

# TREBALL FINAL DE GRAU

**TÍTOL DEL TFG:** Disseny d'una xarxa òptica mitjançant eines de simulació

**TITULACIÓ:** Grau en Enginyeria de Sistemes de Telecomunicació

**AUTOR:** Jordi Compte Prades

**DIRECTOR:** Salvatore Spadaro

**DATA:** 6 de febrer de 2022

**Títol:** Disseny d'una xarxa òptica mitjançant eines de simulació

**Autor:** Jordi Compte Prades

**Director:** Salvatore Spadaro

**Data:** 6 de febrer de 2022

## Resum

L'objectiu d'aquest treball es dissenyar una xarxa òptica mitjançant eines de simulació.

Es començarà amb una breu introducció a una xarxa WDM on es descriurà els diferents components del quals està compost, quins són els principals fenòmens que afecten a la transmissió del senyal i quina mesura s'utilitza per valorar la qualitat del senyal.

Tot seguit, es tractarà de l'eina de simulació escollida, el GNPY. Es parlarà quina és la estructura del programa i com crear els diferents arxius pel correcte funcionament de la simulació.

S'aprofundirà dins del codi del simulador on s'analitzarà quins paràmetres afecten al sistema òptic i es comprovarà que els resultats teòrics concordin amb els resultats simulats.

Finalment, s'utilitzarà tota aquesta informació per dissenyar una xarxa de transport òptic que connecti les ciutats de Barcelona, Girona, Lleida, Tarragona, Perpinyà i València.

**Title:** Design of an optical network using simulation tools  
**Author:** Jordi Compte Prades  
**Director:** Salvatore Spadaro  
**Date:** February 6 th 2022

## Overview

The objective of this project is designing an optical network using simulation tools.

Beginning with a brief introduction about WDM system where it will describe the components that a WDM system is composed, what are the principals' phenomes that affect the signal transmission and what is the measure to determine the signal quality.

After that, the project will introduce the simulation tool chosen, that is GNPY. It will be described the program's structure and how create the different files that GNPY works.

In particular, it will be studied which parameters affect the optical system and it will check that theoretical results match with the simulation results.

Finally, GNPY will be used to design an optical transport network that will connect the following cities: Barcelona, Girona, Lleida, Tarragona, Perpignan and Valencia.

# ÍNDIX

<b>INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTOL 1. XARXES ÒPTIQUES WDM .....</b>	<b>3</b>
1.1. Funcionament.....	3
1.2. Tipus de xarxa WDM.....	3
1.3. Components d'un sistema òptic .....	4
1.3.1. Transmissors/receptors .....	5
1.3.2. Multiplexors/Demultiplexors .....	5
1.3.3. Amplificadors òptics .....	5
1.3.4. OADM .....	6
1.3.5. Fibra òptica .....	7
1.4. Fenòmens òptics .....	8
1.4.1. Atenuació .....	8
1.4.2. Dispersió .....	9
1.5. Relació senyal-soroll .....	10
<b>CAPÍTOL 2. Eina de simulació: GNPpy .....</b>	<b>13</b>
2.1. Descripció.....	13
2.2. Instal·lació .....	13
2.3. Funcionament.....	14
2.4. Creació d'una topologia de xarxa amb fitxer JSON .....	14
2.5. Creació d'un fitxer de simulació .py.....	18
<b>CAPÍTOL 3. ANÀLISIS DEL SIMULADOR GNPpy .....</b>	<b>21</b>
3.1. Anàlisi de la fibra òptica .....	25
3.1.1. Anàlisi en funció de la longitud.....	25
3.1.2. Anàlisi en funció del coeficient d'atenuació .....	28
3.1.3. Anàlisi en funció del coeficient de dispersió.....	29
3.2. Anàlisi en funció del baud_rate .....	31
3.3. Anàlisi en funció del ROADM .....	34
3.4. Anàlisi en funció del guany dels amplificadors .....	37
3.4.1. Anàlisi de l'amplificador booster .....	37
3.4.2. Anàlisi del preamplificador .....	39
3.4.3. Anàlisi de l'amplificador EDFA.....	41
<b>CAPÍTOL 4. DIMENSIONAT D'UNA XARXA MESH.....</b>	<b>45</b>

<b>4.1. Enllaç València-Lleida .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2. Enllaç València-Perpinyà.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3. Enllaç València-Girona.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4. Enllaç Perpinyà-Girona .....</b>	<b>56</b>
<b>4.5. Enllaç Lleida-Girona .....</b>	<b>57</b>
<b>4.6. Enllaç Lleida-Barcelona .....</b>	<b>59</b>
<b>4.7. Enllaç Lleida-Tarragona.....</b>	<b>59</b>
<b>4.8. Enllaç Final.....</b>	<b>60</b>
<b>CAPÍTOL 5. CONCLUSIONS I ESTUDI D'AMBIENTALITZACIÓ.....</b>	<b>63</b>
<b>CAPÍTOL 6. FONTS DE REFERÈNCIA .....</b>	<b>65</b>



# INTRODUCCIÓ

Avui dia, les xarxes òptiques s'han tornat imprescindibles pel nostre dia a dia. Per poder fer ús d'aquestes xarxes, darrera hi ha uns enginyers que han fet el dimensionat de la xarxa per que puguin donar suport als requeriments de capacitat requerides per les aplicacions i serveis dels que gaudim.

Els enginyers al moment de dimensionar la xarxa han de tenir en compte varis paràmetres. Un exemple seria quin transmissor utilitzar per la transferència d'informació o amb quina taxa de bits transmetre. Una opció seria comprar varis transmissors i mirar quin és el que millor funciona. Això a la pràctica no és viable.

És aquí on apareixen les eines de simulació, que ens permeten dissenyar xarxes dins del gran ventall de possibilitats que hi ha sense haver d'invertir en components que després no s'utilitzaran pel desplegament final.

Concretament, en aquest treball es farà ús del GNPpy, una eina de simulació de xarxes òptiques desenvolupada per Telecom Infra Project al qual té com a socis empreses com Facebook o Orange.

Primer de tot, en aquest treball s'explicarà quins elements i fenòmens s'han de tenir en compte en el dimensionat d'una xarxa òptica. Després, s'explicarà què és i com funciona GNPpy, així com dissenyar els diferents arxius per al dimensionat d'una xarxa òptica.

Finalment, s'analitzarà com afecta cada component i paràmetre en un sistema òptic contrastant-lo amb els valors obtinguts per GNPpy. A partir d'això, es realitza el dimensionat d'una xarxa *mesh* que abasti les ciutats de Barcelona, Girona, Lleida, Tarragona, Perpinyà i València.





# CAPÍTOL 1. XARXES ÒPTIQUES WDM

L'alt creixement dels serveis telecomunicacions ha comportat la necessitat d'enllaços d'alta capacitat i velocitat de transmissió més elevades per a connexions més llunyanes. Això es pot dur a terme instal·lant més cablejat, augmentant la taxa de transmissió de bits o utilitzant una xarxa WDM.

A la llarga, una xarxa WDM resulta la més rentable ja que és compatible amb enllaços de fibra òptica. La xarxa WDM permet ampliar la capacitat de la xarxa, permet adaptar-se a infraestructures metropolitanes i troncats sense una revisió prèvia i en una mateixa fibra òptica permet transportar més d'una longitud d'ona [1].

## 1.1. Funcionament

La tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), multiplexatge per divisió de longitud d'ona, permet la transmissió de dades de múltiples usuaris simultàniament a la mateixa fibra òptica. La transmissió de dades simultània és possible gràcies a que els senyals són transmesos espaiats en freqüència i que estan emmarcats i diferenciats per longitud d'ona [2].

Els senyals es transmeten de manera separada per una longitud d'ona concreta. Aquesta longitud d'ona fa referència a un canal discret de l'espectre que s'anomena canal colorit. El canal colorit és una simbologia que representa cada canal fent referència a les longituds d'ona, però no té res a veure amb els colors de la llum visible.

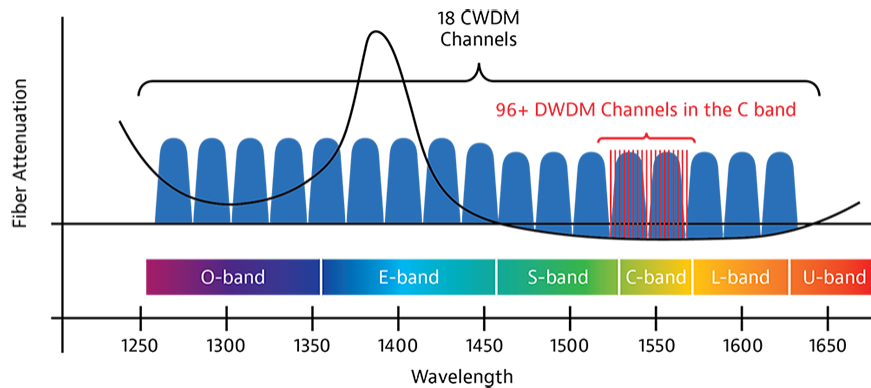
Els diferents senyals dels canals es multiplexen amb un prisma o un multiplexor. Per una correcta multiplexació, el prisma ha de tenir un angle de sortida del senyal complementari a l'angle d'entrada del senyal. Així, els diferents senyals convergeixen formant una "llum blanca" que serà el senyal conjunt que es transmetrà per un únic cable de fibra. El senyal transmès quan arribi al receptor necessita ser separat per poder ser enviat al seu usuari final. Un prisma al receptor separarà la "llum blanca" divergint-la en els diferents senyals colorits, [1], [2], [3]. Per tant, la xarxa WDM permet una comunicació bidireccional i la multiplicació de la capacitat de l'enllaç [4].

## 1.2. Tipus de xarxa WDM

Les diferents classes de xarxa WDM són [5]:

- *Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)*: és una tecnologia de multiplexació per divisió aproximada de longitud d'ona. Divideix l'espectre en canals espaiats 20 nm i treballa en segona i tercera finestra. La divisió obté 18 canals. La estandardització ve regulada per la ITU-T G.694.2.

- *Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)*, és una tecnologia de multiplexació densa per longitud d'ona que utilitza la Banda C. La Banda C és la banda amb menor atenuació i està referenciada per rang de freqüències. El rang de freqüències és de 191.325 THz a 196.125 THz.

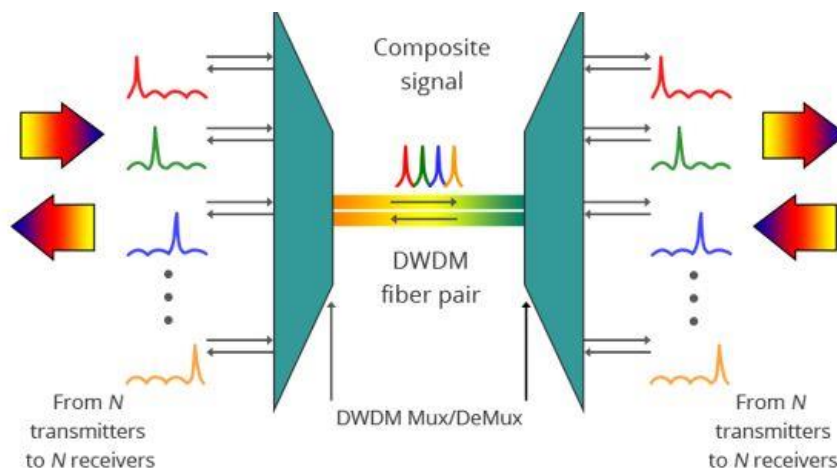


**Fig 1.1.** Espectre utilitzat en CWDM vs DWDM [6]

Una xarxa que utilitza DWDM treballa en un espectre de 4.8 THz. La seva flexibilitat permet decidir l'espaiat dels canals. Als seus inicis el espaiat eren de 100 GHz, pel que es podia treballar amb 48 canals, tot i que la seva estandardització era de 40 canals. A l'actualitat generalment es treballa amb espaiats de 50 GHz, fent que es pugui treballar fins amb 96 canals. La tecnologia DWDM és la que utilitza el simulador GNPY i la que es farà pel dimensionat de la xarxa en el capítol 4.

### 1.3. Components d'un sistema òptic

Un possible sistema òptic per a una xarxa DWDM podria ser:



**Fig 1.2.** Sistema òptic [7]

En el sistema s'observen diferents elements: els transmissors/receptors, els multiplexors/desmultiplexors, la fibra òptica i els amplificadors.

A continuació, es descriurà cada element en detall.

### 1.3.1. Transmissors/receptors

En una xarxa DWDM l'element que fa de transmissor i receptor és el transpondedor. La paraula transpondedor (*Optical Transponder*) prové de la unió de les paraules *Transmitter* i *Responder*, és a dir, un transpondedor segons d'on vingui el senyal farà funcions de transmissor o receptor.

La funció del transmissor és encapsular el senyal provinent de la portadora per poder-la enviar pel canal colorit desitjat, en canvi, la funció del receptor serà desencapsular aquesta informació per tal que la rebí l'usuari final [8].

### 1.3.2. Multiplexors/Demultiplexors

Els multiplexors estan formats per prismes òptics que sumen els senyals enviats pels transpondedors i els emeten per la fibra conjunta. En canvi, el desmultiplexor fa la funció inversa, el senyal rebut per la fibra conjunta el separa i l'envia pels diferents canals.

Per una correcta multiplexació/demultiplexació és important l'angle de d'entrada. Per aquest motiu, només s'accepta un canal colorit per port client [8].

### 1.3.3. Amplificadors òptics

Les etapes d'amplificació permet al senyal tenir un abast major i establir connexions més llunyanes ja que permet compensar l'atenuació deguda a la propagació en la fibra òptica. Segons on estigui col·locat l'amplificador òptic en l'enllaç tindrà una funció o una altra. Els amplificadors òptics més usat en les xarxes WDM són els EDFA, abreviatura de (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), amplificador de fibra dopat amb Erbi. Els paràmetres a tenir en compte pel dimensionat d'una xarxa seran el guany de l'amplificador i la seva figura de soroll. Existeixen tres tipus d'amplificadors en un sistema òptic: l'amplificador booster, l'amplificador de línia i el preamplificador.

L'amplificador booster es col·loca al principi de la fibra òptica. Aquest tipus d'amplificadors tenen potències d'entrada elevades, potències de sortida elevades i tenen guanys mitjans [8] [9].

L'amplificador de línia es col·loca durant en el traçat de la fibra òptica per mitigar les pèrdues d'atenuació de la fibra. Generalment, es col·loquen cada 80-100 km. Les potències d'entrada a l'amplificador acostumen a ser mitjanes o baixes i les potències de sortida elevades, el guany de l'amplificador són alts i les figures de soroll baixes [9] [10].

El preamplificador es col·loca al final de la fibra. La seva funció és que el senyal sigui detectable al receptor, per tant, millorar la seva sensibilitat. Les potències d'entrada són baixes, potències de sortida mitjanes i un guany moderat [9],[10].

Està compost per una bobina on al nucli se li ha injectat impureses d'àtoms d'erbi. A l'entrada hi ha un acoblador amb dos entrades. Una entrada de l'acoblador serà el senyal generat per un làser de bombeig de 980nm o 1480nm i a l'altra entrada el senyal WDM [8], [9].

#### 1.3.4. OADM

Els OADM (*Optical Add Drop Multiplexors*) permeten interconnectar varis sistemes WDM, és a dir, crear sistemes més complexes i circuits òptics per connectar usuaris en qualsevol sistema. Ens permet interconnectar infraestructura fotònica amb ports de línia. El nombre de ports de línia del OADM, ens indica el grau del OADM [11].

Un FOADM (*Fixed Optical Add Drop Multiplexer*) és una sistema WDM amb etapa multiplexora/demultiplexora fixa mitjançant hardware. Que sigui fixa, vol dir que no es pot reconfigurar lo establert. És a dir, si s'havia assignat que a una longitud d'ona es faria un *Drop*, no pot ser canviat. Tot i així és la opció més barata [11].

Un ROADM (*Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*) és un sistema WDM amb etapa multiplexora/ demultiplexora que es pot reconfigurar remotament via software.

Els ROADMs segons el seu nivell de flexibilitat poden ser:

- **Sense color definit (*Colorless*):** permet al ROADM reconfigurar les interfaces de xarxa a qualsevol de les freqüències dins del rang de freqüències WDM. Les interfícies de xarxa es connectaran a etapes multiplexores actives on les posicions client haurà d'acceptar i filtrar a la longitud d'ona desitjada.
- **Sense direcció definida (*Directionless*):** permet al ROADM aplicar canvis d'enrutament mitjançant software. Permet treure el circuit per qualsevol dels graus on el ROADM estigui connectat.
- **Sense contenció de color (*Contentionless*):** permet al ROADM a repetir canals i que una longitud d'ona pugui ser utilitzada en diferents multiplexors.

En els ROADMs, els mòduls que duen a terme la multiplexació ja no són mòduls passius (filtre CMD *Channel Mux/Demux*) i passen a ser filtres actius (*WSS Wavelength Selective Switch*) [12]. En el dimensionat de la xarxa del Capítol 4 s'optarà per l'ús de ROADM.

