion que realiza la demodulacion de la señal 5G recibida en
2800          % el receptor
2801      ...
2802
2954      function Constellation_Callback(source,eventdata)
2955          % Funcion que calcula y representa la constelacion del canal de datos
2956      ...
2957
3004      function EVM_Callback(source,eventdata)
3005          % Funcion que realiza todos los calculos pertinentes y muestra las graficas
3006          % de EVM
3007      ...
3148  end

```

15. Función: DL_5GNR_Simulator.m

```
1 close all,
2 DL5GNR_Simulator();
3
4 function DL5GNR_Simulator()
5
6 % Ajuste del path, declaracion de variables y de la interfaz
7 ...
8
9 % Definicion de menus
10 function men5G_Callback(src,event)
11     % Menu de ayuda acerca de la generacion de la señal 5G
12 ...
13
14 function menAmp_Callback(src,event)
15     % Menu de ayuda acerca de los modelos de amplificador disponibles
16     % en el simulador
17 ...
18
19 function menCan_Callback(src,event)
20     % Menu de ayuda acerca de los modelos de canal disponibles y basados
21     % en el estandar
22 ...
23
24 function menRepr_Callback(src,event)
25     % Menu de ayuda sobre las representaciones y visualizaciones de resultados
26     % ofrecidas al usuario
27 ...
28
29 function Modes_Callback(src,event)
30     % Menu de ayuda acerca de los modos de funcionamiento del simulador y los
31     % objetivos y usos de cada uno
32 ...
33
34 function NoLinMen_Callback(src,event)
35     % Funcion de ayuda acerca del modelado de no linealidades
36 ...
37
38 function CloseMen_Callback(src,event)
39     % Funcion para cerrar la ventana de los menus
40 ...
41
42 function preferencias_Callback(src,event)
43     % Menu para configurar el simulador en uno de los dos modos de funcionamiento
44 ...
45
46 function trainSignals_Callback(src,event)
47     % Menu para configurar las señales que modelan los elementos no lineales presentes
48 ...
49
50
51 function nFrames_Callback(src,eventdata)
52     % Funcion que gestiona la configuracion del numero de tramas que se genera
53 ...
54
55 function TestModel_Callback(src,eventdata)
56     % Funcion que gestiona el modelo de test seleccionado por el usuario
57 ...
58
59 function BW_Callback(src,eventdata)
60     % Funcion que permite ajustar el ancho de banda de la transmision
61 ...
62
63 function SCS_Callback(src,eventdata)
64     % Funcion que gestiona los cambios en la separacion de las subportadoras
65     % (numerologia)
66 ...
67
68 function Dup_Callback(src,eventdata)
```

```
680     % Funcion que permite elegir entre los dos modos de duplexado permitidos
681     ...
685     function ModAmpli_Callback(src,eventdata,opt)
686         % Funcion que permite que el usuario elija el modelo de amplificador deseado
687         ...
688
695     function ModChan_Callback(src,eventdata,opt)
696         % Función que gestiona los ajustes en el modelo de canal
697         ...
698
705     function Simulate_Callback(src,eventdata)
706         % Funcion que realiza la simulacion completa transmision-recepcion de la
707         % señal 5G-NR
708         ...
709
712     function Plot_Callback(src,eventdata)
713         % Funcion que permite realizar las representaciones seleccionadas por el
714         % usuario
715         ...
716
719     function Export_Callback(src,eventdata)
720         % Funcion que permite exportar señales generadas
721         ...
