



# **Investigation on Nyquist Modulation and Multiplexing for Fiber-Optic Communications**

**A Degree Thesis**

**Submitted to the Faculty of the  
Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de  
Barcelona**

**Universitat Politècnica de Catalunya**

**by**

**Marc Jubany Ticó**

**In partial fulfilment  
of the requirements for the degree in  
SCIENCE AND TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES  
ENGINEERING**

**Advisor: Joan M. Gené Bernaus**

**Barcelona, February 2016**

## **Abstract**

Nowadays, the society in which we live, the need to communicate increases every day; therefore, there is a need to improve both spectral efficiency and methods of transmitting data faster.

This thesis analyses a new modulation, the Nyquist modulation, which consists in using Nyquist pulses conveniently spaced in time (TDM: Time Division Multiplexing) such that they are orthogonal (OTDM: Orthogonal Time Division Multiplexing) in order to be able to perfectly allocate all the channels in a finite frequency band  $B$ .

Moreover, this thesis also analyses the Nyquist Multiplexing, which consist in overlapping Nyquist pulses in time, located in different frequency bands.

The main aim of the thesis is to implement a modulation and a multiplexing with a simulation tool. The commercial software VPI TransmissionMaker (by Virtual Photonics Inc.) has been used for this purpose. It is a very powerful package widely used by the research community in this field. A second objective has been making different measures of the sensitivity to check the robustness of the system implemented.

## Resum

Avui en dia, en la societat en la qual vivim, la necessitat de comunicar-se augmenta dia rere dia; per tant, existeix una necessitat de millorar tant en eficiència espectral com en mètodes de transmissió de dades més ràpids.

En aquesta tesi s'analitza una nova modulació, la Nyquist Modulation, la qual consisteix en utilitzar polsos de Nyquist convenientment espaiats en el temps (TDM: Multiplexació per divisió temporal) de manera que siguin ortogonals (OTDM: Multiplexació ortogonal per divisió temporal) amb la finalitat de poder distribuir perfectament tots els canals en una banda finita de freqüència B.

Per altra banda, en aquesta tesi també s'analitza el Nyquist Multiplexing, el qual consisteix en utilitzar polsos de Nyquist superposats en el temps, ubicats en diferents bandes freqüencials.

L'objectiu principal del treball es la implementació de la modulació i la multiplexació a partir d'aquesta eina de simulació; el software comercial VPI TransmissionMaker (per Virtual Photonics S.A.). El software és una eina molt potent, àmpliament utilitzada per la comunitat científica en aquest camp. Un segon objectiu, per a comprovar la robustesa del sistema implementat, ha sigut fer diferents mesures de sensibilitat en el mateix.

## **Resumen**

Hoy en día, en la sociedad en la que vivimos, la necesidad de comunicarse aumenta día tras día; por lo tanto, existe una necesidad de mejorar tanto en eficiencia espectral como en métodos de transmisión de datos más rápidos.

En esta tesis se analiza una nueva modulación, la modulación Nyquist, la cual consiste en utilizar pulsos de Nyquist convenientemente espaciados en el tiempo (TDM: Multiplexación por división temporal) de manera que sean ortogonales (OTDM: Multiplexación ortogonal por división temporal) con el fin de poder distribuir perfectamente todos los canales en una banda finita de frecuencia B.

Por otra parte, en esta tesis también se utiliza el Nyquist Multiplexing, el cual consiste en utilizar pulsos de Nyquist superpuestos en el tiempo, ubicados en diferentes bandas de frecuencias.

El objetivo principal del trabajo es la implementación de la modulación y la multiplexación con esta herramienta de simulación; El software comercial VPI TransmissionMaker (por Virtual Photonics SA). El software es una herramienta muy potente, ampliamente utilizada por la comunidad científica en este campo. Un segundo objetivo, para comprobar la robustez del sistema implementado, ha sido hacer diferentes medidas de sensibilidad del mismo.





*Dedicated to my family,  
who have always been supportive with my decisions.*

## **Acknowledgements**

En primer lloc, m'agradaria agrair al meu director de projecte Joan M. Gené Bernaus tots els seus consells, comentaris, ànims, correccions i explicacions. Gràcies per haver-me guiat tan bé durant tot aquest projecte.

També m'agradaria donar les gràcies a tots aquells que m'han donat suport i han estat al meu costat durant el desenvolupament d'aquesta tesi.

## Revision history and approval record

Revision	Date	Purpose
0	10/12/2015	Document creation
1	21/01/2016	Document revision
2	23/01/2016	Document revision
3	24/01/2016	Document delivery

### DOCUMENT DISTRIBUTION LIST

Name	e-mail
Marc Jubany Ticó	marc.jubany@gmail.com
Joan M. Gené Bernaus	joan.gene@upc.edu

Written by:		Reviewed and approved by:	
Date	24/12/2015	Date	24/01/2016
Name	Marc Jubany Ticó	Name	Joan M. Gené Bernaus
Position	Project Author	Position	Project Supervisor

## Table of contents

<b>Abstract .....</b>	<b>1</b>
<b>Resum .....</b>	<b>2</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>3</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>5</b>
<b>Revision history and approval record .....</b>	<b>6</b>
<b>Table of contents .....</b>	<b>7</b>
<b>List of Figures .....</b>	<b>9</b>
<b>List of Tables:.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Introducció .....</b>	<b>11</b>
1.1. Context.....	11
1.2. Objectius.....	11
1.3. Pla de treball.....	11
<b>2. Estat de l'art de la tecnologia utilitzada o aplicada en aquesta tesi: .....</b>	<b>13</b>
2.1. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) .....	13
2.2. Wavelength Division Multiplexing (WDM) .....	14
<b>3. Metodologia / Desenvolupament del projecte: .....</b>	<b>15</b>
3.1. VPI Transimison Maker .....	15
3.2. Orthogonal Time Division Multiplexing (OTDM) / Nyquist Modulation.....	15
3.2.1. Motivació .....	15
3.2.2. Model matemàtic Nyquist Modulation .....	15
3.2.3. Estructura Nyquist Modulation .....	17
3.2.3.1. Transmissor Nyquist Modulation .....	17
3.2.3.2. Receptor Nyquist Modulation .....	18
3.2.4. Estructura Nyquist Multiplexing .....	19
3.2.4.1. Transmissor Nyquist Multiplexing.....	20
3.2.4.2. Receptor Nyquist Multiplexing .....	20
<b>4. Resultats .....</b>	<b>21</b>
4.1. Paràmetres inicials .....	21
4.2. Simulacions elèctriques.....	22
4.2.1. Nyquist Modulation .....	22
4.2.2. Nyquist Multiplexing .....	25
4.2.3. Efectes del Roll-off.....	26
4.3. Simulacions òptiques.....	28
4.3.1. Nyquist Modulation .....	28
4.3.2. Nyquist Multiplexing .....	29
4.4. Mesures de sensibilitat .....	30
4.4.1. Nyquist Modulation .....	31
4.4.1.1. BER – Potència òptica .....	31
4.4.1.2. Penalty: Potència òptica – Roll-Off.....	32
4.4.1.3. Penalty: Potència òptica – Número de subportadores .....	32
4.4.2. Nyquist Multiplexing .....	33
4.4.2.1. BER – Potència òptica .....	33

4.4.2.2. Penalty: Potència òptica – separació en freqüència dels canals .....	34
<b>5. Budget .....</b>	<b>36</b>
<b>6. Conclusions i futur desenvolupament: .....</b>	<b>37</b>
<b>7. Annexos: .....</b>	<b>39</b>
<b>7.1. Taules de valors .....</b>	<b>39</b>
7.1.1. Nyquist Modulation .....	39
7.1.1.1. BER – Potència òptica .....	39
7.1.1.2. Penalty: Potència òptica – Roll-Off.....	43
7.1.1.3. Penalty: Potència òptica – Número de subportadores .....	44
7.1.2. Nyquist Multiplexing .....	45
7.1.2.1. BER – Potència òptica .....	45
7.1.2.2. Penalty: Potència òptica – separació en freqüència dels canals .....	48
<b>7.2. Scripts.....</b>	<b>49</b>
<b>Glossari.....</b>	<b>52</b>

## List of Figures

Figura 2.1: sistema WDM	14
Figura 3.1: Comparació entre OTDM i OFDM	15
Figura 3.2: “Slots” temporals OTDM, domini temporal	16
Figura 3.3: Transmissor OTDM i expressió genèrica	16
Figura 3.4: Receptor OTDM	17
Figura 3.5: Transmissor Nyquist Modulation	18
Figura 3.6: Receptor Nyquist Modulation	18
Figura 3.7: OTDM Nyquist Multiplexing domini freqüencial	19
Figura 3.8: OTDM Nyquist Multiplexing domini temporal	19
Figura 3.9: Transmissor Nyquist Multiplexing	20
Figura 3.10: Receptor Nyquist Multiplexing	20
Figura 4.1: Paràmetres inicials Nyquist Modulation	21
Figura 4.2: Paràmetres inicials Nyquist Multiplexing	21
Figura 4.3: Esquemàtic Nyquist Modulation Elèctric	22
Figura 4.4: Mòdul on és convoluciona el senyal amb la sinc	22
Figura 4.5: Senyal elèctric transmès Nyquist Modulation	23
Figura 4.6: Zoom del senyal elèctric transmès Nyquist Modulation	23
Figura 4.7: Diagrama d’ull amb 4 subportadores Nyquist Modulation	24
Figura 4.8: Senyal de rellotge Nyquist Modulation	24
Figura 4.9: Senyal transmès (superior). Senyal rebut (inferior)	25
Figura 4.10: Esquemàtic d’una de les N branques a multiplexar	25
Figura 4.11: Diagrama d’ull Nyquist Multiplexing	25
Figura 4.12: Resposta a un impuls d’un filtre de cosinus alçat amb diferents factors de Roll-Off	26
Figura 4.13: Resposta en amplitud d’un filtre de cosinus alçat amb diferents factors de Roll-Off	26
Figura 4.14: (a)Roll-Off=1; (b) Roll-Off=0,5; (c) Roll-Off=0	27
Figura 4.15: (a)Roll-Off=1; (b)Roll-Off=0	27
Figura 4.16: Espectre Nyquist Multiplexing Roll-Off=1	27
Figura 4.17: Espectre Nyquist Multiplexing Roll-Off=0	28
Figura 4.18: Esquemàtic Nyquist Modulation Òptic	28
Figura 4.19: Diagrama d’ull de les 16 subportadores juntes en el domini òptic	29
Figura 4.20: A dalt, senyal transmès. A baix, senyal rebut	29
Figura 4.21: Esquemàtic Nyquist Multiplexing Òptic	29
Figura 4.22: El tres canals; a l’esquerra, abans de multiplexar-los, a la dreta, després	30
Figura 4.23: A dalt, senyal transmès. A baix, senyal rebut	30
Figura 4.24: Gràfica de la BER respecte la potència òptica amb 16 subportadores	31
Figura 4.25: Zoom, de la figura anterior, al voltant de $BER=10^{-3}$	31
Figura 4.26: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció del Roll-Off	32
Figura 4.27: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció del número de subportadores	33
Figura 4.28: Gràfica de la BER respecte la potència òptica amb un únic canal	34
Figura 4.29: Zoom, de la figura anterior, al voltant de $BER=10^{-3}$	34
Figura 4.30: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció de la separació entre canals	35
Figura 7.1: Gràfica de la BER respecte la potència òptica amb 16 subportadores	39
Figura 7.2: Zoom, de la figura anterior, al voltant de $BER=10^{-3}$	41
Figura 7.3: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció del Roll-Off	43
Figura 7.4: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció del número de subportadores	44
Figura 7.5: Gràfica de la BER respecte la potència òptica amb un únic canal	45
Figura 7.6: Zoom, de la figura anterior, al voltant de $BER=10^{-3}$	46
Figura 7.7: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció de la separació entre canals	48

## List of Tables:

Taula 1.1: Fites i Tasques	12
Taula 1.2: Diagrama de Gantt	12
Taula 5.1: Budget	36
Taula 7.1: BER - potència òptica Roll-Off=1	39
Taula 7.2: BER - potència òptica Roll-Off=0,75	39
Taula 7.3: BER - potència òptica Roll-Off=0,5	40
Taula 7.4: BER - potència òptica Roll-Off=0,25	40
Taula 7.5: BER - potència òptica Roll-Off=0	40
Taula 7.6: BER - potència òptica Roll-Off=1	41
Taula 7.7: BER - potència òptica Roll-Off=0,75	41
Taula 7.8: BER - potència òptica Roll-Off=0,5	42
Taula 7.9: BER - potència òptica Roll-Off=0,25	42
Taula 7.10: BER - potència òptica Roll-Off=0	42
Taula 7.11: Taula de Penalty, potència òptica en funció del Roll-Off	43
Taula 7.12: Taula de Penalty, p.òptica en funció del número de subportadores. Roll-Off=1	44
Taula 7.13: Taula de Penalty, p.òptica en funció del número de subportadores. Roll-Off=0	44
Taula 7.14: BER - potència òptica Roll-Off=1	45
Taula 7.15: BER - potència òptica Roll-Off=0,75	45
Taula 7.16: BER - potència òptica Roll-Off=0,5	45
Taula 7.17: BER - potència òptica Roll-Off=0,25	45
Taula 7.18: BER - potència òptica Roll-Off=0	45
Taula 7.19: BER - potència òptica Roll-Off=1	46
Taula 7.20: BER - potència òptica Roll-Off=0,75	46
Taula 7.21: BER - potència òptica Roll-Off=0,5	47
Taula 7.22: BER - potència òptica Roll-Off=0,25	47
Taula 7.23: BER - potència òptica Roll-Off=0	47
Taula 7.24: BER - potència òptica Roll-Off=0,18	47
Taula 7.25: Taula Penalty. Roll-Off=1	48
Taula 7.26: Taula Penalty. Roll-Off=0	48

# 1. Introducció

## 1.1. Context

Aquesta tesi està dins dels treballs d'investigació sobre les modulacions que s'estan duent a terme en el "Departament de Teoria del Senyal i de Comunicacions (TSC)", específicament en el "Grup de Comunicacions Òptiques (GCO)", l'expert en el tema és el supervisor del projecte, Joan M. Gené Bernaus. El propòsit d'aquest projecte és continuar amb la tesi d'en Jonathan Rodríguez Casal, un company d'universitat, que va començar a desenvolupar aquest tema quedant-se en conclusions no definitives.

Aquest projecte consisteix en la investigació sobre la modulació i multiplexació Nyquist en la fibra òptica, tenint en compte els resultats ja obtinguts anteriorment pel meu company.

## 1.2. Objectius

Els objectius de l'estudi en aquesta tesi han estat:

1. Aconseguir ser espectralment eficients.
2. Aconseguir el màxim aprofitament de l'ample de banda donat.
3. Analitzar la sensibilitat dels esquemàtics.

Cal esmentar que els objectius de la tesi estan dissenyats en un context real on la principal limitació, és la limitació de components electrònics, aquests tenen, aproximadament, un abast màxim de 50 GHz. Aquestes limitacions són degudes al fet que les comunicacions òptiques són un nou mètode de comunicació i, per tant, gran part de la tecnologia està sent desenvolupada actualment; no es tenen els mateixos components elèctrics en format òptic.

Per dissenyar i provar els diferents esquemàtics s'ha utilitzat el software VPI Transmission Maker, ja que és una eina molt potent i àmpliament utilitzada per la comunitat científica en aquest camp.

No hi ha estudis que s'estiguin duent a terme sobre aquest tipus de modulació i multiplexació dins del grup de recerca, almenys amb una implementació real amb components elèctrics i portat al domini òptic. Els estudis més similars que s'havien dut a terme eren sobre els sistemes òptics en general. Veure referències [1], [2].

## 1.3. Pla de treball

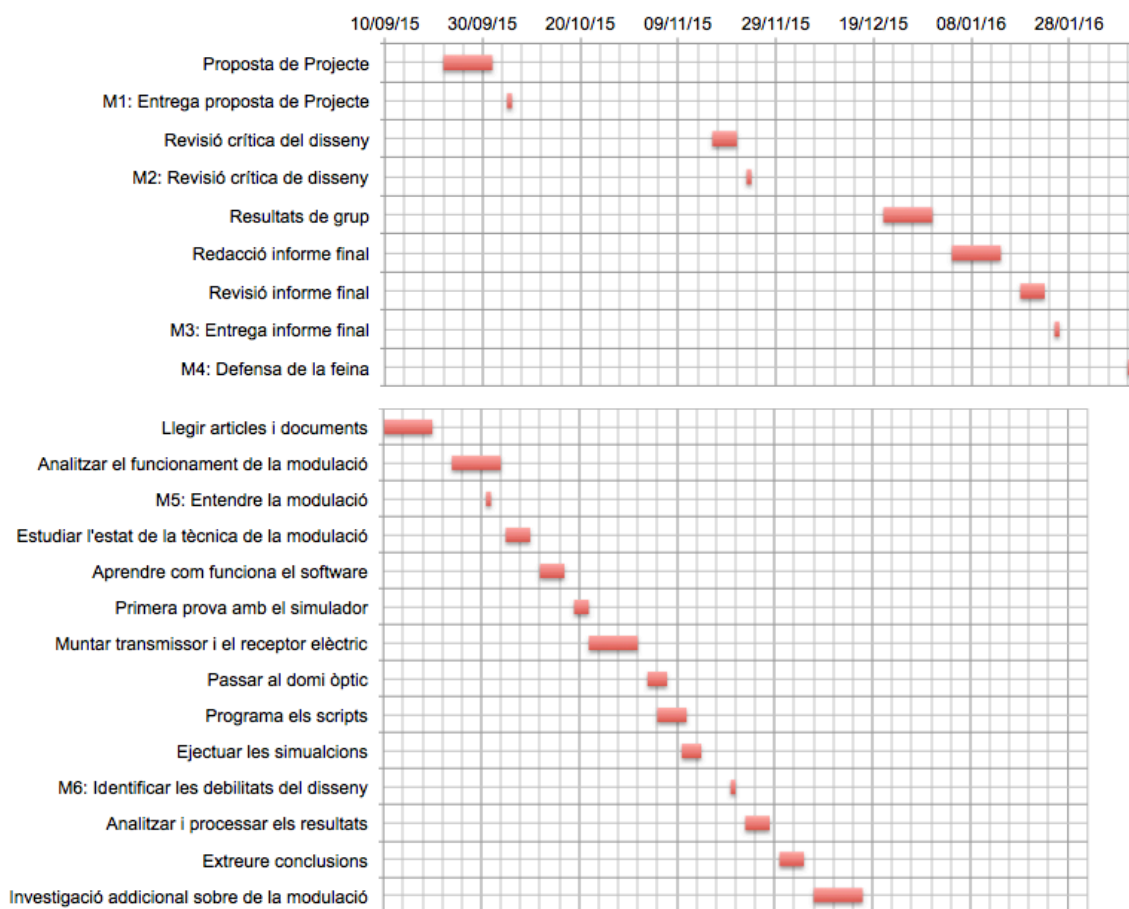
Al principi és van definir quatre paquets de treballs principals, degut a nous requeriments a mesura que avançava la tesi, aquests han estat degudament modificats.

Es subratllen els canvis en el pla de treball inicial en blau; aquests canvis són noves tasques que van aparèixer durant el projecte i han produït alguns canvis en el calendari inicial:



NOM DE LA TASCA	DURACIÓ (dies)	INICI	FI	CARREGA DE FEINA (hores)
<b>WP1: DOCUMENTACIÓ</b>	<b>140</b>	<b>22/09/15</b>	<b>09/02/16</b>	
Proposta de Projecte	10	22/09/15	04/10/15	10
M1: Entrega proposta de Projecte	1	05/10/15	05/10/15	
Revisió crítica del disseny	5	16/11/15	20/11/15	20
M2: Revisió crítica de disseny	1	23/11/15	23/11/15	
Resultats de grup	10	21/12/15	31/12/15	10
Redacció informe final	10	04/01/16	15/01/16	35
Revisió informe final	5	18/01/16	22/01/16	15
M3: Entrega informe final	1	25/01/16	25/01/16	
M4: Defensa de la feina	1	09/02/16	09/02/16	
<b>WP2: INVESTIGACIÓ NYQUIST MODULATION I MULTIPLEXING</b>	<b>36</b>	<b>10/09/15</b>	<b>16/10/15</b>	
Llegir articles i documents	10	10/09/15	23/09/15	15
Analitzar el funcionament de la modulació	10	24/09/15	01/10/15	15
M5: Entendre la modulació	1	01/10/15	01/10/15	
Estudiar l'estat de la tècnica de la modulació	5	05/10/15	09/10/15	10
Aprendre com funciona el software	5	12/10/15	16/10/15	20
<b>WP3: SIMULACIONS</b>	<b>32</b>	<b>19/10/15</b>	<b>20/11/15</b>	
Primera prova amb el simulador	3	19/10/15	21/10/15	15
Muntar transmissor i el receptor elèctric	10	22/10/15	02/11/15	35
Passar al domini òptic	4	03/11/15	04/11/15	10
Programa els scripts	6	05/11/15	15/11/15	20
Ejectuar les simulacions	4	10/11/15	20/11/15	10
M6: Identificar les debilitats del disseny	1	20/11/15	20/11/15	
<b>WP4: ESTUDI DELS RESULTATS</b>	<b>25</b>	<b>23/11/15</b>	<b>18/12/15</b>	
Analitzar i processar els resultats	5	23/11/15	27/11/15	30
Extreure conclusions	5	30/11/15	04/12/15	15
Investigació addicional sobre de la modulació	10	07/12/15	18/12/15	15

Taula 1.1: Fites i Tasques



Taula 1.2: Diagrama de Gantt

## **2. Estat de l'art de la tecnologia utilitzada o aplicada en aquesta tesi:**

Any rere any, la nostra societat no cessa en l'augment de la demanda d'ample de banda de dades, que està creixent a un ritme al voltant del 30% al 60% cada any. Cada vegada és més la gent connectada a la xarxa amb la necessitat d'estar en contacte amb altres persones, compartir fotos i vídeos, veure la televisió en línia y un llarg etcètera.