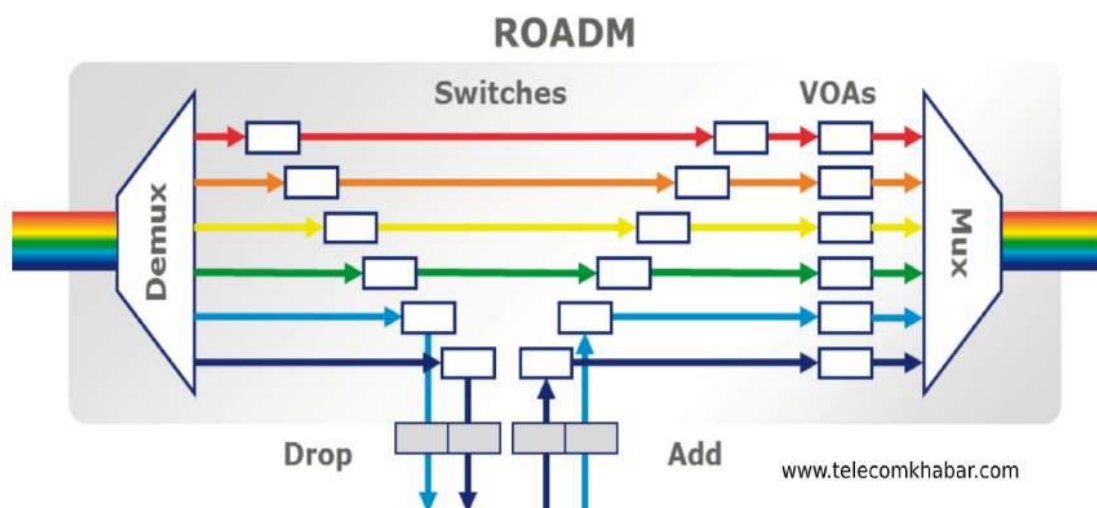


Fig 1.3. Esquema d'un ROADM [13]

### 1.3.5. Fibra òptica

El cable que connecta els diferents dispositius és la fibra òptica. La fibra òptica transmet les dades en polsos de llum i la seva estructura és la següent:

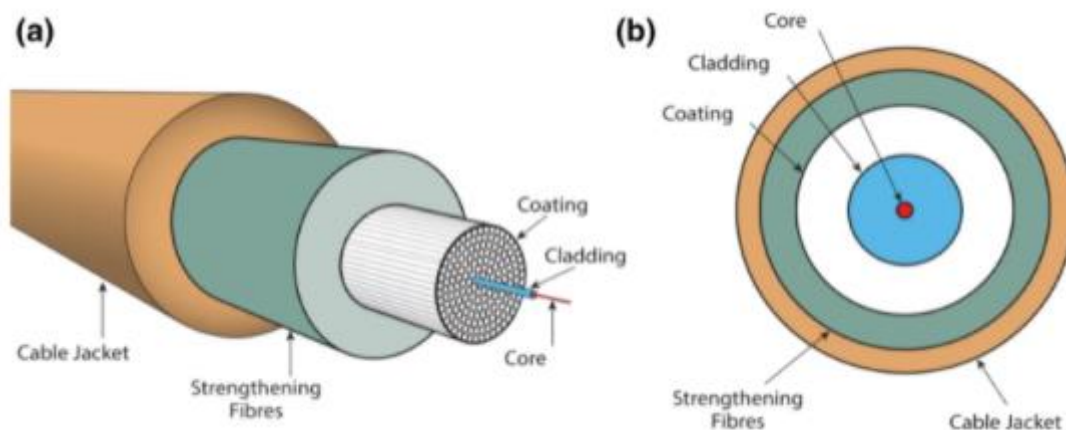


Fig 1.4. Estructura d'una fibra òptica [14]

- **Nucli (core):** està format per vidre dopat, el vidre dopat fa que l'índex de refracció del material canviï, per aconseguir la reflexió interna total. El seu índex de refracció serà al voltant  $n_1 \cong 1.5$ . El nucli és l'encarregat de transmetre la informació.
- **Revestiment (cladding):** capa de vidre que s'afegeix per facilitar la reflexió total interna del nucli. El seu índex de refracció ha de ser inferior al del nucli ( $n_1 > n_2$ ).
- **Capa protectora (cable jacket):** recobriment de plàstic que protegeix al cable de danys [15].

Les fibres monomode tenen un menor índex d'atenuació i permeten transmetre els senyals a major longitud. Per tant, són les fibres que s'utilitzen en llargues distàncies i les que s'utilitzarà en el dimensionat del Capítol 4 [14].

Els fenòmens principals que afecten a la propagació d'un senyal en una fibra òptica són la atenuació i la dispersió. En el dimensionat d'aquest treball es valorarà dos tipus de fibra. Per una banda, la fibra G.652 és la fibra estàndard i més utilitzada. Per altra banda, la fibra G.655 té una dispersió petita a la tercera finestra [16].

S'han presentat els diferents elements que formen una xarxa òptica. Quan es dissenya una xarxa òptica aquesta ha de garantir uns mínims de qualitat per garantir la transmissió correcte del senyal. La mètrica que mesura la qualitat del senyal és la relació senyal-soroll.

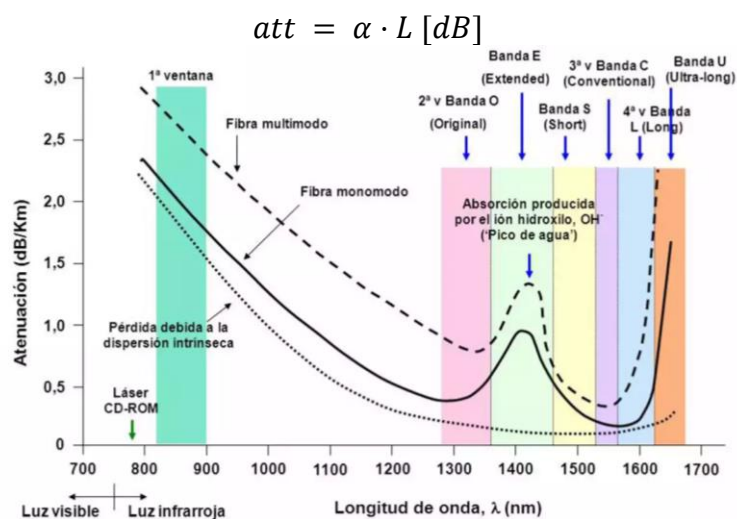
## 1.4. Fenòmens òptics

### 1.4.1. Atenuació

La atenuació és la pèrdua de potència d'un senyal al llarg d'una comunicació a causa dels cables, els connectors i els empalmaments. Cada fibra segueix la següent fórmula per calcular el coeficient d'atenuació:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \text{ [dB/km]} \quad [17]$$

La  $P_1$  és la potència a l'inici de la fibra,  $P_2$  la potència al final de la fibra i  $L$  la longitud de la fibra. Els valors típics de coeficients d'atenuació són de 0.2 a 0.3 dB/km. Per tant, sabent el seu coeficient d'atenuació, la atenuació serà:



**Fig 1.5.** Atenuació típica d'una fibra òptica [18]

En la Figura 1.5, es mostra el comportament de la fibra segons sigui monomode o multimode. Així com la atenuació ideal segons la dispersió del material. A la longitud d'ona de 1400 nm hi ha un pic d'aigua que es forma durant el procés de fabricació de la fibra quan ions d'hidrogen s'absorbeixen en el procés.

També mostra les diferents bandes de longitud d'ona. Les bandes més utilitzades són la banda O i la banda C, conegudes també com a segona i tercera finestra. En el dimensionat de la xarxa s'utilitzarà la tercera finestra ja que es treballa en una xarxa WDM de llargues distàncies [18].

### 1.4.2. Dispersió

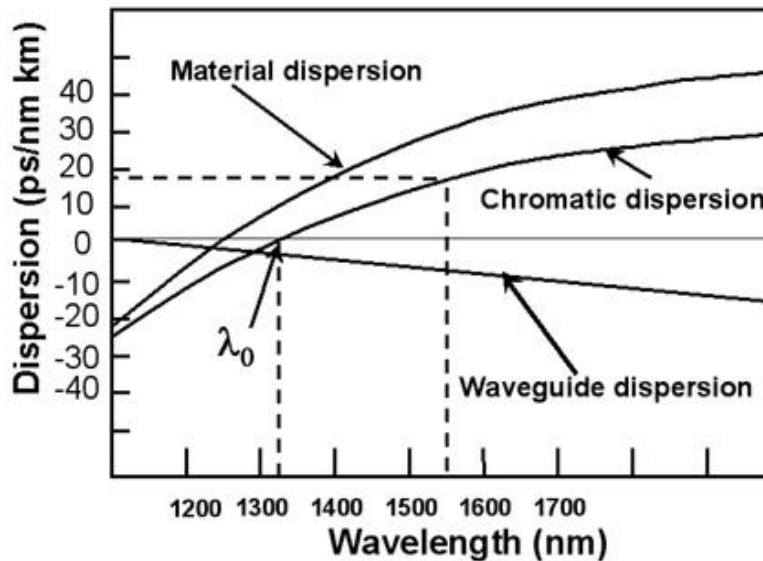
El senyal es transmet en polsos de llum cada cert període de temps. La dispersió és quan els polsos s'eixamplen provocant que solapin amb els altres polsos i provocant errors de transmissió.

La dispersió depèn del tipus de fibra, per les fibres monomodes existeix la dispersió cromàtica i la dispersió de mode de polarització. En canvi, les fibres multimode pateixen de dispersió modal.

La dispersió cromàtica és la que depèn del color de la llum. La banda espectral de la llum està composta per diferents longitud d'ona, cada longitud d'ona té un color. Les components que afecten a la dispersió cromàtica són la dispersió del material i la dispersió per guia d'ones.

La dispersió del material és la provocada pel material, en el cas de la fibra seria el vidre. Cada longitud d'ona, té una índex de refracció diferent. Quan major és la longitud d'ona, major és l'índex de refracció i la llum es transmet més lentament.

La dispersió per guia d'ones és la que es produeix en la transmissió de la llum entre el nucli i la coberta. Quan major és la longitud d'ona, la llum s'eixampla i circula més quantitat de llum per la coberta. L'índex de refracció és menor a la coberta, per tant, la llum circula més ràpid que pel nucli [19].



**Fig 1.6.** Dispersió cromàtica [20]

La dispersió per guia d'ones i per material són antagòniques, per tant, s'ha de d'arribar a un compromís on la dispersió sigui petita. Per exemple a 1310 nm, que pertany a la segona finestra.

La dispersió per mode de polarització és degut a les imperfeccions de la fibra. Aquestes imperfeccions produeixen que les diferents longitud d'ones viatgin a diferents velocitats provocant d'aquesta manera un eixamplament del senyal, per tant, una dispersió [21].

Un cop vist els diferents components òptics i fenòmens que estan involucrats en una xarxa WDM és important un bon dimensionat de la xarxa. La complexitat del dimensionat d'aquestes xarxes fa que sigui necessari l'ús d'eines de simulació per tal es faci un ús eficient dels diferents recursos. En aquest treball s'utilitzarà l'eina de simulació GNPY del qual es parlarà en més profunditat en el següent capítol.

## 1.5. Relació senyal-soroll

La relació senyal-soroll òptica (OSNR) fa referència a la relació entre la potència del senyal i la potència del soroll després de passar pels diferents sistemes que componen una xarxa òptica. Aquesta relació quantifica com afecta la potència soroll a la potència senyal.

La fórmula general és la següent:

$$OSNR = 10 \cdot \log (S / N)$$

on S és la potència del senyal i N la potència del soroll.



Quan major és la OSNR, millor és pel sistema. En canvi, una OSNR baixa pot significar que el senyal no es rebi correctament al receptor [22].

Aquest valor depèn de varis factors, no solament de l'atenuació. Altres factors ha tenir en compte són la dispersió, una reducció de la potència, la polarització, una amplificació no balancejada [23].

Respecte aquest treball la potència soroll fa referència a la potencia d'emissió espontània amplificada ( $P_{ASE}$ ) que és la potència de soroll generada per l'amplificador dins de l'ample de banda d'una longitud d'ona [24]. La  $P_{ASE}$  és una de les principals causes per les pèrdues de rendiment en una xarxa òptica [25].

Per tant, la OSNR ve definida per [26]:

$$OSNR_{ASE} = \frac{P_{s,i}}{P_{ASE}(f_i)}$$

on  $P_{s,i}$  és la potència del senyal respecte un canal determinat i  $f_i$  és la freqüència central del canal.

També, s'ha de tenir en compte les potències de les no-linealitats ( $P_{NLI}$ ). Aquestes són causades per els efectes no lineals que apareixen en la propagació del senyal en la fibra. La contribució de la  $P_{NLI}$  es comporta com a soroll blanc Gaussià additiu (AWGN) [26].

La relació senyal-soroll de les no-linealitats es defineix com:

$$SNR_{NLI} = \frac{P_{s,i}}{P_{NLI}(f_i)} [26]$$

Les potències  $P_{ASE}$  i  $P_{NLI}$  es calculen com:

$$P_{ASE}(f) = h \cdot f \cdot NF(f) \cdot G(f) \cdot B_{ref}$$

$$P_{NLI}(f) = G_{NLI}(f) \cdot B_{ref}$$

on  $h$  és la constant de Planck,  $f$  és la freqüència central,  $NF(f)$  la figura del soroll,  $G(f)$  el guany de l'amplificador,  $B_{ref}$  l'ample de banda i  $G_{NLI}(f)$  la densitat espectral.

El rendiment final al receptor s'avalua amb la GSNR que té en compte tant la  $OSNR_{ASE}$  com la  $SNR_{NLI}$ , segons la fórmula:

$$GSNR = \frac{P_{s,i}}{P_{ASE}(f_i) + P_{NLI}(f_i)} = \frac{1}{\frac{1}{OSNR_{ASE}} + \frac{1}{SNR_{NLI}}}$$



## CAPÍTOL 2. Eina de simulació: GNPY

### 2.1. Descripció

*Gaussian Noise Simulation in Python* (GNPY) és un estimador i predictor de qualitat de transmissió (QoT) de la capa física en xarxes òptiques. És un codi obert escrit en Python i desenvolupat per Telecom Infra Project.

GNPY va sorgir amb l'objectiu de convertir-se en un algoritme neutral entre operadors i proveïdors. Fins llavors, cada operador/proveïdor tenia el seu propi estimador de qualitat de transmissió de senyals en una xarxa òptica. L'any 2017, el grup de treball *Open Optical & Packet Transport-Physical Simulation Environment (OOPT-PSE)* de Telecom Infra Project va iniciar el projecte. Aquest projecte permet avaluar les deficiències i carències d'un sistema òptic. El projecte és impulsat per Facebook i col·labora grans empreses i operadores com Microsoft, Orange, Telefónica, entre altres. Pel que fa el disseny model matemàtic col·labora el Politecnico di Torino [27].

GNPY permet el disseny, la planificació, el control i la gestió de xarxes òptiques [28]. En aquest capítol, s'explicarà la estructura base de la eina de simulació i com dissenyar el diferents arxius per poder utilitzar el GNPY. En el capítol 4 d'aquest treball es farà el dimensionat d'una xarxa òptica.

### 2.2. Instal·lació

Dins de la pàgina web oficial del GNPY, ens presenta dos opcions per instal·lar el GNPY al nostre ordinador.

La primera opció és mitjançant una imatge Docker. Primerament s'haurà de descarregar el programa Docker Hub. Després amb el Docker Hub instal·lat, s'introdueix la comanda corresponent per descarregar la imatge `oopt-gny`. La comanda varia segons el sistema operatiu instal·lat (Linux, Mac, Windows). La comanda es posa a través de terminal, en el cas de tenir sistema operatiu Windows, mitjançant PowerShell. A més, cal que tingueu Python instal·lat al vostre sistema.

La segona opció es mitjançant un entorn virtual via Anaconda. Per començar, com en el cas anterior, s'haurà d'instal·lar Anaconda. Tot seguit, des de l'Anaconda Navigator s'obre el CMD.exe Prompt i s'executen les comandes proporcionades a la web per instal·lar l'ambient `oopt-gnpy` al teu entorn virtual. Finalment per accedir als fitxers i modificar-los es fa a través del programa Spyder que proporciona l'Anaconda Navigator. Spyder et permet modificar els fitxers, així com executar-los.

## 2.3. Funcionament

La simulació de xarxes amb GNPY està compost per tres parts: la topologia de la xarxa, l'equipament de la xarxa i les opcions de simulació.

La topologia de la xarxa està composta d'un fitxer amb extensió JSON o .XLS on l'usuari dissenya la dimensió de la xarxa, generalment xarxes *mesh*. El qual l'usuari decideix els elements que utilitzarà a la xarxa (Transpondedors, ROADMs, amplificadors...) i quins paràmetres utilitzarà en cada element com ara la longitud d'una fibra o el guany d'un amplificador. A més, l'usuari també decidirà el camí direccional que podrà seguir per cada connexió.