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1778
1779
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1786
1787
1787
1788
1789
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1796
1797
1797
1798
1799
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1806
1807
1807
1808
1809
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1816
1817
1817
1818
1819
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1826
1827
1827
1828
1829
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1836
1837
1837
1838
1839
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1846
1847
1847
1848
1849
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1856
1857
1857
1858
1859
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1866
1867
1867
1868
1869
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1876
1877
1877
1878
1879
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1886
1887
1887
1888
1889
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1896
1897
1897
1898
1899
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1906
1907
1907
1908
1909
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1916
1917
1917
1918
1919
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1926
1927
1927
1928
1929
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1936
1937
1937
1938
1939
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1946
1947
1947
1948
1949
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1956
1957
1957
1958
1959
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1966
1967
1967
1968
1969
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1976
1977
1977
1978
1979
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1986
1987
1987
1988
1989
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1996
1997
1997
1998
1999
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2006
2007
2007
2008
2009
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2016
2017
2017
2018
2019
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2026
2027
2027
2028
2029
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2036
2037
2037
2038
2039
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2046
2047
2047
2048
2049
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2056
2057
2057
2058
2059
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2066
2067
2067
2068
2069
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2076
2077
2077
2078
2079
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2086
2087
2087
2088
2089
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2096
2097
2097
2098
2099
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2106
2107
2107
2108
2109
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2116
2117
2117
2118
2119
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2126
2127
2127
2128
2129
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2136
2137
2137
2138
2139
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2146
2147
2147
2148
2149
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2156
2157
2157
2158
2159
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2166
2167
2167
2168
2169
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2176
2177
2177
2178
2179
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2186
2187
2187
2188
2189
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2196
2197
2197
2198
2199
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2206
2207
2207
2208
2209
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2216
2217
2217
2218
2219
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2226
2227
2227
2228
2229
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2236
2237
2237
2238
2239
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2246
2247
2247
2248
2249
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2256
2257
2257
2258
2259
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2266
2267
2267
2268
2269
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2276
2277
2277
2278
2279
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2286
2287
2287
2288
2289
2289
2290
2291
2292
2293
2294
2295
2296
2296
2297
2297
2298
2299
2299
2300
2301
2302
2303
2304
2305
2306
2306
2307
2307
2308
2309
2309
2310
2311
2312
2313
2314
2315
2316
2316
2317
2317
2318
2319
2319
2320
2321
2322
2323
2324
2325
2326
2326
2327
2327
2328
2329
2329
2330
2331
2332
2333
2334
2335
2336
2336
2337
2337
2338
2339
2339
2340
2341
2342
2343
2344
2345
2346
2346
2347
2347
2348
2349
2349
2350
2351
2352
2353
2354
2355
2356
2356
2357
2357
2358
2359
2359
2360
2361
2362
2363
2364
2365
2366
2366
2367
2367
2368
2369
2369
2370
2371
2372
2373
2374
2375
2376
2376
2377
2377
2378
2379
2379
2380
2381
2382
2383
2384
2385
2386
2386
2387
2387
2388
2389
2389
2390
2391
2392
2393
2394
2395
2396
2396
2397
2397
2398
2399
2399
2400
2401
2402
2403
2404