Tenint en compte el requisit de la reducció del cost per bit per Hz, les interfícies de transmissió òptica d'alta velocitat i una tecnologia amb una major eficiència de l'espectre s'estant tornant més i més importants. A diferència dels sistemes de telecomunicacions tradicionals, els sistemes òptics comercials sempre s'han limitat a modulació d'intensitat amb la detecció directa (IM-DD). Malgrat això, avui en dia la demanda de connexions d'alta capacitat ha fet moure l'interès cap a tècniques de transmissió amb senyals òptics [16].

Per aconseguir aquesta evolució, les dues direccions principals adoptades han estat l'ús de modulacions òptiques avançades i sobretot, l'ús de receptors coherents. Gràcies aquest últim, ha estat possible l'arribada de circuits ràpids de processament de senyal digital (DSP) que permeten disminuir la complexitat i augmentar la viabilitat dels receptors coherents tradicionals. Una tercera tècnica emprada per augmentar la capacitat dels sistemes de comunicació òptica és l'ús de "Optical Time Division Multiplexing" (OTDM) que permet, gràcies a la multiplexació, ubicar molts canals òptics en el domini del temps usant polsos de retorn a zero (RZ) [4].

La quantitat d'informació que es comparteix és extrapolable a un punt en què estem parlant d'Internet de les Coses (IoT), on absolutament tot podria tenir comunicació. Aquesta tesi estudiarà la necessitat d'una comunicació ràpida i eficient en un futur proper. Avui en dia, la modulació utilitzada per excel·lència és la "Orthogonal Frequency Division Multiplexing" (OFDM) i provarem d'estudiar una modulació amb millor rendiment que la OFDM per tal de cobrir la necessitat de gestionar el creixement diari de les comunicacions.

### **2.1. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)**

Com s'ha esmentat anteriorment, és la modulació més popular en la investigació de sistemes de comunicacions. OFDM s'ha convertit en un esquema popular per a la comunicació digital de banda ampla, que s'utilitza en aplicacions com ara la televisió digital i la radiodifusió d'àudio, accés a Internet DSL, xarxes sense fils, xarxes de línia elèctrica, i les comunicacions mòbils 4G.

Es farà un breu explicació de com funciona el OFDM, ja que té una estreta relació amb la modulació a estudiar, la OTDM ("Orthogonal Time Division Multiplexing").

La idea principal de com funciona una modulació OFDM és la següent: tenim  $N$  símbols complexos  $d_0, d_1, d_2, \dots, d_{n-1}$  i volem multiplexar-los en una banda de freqüència  $B$ . Per tant, hem de dividir l'espectre en  $N$  subportadores de manera que cada símbol és transmès en una subportadora [18].

## 2.2. Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Wavelength Division Multiplexing és una tecnologia que multiplexa un nombre de senyals òptics portadores en una sola fibra òptica utilitzant diferents longituds d'ona del làser. El terme de multiplexació per divisió en longitud d'ona s'aplica comunament a una portadora òptica, mentre que la multiplexació per divisió en freqüència típicament s'aplica a una portadora de ràdio (que es descriu més sovint per freqüència).

Els sistemes WDM són populars entre les empreses de telecomunicacions, ja que els permeten ampliar la capacitat de la xarxa sense posar més fibres. La capacitat d'un enllaç donat es pot ampliar, simplement, canviant els multiplexors i desmultiplexors a cada extrem per uns amb més canals [3].

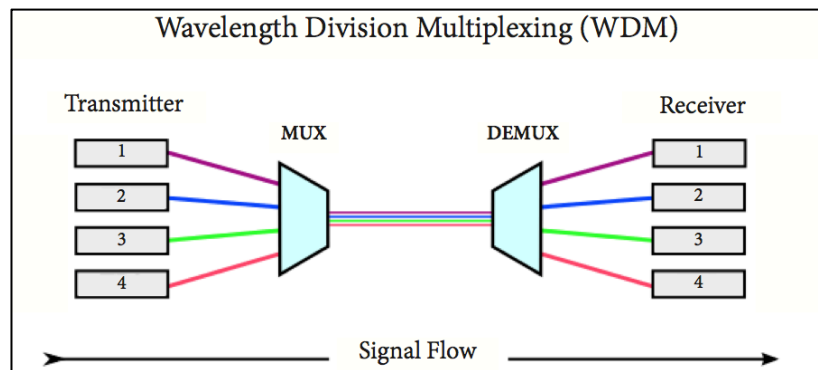


Figura 2.1: sistema WDM

### 3. Metodologia / Desenvolupament del projecte:

#### 3.1. VPI Transimison Maker

Virtual Photonics Integrated (VPI) és una eina potent que permet simular una àmplia gamma de dissenys de transmissió òptica, donant la possibilitat de crear múltiples configuracions per a un escenari de transmissió donada. En concret, les simulacions que es descriuran es duran a terme per mitjà de l'aplicació VPI Transmision Maker, d'ara en endavant ens hi referirem com a VPI.

VPI conté dos escenaris de demostració que són molt interessants pel que fa als resultats de les simulacions. Es mostraran mitjançant l'eina Analyzer del VPI, que s'executa automàticament després d'executar la simulació quan s'utilitzen en la configuració de l'esquemàtic qualsevol dels mòduls d'anàlisi proporcionats per VPI [16].

#### 3.2. Orthogonal Time Division Multiplexing (OTDM) / Nyquist Modulation

##### 3.2.1. Motivació

Degut a la necessitat de ser espectralment eficients i aconseguir el màxim aprofitament de l'ample de banda tenint en compte les limitacions electròniques, com s'explica en el capítol 1.2 i a causa del fet que les comunicacions òptiques són un nou mètode d'intercanvi d'informació, hem de trobar una modulació que exploti aquestes dues idees.

Si fem un anàlisi acurat de la modulació OFDM, trobem algunes ineficiències espectrals, a causa de l'expansió dels lòbuls secundaris de la funció sinc a altres bandes freqüencials.

La solució és moure la perfecta divisió ortogonal del domini freqüencial al domini temporal. Aquesta és la raó per la qual la modulació de Nyquist es pot considerar una tècnica de Time Division Multiplexing (TDM), pel fet de ser ortogonal l'anomenem OTDM.

D'aquesta manera obtenim divisions quadrades perfectes en el domini freqüencial, i per tant la màxima eficiència espectral. No obstant això, el problema de la durada de les sincs encara hi és, tot i que ara apareix en el domini temporal i son de l'ordre de pico-segons, afecta a la latència baixa o aplicacions en temps real [8].

##### 3.2.2. Model matemàtic Nyquist Modulation

Com acabem de comentar, hi ha similituds entre les dues modulacions (OFDM i OTDM).

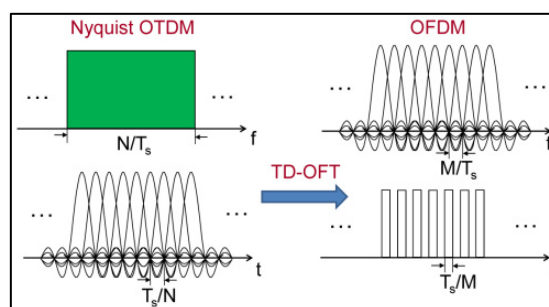


Figura 3.1: Comparació entre OTDM i OFDM

La idea principal en OTDM, com en OFDM, és que tenim  $N$  símbols complexos  $d_0, d_1, d_2, \dots, d_{n-1}$ , però ara la idea és multiplexar-los en intervals de temps  $T_s/N$ , on  $N$  és el

nombre de canals OFDM o “slots” de temps, assegurant que cada pols s'ajusta al seu “slot” de temps assignat. A continuació es presenten algunes equacions:

$$x(t) = \frac{N}{T_s} \text{sinc}\left(\frac{t}{T_s/N}\right) * \delta\left(t - l\frac{T_s}{N}\right) \text{ amb } 0 \leq l \leq N - 1 \quad (3.1)$$

On  $\frac{1}{T_s}$  es un factor d'escala per obtenir un valor de potència 1 en el domini freqüencial.

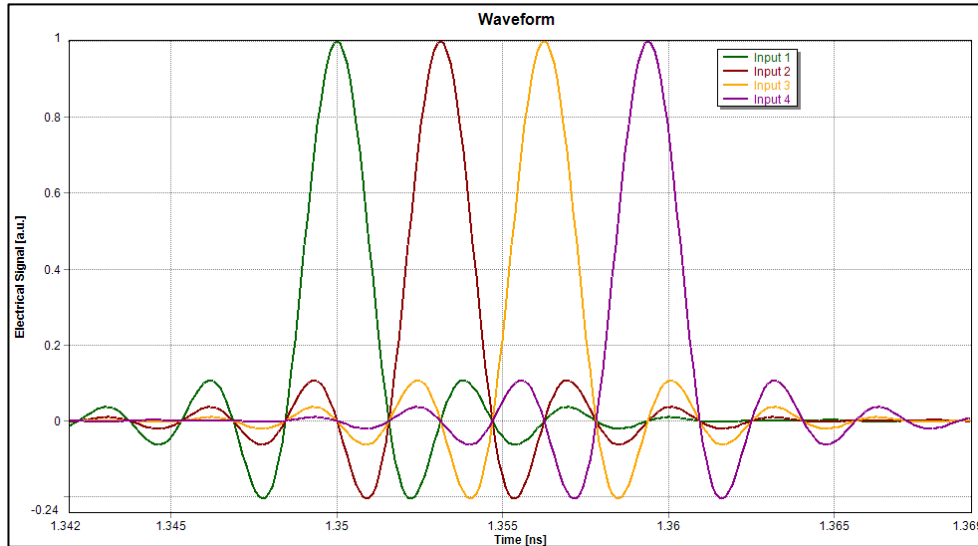


Figura 3.2: “Slots” temporals OTDM, domini temporal

A continuació es mostra l'esquema bàsic de transmissió juntament amb l'expressió genèrica del senyal transmès:

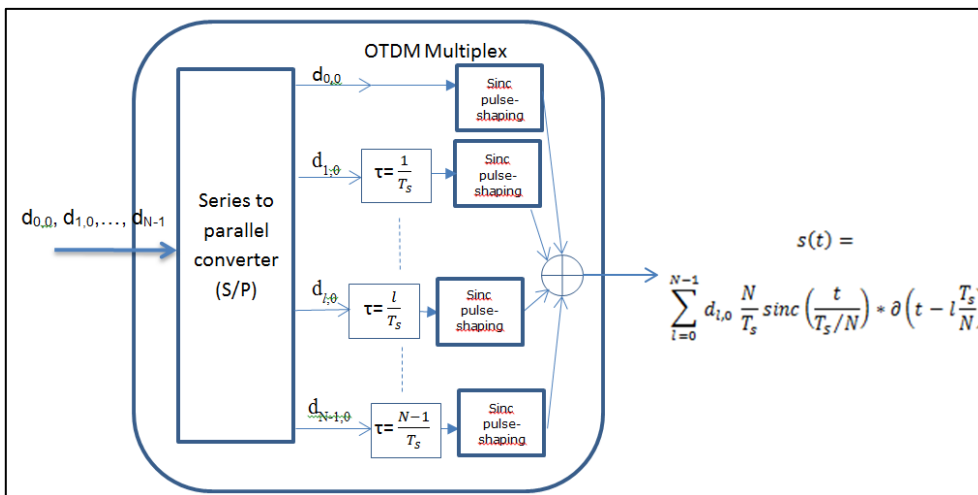


Figura 3.3: Transmissor OTDM i expressió genèrica

Ortogonalitat:

$$\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc}\left(\frac{t}{T_s} - kT_s\right) \text{sinc}\left(\frac{t}{T_s} - lT_s\right) dt = \begin{cases} 1 & \text{si } k = l \\ 0 & \text{si } k \neq l \end{cases} \quad (3.2)$$

Llavors, per analitzar en el domini freqüencial hem d'aplicar la transformada de Fourier:

$$X(f) = \text{rect}\left(\frac{T_s}{N}f\right) e^{-j2\pi l \frac{T_s}{N}f} \quad (3.3)$$

Per rebre el senyal, necessitem fer algunes operacions:

$$X(f) = \left( \text{rect} \left( \frac{T_s}{N} f \right) e^{-j2\pi l \frac{T_s}{N} f} e^{j2\pi k \frac{T_s}{N} f} \right) * H(f) = \frac{T_s}{N} \int_0^{\frac{N}{T_s}} \text{rect} \left( \frac{T_s}{N} f \right) e^{-j2\pi l \frac{T_s}{N} f} e^{j2\pi k \frac{T_s}{N} f} \partial f$$

$$= \frac{T_s}{N} \int_0^{\frac{N}{T_s}} e^{-j2\pi(k-l) \frac{T_s}{N} f} \partial f = \delta_{l,0} \quad (3.4)$$

On  $H(F) = \frac{T_s}{N} \text{rect} \left( \frac{T_s}{N} f \right)$ , es l'expressió del filtre adaptat. Fent la IFT aconseguim:

$$x(t) = \frac{N}{T_s} \text{sinc} \left( \frac{t}{T_s/N} \right) * \delta \left( t - k \frac{T_s}{N} \right) * \delta \left( t + l \frac{T_s}{N} \right) \cdot h(t) = \frac{N}{T_s} \text{sinc} \left( \frac{t}{T_s/N} \right) \text{sinc} \left( \frac{t}{T_s/N} \right) \quad (3.5)$$

Únicament quan  $k = l$ , el producte recupera el senyal original. Si  $k \neq l$ , el senyal es retardat un múltiple de  $\frac{T_s}{N}$  que fa que el producte de el senyal sigui igual a zero.

A continuació es mostra l'esquema bàsic del receptor:

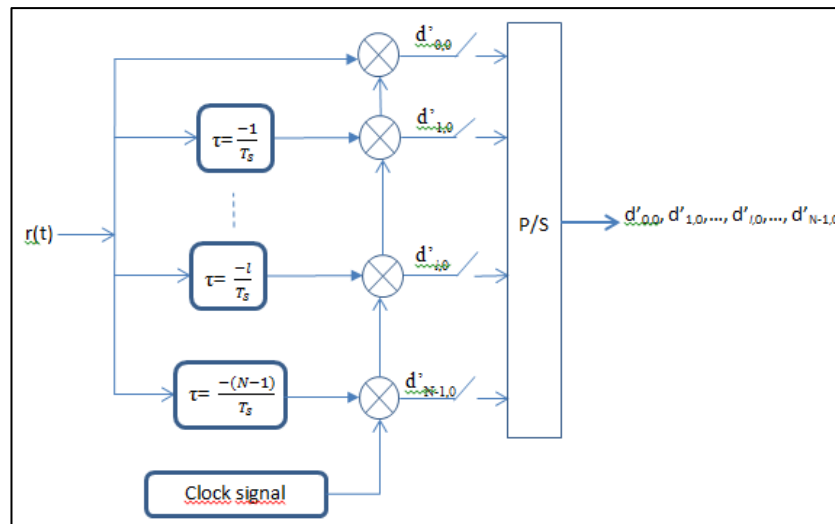


Figura 3.4: Receptor OTDM

### 3.2.3. Estructura Nyquist Modulation

La tècnica OTDM Nyquist Modulation consisteix en transmetre diferents canals de dades a través d'una fibra òptica, on tots els canals estan a la mateixa freqüència òptica. Per cada "slot" de temps s'envia un canal.

#### 3.2.3.1. Transmissor Nyquist Modulation

A cada una de les N branques tenim una font de polsos que produeix polsos cada  $T_s$ ; aquests polsos han de tenir una amplada  $A = 2T_s/N$ . A cada branca, s'obté el pols de la font i aquest senyal es retarda  $(l - 1) T_s/N$  on  $l \in \{1, \dots, N\}$ . Seguidament es convoluciona amb un senyal en forma de sinc per tal de donar a cada pols una forma sinc. A més, s'afegeix el senyal en forma de sinc a altres canals que tenen diferents retards, per finalment ser modulades amb un làser que mou el senyal al domini òptic.

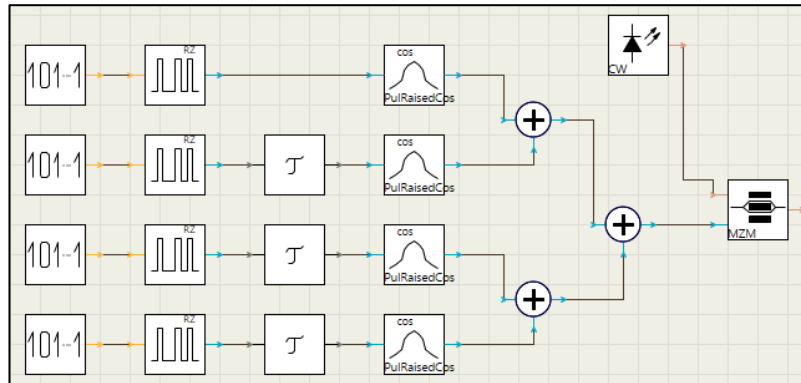


Figura 3.5: Transmissor Nyquist Modulation

Es necessari un transmissor òptic per convertir el senyal elèctric a òptic.

Els transmissors òptics més comunament utilitzats són dispositius semiconductors com ara díodes emissors de llum (LEDs) i els làsers. La diferència entre els LED i làser és que els LEDs produeixen llum coherent, mentre que els díodes làser produeixen llum coherent. Per al seu ús en comunicacions òptiques, els transmissors òptics semiconductors han de ser dissenyats per ser compactes, eficients i fiables, mentre operen en un rang de longitud d'ona òptima, i directament modulats a freqüències altes [5].

El modulador òptic està a càrrec de la transferència de la informació continguda en el domini elèctric en el domini òptic. Això es pot fer de dues maneres: o bé s'aplica una modulació directa de la font òptica o posteriorment es modula l'ona de llum d'amplitud constant per un modulador extern. En el cas de altes taxes de bits i formats de modulació d'ordre superior, generalment, s'utilitza la darrera. Per tant, en aquesta tesi s'utilitzaran només moduladors externs.

### 3.2.3.2. Receptor Nyquist Modulation

Com que ja hem explicat el model matemàtic anteriorment, aquí ens centrarem en la seva implementació.

Després de passar el senyal del domini òptica a l'elèctric, el senyal ha de ser dividit en N branques i a cada una aplicar-li el corresponent retard, és a dir  $[-(l - 1) T_s / N]$  on  $l \in \{1, \dots, N\}$ , i a continuació, com s'ha demostrat matemàticament, ha de ser multiplicat per el senyal del rellotge sinc.

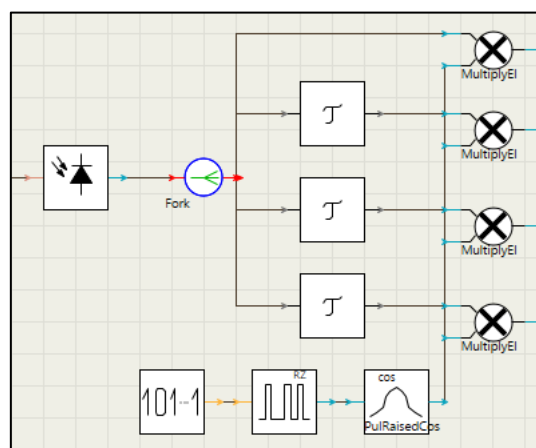


Figura 3.6: Receptor Nyquist Modulation

Per a realitzar el processament de senyal síncron, és necessari un rellotge de recuperació estable (en aquest cas elèctric) amb baix soroll de fase i amplitud. El receptor genera un rellotge a la mateixa freqüència que els senyals transmesos, i si el senyal rebut està convenientment espaiat, permet la recuperació del senyal transmès. La recuperació del rellotge es defineix com el temps per des-multiplexar.