L'equipament és un fitxer on s'emmagatzema tots els components de la xarxa. Aquest fitxer és de format .JSON i ja ve donat al descarregar el programa l'anomenen *eqpt\_config.json*. Tot així es pot crear un fitxer amb els elements que es vulgui. En aquest fitxer es troba les especificacions dels diferents EDFA amb les seves corresponent figures de soroll.

Les opcions de simulació venen donades per fitxer amb extensió .Py. Aquest fitxer portarà les ordres per executar la simulació. A més, allà s'introdueix la informació espectral com la modulació i l'espaiat entre canals. Així com el transpondedor origen i el transpondedor destí [29].

## 2.4. Creació d'una topologia de xarxa amb fitxer JSON

En aquest apartat, es veurà com dissenyar una topologia de xarxa amb un fitxer .JSON.

El fitxer es divideix en elements i connectors. A l'apartat d'elements es descriuran els diferents elements de la xarxa i l'apartat connectors estaran els diferents que es pot connectar a la xarxa.

Els elements d'una xarxa estan definits de la manera següent. Primer es defineix de quin tipus és aquell element i quin nom rep per identificar-lo. A més, també disposarà d'un apartat de paràmetres per determinar diferents característiques de l'element i d'un apartat metadata on es col·locarà les coordenades d'on es troba el dispositiu. Aquest últim apartat és opcional.

Ara que es té una visió general de com funciona el fitxer, s'observa com es defineix cada element. Es començarà definint el transpondedors de la següent forma:

```
{
  "type": "Transceiver",
  "uid": "trx_A"
},
```

Si es desitja també es pot afegir informació de la localització del transponedor de la següent forma:

```
{
  "type": "Transceiver",
  "uid": "trx_Barcelona",
  "metadata": {
    "location": {
      "latitude": 41.38879,
      "longitude": 2.15899,
      "city": "Barcelona",
      "region": null
    }
  }
},
```

A continuació, es definirà com declarar una fibra òptica. La fibra òptica se li podran definir varis paràmetres, a més de tenir identificat de quin tipus de fibra es tracta. De tipus de fibra tenim tres, la SSMF que correspon a una fibra G.652, la NZDF que correspondria a una fibra G.655 i finalment la LOF.

```
{
  "type": "Fiber",
  "uid": "fib_a_b",
  "type_variety": "SSMF",
  "params":
  {
    "length": 80.00,
    "length_units": "km",
    "loss_coef": 0.2,
    "dispersion": 1.67e-05,
    "gamma": 0.00127,
    "con_in": 0.0,
    "con_out": 0.0
  }
},
```

Els diferents paràmetres corresponen a :

- *Longitud (length)*: permet establir la llargada de la fibra
- *Unitats de la longitud (length\_units)*: establir si la longitud posada a length està posat en metres "m" o quilòmetres "km"
- *Coefficient d'atenuació (loss\_coef)*: coeficient d'atenuació de la fibra expressat en dB/km.
- *Coefficient de dispersió (dispersion)*: coeficient de dispersió de la fibra expressat en  $\frac{s}{m^2}$ .

- *Gamma*: Paràmetre que s'utilitza pel càlcul del guany de les no-linealitats. El seu valor correspon a  $\frac{2 \cdot \pi \cdot n^2}{\lambda \cdot A_{eff}}$  expressat en  $\omega^{-1} \cdot m^{-1}$
- *Pèrdues al connector d'entrada (con\_in)*
- *Pèrdues al connector de sortida (con\_out)*

Per definir amplificadors s'ha de tenir en compte que es tracta d'un element unidireccional, per tant, si es vol enviar senyal d'un transponedor A a un transponedor B, i alhora que sigui possible enviar senyal del transponedor B al transponedor A, és necessari la declaració de dos línies de fibra, un per cada sentit de la fibra.

Com s'ha vist al capítol anterior, hi ha tres tipus d'amplificadors: l'amplificador booster, el preamplificador i el amplificador de línia. Es recomana que sempre hi hagi un amplificador booster i un preamplificador per línia.

Així doncs l'amplificador booster es fixa de la següent manera:

```
{
  "uid": "edfa_booster_a_b",
  "type": "Edfa",
  "type_variety": "openroadm_mw_mw_booster",
  "operational": {
    "gain_target": 19,
    "delta_p": null,
    "tilt_target": 0,
    "out_voa": 0
  }
},
```

Sent el “type\_variety” el tipus amplificador que es vol posar al circuit de la col·lecció d'amplificadors guardats al fitxer d'equipament eqpt\_config.json. Segons el que s'utilitzi l'amplificador serà d'un tipus o un altre. Després dins de operational, hi ha els diferents camps que l'usuari pot modificar:

- *Gain\_target*: Fa referència al guany que volem posar a l'amplificador
- *delta\_p*: No és obligatori omplir-lo. Quan s'omple és per treballar en Power Mode i ens serveix per establir la potència desitjada de sortida.
- *tilt\_target*: Camp no obligatori d'omplir. Serveix per marcar un objectiu de la pendent del guany respecte l'ample de banda de l'amplificador, es defineix segons la longitud d'ona. Si no s'omple per defecte està a 0.
- *out\_voa*: funció per optimitzar la sortida dels amplificadors VOA

L'amplificador de línia i el preamplificador es fixaran així:

<pre>{   "uid": "edfa_amp_a_b",   "type": "Edfa",   "type_variety": "openroadm_ila_standard",   "operational": {     "gain_target": 22,     "delta_p": null,     "tilt_target": 0,     "out_voa": 0   } },</pre>	<pre>{   "uid": "edfa_preamp_a_b",   "type": "Edfa",   "type_variety": "openroadm_mw_mw_preamp_worstcase_ver5",   "operational": {     "gain_target": 19,     "delta_p": null,     "tilt_target": 0,     "out_voa": 0   } },</pre>
--	--

Els noms posats als uid són noms definits per l'usuari. A més, hi ha varis tipus d'amplificador segons la funció que realitzin tindran una figura de soroll o un altre.

Finalment, l'últim element a explicar com definir-lo és el ROADM. El ROADM s'implementa així:

```
{
  "uid": "roadm_A",
  "type": "Roadm",
  "params": {
    "target_pch_out_db": -20,
    "restrictions": {
      "preamp_variety_list": [
        "openroadm_mw_mw_preamp_worstcase_ver5"
      ],
      "booster_variety_list": [
        "openroadm_mw_mw_booster"
      ]
    },
    "per_degree_pch_out_db": {
      "edfa_booster_a_b": -20
    }
  }
},
```

El paràmetre target\_pch\_out\_db correspon a la potència del canal desitjada a la sortida del ROADM, després amb la potència de target i la potència de referència, es calcula les pèrdues efectives del ROADM.

Les restriccions fan referència als amplificadors permesos per l'auto-disseny.

Ja s'ha vist com declarar cada element, a continuació, es veurà com es connecten entre sí. Per un cas simple de connectar un transponedor A amb un

transponedor B mitjançant una fibra amb amplificador booster i preamplificador. Es defineix de la següent manera:

```
"connections":
  [
    { "from_node": "trx_A",      "to_node": "edfa_booster_a_b"},
    { "from_node": "edfa_booster_a_b",  "to_node": "fib_a_b"},
    { "from_node": "fib_a_b",      "to_node": "edfa_preamp_a_b"},
    { "from_node": "edfa_preamp_a_b",  "to_node": "trx_B"}
  ]
```

La fixació de les connexions és bastant fàcil i intuïtiva. De quin element surt el senyal “from\_node” a l’element destí “to\_node”.

## 2.5. Creació d’un fitxer de simulació .py

En aquest apartat es mostrarà com crear un fitxer per poder executar una topologia de xarxa.

Primerament, es cridarà vàries llibreries que s'utilitzava en les funcions.

```
from gnp.py.tools.json_io import load_network,load_equipment
from pathlib import Path
from gnp.py.core.info import SpectralInformation, Channel, Power,
Pref
from networkx import dijkstra_path, jit_graph
```

Es comença carregant l’equipament utilitzat:

```
equipment= load_equipment('../../example-data/eqpt_config.json')
```

Dins de `load_equipment` es col·loca el nom del fitxer on està l’equipament que es vol. En el meu cas, poso la ruta que ha de fer ja que tinc el fitxer en una altra carpeta.

Tot seguit, es carrega la topologia de xarxa creada:

```
network_path = Path("Network.json")
```

en aquest cas es té el fitxer de la topologia de xarxa a la mateixa carpeta que el fitxer de simulació.

Després, es crea una xarxa amb els dos fitxers carregats.

```
network = load_network(network_path, equipment)
```



Es crea una variable `spacing` que després s'utilitzarà per definir els canals de freqüència.

```
spacing = 0.05
```

Aquest valor de espaiat ve donat en THz.

Es genera el senyal espectral:

```
si=SpectralInformation(pref=Pref(0,0,0),carriers=tuple(Channel(f
,(191.3 + spacing * f) * 1e12, 32e9, 0.15, Power(1e-3,0,0),0,0)
for f in range(1,77)
))
```

al qual `Pref(0,0,0)` és la potència de referència pel càlcul de les pèrdues efectives del ROADM, dins del parèntesis anirà expressat en dBm, `(191.3 + spacing * f) * 1e12` defineix el diferents canals de freqüència, `32e9` és el `baud_rate`, `0.15` fa referència la factor de roll-off, `Power(1e-3,0,0),0,0)` fa referència a la potència de canal transmès, `range(1,77)` és el nombre de canals.

Es busca els nodes segona la uid:

```
nodes = {k.uid: k for k in network.nodes()}
```

Es decideix quins són els transponedor origen i quin el transponedor destí:

```
source = nodes['trx_A']
sink = nodes['trx_B']
```

Es genera el camí més curt entre els dos transponedors a través de l'algoritme dijkstra:

```
path_dijkstra = dijkstra_path(network, source, sink)
```

S'imprimeix per pantalla el nombre de nodes i el seu nom:

```
print("Nodes num:" + str(len(path_dijkstra)))
```

```
print(path_dijkstra[0])
print(path_dijkstra[1])
print(path_dijkstra[2])
```

Imprimeix la informació en format .JSON

```
print(path_dijkstra[1].to_json)
```

Finalment, per imprimir la informació espectral de cada node:

```
for el in dijkstra_path(network, source, sink):
    si = el(si)
    print (si)
```

on si representa a la informació espectral i la funció  $si=el(si)$  canvia aquesta informació segons el node que passi.

A més, si en el sistema es vol afegir ROADMs, s'haurà d'escriure de la següent manera:

```
i=0
for el in dijkstra_path(network, source, sink):
    if (str(el) == "Roadm roadm_A"):
        si = el(si, 3)
    elif (str(el) == "Roadm roadm_B"):
        si = el(si, 3)
    elif (str(el) == "Roadm roadm_C"):
        si = el(si, 3)

    else:

        print("Node number:" + str(i+1) + "\n" + str(path_dijkstra[i]))

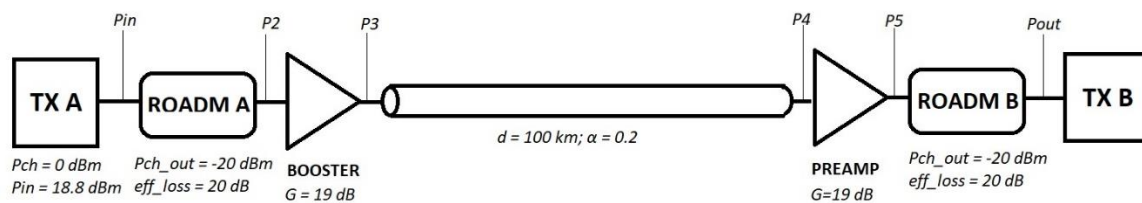
        si = el(si)
        print(el)
        i=i+1
        print("#####")
```

on el 3 de  $si = el (si, 3)$  fa referència al grau del ROADM. El primer i últim print no són necessaris són prints estètics perquè la representació dels resultats per terminal sigui més amigable. On s'informa de quin node es tracta i el separa del següent del node amb una línia de coixinets.

## CAPÍTOL 3. ANÀLISIS DEL SIMULADOR GNPY

En aquest capítol, s'analitzarà quin impacte té cada paràmetre o component òptic dins d'un sistema òptic. S'estudiarà un tipus d'exemple i a partir d'ell, es canviarà els valors dels diferents paràmetres i s'observarà quina repercussió té en el resultat final.

Aquest exemple, constarà d'un enllaç simple entre 2 transpondedors als quals estan connectats mitjançant ROADMs, un amplificador booster, una fibra òptica i un preamplificador. Tal com mostra la figura següent:



**Fig 3.1.** Esquema sistema òptic

El sistema òptic està compost per un transpondedor que emet una potència de canal. Concretament, la potència en un canal és de 0 dBm (1 mW), per tant, la potència d'entrada al sistema és de 76 mW (ja que el nombre de canals és 76), que en dBm és 18.8 dBm,. Després, consta d'un ROADM A amb unes pèrdues efectives de 20 dB, un guany de booster de 19 dB i una fibra òptica G.652 de 100 km i coeficient d'atenuació de 0.2 dB/km. Per acabar, disposa d'un preamplificador de 19 dB i un ROADM B igual que el ROADM A.

Presentat el sistema que s'utilitzarà de referència, es procedeix a analitzar-lo i trobar les potències a cada tram, així com les figures de soroll i les relacions senyal-soroll.

La P2 de l'esquema correspon a  $P_{in}$  menys les pèrdues efectives del ROADM, així doncs:  $P_2 = P_{IN} - 20 = 18.80 - 20 = -1.2 \text{ dBm}$ .

La P3 és la potència a la sortida de l'amplificador booster després d'aplicar-li un guany. D'aquesta manera,  $P_3 = P_2 + G_{booster} = -1.2 + 19 = 17.8 \text{ dBm}$ .

P4 és la potència a l'entrada del preamplificador, aquesta potència serà la potència de sortida menys les pèrdues provocades per la fibra òptica. La fibra òptica és de 100 km i el seu coeficient d'atenuació de 0.2 dB/km. Per tant, la atenuació de la fibra serà de  $100 \text{ km} \cdot 0.2 \text{ dB/km}$ , és a dir, les pèrdues a la fibra són de 20 dB. Així,  $P_4 = P_3 - 20 = 17.8 - 20 = -2.2 \text{ dBm}$ .

P5 és la potència a la sortida del preamplificador, llavors

$$P_5 = P_4 + G_{preamp} = -2.2 + 19 = 16.8 \text{ dBm}.$$

En resum les potències en cada tram són les següents:

$P_{IN} = 18.8 \text{ dBm}$ $P_2 = -1.2 \text{ dBm}$ $P_3 = 17.8 \text{ dBm}$	$P_4 = -2.2 \text{ dBm}$ $P_5 = 16.8 \text{ dBm}$
---	--

A continuació, es calcula les figures senyal soroll dels amplificadors ja que són necessàries pel càlcul de les relacions senyal-soroll. El simulador ha donat els següents valors:

$NF_{\text{booster}} = -\infty$ $NF_{\text{preamp}} = 8.57 \text{ dB}$
---

Es procedeix a calcular numèricament per comprovar que els resultats coincideixen.

La figura de soroll de l'amplificador booster està definit a menys infinit.

En canvi, la figura de soroll del preamplificador segueix la següent expressió:

$$NF_{PREAMP} = Pin_{ch} - polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) + 58$$

on  $Pin_{ch}$  és la potència d'entrada del preamplificador d'un canal,  $polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch})$  és la funció polinòmica entre la potència d'entrada del canal i els coeficients de figura de soroll de l'amplificador.

Es calcula la potència d'entrada del canal a partir de la potència  $P_4$  corresponent a la potència d'entrada del preamplificador.

$$Pin_{ch} = Pin_{preamp}(dB) - Nch(dB) = -2.2 - 10 \cdot \log(76) = -21,0081 \text{ dBm}$$

A continuació, es calcula la funció polinòmica i dóna:

$$\begin{aligned}
 &polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) \\
 &= [(-5,952 \cdot 10^{-4}) \cdot (-21)^3 + (-6,25 \cdot 10^{-2}) \cdot (-21)^2 + (-1,071) \\
 &\quad \cdot (-21) + 27,99] = 28.43 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Per tant, la figura de soroll serà:

$$NF_{PREAMP} = -21 - 28.43 + 58 = 8.57 \text{ dB}$$

Es comprova que dóna el mateix valor que el donat pel simulador.

Per acabar, es comprova que les relacions senyal-soroll també coincideixen amb els valors simulats. La simulació ha donat:

RESULTATS SIMULACIÓ	
OSNR <sub>ASE, 0.1nm</sub> (dB)	28.39
OSNR <sub>ASE, BW</sub> (dB)	24.31

La relació senyal-soroll segueix la següent expressió:

$$OSNR_{ASE,BW} = P_{in,preamp} - P_{ASE,76\ ch}$$

La OSNR<sub>ASE</sub> fa referència a la relació senyal-soroll respecte la P<sub>ASE</sub> que genera el preamplificador. P<sub>IN, preamp</sub> és la potència d'entrada del senyal i P<sub>ASE, 76 ch</sub> és la P<sub>ASE</sub> dels 76 canals.

