

Universidad Politécnica de Cartagena

TRABAJO FIN DE GRADO

INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

Análisis de la transmisión monocanal y multicanal
en sistemas de radio sobre fibra basados en láseres
de emisión superficial con cavidad vertical a 850 nm
(VCSEL)

Autor

Luis Fernández Álvarez

Directores

Dr.Ing. Jacopo Nanni

Prof. Giovanni Tartarini

Prof. David Cañete Rebenaque



Agradecimientos

Ha sido un largo camino hasta llegar aquí. Después de una gran cantidad de horas de estudio, por fin llegó el día de redactar el que será mi último trabajo antes de ser reconocido con el prestigioso título de ingeniero.

Quiero agradecer especialmente la ayuda de mis compañeros, ya que sin ellos hubiera sido extremadamente más difícil llegar hasta aquí. En especial se me vienen a la mente los nombres de Antonio Manuel Huéscar, Antonio Oliva, Joaquín García o Alejandro Gil.

Por otro lado también quiero agradecer a mi familia y a los profesores de la Universidad de Bolonia, los doctores Jacopo Nanni y Giovanni Tartarini, por el gran apoyo y ayuda proporcionada.

Por último, agradecer tanto a mi coordinador Erasmus como a mi director de TFG, los profesores Rafael Toledo Moreo y David Cañete Rebenaque, por haberse ofrecido a ayudarme desinteresadamente y facilitarme en gran medida el trabajo realizado.

Dicho todo esto solo quiero volver a decir: gracias.

RESUMEN

El trabajo se centra en el área de procesado de la señal aplicado a sistemas de radio sobre fibra (RoF). A partir de un software desarrollado en MATLAB se generan muestras de una señal LTE en banda base. Utilizando un generador de señales, con estas muestras, se genera la señal LTE paso banda de radiofrecuencia (RF).

Esta señal se utiliza para modular un láser (en general un VCSEL a 850 nm para aplicaciones de bajo coste) y la señal modulada es transmitida a través de fibra óptica donde es detectada por un fotodiodo. A continuación, se transmite a un analizador de señales donde se recupera la señal en banda base.

A partir de otro software desarrollado en MATLAB, la señal recibida es analizada y procesada estimando su calidad a través del vector de magnitud de error (EVM).

Partiendo de esta base, se ha extendido la funcionalidad de ambos softwares a una transmisión multicanal. Además, se han incluido otras mejoras como nuevas técnicas de modulación, esto es, 1024-QAM.

El trabajo se basa tanto en una parte teórica relacionada con la generación y procesado de la señal, como en otra experimental relacionada con la estimación de la calidad de la transmisión en función de la longitud de la fibra, el número de canales transmitidos, la potencia transmitida, el tipo de láser etc.

Palabras Clave: RoF, RF, LTE, EVM, QAM.

ÍNDICE

1. Introducción	9 - 12
1.1. Sistemas de radio sobre fibra	9 - 10
1.2. El estándar LTE	10 - 12
2. El software LTE	13 - 26
2.1. Software preexistente	13 - 17
2.1.1. Transmisor	13
2.1.2. Receptor	14
2.1.3. Main	14 - 17
2.2. Ampliaciones del programa	17 - 26
2.2.1. 1024-QAM	17 - 19
2.2.2. Transmisión multicanal	19 - 26
3. Análisis de sistemas RoF basados en láseres VCSEL a 850 nm	27 - 34
3.1. Caracterización del enlace de RoF	27 - 28
3.2. Resultados de la transmisión de señales LTE	26 - 33
3.2.1. El vector de magnitud de error (EVM)	28 - 29
3.2.2. Rama SSMF	29 - 32
3.2.3. Rama MMF	32 - 33
3.2.3. Comparación de ambos enlaces	34
4. Evaluación experimental de la (de) multiplexación de modos presentes a 850 nm en SSMF	35 - 59
4.1. Análisis del parámetro de transmisión S_{21}	35 - 50
4.1.1. Sin acoplador	37
4.1.2. Acoplador en (1)	37 - 46
4.1.3. Acoplador en (2)	46 - 49
4.1.4. Acoplador en (1) y (2)	49 - 50
4.2. Análisis del EVM del sistema	50 - 52
4.3. Aplicación a un sistema WDM	52 - 58
5. Conclusiones y líneas futuras	59
6. Bibliografía	61 - 62

1. INTRODUCCIÓN

1.1. SISTEMAS DE RADIO SOBRE FIBRA

El trabajo se centra en los sistemas de radio sobre fibra (RoF). Estos sistemas son considerados una solución viable para redes de datos de corto alcance utilizadas tanto para aplicaciones profesionales como orientadas al consumidor.

Estos sistemas se caracterizan por utilizar las portadoras de RF como subportadoras del canal óptico. Las señales de RF modulan un láser y la señal modulada es transmitida a través de la fibra. Finalmente, se recupera la señal eléctrica a través de un fotodiodo.

Son muy utilizados en sistemas de televisión (CATV), redes de área local (LAN), aplicaciones militares etc.



Figura 1. Esquema general de un sistema de RoF

En este caso particular, el trabajo se ha centrado fundamentalmente en sistemas de bajo coste y por ello se han empleado mayoritariamente láseres de emisión superficial con cavidad vertical (VCSEL) en primera ventana de transmisión (850 nm). Los VCSEL son láseres de semiconductor en los que la luz se propaga perpendicularmente al plano de la región activa. Algunas de sus características más interesantes son consumir poca potencia, tener una baja corriente umbral y ser de fabricación barata.

Con el mismo objetivo de desarrollar sistemas de bajo coste, se han empleado tramos de fibra estándar monomodo (SSMF) como medio óptico de transmisión. Este tipo de fibras son mucho más económicas que las multimodo. Sin embargo, su mayor inconveniente es que al combinarse con el VCSEL en primera ventana introduce un comportamiento bimodal que puede producir problemas en la transmisión [1].

Para superar este problema, a lo largo del trabajo se incluirán opciones como incluir una etapa previa de filtrado a través de un tramo de fibra SMF muy corto de 5 μm de diámetro del núcleo o la incorporación de acopladores ópticos para la (de) multiplexación de modos.

1.2. EL ESTÁNDAR LTE

El trabajo se ha centrado en las señales 4G - 4.5G o señales LTE Advanced (Long Term Evolution-Advanced). Este es un sistema de mejora de LTE que se está desarrollando desde la primera década del siglo XXI. Se caracteriza por tener una mejor eficiencia espectral (tanto media como de pico), aumentar el ancho de banda disponible, mejorar la velocidad de transmisión mediante técnicas de multiplexación más avanzadas (MIMO 8x8 y 4x4) etc.

En un sistema LTE cada usuario transmite durante un intervalo de tiempo utilizando un rango de frecuencias particular. El intervalo de tiempo debe ser múltiplo de 1 ms que es lo que se conoce como subtrama temporal. La agrupación de 10 subtramas da lugar a una trama temporal. Por otro lado, a cada usuario se le asignan unos determinados rangos de frecuencia conocidos como bloques de recurso. Cada bloque de recurso ocupa 180 KHz.

Una característica muy importante de las señales LTE consiste en que la información puede ser transmitida de forma muy variada. Esto quiere decir que no existe un formato fijo de transmisión y por ello, en cada caso, pueden utilizarse distintos tipo de modulación (como 64-QAM o 256-QAM), técnicas de duplexado (tanto TDD como FDD), anchos de banda, tasas de transmisión etc. Entre los objetivos del trabajo, se han incluido el desarrollo y análisis de una técnica de modulación muy avanzada como es 1024-QAM y el estudio de la transmisión multicanal.

Además, cabe destacar que las señales LTE se tratan de manera diferente según se trabaje en el enlace ascendente o descendente. Así por ejemplo, la técnica de acceso al medio es diferente en ambos enlaces ya que en el ascendente se utilizaría *Single Carrier Frequency Division Multiplexing Access (SC-FDMA)* y en el descendente se emplearía *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA)* [2].

Todo el trabajo se centrará en la trata de la señal en el enlace descendente. Es por ello, que aunque no haya un formato fijo de transmisión, si que existen unos estándares y estos son recogidos en la Tabla 1.

	Bandwidth (MHz)					
	1.4	3	5	10	15	20
Frame Duration	10 (ms)					
Subframe Duration	1 (ms)					
Sub-carrier Spacing	15 (KHz)					
N. of sub-carriers in Resource Blocks	12					
N. of slots for subframe	2					
Sampling Frequency (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
FFT Size	128	256	512	1024	1536	2048
Occupied Sub-carriers + DC	72+1	180+1	300+1	600+1	900+1	1200+1
Guard Sub-carriers	52	105	211	423	635	847
N. of Resource Blocks	6	15	25	50	75	100
Transmission Bandwidth (MHz)	1.095	2.715	4.515	9.015	13.515	18.015
OFDM Symbol for slots	7 (normal cyclic prefix)					
Samples for slots	960	1920	3840	7680	11520	15360
Samples for frame	19200	38400	76800	153600	230400	307200
Length (normal CP)	5.21 (first symbol) / 4.69 (six following symbols)					
Length samples (normal CP), first symbol /six following symbols	10/9	20/18	40/36	80/72	120/108	160/144

Tabla 1. Parámetros fundamentales de la trata en el enlace descendente [3]

Por último, es importante destacar los canales y señales que transportan la información. En el enlace descendente destacan fundamentalmente:

- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel): Es el canal que se utiliza para transmitir el tráfico de datos. Puede utilizar técnicas de modulación desde BPSK hasta 1024-QAM. A partir de este canal, se estimará la calidad de la transmisión en función del EVM calculado.

- PBCH (Physical Broadcast Channel): Se utiliza para enviar información de difusión. Emplea QPSK como técnica de modulación.

- PDCCH (Physical Downlink Control Channel): Transporta información de control y soporta QPSK.

- RS (Reference Signal): Se utiliza para estimar la calidad del canal a partir de su respuesta impulsional.

- PSS (Primary Synchronization Signal): Empleada para la sincronización a nivel de slot temporal.

- SSS (Secondary Synchronization Signal): Empleada para la sincronización a nivel de trama.

2. EL SOFTWARE LTE

La parte teórica del trabajo se ha desarrollado plenamente en MATLAB. A partir de un software preexistente para la simulación de señales LTE, se han desarrollado nuevas funciones que posteriormente se han puesto a prueba y utilizado para el desarrollo experimental del trabajo.

2.1. SOFTWARE PREEXISTENTE

En primer lugar, se debe describir a grandes rasgos el software preexistente ya que es la base de todo el trabajo. Se divide en tres partes fundamentales: el transmisor, el receptor y el panel de ejecución o *main*.

2.1.1. TRANSMISOR

Dentro del transmisor se encuentran todas las funciones necesarias para generar las muestras de la señal LTE. Entre sus funciones están la generación de los distintos canales y señales, la selección del tipo de modulación y ancho de banda, el mapeo etc. En la Figura 2 pueden verse todas las funciones que incluye.

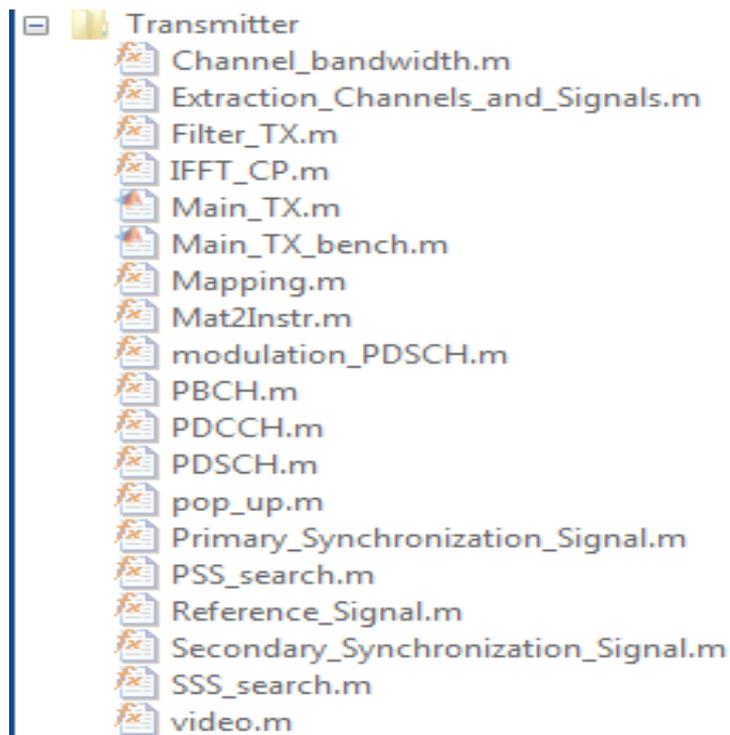


Figura 2. Funciones disponibles en el transmisor

Cabe destacar que el objetivo del trabajo no es explicar el software, ya que este ya estaba previamente implementado, y por ello no se entrará en detalle de cada una de las funciones desarrolladas. Sin embargo, si es necesario hacer una mención a las distintas opciones que se incluyen.

2.1.2. RECEPTOR

El receptor es el encargado de reconstruir la señal y a partir de ella estimar la calidad de la transmisión. Por ello, además de las funciones destinadas a la extracción y representación de las constelaciones de los diferentes canales y señales, cuenta con funciones destinadas a la medida del EVM. Al igual que con el transmisor, en la siguiente figura se muestran todas las funciones que se incluyen.

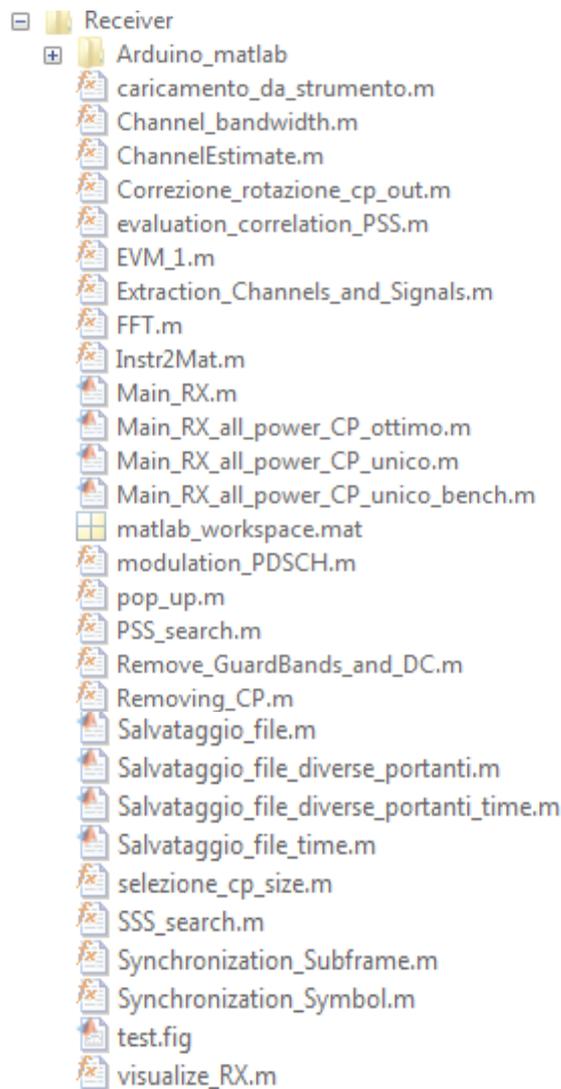


Figura 3. Funciones disponibles en el receptor

2.1.3. MAIN

El *main* es desde donde se ejecuta el programa. En él se ejecutan tanto el emisor como el transmisor, así como la función de salvaguardado necesaria para archivar los resultados obtenidos. Además, en él se incluye la opción de simular un canal AWGN (canal con ruido blanco aditivo gaussiano) en el caso de que únicamente quiera ponerse a prueba el transmisor.

```

Main.m x +
1  %%%% MAIN Program LTE Simulator %%%%%%%%%
2  clear all
3  clc
4  %% Data Transmission
5  Root_Directory = pwd;
6  cd([Root_Directory '\Transmitter']);
7
8  %upsampling_factor = 4; %enlarge the TX bandwidth
9  Main_TX;
10 pause(5)
11 %% Simulation of AWGN Channel
12
13 Noise_power_dBm = -20;
14 Noise = sqrt(100*10.^(Noise_power_dBm/10)*1e-3)*randn(1,length(LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1));
15
16 LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1 = LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1 + Noise;
17 T = 0:dt:(length(LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1)-1)*dt;
18 F = (-length(T)/2:1:(length(T)/2)-1)/(dt*length(T));
19 figure;plot(F,20*log10(abs(fftshift(abs(fft(LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1))))))
20
21
22 %% Data Reception
23 cd([Root_Directory '\Receiver']);
24
25 Main_RX_all_power_CP_unico;
26 %%% End

```

Figura 4. Main.

A continuación se expone un ejemplo acerca del funcionamiento del programa consistente en la simulación de la transmisión de una señal LTE con modulación 16-QAM, 20 MHz de ancho de banda y un canal AWGN con una potencia media de ruido de -20dBm.

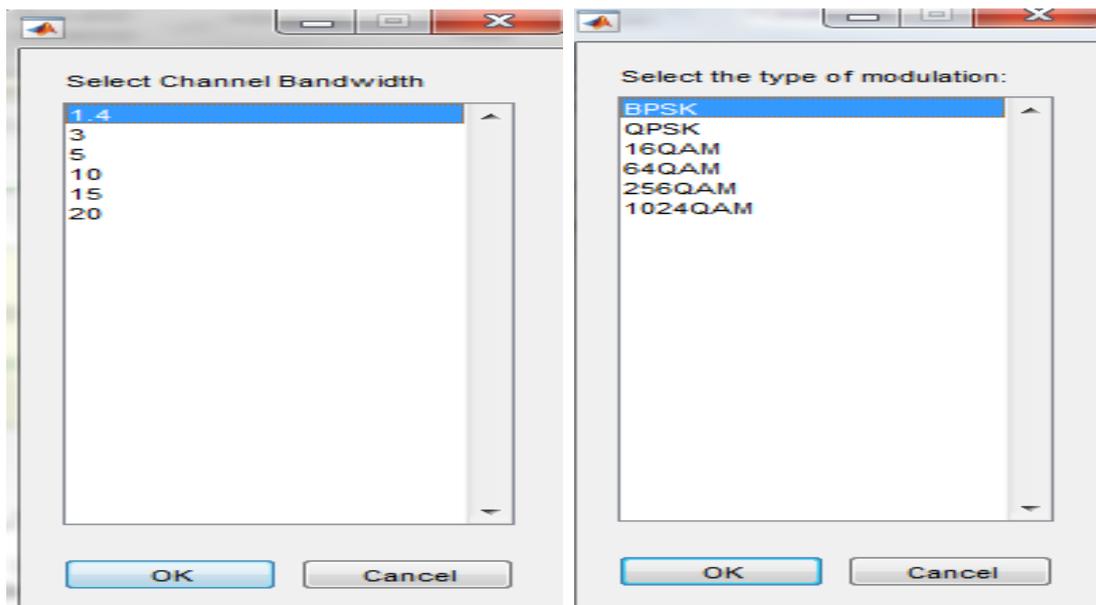


Figura 5. Paneles de selección del tipo de modulación y ancho de banda.