### 3.2.4. Estructura Nyquist Multiplexing

La tècnica OTDM Nyquist Multiplexing consisteix en transmetre diferents canals de dades a través d'una fibra òptica, on tots els canals estan a diferents freqüències òptiques. Per cada "slot" de temps s'envien tots els canals.

El model matemàtic del Nyquist Multiplexing no s'ha explicat, degut a que simplement, al tenir el senyal en freqüències diferents, s'utilitzen filtres centrats a les pertinents freqüències per a recuperar el senyal original.

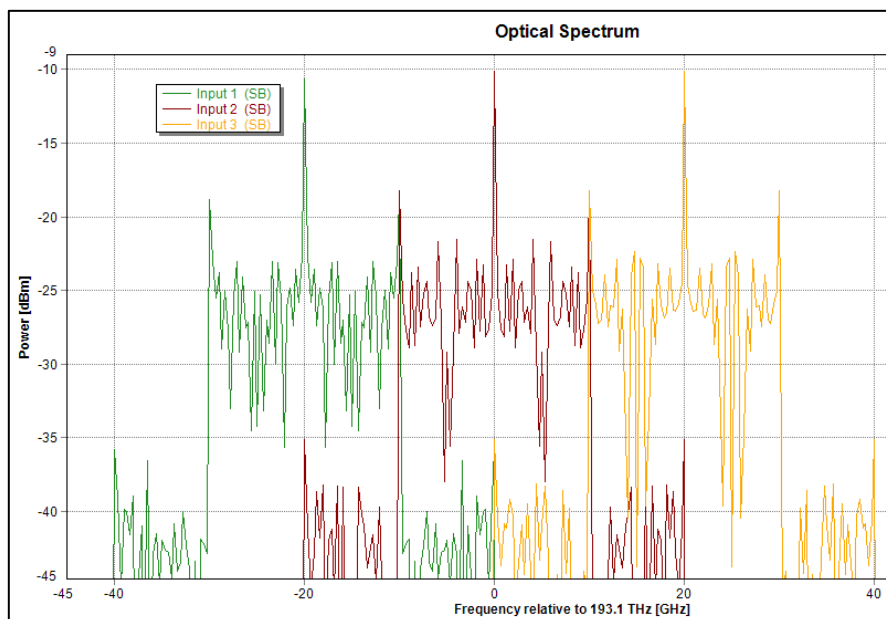


Figura 3.7: OTDM Nyquist Multiplexing domini freqüencial

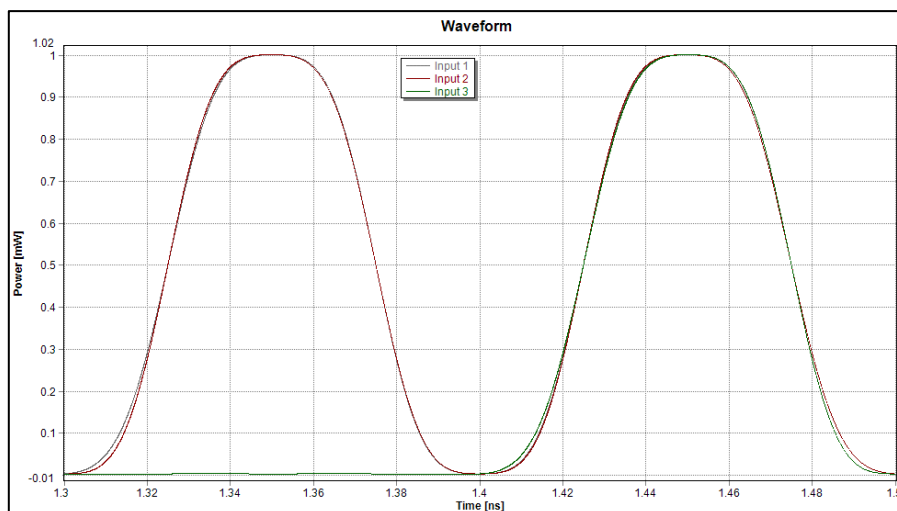


Figura 3.8: OTDM Nyquist Multiplexing domini temporal



Com s'observa en la figura 3.7, el tres canals estan separats en freqüència i s'obté un aprofitament complet de l'ample de banda del canal. Per altra banda, en la figura 3.8 observem que els tres senyals ocupen el mateix "slot" de temps, en aquest cas 100ps.

### 3.2.4.1. Transmissor Nyquist Multiplexing

En aquest cas, a cada una de les N branques tenim una font de polsos que produeix polsos cada  $T_s$ ; aquests polsos han de tenir una amplada  $A = 2T_s/N$ . A cada branca, s'obté el pols de la font i seguidament, és convoluciona amb un senyal en forma de sinc per tal de donar a cada pols una forma sinc. A continuació, es modula amb un làser que mou el senyal al domini òptic per a ser multiplexat amb la resta de branques.

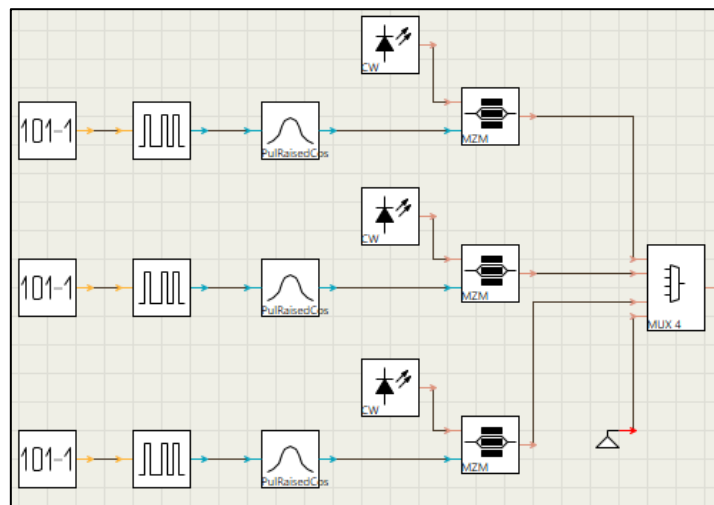


Figura 3.9: Transmissor Nyquist Multiplexing

### 3.2.4.2. Receptor Nyquist Multiplexing

En aquest cas, després de des-multiplexar el senyal, a cada branca és transformat del domini òptic a l'elèctric. Gràcies al multiplexor, i a que els diferents senyals estan en diferents freqüències, ens estalviem el fet d'haver d'utilitzar un senyal de rellotge.

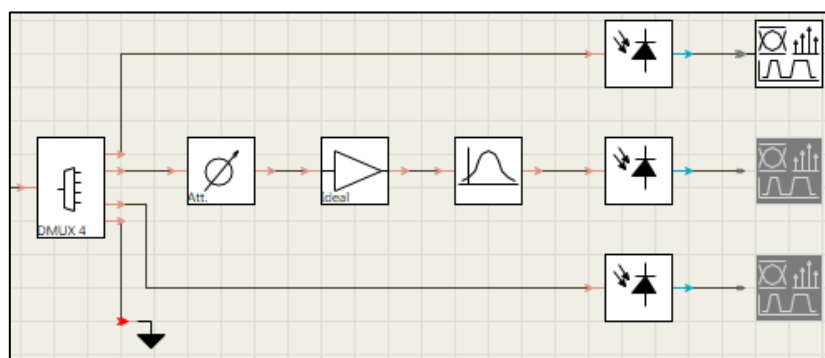


Figura 3.10: Receptor Nyquist Multiplexing

L'atenuador, l'amplificador i el filtre han estat utilitzats per simular la introducció de soroll del canal de comunicacions.

Una vegada explicada la teoria, veurem com s'ha dut a terme i els resultats obtinguts en l'eina de simulació.

## 4. Resultats

En les simulacions, es va començar muntant el model elèctric per tal de demostrar que el sistema funcionava correctament abans de passar al domini òptic. Un cop es va dominar el model elèctric es va passar al domini òptic i es van començar a extreure les mesures de sensibilitat.

### 4.1. Paràmetres inicials

Abans de començar amb els resultats, es presentaran els paràmetres principals de les simulacions. Aquests paràmetres son usats per diferents mòduls. A continuació s'explicaran els paràmetres principals:

- **TimeWindow:** estableix el període de temps real que és representat com a bloc de dades. Estableix la resolució de pantalles espectrals. En les simulacions que s'han fet la TimeWindow escollida és  $32/10 \cdot 10^9 \text{s} = 3,2 \text{ns}$ .
- **SampleRateDefault:** s'utilitza per defecte en tots els mòduls com a paràmetre de freqüència de mostreig. No obstant això, es poden triar diferents freqüències de mostreig a cada mòdul editant el paràmetre SampleRate corresponent.
- **BitRateDefault:** s'utilitza per defecte en tots els mòduls com a paràmetre de taxa de bits. Igual que abans, es poden triar diferents velocitats de bits per a cada mòdul mitjançant l'edició del seu paràmetre de BitRate. En aquesta simulació,  $10 \cdot 10^9 \text{ bit/s}$ .

Name:	Value
Marc	
f N	6
f RollOff	1
f ATT	0
Global	
f TimeWindow	32/BitRateDefault
i GreatestPrimeFactorLimit	2
InBandNoiseBins	OFF
BoundaryConditions	Periodic
LogicalInformation	ON
f SampleModeBandwidth	1280e9
f SampleModeCenterFreq...	193.1e12
f SampleRateDefault	$8 \cdot \text{BitRateDefault} \cdot (2^N)$
f BitRateDefault	10e9
DesignRules	
TrackingMode	None
Scheduler	
Simulation Domain	Auto
Player	

Name:	Value
Marc	
f N	2
f M	9
f RollOff	0
f FreqRef	193.1e12
f deltaFreq	20e9
f ATT	0
f Freq1	$193.1e12 - 20e9$
f Freq2	$193.1e12 + 20e9$
Global	
f TimeWindow	32/BitRateDefault
i GreatestPrimeFactorLimit	2
InBandNoiseBins	OFF
BoundaryConditions	Periodic
LogicalInformation	ON
f SampleModeBandwidth	1280e9
f SampleModeCenterFreq...	193.1e12
f SampleRateDefault	$8 \cdot 2^N \cdot 10e9$
f BitRateDefault	10e9

Figura 4.1: Paràmetres inicials Nyquist Modulation    Figura 4.2: Paràmetres inicials Nyquist Multiplexing

A mesura que anem avançant, s'explicaran més paràmetres i el perquè de les variables.

## 4.2. Simulacions elèctriques

### 4.2.1. Nyquist Modulation

Per començar mostrarem l'esquemàtic del Nyquist Modulation amb 16 portadores. Podem observar en primer lloc i enquadrat en vermell els diferents transmissors de dades. A continuació ens trobem amb el mòdul de codificació de Nyquist, unit amb el mòdul de descodificació de Nyquist. Finalment, enquadrat en verd, veiem el rellotge recuperador.

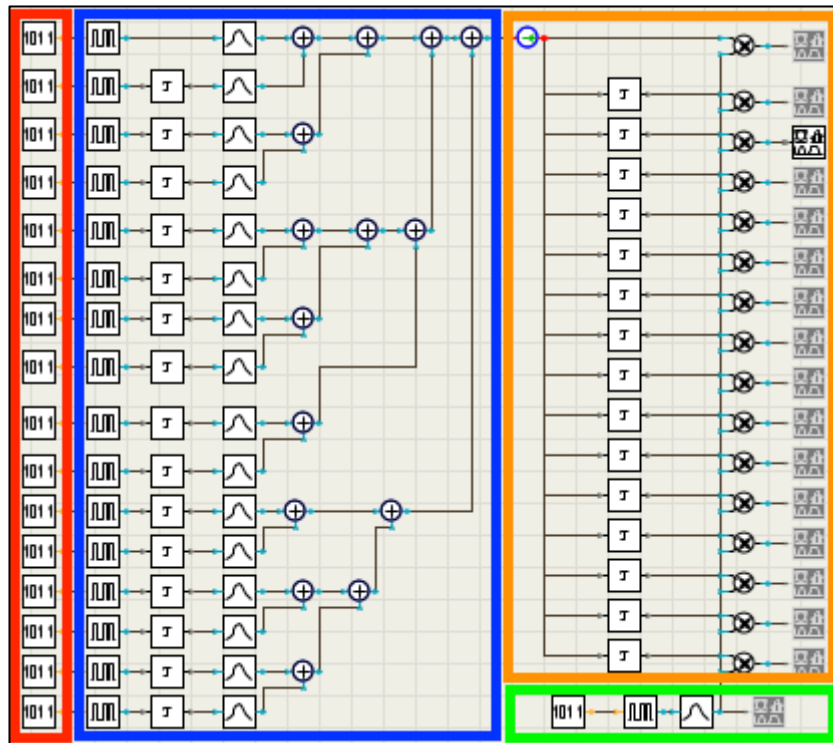


Figura 4.3: Esquemàtic Nyquist Modulation Elèctric

Per aconseguir ubicar, en aquest cas 16 subportadores dins dels 100ps del temps de bit, es fa regulant el paràmetre SymbolRate del mòdul on és convoluciona el senyal amb la sinc. Més endavant s'explicarà amb més detall.

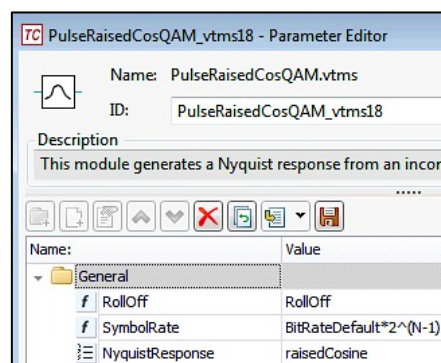


Figura 4.4: Mòdul on és convoluciona el senyal amb la sinc

En aquest cas, si tenim 16 subportadores, l'amplada del pols ha de ser:  $\frac{100ps}{16 subp} = 6,25ps$ .

El desplaçament temporal entre polsos serà el mateix per així aconseguir la ortogonalitat.

Ara mostrarem com estan distribuïts en el temps els diferents senyals:

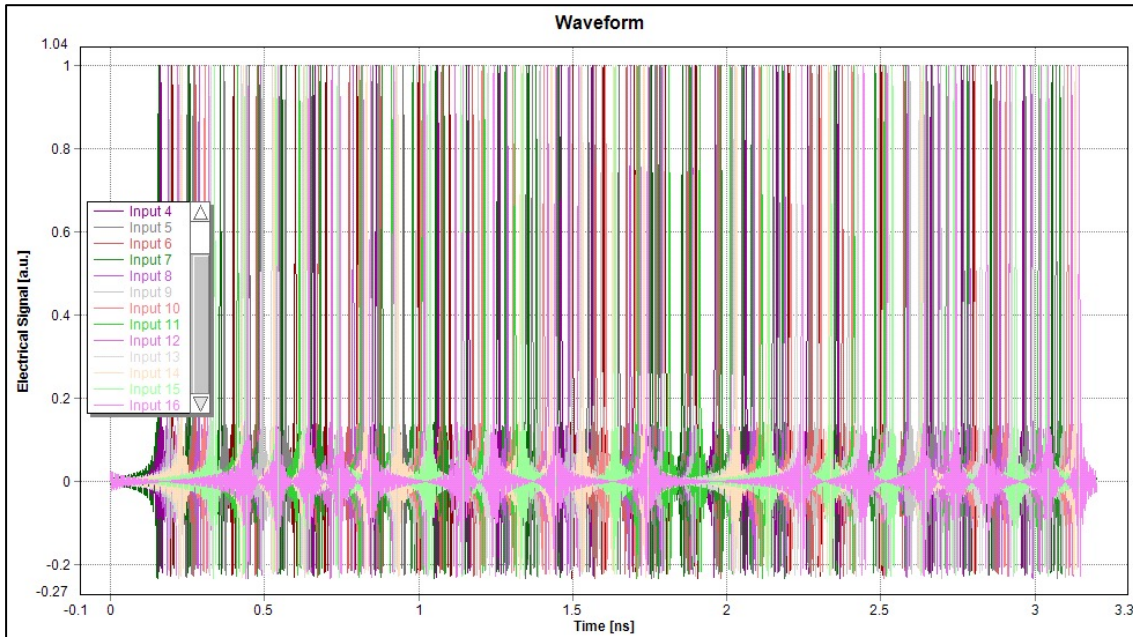


Figura 4.5: Senyal elèctric transmès Nyquist Modulation

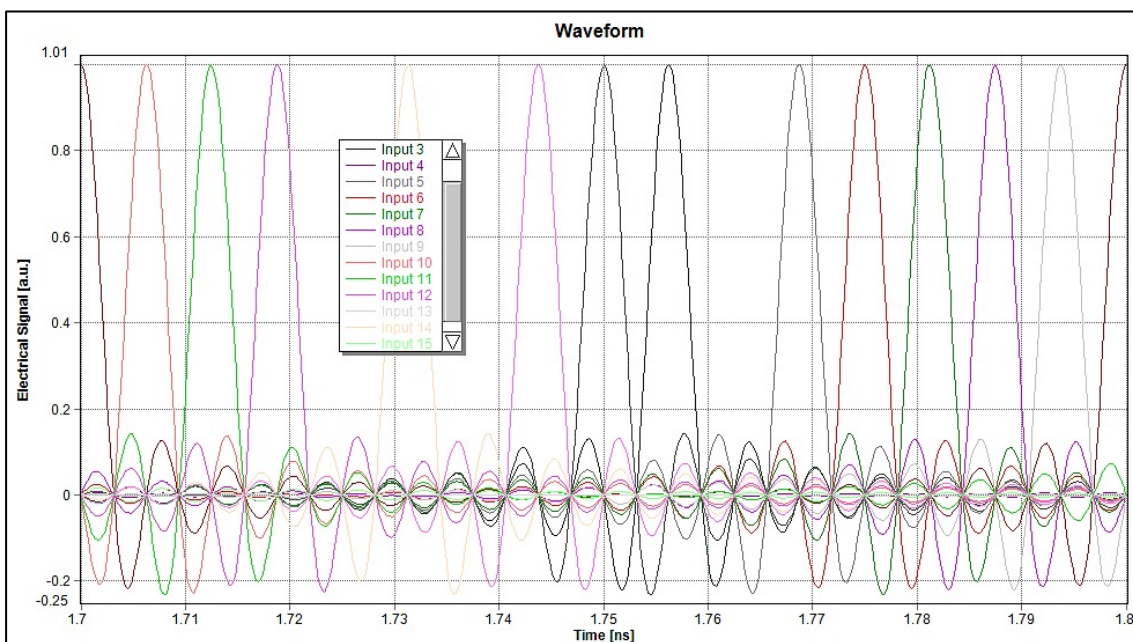


Figura 4.6: Zoom del senyal elèctric transmès Nyquist Modulation

Com podem observar, aconseguim un perfecte aprofitament del temps de bit, emplenant-lo completament. A més a més, en la figura 4.6 s’observa com totes les subportadores creuen perfectament sincronitzades en zero quan no estan al seu “slot” de temps, això assegura la ortogonalitat i la correcta reconstrucció de el senyal rebuda en el receptor. En la figura 4.6 hi ha representant un període complet amb les seves 16 subportadores, 3 de les quals, en aquest període, valen 0.

A continuació, es mostrarà l’anàlisi del diagrama d’ull per a només 4 subportadores, degut a que si ho fem amb les 16 són masses i no s’aprecia bé. Com que en aquest cas ho farem amb 4 subportadores, per ocupar tot el canal, canviarem també l’amplada del pols:  $\frac{100ps}{4 subp} = 25ps$ . De la mateixa manera, també canviarem el desplaçament temporal



entre polsos, igualant-lo al l'ampada dels polsos per així seguir assegurant la ortogonalitat.