2405
2406
2406
2407
2407
2408
2409
2409
2410
2411
2412
2413
2414
2415
2416
2416
2417
2417
2418
2419
2419
2420
2421
2422
2423
2424
2425
2426
2426
2427
2427
2428
2429
2429
2430
2431
2432
2433
2434
2435
2436
2436
2437
2437
2438
2439
2439
2440
2441
2442
2443
2444
2445
2446
2446
2447
2447
2448
2449
2449
2450
2451
2452
2453
2454
2455
2456
2456
2457
2457
2458
2459
2459
2460
2461
2462
2463
2464
2465
2466
2466
2467
2467
2468
2469
2469
2470
2471
2472
2473
2474
2475
2476
2476
2477
2477
2478
2479
2479
2480
2481
2482
2483
2484
2485
2486
2486
2487
2487
2488
2489
2489
2490
2491
2492
2493
2494
2495
2496
2496
2497
2497
2498
2499
2499
2500
2501
2502
2503
2504
2505
2506
2506
2507
2507
2508
2509
2509
2510
2511
2512
2513
2514
2515
2516
2516
2517
2517
2518
2519
2519
2520
2521
2522
2523
2524
2525
2526
2526
2527
2527
2528
2529
2529
2530
2531
2532
2533
2534
2535
2536
2536
2537
2537
2538
2539
2539
2540
2541
2542
2543
2544
2545
2546
2546
2547
2547
2548
2549
2549
2550
2551
2552
2553
2554
2555
2556
2556
2557
2557
2558
2559
2559
2560
2561
2562
2563
2564
2565
2566
2566
2567
2567
2568
2569
2569
2570
2571
2572
2573
2574
2575
2576
2576
2577
2577
2578
2579
2579
2580
2581
2582
2583
2584
2585
2586
2586
2587
2587
2588
2589
2589
2590
2591
2592
2593
2594
2595
2596
2596
2597
2597
2598
2599
2599
2600
2601
2602
2603
2604
2605
2606
2606
2607
2607
2608
2609
2609
2610
2611
2612
2613
2614
2615
2616
2616
2617
2617
2618
2619
2619
2620
2621
2622
2623
2624
2625
2626
2626
2627
2627
2628
2629
2629
2630
2631
2632
2633
2634
2635
2636
2636
2637
2637
2638
2639
2639
2640
2641
2642
2643
2644
2645
2646
2646
2647
2647
2648
2649
2649
2650
2651
2652
2653
2654
2655
2656
2656
2657
2657
2658
2659
2659
2660
2661
2662
2663
2664
2665
2666
2666
2667
2667
2668
2669
2669
2670
2671
2672
2673
2674
2675
2676
2676
2677
2677
2678
2679
2679
2680
2681

```


Anexo D

Hojas de características

Se incluye la hoja de características del amplificador que se ha utilizado en la captura de señales reales y que posteriormente se ha modelado para obtener las medidas recogidas en este trabajo:

- Amplificador de potencia (PA): Modelo ZHL-4240+, Mini-Circuits

Coaxial Amplifier

ZHL-4240+

50Ω Medium High Power 600 to 4200 MHz

The Big Deal

- Wideband, 600 to 4200 MHz
- High gain, 39 dB
- Extremely flat gain, ± 1.3 dB
- High OIP3, +38 dBm



Product Overview

Mini-Circuits' ZHL-4240+ is a medium-power connectorized amplifier supporting a wide range of applications from 600 to 4200 MHz, such as test instrumentation, SatCom, and mobile communications systems, including those operating in the new telecom Band 71 allocation (617 to 698 MHz). This model provides +31 dBm output power at saturation and extremely flat gain (39 ± 1.3 dB) across its full bandwidth, making it ideal for systems where consistent performance across frequency is required. The amplifier operates on a 15V DC supply and comes housed in compact aluminum alloy case (7.00 x 3.25 x 2.13") with SMA connectors, built-in bracket for mounting, and an optional heat sink for efficient cooling.

Key Features

Feature	Advantages
Wideband, 600 to 4200 MHz	One amplifier supports a broad range of system and test lab applications. Extended bandwidth down to 600 MHz supports new telecom Band 71 allocation (617 to 698 MHz)
High gain, 39 dB	Reduces the number of gain stages, lowering component count and overall system cost.
Excellent gain flatness, ± 1.3 dB	Provides consistent performance across frequency, minimizing the need for external equalizing networks in wideband applications.
Medium output power, +31 dBm P3dB	Supports a wide range of power requirements.
High OIP3, +38 dBm	Provides highly linear performance with excellent sensitivity and two-tone spur-free dynamic range.

Notes

- Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp



Coaxial Amplifier

ZHL-4240+

50Ω Medium High Power 600 to 4200 MHz

Features

- wideband, 600 to 4200 MHz
- high IP3, +38 dBm typ.
- high gain, 39 dB min.



ZHL-4240X+



ZHL-4240+

CASE STYLE: U36

Connectors	Model
SMA	ZHL-4240+
SMA	ZHL-4240X+

+RoHS Compliant

The +Suffix identifies RoHS Compliance. See our web site for RoHS Compliance methodologies and qualifications

Electrical Specifications at 25°C

Parameter	Condition (MHz)	ZHL-4240+ ▲ ZHL-4240X+			Units
		Min.	Typ.	Max.	
Frequency Range		600	—	4200	MHz
Gain	600-4200	39	42	47	dB
Gain Flatness	600-4200	—	±1.3	±1.8	dB
Output Power at 1dB compression*	600-4200	+28	+30	—	dBm
Output Power at 3dB compression**	600-4200	+29	+31	—	dBm
Noise Figure	600-4200	—	8.0	—	dB
Output third order intercept point	600-4200	—	+38	—	dBm
Input VSWR	600-4200	—	—	2.5	:1
Output VSWR	600-4200	—	—	2.5	:1
DC Supply Voltage		—	15	—	V
Supply Current		—	—	1.0	A

Open load is not recommended, potentially can cause damage.

With no load derate max. input power by 20 dB.