Primer, es calcula la potència d'un sol canal.

$$P_{ASE,1ch} = h \cdot baud_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF$$

on  $h$  és la constant de Planck, el  $baud_{rate}$  és el definit a l'entrada del sistema (32 Gbaud/s),  $f_{ch}$  és la freqüència del canal i  $NF$  la figura de soroll del preamplificador.

Així doncs,

$$\begin{aligned} P_{ASE,1ch} &= h \cdot baud_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF = \\ &= 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 32 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{8.57}{10}} = 2.91 \cdot 10^{-8} \text{ W} \\ &= -45.35 \text{ dBm} \end{aligned}$$

La potència per 76 canals serà:

$$\begin{aligned} P_{ASE,76\ ch\ 80\ km} &= P_{ASE, 1\ ch} + 10 \log(Nch) = -45.35 + 10 \log(76) \\ &= -26.54 \text{ dBm} \end{aligned}$$

Abans s'ha calculat que P<sub>in, preamp</sub> és P<sub>4</sub> = -2.2 dBm. Per tant,

$$OSNR_{ASE,BW} = P_{in,preamp} - P_{ASE, 76\ ch} = -2.2 - (-26.54) = 24.34 \text{ dB}$$

Per calcular, la OSNR<sub>ASE, 0.1nm</sub> s'ha de calcular la relació entre la OSNR<sub>ASE,BW</sub> i la OSNR<sub>ASE; 0.1nm</sub>.

$$ratio_{0.1nm} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{baud_{rate}} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{32 \cdot 10^9} = 0.39 = -4.08 \text{ dB}$$

Llavors,

$$OSNR_{ASE,01nm} = OSNR_{ASE,BW} - ratio_{0.1\ nm} = 24.34 - (-4.08) = 28.42 \text{ dB}$$

Un cop comprovat que els valors simulats i calculats coincideixen, s'estudia la dispersió cromàtica i la dispersió pel mode de polarització.

Sabent que la dispersió cromàtica és:

$$CD = dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] \cdot length [km]$$

i el coeficient de dispersió per una fibra G.652 és:

$$dispersion \left[ \frac{s}{m^2} \right] = 1.67 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2}$$

Llavors, es converteix el coeficient de dispersió a les unitats que interessa:

$$\begin{aligned} dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] &= 1.67 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2} \cdot \frac{10^{12} ps}{1 s} \cdot \frac{1 m}{10^9 nm} \cdot \frac{10^3 m}{1 km} \\ &= 16.7 \frac{ps}{nm \cdot km} \end{aligned}$$

Tenint en compte que la fibra del sistema és de 100 km i tenint el coeficient de dispersió, es calcula la dispersió cromàtica de la fibra:

$$CD = dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] \cdot length [km] = 16.7 \cdot 100 = 1670 ps/nm$$

Finalment, es calcula la dispersió pel mode de polarització. Que regeix la expressió:

$$PMD = coeficient PMD \cdot d$$

Sabent que el coeficient PMD és:

$$coeficient PMD \left[ \frac{s}{\sqrt{m}} \right] = 1.265 \cdot 10^{-15} \frac{s}{\sqrt{m}}$$

es fa la conversió a ps:

$$coeficient PMD \left[ \frac{ps}{\sqrt{m}} \right] = 1.265 \cdot 10^{-3} \frac{ps}{\sqrt{m}}$$

Es calcula la PMD:

$$PMD = coeficient PMD \cdot d = 1.265 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^3 = 0.40 ps$$

El simulador dona els següents valors:

RESULTATS SIMULACIÓ	
CD (ps/nm)	1670.00
PMD (ps)	0.40

Ja s'ha comprovat que tots els càlculs han coincidit amb els valors simulats. Per tant, al llarg d'aquest capítol s'analitzarà els diferents paràmetres com afecten en el sistema partint d'aquest exemple.

Finalment, la taula següent resumeix tots els valors del sistema trobats:

$P_{IN} = 18.8 \text{ dBm}$ $P_2 = -1.2 \text{ dBm}$ $P_3 = 17.8 \text{ dBm}$ $P_4 = -2.2 \text{ dBm}$ $P_5 = 16.8 \text{ dBm}$ $\text{ratio}_{0.1 \text{ nm}} = -4.08 \text{ dB}$	$NF_{\text{booster}} = -\infty$ $NF_{\text{preamp}} = 8.57 \text{ dB}$ $OSNR_{\text{ASE, BW}} = 24.15 \text{ dB}$ $OSNR_{\text{ASE, 0.1nm}} = 28.23 \text{ dB}$ $CD = 1670 \text{ ps/nm}$ $PMD = 0.40 \text{ ps}$
---	--

### 3.1. Anàlisi de la fibra òptica

#### 3.1.1. Anàlisi en funció de la longitud

Anteriorment, per una fibra de longitud de 100 km, s'ha obtingut els següents valors:

$P_{IN} = 18.8 \text{ dBm}$ $P_2 = -1.2 \text{ dBm}$ $P_3 = 17.8 \text{ dBm}$ $NF_{\text{booster}} = -\infty$ $OSNR_{\text{ASE, 0.1nm}} = 28.23 \text{ dB}$ $\text{ratio}_{0.1 \text{ nm}} = -4.08 \text{ dB}$	$P_4 = -2.2 \text{ dBm}$ $P_5 = 16.8 \text{ dBm}$ $P_{OUT} = -3.2 \text{ dBm}$ $NF_{\text{preamp}} = 8.57 \text{ dB}$ $OSNR_{\text{ASE, BW}} = 24.15 \text{ dB}$ $CD (\text{ps/nm}) = 1670.00$
---	---

Canviant la longitud de la fibra s'espera que les potències, les SNR, la CD i la PMD tinguin modificacions.

Es farà l'anàlisi per una fibra de longitud de 80 km i una altra de 120 km. Fins a la  $P_3$  no s'ha fet cap canvi, així que parteixo de  $P_3 = 17.8 \text{ dBm}$ .

Les diferents longituds afecten en l'atenuació de la fibra. Per tant, es calcula la seva atenuació:

$$L_{80 \text{ km}} = \alpha \cdot d = 0.2 \cdot 80 = 16 \text{ dB}$$

$$L_{120 \text{ km}} = \alpha \cdot d = 0.2 \cdot 120 = 24 \text{ dB}$$

i les posteriors potències a cada tram.

$$P_{4, 80 \text{ km}} = P_3 - L_{80 \text{ km}} = 17.8 \text{ dBm} - 16 \text{ dB} = 1.8 \text{ dBm}$$

$$P_{4, 120 \text{ km}} = P_3 - L_{120 \text{ km}} = 17.8 \text{ dBm} - 24 \text{ dB} = -6.2 \text{ dBm}$$

$$P_{5, 80 \text{ km}} = P_{4, 80 \text{ km}} + G = 1.8 \text{ dBm} + 19 \text{ dB} = 20.8 \text{ dB}$$

$$P_{5, 120 \text{ km}} = P_{4, 120 \text{ km}} + G = -6.2 \text{ dBm} + 19 \text{ dB} = 12.8 \text{ dB}$$

S'observa que la  $P_4$  ha canviat en cada cas, això també afectarà a la figura de soroll.

$$NF_{preamp} = Pin_{ch} - polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) + 58$$

Pel cas de la fibra de 80 km, s'obté:

$$\begin{aligned} Pin_{ch} &= Pin_{preamp} (dB) - Nch (dB) = 1.8 - 10 \cdot \log(76) \\ &= -17.0081 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) &= [(-5,952 \cdot 10^{-4}) \cdot (-17)^3 + (-6,25 \cdot 10^{-2}) \cdot (-17)^2 \\ &+ (-1,071) \cdot (-17) + 27,99] = 31.058 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$NF_{preamp, 80 \text{ km}} = -17 - 31.058 + 58 = 9.94 \text{ dB}$$

Pel cas de 120 km:

$$\begin{aligned} Pin_{ch} &= Pin_{preamp} (dB) - Nch (dB) = -6.2 - 10 \cdot \log(76) \\ &= -25.0081 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) &= [(-5,952 \cdot 10^{-4}) \cdot (-25)^3 + (-6,25 \cdot 10^{-2}) \cdot (-25)^2 + (-1,071) \\ &\cdot (-25) + 27,99] = 25.0025 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$NF_{preamp, 120 \text{ km}} = -25 - 25 + 58 = 8 \text{ dB}$$

El simulador dona els següents resultats:

Edfa edfa_preamp_a_b (80 km)		Edfa edfa_preamp_a_b (120 km)	
noise figure (dB)	9.94	noise figure (dB)	8.00
Power In (dBm)	1.81	Power In (dBm)	-6.19
Power Out (dBm)	20.82	Power Out (dBm)	12.85

Les figures de soroll són diferents, en conseqüència, les SNR també seran diferents.

$$OSNR_{ASE} = Pin_{preamp} - P_{ASE, 76 \text{ ch } 80 \text{ km}}$$

$$\begin{aligned} P_{ASE, 1ch \text{ } 80 \text{ km}} &= h \cdot baud_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF_{80 \text{ km}} = \\ &= 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 32 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{9.94}{10}} = 3.99 \cdot 10^{-8} = -43.98 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{ASE, 1ch \text{ } 120 \text{ km}} &= h \cdot baud_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF_{120 \text{ km}} = \\ &= 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 32 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{8}{10}} = 2.55 \cdot 10^{-8} = -45.92 \text{ dBm} \end{aligned}$$



$$P_{ASE,76 \text{ ch } 80 \text{ km}} = P_{ASE,1ch} + 10 \log(Nch) = -43.98 + 10 \log(76) = -25.17 \text{ dBm}$$

$$P_{ASE,76 \text{ ch } 120 \text{ km}} = P_{ASE,1ch} + 10 \log(Nch) = -45.92 + 10 \log(76) = -27.11 \text{ dBm}$$

$$OSNR_{ASE,BW \text{ 80 km}} = Pin_{preamp} - P_{ASE,76 \text{ ch } 80 \text{ km}} = 1.8 - (-25.1) = 26.97 \text{ dB}$$

$$OSNR_{ASE,BW \text{ 120 km}} = Pin_{preamp} - P_{ASE,76 \text{ ch } 120 \text{ km}} = -6.2 - (-27.11) = 20.91 \text{ dB}$$

Transceiver trx_B (80 km)		Transceiver trx_B (120 km)	
OSNR ASE (0.1nm, dB)	31.02	OSNR ASE (0.1nm, dB)	24.96
OSNR ASE (signal bw, dB)	26.93	OSNR ASE (signal bw, dB)	20.88

La dispersió cromàtic i la dispersió pel mode de polarització també canvien ja que:

$$CD = dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] \cdot length [km]$$

$$dispersion \left[ \frac{s}{m^2} \right] = 1.67 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2}$$

$$dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] = 1.67 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2} \cdot \frac{10^{12} ps}{1 s} \cdot \frac{1 m}{10^9 nm} \cdot \frac{10^3 m}{1 km}$$

$$= 16.7 \frac{ps}{nm \cdot km}$$

$$CD_{80 \text{ km}} = dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] \cdot length [km] = 16.7 \cdot 80 = 1336 \text{ ps/nm}$$

$$CD_{120 \text{ km}} = dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] \cdot length [km] = 16.7 \cdot 120 = 2004 \text{ ps/nm}$$

$$PMD = coeficient_{PMD} \cdot d$$

$$coeficient_{PMD} \left[ \frac{s}{m} \right] = 1.265 \cdot 10^{-15} \frac{s}{m}$$

$$coeficient_{PMD} \left[ \frac{ps}{m} \right] = 1.265 \cdot 10^{-3} \frac{ps}{m}$$

$$PMD_{80 \text{ km}} = coeficient_{PMD} \cdot d = 1.265 \cdot 10^{-3} \cdot 80 \cdot 10^3 = 0.36 \text{ ps}$$

$$PMD_{120 \text{ km}} = coeficient_{PMD} \cdot d = 1.265 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 10^3 = 0.44 \text{ ps}$$

Els resultats obtinguts al simulador són:

Transceiver trx_B (80 km)	
CD (ps/nm)	1336.00
PMD (ps)	0.36

Transceiver trx_B (120 km)	
CD (ps/nm)	2004.00
PMD (ps)	0.44

Per tant, els resultats teòrics han coincidit amb el donats pel simulador. En conclusió, s'ha vist en aquest apartat que modificar la longitud afecta en l'atenuació de la fibra i en conseqüència en la seva figura de soroll i la seva relació senyal-soroll. També afecta a la dispersió tant la cromàtica com la de mode de polarització.

### 3.1.2. Anàlisi en funció del coeficient d'atenuació

A continuació, es farà l'anàlisi canviant el coeficient d'atenuació. En aquest cas  $\alpha = 0.3$  dB/km.

El coeficient només afecta en el tram de la fibra, per tant, es partirà amb  $P_3 = 17.8$  dBm.

Les pèrdues d'atenuació passen a ser de  $L = d \cdot \alpha = 100 \cdot 0.3 = 30$  dB, llavors,  $P_4 = 17.8 - 30 = -12.2$  dBm.

El guany del preamplificador es manté a 19, per tant,  $P_5 = 6.8$  dBm i  $P_6 = -13.2$  dBm.

També canvia la potència d'entrada al preamplificador, així que la figura de soroll també canviarà.

$$NF_{preamp} = Pin_{ch} - polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) + 58$$

$$Pin_{ch} = Pin_{preamp} (dB) - Nch (dB) = -12.2 - 10 \cdot \log(76) = -31,0081$$

$$\begin{aligned} polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) \\ = [(-5,952 \cdot 10^{-4}) \cdot (-31)^3 + (-6,25 \cdot 10^{-2}) \cdot (-31)^2 \\ + (-1,071) \cdot (-31) + 27,99] = 18.86 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$NF_{preamp} = -31 - 18.86 + 58 = 8.14 \text{ dB}$$

Al canviar la figura de soroll també canvia la SNR, així doncs:

$$OSNR_{ASE} = Pin_{preamp} - P_{ASE,76 \text{ ch}}$$

on

$$\begin{aligned} P_{ASE,1ch} &= h \cdot baud_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF = 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 32 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot \\ 10^{\frac{8.14}{10}} &= 2.64 \cdot 10^{-8} = -45,78 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$P_{ASE,76 \text{ ch}} = P_{ASE,1ch} + 10 \log(Nch) = -45.78 + 10 \cdot \log(76) = -26.97 \text{ dBm}$$

Llavors,

$$OSNR_{ASE,BW} = Pin_{preamp} - P_{ASE,76 \text{ ch}} = -12.2 - (-26.97) = 14.77 \text{ dB}$$

Si volem la  $OSNR_{ASE, 0.1nm}$  haurem de calcular la següent relació:

$$ratio_{0.1nm} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{baudrate} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{32 \cdot 10^9} = 0.39 = -4.08 \text{ dB}$$

Per tant,

$$OSNR_{ASE,0.1nm} = OSNR_{ASE,BW} - ratio_{0.1nm} = 14.58 - (-4.08) = 18.85 \text{ dB}$$

Edfa edfa_preamp_a_b	
noise figure (dB)	8.14
Power In (dBm)	-12.19
Power Out (dBm)	6.95
Transceiver trx_B	
OSNR ASE (0.1nm, dB)	18.82
OSNR ASE (signal bw, dB)	14.74

### 3.1.3. Anàlisi en funció del coeficient de dispersió

Tot seguit, s'analitzarà com canvia el sistema variant el coeficient de dispersió. La fórmula de la dispersió cromàtica és la següent:

$$CD = dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] \cdot length [km] = 16.7 \cdot 100 = 1670 \text{ ps/mm}$$

$$\begin{aligned}
 dispersion \left[ \frac{s}{m^2} \right] &= 1.67 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2} \\
 dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] &= 1.67 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2} \cdot \frac{10^{12} ps}{1 s} \cdot \frac{1 m}{10^9 nm} \cdot \frac{10^3 m}{1 km} \\
 &= 16.7 \frac{ps}{nm \cdot km}
 \end{aligned}$$

Els resultats al simulador són:

Transceiver trx_B	
GSNR (0.1 nm, dB)	27.72
GSNR (signal bw, dB)	23.63
OSNR ASE (0.1nm, dB)	28.39
OSNR ASE (signal bw, dB)	24.31
CD (ps/nm)	1670.00

Si el coeficient de dispersió és de  $0.5 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2}$ , així doncs:

$$CD = dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] \cdot length [km] = 5 \cdot 100 = 500 ps/mm$$

$$dispersion \left[ \frac{s}{m^2} \right] = 0.5 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2}$$

$$dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] = 0.5 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2} \cdot \frac{10^{12} ps}{1 s} \cdot \frac{1 m}{10^9 nm} \cdot \frac{10^3 m}{1 km} = 5 \frac{ps}{nm \cdot km}$$