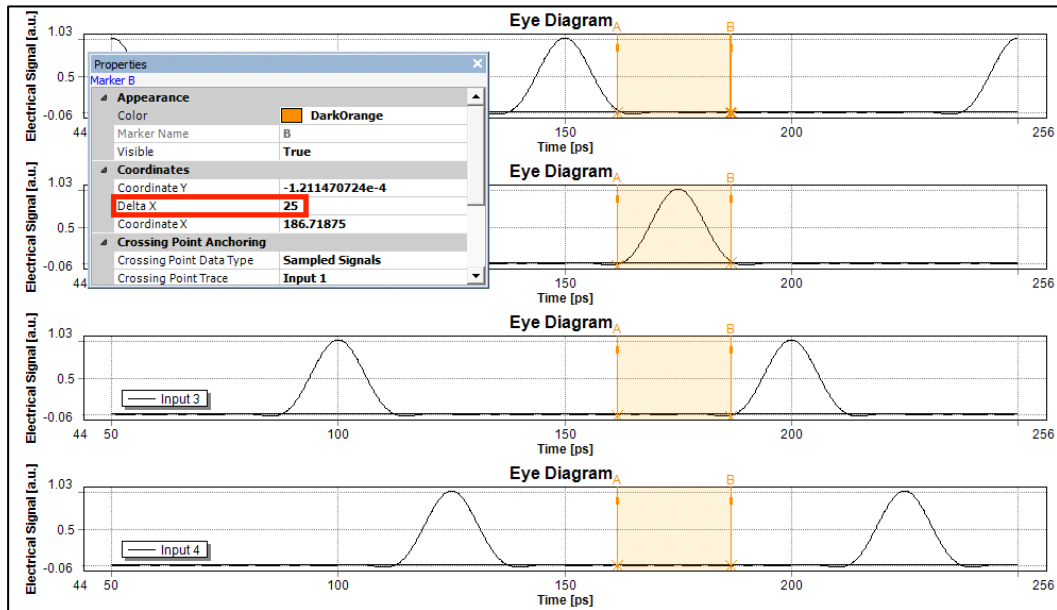


Figura 4.7: Diagrama d'ull amb 4 subportadores Nyquist Modulation

Com es pot observar en el diagrama d'ull, els polsos estan perfectament sincronitzats i quan n'acaba un, en comença un altre. Enquadrat en vermell observem la duració d'un dels polsos, en concret el del segon senyal.

A continuació ens centrarem en la part del receptor tornant en el cas de 16 subportadores. Començarem per el rellotge de recuperació del senyal:

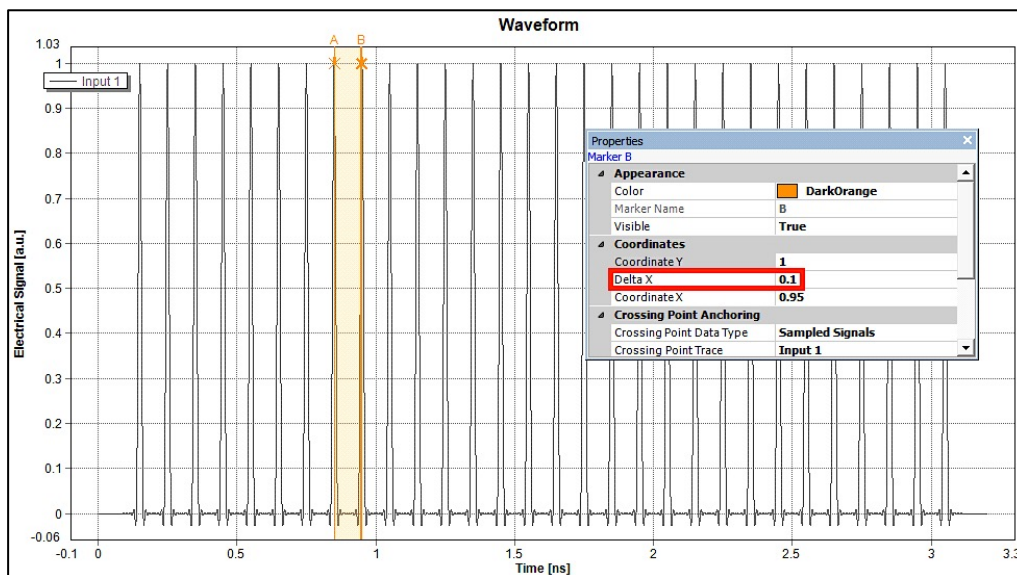


Figura 4.8: Senyal de rellotge Nyquist Modulation

El senyal de rellotge és una sinc espaiada 100ps. En tots els casos, tenim un  $\text{BitRateDefault} = 10\text{GHz} \rightarrow T_s = 100\text{ps}$ , per tant aquest senyal ha d'estar espaiats 100ps per tal de captar cada senyal cada  $T_s$ . Posteriorment, a cada branca s'aplica el retard corresponent per a recuperar el senyal.

En la següent figura, es mostra un exemple d'un senyal transmès comparat amb el mateix senyal rebut.

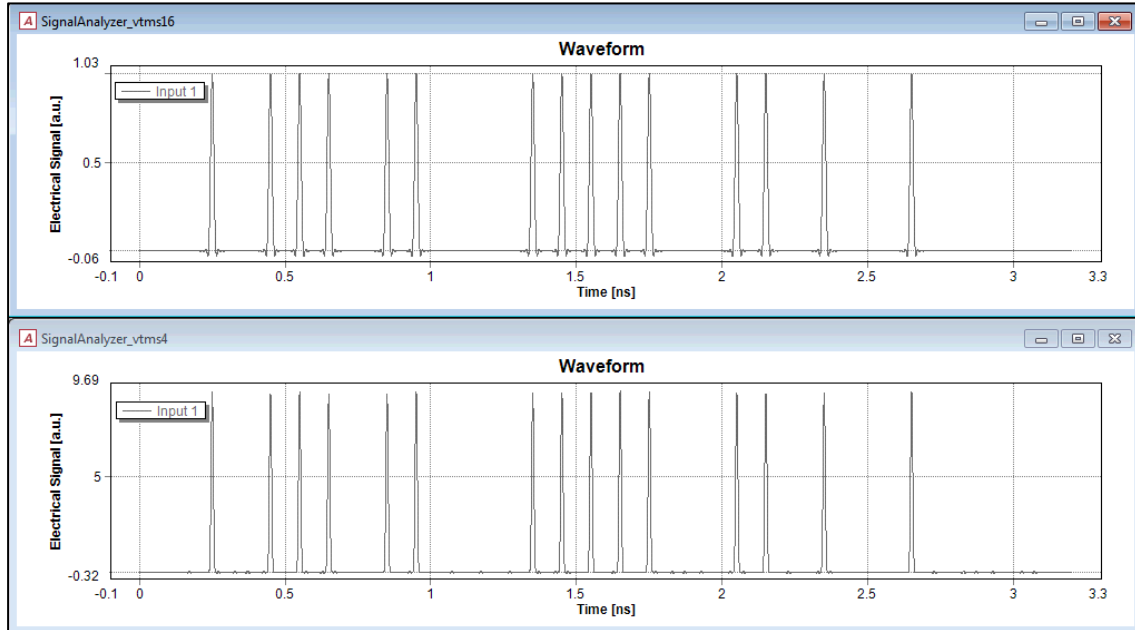


Figura 4.9: Senyal transmès (superior). Senyal rebut (inferior)

Com es pot observar, son el mateix i aconseguim una reconstrucció perfecta del senyal.

#### 4.2.2. Nyquist Multiplexing

En el cas del Nyquist Multiplexing, no té sentit estudiar un transmissor i un receptor elèctric. Simplement hem d'aconseguir que el pols de Nyquist ocupés tot el temps de bit, és a dir, 100ps.

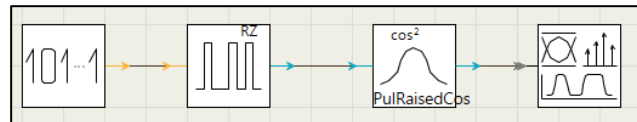


Figura 4.10: Esquemàtic d'una de les N branques a multiplexar

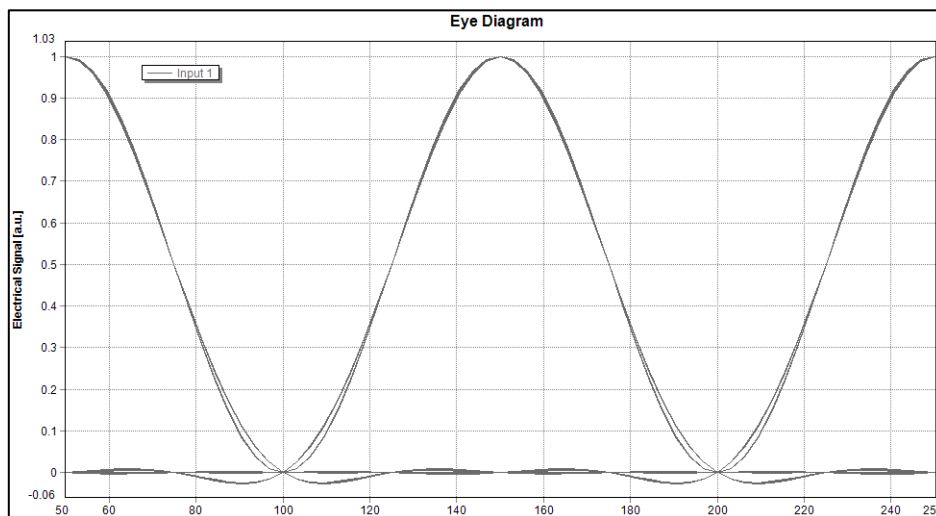


Figura 4.11: Diagrama d'ull Nyquist Multiplexing

Com podem observar en el diagrama d'ull, el pols dura exactament 100ps. Aprofundirem més en el Nyquist Multiplexing en els següents apartats.

### 4.2.3. Efectes del Roll-off

Un filtre de cosinus alçat és un tipus de filtre electrònic, utilitzat freqüentment en sistemes de telecomunicacions a causa de que és capaç de reduir al mínim la interferència entre símbols (ISI). Es diu així perquè la part no nul·la de l'espectre freqüencial és un cosinus que, en la seva forma més simple ( $\beta = 1$ ), es troba 'alçat' per situar-se per sobre de l'eix f (horitzontal) [7].

El filtre de cosinus alçat és una implementació d'un filtre pas baix de Nyquist. Amb la qual cosa, l'espectre tindrà simetria parell en  $\frac{1}{2T}$ , on T és el període del sistema de comunicacions.

La seva descripció en el domini de la freqüència és una funció definida a trossos, donada per:

$$|H(f)| = \begin{cases} 1.0, & |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi T}{\beta} \left[ |f| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right], & \frac{1-\beta}{2T} < |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \quad (4.1)$$

i caracteritzada per dos valors;  $\beta$ , el factor de roll-off, comprés entre [0,1] i T, l'invers de la taxa binària.

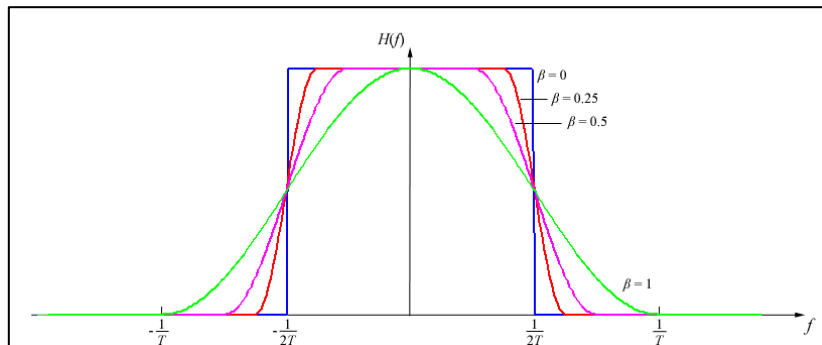


Figura 4.12: Resposta a un impuls d'un filtre de cosinus alçat amb diferents factors de Roll-Off

La resposta a l'impuls d'aquest tipus de filtres (suposant fase lineal) i en termes de sinc normalitzada, ve donada per:

$$h(t) = \text{sinc} \left( \frac{t}{T} \right) \frac{\cos \left( \frac{\pi \beta t}{T} \right)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T^2}} \quad (4.2)$$

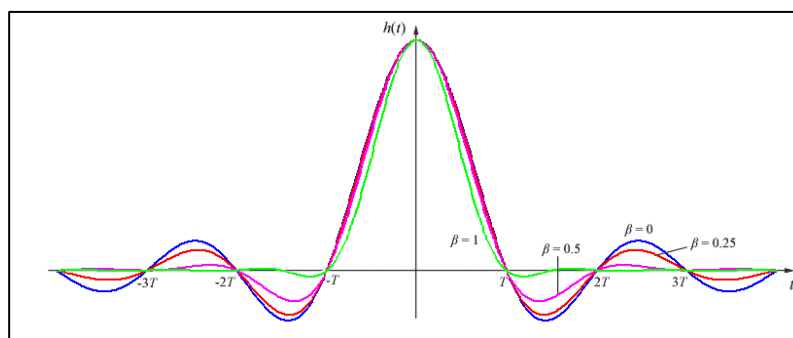


Figura 4.13: Resposta en amplitud d'un filtre de cosinus alçat amb diferents factors de Roll-Off

A continuació, mostrarem diferents efectes que provoca el Roll-Off sobre el nostre senyal. En el cas del Nyquist Modulation, només ens afecta en la mesura de que es pertorba el diagrama d'ull.

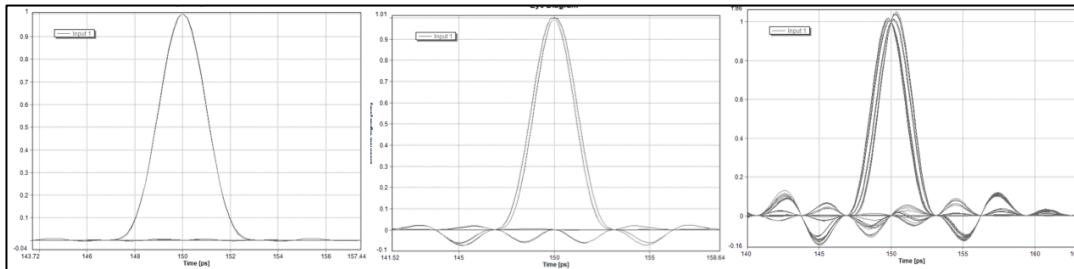


Figura 4.14: (a) Roll-Off=1; (b) Roll-Off=0,5; (c) Roll-Off=0

Més endavant, a l'apartat de mesures de sensibilitat, s'estudiaran el comportament dels diferents esquemàtics en funció del Roll-Off.

L'efecte del Roll-Off és més rellevant en el cas del Nyquist Multiplexing per dues raons, al ser el pols més ample afecta més en el diagrama d'ull i depenent del factor de Roll-Off obtindrem un espectre més o menys quadrat.

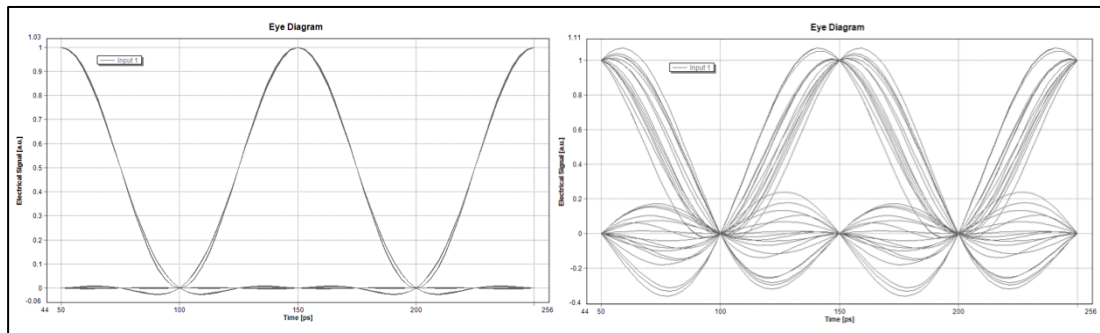


Figura 4.15: (a) Roll-Off=1; (b) Roll-Off=0

Com hem vist en aquest mateix apartat, depenent del factor de Roll-Off escollit, la funció de transferència és més o menys quadrada. Degut aquest fet, al convolucionar el senyal amb el filtre de cosinus alçat, si no és perfectament quadrat (factor de Roll-Off=0), veiem com s'eixampla l'espectre.

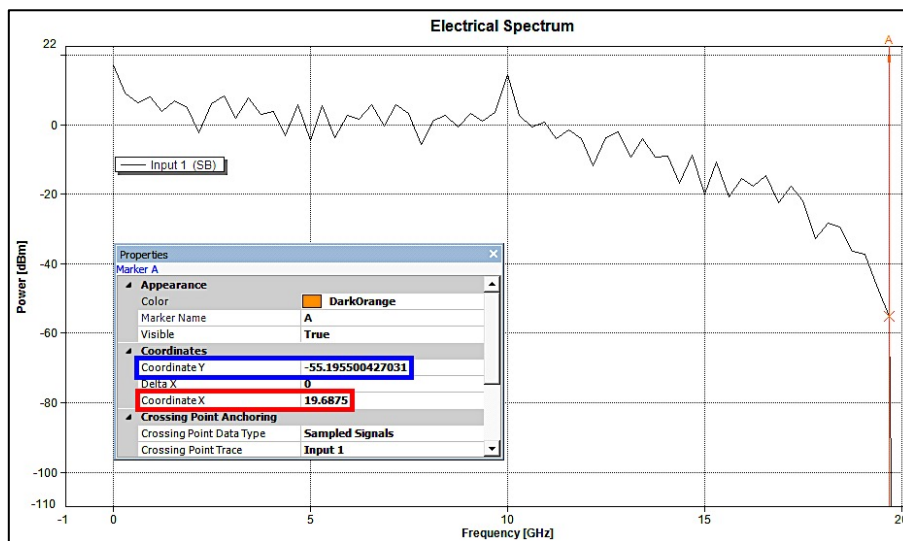


Figura 4.16: Espectre Nyquist Multiplexing Roll-Off=1



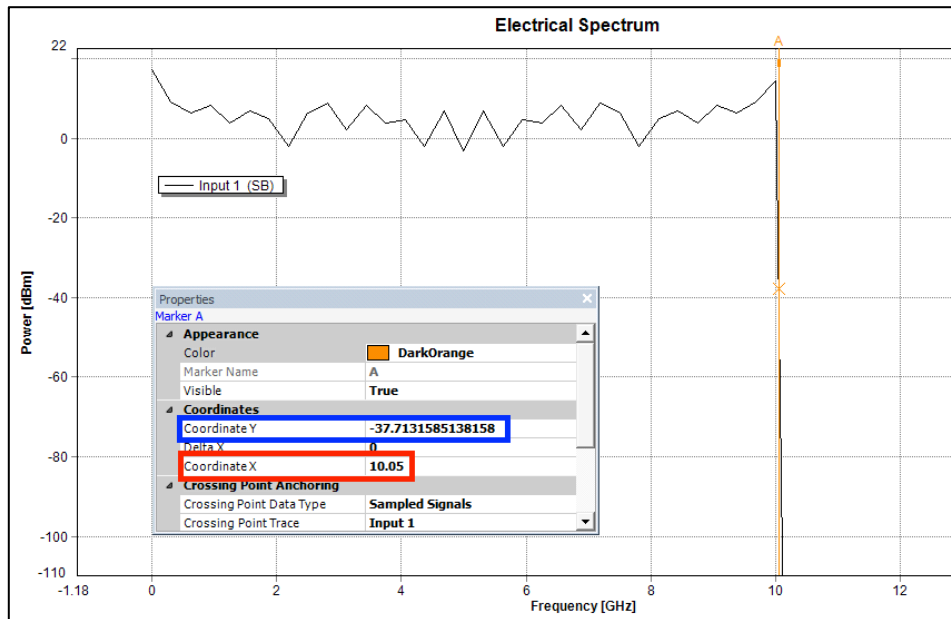


Figura 4.17: Espectre Nyquist Multiplexing Roll-Off=0

Com es pot observar en la figura 4.17, l'espectre cau quasi perpendicular quan arriba als 10GHz. Per altra banda, en l'altre cas extrem, el de la figura 4.16, veiem com l'espectre s'eixampla fins als 18GHz per baixar dels -40dBm.

### 4.3. Simulacions òptiques

La part més difícil de controlar es l'elèctrica, ja que és la que crea el senyal i defineix la duració i amplitud dels polsos. Per tant, la part òptica serà explicada breument, sobretot per comprovar que a l'afegir els diferent elements per transformar al domini òptic, seguim tenint una bona recepció del senyal.

En general, les gràfiques elèctriques no es mostraran en aquest apartat degut a que seria una repetició de l'anterior.

#### 4.3.1. Nyquist Modulation

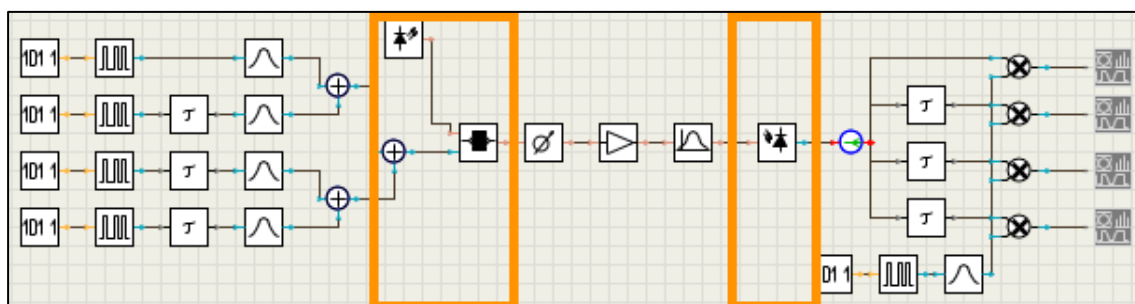


Figura 4.18: Esquemàtic Nyquist Modulation Òptic

En la Figura 4.18, podem observar enquadrat a l'esquerra, el pas Electro-òptic, i a la dreta el seu invers, el pas Opto-elèctric.