* +27 dBm at 3700-4200 MHz

** +28 dBm at 3700-4200 MHz

▲Heat sink not included. Alternative heat sinking and heat removal must be provided by the user to limit maximum base-plate temperature to 65°C, in order to ensure proper performance. For reference, this requires thermal resistance of user's external heat sink to be 1.3°C/W max.

Maximum Ratings

Parameter	Ratings
Operating Temperature	-20°C to 65°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	+20V
Input RF Power (no damage)	-5 dBm

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

Notes

A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.

B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits's applicable established test performance criteria and measurement instructions.

C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp

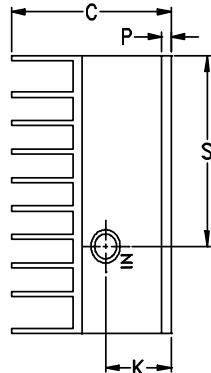
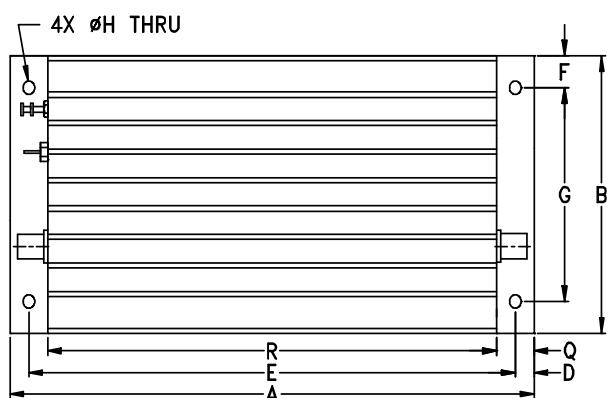
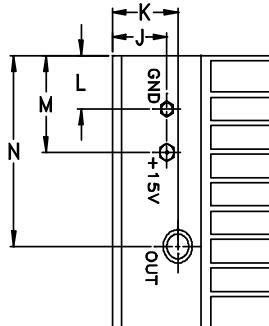


www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

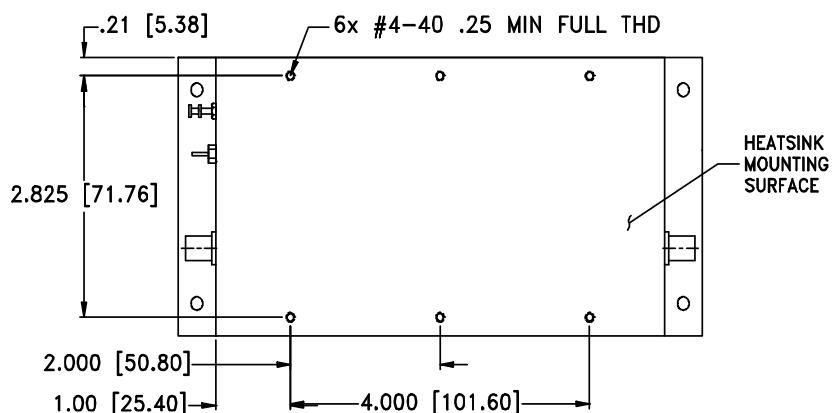
REV. A
M167682
ZHL-4240+
CH/CP/AM
180507

Page 2 of 4

Outline Drawing for models with heatsink



MOUNTING INFORMATION FOR MODELS WITHOUT HEATSINK



Outline Dimensions (inch mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	wt
7.00	3.25	2.13	.25	6.500	.38	2.500	.156	.73	.88	.63	1.13	2.23	.125	.50	6.00	2.23	grams

177.80 82.55 54.10 6.35 165.10 9.65 63.50 3.96 18.54 22.35 16.00 28.70 56.64 3.18 12.70 152.40 56.64 900

*600 grams without heatsink

Notes

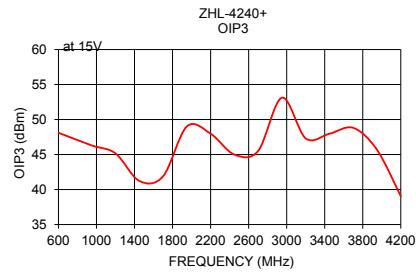
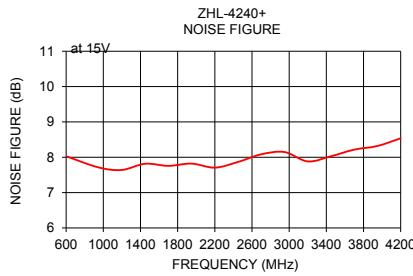
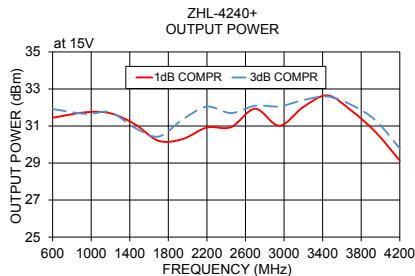
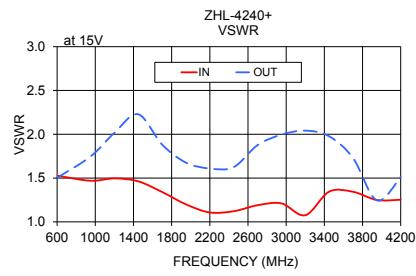
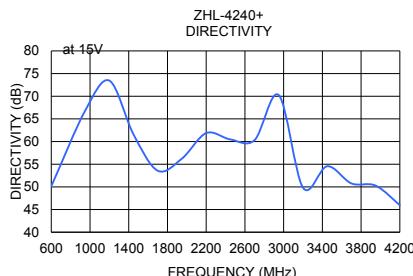
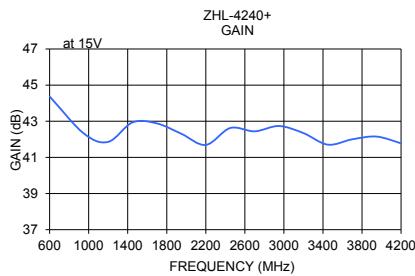
- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuits's applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp