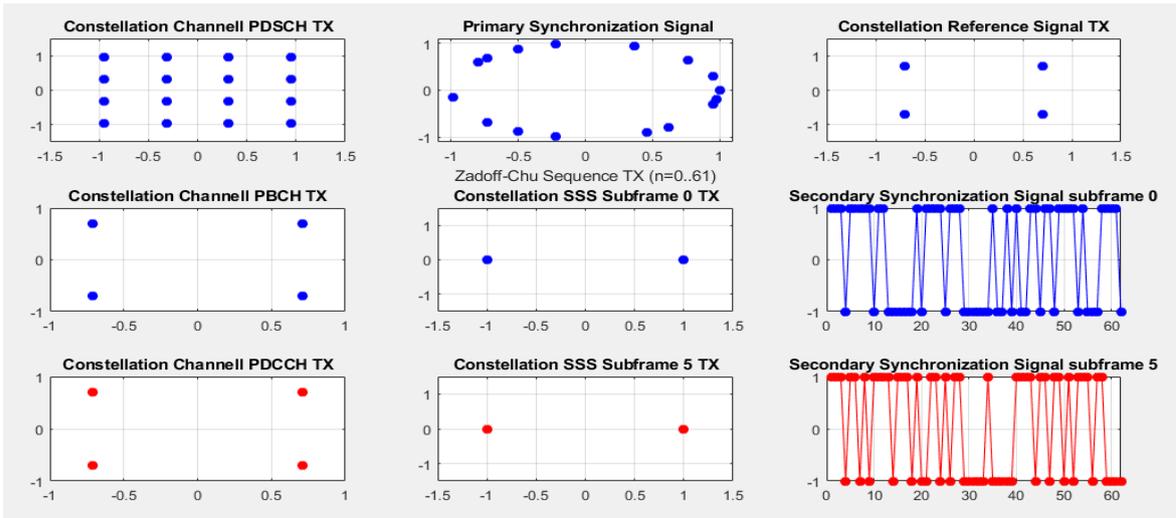


Figura 6. Constelaciones de los diferentes canales y señales en transmisión

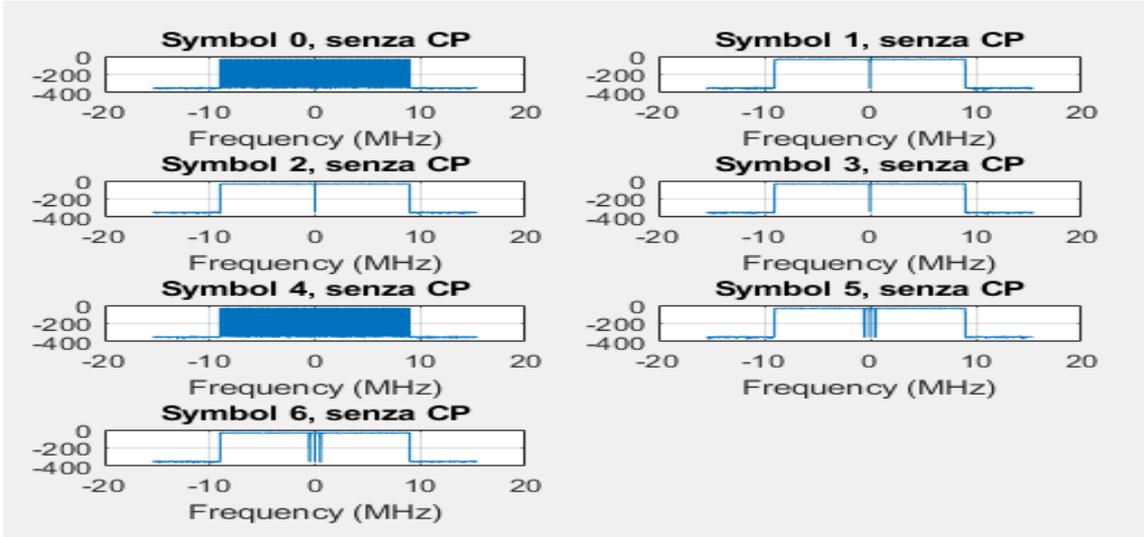


Figura 7. Símbolos OFDM transmitidos

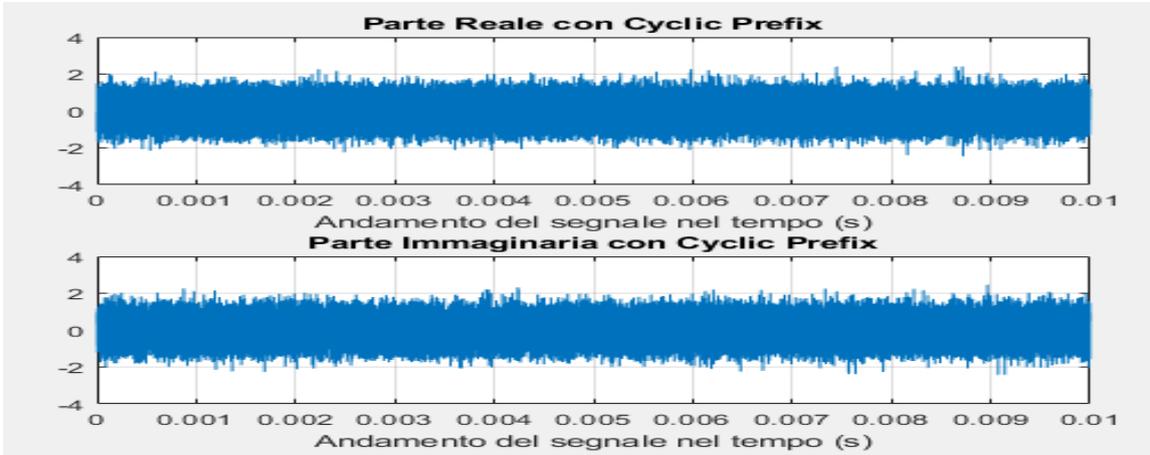


Figura 8. Señal transmitida en el tiempo

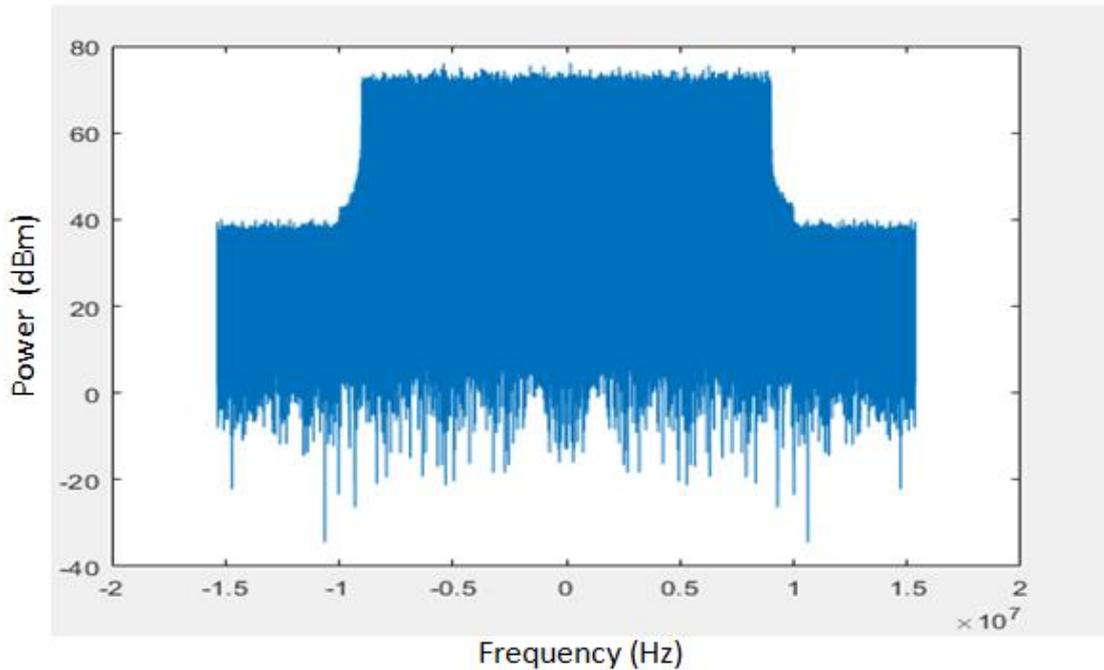


Figura 9. Espectro de la señal recibida

2.2. AMPLIACIONES DEL PROGRAMA

A continuación se exponen las diversas funciones que se han implementado.

2.2.1. 1024-QAM

Hasta ahora los diferentes estándares de LTE definían como máximo la modulación 256-QAM para el PDSCH. Sin embargo, recientemente se ha incluido una nueva modulación que permite aumentar en gran medida la tasa de transmisión, esta es, 1024-QAM. Como contrapartida, es una modulación mucho más sensible al ruido y por ello, como se explicará más adelante, el porcentaje de error máximo admitido sobre el EVM tiene un valor mucho más reducido que el de otras modulaciones (algo que implicará que únicamente sea viable para distancias cortas).

A continuación se muestra el código realizado para su implementación, donde se han seguido las recomendaciones de la ITU según el Release 16 en lo que respecta al mapeo de los símbolos [4]:

```

case 6 %% PDSCH 1024QAM
    M = 1024;
    Numeros = zeros(M,1);
    b = zeros(M,log2(M));
    for i = 0:M-1
        Numeros(i+1,1) = i;
    end
    aux=num2str(dec2bin(Numeros));
    for i=1:M
        for j=1:log2(M);

```

```

        b(i,j)=str2double(aux(i,j));
    end
end
Real = zeros(M,1);
Imaginaria = zeros(M,1);
x = zeros(M,1);
for i=1:M
    Real(i,1) = (1-2*b(i,1))*(16-(1-2*b(i,3))*(8-(1-
2*b(i,5))*(4-(1-2*b(i,7))*(2-(1-2*b(i,9))))));
    Imaginaria(i,1) = (1-2*b(i,2))*(16-(1-2*b(i,4))*(8-(1-
2*b(i,6))*(4-(1-2*b(i,8))*(2-(1-2*b(i,10))))));
end
x = Real + 1i*Imaginaria;
custmap = zeros(1,M);
aux = zeros (sqrt(M),1);
k = 1;
ind = 1;
aux1 = 1;
minimo_real = min(real(x));
maximo_imag = max(imag(x));
for contador = 1:M
    for i = 1:M
        if real(x(i,1)) == minimo_real
            aux(k,1) = i;
            k = k+1;
        end
    end
    for j = 1:sqrt(M)
        if imag(x(aux(j,1),1)) == maximo_imag
            custmap(ind) = aux(j,1);
            ind = ind + 1;
        end
    end
    if aux1 <= sqrt(M)
        maximo_imag = maximo_imag - 2;
        aux1 = aux1 + 1;
    end
    if aux1 == sqrt(M) + 1
        maximo_imag = max(imag(x));
        minimo_real = minimo_real + 2;
        aux1 = 1;
    end
    k=1;
end
custmap = custmap-1;
hMod =
comm.RectangularQAMModulator('ModulationOrder',1024,'BitInput',true,'S
ymbolMapping','Custom','CustomSymbolMapping',custmap);
for simboli=1:1:140
    dataMod_PDSCH (:,simboli) =
step(hMod,b_PDSCH(:,simboli))/sqrt(682);
end

```

A la hora de implementar el código, la parte más importante es la que concierne al mapeo de los símbolos, esto es, que palabra código se corresponde con que símbolo de la constelación. Para ello, en primer lugar se han generado los números binarios y a partir de la expresión recomendada por la ITU se han generado los símbolos para cada palabra código. Por último, se han debido ordenar según el orden que fuerza MATLAB

(según la parte real e imaginaria de cada símbolo) para poder hacer uso de la función *RectangularQAMModulator* que es la encargada de generar la constelación.

En la Figura 10 se muestra un ejemplo de la constelación de esta modulación en transmisión.

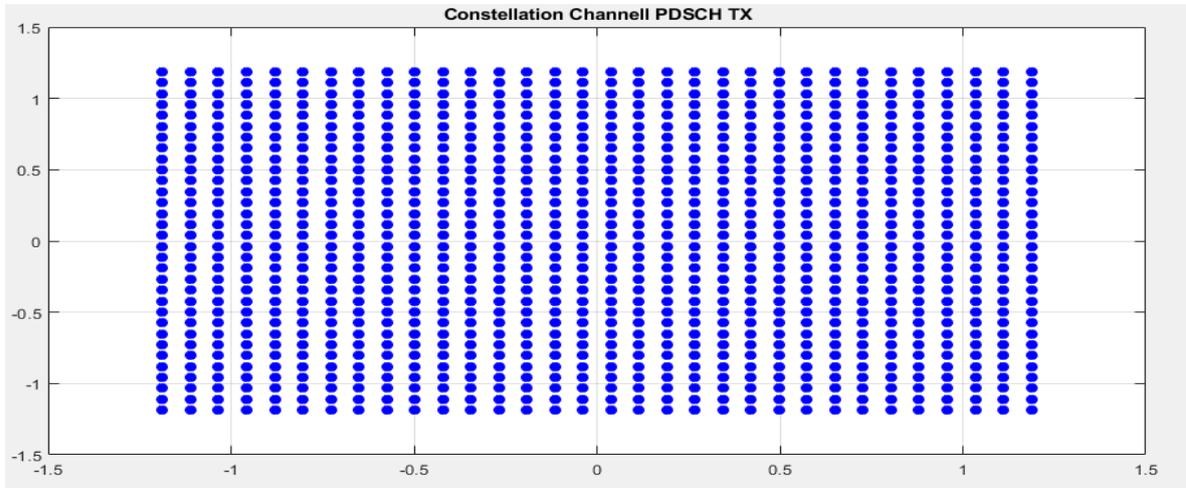


Figura 10. Constelación de la modulación 1024-QAM en transmisión

2.2.2. TRANSMISIÓN MULTICANAL

Hasta el momento, el programa únicamente era capaz de implementar la transmisión de un único canal. Sin embargo, a partir de una serie de modificaciones en el programa se ha logrado conseguir una transmisión multicanal. El objetivo ha sido conseguir no solo simular un mayor número de canales, sino también poder seleccionar el espaciado entre ellos para poder estudiar su efecto en la transmisión. Las modificaciones implementadas se muestran a continuación:

```

for c = 1:Selecting_Number_Of_Channels
[ dataMod_PDSCH ] = PDSCH(
NumBit,Nc,q,nRNTI,N_symb,n_slot,N_ID_cell,bit_for_symbol,Selecting_Mod
ulation )

    LTE - Synchronization signals
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    6.11.1 Primary synchronization signal (PSS)
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[ PSS ] = Primary_Synchronization_Signal( Nid_2 );

    6.11.2 Secondary synchronization signal (SSS)
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[ SSS_sub_0,SSS_sub_5 ] = Secondary_Synchronization_Signal(
Nid_1,Nid_2 );

    LTE - Physical broadcast channel "PBCH"
    6.3 General structure for downlink physical channels.
    6.6 Physical broadcast channel.
    7.2 Pseudo-random sequence generation.

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[
dataMod_PBCH_simb_0,dataMod_PBCH_simb_1,dataMod_PBCH_simb_2,dataMod_PB
CH_simb_3 ] = PBCH( N_ID_cell,Nc );

    LTE - Physical downlink control channel "PDCCH"
    6.3 General structure for downlink physical channels.
    6.8 Physical downlink control channel.
    7.2 Pseudo-random sequence generation.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[ dataMod_PDCCH ] = PDCCH( N_rb,N_sc,n_slot,N_ID_cell,Nc );

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    LTE - Reference Si.c Reference Signal (CRS).
    6.10.1.1 Sequence generation.
    7.2 Pseudo-random sequence generation.

[ RS ] = Reference_Signal( N_rb,N_ID_cell,Nc );

    LTE - Mapping to resource elements
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[ Resource_Grid ] = Mapping(
Selecting_Channel_bandwidth,N_symb,n_slot,dataMod_PDSCH,dataMod_PDCCH,
PSS,SSS_sub_0,SSS_sub_5,...

dataMod_PBCH_simb_0,dataMod_PBCH_simb_1,dataMod_PBCH_simb_2,dataMod_PB
CH_simb_3,RS );

    LTE - Inverse fast Fourier transform and Normal cyclic prefix
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[
LTE_Signal_Frequency,LTE_Signal_Time,LTE_Signal_Time_Serial,LTE_Signal
_Time_Serial_CP,LTE_Signal_Frequency_Serial_CP,t_CP ] =...
    IFFT_CP(
upsampling_factor*nFFTSize,N_symb,n_slot,Resource_Grid,f,dt,CP_1,CP_re
maining,Occupied_Sub_carriers );

    Maximum Power
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Maximum_power_dBm = 10*log10(max(abs(LTE_Signal_Time_Serial_CP).^2));

    Average Power
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Average_power_dBm = 10*log10(mean(abs(LTE_Signal_Time_Serial_CP).^2));

    Peak to Average Power Ratio (PAPR)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

PAPR_dB =
10*log10(max(abs(LTE_Signal_Time_Serial_CP).^2)/mean(abs(LTE_Signal_Ti
me_Serial_CP).^2));

video(
Maximum_power_dBm,Average_power_dBm,PAPR_dB,Ch_bandwidth,Selecting_Mod
ulation );

    Filtraggio

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[ LTE_Signal_Time_Serial_CP ] = Filter_TX(
Selecting_Channel_bandwidth,LTE_Signal_Time_Serial_CP,Filtro_TX,fmax,C
P_1,CP_remaining,upsampling_factor.*nFFTSize,N_symb,n_slot );

        LTE - Genero 3 frame identici
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot(:,c) =
LTE_Signal_Time_Serial_CP.*exp(Spacing_Channels.*1i*(-
(Selecting_Number_Of_Channels-1)/2+(c-
1))*2*pi*fs/upsampling_factor.*t_CP');

end
LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1= sum(LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot,2);
LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1 = [ LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1 ;
LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1 ; LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1 ];
LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1 = LTE_Signal_Time_Serial_CP_tot_1';

```

Lo primero de todo ha sido incluir un bucle *for* en el *Main* del transmisor que se repetirá tantas veces como número de canales indique el usuario al ejecutar el programa. La clave para la transmisión multicanal reside en el producto de la señal inicial monocanal generada en el tiempo por una exponencial compleja, de tal forma que se desplace en frecuencia según las propiedades básicas del análisis de Fourier. En concreto la expresión utilizada ha sido la siguiente:

$$LTE_Multichannel = \sum_1^N LTE * e^{-\frac{j2\pi fsS}{c*t}(\frac{N-1}{2} + (c-1))}$$

Donde LTE es la señal original en banda base, f_s es la frecuencia de muestreo determinada según la Tabla 1, S es el espaciado entre canales escogido por el usuario, t es la componente temporal, N el número de canales elegido por el usuario y c el factor de sobre muestreo (parámetro necesario ya que al simular más canales la frecuencia de muestreo debe ser mayor que en el caso de un solo canal).

A último, el objetivo es obtener N canales de idéntico ancho de banda separados una distancia S. Además cabe destacar que se ha limitado el ancho de banda máximo de transmisión a 160 MHz ya que es el máximo que alcanza el analizador de señales.

Para escoger el espaciado entre canales y el número de canales se han implementado las siguientes funciones respectivamente:

```

function [Spacing_Channels,Selection] =
Spacing(Selecting_Channel_bandwidth,F_s)

    possibili_valori4 = {'Nominal','Free spacing'};
    Selection = listdlg('PromptString','Option for the
spacing:',...
                        'SelectionMode','single',...
                        'ListString',possibili_valori4);

```

```

switch Selection
case 1
    switch Selecting_Channel_bandwidth

        case 1 % 1.4 MHz
            Ch_bandwidth = 1.4e6; %Este es el
ancho de banda "efectivo"
                                %El ancho de
banda real es F_s
                                BW1 = Ch_bandwidth/1e6; %Suponemos
                                todos los canales iguales
                                BW2 = Ch_bandwidth/1e6;
                                Spacing_Channels_MHz = floor((BW1 +
BW2 - 0.1*abs(BW1 - BW2))/0.6)*0.3; %En MHZ
                                Spacing_Channels =
                                (Spacing_Channels_MHz*1e6)/F_s;
        case 2 % 3 MHz
            Ch_bandwidth = 3e6;

                                BW1 = Ch_bandwidth/1e6; %Suponemos
                                todos los canales iguales
                                BW2 = Ch_bandwidth/1e6;
                                Spacing_Channels_MHz = floor((BW1 +
BW2 - 0.1*abs(BW1 - BW2))/0.6)*0.3; %En MHZ
                                Spacing_Channels =
                                (Spacing_Channels_MHz*1e6)/F_s;
        case 3 % 5 MHz
            Ch_bandwidth = 5e6;

                                BW1 = Ch_bandwidth/1e6; %Suponemos
                                todos los canales iguales
                                BW2 = Ch_bandwidth/1e6;
                                Spacing_Channels_MHz = floor((BW1 +
BW2 - 0.1*abs(BW1 - BW2))/0.6)*0.3; %En MHZ
                                Spacing_Channels =
                                (Spacing_Channels_MHz*1e6)/F_s;
        case 4 % 10 MHz
            Ch_bandwidth = 10e6;

                                BW1 = Ch_bandwidth/1e6; %Suponemos
                                todos los canales iguales
                                BW2 = Ch_bandwidth/1e6;
                                Spacing_Channels_MHz = floor((BW1 +
BW2 - 0.1*abs(BW1 - BW2))/0.6)*0.3; %En MHZ
                                Spacing_Channels =
                                (Spacing_Channels_MHz*1e6)/F_s;
        case 5 % 15 MHz
            Ch_bandwidth = 15e6;

                                BW1 = Ch_bandwidth/1e6; %Suponemos
                                todos los canales iguales
                                BW2 = Ch_bandwidth/1e6;
                                Spacing_Channels_MHz = floor((BW1 +
BW2 - 0.1*abs(BW1 - BW2))/0.6)*0.3; %En MHZ
                                Spacing_Channels =
                                (Spacing_Channels_MHz*1e6)/F_s;
        case 6 % 20 MHz
            Ch_bandwidth = 20e6;

                                BW1 = Ch_bandwidth/1e6; %Suponemos

```

```

todos los canales iguales
        BW2 = Ch_bandwidth/1e6;
        Spacing_Channels_MHz = floor((BW1 +
BW2 - 0.1*abs(BW1 - BW2))/0.6)*0.3; %En MHZ
        Spacing_Channels =
        (Spacing_Channels_MHz*1e6)/F_s;

        end
    case 2
        Spacing_Channels = input('Type the spacing for
the channels in Hz: ');
        Spacing_Channels = Spacing_Channels/F_s;
    end
end

```

```

function [Selecting_Number_Of_Channels,upsampling_factor] =
Number_Channels(Max_B,F_s,Spacing_Channels);

    MaximumNumberOfChannels = floor(((Max_B-
F_s)/(Spacing_Channels*F_s))+1);

    if (ceil(Spacing_Channels*(MaximumNumberOfChannels-1) + 1)*F_s
> 160e6)
        MaximumNumberOfChannels = MaximumNumberOfChannels - 1;
    end

    for i=1:MaximumNumberOfChannels
        possibili_valori2(i) = {int2str(i)};
    end

    Selecting_Number_Of_Channels =listdlg('PromptString','Select
Number of Channels:',...
        'SelectionMode','single',...
        'ListString',possibili_valori2);
    upsampling_factor = ceil((Spacing_Channels *
(Selecting_Number_Of_Channels-1)) + 1);

end

```

A partir de estas funciones el usuario puede elegir el parámetro S, que es el que desplazará más o menos los canales generados, y el parámetro N, que dependerá de S, ya que el ancho de banda disponible es limitado (por lo que no podemos tener un número ilimitado de canales). Además, se incluye la posibilidad de establecer un espaciado nominal entre canales. Esto es debido a que según el estándar LTE se puede implementar el espaciado libremente pero aun con ello recomienda ciertos valores. Esto queda recogido en la Tabla 2:

Channel Bandwidth (MHz)	Nominal Channel Spacing Between Adjacent Carriers (MHz)					
	1.4	3.0	5	10	15	20
1.4	1.20	2.10	3.00	5.10	7.50	9.60
3	—	3.00	3.90	6.00	8.40	10.50
5	—	—	4.80	7.20	9.30	11.70
10	—	—	—	9.90	12.00	14.40
15	—	—	—	—	15.00	17.10
20	—	—	—	—	—	19.80

Tabla 2. Espaciado nominal entre canales según LTE Release 15 [5]

Estos valores han sido calculados según la siguiente expresión también proporcionada en el Release 15:

$$Nominal\ channel\ spacing(MHz) = \left\lfloor \frac{BW_{Channel(1)} + BW_{Channel(2)} - 0.1|BW_{Channel(1)} - BW_{Channel(2)}|}{0.6} \right\rfloor 0.3$$

A continuación se muestra un ejemplo de la interfaz añadida (la respectiva a la modulación, ancho de banda y demás parámetros continúa siendo la misma) y la simulación de la transmisión de 8 canales de 10 MHz con un espaciado nominal de 9.9 MHz. En el caso de elegir un espaciado libre, se introduciría el valor deseado por teclado.