Transceiver trx_B	
GSNR (0.1 nm, dB)	26.72
GSNR (signal bw, dB)	22.64
OSNR ASE (0.1nm, dB)	28.39
OSNR ASE (signal bw, dB)	24.30
CD (ps/nm)	500.00

Amb un coeficient de dispersió de  $2.2 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2}$ , la dispersió cromàtica esperada és:

$$CD = dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] \cdot length [km] = 22 \cdot 100 = 2200 ps/mm$$

$$dispersion \left[ \frac{s}{m^2} \right] = 2.2 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2}$$

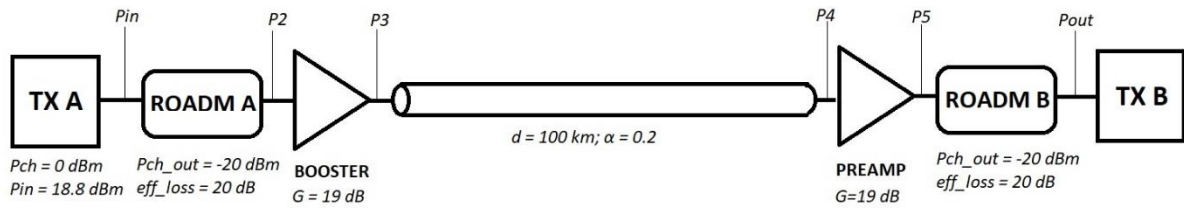
$$dispersion \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right] = 2.2 \cdot 10^{-5} \frac{s}{m^2} \cdot \frac{10^{12} ps}{1 s} \cdot \frac{1 m}{10^9 nm} \cdot \frac{10^3 m}{1 km} = 22 \frac{ps}{nm \cdot km}$$

Transceiver trx_B	
GSNR (0.1 nm, dB)	27.85
GSNR (signal bw, dB)	23.77
OSNR ASE (0.1nm, dB)	28.39
OSNR ASE (signal bw, dB)	24.31
CD (ps/nm)	2200.00

Provant diferents valor de coeficients de dispersió, s'observa que la dispersió cromàtica és directament proporcional al coeficient de dispersió, es a dir, a mesura que augmentem el seu valor, la dispersió cromàtica augmenta. A més, la  $OSNR_{ASE}$  es manté constant, per tant, podem assegurar que la  $P_{ch}$  i la  $P_{ASE}$  no es veuen modificades. No obstant, la  $G_{SNR}$  sí que varia pel que es pot afirmar que la  $P_{NLI}$  sí que es veu modificada.

### 3.2. Anàlisi en funció del baud\_rate

Per defecte, es realitza els càlculs amb un  $baud_{rate}$  de 32 Gbauds/s. Utilitzant el mateix sistema sense  $P_{ASE}$  a l'entrada s'obté els següents resultats:



$P_{IN} = 18.8 \text{ dBm}$	$P_4 = -2.2 \text{ dBm}$
$P_2 = -1.2 \text{ dBm}$	$P_5 = 16.8 \text{ dBm}$
$P_3 = 17.8 \text{ dBm}$	$P_{OUT} = -3.2 \text{ dBm}$
$NF_{booster} = -\infty$	$NF_{preamp} = 8.57 \text{ dB}$
$OSNR_{ASE, 0.1nm} = 28.39 \text{ dB}$	$OSNR_{ASE, BW} = 24.31 \text{ dB}$
$ratio_{0.1nm} = -4.08 \text{ dB}$	

Fent l'anàlisi amb un  $baud_{rate}$  de 16 GBaud/s, s'obté:

$$\begin{aligned}
 P_{ASE,1ch} &= h \cdot baud_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF \\
 &= 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 16 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{8,57}{10}} = \\
 &= 1.45 \cdot 10^{-8} = -48.36 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

$$P_{ASE,76ch} = P_{ASE,1ch} + 10 \cdot \log(76) = -48.36 + 10 \log(76) = -29.55 \text{ dBm}$$

Llavors,

$$OSNR_{ASE,BW} = Pin_{preamp} - P_{ASE,76ch} = -2.2 - (-29.55) = 27.35 \text{ dB}$$

Si volem la  $OSNR_{ASE, 0.1nm}$  haurem de calcular la següent relació:

$$ratio_{0.1nm} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{baud_{rate}} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{16 \cdot 10^9} = 0.78 = -1.07 \text{ dB}$$

Per tant,

$$OSNR_{ASE, 0.1nm} = OSNR_{ASE,BW} - ratio_{0.1nm} = 27.35 - (-1.07) = 28,42 \text{ dB}$$

Transceiver trx_B	
GSNR (0.1 nm, dB)	26.31
GSNR (signal bw, dB)	25.24
OSNR ASE (0.1nm, dB)	28.39
OSNR ASE (signal bw, dB)	27.32
CD (ps/nm)	1670.00

Tornem a fer l'anàlisi ara per un  $baud_{rate}$  de 44 GBaud/s:

$$\begin{aligned} P_{ASE,1ch} &= h \cdot baud_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF \\ &= 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 44 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{8,57}{10}} = \\ &= 4.008 \cdot 10^{-8} = -43.97 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$P_{ASE,76ch} = P_{ASE,1ch} + 10 \cdot \log(76) = -43.97 + 10 \log(76) = -25.16 \text{ dBm}$$

Llavors,

$$OSNR_{ASE,BW} = Pin_{preamp} - P_{ASE,76ch} = -2.2 - (-25.16) = 22.96 \text{ dB}$$

Si volem la  $OSNR_{ASE, 0.1nm}$  haurem de calcular la següent relació:

$$ratio_{0.1nm} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{baud_{rate}} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{44 \cdot 10^9} = 0.284 = -5.46 \text{ dB}$$

Per tant,

$$OSNR_{ASE, 0.1nm} = OSNR_{ASE, BW} - ratio_{0.1nm} = 22.96 - (-5.46) = 28,41 \text{ dB}$$

Transceiver trx_B	
GSNR (0.1 nm, dB)	28.02
GSNR (signal bw, dB)	22.55
OSNR ASE (0.1nm, dB)	28.39
OSNR ASE (signal bw, dB)	22.92
CD (ps/nm)	1670.00

Finalment, fem l'anàlisi per un  $\text{baud}_{rate}$  de 66 GBaud/s.

$$P_{ASE, 1ch} = h \cdot \text{baud}_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF = 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 66 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{8,57}{10}}$$

$$= 6.013 \cdot 10^{-8} = -42.20 \text{ dBm}$$

$$P_{ASE, 76ch} = P_{ASE, 1ch} + 10 \cdot \log(76) = -42.20 + 10 \log(76) = -23.39 \text{ dBm}$$

Llavors,

$$OSNR_{ASE, BW} = P_{in_{preamp}} - P_{ASE, 76ch} = -2.2 - (-23.39) = 21.19 \text{ dB}$$

Si volem la  $OSNR_{ASE, 0.1nm}$  haurem de calcular la següent relació:

$$ratio_{0.1nm} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{\text{baud}_{rate}} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{66 \cdot 10^9} = 0.18 = -7.23 \text{ dB}$$

Per tant,

$$OSNR_{ASE, 0.1nm} = OSNR_{ASE, BW} - ratio_{0.1nm} = 21.19 - (-7.23) = 28,42 \text{ dB}$$

Transceiver trx_B	
GSNR (0.1 nm, dB)	28.22
GSNR (signal bw, dB)	20.99
OSNR ASE (0.1nm, dB)	28.39
OSNR ASE (signal bw, dB)	21.16
CD (ps/nm)	1670.00

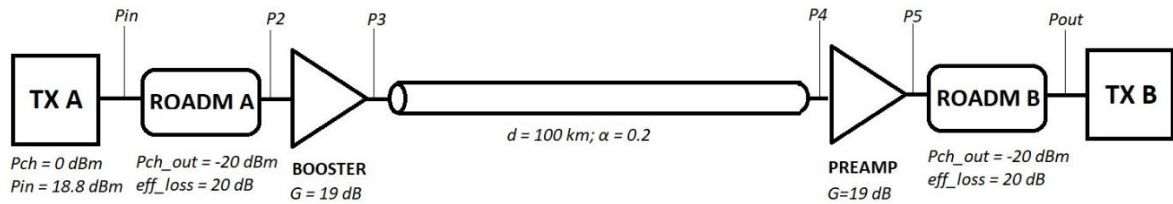
En resum, s'obté:

	16 GBaud/s	32 GBaud/s	44 GBaud/s	66 GBaud/s
ratio (dB)	-1.07	-4.08	-5.46	-7.23
$P_{ASE, 1ch}$ (dBm)	-48.36	-45.35	-43.97	-42.20
$P_{ASE, 76ch}$ (dBm)	-29.55	-26.54	-25.16	-23.39
$OSNR_{ASE, BW}$	27.35	24.34	22.96	21.19
$OSNR_{ASE, 0.1nm}$	28.42	28.42	28.42	28.42

Quan major és el baud\_rate s'obté una major potència ASE de canal i per tant, una major potència ASE. La relació senyal-soroll disminueix degut a l'increment de la potència ASE.

### 3.3. Anàlisi en funció del ROADM

Partint del següent esquema:



Amb pèrdues efectives de 20 dB, s'obté els següents valors:

$P_{IN} = 18.8 \text{ dBm}$ $P_2 = -1.2 \text{ dBm}$ $P_3 = 17.8 \text{ dBm}$ $NF_{booster} = -\infty$ $OSNR_{ASE, 01nm} = 28.23 \text{ dB}$ $ratio_{01nm} = -4.08 \text{ dB}$	$P_4 = -2.2 \text{ dBm}$ $P_5 = 16.8 \text{ dBm}$ $P_{OUT} = -3.2 \text{ dBm}$ $NF_{preamp} = 8.57 \text{ dB}$ $OSNR_{ASE, BW} = 24.15 \text{ dB}$
---	--

Tot seguit, es farà l'anàlisi de quan el ROADM té 30 dB de pèrdues efectives.

Això voldrà dir que  $P_2 = P_{IN} - 30 = -11.2 \text{ dBm}$

Per tant,  $P_3 = 7.8 \text{ dBm}$  i  $P_4 = -12.2 \text{ dBm}$ .

La potència a l'entrada del preamplificador ha canviat, per la qual cosa la figura senyal-soroll també variarà.

$$NF_{preamp} = Pin_{ch} - polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) + 58$$

$$Pin_{ch} = P_{in,preamp}(\text{dB}) - N_{ch}(\text{dB}) = -12.2 - 10 \cdot \log(76) = -31.0081 \text{ dBm}$$

$$\begin{aligned} polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) &= [(-5,952 \cdot 10^{-4}) \cdot (-31)^3 + (-6,25 \cdot 10^{-2}) \cdot (-31)^2 + (-1,071) \\ &\cdot (-31) + 27,99] = 18.86 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$NF_{preamp} = -31 - 18.86 + 58 = 8.14 \text{ dB}$$



Es comprova el resultat que dóna el simulador i dóna 8.14 dB. Per tant, coincideix amb lo esperat..

Es segueix, calculant les relacions senyal-soroll.

$$\begin{aligned} P_{ASE,1\ ch} &= h \cdot baud_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF \\ &= 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 32 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{8,14}{10}} = 2.64 \cdot 10^{-8} \\ &= -45.78\ dBm \end{aligned}$$

$$P_{ASE,76\ ch} = P_{ASE,1\ ch} + 10 \cdot \log(76) = -45.78 + 10\log(76) = -26.97\ dBm$$

$$OSNR_{ASE,BW} = Pin_{preamp} - P_{ASE,76\ ch} = -12.2 - (-26.97) = 14.77\ dB$$

Es comprova amb els resultats obtinguts a la simulació i dóna:

Transceiver trx_B	
GSNR (signal bw, dB)	14.73
OSNR ASE (signal bw, dB)	14.74

Per tant, els resultats concorden amb els teòrics. En definitiva, si s'augmenten les pèrdues del ROADM, afecta tant a la figura de soroll del preamplificador com a la seva relació senyal-soroll. Com era esperable, augmentant les pèrdues del ROADM la relació senyal-soroll disminueix.

A continuació, es farà l'anàlisi de quan el ROADM té 10 dB de pèrdues efectives.

$$\text{Això voldrà dir que } P_2 = P_{IN} - 10 = 8.8\ dBm$$

$$\text{Per tant, } P_3 = 27.8\ dBm \text{ i } P_4 = 7.8\ dBm.$$

La potència a l'entrada del preamplificador ha canviat, per la qual cosa la figura senyal-soroll també variarà.

$$NF_{preamp} = Pin_{ch} - polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) + 58$$

$$Pin_{ch} = P_{in,preamp}(dB) - Nch(dB) = 7.8 - 10 \cdot \log(76) = -11.0081\ dBm$$

$$\begin{aligned} polyval(nf\_model.nf\_coef, Pin_{ch}) &= [(-5,952 \cdot 10^{-4}) \cdot (-11)^3 + (-6,25 \cdot 10^{-2}) \cdot (-11)^2 + (-1,071) \\ &\cdot (-11) + 27,99] = 33\ dB \end{aligned}$$

$$NF_{preamp} = -11 - 33 + 58 = 14\ dB$$

Al simulador s'obté una figura de soroll de  $NF = 14.24$  dB. Per tant, no amb el esperat concorda. S'observa que la  $P_{IN, preamp} = 8.07$  dBm i que la  $P_{ch, out\_preamp} = 8$  dBm.

La potència que s'esperava a la sortida del preamplificador era  $P_5 = P_4 + 19 = 26.8$  dBm. A partir de la potència de canal a la sortida del preamplificador, la potència a la sortida del preamplificador és:  $P_5 = 8 + 10 \cdot \log(76) = 26.8$  dBm. Per tant, la potència senyal a la sortida del preamplificador és la esperada.

Llavors, es calcula la figura de soroll a partir de la potència d'entrada de 8.07 dBm.

$$P_{in\_ch} = P_{in,preamp}(dB) - N_{ch}(dB) = 8.07 - 10 \cdot \log(76) = -10.7381 \text{ dBm}$$

$$\begin{aligned} polyval(nf\_model.nf\_coef, P_{in\_ch}) \\ = [(-5,952 \cdot 10^{-4}) \cdot (-10.7381)^3 + (-6,25 \cdot 10^{-2}) \cdot (-10.7381)^2 \\ + (-1,071) \cdot (-10.7381) + 27,99] = 33.0208 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$NF_{preamp} = -10.7381 - 33.0208 + 58 = 14.24 \text{ dB}$$

Utilitzant la potència d'entrada al preamplificador de 8.07 dBm, els resultats concorden amb els teòrics. Per tant, la conclusió que s'extreu és que al reduir les pèrdues efectives del ROADM, es genera una potència no-lineal que es suma a la potència del senyal a l'entrada del preamplificador. Llavors, la potència d'enlloc de ser 7.8 dBm és de 8.07 dBm.

Finalment, es valora la relació-senyal soroll:

$$\begin{aligned} P_{ASE,1\ ch} &= h \cdot baud_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF \\ &= 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 32 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{14.24}{10}} = 1.075 \cdot 10^{-5} \\ &= -39.68 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$P_{ASE,76\ ch} = P_{ASE,1\ ch} + 10 \cdot \log(76) = -39.68 + 10 \log(76) = -20.87 \text{ dBm}$$

$$OSNR_{ASE,BW} = P_{in,preamp} - P_{ASE,76\ ch} = 7.8 - (-20.87) = 28.67 \text{ dB}$$

Es compara amb els resultats de la simulació:

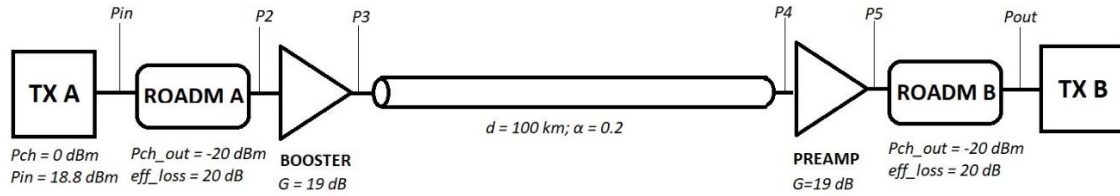
Transceiver trx_B	
GSNR (signal bw, dB)	11.99
OSNR ASE (signal bw, dB)	28.63

Els resultats coincideixen als calculats. A més, s'observa que la  $OSNR_{ASE}$  ha augmentat respecte a la  $OSNR_{ASE}$  de 24.15 dB que es partia. En canvi, difereixen bastant la  $OSNR_{ASE}$  de la GSNR, la qual cosa confirma que baixant les pèrdues del ROADM pot generar potències no-lineals que afectin a la GSNR final.