Typical Performance Data/Curves

ZHL-4240+

FREQUENCY (MHz)	GAIN (dB)	DIRECTIVITY (dB)	VSWR (:1)	POUT at 1 dB COMPR. (dBm)	POUT at 3 dB COMPR. (dBm)	NOISE FIGURE (dB)	IP3 (dBm)
15V	15V	IN	OUT	15V	15V	15V	15V
600	44.37	50.13	1.53	31.45	31.91	8.03	48.11
950	42.33	66.82	1.47	31.74	31.65	7.71	46.30
1200	41.86	73.44	1.50	31.68	31.74	7.64	45.16
1450	42.94	61.55	1.46	31.11	30.91	7.82	41.23
1700	42.88	53.56	1.34	30.20	30.43	7.76	41.89
1950	42.31	56.25	1.20	30.30	31.36	7.82	49.01
2200	41.69	61.87	1.11	30.92	32.04	7.71	47.98
2450	42.63	60.47	1.12	30.94	31.70	7.87	44.99
2700	42.44	60.33	1.19	31.93	32.09	8.08	45.51
2950	42.74	70.24	1.21	31.01	32.06	8.15	53.12
3200	42.34	49.82	1.08	32.03	32.40	7.88	47.31
3450	41.71	54.55	1.34	32.65	32.59	8.03	47.97
3700	42.00	50.76	1.34	31.82	32.14	8.22	48.81
3950	42.15	50.28	1.25	30.66	31.30	8.32	45.68
4200	41.78	45.95	1.25	29.13	29.78	8.54	39.05
4200	41.78	45.95	1.25	29.13	29.78	8.54	39.05



Notes

- A. Performance and quality attributes and conditions not expressly stated in this specification document are intended to be excluded and do not form a part of this specification document.
- B. Electrical specifications and performance data contained in this specification document are based on Mini-Circuit's applicable established test performance criteria and measurement instructions.
- C. The parts covered by this specification document are subject to Mini-Circuits standard limited warranty and terms and conditions (collectively, "Standard Terms"); Purchasers of this part are entitled to the rights and benefits contained therein. For a full statement of the Standard Terms and the exclusive rights and remedies thereunder, please visit Mini-Circuits' website at www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp

Mini-Circuits®

www.minicircuits.com P.O. Box 350166, Brooklyn, NY 11235-0003 (718) 934-4500 sales@minicircuits.com

Page 4 of 4