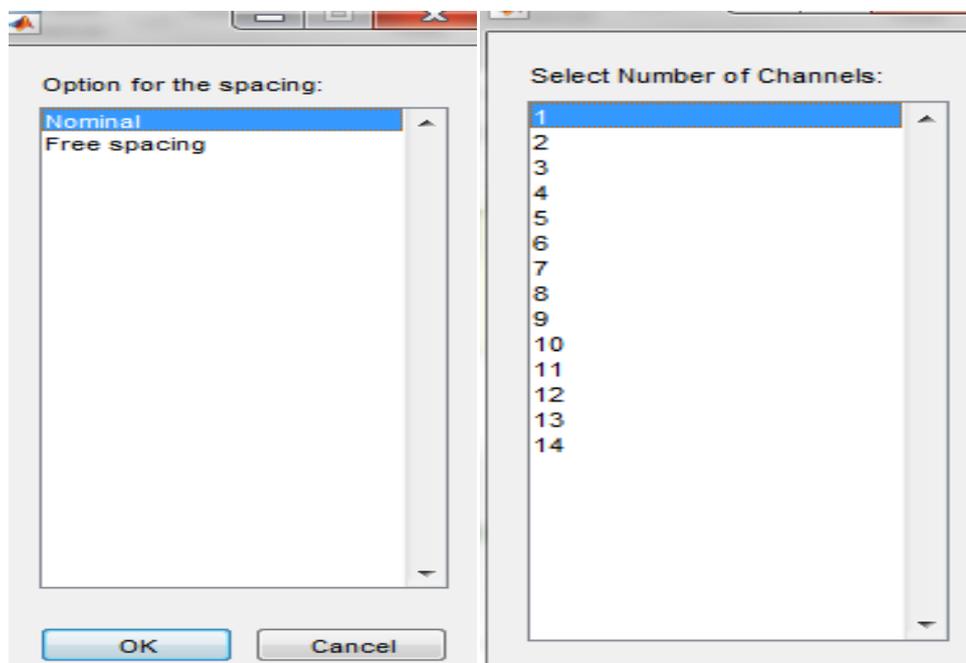


Figura 11. Paneles de selección del espaciado y número de canales.

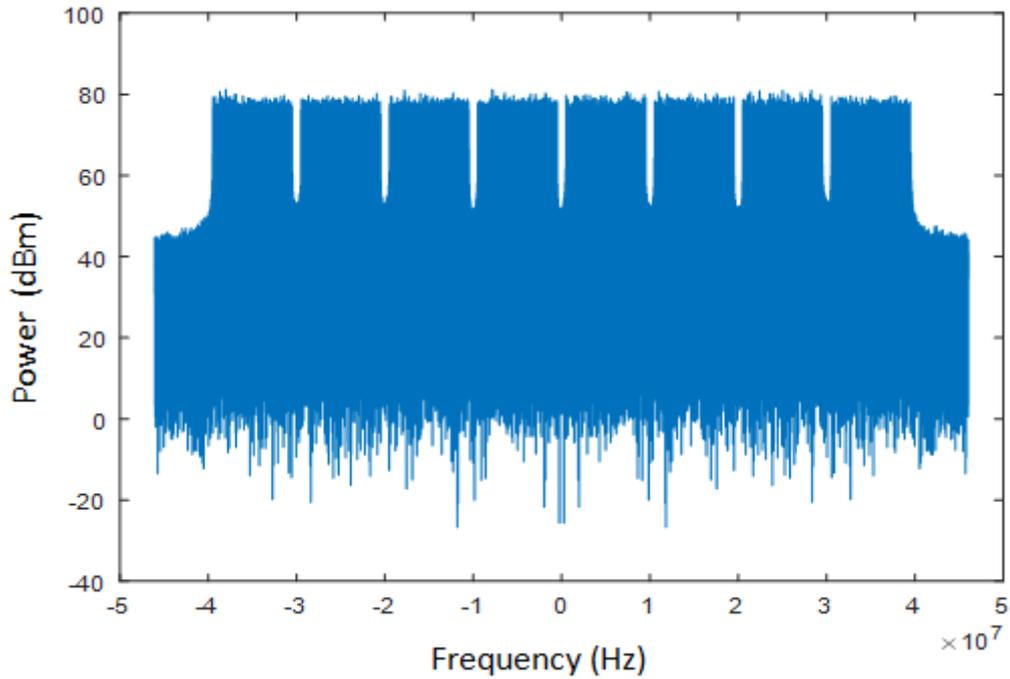


Figura 12. Espectro de los 8 canales de la señal recibida con un espaciado nominal de 9.9 MHz

Además, en la Figura 13 se incluye el espectro de la señal recibida de 4 canales con un espaciado arbitrario de 30 MHz para ilustrar el efecto del espaciado.

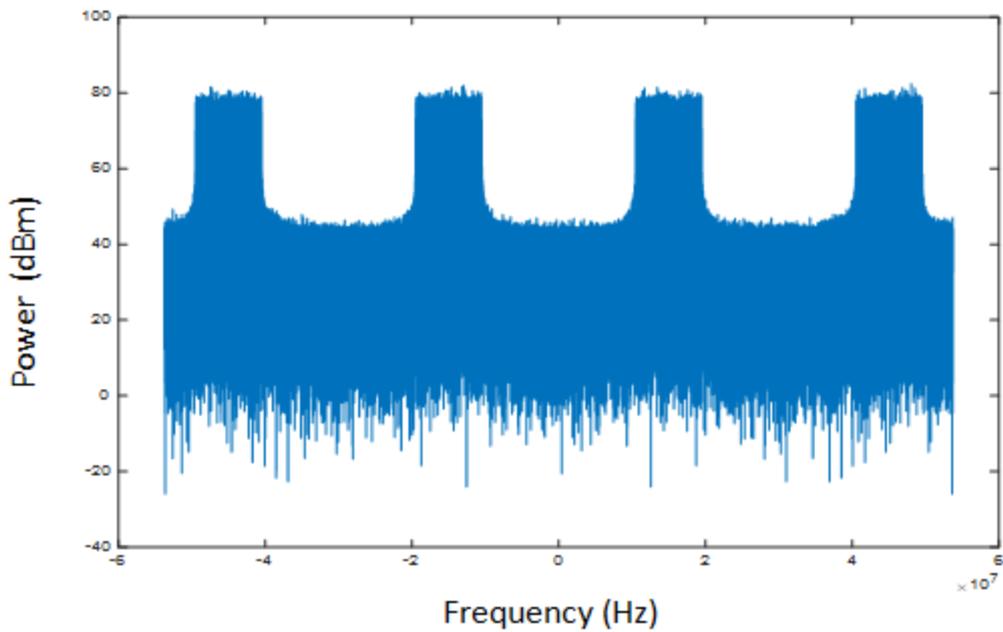


Figura 13. Espectro de los 4 canales de la señal recibida con un espaciado arbitrario de 30 MHz

3. ANÁLISIS DE SISTEMAS RoF BASADOS EN LÁSERES VCSEL A 850 nm

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ENLACE DE RoF

Como ya se ha mencionado anteriormente, el objetivo es poner a prueba la transmisión multicanal en sistemas de RoF de bajo coste y evaluar la calidad y viabilidad del enlace. Para ello, el esquemático de la Figura 14 ha sido desarrollado:

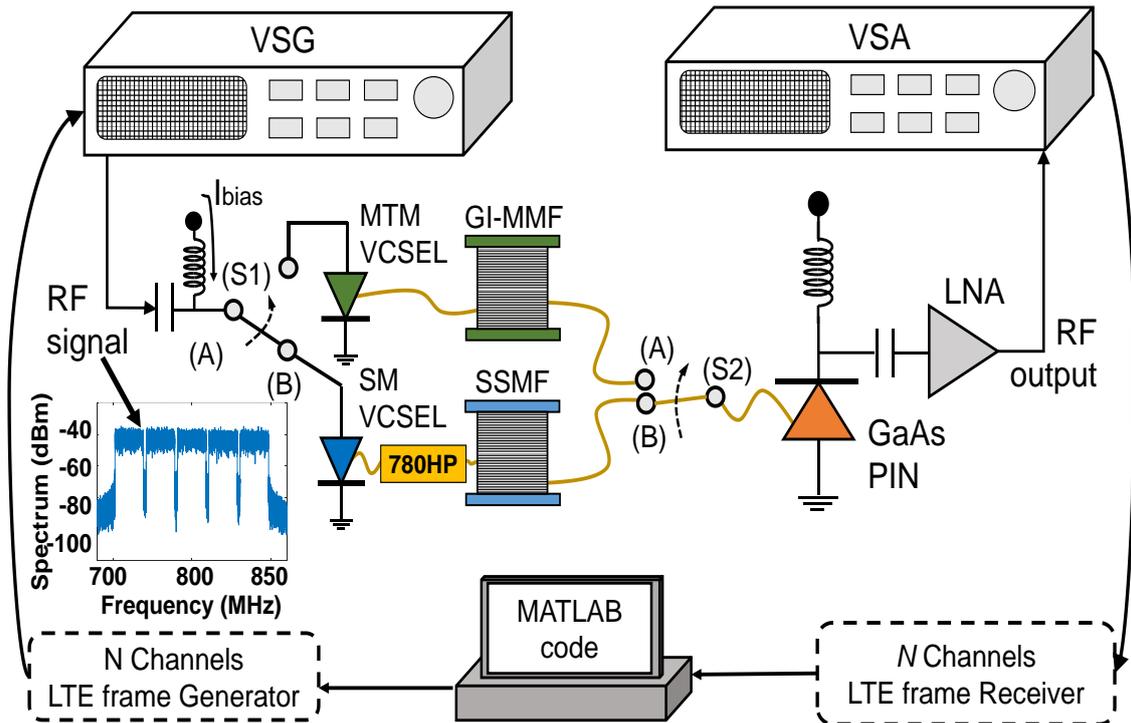


Figura 14. Esquemático del sistema de RoF [6] [7]

En primer lugar, todo el enlace está diseñado para trabajar sobre una portadora de RF de 750MHz. Para la conversión eléctrico-óptica y posterior transmisión de la señal por el canal se han puesto a prueba dos 'subsistemas' diferentes.

El primero de ellos, la realiza a partir de un VCSEL monomodo en primera ventana de transmisión (850 nm). El VCSEL se encuentra acoplado con un tramo muy corto de fibra SSMF (de en torno a 1 metro de longitud) que a su vez se conecta con un tramo de fibra de aproximadamente 5 μm de diámetro del núcleo (denominado 780HP) que actúa como filtro ya que únicamente permite la propagación del modo LP_{01} en primera ventana [7]. A continuación, se conecta al tramo de fibra del tipo SSMF sobre el que se desean realizar las medidas. En el segundo, sin embargo, se ha empleado un VCSEL multimodo a 850 nm que, en lugar de utilizar el tramo de fibra de 780HP para el filtrado, hace uso de un tramo de fibra multimodo (MMF) la cual permite la transmisión de ambos modos.

Como receptor, se ha empleado un fotodiodo PIN de GaAs seguido de un Amplificador de Bajo Ruido (LNA) con una ganancia de en torno a los 40 dB y una figura de ruido (NF) de 2-3 dB a la frecuencia de trabajo. Por último, cabe destacar que se ha tomado un valor de 4.5mA como corriente de polarización del VCSEL (valor que se encuentra entre el umbral y el punto de saturación) y que posee una impedancia de unos 50 ohmios a 750 MHz.

La transmisión multicanal se lleva a cabo mediante el software desarrollado en MATLAB ya explicado anteriormente. A partir de él, se generan las muestras en banda base de N canales independientes multiplexados en frecuencia (FDD) que se superponen y son enviados al generador vectorial de señales para la modulación en RF y la transmisión sobre el enlace de RoF. En el receptor, la señal es capturada a través de un analizador de redes vectorial y cada canal es analizado de manera independiente. A través del otro software desarrollado también en MATLAB, se estima la calidad del enlace en términos del EVM. Cabe destacar, que todos los canales transmitidos se consideran con el mismo ancho de banda.

3.2. RESULTADOS DE LA TRANSMISIÓN DE SEÑALES LTE

3.2.1. EL VECTOR DE MAGNITUD DE ERROR (EVM)

Para estimar la calidad, viabilidad y comparar ambos enlaces se ha hecho uso del vector de magnitud de error o EVM. Este es un parámetro que mide la diferencia presente entre el vector del símbolo recibido y el vector del símbolo transmitido (en realidad el que se haya decidido en función del umbral establecido) para cada uno de los símbolos transmitidos. Matemáticamente (su error cuadrático medio) puede computarse según la siguiente expresión y su funcionamiento queda bien reflejado en la Figura 15:

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^N e_K}{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^N (I_K^2 + Q_K^2)}}$$

$$e_K = (I_K - \tilde{I}_K)^2 + (Q_K - \tilde{Q}_K)^2$$

Siendo e_k el error medio, I_k el valor en fase (ideal) de la señal de referencia, Q_k el valor en cuadratura (ideal) de la señal de referencia, \tilde{I}_k el valor en fase medido y \tilde{Q}_k el valor en cuadratura medido.

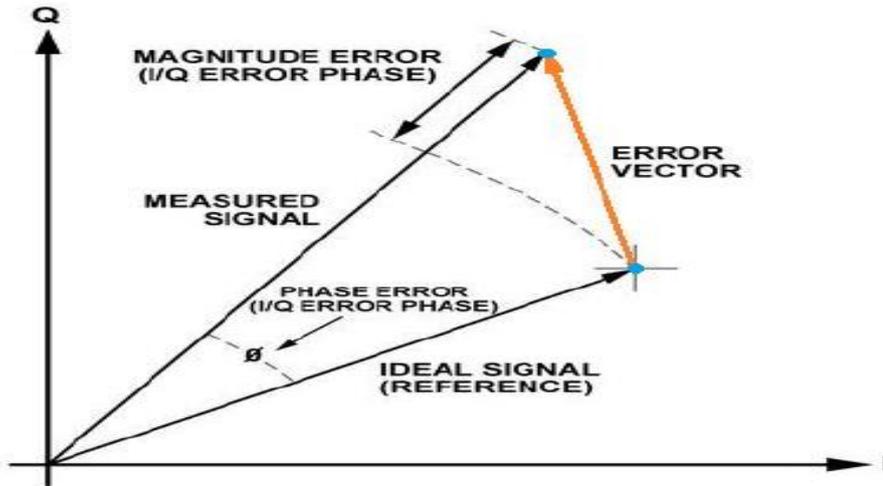


Figura 15. Representación en el plano complejo del EVM [3]

A la hora de establecer como es la calidad del enlace óptico, se ha atendido al tipo de modulación que pueda utilizarse. Para ello se han seguido las recomendaciones de la ITU en el Release 16 acerca del valor máximo admitido para cada modulación en el PDSCH [4].

Modulación	Máximo EVM (%)
QPSK	17.5
16 QAM	12.5
64 QAM	8
256 QAM	3.5
1024 QAM	2.5

Tabla 3. EVM admitido según la modulación empleada.

3.2.2. RAMA SSMF

En primer lugar se ha analizado la rama del tramo de fibra SSMF. Para ello el primer paso ha sido determinar la potencia óptima a la que transmitir la señal. Con tal fin se ha efectuado un barrido en potencia para 1 y 5 canales de 20 MHz con espaciado nominal y un tramo de fibra muy corto (alrededor de 1 metro de longitud) y se ha evaluado el EVM. Los resultados se muestran en la Figura 16.

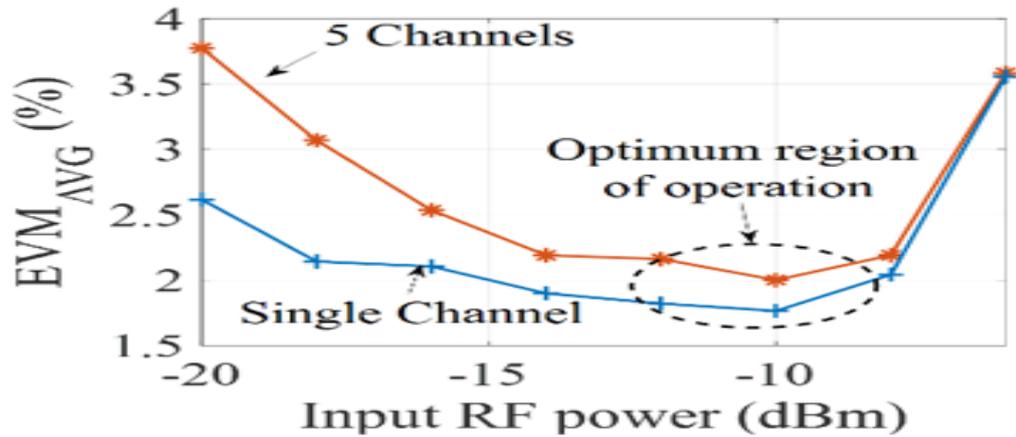


Figura 16. Barrido en potencia para el tramo de fibra SSMF [7]

A la vista de los resultados, se ha tomado una potencia de transmisión de la señal de RF de -9 dBm. Una vez determinada la potencia de transmisión, se han realizado medidas del EVM para tramos de fibra de 100, 300, 700, 1000, 1500 y 2000 metros. En las Figuras 16 y 17 se muestra el EVM en función de la distancia según el número de canales y el EVM en función del número de canales para cada distancia respectivamente. En todos los casos se ha empleado una modulación 256-QAM, con canales de 20 MHz y espaciado nominal.

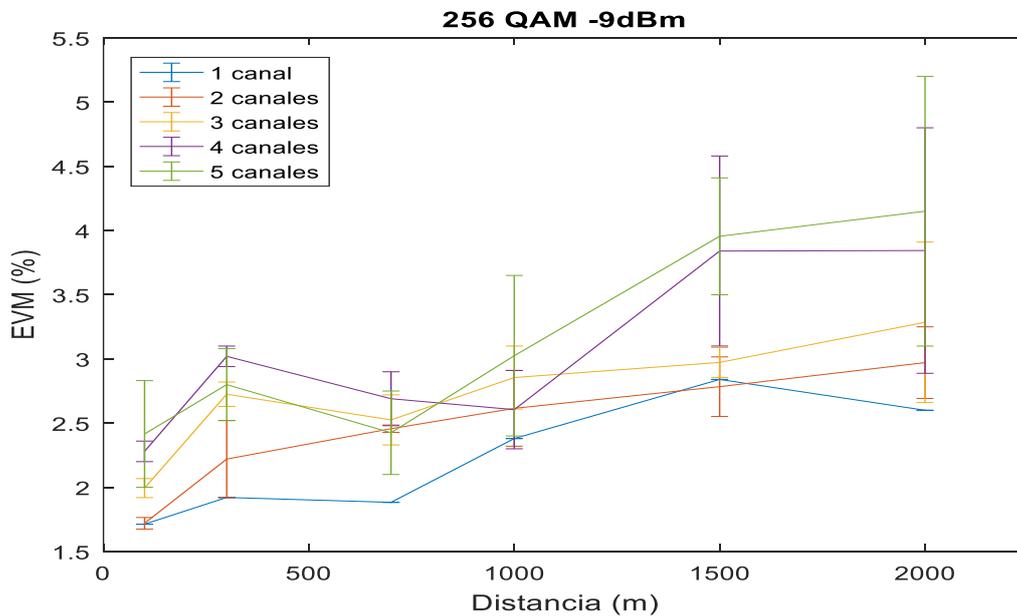


Figura 17. EVM vs Distancia SSMF

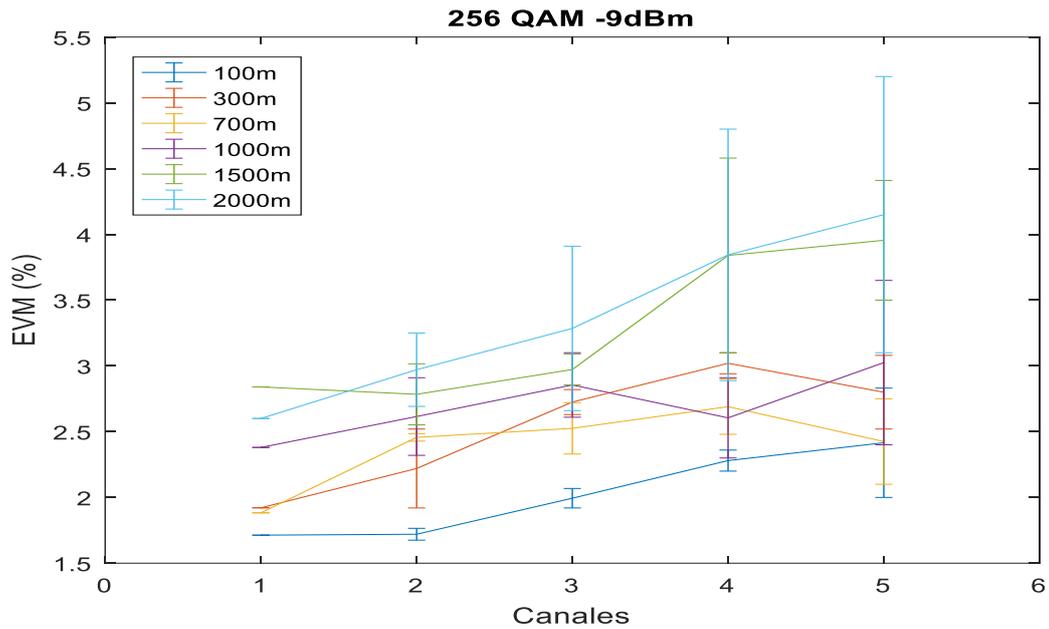


Figura 18. EVM vs Número de Canales SSMF

Para la representación de las figuras se ha utilizado el comando de MATLAB *errorbar*, el cual muestra el valor máximo, mínimo y medio de las medidas realizadas. Como cabía esperar, el EVM aumenta tanto con la distancia como con el número de canales. Además puede verse que la tendencia que sigue este crecimiento es muy similar independientemente del número de canales. Para determinar la calidad del enlace, en la Figura 19 se muestra el tipo de modulación admisible en función de la longitud del tramo de fibra.