### 3.4. Anàlisi en funció del guany dels amplificadors

#### 3.4.1. Anàlisi de l'amplificador booster

Partint del següent esquema:



Amb un guany de l'amplificador booster 19 dB, s'obté els següents valors:

$P_{IN} = 18.8 \text{ dBm}$	$P_4 = -2.2 \text{ dBm}$
$P_2 = -1.2 \text{ dBm}$	$P_5 = 16.8 \text{ dBm}$
$P_3 = 17.8 \text{ dBm}$	$P_{OUT} = -3.2 \text{ dBm}$
$NF_{\text{booster}} = -\infty$	$NF_{\text{preamp}} = 8.57 \text{ dB}$
$OSNR_{\text{ASE}, 01\text{nm}} = 28.23 \text{ dB}$	$OSNR_{\text{ASE}, \text{BW}} = 24.15 \text{ dB}$
$\text{ratio}_{01 \text{ nm}} = -4.08 \text{ dB}$	

Canviant el valor del guany del booster per un guany de 10. La potència a l'entrada serà la mateixa, per tant,  $P_2 = -1.2 \text{ dBm}$ .

Llavors,

$$P_3 = P_2 + G = 8.8 \text{ dBm.}$$

$$P_4 = P_3 - \alpha \cdot d = 8.8 - 0.2 \cdot 100 = -11.2 \text{ dBm}$$

$$P_5 = P_4 + G = -11.2 + 19 = 7.8 \text{ dBm}$$

$$NF_{\text{preamp}} = Pin_{\text{ch}} - \text{polyval}(nf\_model.nf\_coef, Pin_{\text{ch}}) + 58$$

$$Pin_{\text{ch}} = Pin_{\text{preamp}} (\text{dB}) - N_{\text{ch}} (\text{dB}) = -11.2 - 10 \cdot \log(76) = -30,0081$$

$$\begin{aligned} & \text{polyval}(nf\_model.nf\_coef, Pin_{\text{ch}}) \\ &= [(-5,952 \cdot 10^{-4}) \cdot (-30)^3 + (-6,25 \cdot 10^{-2}) \cdot (-30)^2 \\ &+ (-1,071) \cdot (-30) + 27,99] = 19.94 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$NF_{\text{preamp}} = -30 - 19.94 + 58 = 8.06 \text{ dB}$$

Edfa edfa_preamp_a_b ( $G_{\text{booster}} = 10 \text{ dB}$ )	
Noise Figure (dB)	8.06
Power In (dBm)	-11.19
Power Out (dBm)	7.92

$$\begin{aligned}
 P_{ASE,1ch} &= h \cdot \text{baud}_{rate} \cdot f_{ch} \cdot NF \\
 &= 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 32 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{8,06}{10}} = 2.59 \cdot 10^{-8} \\
 &= -45.86 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

$$P_{ASE,76ch} = P_{ASE,1ch} + 10 \cdot \log(76) = -45.86 + 10 \log(76) = -27.05 \text{ dBm}$$

$$OSNR_{ASE,BW} = Pin_{preamp} - P_{ASE,76ch} = -11.2 - (-27.05) = 15.85 \text{ dB}$$

Transceiver trx_B ( $G_{\text{booster}} = 10\text{dB}$ )	
GSNR (0.1 nm, dB)	19.90
GSNR (signal bw, dB)v	15.81
OSNR ASE (0.1 nm, dB)	19.90
OSNR ASE (signal bw, dB)	15.82

Es realitza l'anàlisi amb  $G_{\text{booster}} = 15$ ,  $G_{\text{booster}} = 20$ ,  $G_{\text{booster}} = 25$  i  $G_{\text{booster}} = 30$ . S'obtenen els següents resultats:

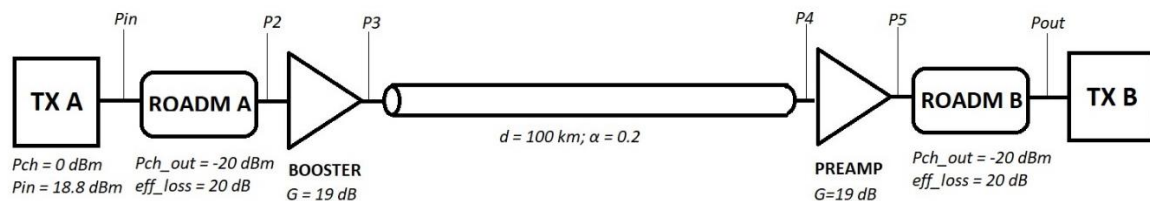
$G_{\text{booster}} = 15 \text{ dB}$	GSNR (0.1 nm, dB)	24.91
	GSNR (signal bw, dB)v	20.83
	OSNR ASE (0.1 nm, dB)	24.96
	OSNR ASE (signal bw, dB)	20.88
$G_{\text{booster}} = 20 \text{ dB}$	GSNR (0.1 nm, dB)	27.94
	GSNR (signal bw, dB)v	23.86
	OSNR ASE (0.1 nm, dB)	29.13
	OSNR ASE (signal bw, dB)	25.05

$G_{\text{booster}} = 25 \text{ dB}$	GSNR (0.1 nm, dB)	23.49
	GSNR (signal bw, dB)v	19.41
	OSNR ASE (0.1 nm, dB)	31.93
	OSNR ASE (signal bw, dB)	27.85
$G_{\text{booster}} = 30 \text{ dB}$	GSNR (0.1 nm, dB)	14.10
	GSNR (signal bw, dB)v	10.02
	OSNR ASE (0.1 nm, dB)	32.59
	OSNR ASE (signal bw, dB)	28.51

Fent l'estudi del com afecta el guany booster, s'aprecia que a partir de guany de l'amplificador booster a 20 dB, les GSNR i les OSNR comencen a diferenciar-se entre elles. Això vol dir que partir d'aquest guany de booster es comença a generar potències no lineals.

### 3.4.2. Anàlisi del preamplificador

Partint del següent esquema:



Amb un guany del preamplificador de 19 dB, s'obté els següents valors:

$P_{\text{IN}} = 18.8 \text{ dBm}$	$P_4 = -2.2 \text{ dBm}$
$P_2 = -1.2 \text{ dBm}$	$P_5 = 16.8 \text{ dBm}$
$P_3 = 17.8 \text{ dBm}$	$P_{\text{OUT}} = -3.2 \text{ dBm}$
$\text{NF}_{\text{booster}} = -\infty$	$\text{NF}_{\text{preamp}} = 8.57 \text{ dB}$
$\text{OSNR}_{\text{ASE}, 0.1\text{nm}} = 28.23 \text{ dB}$	$\text{OSNR}_{\text{ASE}, \text{BW}} = 24.15 \text{ dB}$
$\text{ratio}_{0.1 \text{ nm}} = -4.08 \text{ dB}$	

Es farà l'anàlisi del guany del preamplificador per una  $G_{\text{preamp}} = 10 \text{ dB}$ .

No hi ha cap canvi fins arribar al preamplificador. Per aquest motiu, es parteix de  $P_4 = -2.2 \text{ dBm}$ .

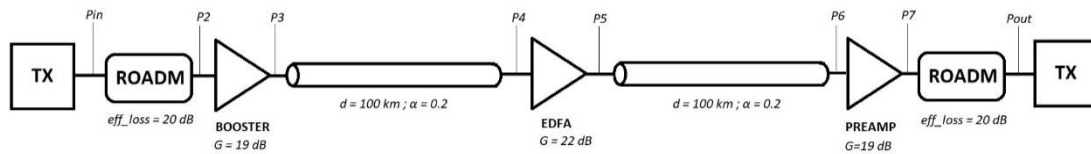
La figura de soroll no depèn del guany del preamplificador, per tant,  $\text{NF} = 8.57 \text{ dB}$ .

La OSNR tampoc depèn del guany del preamplificador, així que la OSNR es mantindrà igual en cada cas.

$G_{\text{preamp}} = 10 \text{ dB}$	GSNR (0.1 nm, dB)	27.72
	GSNR (signal bw, dB)v	23.63
	OSNR ASE (0.1 nm, dB)	28.39
	OSNR ASE (signal bw, dB)	24.31
$G_{\text{preamp}} = 15 \text{ dB}$	GSNR (0.1 nm, dB)	27.72
	GSNR (signal bw, dB)v	23.63
	OSNR ASE (0.1 nm, dB)	28.39
	OSNR ASE (signal bw, dB)	24.31
$G_{\text{preamp}} = 20 \text{ dB}$	GSNR (0.1 nm, dB)	27.72
	GSNR (signal bw, dB)v	23.63
	OSNR ASE (0.1 nm, dB)	28.39
	OSNR ASE (signal bw, dB)	24.31
$G_{\text{preamp}} = 25 \text{ dB}$	GSNR (0.1 nm, dB)	27.72
	GSNR (signal bw, dB)	23.63
	OSNR ASE (0.1 nm, dB)	28.39
	OSNR ASE (signal bw, dB)	24.31

S'observa que modificar el guany del preamplificador no fa variar la GSNR del sistema.

### 3.4.3. Anàlisi de l'amplificador EDFA



#### Càlcul de potències

El transpondedor envia una senyal de 76 portadores amb una potència de 1 mW per portadora.

Per tant,  $P_{in} = 76 \cdot 1 \text{ mW} = 76 \text{ mW} \rightarrow 18,8081 \text{ dBm}$

Després el ROADM té unes pèrdues efectives de 20 dB. Així que  
 $P_2 = P_{in} - 20 \text{ dB} = -1,2 \text{ dBm}$

El senyal del ROADM passa per l'amplificador booster que té un guany de 19 dB. Llavors,  $P_3 = P_2 + 19 = 17,8081 \text{ dBm}$

A continuació, el senyal passa per una fibra òptica de 100 km i coeficient d'atenuació de 0.2. D'aquesta manera les pèrdues a la fibra òptica són de 20 dB i  $P_4 = P_3 - 40 = -2,1919 \text{ dBm}$

Tot seguit, el senyal passa per un amplificador EDFA amb guany 22 dB. Així doncs, la potència a la sortida de l'amplificador serà de  $P_5 = -2,1919 + 22 = 19,8081 \text{ dBm}$ .

Després, aquest senyal és enviada per la fibra òptica de distància 100 km i coeficient d'atenuació 0,2. Per tant, la potència a la sortida de la fibra i a la entrada del preamplificador és de  $P_6 = 19,8081 - 20 = -0,19 \text{ dBm}$ .

El preamplificador té un guany de 19 dB. Per tant,  $P_7 = P_6 + 19 = 18,8081 \text{ dBm}$ .

Finalment, la potència que arriba a l'altre transceptor serà  $P_{out} = P_7 - 20 = -1,19 \text{ dBm}$ .

#### Taula Resum

$P_{in} = 18,8081 \text{ dBm}$	$P_5 = 19,8081 \text{ dBm}$
$P_2 = -1,2 \text{ dBm}$	$P_6 = -0,19 \text{ dBm}$
$P_3 = 17,8081 \text{ dBm}$	$P_7 = 18,8081 \text{ dBm}$
$P_4 = -2,1919 \text{ dBm}$	$P_{out} = -1,19 \text{ dBm}$

Càlcul de les figures de soroll

Booster:

$$NF = -\infty$$

EDFA:

$$\text{"nf\_coef": } [-8.104e - 4, -6.221e - 2, -5.889e - 1, 37.62],$$

$$NF = Pin_{ch} - \text{polyval}(\text{nf\_model.nf\_coef}, Pin_{ch}) + 58$$

$$Pin_{ch} = Pin_{preamp}(dB) - Nch(dB) = -2,1919 - 10 \cdot \log(76) = -21 \text{ dBm}$$

$$\begin{aligned} \text{polyval}(\text{nf\_model.nf\_coef}, Pin_{ch}) \\ = [(-8,104 \cdot 10^{-4}) \cdot (-21)^3 + (-6,221 \cdot 10^{-2}) \cdot (-21)^2 \\ + (-5,889 \cdot 10^{-1}) \cdot (-21) + 37,62] = 30,0574 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} NF &= Pin_{ch} - \text{polyval}(\text{nf\_model.nf\_coef}, Pin_{ch}) + 58 \\ &= -21 - 30,0574 + 58 = 6.94 \text{ dB} \end{aligned}$$

Preamp:

$$\text{"nf\_coef": } [-5.952e - 4, -6.250e - 2, -1.071, 27.99],$$

$$NF = Pin_{ch} - \text{polyval}(\text{nf\_model.nf\_coef}, Pin_{ch}) + 58$$

$$Pin_{ch} = Pin_{preamp}(dB) - Nch(dB) = -0.19 - 10 \cdot \log(76) = -19 \text{ dBm}$$

$$\begin{aligned} \text{polyval}(\text{nf\_model.nf\_coef}, Pin_{ch}) \\ = [(-5,952 \cdot 10^{-4}) \cdot (-19)^3 + (-6,25 \cdot 10^{-2}) \cdot (-19)^2 + (-1,071) \\ \cdot (-19) + 27,99] = 29,859 \end{aligned}$$

$$NF = -19 - 29,859 + 58 = 9,14 \text{ dB}$$

Edfa edfa_amp_a_b	
noise figure (dB)	6.94

Edfa edfa_preamp_a_b	
noise figure (dB)	9.15



Càlcul de les SNREDFA

$$\begin{aligned}
 P_{ASE,1ch} &= h \cdot \text{baud\_rate} \cdot f_{ch} \cdot NF \\
 &= 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 32 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{6,94}{10}} = 2,00319 \cdot 10^{-8} W \\
 &= -46,9828 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

$$P_{ASE,1ch} (6) = -46,9828 + 22 - 20 = -44,9828 \text{ dBm} = 3,1748 \cdot 10^{-8} W$$

$$\begin{aligned}
 P_{ASE,1ch} (7) &= h \cdot \text{baud\_rate} \cdot f_{ch} \cdot NF \\
 &= 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 32 \cdot 10^9 \cdot 191,3 \cdot 10^{12} \cdot 10^{\frac{9,14}{10}} = 3,32 \cdot 10^{-8} W
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{ASE,1ch} \text{ (out, No gain)} &= 3,32 \cdot 10^{-8} + 3,1748 \cdot 10^{-8} W \\
 &= 6,49480 \cdot 10^{-8} W = -41,874 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{ASE,76ch} &= P_{ASE,1ch} + 10 \cdot \log(N_{ch}) = -41,874 + 10 \cdot \log(76) \\
 &= -23,06 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

$$OSNR_{ASE,BW} \text{ (dB)} = Pin_{1ch} - P_{ASE,76ch} = -0,19 - (-23,06) = 22,87 \text{ dB}$$

$$ratio_{0,1nm} = \frac{12,5 \cdot 10^9}{32 \cdot 10^9} = 0,39 \rightarrow -4,08 \text{ dB}$$

$$OSNR_{ASE, 0,1nm} \text{ (dB)} = OSNR_{ASE, BW} \text{ (dB)} - (-ratio_{0,1nm}) = 26,95 \text{ dB}$$

Transceiver trx_B	
OSNR ASE (0.1 nm, dB)	26.90
OSNR ASE (signal bw, dB)	22.82

En aquests càlculs, s'observa que l'amplificador de línia provoca una  $P_{ASE}$  que afecta a la figura de soroll del preamplificador i per tant, a la OSNR.

S'han avaluat els diferents paràmetres que afecten a un sistema òptic. La longitud de la fibra afecta directament en l'atenuació del sistema, així com el coeficient d'atenuació, quan major és l'atenuació, menor serà la potència d'entrada al receptor i per tant menor serà la seva SNR. Pel que fa al coeficient de dispersió, afecta a la dispersió de la fibra, però no a la SNR.

Després s'ha vist com afecta els guanys de l'amplificador booster i s'ha comprovat que quan augmenta, la SNR augmenta fins a cert punt, arribat aquest punt es generen no-linealitats que fan reduir la SNR final. En canvi, el guany del preamplificador no afecta al SNR. Finalment, l'amplificador de línia genera  $P_{ASE}$  que afecta a la SNR.

També s'ha observat que les pèrdues del ROADM afecten a la SNR, si les pèrdues són més grans, llavors la SNR baixarà. En canvi, si les pèrdues són més petites, es poden generar potències no-lineals que afectin a la GSNR. Per tant, s'ha d'arribar a un compromís perquè les pèrdues sigui el més petit possible sense generar potències no-lineals.

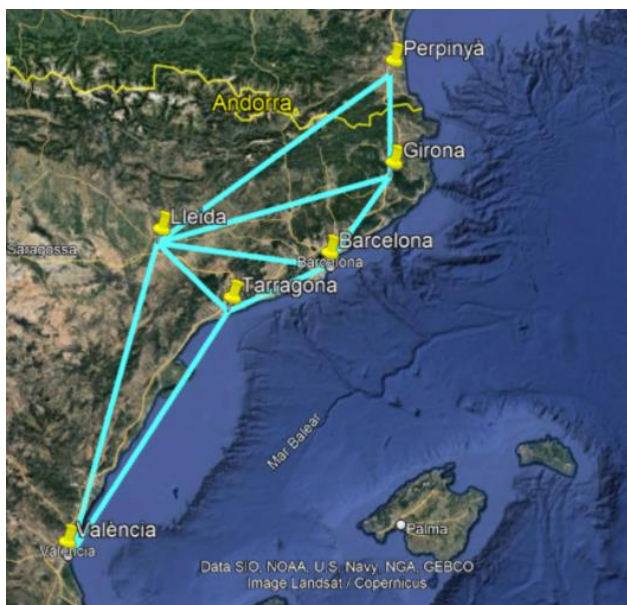
Per tant, s'ha validat els resultats de la teoria respecte als obtinguts mitjançant simulació. S'ha après com variant els diferents paràmetres del sistema es veuen afectats els resultats. Així doncs sabent com afecta cada paràmetre, s'utilitzarà per fer el dimensionat d'una xarxa utilitzant GNPY tal com es mostra en el següent capítol.