A continuació, veurem com queden les 16 subportadores multiplexades en freqüència en el domini òptic. També agafarem un canal qualsevol i compararem el senyal en el transmissor i en el receptor, en aquest cas, en el domini elèctric.

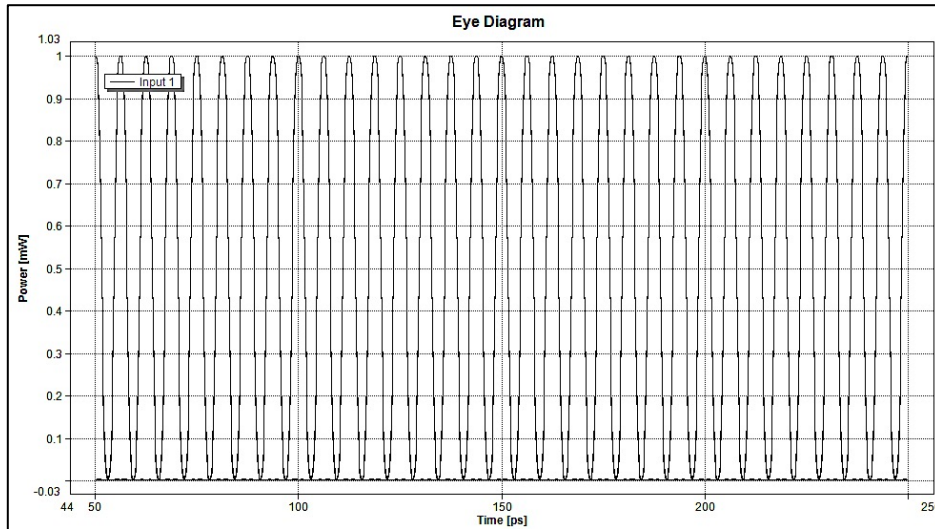


Figura 4.19: Diagrama d'ull de les 16 subportadores juntes en el domini òptic

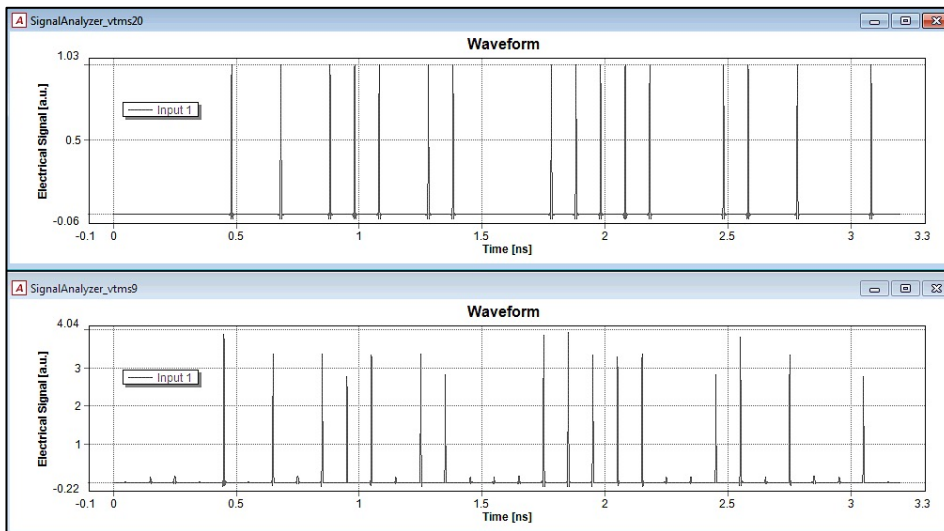


Figura 4.20: A dalt, senyal transmès. A baix, senyal rebut

En la Figura 4.19 podem observar com estan totes les subportadores perfectament sincronitzades ocupant tot l'ample de banda. En la figura 4.20, podem comprovar com recuperem el mateix senyal transmès encara que els polsos tenen amplituds diferents.

### 4.3.2. Nyquist Multiplexing

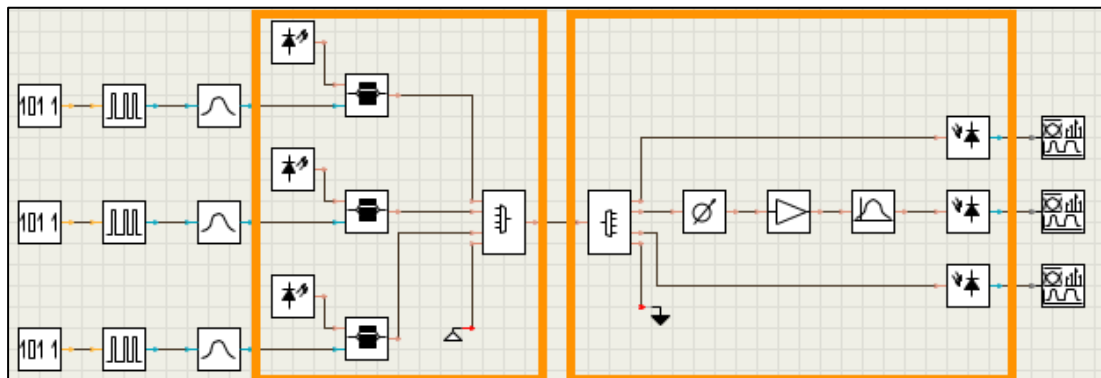


Figura 4.21: Esquemàtic Nyquist Multiplexing Òptic

En la figura 4.21, podem observar enquadrat a l'esquerra, el pas Electro-òptic, i a la dreta el seu invers, el pas Opto-elèctric.

A continuació comprovarem com els tres canals estan perfectament separats en freqüència, i de la mateixa manera que abans, compararem per un dels tres canals un senyal transmès amb el rebut. Per tenir els tres canals perfectament separats en freqüència, utilitzem un factor de Roll-Off = 0, que com acabem de veure, el seu espectre elèctric (banda base) ocupa 10 GHz amb la qual cosa l'espectre òptic (passa-banda) ha de ser de 20 GHz. Per tant, utilitzem una separació de 20GHz entre canals.

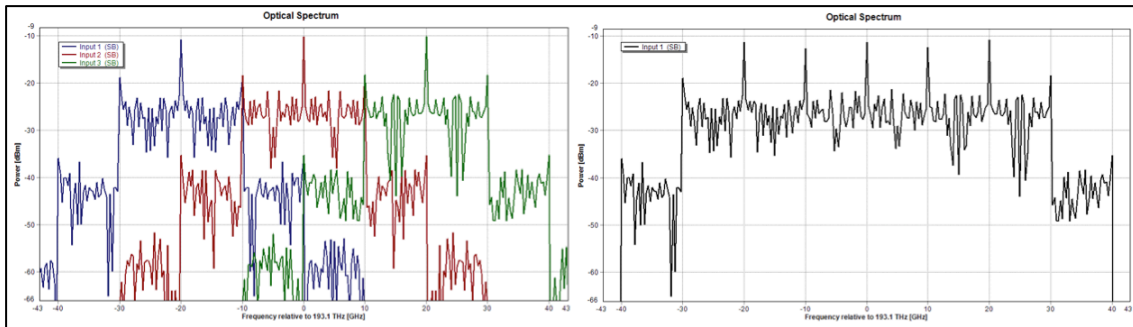


Figura 4.22: El tres canals; a l'esquerra, abans de multiplexar-los, a la dreta, després

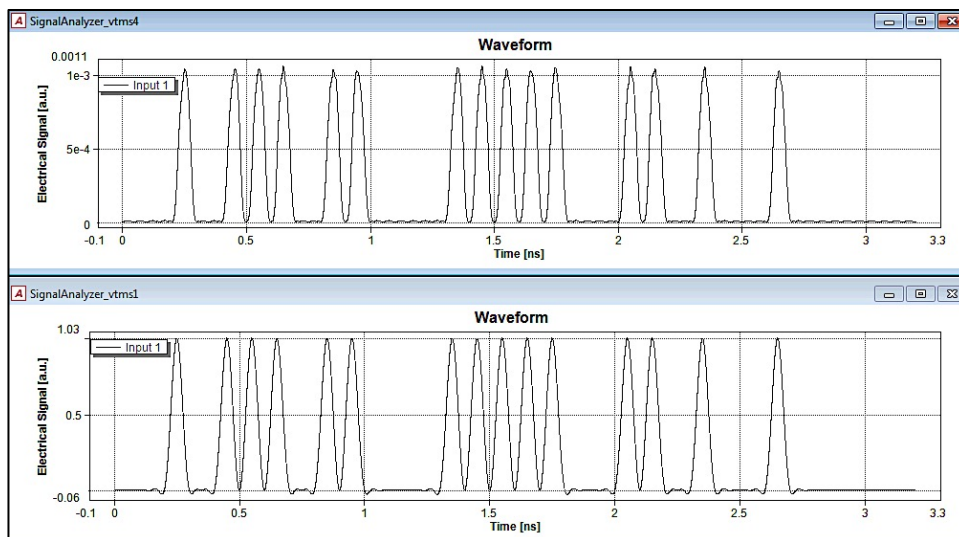


Figura 4.23: A dalt, senyal transmès. A baix, senyal rebut

En la figura 4.22, veiem l'espectre òptic dels tres canals. A l'esquerra, abans de passar pel multiplexor i, a la dreta, després de passar pel multiplexor quan els tres senyals ja s'han unit. En la figura 4.23, podem comprovar com recuperarem correctament el mateix senyal transmès.

#### 4.4. Mesures de sensibilitat

Una vegada comprovat que tot segueix funcionant correctament al passar al domini òptic, es el moment de començar amb les mesures de sensibilitat per estudiar el comportament dels diferents esquemàtics.

Per això, va caldre programar uns scripts, que juntament amb uns mòduls del software VPI ens permeten prendre diferent dades de cert interès. En el nostre cas, tant en el Nyquist Modulation com en el Nyquist Multiplexing, vam començar calculant la BER

respecte la potència òptica i finalment, fixant la  $BER = 10^{-3}$ , vam calcular les gràfiques de Penalty.

Els scripts es poden trobar en el annex 7.2; i els valors de les gràfiques en el annex 7.1.

#### 4.4.1. Nyquist Modulation

##### 4.4.1.1. BER – Potència òptica

A continuació, es mostra un gràfic on és representa la variació de la BER respecte la potència òptica per a diferents factors de Roll-Off. Aquest gràfic s'ha fet utilitzant l'esquemàtic del Nyquist Modulation amb 16 subportadores.

Per el primer gràfic s'ha anat augmentant la variable d'atenuació de l'atenuador de 0dB fins a 40dB amb passos de 2dB. Una vegada vist per on és movia el valor de  $BER = 10^{-3}$ , s'ha acurat la simulació utilitzant passos d'atenuació de 0,1dB entre 28 i 30 dB.

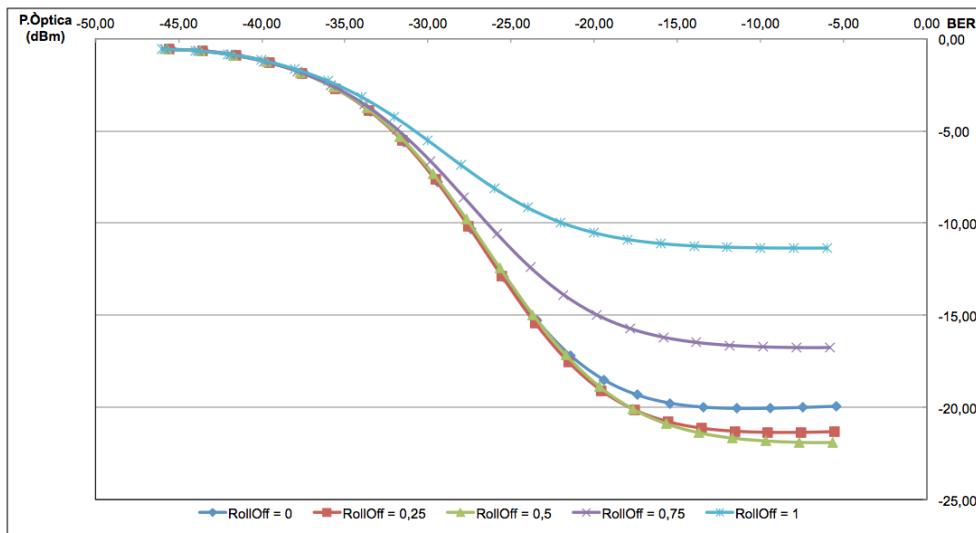


Figura 4.24: Gràfica de la BER respecte la potència òptica amb 16 subportadores

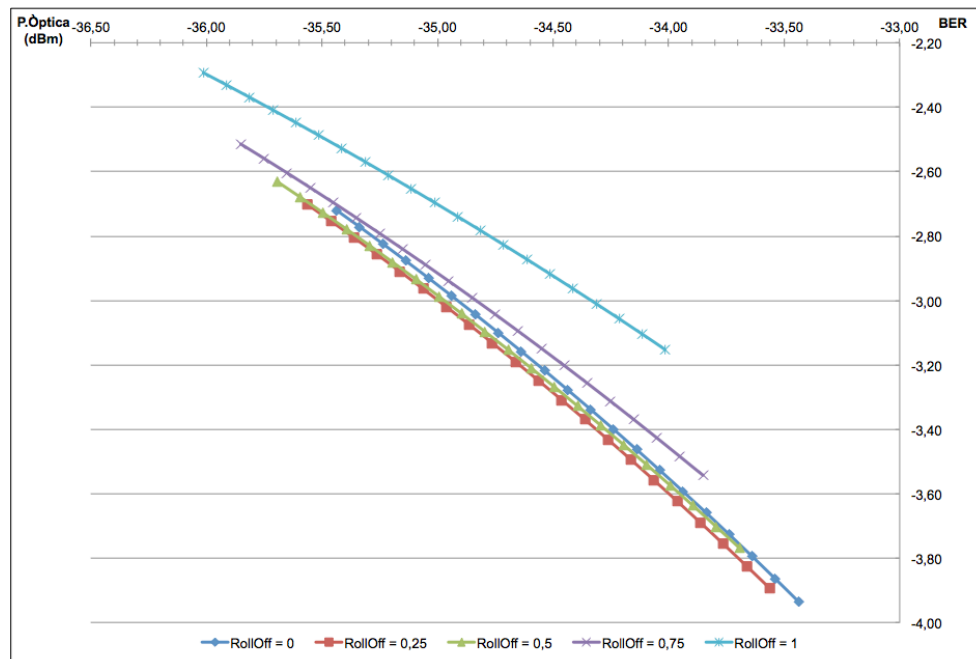


Figura 4.25: Zoom, de la figura anterior, al voltant de  $BER=10^{-3}$

Com es lògic, i es pot observar en la figura 4.24, com més potència tenim, més bo és el resultat de la BER obtinguda. Quan tenim massa potència, podem observar com apareix un BER floor, la BER mínima es satura. Com més gran és el roll-off, més amunt està el BER floor. Mirant la figura 4.14 es podria esperar que fos a l'inrevés doncs el diagrama d'ull per a un Roll-Off = 0 es veu més distorsionat. En la figura 4.25, centrada en el punt on la BER =  $10^{-3}$ , veiem com en el cas de Roll-Off = 1, necessitem una mica menys de 1dB per assolir la mateixa BER que en el cas de Roll-Off = 0.

#### 4.4.1.2. Penalty: Potència òptica – Roll-Off

Seguidament, es mostrarà un gràfic on és representa la variació de la potència òptica respecte el factor de Roll-Off. Aquest gràfic s'ha fet utilitzant l'esquemàtic del Nyquist Modulation amb 16 subportadores.

Per aquest gràfic s'ha fet un script que iterava variant l'atenuació, apropant-se cada cop més, fins a trobar el valor de la BER =  $10^{-3}$ , amb un error màxim de l'atenuació de 0,005dB; per a diferents factors de Roll-Off.

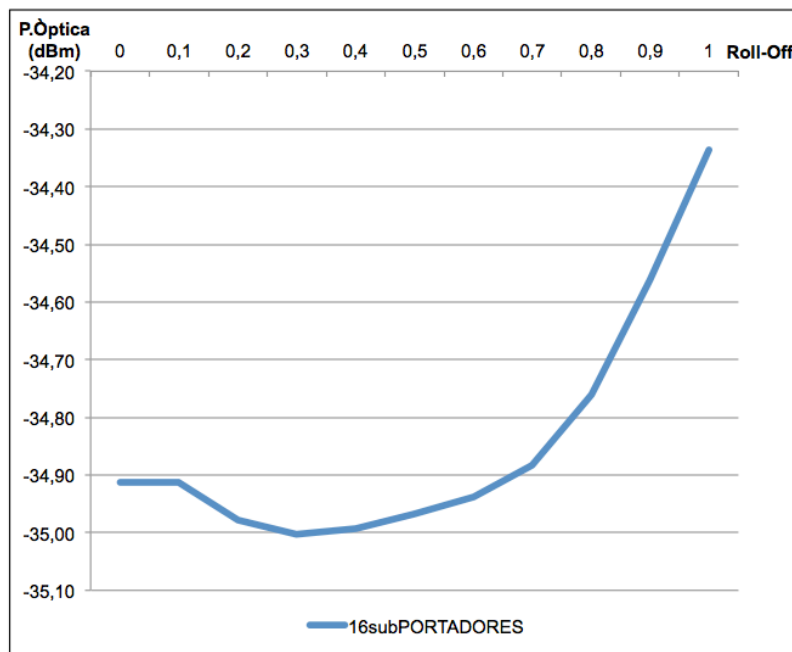


Figura 4.26: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció del Roll-Off

En la figura 4.26 podem observar com a mesura que augmenta el factor de Roll-Off necessitem més potència per assolir el valor de la BER =  $10^{-3}$ , arribant a un mínim de -35dBm per al factor de Roll-Off = 0,3. Encara que com podem observar, la diferència no és molt gran, no arriba als 0,7dB.

#### 4.4.1.3. Penalty: Potència òptica – Número de subportadores

En aquest apartat, es mostrarà un gràfic on és representa la variació de la potència òptica respecte al número de subportadores per a diferents factors de Roll-Off. Aquest gràfic s'ha fet utilitzant l'esquemàtic del Nyquist Modulation amb 1, 2, 4, 8 i 16 subportadores.

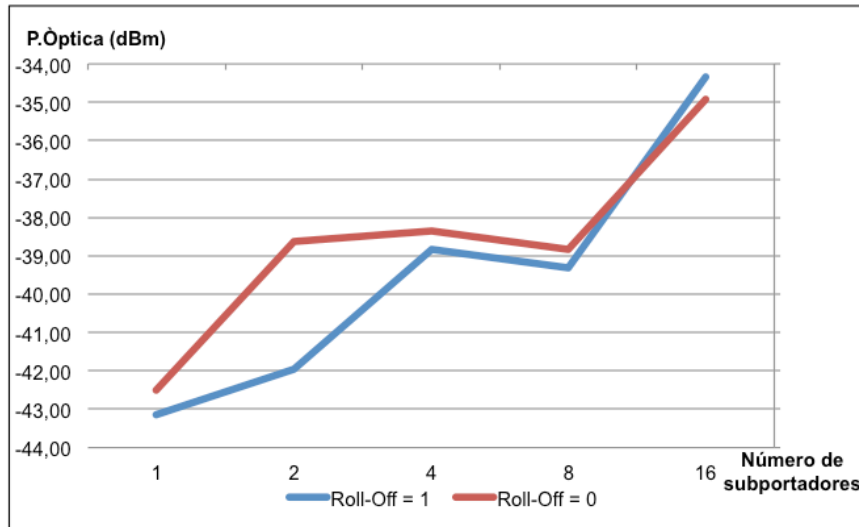


Figura 4.27: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció del número de subportadores

En aquest gràfic, hem anat variant l'amplada del pols segons el número de subportadores actives. És a dir, quan només teníem una sola subportadora, la duració del pols era de 100ps, ocupant tot el BitRate; quan teníem dos subportadores, cada pols feia 50ps d'ample; així fins al cas de 16 subportadores on cada pols ocupava 6,25ps.

Com podem observar en la figura 4.27, com més canals actius tenim i més estretim els polsos, més potència necessitem per assolir el valor de  $BER = 10^{-3}$ . Per tant, el número de subportadores juga un paper important a l'hora de necessitar més o menys potència òptica.

El factor Roll-Off, en aquests esquemàtics, no juga un paper determinant, si que és cert que en el cas de 2 subportadores, s'eixampla més la diferència entre els factors de Roll-Off iguals 1 i 0. La diferència és de 3,5 dB en aquest cas.

El comportament sembla una mica caòtic, segurament caldria fer simulacions amb un temps de simulació major per tenir una millor estadística.