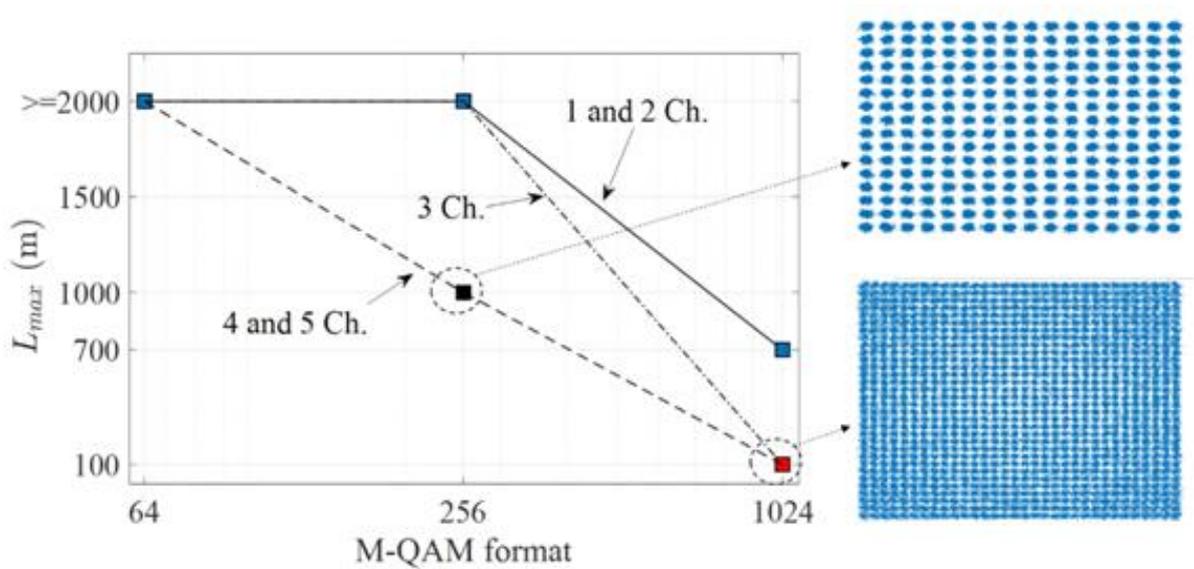


Figura 19. Modulación vs Distancia SSMF

Puede verse claramente como la modulación 1024-QAM es muy sensible y únicamente puede emplearse en longitudes muy cortas, mientras que otras más comunes como 256-QAM o 64-QAM pueden emplearse para distancias más grandes.

3.2.3. RAMA MMF

Exactamente el mismo procedimiento se ha seguido para analizar la rama del tramo de fibra MMF. Únicamente difieren la longitud de los tramos de fibra ya que en el laboratorio no se disponía de los mismas longitudes que en el caso anterior. En este caso se han empleado tramos de 100, 400, 700, 1100, 1400 y 1700 metros.

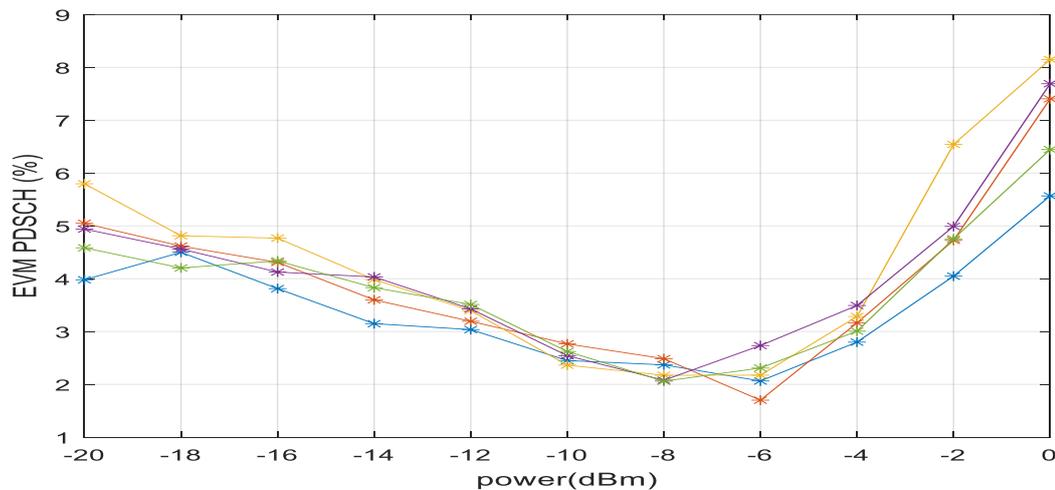


Figura 20. Barrido en potencia de distintos números de canales para el tramo de fibra MMF

En este caso se ha empleado una potencia de -7 dBm para la señal de RF.

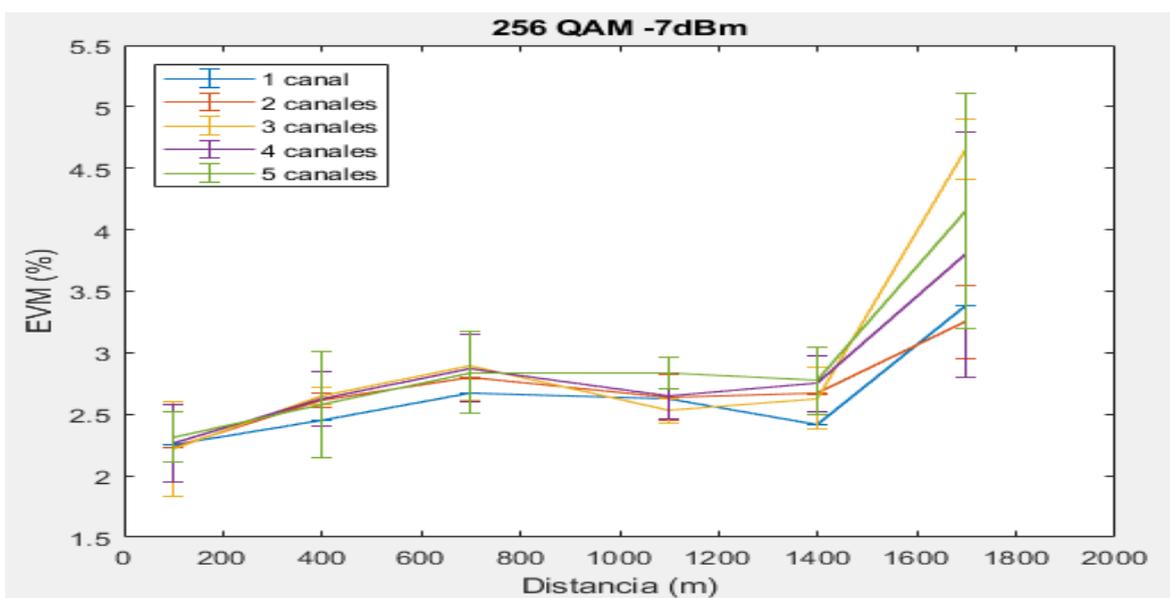


Figura 21. EVM vs Distancia MMF

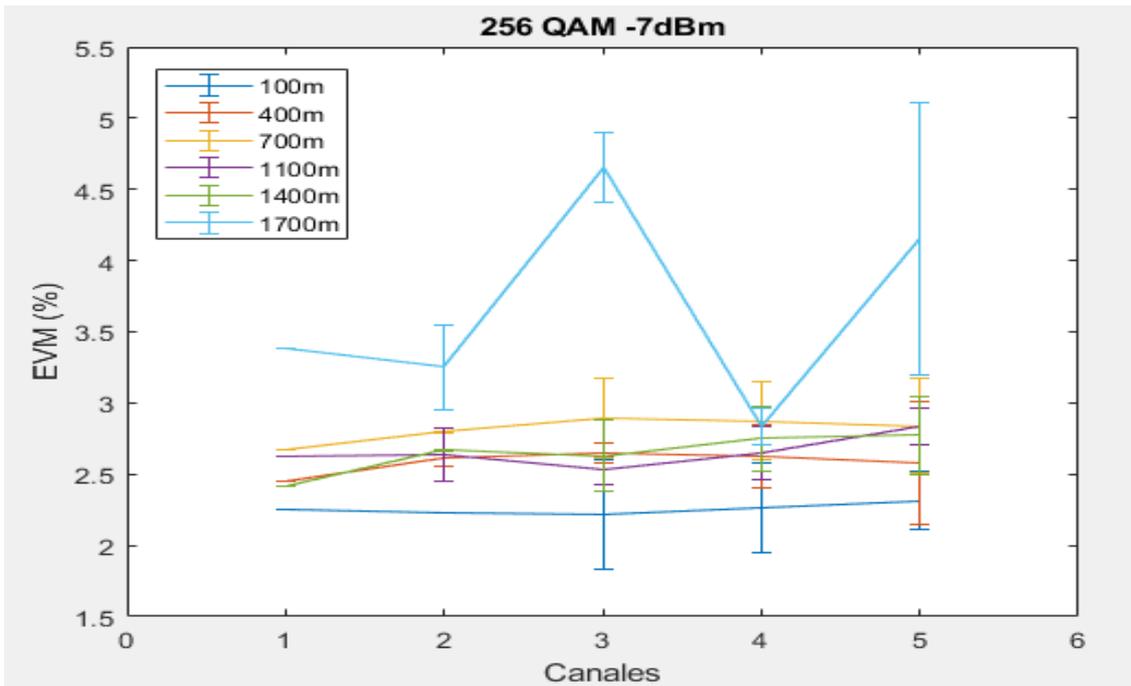


Figura 22. EVM vs Número de Canales MMF

El tipo de modulación admisible en función de la longitud de la fibra se refleja en la Figura 23.

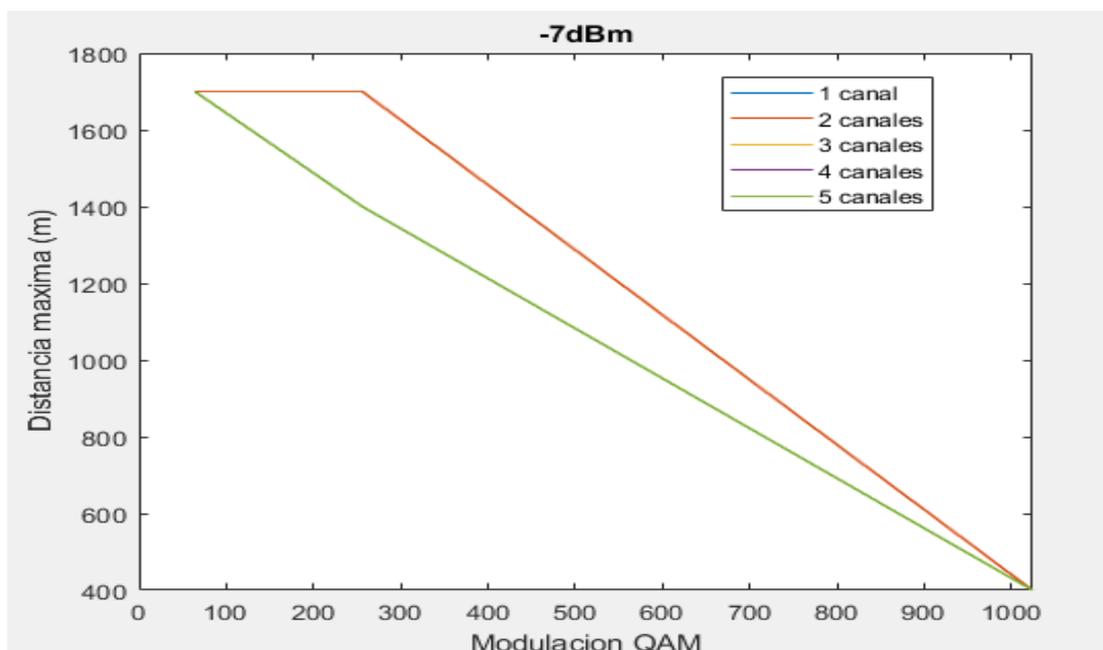


Figura 23. Modulación vs Distancia MMF

Es importante remarcar que los casos de 1, 2 y 3 canales y 4 y 5 canales comparten las mismas limitaciones y por ello sus gráficas han sido superpuestas y únicamente aparecen dos de ellas.

3.2.4 COMPARACIÓN DE AMBOS ENLACES

La comparación en la efectividad entre ambos enlaces queda bien reflejada en la Figura 24.

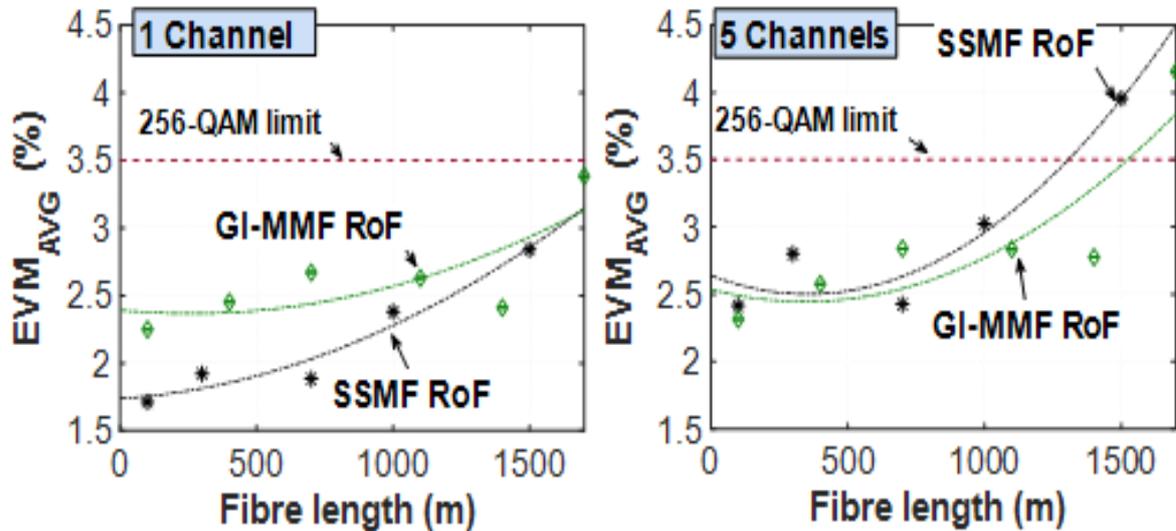


Figura 24. EVM vs Distancia para el caso de 1 canal (a) y 5 canales (b) para señales LTE de 20 MHz centradas en 750 MHz para los enlaces de RoF basados en SSMF y MMF [6]

Como cabía esperar, en el enlace RoF basado en el tipo de fibra MMF se han obtenido muy buenos rendimientos gracias principalmente a la mayor dinámica del MTM VCSEL en comparación con el SM.

Por otro lado, para el enlace compuesto por el SM VCSEL y SSMF que, como ya se mencionó, exhibe un menor costo global en comparación con el MMF, los rendimientos alcanzados son comparables, principalmente gracias a la mitigación de la propagación bimodal a 850 nm aprovechando una técnica de bajo costo de filtrado previo.

Para ambos enlaces, los rendimientos alcanzados en el caso de 5 canales transmitidos con un ancho de banda de 20 MHz y espaciado nominal de 19.9 MHz cumplen con el estándar LTE para 256-QAM hasta el kilómetro de distancia. Remarcar también que la modulación 64-QAM ($EVM < 8\%$) es ampliamente alcanzable por varios kilómetros para ambos enlaces RoF y las grandes limitaciones de la modulación 1024-QAM ($EVM < 2.5\%$) para largas distancias.

Estos resultados pueden sugerir el uso de enlaces basados en SSMF debido a su menor costo posible y la evidencia intrínseca futura de los SSMF. También hay que tener en cuenta que se pueden alcanzar rendimientos mayores aumentando la dinámica del SM VCSEL (es decir, el acoplamiento óptico con el SSMF).

4. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA (DE) MULTIPLEXACIÓN DE LOS DOS MODOS PRESENTES A 850 nm EN SSMF

4.1 ANÁLISIS DEL PARÁMETRO DE TRANSMISIÓN S_{21}

Como ya se ha mencionado, los sistemas ópticos operantes en primera ventana de transmisión (850 nm) resultan mucho más sencillos de fabricar y por ello más económicos que aquellos operantes en segunda (1310 nm) o tercera ventana (1550 nm) [1] [8]. Sin embargo, a esta longitud de onda, no es posible obtener una transmisión monomodo, lo cual provoca problemas como la dispersión intermodal, el ruido modal, el ruido de partición de modos etc. Para solucionar este problema, el esquema de la Figura 25 ha sido desarrollado:

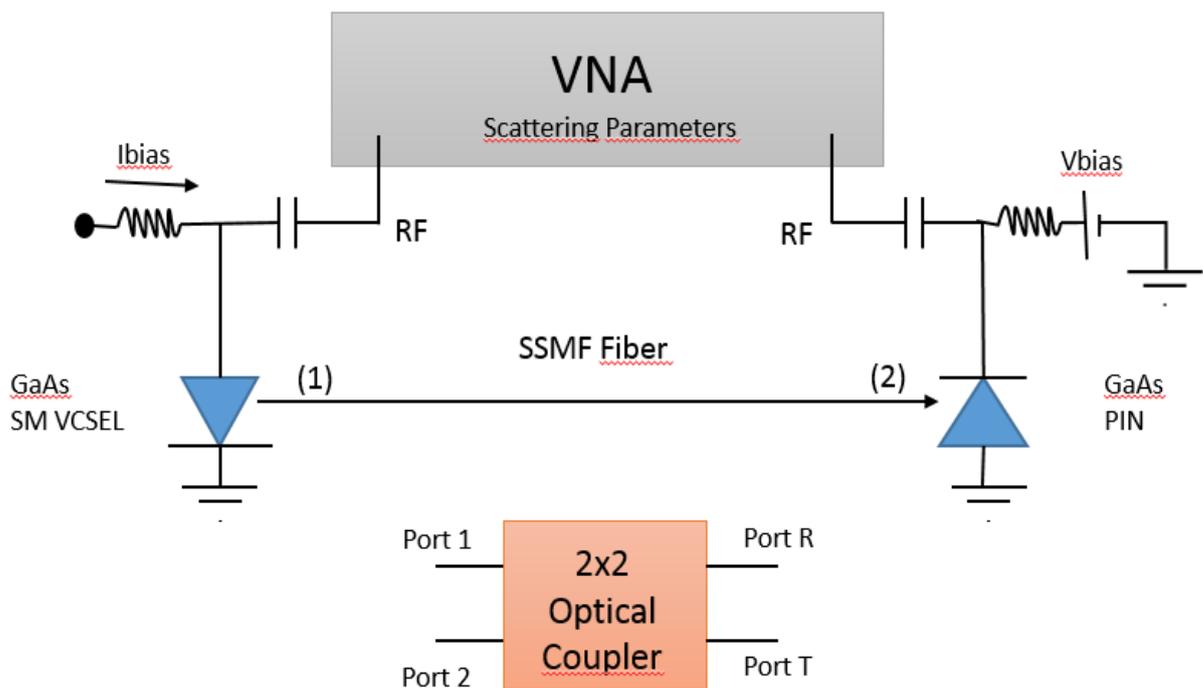


Figura 25. Esquemático para la separación de modos

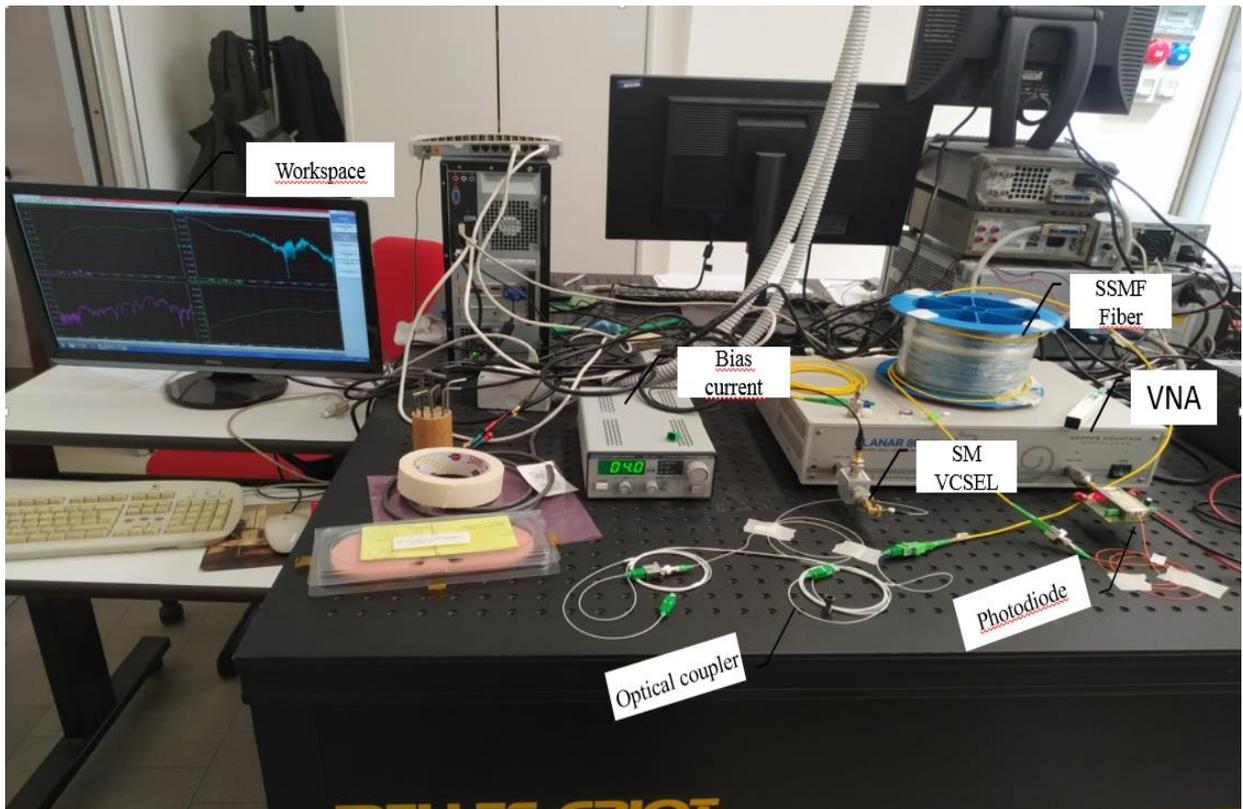


Figura 26. Montaje real para la separación de modos

En la parte de transmisión se ha utilizado un VCSEL de GaAs operante a 850 nm. Este provocará la aparición de dos modos a través del tramo de fibra SSMF: el modo principal o LP_{01} y un modo secundario, el LP_{11} . En recepción se ha utilizado un fotodiodo PIN fabricado también a partir de GaAs el cual transformará la potencia óptica en corriente eléctrica. El analizador de redes vectorial (VNA) transmite la señal al VCSEL y recibe la señal eléctrica del fotodiodo. Como redes de polarización de los dispositivos activos han sido utilizados redes 'Bias T' con valores de 4.5 mA para el transmisor y 12V para el receptor. Además, el VNA ha sido previamente calibrado con el 'Bias T' en el puerto 1 para remover su contribución de la medida total.