## CAPÍTOL 4. DIMENSIONAT D'UNA XARXA MESH

En el capítol anterior s'ha estudiat com afecta cada paràmetre d'un sistema òptic al ser modificat. L'objectiu d'aquest capítol i d'aquest treball és fer el dimensionat d'una xarxa *mesh*.

La xarxa *mesh* que he escollit és una xarxa real que connectis diverses ciutats de Catalunya, València i Perpinyà. La xarxa *mesh* és la següent:

Les ciutats estan connectades a través de fibra. La longitud de cada enllaç de fibra és fixa i les longituds dels diferents enllaços són:



**Fig. 4.1:** Xarxa dissenyada

**Taula 4.1.** Longitud dels enllaços

Enllaç de fibra	km
Barcelona-Girona	85.3
Barcelona-Tarragona	83
Barcelona-Lleida	132
Girona-Perpinyà	79
Tarragona-Lleida	76.5
Lleida-Girona	187
Perpinyà-Lleida	222
València-Lleida	253
València-Tarragona	229

Els elements que s'han de tenir en compte pel dimensionats dels enllaços són:

- **Les pèrdues d'inserció del ROADM:** venen marcades per la potència de canal a la sortida del ROADM desitjada ( $P_{ch\ out}$ ). Les pèrdues del ROADM es calculen fent a diferència entre la potència de canal a l'entrada del ROADM i la potència a la sortida del ROADM. Quan major són les pèrdues del ROADM, menor és el seu cost econòmic.
- **Guany del booster:** amplificador booster amplifica la  $P_{ch\ out}$  de sortida del ROADM. Quan major és el guany, major serà la potència de sortida de l'amplificador. No obstant, un guany molt elevat pot generar no-linealitats. L'objectiu serà trobar el guany mínim per complir la GSNR marcada.

- **Guany de l'amplificador lineal:** mateix cas que en el guany del booster.
- **Tipus de fibra:** una característica important de la fibra és el seu coeficient de dispersió, aquest va molt lligat a la dispersió cromàtica. Una dispersió cromàtica elevada provoca problemes de transmissió al sistema. On afecta més la dispersió cromàtica és en enllaços llargs.
- **Tipus d'amplificador:** cada amplificador disposa d'uns coeficients de figures de soroll propis. Aquests afecten a la figura de soroll seguint una funció polinòmica, però també depèn de la potència a l'entrada de l'amplificador. Quan major és la figura de soroll, menor serà la GSNR.

Aquests són els elements que afecten en un sistema òptic. L'objectiu d'aquest treball és dimensionar una xarxa òptica on els seus enllaços siguin superiors a 15 dB. Cal destacar que segons els requeriments del sistema, el valor de GSNR requerit pot ser superior. Aquí el valor de 15 dB s'imposa com un llindar per discriminar entre les diferents possibles configuracions del sistema.

#### 4.1. Enllaç València-Lleida

Un cop definit els elements que afecten directament a la GSNR, es realitzarà un estudi de dimensionat pels diferents enllaços per tal que la GSNR al receptor sigui de 15 dB. Aquells enllaços que compleixin una GSNR de 15 dB seran remarcats en groc.

La situació inicial és la d'un enllaç de fibra òptica G.652 de 253 quilòmetres de longitud. Aquest enllaç no disposa d'amplificadors de línia però sí un amplificador booster de 15 dB de guany. La taxa de transmissió és de 32 GBaud/s, la potència de transmissió per canal és de 0 dBm i les pèrdues del ROADM són de 20 dB. En aquesta situació, els resultats són els següents:

GSNR (dB)	-7.49
OSNR ASE (dB)	-7.49

Aquests resultats ens indiquen que l'enllaç necessita almenys algun amplificador de línia. Afegint a la situació anterior un amplificador de línia de 15 dB, s'obté:

GSNR (dB)	9.34
OSNR ASE (dB)	9.37

A continuació, es realitza un escombrat per diferents valors de guany del booster, del guany de l'amplificador i pèrdues del ROADM per veure si alguna combinació compleix una GSNR de 15 dB.

G <sub>booster</sub> = 10 dB ; G <sub>amp</sub> = 10 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
30	-11.2
25	-8.33
20	-5.07
15	-0.91
10	4.07

Per la combinació d'un guany d'amplificador booster de 10 dB i un amplificador de línia de 10 dB, no hi ha cap valor de pèrdues de ROADM per el qual compleixi l'objectiu marcat de 15 dB.

G <sub>booster</sub> = 15 dB ; G <sub>amp</sub> = 10 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
30	-8.33
25	-5.07
20	-0.91
15	4.07
10	9.17

No hi ha cap valor que s'acosti a una GSNR de 15 dB marcada. Però es veu una certa milloria de resultats respecte l'anterior taula.

G <sub>booster</sub> = 10 dB ; G <sub>amp</sub> = 15 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
30	-9.47
25	-5.53
20	-1.12
15	3.92
10	9.37

Mateixa situació que la taula anterior. S'observa que per un valor del guany d'amplificador de línia, els resultats obtinguts són lleugerament millors.

G <sub>booster</sub> = 15 dB ; G <sub>amp</sub> = 15 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
30	-5.53
25	-1.12
20	3.92
15	9.37
10	13.66

Els resultats en aquesta combinació tampoc compleix la GSNR de 15 dB. Tot i així, s'observa que per unes pèrdues de 10 dB al ROADM el resultat ja és proper a 15 dB.

G <sub>booster</sub> = 20 dB ; G <sub>amp</sub> = 15 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
20	9.34
15	13.66
10	9.54

Quan el sistema disposa d'un guany a l'amplificador booster de 20 dB i un guany a l'amplificador de línia de 15 dB, els resultats fins a pèrdues de 15 dB al ROADM milloren respecte al cas anterior. En canvi, quan el ROADM introdueix unes pèrdues de 10 dB, la GSNR empitjora, això es deu que es produeixen potències no-lineals que també afecten a la GSNR.

G <sub>booster</sub> = 15 dB ; G <sub>amp</sub> = 20 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
20	8.83
15	14.46
10	16.42

En canvi, si enlloc d'augmentar el guany de l'amplificador booster, s'augmenta el guany de l'amplificador de línia, s'obté una GSNR vàlida per unes pèrdues de ROADM de 10 dB. Això ens indica que a partir d'un guany de booster de 20 dB, aquest introdueix potències no-lineals al sistema.

G <sub>booster</sub> = 20 dB ; G <sub>amp</sub> = 20 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
20	14.16
15	16.42
10	9.46

En aquesta taula, s'obté un valor vàlid quan el guany de l'amplificador booster, el guany de l'amplificador de línia són de 20 dB i les pèrdues de ROADM són de 15 dB.

G <sub>booster</sub> = 25 dB ; G <sub>amp</sub> = 20 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
30	8.83
25	14.16
20	16.42
15	9.46
10	-0.36

Per unes pèrdues de 20 dB, guany l'amplificador de booster de 25 dB i guany de l'amplificador de línia de 20 dB, s'obté una GSNR superior a 15 dB.

G <sub>booster</sub> = 20 dB ; G <sub>amp</sub> = 25 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
25	12.76
20	17.42
15	16.07
10	7.22

Per la combinació de guanys d'amplificador booster de 20 dB i d'amplificador de línia de 25 dB, s'obtenen dos opcions vàlides. A més, respecte la opció anterior s'obtenen millors resultats. Això fa indicar que és preferible tenir un guany de línia superior al guany del booster, enlloc de un guany de booster superior al de línia.

G <sub>booster</sub> = 25 dB ; G <sub>amp</sub> = 25 dB	
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB)
30	12.76
25	17.42
20	16.07
15	7.22

Per aquesta opció hi ha dos opcions vàlides. També s'observa que a partir de pèrdues de ROADM de 15 dB, les potències no-lineals del sistema són més severes.

Un cop fet l'escombrat, s'obtenen varies opcions que poden complir la GSNR de 15 dB. Per altre banda, s'observa que per molt que es pugi el guany dels amplificadors, no és sinònim de millora rendiment ja que les potències no lineals augmenten i fan reduir la GSNR final.

Una altra observació és que entre augmentar el guany de l'amplificador booster o augmentar el guany de l'amplificador de línia, és preferible augmentar el guany de l'amplificador de línia ja que s'obtenen millor resultats. A més, quan s'augmenta el guany del booster, augmenten les potències no-lineals.

Ara s'analitzarà quin efecte té modificar la taxa de transmissió en la GSNR. Es partirà d'un G<sub>booster</sub> de 20 dB, una G<sub>amp</sub> de 20 dB i unes pèrdues efectives del ROADM de 20 dB.

Baud rate (Gbaud/s)	GSNR (dB)
16	16.85
32	14.16
48	12.46
64	11.24

Quan menor és taxa de transmissió major és la qualitat que rep el receptor. Això és degut perquè el baud rate està relacionat amb la P<sub>ASE</sub>. Quan major és la el baud rate, major és la P<sub>ASE</sub>. Com s'ha vist en anteriors capítols, la OSNR (dB) =



$P_s$  (dB) –  $P_{ASE}$  (dB). A partir d'aquí en aquest treball es treballarà amb baud rate de 32 GBaud/s que equival a una modulació QPSK de 100 Gbps.

Altre element en tenir en compte és el tipus d'amplificador que s'utilitza. Fins ara s'ha estat treballant amb amplificadors de línia estàndards, ara es farà l'anàlisi utilitzant un amplificador de línia de soroll baix.

G <sub>booster</sub> = 20 dB ; G <sub>amp</sub> = 20 dB		
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB) (standard)	GNSR (dB) (low noise)
25	8.83	8.87
20	14.16	14.17
15	16.42	16.51
10	9.46	9.48

En aquest anàlisi s'obté valors molt semblant entre un amplificador estàndard i un de soroll baix. Per tant, com els preus dels amplificadors de soroll baix són més elevats, pels següents enllaços es treballarà directament amb amplificadors estàndards.

Per acabar, s'analitzarà quin efecte té el tipus de fibra que s'utilitza. Fins ara els càlculs s'han fet amb una fibra G.652, a continuació, es veurà com canvia amb una fibra G.655.

G <sub>booster</sub> = 20 dB ; G <sub>amp</sub> = 20 dB		
Pèrdues del ROADM	GSNR (dB) (G.652)	GNSR (dB) (G.655)
30	3.35	3.35
25	8.83	8.82
20	14.16	13.84
15	16.42	12.84
10	9.46	3.93

La fibra G.655 obté pitjors resultats en quant a valors de GSNR, en canvi, en quant a valors de dispersió, la dispersió cromàtica millora. Per tant, a partir d'aquí es treballarà amb una fibra G.652.

En resum, en aquest apartat s'ha valorat els diferents elements que afecten a l'enllaç València-Lleida. S'ha definit que en els següents enllaços es treballarà amb taxes de transmissió de 32 Gbaud/s, fibra del tipus G.652 i amplificadors de línia estàndard. Pel que fa a les pèrdues del ROADM i els guanys dels amplificadors definitius es decidiran al següent apartat ja que l'enllaç València-Lleida es troba dins del camí València-Perpinyà. Fer aquest estudi ha servit per acotar els possibles valors de pèrdues del ROADM {25,20,15} dB i els guanys dels amplificadors de {20,25} dB.

## 4.2. Enllaç València-Perpinyà

Aquest recorregut està compostat pels trams València-Lleida i Lleida-Perpinyà. La longitud del primer tram és de 253 km, en canvi, la longitud del segon tram és de 222 km. Per tant, farà falta un amplificador de línia.

Tot i així, es fa una primera valoració del recorregut sense amplificadors de línia.

GSNR (dB)	-16.90
OSNR ASE (dB)	-16.90

Respecte al cas del tram València-Lleida, la GSNR ha empitjorat, així com la dispersió cromàtica i la dispersió per mode de polarització. Això és degut a que la longitud del recorregut ha augmentat, per tant, la fibra pateix més atenuacions i les dispersió depenen directament de la longitud.

Així doncs es realitza l'escombrat de guanys i pèrdues del ROADM. En aquest cas, com es parteix del cas anterior, es farà l'escombrat per guanys de {20, 25} dB i pèrdues del ROADM de {25, 20, 15} dB.

G <sub>booster_VL</sub> = 20 ; G <sub>amp_VL</sub> = 20 ; G <sub>booster_LP</sub> = 20; G <sub>amp_LP</sub> = 20 (dB)	
Pèrdues ROADM	GSNR (dB)
25	8.40
20	12.93
15	14.54

Per aquest enllaç, cap valor compleix una GSNR de 15 dB amb uns guanys als amplificadors de 20 dB.

G <sub>booster_VL</sub> = 25 ; G <sub>amp_VL</sub> = 20 ; G <sub>booster_LP</sub> = 20; G <sub>amp_LP</sub> = 20 (dB)	
Pèrdues ROADM	GSNR (dB)

25	12.93
20	14.54
15	8.98

Augmentant el guany de l'amplificador booster del tram València-Lleida, s'observa que a partir de pèrdues de ROADM de 15 dB, les potències no-lineals comencen a afectar a la GSNR.

$G_{\text{booster\_VL}} = 20$ ; $G_{\text{amp\_VL}} = 25$ ; $G_{\text{booster\_LP}} = 20$ ; $G_{\text{amp\_LP}} = 20$ (dB)	
Pèrdues ROADM	GSNR (dB)
25	11.83
20	15.16
15	14.30

$G_{\text{booster\_VL}} = 25$ ; $G_{\text{amp\_VL}} = 25$ ; $G_{\text{booster\_LP}} = 20$ ; $G_{\text{amp\_LP}} = 20$ (dB)	
Pèrdues ROADM	GSNR (dB)
25	15.16
20	14.30
15	6.91

S'ha trobat dos possibles solucions on el senyal al receptor de Perpinyà, tingui una GSNR de 15 dB. Tot i així, es farà un escombrat per valor més baixos de guany més baixos pels amplificadors del tram Lleida-Perpinyà. Per valor més elevats no, ja que s'està buscant els valors mínims per assegurar una GSNR de 15 dB.

$G_{\text{booster\_VL}} = 20$ ; $G_{\text{amp\_VL}} = 25$ ; $G_{\text{booster\_LP}} = 15$ ; $G_{\text{amp\_LP}} = 20$ (dB)	
Pèrdues ROADM	GSNR (dB)
25	10.55
20	12.83
15	12.30

$G_{\text{booster\_VL}} = 20$ ; $G_{\text{amp\_VL}} = 25$ ; $G_{\text{booster\_LP}} = 20$ ; $G_{\text{amp\_LP}} = 15$ (dB)	
Pèrdues ROADM	GSNR (dB)
25	10.88
20	13.39
15	12.78

Per tant, pel recorregut València -Perpinyà. les dos opcions que tenim són les següents:

- Un ROADM amb pèrdues de 20 dB, un amplificador de línia del tram València-Lleida de 25 dB i la resta de guanys a 20 dB.
- Un ROADM amb pèrdues de 25 dB, guanys dels amplificadors del tram València-Lleida de 25 dB i un guanys dels amplificadors del tram Lleida-Perpinyà de 20 dB.

### 4.3. Enllaç València-Girona

El recorregut València-Girona està format per 3 trams, València-Tarragona, Tarragona-Barcelona i Barcelona-Girona. La longitud dels trams són de 229 km, 83 km i 85,3 km.

Com s'ha establert en els recorreguts anteriors s'utilitzarà una fibra de G.652, una taxa de transmissió de 32 Gbaud/s i uns amplificadors de línia de tipus estàndard. Donades les dades, es farà una primera estimació de l'estat del canal sense amplificadors de línia amb tots els guanys dels amplificadors booster a 15 dB i unes pèrdues de ROADM de 20 dB.

GSNR (dB)	-5.21
OSNR ASE (dB)	-5.21

Per millorar la GSNR, és necessari l'ús d'amplificadors de línia. Donades les distàncies dels diferents trams, l'únic tram on caldrà d'amplificador de línia serà el tram València-Tarragona. D'aquesta manera es fa l'escorbat de valors de guany dels amplificadors i de les pèrdues del ROADM.