#### 4.4.2. Nyquist Multiplexing

##### 4.4.2.1. BER – Potència òptica

A continuació, es mostra un gràfic on és representada la variació de la BER respecte la potència òptica per a diferents factors de Roll-Off. Aquest gràfic s'ha fet utilitzant l'esquemàtic del Nyquist Multiplexing amb una separació entre canals de 2THz, per simular com si només n'actués un. Més endavant s'estudiarà l'efecte d'anar apropant o allunyant els canals en freqüència.

Per el primer gràfic s'ha anat augmentant la variable d'atenuació de l'atenuador de 24dB fins a 40dB amb passos de 2dB. Fer-ho amb atenuacions més petites no tenia sentit ja que donava resultats de la BER per sota de l'ordre de  $10^{-12}$ . Una vegada vist per on és movia el valor de  $BER = 10^{-3}$ , s'ha acurat la simulació utilitzant passos d'atenuació de 0,1dB entre 28 i 30 dB.

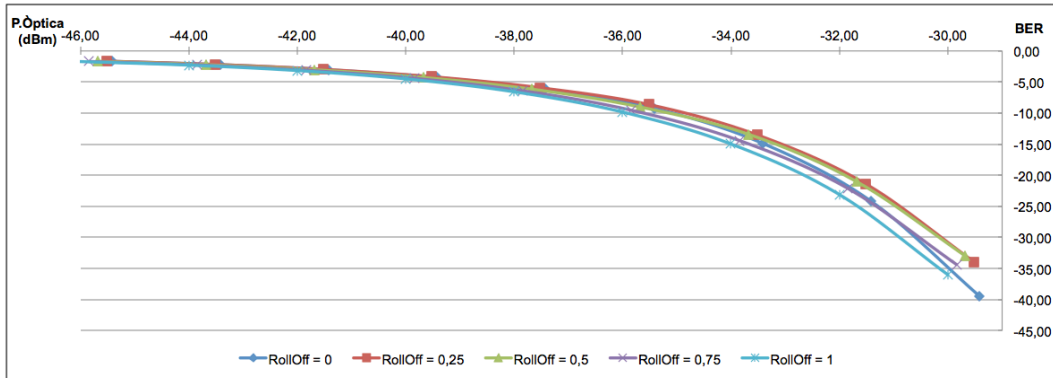


Figura 4.28: Gràfica de la BER respecte la potència òptica amb un únic canal

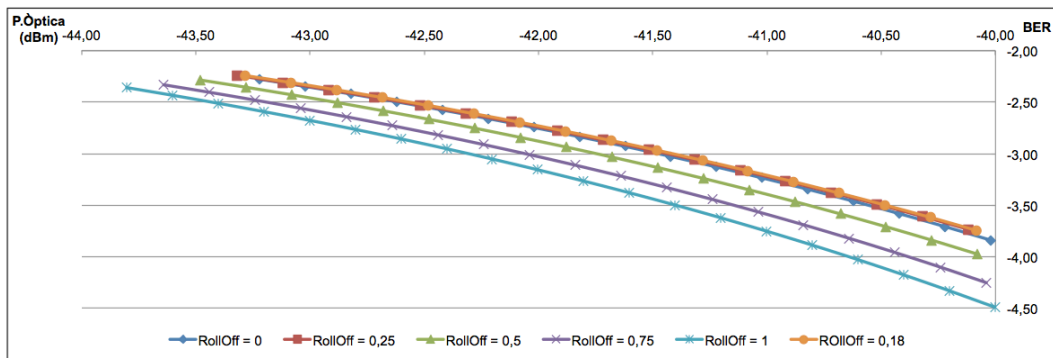


Figura 4.29: Zoom, de la figura anterior, al voltant de  $BER=10^{-3}$

Com en el apartat 4.4.1.1 es lògic, i es pot observar en la figura 4.28, que com més potència tenim, més bo és el resultat de la BER obtinguda. Encara que en aquest cas no apareix un BER floor. En la figura 4.29, centrada en el punt on la  $BER = 10^{-3}$ , veiem com en el cas de Roll-Off = 0, necessitem una mica menys de 1dB per assolir la mateixa BER que en el cas de Roll-Off = 1. És a dir, en aquest cas el comportament del Roll-Off és invers al cas anterior.

#### 4.4.2.2. Penalty: Potència òptica – separació en freqüència dels canals

A continuació, es mostra un gràfic on és representa la variació de la potència òptica del canal principal respecte a la separació en freqüència de dos canals adjunts per cada costat (figura 4.21). Es mostrarà per a dos factors de Roll-Off. Aquest gràfic s'ha fet utilitzant l'esquemàtic del Nyquist Multiplexing jugant amb una separació entre canals.

Aquest gràfic s'ha realitzat mitjançant un script que iterava variant l'atenuació, apropant-se cada cop més, fins a trobar el valor de la  $BER = 10^{-3}$ , amb un error màxim de l'atenuació de 0,005dB; per a dos factors de Roll-Off. Per altra banda, també anava iterant la separació en freqüència dels canals veïns, amb passos de 2GHz, començant amb una separació de 14GHz, fins als 44GHz.

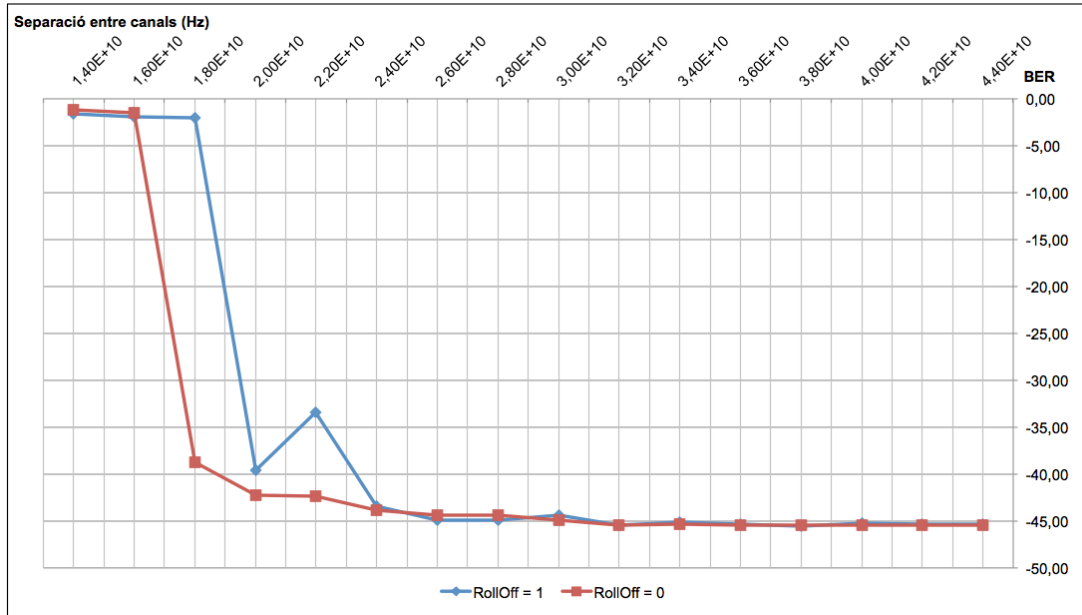


Figura 4.30: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció de la separació entre canals

Com podem observar en la figura 4.30, quan els canals son molt propers, tant que estan solapats, observem una caiguda abrupta de la sensibilitat. Cal comentar, que la BER és  $10^{-3}$  a partir de la separació de 20GHz per al cas de Roll-Off 1, i de 18GHz per al cas de Roll-Off 0. Amb menys separació, no s'assoleix una BER =  $10^{-3}$ .

A partir de que es deixen de solapar els canals en freqüència es va tendint al valor de sensibilitat sense interferència, on el Roll-Off = 0, cau abans degut a que té un espectre freqüencial més estret, a diferència del Roll-Off = 1. És a dir, amb Roll-Off = 0, amb una separació de 18GHz ja obtenim molt bons resultats, en canvi, per al Roll-Off = 1, no passa fins als 20GHz de separació.

Finalment, podem observar que els dos tenen un comportament idèntic a partir de la separació de 24GHz, i per força que els allunyem no aconseguim baixar dels -45dBm.



## 5. Budget

COST DEL PROJECTE				
Concepte	Detall	Hores (estimacio)	Cost/hora (enginyer junior)	Cost final (€)
DOCUMENTACIÓ (redacció i revisió)	Proposta de Projecte	10	8€/h	80,00 €
	Revisió crítica del disseny	20	8€/h	160,00 €
	Resultats de grup	10	8€/h	80,00 €
	Redacció informe final	35	8€/h	280,00 €
	Revisió informe final	15	8€/h	120,00 €
INVESTIGACIÓ NYQUIST MODULATION I MULTIPLEXING	Llegir articles i documents	15	8€/h	120,00 €
	Analitzar el funcionament de la modulació	15	8€/h	120,00 €
	Estudiar l'estat de la tècnica de la modulació	10	8€/h	80,00 €
	Aprendre com funciona el software	20	8€/h	160,00 €
SIMULACIONS	Primera prova amb el simulador	15	8€/h	120,00 €
	Muntar transmissor i el receptor elèctric	35	8€/h	280,00 €
	Passar al domini òptic	10	8€/h	80,00 €
	Programa els scripts	20	8€/h	160,00 €
	Ejectuar les simulacions	10	8€/h	80,00 €
SOFTWARE	Llicència del software	-	-	500,00 €
	Amortització (5%/quatrimestre)	-	-	-25,00 €
ESTUDI DE LES SIMUALCIONS	Analitzar i processar els resultats	30	8€/h	240,00 €
	Extreure conclusions	15	8€/h	120,00 €
	Investigació addicional sobre de la modulació	15	8€/h	120,00 €
<b>TOTAL:</b>		300	-	2.875,00 €

Taula 5.1: Budget

## 6. Conclusions i futur desenvolupament:

Com a conclusions podem dir que hem pogut implementar en el simulador un model tant per el Nyquist Modulation com per el Nyquist Multiplexing a nivell elèctric i òptic.

Per una banda, hem avaluat l'impacte del Roll-Off en el Nyquist Modulation i hem vist que, tot i que el diagrama d'ull es veu distorsionat, com menor és el Roll-Off, millor és la sensibilitat i menor el BER floor. S'ha estudiat pel cas de 16 subportadores; un futur desenvolupament seria estenent l'estudi a diferents números de subportadores.

També hem observat que a major número de subportadores, pitjor és el nivell de sensibilitat. Tenim un empitjorament d'uns 8dB en el cas de 16 subportadores respecte el de només 1. Com que només s'ha estudiat per a dos factors de Roll-Off, un altre possible futur desenvolupament seria estendre l'estudi a nivells de Roll-Off intermedis.

Per altra banda, hem estudiat el Nyquist Multiplexing amb 3 canals òptics. El comportament en quant a Roll-Off és contrari al del Nyquist Modulation, és a dir, obtenim abans el valor desitjat de la BER per Roll-Off 1, que pel cas de Roll-Off 0. Apart, en aquest cas no apareix cap mena de BER floor. Suposem que aquest depèn del número de subportadores, cosa que també podria ser un futur desenvolupament.

Prenent una penalització màxima de 2 dB, s'ha trobat que la separació mínima entre canals ha de ser de 18 GHz i 20 GHz per als casos de Roll-Off 0 i 1, respectivament. Aquesta diferència és inferior al que es podria esperar a partir dels espectres vistos en les figures 4.16 i 4.17. L'espectre elèctric (banda base) ocupa 10 GHz per al cas de roll-off = 0 amb la qual cosa l'espectre òptic (passa-banda) ha de ser de 20 GHz. Aquest és el límit teòric abans de que els canals es comencin a solapar freqüencialment. Un altre possible futur desenvolupament seria estudiar aquest punt amb més detall per tal de veure com es propaguen els canals per un enllaç de fibra òptica realista.

Un altre possible desenvolupament seria en el cas del Nyquist Modulation, on és podria fer un estudi de les propietats de propagació per un canal òptic típic per tal de veure com afecten els diferents tipus de degradacions com la dispersió cromàtica o els efectes no lineals.

Finalment, també es podria estudiar l'efecte d'estendre el concepte a modulacions més sofisticades de les subportadores, no només modulació de la intensitat, la qual cosa requeriria l'ús de moduladors IQ (In-phase/Qadrature) i detectors coherents.

## Web-grafia:

- [1] [http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22021/Master thesis - H ctor Canibano.pdf?sequence=4](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22021/Master%20thesis%20-%20Hector%20Canibano.pdf?sequence=4)
- [2] <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10654/1/memoria.pdf>
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength-division\\_multiplexing](https://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength-division_multiplexing)
- [4] <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/16069>
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic\\_communication](https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic_communication)
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_frequency-division\\_multiplexing](https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing)
- [7] [https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro\\_de\\_coseno\\_alzado](https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_de_coseno_alzado)
- [8] <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-22-1-110&id=276355>
- [10] [http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-et\\_10239.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-et_10239.pdf)
- [11] <http://soe.northumbria.ac.uk/ocr/downloads/otdm/otdmgv1-02.pdf>
- [12] <http://www-bcf.usc.edu/~willner/Jeffrey.pdf>
- [13] <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/ofdm/ofdmmath.htm>
- [14] [http://www.srcf.ucam.org/~fw246/docs/thesis/mphil/M\\_Chapter2\\_5-12\\_.pdf](http://www.srcf.ucam.org/~fw246/docs/thesis/mphil/M_Chapter2_5-12_.pdf)
- [15] <http://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-system-optical-time-domain-multiplexing-otdm-design/>

## Bibliografia:

- [16] Investigation on Nyquist Modulation for Fiber-Optic Communications, Jonathan Casal Rodríguez
- [17] Optical\_Fiber\_Telecommunications\_VI-B\_Chapter\_09\_OFDM and Nyquist
- [18] OFDM for Optical Communications, Willian Shieh
- [19] J. T. Verdeyen, Laser Electronics. Prentice Hall, third ed., 1995.

## 7. Annexos:

### 7.1. Taules de valors

A continuació es mostraran les taules de valors extrems en les simulacions dels diferents esquemàtics juntament amb les gràfiques resultants.

#### 7.1.1. Nyquist Modulation

##### 7.1.1.1. BER – Potència òptica

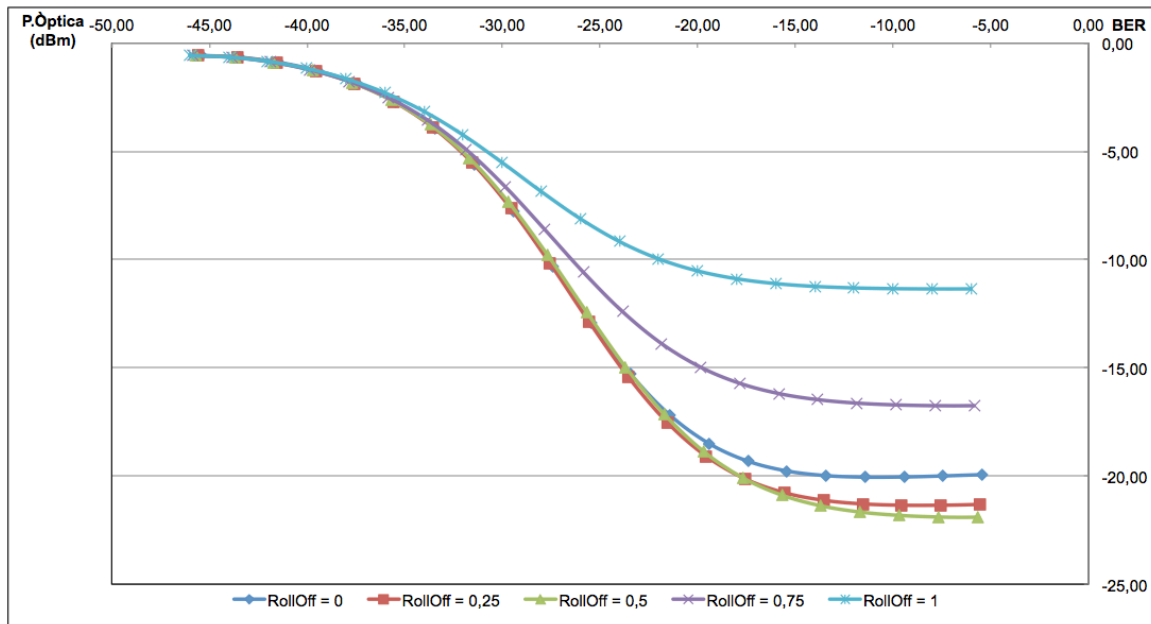


Figura 7.1: Gràfica de la BER respecte la potència òptica amb 16 subportadores

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 1	
		BER	LOG(BER)
0	-6,01	4,39E-12	-11,36
2	-8,01	4,40E-12	-11,36
4	-10,01	4,54E-12	-11,34
6	-12,01	4,91E-12	-11,31
8	-14,01	5,77E-12	-11,24
10	-16,01	7,77E-12	-11,11
12	-18,01	1,30E-11	-10,89
14	-20,01	2,99E-11	-10,52
16	-22,01	1,08E-10	-9,97
18	-24,01	6,82E-10	-9,17
20	-26,01	7,72E-09	-8,11
22	-28,01	1,39E-07	-6,86
24	-30,01	3,04E-06	-5,52
26	-32,01	5,72E-05	-4,24
28	-34,01	7,04E-04	-3,15
30	-36,01	5,09E-03	-2,29
32	-38,01	2,28E-02	-1,64
34	-40,01	6,80E-02	-1,17
36	-42,01	1,45E-01	-0,84
38	-44,01	2,27E-01	-0,64
40	-46,01	0,272358579	-0,56

Taula 7.1: BER - potència òptica RollOff=1

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,75	
		BER	LOG(BER)
0	-5,85	1,73E-17	-16,76
2	-7,85	1,77E-17	-16,75
4	-9,85	1,93E-17	-16,72
6	-11,85	2,33E-17	-16,63
8	-13,85	3,36E-17	-16,47
10	-15,85	6,45E-17	-16,19
12	-17,85	1,91E-16	-15,72
14	-19,85	1,06E-15	-14,98
16	-21,85	1,30E-14	-13,88
18	-23,85	3,92E-13	-12,41
20	-25,85	2,57E-11	-10,59
22	-27,85	2,54E-09	-8,59
24	-29,85	2,30E-07	-6,64
26	-31,85	1,20E-05	-4,92
28	-33,85	2,87E-04	-3,54
30	-35,85	3,06E-03	-2,51
32	-37,85	1,72E-02	-1,76
34	-39,85	5,82E-02	-1,24
36	-41,85	1,33E-01	-0,87
38	-43,85	2,20E-01	-0,66
40	-45,85	0,267730375	-0,57

Taula 7.2: BER - potència òptica RollOff=0,75

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,5	
		BER	LOG(BER)
0	-5,69	1,19E-22	-21,92
2	-7,69	1,27E-22	-21,89
4	-9,69	1,51E-22	-21,82
6	-11,69	2,16E-22	-21,66
8	-13,69	4,19E-22	-21,38
10	-15,69	1,31E-21	-20,88
12	-17,69	8,24E-21	-20,08
14	-19,69	1,34E-19	-18,87
16	-21,69	6,85E-18	-17,16
18	-23,69	1,08E-15	-14,97
20	-25,69	3,82E-13	-12,42
22	-27,69	1,65E-10	-9,78
24	-29,69	4,51E-08	-7,35
26	-31,69	4,88E-06	-5,31
28	-33,69	1,71E-04	-3,77
30	-35,69	2,34E-03	-2,63
32	-37,69	1,50E-02	-1,82
34	-39,69	5,44E-02	-1,26
36	-41,69	1,30E-01	-0,89
38	-43,69	2,19E-01	-0,66
40	-45,69	0,267304325	-0,57

Taula 7.3: BER - potència òptica RollOff=0,5

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,25	
		BER	LOG(BER)
0	-5,56	4,79E-22	-21,32
2	-7,56	4,47E-22	-21,35
4	-9,56	4,47E-22	-21,35
6	-11,56	5,13E-22	-21,29
8	-13,56	7,55E-22	-21,12
10	-15,56	1,69E-21	-20,77
12	-17,56	7,29E-21	-20,14
14	-19,56	8,09E-20	-19,09
16	-21,56	2,96E-18	-17,53
18	-23,56	3,83E-16	-15,42
20	-25,56	1,32E-13	-12,88
22	-27,56	6,58E-11	-10,18
24	-29,56	2,25E-08	-7,65
26	-31,56	3,06E-06	-5,51
28	-33,56	1,28E-04	-3,89
30	-35,56	1,98E-03	-2,70
32	-37,56	1,38E-02	-1,86
34	-39,56	5,22E-02	-1,28
36	-41,56	1,27E-01	-0,89
38	-43,56	2,20E-01	-0,66
40	-45,56	0,268673796	-0,57