La clave del sistema reside en la utilización un acoplador óptico de 4 puertos diseñado para operar a 1550 nm. A partir de él, es posible separar los campos ópticos generados a través de la fibra. La idea principal consiste en que a partir de los parámetros de diseño del acoplador (longitud L , diámetro D y espaciado S), se puede variar el coeficiente de acoplo haciendo que haya un intercambio periódico de potencia entre ambos modos. Si se ajusta correctamente, es posible obtener el modo principal en uno de los puertos de salida y el modo secundario en el otro puerto. Este hecho queda reflejado en la Figura 27:

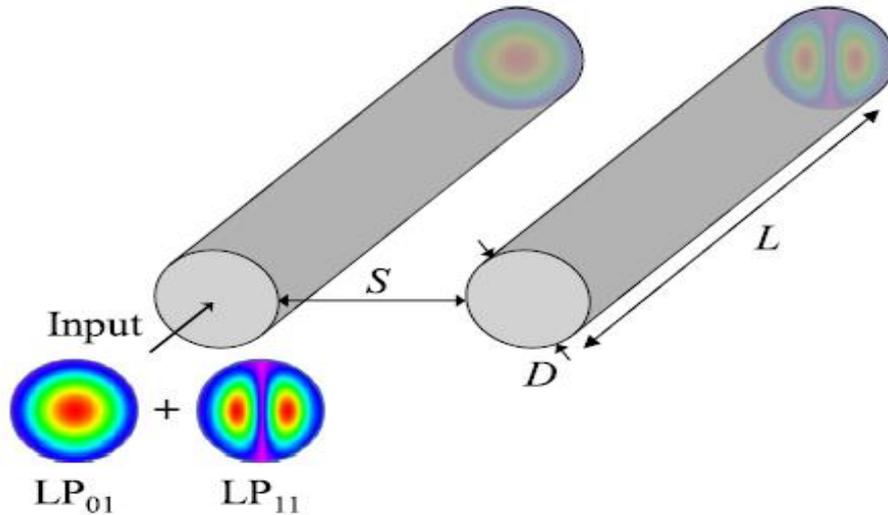


Figura 27. Esquema 3D de la estructura del acoplador como (de) multiplexor [9].

Para el análisis del sistema se han analizado los parámetros S de cuatro formas distintas:

- Sin acoplador
- Acoplador en (1)
- Acoplador en (2)
- Acoplador en (1) y (2) simultáneamente

4.1.1 SIN ACOPLADOR

En primer lugar es necesario realizar una medida de los parámetros S del sistema situando únicamente un tramo de muy poca longitud (alrededor de 1m) y sin incluir el acoplador. Esto se debe a que en los siguientes esquemas únicamente queremos tener en cuenta el efecto del acoplador y la fibra en las medidas, y por ello debemos estimar el efecto de todo elemento externo (como el VNA) para poder eliminarlo de la medida total. Este proceso se conoce como '*de-embedding*'.

4.1.2 ACOPLADOR EN (1)

A partir de las medidas de los parámetros S obtenidas por el VNA y un sencillo código desarrollado en MATLAB, se ha representado en las siguientes figuras el parámetro de transmisión S_{21} para dos tramos de 2000 y 300 metros. El código empleado ha sido:

```
clearall
closeall
```

```

% 2Km
FileReference = 'GS85_4mA_SMF0Km_RXOpto.s2p';
delimiterIn = '';
headerlinesIn = 5;

Reference = ImportData (FileReference, delimiterIn, headerlinesIn);
Reference_abs (:, 1) = Reference.data (:, 1);
Reference_abs (:, 2) = 20 * log10 (. Sqrt (Reference.data (:, 2) ^ 2 +
Reference.data (:, 3) ^ 2.)); % S11
Reference_abs (:, 3) = 20 * log10 (. Sqrt (Reference.data (:, 4) ^ 2 +
Reference.data (:, 5) ^ 2.)); % S21
Reference_abs (:, 4) = 20 * log10 (. Sqrt (Reference.data (:, 6) ^ 2 +
Reference.data (:, 7) ^ 2.)); % S12
Reference_abs (:, 5) = 20 * log10 (. Sqrt (Reference.data (:, 8) ^ 2 +
Reference.data (:, 9) ^ 2.)); % S22

FileTarget_1 = 'GS85_4mA_SMF2Km_RXOpto.s2p'; % FiberWithoutcoupler
FileTarget_2 = 'GS85_4mA_SMF2Km_RXOpto_1R.s2p'; % Fiber Coupler + 1R
FileTarget_3 = 'GS85_4mA_SMF2Km_RXOpto_1T.s2p'; % Fiber Coupler + 1T
FileTarget_4 = 'GS85_4mA_SMF2Km_RXOpto_2R.s2p'; % Fiber Coupler 2R +
FileTarget_5 = 'GS85_4mA_SMF2Km_RXOpto_2T.s2p'; % Fiber Coupler 2R +
FileTargets = {FileTarget_1, FileTarget_2, FileTarget_3, FileTarget_4,
FileTarget_5};
= {leg'.', '1R', '1T', '2R', '2T'};

fori = 1: length (FileTargets)
Target = ImportData (FileTargets {i}, delimiterIn, headerlinesIn);
Target_abs (:, 1) = Target.data (:, 1);
Target_abs (:, 2) = 20 * log10 (. Sqrt (Target.data (:, 2) ^ 2 +
Target.data (:, 3) ^ 2.)); % S11
Target_abs (:, 3) = 20 * log10 (. Sqrt (Target.data (:, 4) ^ 2 +
Target.data (:, 5) ^ 2.)); % S21
Target_abs (:, 4) = 20 * log10 (. Sqrt (Target.data (:, 6) ^ 2 +
Target.data (:, 7) ^ 2.)); % S12
Target_abs (:, 5) = 20 * log10 (. Sqrt (Target.data (:, 8) ^ 2 +
Target.data (:, 9) ^ 2.)); % S22
for j = 1: 5 S11 S21 S12% Frequency S22
if j == 1
Results_abs (:, j) = Target_abs (:, j);
else
Results_abs (:, j) = Target_abs (:, j) - Reference_abs (:, j);

```

```

end
end

figure (1)
plot (Results_abs (:, 1) / 1e9, Results_abs (:, 3)) hold on
xlabel ('Frequency (GHz)')
ylabel ('Magnitude (dB)')
xlim ([0,1.5]);
title ('S21 2Km')
end

legend (leg, 'Location', 'South')

```



Figura 28. Ejemplo de medida de los parámetros S

En las siguientes figuras se muestra el parámetro de transmisión S_{21} después del proceso de *de-embedding*. En ellas, ‘.’ representa el caso sin acoplador y ‘1R’, ‘1T’, ‘2R’, y ‘2T’ los casos con el acoplador en sus distintas combinaciones.

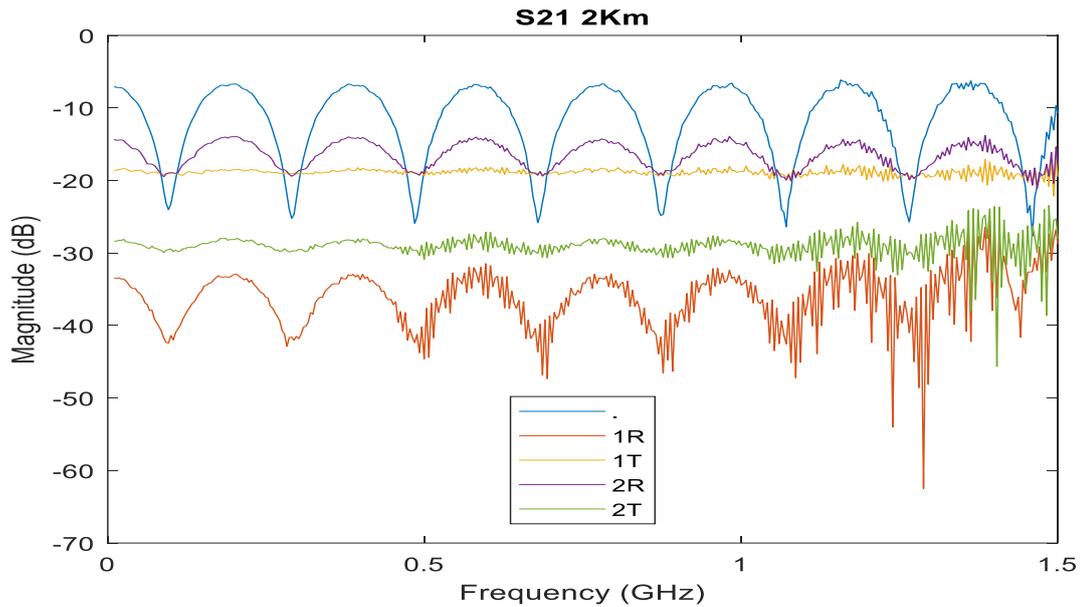


Figura 29. Parámetro de transmisión S_{21} para un tramo de 2000 metros después del *de-embedding*

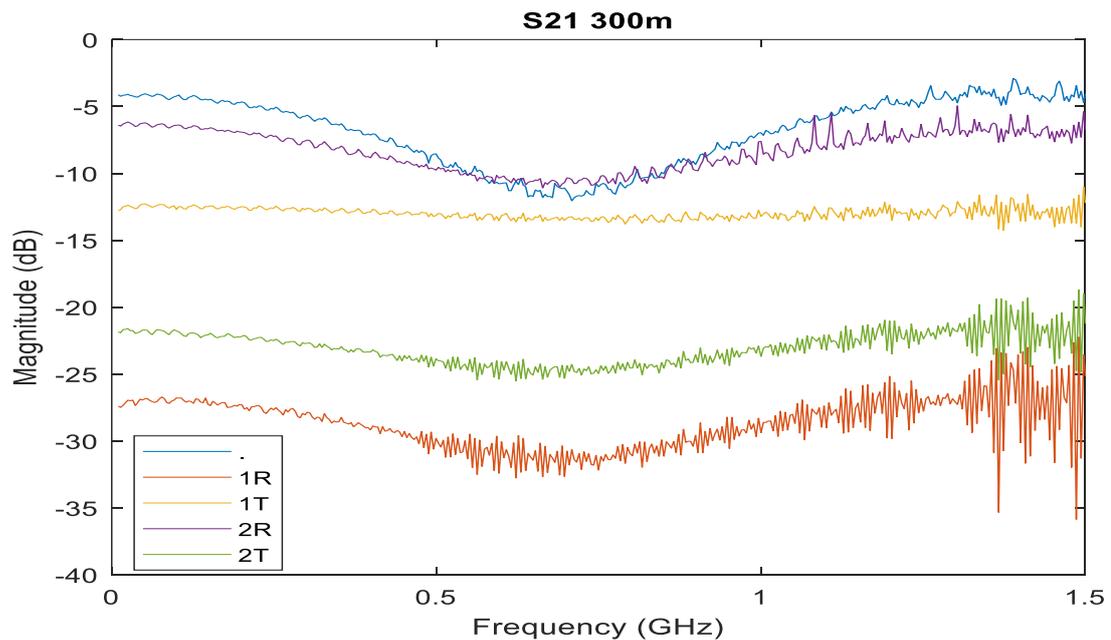


Figura 30. Parámetro de transmisión S_{21} para un tramo de 300 metros después del *de-embedding*

Acerca de los resultados hay varios aspectos a destacar. En primer lugar, debe hacerse mención a que se han representado cada una de las combinaciones de entrada y salida del acoplador, así como el caso en el que únicamente se incluye el tramo de fibra sin acoplador. Por otro lado, el campo de los diversos modos tiene un comportamiento sinusoidal. Es por ello que cuanto más significativo sea el peso de cada modo, mayores

interferencias habrá entre ellos. En definitiva, el resultado es que cuanto más plana sea la curva representada implica una mejor separación de los modos, ya que no se producen interferencias destructivas entre los modos.

Si comparamos ambas longitudes del tramo de fibra, en primer lugar podemos ver que, como cabe esperar, la atenuación sufrida para cada curva es la misma. Sin embargo podemos ver que cuanto mayor es la distancia más inestable se vuelve la interacción entre ambos modos. Aun con ello, en ambos casos podemos concluir que las combinaciones de los puertos 1 con T y 2 con R dan lugar a los mejores resultados.

Por otro lado, una vez obtenidos los resultados, es necesario desarrollar un modelo para ajustar las curvas y ver cuál es el 'peso' de cada modo. Para tal fin, se ha hecho uso de la siguiente expresión [10]:

$$|S_{21}| = \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{N_M} A_m^2 \cos(\omega_{RF} \tau_m L)\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{N_M} A_m^2 \sin(\omega_{RF} \tau_m L)\right)^2}$$

Donde N_M representa el número total de modos (en nuestro caso 2), A_m es el 'peso' relativo de cada modo, ω_{RF} es la pulsación, τ_m es el retardo medio de cada modo y L la longitud del tramo de fibra.

Además, debe cumplirse:

$$A_1^2 + A_2^2 = 1 ; A_1 > 0.5$$

Ya que la expresión está normalizada para los valores de A_m y la potencia del modo principal se considera siempre mayor que la del secundario.

A partir del siguiente código desarrollado en MATLAB se muestran los resultados:

```
% 2Km
L = 2000 % m
f_RFmin = 0.09596e9 % Distancia entre 0 Hz y el primer mínimo
delta_tau = 1 / (2 * L * f_RFmin);
c = 3e8 % M / s
n = 1.4564; % Índice de refracción
tau_1 = n / c;
tau_2 = tau_1 + delta_tau;
A1 = 0.6554; % A1 > 0.5
f = linspace (1e7, 3e9, 801);
w_rf = 2 * pi * f;
A2 = sqrt (1 - A1 ^ 2);
i_out = sqrt ((A1. ^ 2 * cos (w_rf. * tau_1. * L) + A2. ^ 2 * cos
(w_rf. * tau_2. * L)). ^ 2 + (A1. ^ 2 * sin (w_rf . * * tau_1 L) + A2
^ 2 * sin (w_rf * tau_2 * L)) ^ 2).....;
plot (f / 1e9, (20 * log10 (i_out)) - 7.015)
xlabel ('Frequency (GHz)')
ylabel ('Magnitudo (dB)')
xlim ([0,1.5]);
title ('Model approximation');
```

Para 2000 metros:

Sin acoplador

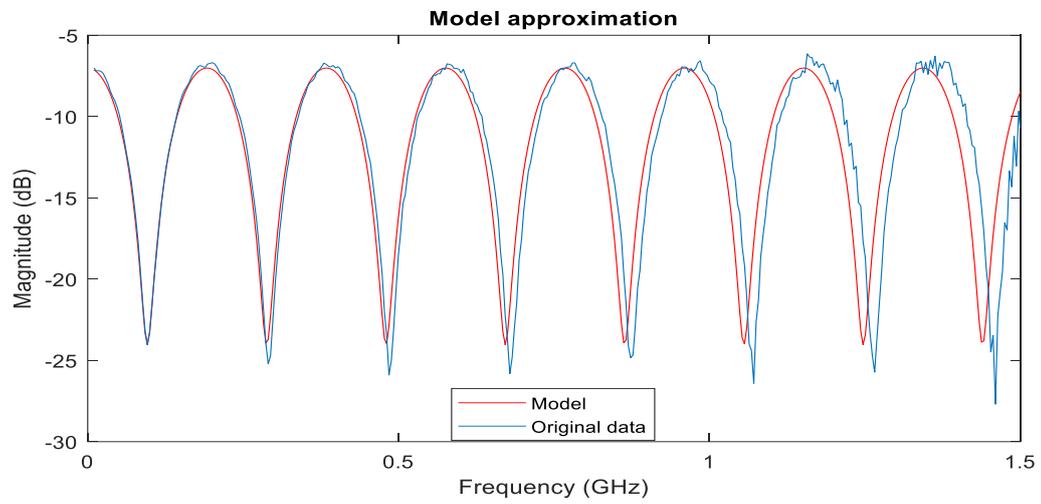


Figura 31. Modelo para una longitud de 2000m sin acoplador

1R

$A_1 = 0.57$

Atenuación = -33.43dB

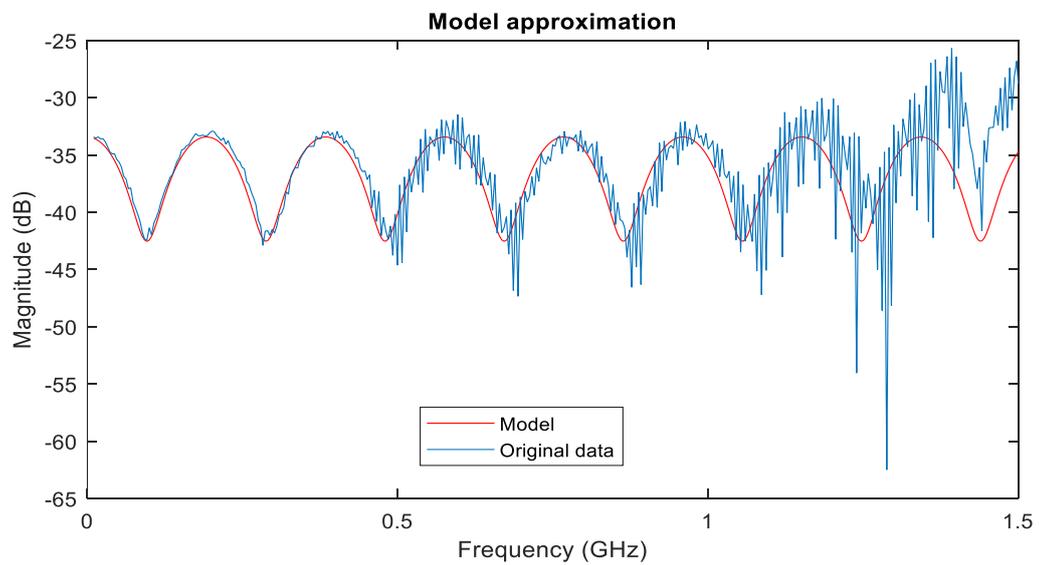


Figura 32. Modelo para una longitud de 2000m con acoplador entrada 1 salida R

1T

$A_1 = 0.9825$

Atenuación = -18.62dB

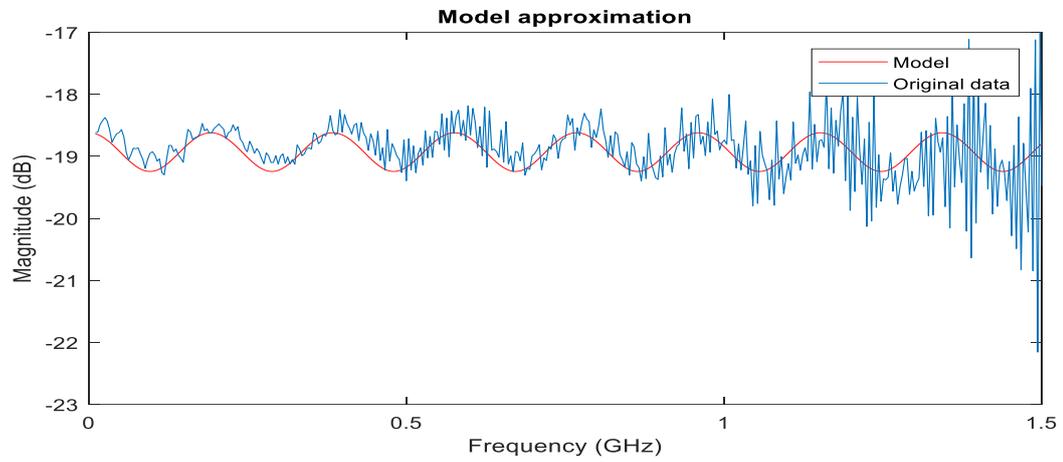


Figura 33. Modelo para una longitud de 2000m con acoplador entrada 1 salida T

2R

$A_1 = 0.886$

Atenuación = -14.33dB

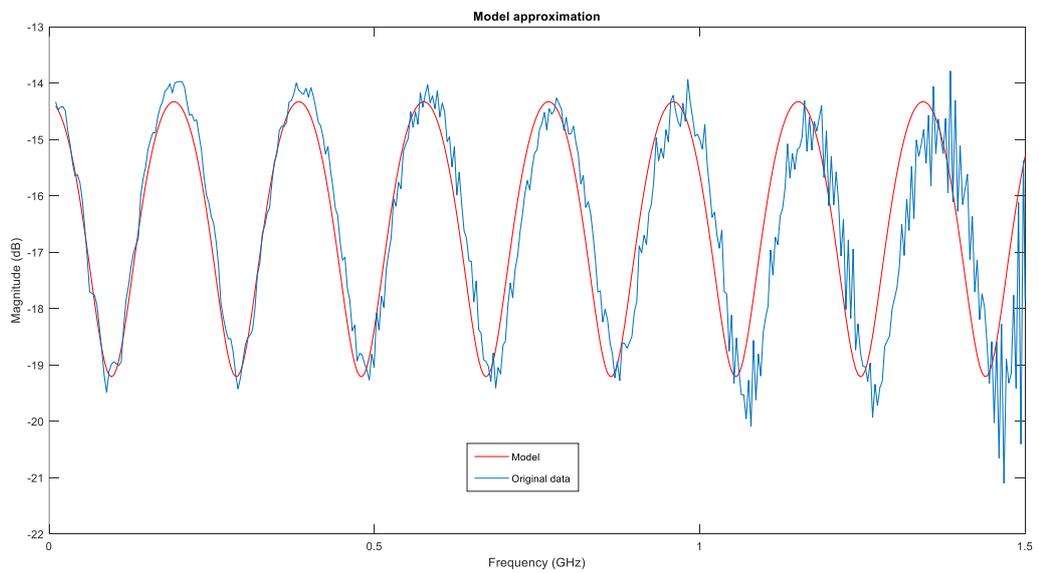


Figura 34. Modelo para una longitud de 2000m con acoplador entrada 2 salida R

2T

$A1 = 0.958$

Atenuación = -28.29dB

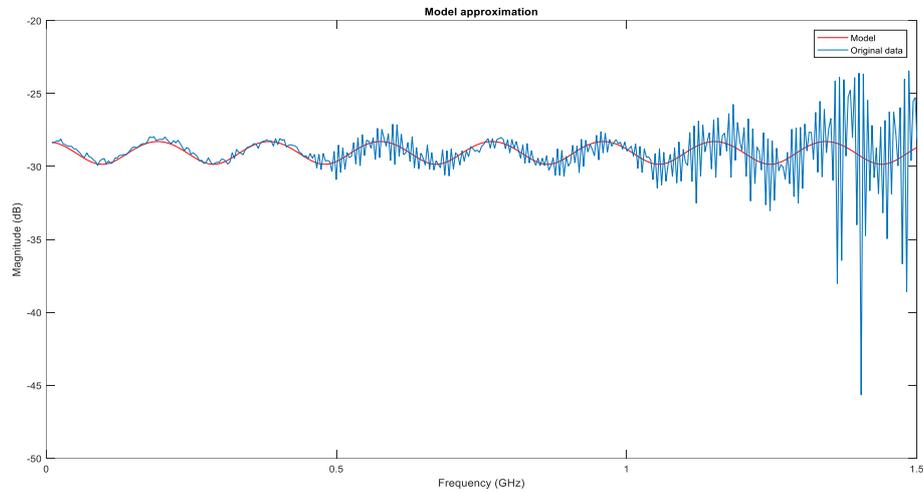


Figura 35. Modelo para una longitud de 2000m con acoplador entrada 1 salida R

El mismo procedimiento se ha realizado también para el tramo de fibra de 300 metros de longitud:

1R

$A1 = 0.887$

Atenuación = -27.4 dB

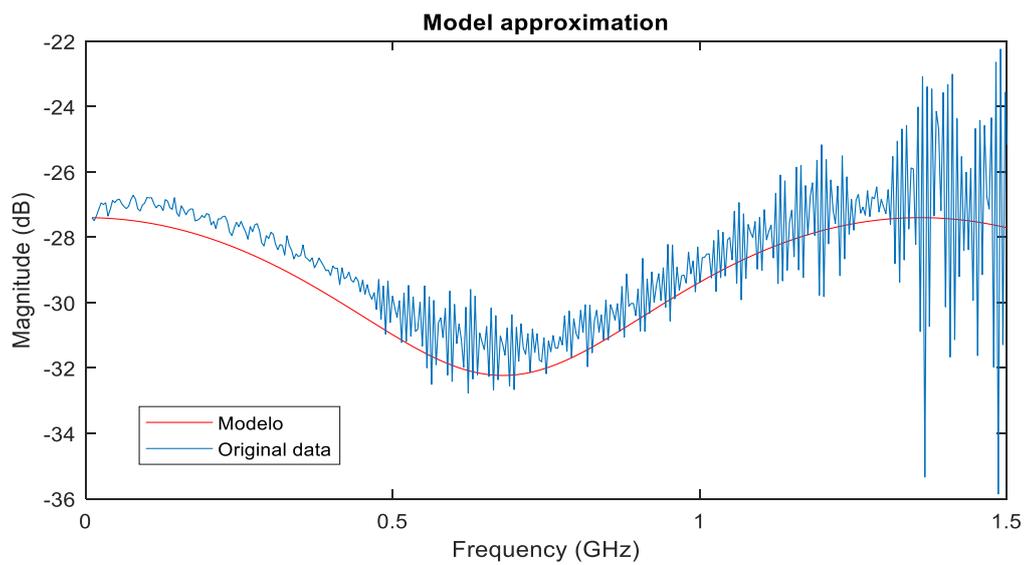


Figura 36. Modelo para una longitud de 300m con acoplador entrada 1 salida R

1T

$A_1 = 0.98$

Atenuación = -12.76 dB

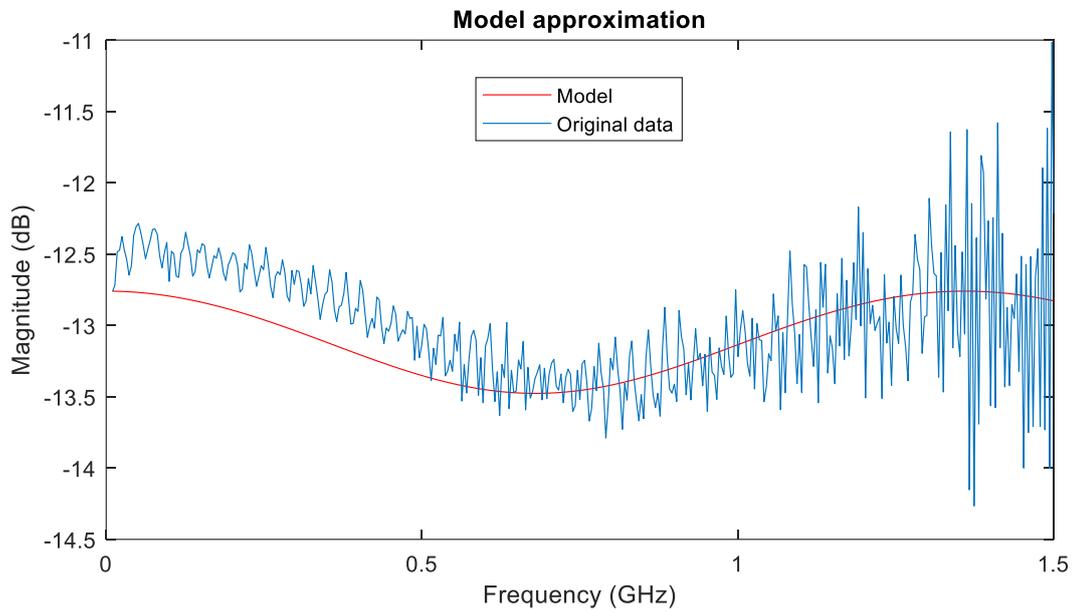


Figura 37. Modelo para una longitud de 300m con acoplador entrada 1 salida T

2R

$A_1 = 0.893$

Atenuación = -6.197

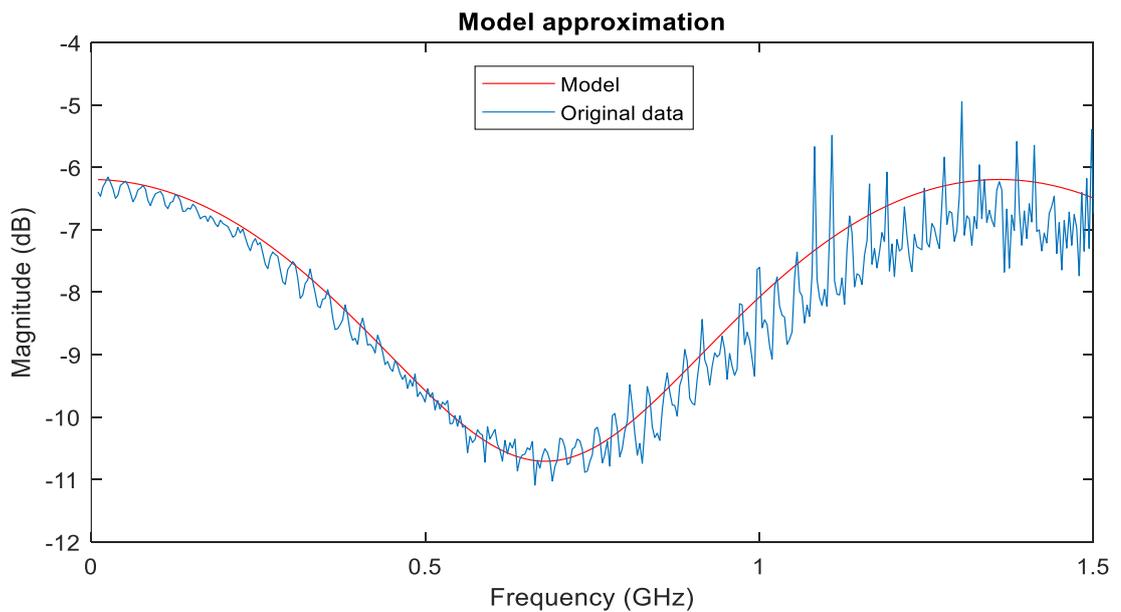


Figura 38. Modelo para una longitud de 300m con acoplador entrada 2 salida R

$2T$

$A_1 = 0.927$

Atenuación = -21.85 dB

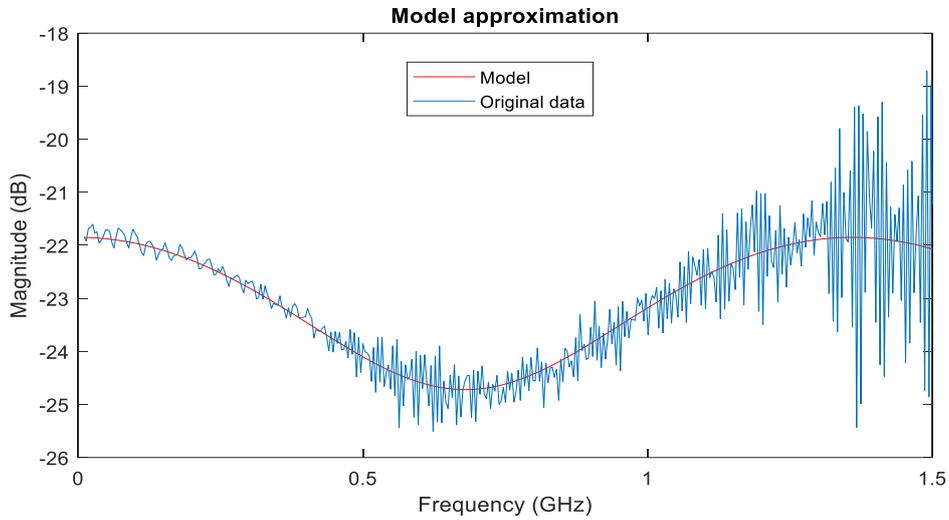


Figura 39. Modelo para una longitud de 300m con acoplador entrada 2 salida T

4.1.3 ACOPLADOR EN (2)

Exactamente el mismo procedimiento se ha empleado en el receptor para analizar el comportamiento del sistema, aunque en este caso solo con el tramo de 2000 metros de longitud.

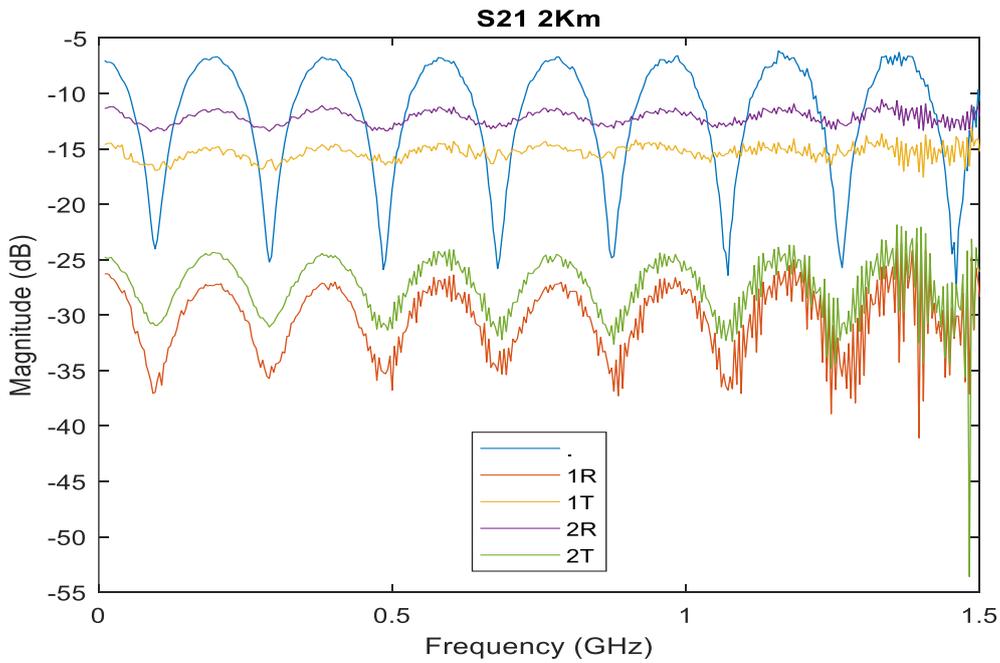


Figura 40. Parámetro de transmisión S_{21} para un tramo de 2000 metros después del *de-embedding*

1R

$A_1 = 0.803$

Atenuación = -26.29 dB

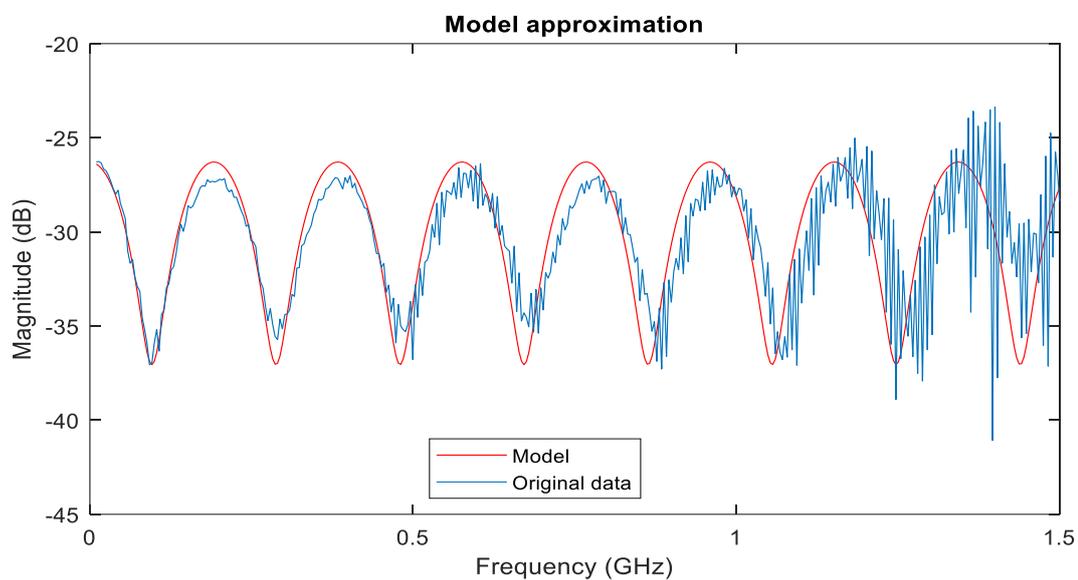


Figura 41. Modelo para una longitud de 2000m con acoplador entrada 1 salida R

1T

$A_1 = 0.94$

Atenuación = -14.61 dB

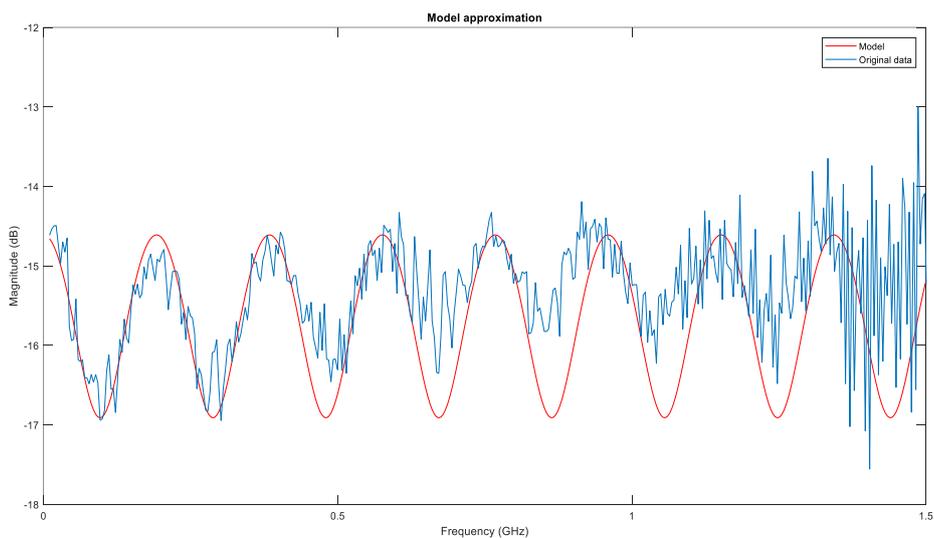


Figura 42. Modelo para una longitud de 2000m con acoplador entrada 1 salida T

2R

$A_1 = 0.955$

Atenuación = -11.35 dB

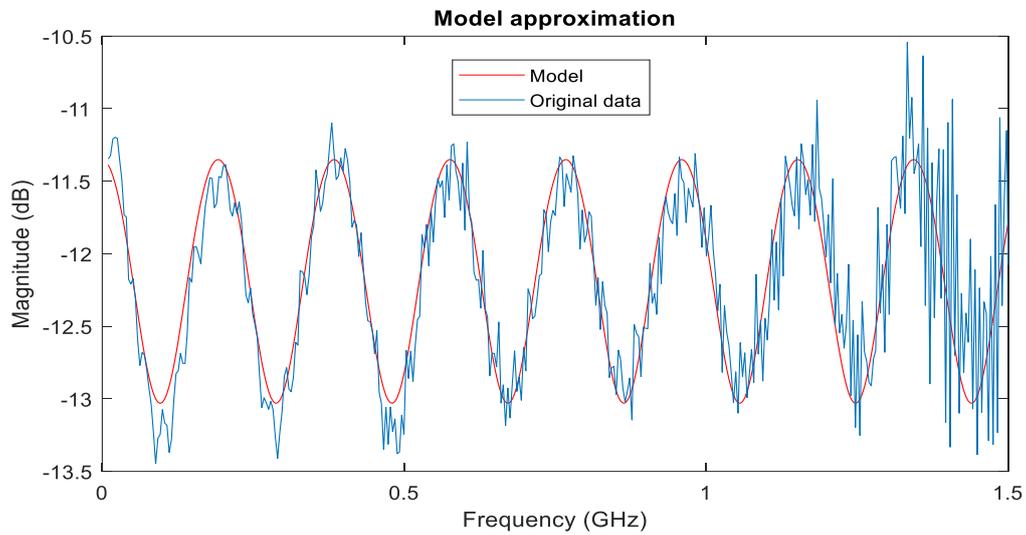


Figura 43. Modelo para una longitud de 2000m con acoplador entrada 2 salida R

2T

$A_1 = 0.864$

Atenuación = -24.76 dB

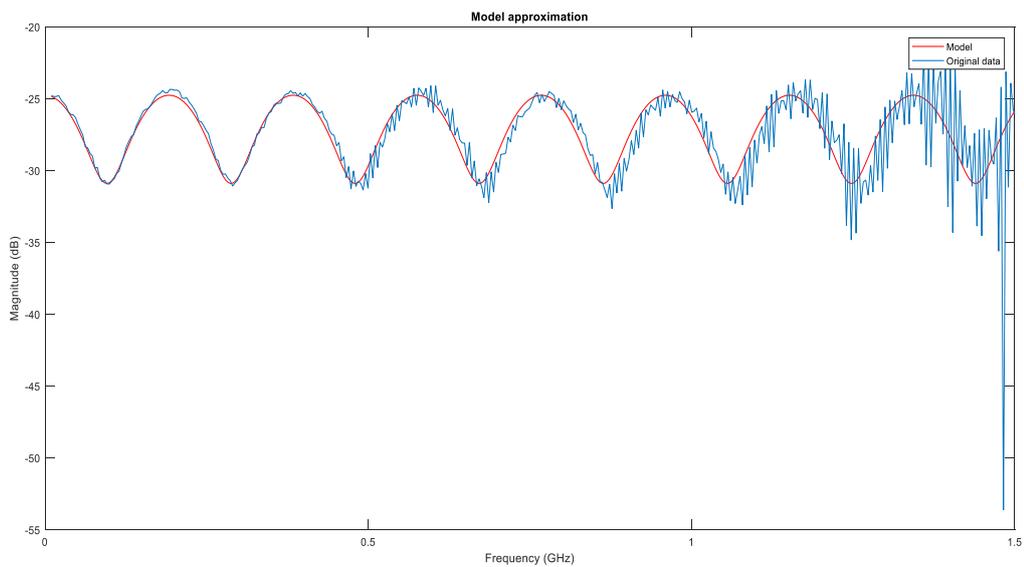


Figura 44. Modelo para una longitud de 2000m con acoplador entrada 2 salida T

En la Tabla 4 se muestra un resumen de los resultados obtenidos:

2000 m (Tx)	A1	Atenuación (dB)	2000 m (Rx)	A1	Atenuación (dB)	300 m (Tx)	A1	Atenuación (dB)
Sin acoplador	0.6554	-7.015	Sin acoplador	0.6554	-7.015	Sin acoplador	0.541	-4.122
1R	0.57	-33.43	1R	0.803	-26.29	1R	0.887	-27.4
1T	0.9825	-18.62	1T	0.94	-14.61	1T	0.98	-12.76
2R	0.886	-14.33	2R	0.955	-11.35	2R	0.893	-6.197
2T	0.958	-28.29	2T	0.864	-24.76	2T	0.927	-21.85

Tabla 4. Resumen de los parámetros del modelo empleado para el parámetro de transmisión

En conclusión, podemos afirmar que las combinaciones 1T (debido a que es en la que el parámetro asociado al modo principal es más alto) y 1R (es la que presenta menor atenuación) son las más propicias para cumplir el objetivo propuesto.