G <sub>booster_VT</sub> = 15 : G <sub>amp_VT</sub> = 15 : G <sub>booster_TB</sub> =15 : G <sub>booster_BG</sub> =15			
Pèrdues Roadm València (dB)	Pèrdues Roadm Tarragona (dB)	Pèrdues Roadm Barcelona (dB)	GSNR (dB)
20	20	20	8.63
15	20	20	13.34
20	15	20	8.63
20	20	15	8.70

Pèrdues ROADMs de 20 dB				
G <sub>booster_VT</sub>	G <sub>amp_VT</sub>	G <sub>booster_TB</sub>	G <sub>booster_BG</sub>	GSNR (dB)
20	15	15	15	13.34
15	20	15	15	12.69
15	15	20	15	8.70
15	15	15	20	8.70
15	15	20	20	8.77
20	20	15	15	16.17
20	20	20	15	16.43
20	20	15	20	16.48
20	20	20	20	16.76
25	20	20	20	16.23
20	25	20	20	15.40
25	25	20	20	15.01

En l'escombrat anterior s'observa que els guanys que marquen el valor de la GSNR són els guanys dels amplificadors de València-Tarragona. Per tant, es provarà de baixar els valors dels guanys dels boosters dels trams de Tarragona-Barcelona i de Barcelona-Girona. Així com provar altres combinacions pels guanys dels trams València-Tarragona.

Pèrdues ROADMs de 20 dB				
$G_{\text{booster\_VT}}$	$G_{\text{amp\_VT}}$	$G_{\text{booster\_TB}}$	$G_{\text{booster\_BG}}$	GSNR (dB)
15	25	15	15	14.99
25	15	15	15	15.12
20	20	10	15	14.98
20	20	15	10	14.85

En vista dels resultats, pel recorregut València-Girona es disposa de dos opcions clares:

- Pèrdues dels ROADMs a 20 dB, guanys dels amplificadors del tram València-Tarragona a 20 dB i la resta a 15 dB.
- Pèrdues del ROADM a 20 dB, guany de l'amplificador booster del tram València-Tarragona a 25 dB i resta a 15 dB.

#### 4.4. Enllaç Perpinyà-Girona

L'enllaç que uneix les ciutats de Perpinyà i Girona és de 79 km. Per tant, no serà necessari l'ús de amplificadors de línia. Així, es comença directament amb l'escombrat de guanys i de pèrdues del ROADM.

Pèrdues ROADM (dB)	Guany del booster (dB)	GSNR (dB)
25	10	14.95
25	15	20.11
25	20	24.34
20	10	20.11
20	15	24.34
20	20	25.66
15	10	24.34
15	15	25.66
15	20	19.67
10	10	25.66
10	15	19.67
10	20	10.15

Per aquest enllaç, s'observa que exceptuant les combinacions de l'extrem de l'escombrat, qualsevol combinació compleix la GSNR marcada a 15 dB.

#### 4.5. Enllaç Lleida-Girona

L'enllaç Lleida-Girona és de 187 km. Per tant, és probable que faci falta d'utilitzar amplificadors de línia. Tot i així, es fa un escombrat de guanys i pèrdues del ROADM quan l'enllaç no disposa d'amplificadors de línia.

Pèrdues ROADM (dB)	Guany del booster (dB)	GSNR (dB)
25	25	7.61
20	20	7.61
20	25	12.38
15	15	7.61
15	20	12.38
15	25	9.43
10	10	7.61
10	15	12.38
10	20	9.43

Fent l'escombrat no hi ha cap valor que compleixi. Per tant, l'ús d'amplificadors de línia serà necessari. Es torna de fer l'escombrat introduint un amplificador de línia.

Pèrdues del ROADM de 20 dB		
G <sub>booster</sub> (dB)	G <sub>amp</sub> (dB)	GSNR (dB)
10	10	7.28
10	15	12.01
10	20	15.35
10	25	16.95
15	10	12.77

15	15	17.20
15	20	19.99
15	25	20.48
20	10	17.68
20	15	20.98
20	20	21.60
20	25	16.55
25	10	17.98
25	15	18.28
25	20	15.22
25	25	7.21

Pèrdues del ROADM de 25 dB		
G <sub>booster</sub> (dB)	G <sub>amp</sub> (dB)	G <sub>SNR</sub> (dB)
10	20	9.97
10	25	11.74
15	15	12.01
15	20	15.35
15	25	16.95
20	10	12.77
20	15	17.20
20	20	19.99
20	25	20.48
25	10	17.68
25	15	20.98
25	20	21.60
25	25	16.55



Després de fet l'escombrat s'observa que hi ha moltes opcions que garanteixen una GSNR de 15 dB.

#### 4.6. Enllaç Lleida-Barcelona

Les ciutats de Lleida i Barcelona estan connectades mitjançant una fibra de 132 km. En aquest cas, és probable que no faci falta amplificadors de línia. Es realitza un escombrat de guany i pèrdues per corroborar-ho.

Pèrdues ROADM (dB)	Guany Booster (dB)	GSNR (dB)
25	15	8.75
25	20	14.29
25	25	19.16
20	10	8.75
20	15	14.29
20	20	19.16
20	25	18.55
15	10	14.29
15	15	19.16
15	20	18.55
15	25	9.93

Després de fer l'escombrat, s'observa que no és necessari l'ús d'amplificadors de línia. Dues possibles opcions de dimensionat són:

- Pèrdues de ROADM de 25 dB i guany del booster de 25 dB
- Pèrdues de ROADM de 20 dB i guany del booster de 20 dB.

#### 4.7. Enllaç Lleida-Tarragona

L'enllaç de Lleida-Tarragona és de 76.5 km. Per tant, no serà necessari d'amplificadors de línia. Es realitza l'escombrat de guany i pèrdues de ROADM:

Pèrdues ROADM (dB)	Guany Booster (dB)	GSNR (dB)
25	10	15.49
25	15	20.59

25	20	24.71
25	25	25.81
20	10	20.59
20	15	24.71
20	20	25.81
20	25	19.69
15	10	24.71
15	15	25.81
15	20	19.69
15	25	10.17

Per aquest enllaç hi ha múltiples opcions que compleixen una GSNR de 15 dB.

#### 4.8. Enllaç Final

En els apartats anteriors s'ha dimensionat diferents enllaços, no tots. En aquest apartat es realitzarà el dimensionat final. S'ha dimensionat enllaços llargs que englobaven altres enllaços curts. A més, els enllaços dimensionats són simètrics, així que per l'enllaç Lleida-València, s'utilitzarà els mateixos valors de guanys dels amplificadors i de les pèrdues del ROADM.

Recordar que s'ha establerts en anteriors apartats que la fibra utilitzada és una fibra G.652, la taxa de transmissió és de 32 GBaud/s i els amplificadors de línia seran del tipus estàndard.

Finalment, les pèrdues del ROADM seran de 20 dB i els guanys dels amplificadors seran els següents:

G <sub>booster_BG</sub>	15	G <sub>booster_BT</sub>	15	G <sub>booster_BL</sub>	20
G <sub>booster_GB</sub>	15	G <sub>booster_GL</sub>	15	G <sub>booster_GP</sub>	10
G <sub>booster_TB</sub>	15	G <sub>booster_TL</sub>	10	G <sub>booster_TV</sub>	20
G <sub>booster_LB</sub>	20	G <sub>booster_LG</sub>	15	G <sub>booster_LT</sub>	10
G <sub>booster_LP</sub>	20	G <sub>booster_LV</sub>	20	G <sub>booster_PG</sub>	10
G <sub>booster_PL</sub>	20	G <sub>booster_VL</sub>	20	G <sub>booster_VT</sub>	20
G <sub>amp_GL</sub>	15	G <sub>amp_LG</sub>	15	G <sub>amp_LP</sub>	20

$G_{amp\_LV}$	25	$G_{amp\_TV}$	20	$G_{amp\_PL}$	20
$G_{amp\_VT}$	20	$G_{amp\_VL}$	25		

La GSNR de tots els enllaços amb el dimensionat establert serà:

GSNR (dB)						
Destí\Ori	Barcelona	Girona	Tarragona	Lleida	Perpinyà	València
Barcelona	-	23.37	23.74	19.16	18.42	17.10
Girona	23.37	-	20.53	17.20	20.11	16.17
Tarragona	23.74	20.53	-	20.59	17.29	18.18
Lleida	19.16	17.20	20.59	-	19.13	17.42
Perpinyà	18.42	20.11	17.29	19.13	-	15.16
València	17.11	16.17	18.18	17.42	15.16	-

La taula mostra com s'ha complert el propòsit de dimensionar una xarxa a Catalunya i València mantenint una GSNR de 15 dB.



## CAPÍTOL 5. CONCLUSIONS I ESTUDI D'AMBIENTALITZACIÓ

En aquest treball, s'ha estudiat com és una xarxa WDM, els seus components i els diferents paràmetres s'han de tenir en compte per complir els requeriments de qualitat del senyal rebut.

Pel disseny d'una xarxa WDM és molt útil les eines de simulació. En aquest treball s'ha optat pel GNPpy, una eina de codi obert escrita en Python i desenvolupada per Telecom Infra Project. Abans de utilitzar el simulador s'ha fet un estudi del programa on s'ha comprovat que els resultats teòrics i els resultats simulats concordaven. Gràcies a l'estudi s'ha vist quins paràmetres afectaven a la GSNR del sistema òptic. Els resultats han estat que els paràmetres més determinants eren els guanys dels amplificadors de línia i dels amplificadors booster, però alhora aquests podien generar potències no-lineals o potències ASE que fan disminuir la GSNR. Per tant, s'havia d'arribar a un compromís per garantir una GSNR determinada. L'altre paràmetre que afectava a la GSNR del sistema era les pèrdues del ROADM.

Finalment, s'ha complert l'objectiu marcat de dissenyar una xarxa de transport òptic utilitzant una eina de simulació. Amb el GNPpy s'ha dissenyat una xarxa que garanteix una GSNR de 15 dB que uneix les ciutats de Barcelona, Girona, Lleida, Tarragona, Perpinyà i València.

En quan l'estudi ambientalització, una xarxa òptica sempre és més eficient que una xarxa elèctrica ja que admet el cablejat admet més capacitat, més velocitat de transmissió i consumeix menys una energia que una xarxa elèctrica. Tot i que per la instal·lació de xarxes òptiques s'han d'obrir franges i això provocar canvis en el terreny, fent un correcte dimensionat de la xarxa mitjançant eines de simulació com el GNPpy, permet dimensionar xarxes amb capacitat molt elevada provocant que aquella xarxa sigui utilitat durant molts anys.



## CAPÍTOL 6. FONTS DE REFERÈNCIA

- [1] Foccc Technology Co., Ltd. (2019c, juliol 12). *Qué es WDM: Wiki, tipos y funciones - Exposición*. <http://www.fibresplitter.com/info/what-is-wdm-wiki-types-and-functions-37165544.html>
- [2] Aragonès, R. [Ran Arm]. (2020, 6 juny). 5.2. *Redes WDM - Longitud de onda en WDM* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=AFFX9SQJBQw>
- [3] Aragonès, R. [Ran Arm]. (2020b, juny 6). 5.3. *Redes WDM - Inserción de señales en sistemas WDM* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=0MEmlXIAQus&t=11s>
- [4] *Què és el multiplexatge de divisió de longitud d'ona (wdm)? - Definició de tecnologia - Xarxes - 2022.* (2022). Icy Science. <https://ca.theastrologypage.com/wavelength-division-multiplexing>
- [5] Aragonès, R. [Ran Arm]. (2020c, juny 6). 5.4. *Redes WDM - CWDM Vs DWDM* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=2PryotdhQ8w&t=74s>
- [6] *Equipos DWDM: pruebas, monitorización y solución de problemas de redes DWDM.* (s. f.). VIAVI Solutions Inc. <https://www.viavisolutions.com/es-es/soluciones/dwdm>
- [7] P., & P. (2021, 26 maig). *REDES ÓPTICAS DWDM*. Comunidad Huawei Enterprise. <https://forum.huawei.com/enterprise/es/redes-%C3%B3pticas-dwdm/thread/743049-100235>
- [8] Aragonès, R. [Ran Arm] (2020, 6 juny). 5.5. *Redes WDM - Sistema WDM por módulos*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=h9KoLOYFBj8>
- [9] Foccc Technology Co., Ltd. (2019a, maig 16). *Diferencias entre el preamplificador, el amplificador booster y el amplificador en línea - Noticias*. <http://www.fibresplitter.com/news/differences-between-pre-amplifier-booster-amp-24267565.html>
- [10] Foccc Technology Co., Ltd. (2019, 4 juny). *Amplificador óptico - EDFA (amplificador de fibra dopado con erbio) para el sistema WDM - Exposición*. <http://www.fibresplitter.com/info/optical-amplifier-edfa-erbium-doped-fiber-a-35901322.html>
- [11] Aragonès, R. (2020b, juny 6). 5.6. *Redes WDM - Interconexión de equipos WDM*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=c0TyV-ZwiCc>
- [12] Aragonès, R. (2020c, juny 6). 5.7. *Redes WDM - ROADMs CDCG*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=JZ51QIPUos0>
- [13] Telecomkhabar. (2019, 28 setembre). *ROADM: Concept, Function, Application in Telecom Network*. <https://www.telecomkhabar.com/2019/09/roadm-concept-function-application-telecom-network/>
- [14] Fenta, M. C. (2021, 9 març). *Fibre Optic Methods of Prospecting: A Comprehensive and Modern Branch of Geophysics*. SpringerLink. [https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-021-09634-8?error=cookies\\_not\\_supported&code=0f61dec6-78dd-4698-ad17-101f45b7aff7](https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-021-09634-8?error=cookies_not_supported&code=0f61dec6-78dd-4698-ad17-101f45b7aff7)
- [15] Lesics Española. (2019, 9 maig). *Cables de fibra óptica, ¿cómo funcionan?* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=zZ7ay-j6ZQQ>
- [16] Passanisi, L. (2017, 31 octubre). *G.652 y G.655: ¿Cuáles son las diferencias entre las fibras ópticas monomodo?* Beyondtech.

<https://beyondtech.us/blogs/beyondtech-en-espanol/cuales-son-las-diferencias-entre-las-fibras-opticas-monomodo-g-652-y-g-655>

[17] Juniper Networks. (2020, 24 maig). *Pérdida de señal de cable de fibra óptica, atenuación y dispersión* - TechLibrary.

<https://www.juniper.net/documentation/es/release-independent/junos/topics/concept/fiber-optic-cable-signal-loss-attenuation-dispersion-understanding.html>

[18] Montañana, R. [Universidad Valencia - aulaclí]. (2018, 18 juny). *Curso de Redes. 2.4.5 Cables de fibra óptica. Atenuación, ventanas y bandas* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=pMIdIMfevRs>

[19] Montañana, R. [Universidad Valencia - aulaclí]. (2018, 28 juny). *Curso de Redes. 2.4.9. Cables de fibra óptica. Dispersión en fibras monomodo. Tipos de fibras* [Vídeo]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=jd5H\\_rLUzr4](https://www.youtube.com/watch?v=jd5H_rLUzr4)

[20] Wilder, M. R. (2000, 25 juliol). *Understanding and measuring chromatic dispersion*. Fiber Optics Online.

<https://www.fiberopticonline.com/doc/understanding-and-measuring-chromatic-dispers-0002>

[21] Jay N. Damask, *Polarization Optics in Telecommunications*, New York, Springer, 2004

[22] Manghat, P. (2021, 27 maig). *OSNR in Fiber Optic Communications*. Vitex. <https://vitextech.com/osnr-meaning/>

[23] D. Knipp, T. Chakma [International University Bremen](Primavera 2005). *Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)* <https://cdn.optiwave.com/wp-content/uploads/2015/10/TC-Optical-Signal-to-Noise-Ratio-OSNR.pdf>

[24] *¿Qué es OSNR en el sistema de transmisión óptica?* (2019, 29 març). Comunidad Huawei Enterprise.

<https://forum.huawei.com/enterprise/es/%C2%BFqu%C3%A9-es-osnr-en-el-sistema-de-transmisi%C3%B3n-%C3%B3ptica/thread/515093-100243>

[25] S. Alahakoon, D. Munasinghe, G. S Samarakkody, R. Weerasuriya (2020 Setembre). *OSNR and dispersion tolerance of FWM based optical carrier recovery scheme*. Journal of Physics Communications.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2399-6528/abb24a>

[26] Ferrari, A. (2020, 1 juny). *GNPy: an open source application for physical layer aware open optical networks*. Optica Publishing Group.

<https://www.osapublishing.org/jocn/fulltext.cfm?uri=jocn-12-6-C31&id=429003>

[27] *PLANET: Physical Layer Aware Networking* | OptCom. (2021).

<https://optcom.polito.it/content/planet-physical-layer-aware-networking>

[28] A.Ferrari, M. Filer, K. Balasubramanian, Y. Yin, E. Le Rouzic, J. Kunderát, G. Grammel, G. Galimberti, V. Curri. (2020, Juny). *GNPy: an open source application for physical layer aware open optical networks*.

[29] *GNPy: Optical Route Planning Library — gnp documentation*. (2021).

GNPy: Optical Route Planning Library. <https://gnpy.readthedocs.io/en/master/>