Taula 7.4: BER - potència òptica RollOff=0,25

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0	
		BER	LOG(BER)
0	-5,44	1,16435E-20	-19,93
2	-7,44	1,00703E-20	-20,00
4	-9,44	9,02639E-21	-20,04
6	-11,44	8,84879E-21	-20,05
8	-13,44	1,04061E-20	-19,98
10	-15,44	1,70417E-20	-19,77
12	-17,44	4,85149E-20	-19,31
14	-19,44	3,20744E-19	-18,49
16	-21,44	6,63E-18	-17,18
18	-23,44	5,04E-16	-15,30
20	-25,44	1,20E-13	-12,92
22	-27,44	5,01E-11	-10,30
24	-29,44	1,71E-08	-7,77
26	-31,44	2,52E-06	-5,60
28	-33,44	1,16E-04	-3,93
30	-35,44	1,91E-03	-2,72
32	-37,44	1,37E-02	-1,86
34	-39,44	5,26E-02	-1,28
36	-41,44	0,128723963	-0,89
38	-43,44	0,222719405	-0,65
40	-45,44	0,271906929	-0,57

Taula 7.5: BER - potència òptica RollOff=0

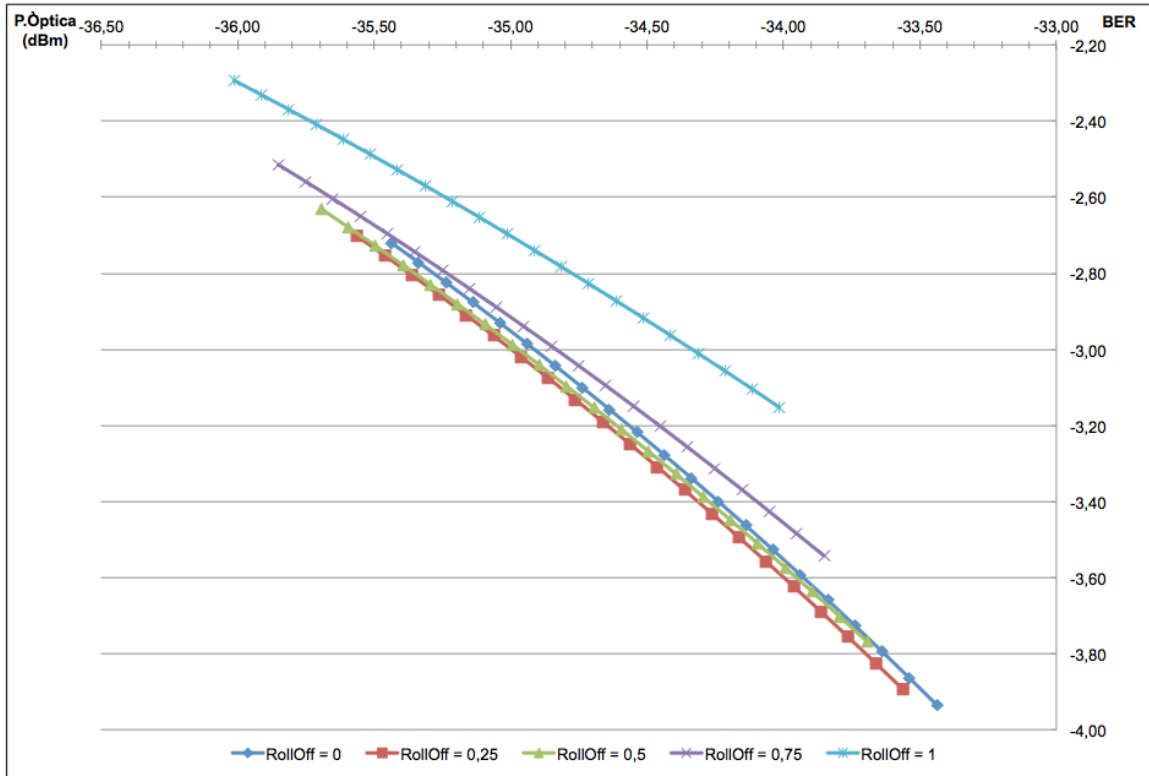


Figura 7.2: Zoom, de la figura anterior, al voltant de BER=10<sup>-3</sup>

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 1	
		BER	LOG(BER)
28	-34,01	7,04E-04	-3,15
28,1	-34,11	7,87E-04	-3,10
28,2	-34,21	8,78E-04	-3,06
28,3	-34,31	9,78E-04	-3,01
28,4	-34,41	1,09E-03	-2,96
28,5	-34,51	1,21E-03	-2,92
28,6	-34,61	1,34E-03	-2,87
28,7	-34,71	1,49E-03	-2,83
28,8	-34,81	1,65E-03	-2,78
28,9	-34,91	1,82E-03	-2,74
29	-35,01	2,02E-03	-2,70
29,1	-35,11	2,22E-03	-2,65
29,2	-35,21	2,45E-03	-2,61
29,3	-35,31	2,70E-03	-2,57
29,4	-35,41	2,96E-03	-2,53
29,5	-35,51	3,25E-03	-2,49
29,6	-35,61	3,57E-03	-2,45
29,7	-35,71	3,91E-03	-2,41
29,8	-35,81	4,27E-03	-2,37
29,9	-35,91	4,67E-03	-2,33
30	-36,01	0,005094218	-2,29

Taula 7.6: BER - potència òptica RollOff=1

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,75	
		BER	LOG(BER)
28	-33,85	2,87E-04	-3,54
28,1	-33,95	3,28E-04	-3,48
28,2	-34,05	3,75E-04	-3,43
28,3	-34,15	4,28E-04	-3,37
28,4	-34,25	4,87E-04	-3,31
28,5	-34,35	5,54E-04	-3,26
28,6	-34,45	6,28E-04	-3,20
28,7	-34,55	7,12E-04	-3,15
28,8	-34,65	8,05E-04	-3,09
28,9	-34,75	9,08E-04	-3,04
29	-34,85	1,02E-03	-2,99
29,1	-34,95	1,15E-03	-2,94
29,2	-35,05	1,29E-03	-2,89
29,3	-35,15	1,45E-03	-2,84
29,4	-35,25	1,62E-03	-2,79
29,5	-35,35	1,81E-03	-2,74
29,6	-35,45	2,01E-03	-2,70
29,7	-35,55	2,24E-03	-2,65
29,8	-35,65	2,49E-03	-2,60
29,9	-35,75	2,76E-03	-2,56
30	-35,85	0,003060444	-2,51

Taula 7.7: BER - potència òptica RollOff=0,75

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,5	
		BER	LOG(BER)
28	-33,69	1,71E-04	-3,77
28,1	-33,79	1,99E-04	-3,70
28,2	-33,89	2,31E-04	-3,64
28,3	-33,99	2,68E-04	-3,57
28,4	-34,09	3,09E-04	-3,51
28,5	-34,19	3,57E-04	-3,45
28,6	-34,29	4,10E-04	-3,39
28,7	-34,39	4,71E-04	-3,33
28,8	-34,49	5,40E-04	-3,27
28,9	-34,59	6,17E-04	-3,21
29	-34,69	7,04E-04	-3,15
29,1	-34,79	8,01E-04	-3,10
29,2	-34,89	9,10E-04	-3,04
29,3	-34,99	1,03E-03	-2,99
29,4	-35,09	1,17E-03	-2,93
29,5	-35,19	1,32E-03	-2,88
29,6	-35,29	1,48E-03	-2,83
29,7	-35,39	1,67E-03	-2,78
29,8	-35,49	1,87E-03	-2,73
29,9	-35,59	2,09E-03	-2,68
30	-35,69	0,002340761	-2,63

Taula 7.8: BER - potència òptica RollOff=0,5

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,25	
		BER	LOG(BER)
28	-33,56	1,28E-04	-3,89
28,1	-33,66	1,50E-04	-3,82
28,2	-33,76	1,76E-04	-3,76
28,3	-33,86	2,05E-04	-3,69
28,4	-33,96	2,38E-04	-3,62
28,5	-34,06	2,77E-04	-3,56
28,6	-34,16	3,21E-04	-3,49
28,7	-34,26	3,71E-04	-3,43
28,8	-34,36	4,27E-04	-3,37
28,9	-34,46	4,92E-04	-3,31
29	-34,56	5,64E-04	-3,25
29,1	-34,66	6,46E-04	-3,19
29,2	-34,76	7,38E-04	-3,13
29,3	-34,86	8,42E-04	-3,07
29,4	-34,96	9,58E-04	-3,02
29,5	-35,06	1,09E-03	-2,96
29,6	-35,16	1,23E-03	-2,91
29,7	-35,26	1,39E-03	-2,86
29,8	-35,36	1,57E-03	-2,80
29,9	-35,46	1,77E-03	-2,75
30	-35,56	0,00198491	-2,70

Taula 7.9: BER - potència òptica RollOff=0,25

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0	
		BER	LOG(BER)
28	-33,44	0,000116413	-3,93
28,1	-33,54	0,000136946	-3,86
28,2	-33,64	0,000160699	-3,79
28,3	-33,74	0,000188105	-3,73
28,4	-33,84	0,000219643	-3,66
28,5	-33,94	0,000255843	-3,59
28,6	-34,04	0,000297285	-3,53
28,7	-34,14	0,00034461	-3,46
28,8	-34,24	3,99E-04	-3,40
28,9	-34,34	4,60E-04	-3,34
29	-34,44	5,29E-04	-3,28
29,1	-34,54	6,08E-04	-3,22
29,2	-34,64	6,96E-04	-3,16
29,3	-34,74	7,96E-04	-3,10
29,4	-34,84	9,08E-04	-3,04
29,5	-34,94	1,03E-03	-2,99
29,6	-35,04	1,17E-03	-2,93
29,7	-35,14	1,33E-03	-2,88
29,8	-35,24	0,001502188	-2,82
29,9	-35,34	0,00169469	-2,77
30	-35,44	0,001907848	-2,72

Taula 7.10: BER - potència òptica RollOff=0



7.1.1.2. Penalty: Potència òptica – Roll-Off

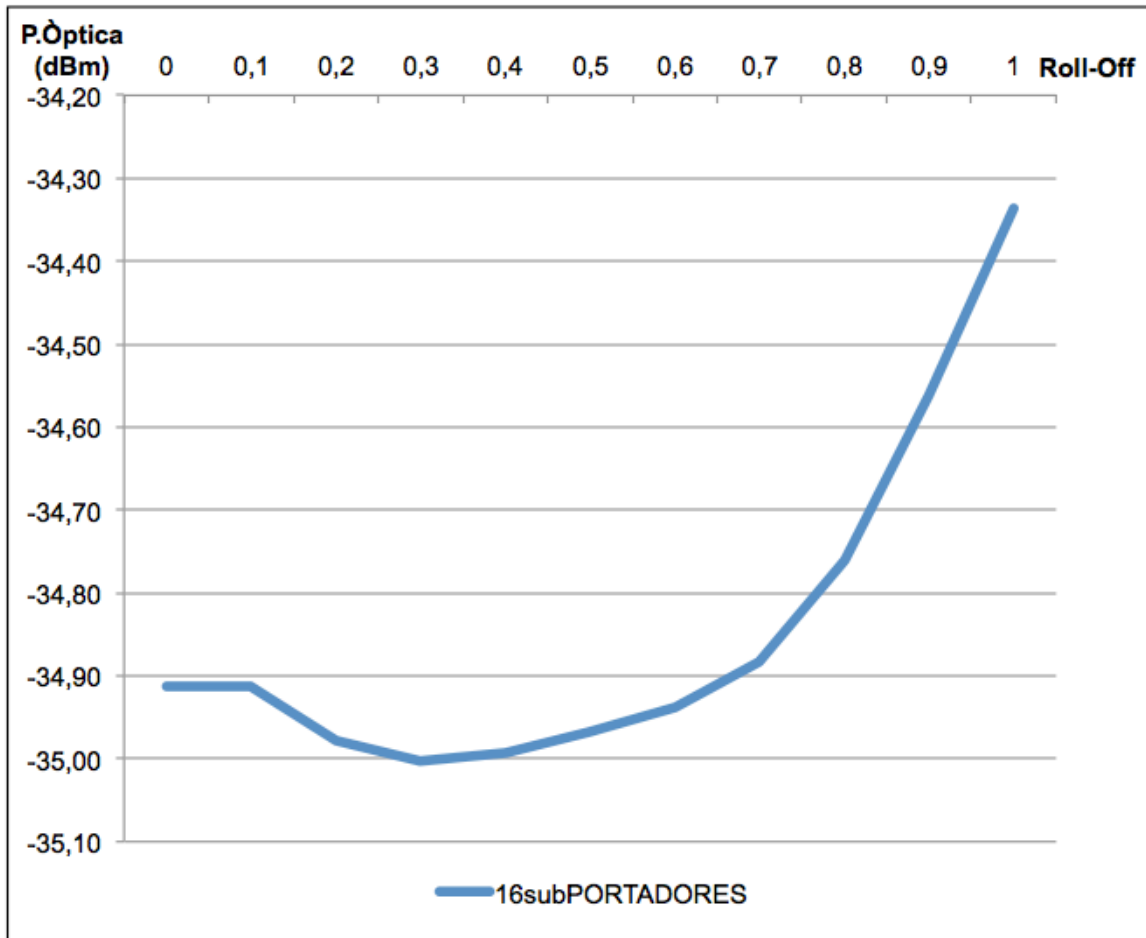


Figura 7.3: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció del Roll-Off

Roll-Off	ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 1	
			BER	LOG(BER)
1	28,3218384	-34,34	1,00E-03	-3,00
0,9	28,6117554	-34,56	1,00E-03	-3,00
0,8	28,8772583	-34,76	1,00E-03	-3,00
0,7	29,0634155	-34,88	1,00E-03	-3,00
0,6	29,1824341	-34,94	1,00E-03	-3,00
0,5	29,2739868	-34,97	9,98E-04	-3,00
0,4	29,3563843	-34,99	1,00E-03	-3,00
0,3	29,4174194	-35,00	1,00E-03	-3,00
0,2	29,4387817	-34,98	1,00E-03	-3,00
0,1	29,4174194	-34,91	1,00E-03	-3,00
0	29,4754028	-34,91	1,00E-03	-3,00

Taula 7.11: Taula de Penalty, potència òptica en funció del Roll-Off



### 7.1.1.3. Penalty: Potència òptica – Número de subportadores

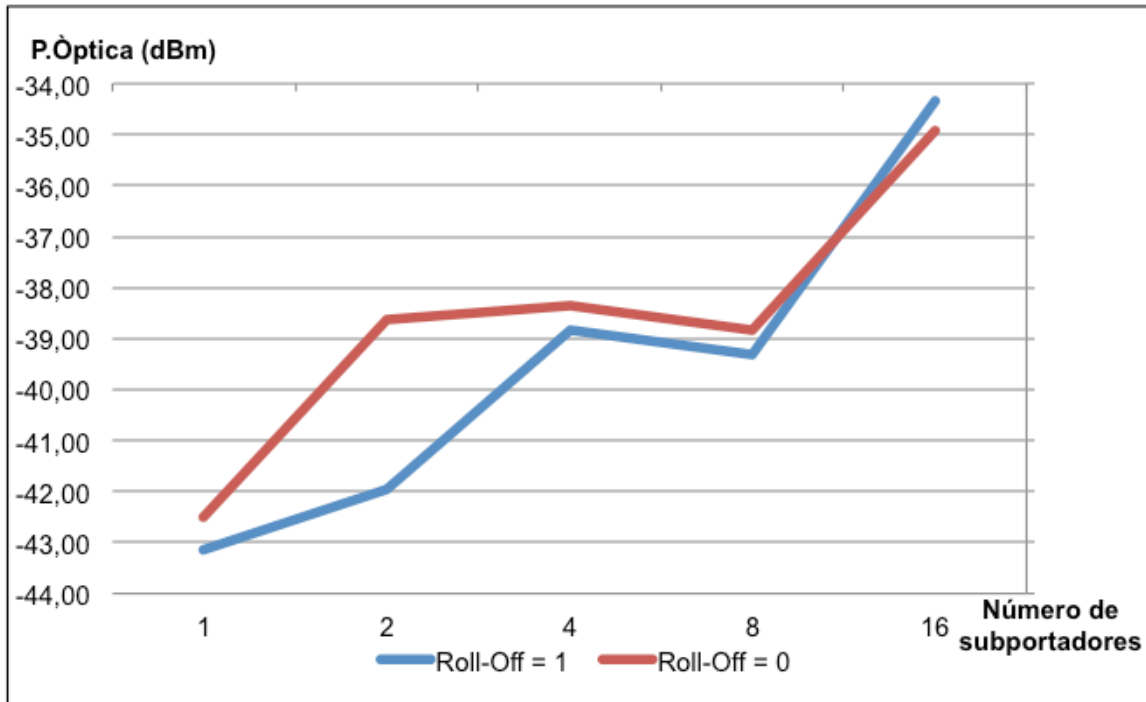


Figura 7.4: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció del número de subportadores

#SUBP	ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 1	
			BER	LOG(BER)
1	36,87	-43,14	9,99E-04	-3,00
2	35,81	-41,94	9,99E-04	-3,00
4	32,77	-38,83	9,98E-04	-3,00
8	33,29	-39,32	9,98E-04	-3,00
16	28,32	-34,34	1,00E-03	-3,00

Taula 7.12: Taula de Penalty, potència òptica en funció del número de subportadores. Roll-Off=1

#SUBP	ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0	
			BER	LOG(BER)
1	36,84	-42,50	9,99E-04	-3,00
2	33,09	-38,62	1,00E-03	-3,00
4	32,88	-38,36	9,98E-04	-3,00
8	33,38	-38,83	1,00E-03	-3,00
16	29,48	-34,91	1,00E-03	-3,00

Taula 7.13: Taula de Penalty, potència òptica en funció del número de subportadores. Roll-Off=0

## 7.1.2. Nyquist Multiplexing

### 7.1.2.1. BER – Potència òptica

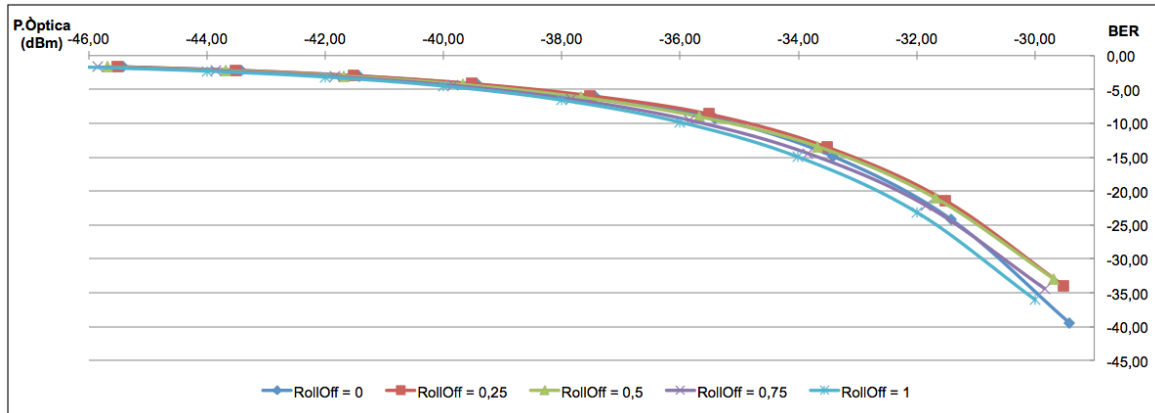


Figura 7.5: Gràfica de la BER respecte la potència òptica amb un únic canal

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 1	
		BER	LOG(BER)
24	-30,00	9,84E-37	-36,01
26	-32,00	7,84E-24	-23,11
28	-34,00	1,08E-15	-14,97
30	-36,00	1,49E-10	-9,83
32	-38,00	2,68E-07	-6,57
34	-40,00	3,21E-05	-4,49
36	-42,00	6,97E-04	-3,16
38	-44,00	5,18E-03	-2,29
40	-46,00	0,019533896	-1,71

Taula 7.14: BER - potència òptica RollOff=1

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,75	
		BER	LOG(BER)
24	-29,84	4,28E-35	-34,37
26	-31,84	7,15E-23	-22,15
28	-33,84	3,72E-15	-14,43
30	-35,84	2,89E-10	-9,54
32	-37,84	3,83E-07	-6,42
34	-39,84	3,88E-05	-4,41
36	-41,84	7,74E-04	-3,11
38	-43,84	5,50E-03	-2,26
40	-45,84	0,020214292	-1,69

Taula 7.15: BER - potència òptica RollOff=0,75

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,5	
		BER	LOG(BER)
24	-29,68	1,13E-33	-32,95
26	-31,68	8,91E-22	-21,05
28	-33,68	3,94E-14	-13,40
30	-35,68	9,65E-10	-9,02
32	-37,68	7,17E-07	-6,14
34	-39,68	5,41E-05	-4,27
36	-41,68	9,26E-04	-3,03
38	-43,68	6,07E-03	-2,22
40	-45,68	0,02139826	-1,67