4.1.4 ACOPLADOR EN (1) y (2)

Finalmente, se ha estudiado el efecto de situar los dos acopladores simultáneamente. Sin embargo, antes de ello, se ha analizado el efecto del segundo acoplador. Los resultados se muestran en la Figura 45:

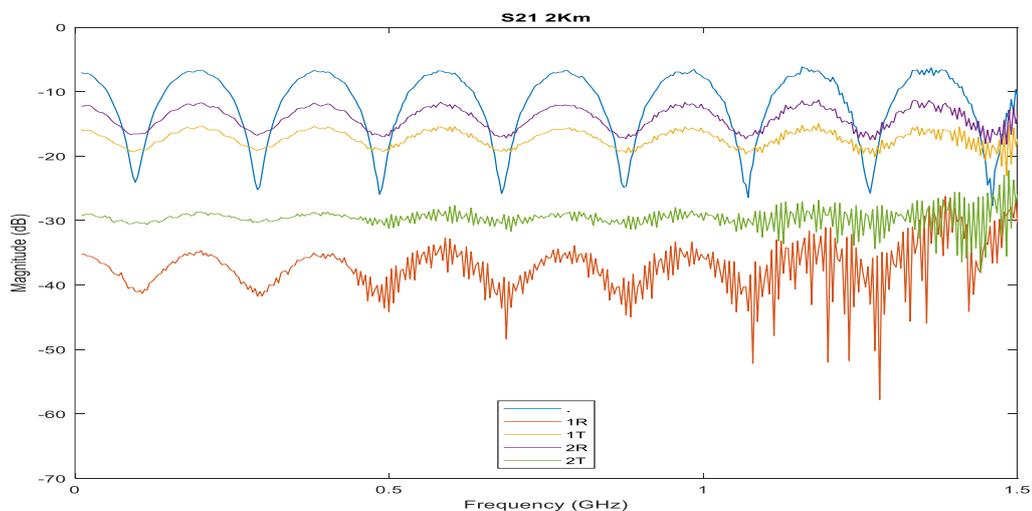


Figure 45. Parámetro de transmisión S_{21} en el segundo acoplador para un tramo de 2000 metros después del *de-embedding*

Podemos ver que los resultados son muy similares a los obtenidos en la figura 15. Para analizar el comportamiento total del sistema, se han analizado las combinaciones más prometedoras, que son 1R-1R, 1R-2T, 2T-1R, 2T-2T. En la Figura 32 se muestran los resultados obtenidos:

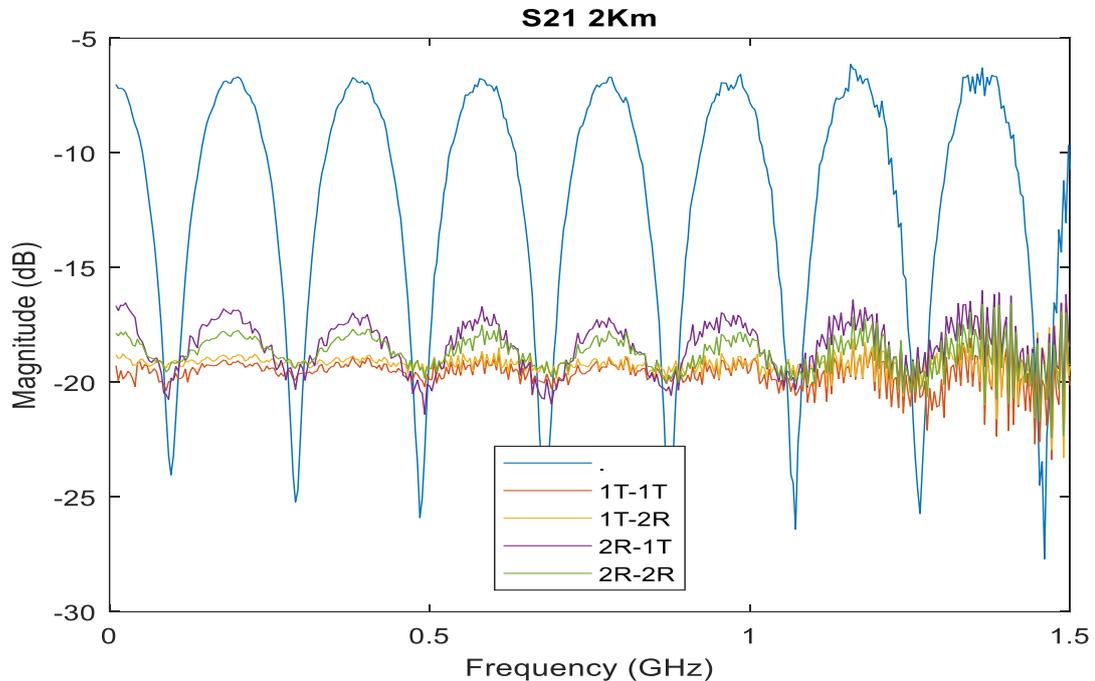


Figure 46. Efecto simultáneo de ambos acopladores en el sistema

Como puede verse claramente, las cuatro combinaciones dan lugar a resultados muy prometedores. En todas ellas, el rizado es muy pequeño en comparación al caso sin acoplador y la atenuación sufrida no es demasiado grande. Además, este último efecto puede ser compensado empleando un amplificador de bajo ruido (LNA).

4.2 ANÁLISIS DEL EVM DEL SISTEMA

En primer lugar se han representados los efectos del desvanecimiento que se produce en la transmisión en determinadas frecuencias. En la Figura 47 se muestra una transmisión de 7 canales de 20 MHz centrados a una portadora de 680 MHz separados 20 MHz con un tramo de fibra de 2000 metros de longitud (sin acopladores) y una corriente de polarización de 4.5 mA.

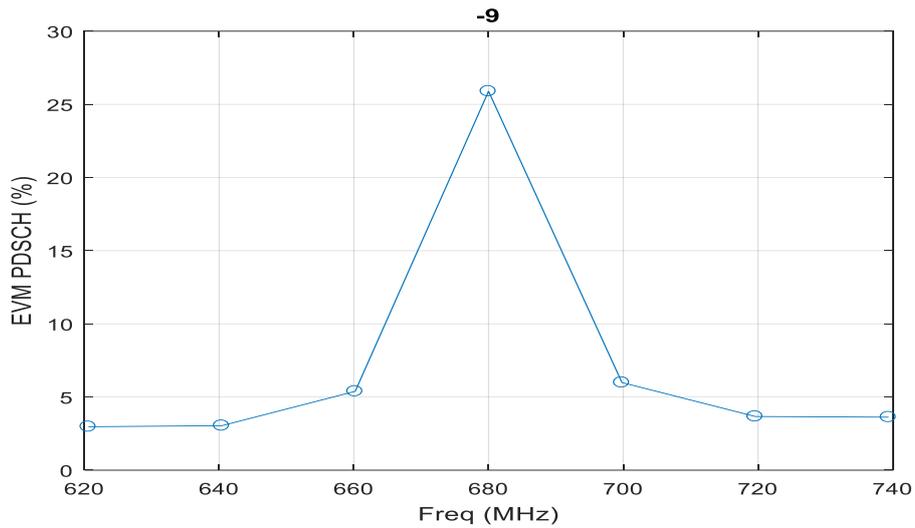


Figura 47. Ejemplo de los desvanecimientos producidos en ciertas frecuencias

Como puede verse a simple vista, el porcentaje de EVM a ciertas frecuencias es inadmisibles. Es por ello que se ha establecido la frecuencia portadora a 750 MHz, una frecuencia a la que se evitan estos efectos perjudiciales producidos por las 'ondulaciones' que presenta el parámetro de transmisión S_{21} (efecto que puede observarse por ejemplo en la Figura 29). Además también se ha ejecutado el mismo procedimiento con la presencia de uno de los acopladores para comprobar la corriente de polarización óptima del láser.

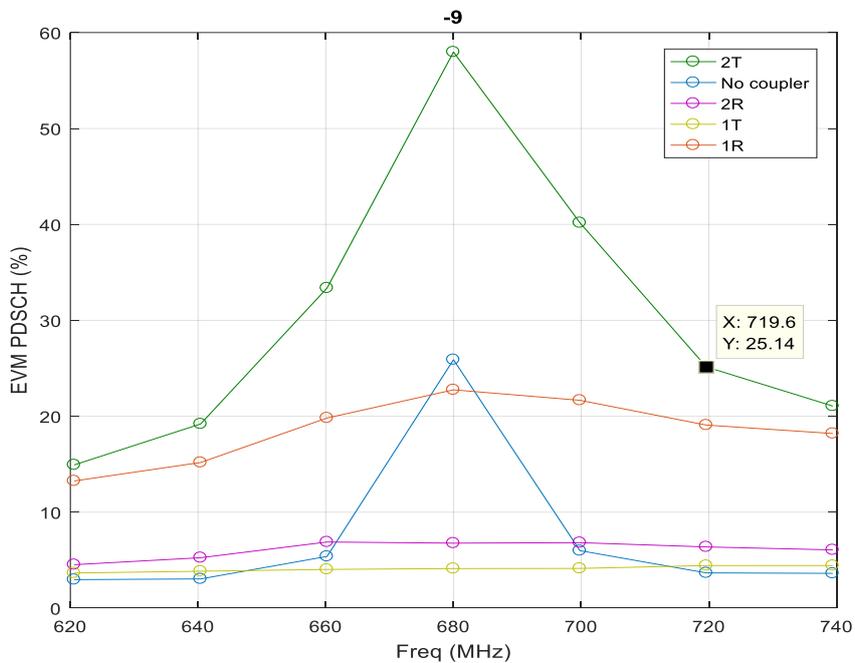


Figura 48. EVM de cada configuración del acoplador para una corriente de 4.5 mA

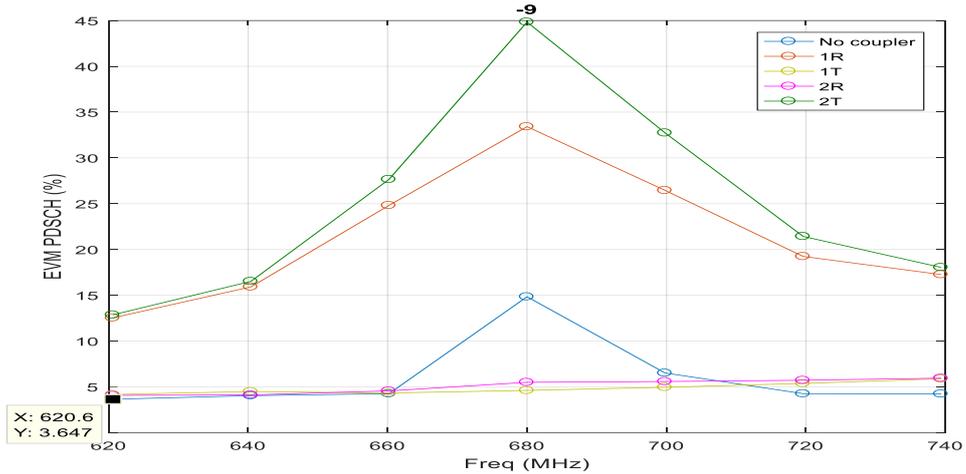


Figura 49. EVM de cada configuración del acoplador para una corriente de 4 mA

A la vista de que ambas figuras muestran un comportamiento muy similar, se ha decidido tomar una corriente de polarización del láser de 4.5 mA ya que es la que se ha venido utilizando hasta el momento. Al igual que ocurría con el parámetro S_{21} , las combinaciones de los puertos 1 con T y 2 con R dan lugar a buenos resultados mientras que 1 con R y 2 con T dan lugar a valores de EVM muy elevados.

4.3. APLICACIÓN A UN SISTEMA WDM

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de los acopladores como (de) multiplexores de modos, se ha buscado analizar su funcionamiento en un sistema de multiplexación en longitud de onda (WDM). El esquema propuesto se muestra en la Figura 50.

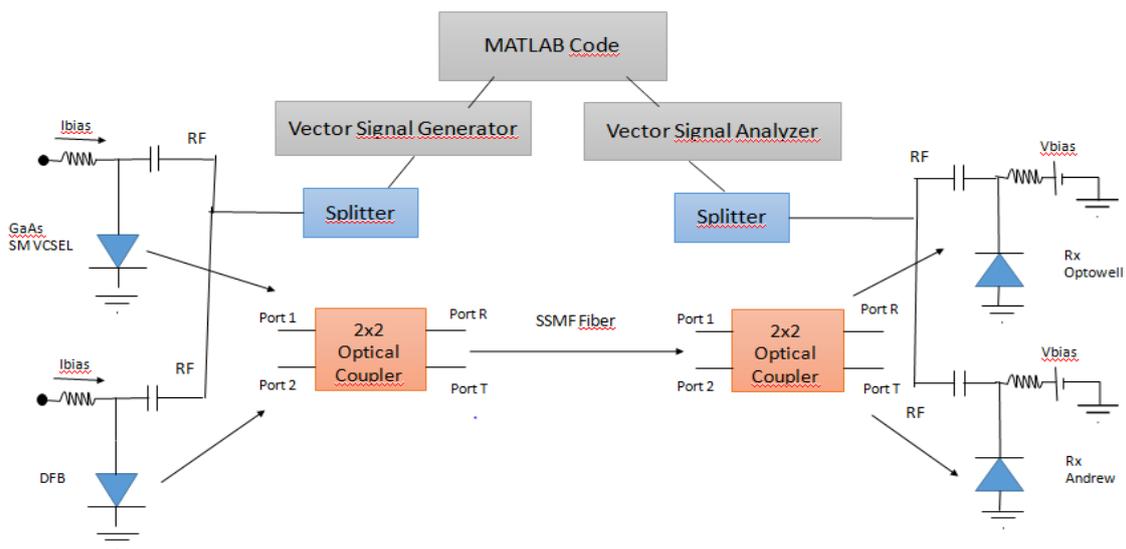


Figura 50. Esquemático del sistema WDM.

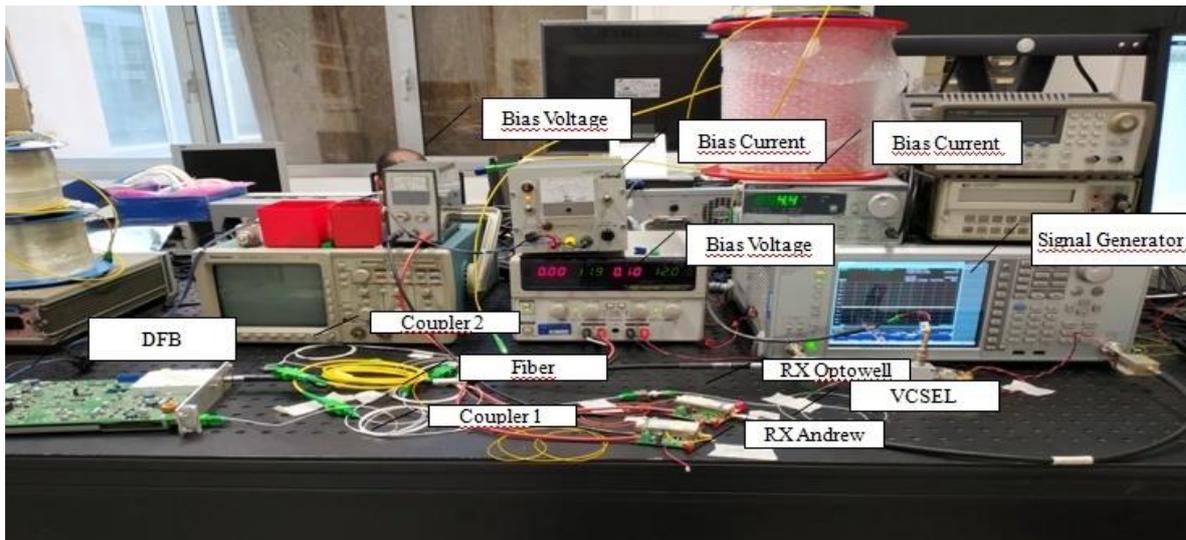


Figura 51. Montaje real del sistema WDM.

En este caso, a partir del software diseñado en MATLAB se generan las muestras de la señal LTE. Con ellas el generador de señales crea la señal en banda base y a partir de un splitter se divide para modular por un lado el VCSEL GS85 de AsGa (850 nm) y por otro un láser de retroalimentación distribuida o DFB Thermostabilished (1550 nm).

Ambos láseres se encuentran conectados a uno de los acopladores que a su vez se encuentra conectado al tramo de fibra. Una vez la señal alcanza el extremo final de la fibra, a partir del otro acoplador se divide hacia dos fotodiodos que transforman la potencia óptica en corriente eléctrica (RX Optowell y RX Andrew). Por último, el analizador de señales se conecta a uno de los fotodiodos y a partir del otro software desarrollado en MATLAB se estima la calidad de la señal a través del EVM.

Para analizar el sistema, en primer lugar, se ha efectuado un barrido en potencia sin colocar los acopladores y con un tramo de fibra muy corto (1 metro) para estimar la potencia óptima de la señal LTE con la que modular ambos láseres. En las Figuras 52 y 53 se muestran los resultados.

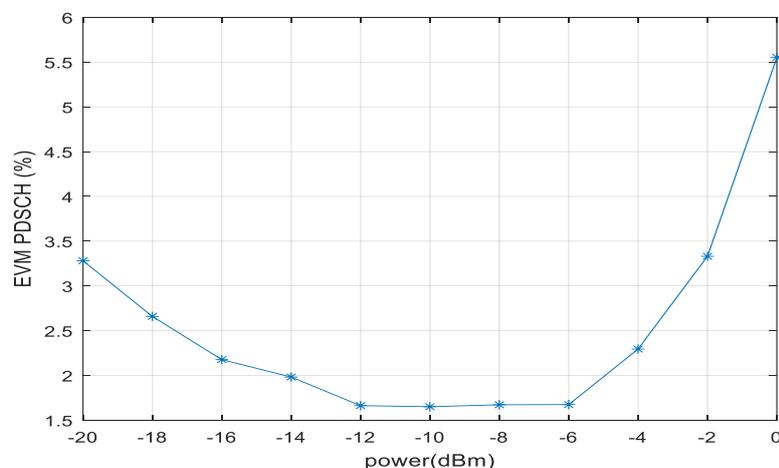


Figura 52. Barrido en potencia del VCSEL

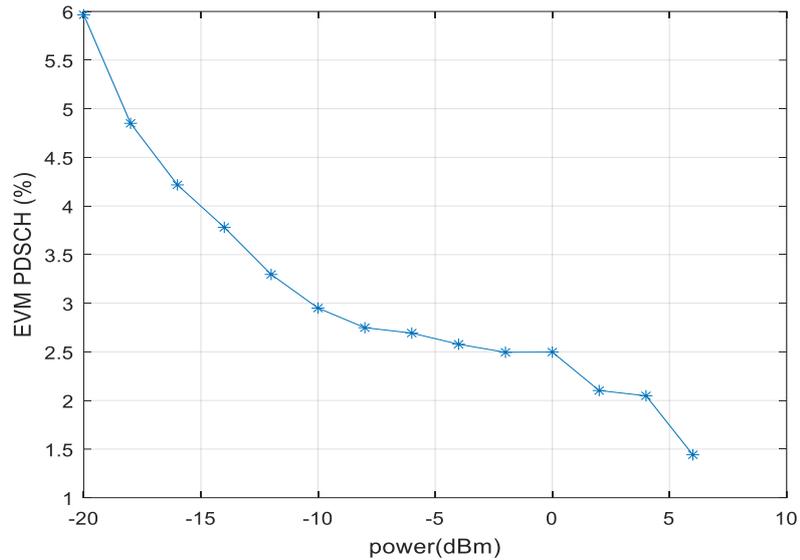


Figura 53. Barrido en potencia del DFB

Como la potencia ha de ser la misma, se ha tomado un valor de -5 dBm que da resultados bastante buenos en ambos casos. Una vez escogida la potencia de transmisión, al igual que se hizo en el apartado 4.1.4 se han analizado únicamente las combinaciones más prometedoras del acoplador (1T - 1T, 1T - 2R, 2R - 1T, 2R - 2R), aunque en este caso sea para evaluar el EVM. Además, se han efectuado las medidas para tramos de fibra de 300, 700 y 2000 metros. Los resultados se muestran a continuación:

VCSEL 1T - 1T

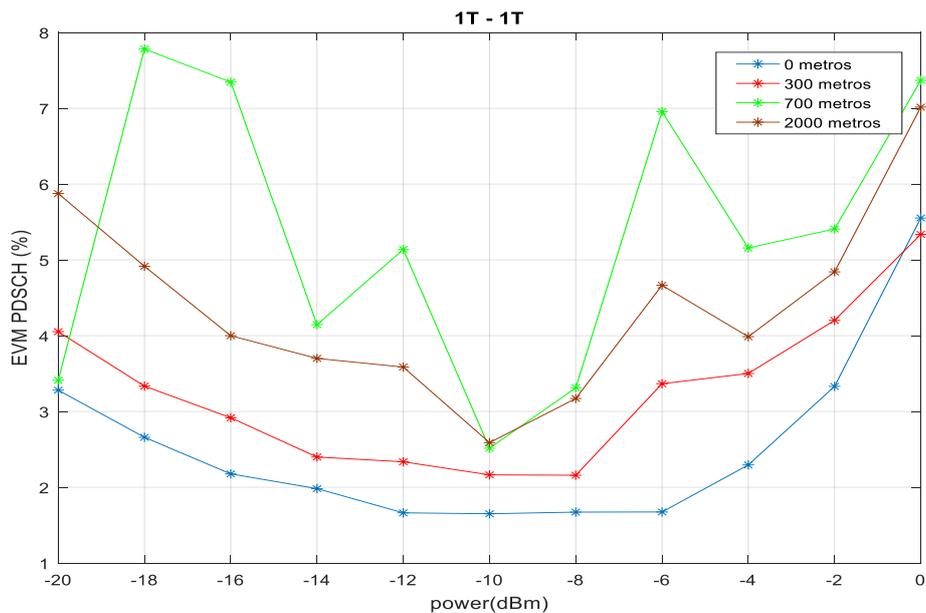


Figura 54. EVM del sistema WDM en el receptor del VCSEL con acopladores en configuración 1T - 1T para diversas distancias

VCSEL 1T -2R

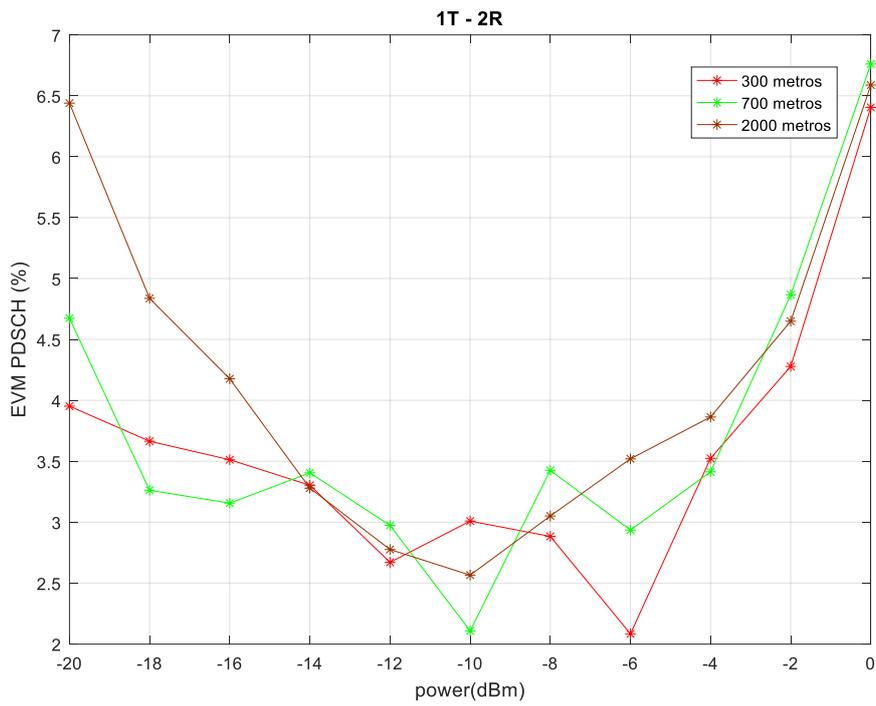


Figura 55. EVM del sistema WDM en el receptor del VCSEL con acopladores en configuración 1T - 2R para diversas distancias

VCSEL 2R-2R

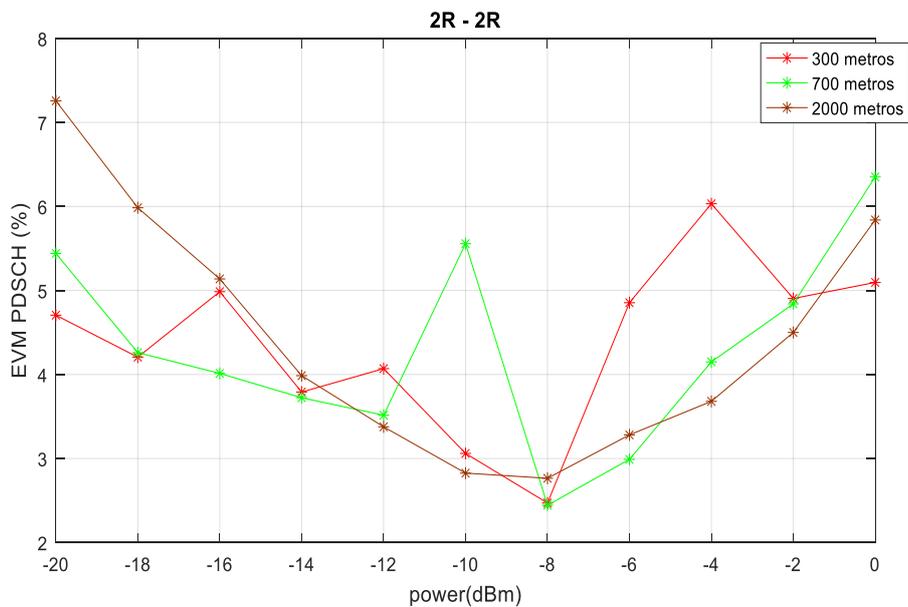


Figura 56. EVM del sistema WDM en el receptor del VCSEL con acopladores en configuración 2R - 2R para diversas distancias

VCSEL 2R-1T

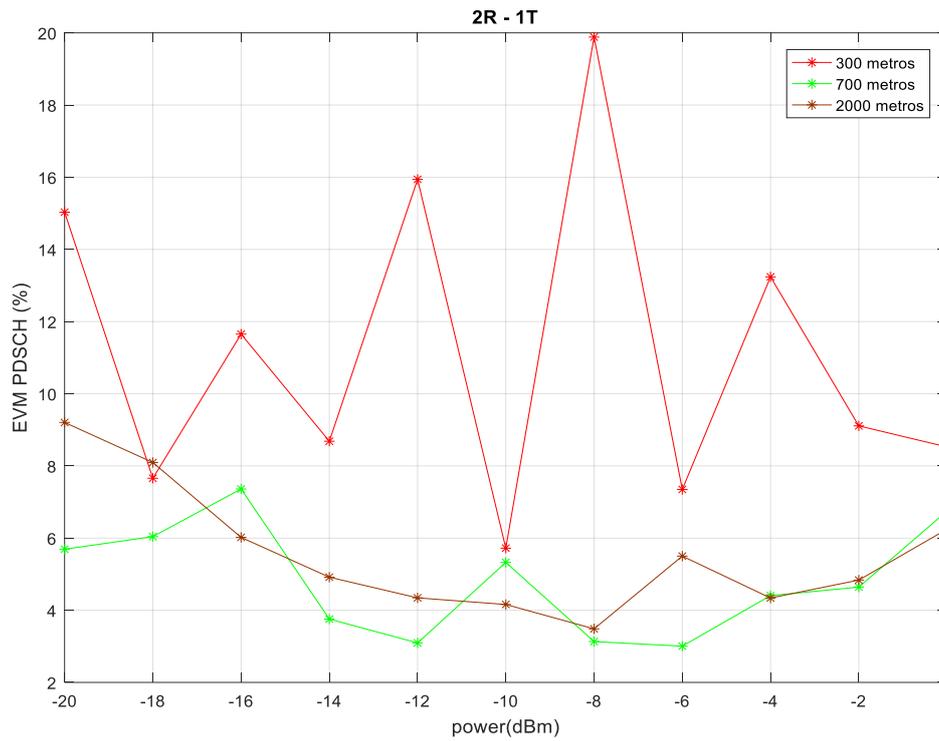


Figura 57. EVM del sistema WDM en el receptor del VCSEL con acopladores en configuración 2R - 1T para diversas distancias

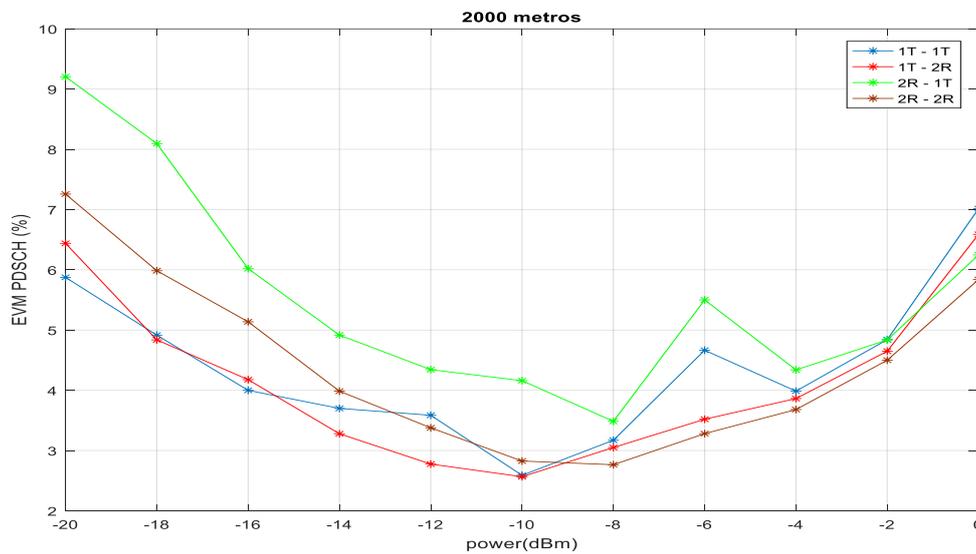


Figura 58. EVM del sistema WDM en el receptor del VCSEL de las diversas configuraciones de los acopladores para una distancia de 2000 metros

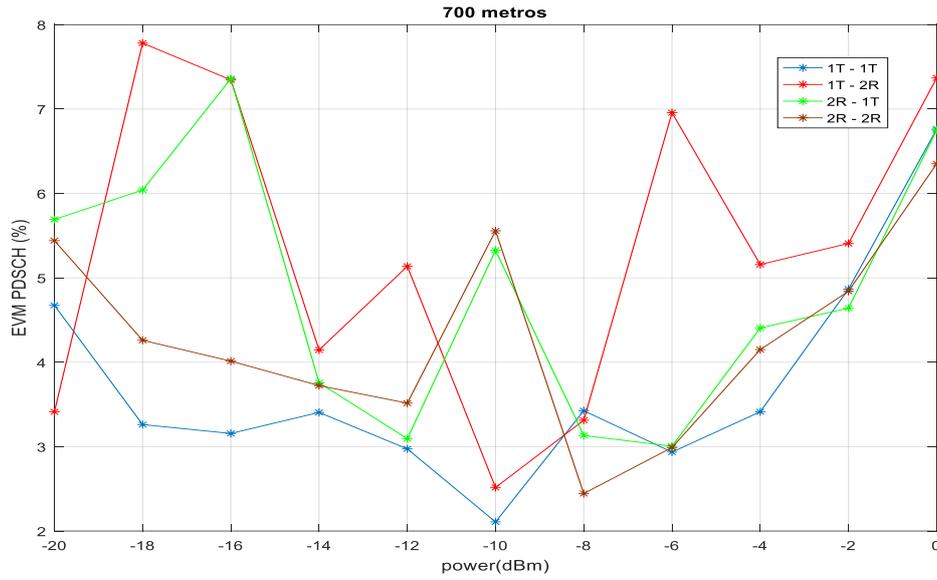


Figura 59. EVM del sistema WDM en el receptor del VCSEL de las diversas configuraciones de los acopladores para una distancia de 700 metros

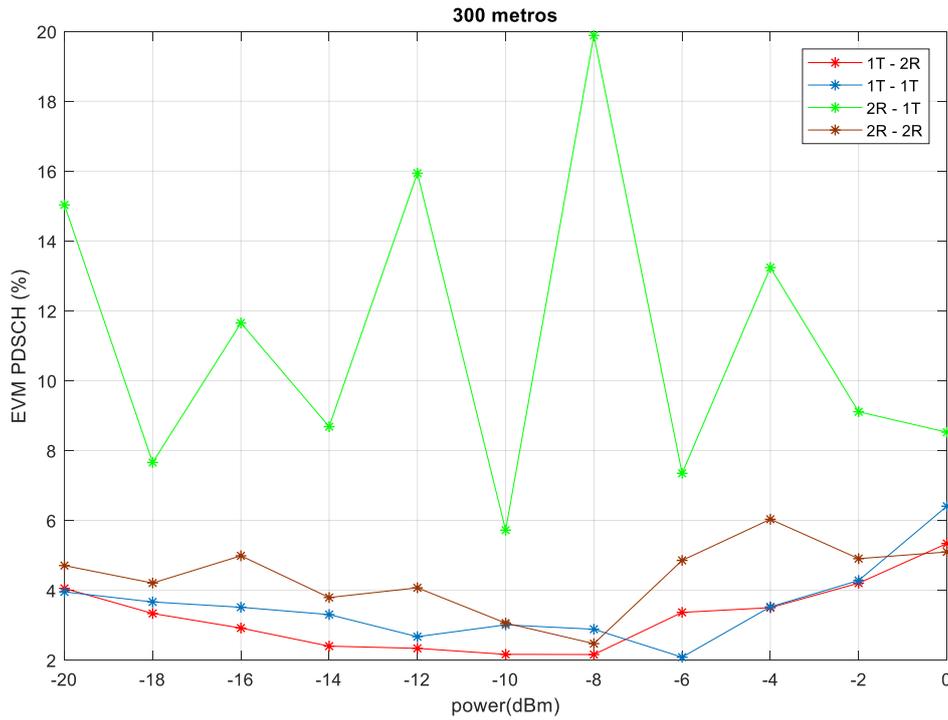


Figura 60. EVM del sistema WDM en el receptor del VCSEL de las diversas configuraciones de los acopladores para una distancia de 300 metros

En cuanto al DFB los valores de EVM obtenidos son todos muy próximos entre sí (como cabía esperar al ser un láser monomodo) en un rango de 2-3% y por ello no se han incluido las gráficas de cada una de las combinaciones

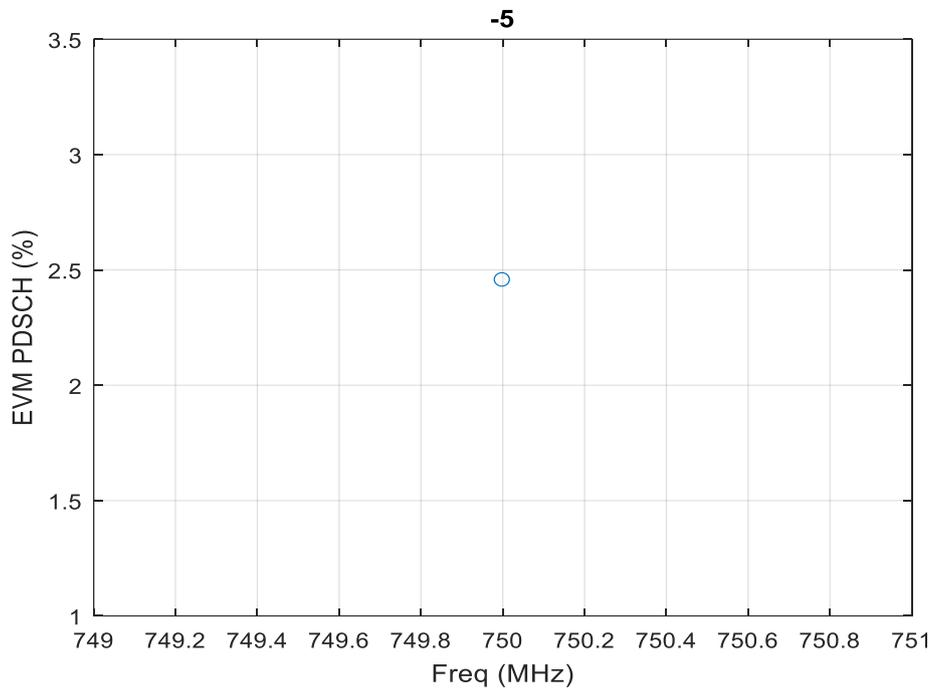


Figura 61. Ejemplo de medida del EVM para el DFB con una distancia de 700 metros en la combinación 2R - 2R.

A la vista de los resultados podemos ver que el sistema no es muy estable. Un ejemplo claro se ve en la figura 59 donde el EVM de cada una de las combinaciones no sigue ninguna tendencia, si no que cada una toma valores aparentemente aleatorios (algo que no pasaba al analizar el parámetro de transmisión donde el sistema se veía muy estable). Las Figuras 57 y 60 también son un ejemplo claro de esto. En definitiva, podemos decir que el sistema no es viable. Una alternativa para tratar de conseguir un sistema que funcione sería realizar el análisis del sistema sustituyendo los acopladores por otro con otro coeficiente de acoplo que no sea del 50%.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

A lo largo de todo el trabajo se ha estudiado la eficiencia y viabilidad de distintos enlaces ópticos de RoF. En especial se ha hecho énfasis en aquellos basados en láseres VCSEL y fibras SSMF para el desarrollo de sistemas de bajo presupuesto. En general, el mayor inconveniente de estos sistemas es la propagación de varios modos a lo largo del tramo de fibra. Para solucionar esto, se han propuesto varias soluciones como el uso de un filtro previo a la transmisión (780 HP), el uso de fibras MMT (que no sería óptimo para sistemas de bajo coste) o el uso de acopladores ópticos diseñados para trabajar a 1550 nm (mecanismo que no aportó buenos resultados atendiendo al EVM).

Todo ello se llevo a cabo a través de un montaje físico real, y a partir de un software desarrollado en MATLAB para la generación de señales LTE. Partiendo de una base preexistente para la generación de señales monocanal, se extendió su funcionalidad a una transmisión multicanal donde el usuario dispone de la posibilidad de elegir tanto de el número de canales como del espaciado entre ellos (respetando siempre el ancho de banda máximo de trabajo del analizador de señales de 160 MHz). Además se incluyó la posibilidad de introducir la modulación 1024-QAM en el PDSCH para aumentar la tasa de transmisión. Como inconveniente, se expusieron sus limitaciones tanto con la distancia como con el número de canales al tener restricciones más grandes con respecto al valor máximo admitido en el EVM.

Con respecto a las perspectivas de futuro, hay muchos objetivos que podrían tratar de alcanzarse. Uno de ellos sería implementar una nueva función de midiera la tasa de error de símbolo (SER) para así tener otro criterio al que atenderse a parte del EVM. También podría implementarse la posibilidad de que no todos los canales tengan el mismo ancho de banda o técnicas para optimizar el tiempo requerido en las simulaciones (ya que en general el programa tomaba bastante tiempo realizándolas).

En cuanto a los esquemas de medida, podrían realizarse medidas con diferentes espaciados o longitudes más largas de la fibra y analizar su efecto en la transmisión. En cuanto al uso de acopladores, podría estudiarse el uso de acopladores con diferente coeficiente de acoplo (en el trabajo este parámetro era del 50 %) o de distinto fabricante.

Personalmente creo que se ha expuesto con la mayor claridad posible todas las medidas, esquemas, procedimientos y resultados obtenidos, los cuales dan buenas perspectivas para desarrollo de los ya mencionados sistemas de RoF de bajo coste.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] VCSEL-SSMF-based Radio-over-Fiber link for low cost and low consumption Wireless Dense Networks, Jacopo Nanni, Francesco Pizzuti, Giovanni Tartarini, Jean-Luc Polleux, Catherine Algani, Octubre 2017.
- [2] Sistemas de Comunicaciones Móviles,-Segunda, Tercera y Cuarta Generación-, Juan Pascual García, José María Molina García-Pardo, Leandro Juan LLácer, Noviembre 2018.
- [3] TESI DI LAUREA in Sistemi a portante ottica M, SVILUPPO DI UN SOFTWARE PER LA CARATTERIZZAZIONE DI UN COLLEGAMENTO LTE RADIO OVER FIBER E REALIZZAZIONE DEL RELATIVO BANCO DI MISURA, Francesco Pizzuti (dirigido por Giovanni Tartarini), Junio 2016.
- [4] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 16).
- [5] LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) conformance testing (3GPP TS 36.141 version 15.3.0 Release 15).
- [6] 850nm VCSEL-based Radio-over-Fiber infrastructure for Multi-Channel 4G /5G wireless networks Jacopo Nanni, Luis Fernández , Muhammad U.Hadi, Carlos Viana, Zerihun G. Tegegne, Jean-Luc Polleux and Giovanni Tartarini (entregado a la ECOC), Mayo 2019.
- [7] Multi-channel LTE-over-Fiber system based on 850nm VCSEL and SSMF for low cost, low consumption Front-Hauls Jacopo Nanni, Luis Fernández , Muhammad U.Hadi, Carlos Viana, Zerihun G. Tegegne, Jean-Luc Polleux and Giovanni Tartarini, Marzo 2019.
- [8] Performance Improvement and Cost Reduction Techniques for Radio Over Fiber Communications, Varghese Antony Thomas, Mohammed El-Hajjar and Lajos Hanzo, Enero 2015.
- [9] Modal selectivity at 850 nm employing standard single-mode couplers: Theory and experimental demonstration, David Garcia-Rodriguez, Maria Morant, Juan L. Corral, Roberto Llorente, Diciembre 2018.
- [10] "Modal Noise Mitigation in 850-nm VCSEL-Based Transmission Systems Over Single-Mode Fiber" J. Nanni, Octubre 2016.