Taula 7.16: BER - potència òptica RollOff=0,5

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,25	
		BER	LOG(BER)
24	-29,52	1,20E-34	-33,92
26	-31,52	4,17E-22	-21,38
28	-33,52	3,14E-14	-13,50
30	-35,52	2,40E-09	-8,62
32	-37,52	1,19E-06	-5,92
34	-39,52	7,21E-05	-4,14
36	-41,52	1,09E-03	-2,96
38	-43,52	6,70E-03	-2,17
40	-45,52	0,022708878	-1,64

Taula 7.17: BER - potència òptica RollOff=0,25

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0	
		BER	LOG(BER)
24	-29,42	3,83E-40	-39,42
26	-31,42	6,97E-25	-24,16
28	-33,42	1,41E-15	-14,85
30	-35,42	6,08E-10	-9,22
32	-37,42	6,68E-07	-6,18
34	-39,42	5,36E-05	-4,27
36	-41,42	0,00093916	-3,03
38	-43,42	0,006190546	-2,21
40	-45,42	0,02179456	-1,66

Taula 7.18: BER - potència òptica RollOff=0

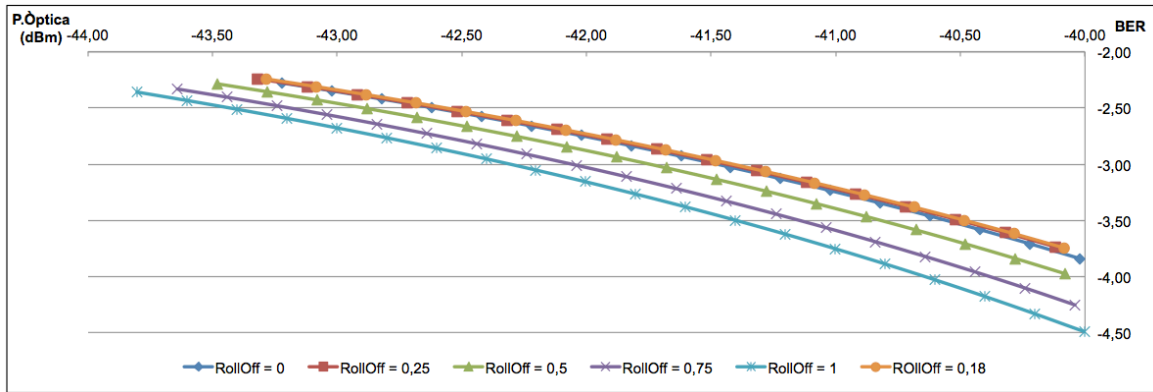


Figura 7.6: Zoom, de la figura anterior, al voltant de BER=10<sup>-3</sup>

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 1	
		BER	LOG(BER)
34	-40,00	3,21E-05	-4,49
34,2	-40,20	4,65E-05	-4,33
34,4	-40,40	6,63E-05	-4,18
34,6	-40,60	9,33E-05	-4,03
34,8	-40,80	1,29E-04	-3,89
35	-41,00	1,77E-04	-3,75
35,2	-41,20	2,38E-04	-3,62
35,4	-41,40	3,17E-04	-3,50
35,6	-41,60	4,17E-04	-3,38
35,8	-41,80	0,000541769	-3,27
36	-42,00	0,000696633	-3,16
36,2	-42,20	0,000886393	-3,05
36,4	-42,40	0,001116559	-2,95
36,6	-42,60	0,001393009	-2,86
36,8	-42,80	0,001722059	-2,76
37	-43,00	0,002110248	-2,68
37,2	-43,20	0,002564341	-2,59
37,4	-43,40	0,003091359	-2,51
37,6	-43,60	0,003698305	-2,43
37,8	-43,80	0,004392152	-2,36

Taula 7.19: BER - potència òptica RollOff=1

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,75	
		BER	LOG(BER)
34	-39,84	3,88E-05	-4,41
34,2	-40,04	5,57E-05	-4,25
34,4	-40,24	7,87E-05	-4,10
34,6	-40,44	1,09E-04	-3,96
34,8	-40,64	1,50E-04	-3,82
35	-40,84	2,03E-04	-3,69
35,2	-41,04	2,72E-04	-3,57
35,4	-41,24	3,59E-04	-3,44
35,6	-41,44	4,69E-04	-3,33
35,8	-41,64	6,06E-04	-3,22
36	-41,84	7,74E-04	-3,11
36,2	-42,04	9,79E-04	-3,01
36,4	-42,24	0,001226277	-2,91
36,6	-42,44	0,001521804	-2,82
36,8	-42,64	0,001871879	-2,73
37	-42,84	0,002283123	-2,64
37,2	-43,04	0,0027622	-2,56
37,4	-43,24	0,003316127	-2,48
37,6	-43,44	0,003951747	-2,40
37,8	-43,64	0,004676039	-2,33

Taula 7.20: BER - potència òptica RollOff=0,75

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,5	
		BER	LOG(BER)
34	-39,68	5,41E-05	-4,27
34,2	-39,88	7,61E-05	-4,12
34,4	-40,08	1,05E-04	-3,98
34,6	-40,28	1,44E-04	-3,84
34,8	-40,48	1,95E-04	-3,71
35	-40,68	2,59E-04	-3,59
35,2	-40,88	3,42E-04	-3,47
35,4	-41,08	4,46E-04	-3,35
35,6	-41,28	5,74E-04	-3,24
35,8	-41,48	7,33E-04	-3,13
36	-41,68	9,26E-04	-3,03
36,2	-41,88	1,16E-03	-2,94
36,4	-42,08	0,001437786	-2,84
36,6	-42,28	0,00176795	-2,75
36,8	-42,48	0,002155992	-2,67
37	-42,68	0,002608394	-2,58
37,2	-42,88	0,003131907	-2,50
37,4	-43,08	0,003733213	-2,43
37,6	-43,28	0,004419094	-2,35
37,8	-43,48	0,005196325	-2,28

Taula 7.21: BER - potència òptica RollOff=0,5

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,25	
		BER	LOG(BER)
34	-39,52	7,21E-05	-4,14
34,2	-39,72	9,97E-05	-4,00
34,4	-39,92	1,36E-04	-3,87
34,6	-40,12	1,84E-04	-3,74
34,8	-40,32	2,45E-04	-3,61
35	-40,52	3,22E-04	-3,49
35,2	-40,72	4,20E-04	-3,38
35,4	-40,92	5,41E-04	-3,27
35,6	-41,12	6,91E-04	-3,16
35,8	-41,32	8,73E-04	-3,06
36	-41,52	1,09E-03	-2,96
36,2	-41,72	1,36E-03	-2,87
36,4	-41,92	0,001668341	-2,78
36,6	-42,12	0,002035685	-2,69
36,8	-42,32	0,002464492	-2,61
37	-42,52	0,002961271	-2,53
37,2	-42,72	0,003532642	-2,45
37,4	-42,92	0,004185174	-2,38
37,6	-43,12	0,004925536	-2,31
37,8	-43,32	0,005760245	-2,24

Taula 7.22: BER - potència òptica RollOff=0,25

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0	
		BER	LOG(BER)
34	-39,42	5,36E-05	-4,27
34,2	-39,62	7,57E-05	-4,12
34,4	-39,82	0,000105193	-3,98
34,6	-40,02	0,000144254	-3,84
34,8	-40,22	0,000195241	-3,71
35	-40,42	0,000260954	-3,58
35,2	-40,62	3,45E-04	-3,46
35,4	-40,82	4,50E-04	-3,35
35,6	-41,02	5,81E-04	-3,24
35,8	-41,22	7,42E-04	-3,13
36	-41,42	9,39E-04	-3,03
36,2	-41,62	0,001176715	-2,93
36,4	-41,82	0,00146087	-2,84
36,6	-42,02	0,001797771	-2,75
36,8	-42,22	0,002193843	-2,66
37	-42,42	0,002655727	-2,58
37,2	-42,62	0,003190191	-2,50
37,4	-42,82	0,003804094	-2,42
37,6	-43,02	0,004504302	-2,35
37,8	-43,22	0,005297584	-2,28

Taula 7.23: BER - potència òptica RollOff=0

ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0,18	
		BER	LOG(BER)
34	-39,48	6,98E-05	-4,16
34,2	-39,68	9,69E-05	-4,01
34,4	-39,88	0,000132657	-3,88
34,6	-40,08	0,000179367	-3,75
34,8	-40,28	0,000239577	-3,62
35	-40,48	0,000316273	-3,50
35,2	-40,68	4,13E-04	-3,38
35,4	-40,88	5,33E-04	-3,27
35,6	-41,08	6,82E-04	-3,17
35,8	-41,28	8,63E-04	-3,06
36	-41,48	1,08E-03	-2,97
36,2	-41,68	0,00134368	-2,87
36,4	-41,88	0,00165509	-2,78
36,6	-42,08	0,002021825	-2,69
36,8	-42,28	0,002450226	-2,61
37	-42,48	0,002946891	-2,53
37,2	-42,68	0,003518495	-2,45
37,4	-42,88	0,004171754	-2,38
37,6	-43,08	0,004913342	-2,31
37,8	-43,28	0,00574973	-2,24

Taula 7.24: BER - potència òptica RollOff=0,18

### 7.1.2.2. Penalty: Potència òptica – separació en freqüència dels canals

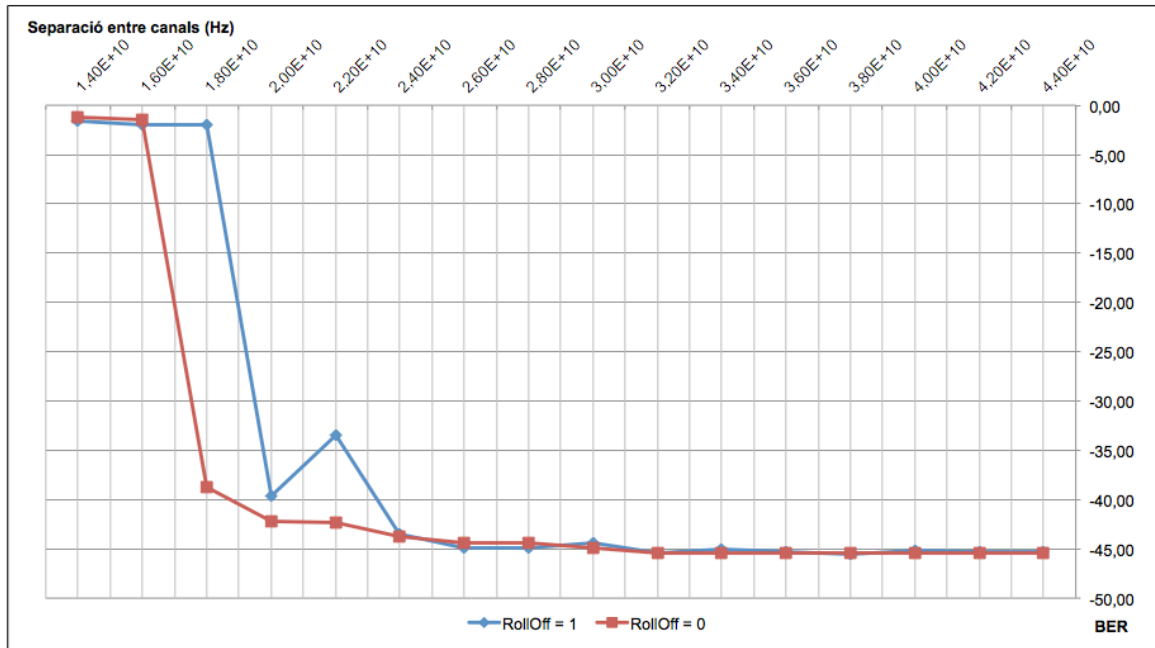


Figura 7.7: Gràfica de Penalty, potència òptica en funció de la separació entre canals

deltaFREQ	ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 1	
			BER	LOG(BER)
1,40E+10	0,001525879	-1,55	1,37E-01	-0,86
1,60E+10	0,001525879	-1,94	1,09E-01	-0,96
1,80E+10	0,001525879	-2,03	5,23E-02	-1,28
2,00E+10	37,36419678	-39,63	9,99E-04	-3,00
2,20E+10	28,97491455	-33,45	1,00E-03	-3,00
2,40E+10	38,70391846	-43,44	1,00E-03	-3,00
2,60E+10	39,82086182	-44,89	1,00E-03	-3,00
2,80E+10	39,65911865	-44,96	9,99E-04	-3,00
3,00E+10	39,26239014	-44,35	1,00E-03	-3,00
3,20E+10	39,43634033	-45,39	0,001000871	-3,00
3,40E+10	39,10064697	-45,09	0,000999326	-3,00
3,60E+10	39,29901123	-45,29	0,001000281	-3,00
3,80E+10	39,60113525	-45,58	0,00100116	-3,00
4,00E+10	39,25323486	-45,20	0,001001302	-3,00
4,20E+10	39,34173584	-45,34	0,001000496	-3,00
4,40E+10	39,34173584	-45,34	0,00099885	-3,00

Taula 7.25: Taula Penalty. RollOff=1

deltaFREQ	ATENUACIÓ	P.ÒPTICA (dBm)	RollOff = 0	
			BER	LOG(BER)
1,40E+10	0,001525879	-1,16	1,06E-02	-1,98
1,60E+10	0,001525879	-1,53	3,50E-03	-2,46
1,80E+10	37,07427979	-38,75	1,00E-03	-3,00
2,00E+10	40,48309326	-42,23	9,99E-04	-3,00
2,20E+10	38,86260986	-42,40	1,00E-03	-3,00
2,40E+10	39,92156982	-43,81	1,00E-03	-3,00
2,60E+10	40,15350342	-44,35	1,00E-03	-3,00
2,80E+10	39,78424072	-44,36	9,99E-04	-3,00
3,00E+10	40,13214111	-44,88	1,00E-03	-3,00
3,20E+10	40,10772705	-45,48	1,00E-03	-3,00
3,40E+10	40,0100708	-45,39	1,00E-03	-3,00
3,60E+10	40,04058838	-45,43	9,98E-04	-3,00
3,80E+10	40,04974365	-45,45	0,000999028	-3,00
4,00E+10	40,04058838	-45,44	0,00099944	-3,00
4,20E+10	40,04364014	-45,46	0,001001097	-3,00
4,40E+10	40,04364014	-45,46	0,001001029	-3,00

Taula 7.26: Taula Penalty. RollOff=0

## 7.2. Scripts

A continuació es mostraran alguns exemples d'scripts usats per a fer les simulacions.

Pels gràfics de la BER – Potència Òptica:

```
set all "C:/Users/pfc_jgene1/Desktop/Simulacions/"
append all "all.txt"

set ATT 0
set inc 2.0
set BER 0
set power 0
set BER_fnd 0

set RO 1.0
set i 0.25

while {$RO >= 0} {

setstate PulseRaisedCosQAM_vtms4 RollOff $RO
setstate PulseRaisedCosQAM_vtms3 RollOff $RO
setstate PulseRaisedCosQAM_vtms1 RollOff $RO

while {$ATT <= 40} {
    setstate Attenuator_vtms1 Attenuation $ATT

    run 1
    wrapup
    set BER [statevalue PostValue_vtms2 InputValue]
    set power [statevalue PostValue_vtms1 InputValue]

    set result [open $all a]
    puts $result "Atenuacio (dB): $ATT dB"
    puts $result "Potència Optica (dBm): $power dBm"
    puts $result "BER: $BER"
    close $result

    set ATT [expr $ATT+$inc]
}

set ATT 0
set RO [expr $RO-$i]
}
```

## Pel gràfic Potència òptica – Roll-Off:

```

set all "C:/Users/pfc_jgene1/Desktop/Simulacions/"
append all "all.txt"
set RO 1.0
set i 0.1

while {$RO >= 0}{
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms18 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms9 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms4 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms10 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms11 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms3 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms12 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms1 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms2 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms5 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms6 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms8 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms13 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms14 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms15 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms16 RollOff $RO
    setstate PulseRaisedCosQAM_vtms17 RollOff $RO
    set UpAtenuacion 100.0
    set DownAtenuacion 0.0
    set Atenuacion 50.0
    set MinError 0.005
    set Error 1.0
    set Potència 0.0
    set SearchBer 1.0e-3
    set Ber 0.0
    while {$Error>$MinError}{
        setstate Attenuator_vtms1 Attenuation $Atenuacion
        run 1
        wrapup
        set Ber [statevalue PostValue_vtms2 InputValue]
        if {$Ber>$SearchBer}{
            set UpAtenuacion $Atenuacion
            set Atenuacion [expr ($UpAtenuacion + $DownAtenuacion)/2]
        }
        if {$Ber<$SearchBer}{
            set DownAtenuacion $Atenuacion
            set Atenuacion [expr ($UpAtenuacion + $DownAtenuacion)/2]
        }
        set Error [expr $UpAtenuacion - $DownAtenuacion]
        if {$Ber==$SearchBer}{
            set Error 0
        }
    }
    setstate Attenuator_vtms1 Attenuation $Atenuacion
    run 1
    wrapup
    set Ber [statevalue PostValue_vtms2 InputValue]
    set power [statevalue PostValue_vtms1 InputValue]
    set res [open $all a]
    puts $res "RollOff: $RO"
    puts $res "Atenuacio (dB): $Atenuacion dB"
    puts $res "Potència Optica (dBm): $power dBm"
    puts $res "BER: $Ber"
    close $res

    set RO [expr $RO-$i]
}

```



Pel gràfic Potència òptica – separació en freqüència dels canals:

```

set all "C:/Users/pfc_jgene1/Desktop/Simulacions/"
append all "all.txt"
set deltaFreq 2.0e+10
set FreqRef 1.931e+14
set inc 1.0
set i 2.0e+10
while {$deltaFreq <= 2.0e+11} {
    set Freq1 [expr $FreqRef-$deltaFreq]
    set Freq2 [expr $FreqRef+$deltaFreq]
    setstate LaserCW_vtms1 EmissionFrequency $Freq1
    setstate LaserCW_vtms2 EmissionFrequency $Freq2
    setstate LaserCW_vtms3 EmissionFrequency $FreqRef
    setstate WDM_MUX_4_1_vtmg1 CenterFrequency_Filter1 $Freq1
    setstate WDM_MUX_4_1_vtmg1 CenterFrequency_Filter3 $Freq2
    setstate WDM_MUX_4_1_vtmg1 CenterFrequency_Filter2 $FreqRef
    setstate WDM_DEMUX_1_4_vtmg1 CenterFrequency_Filter1 $Freq1
    setstate WDM_DEMUX_1_4_vtmg1 CenterFrequency_Filter3 $Freq2
    setstate WDM_DEMUX_1_4_vtmg1 CenterFrequency_Filter2 $FreqRef
    set UpAtenuacion 100.0
    set DownAtenuacion 0.0
    set Atenuacion 50.0
    set MinError 0.005
    set Error 1.0
    set Potència 0.0
    set SearchBer 1.0e-3
    set Ber 0.0
    while {$Error>$MinError} {
        setstate Attenuator_vtms1 Attenuation $Atenuacion
        run 1
        wrapup
        set Ber [statevalue PostValue_vtms2 InputValue]
        if {$Ber>$SearchBer} {
            set UpAtenuacion $Atenuacion
            set Atenuacion [expr ($UpAtenuacion + $DownAtenuacion)/2]
        }
        if {$Ber<$SearchBer} {
            set DownAtenuacion $Atenuacion
            set Atenuacion [expr ($UpAtenuacion + $DownAtenuacion)/2]
        }
        set Error [expr $UpAtenuacion - $DownAtenuacion]
        if {$Ber==$SearchBer} {
            set Error 0
        }
    }
    setstate Attenuator_vtms1 Attenuation $Atenuacion
    run 1
    wrapup
    set Ber [statevalue PostValue_vtms2 InputValue]
    set power [statevalue PostValue_vtms1 InputValue]

    set res [open $all a]
    puts $res "Freq: $Freq1 + $deltaFreq"
    puts $res "Atenuacio (dB): $Atenuacion dB"
    puts $res "Potència Optica (dBm): $power dBm"
    puts $res "BER: $Ber"
    close $res

    set deltaFreq [expr $deltaFreq+$i]
}

```



## Glossari

VoIP: Voice over IP

Hz: Hertz

THz: Tera Hertz

IM-DD: Intensity Modulation with Direct Detection

DSP: Digital Signal Processing

OTDM: Orthogonal Time Division Multiplexing

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex

RZ: Return to Zero

IoT: Internet of Things

DSL: Digital Subscriber Line

WDM: Wavelength Division Multiplexing

BER: Bit Error Rate

IQ: In-phase/Qadrature