

# DESEMPEÑO DE UNA ARQUITECTURA DE RED ÓPTICA DE LINEA MIXTA ASOCIADA A LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DE INFORMACIÓN.

## ANEXOS



Universidad  
del Cauca

Lysette Daniela Contreras Yacumal  
Leyder Adrian Ruiz Romero

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo I+D de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT  
Popayán, 2024

# ANEXO A

## Caracterización de la fibra óptica implementada.

Se opta por emplear el estándar de fibra óptica actual en la elaboración del trabajo de grado, este estándar, regulado por la ITU en la recomendación ITU-T G.657, aborda específicamente el problema del radio de curvatura excesivo que se observa en la fibra óptica convencional ITU-T G.652. La recomendación ITU-T G.657 introduce nuevas características relacionadas con la pérdida por reflexión.

A continuación se presenta en la tabla A.1 las fibras ópticas comerciales encontradas en el entorno de simulación OptSim, entre las cuales se destaca la fibra **CorningSMF28e\_1550**, la cual fue elegida para el desarrollo de este trabajo de grado.

Tipo de fibra	Atenuación $\alpha_n [dB/Km]$	Dispersión cromática		MFD $A_{eff} [\mu m^2]$	Polarización PMD $[ps/\sqrt{Km}]$
		D [ps/nm/Km]	D' slope $[ps/nm^2/Km]$		
PirelliWIDELIGHT_1550	0.24	-6.85	0.157	51	$\leq 0,1$
PirelliWIDELIGHT_1625	0.25	-0.1	0.107	51	$\leq 0,1$
PirelliWIDELIGHT_1550	0.23	4.3	0.114	72	$\leq 0,1$
PirelliWIDELIGHT_1625	0.25	11.2	0.11	72	$\leq 0,1$
PirelliWIDELIGHT_1550	0.23@1560nm	-2.2@1560nm	0.12	70	$\leq 0,1$
CorningSMF28_1310	0.34	0@1313nm	0.086	66.5	$\leq 0,1$
CorningSMF28_1550	0.19	16	0.086	85	$\leq 0,1$
CorningSMF28e_1310	0.34	0@1313nm	0.086	66.5	$\leq 0,1$
<b>CorningSMF28e_1550</b>	<b>0.19</b>	<b>16</b>	<b>0.086</b>	<b>85</b>	<b><math>\leq 0,1</math></b>
Corning_LEAF	0.2@1550nm	4@1550nm	0.1@1550nm	72	$\leq 0,1$
Corning_LEAF_submarine	0.2@1550nm	40@1580nm	0.11@1580nm	71	$\leq 0,1$
FurukawaSM332_1310	0.32	0	0.092	68	$\leq 0,5$
FurukawaSM332_1550	0.18	18	0.092	86.5	$\leq 0,5$
AlcatelSMF_1310	0.3	0	0.86	63.6	$\leq 0,1$
AlcatelSMF_1550	0.28	16		81.67	$\leq 0,1$
AlcatelTERALIGHT_1550	0.205	8	0.058	65	$\leq 0,1$
AlcatelTERALIGHT_1620	0.22	10.9@1600nm	0.058	65	$\leq 0,1$
LucentTRUEWAVE_1600	0.2	4.5	0.045	55	$\leq 0,1$
LucentTRUEWAVE_1550	0.2	7	0.045	59	$\leq 0,1$
LucentTRUEWAVE_1310	0.3	0@1312nm	0.088	66	$\leq 0,1$
LucentTRUEWAVE_1550	0.2	0@1312nm	0.088	80	$\leq 0,1$
SumitomoZ_1550	0.17	18.5	0.056	80	$\leq 0,1$
SumitomoZPLUSa_1550	0.168	20.5	0.059	110	$\leq 0,1$

Tabla A.1: Fibras ópticas disponibles en OptSim.

# ANEXO B

## Escenario General

Al ser necesario utilizar un tipo de ajuste debido a la presencia de canales de mayor capacidad, se opta por llevar a cabo una compensación iniciando en un 70 %, considerando que alrededor del 50 % de compensación es aceptable para capacidades bajas. Después, se realizaron incrementos del 10 % de manera progresiva hasta alcanzar el 100 %, tal y como lo evidencia la tabla B.1.

Compensación [%]	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
				[lin]	[dBm]			
0	40 Gbps	-19.698	0.0227501	2	6.0206	0.005308475	50.1866265	3.951735
	10 Gbps	-24.595	0.0227501	2	6.0206	0.02115985	52.591563	2.586265
	2.5 Gbps	-19.976	$1x10^{-40}$	49.3478	33.6642415	0.06388675	54.204788	9.51514
70	40 Gbps	-19.6985	0.0227501	2	6.0206	0.00575056	50.060955	3.9488
	10 Gbps	-24.5965	$3.54x10^{-19}$	9.32803	19.382348	0.001548635	52.652182	2.57738
	2.5 Gbps	-19.9735	$1x10^{-40}$	57.4329	35.0602865	0.074263	54.233224	9.516405
80	40 Gbps	-19.697	0.02275055	2	6.0206	0.00637579	50.0926035	3.92408
	10 Gbps	-24.595	$7.7x10^{-22}$	10.10247	20.082779	0.00118511	52.982249	2.59825
	2.5 Gbps	-19.977	$1x10^{-40}$	56.7905	34.989849	0.0767029	54.2352025	9.51774
90	40 Gbps	-19.6975	$2.86x10^{-3}$	3.164	9.341416	0.00070032	49.98738	3.922145
	10 Gbps	-24.6015	$4.93x10^{-25}$	10.5977	20.4982105	0.001099505	52.3512205	2.56025
	2.5 Gbps	-19.977	$1x10^{-40}$	55.3262	34.7363	0.0780358	54.229311	9.5175
100	40 Gbps	-19.6975	$1x10^{-40}$	43.83195	30.429979	0.000472988	50.0971715	3.966785
	10 Gbps	-24.601	$1.1x10^{-25}$	10.735	20.6115785	0.001127675	52.659029	2.58503
	2.5 Gbps	-19.968	$1x10^{-40}$	57.33055	35.050905	0.07883805	54.2156755	9.521705

Tabla B.1: Variación de la compensación, rango de 70 % a 100 % en incrementos de 10 %.

Posteriormente, con el fin de realizar una compensación real, se realiza una compensación adicional en el intervalo del 90 % a 100 % con aumentos progresivos del 2 % (tablaB.2).

Compensación [%]	Capacidad de canal	Potencia Rx [dBm]	BER	Factor Q		Jitter [ns]	OSNR [dB]	OSNR Real [dB]
				[lin]	[dBm]			
92	40 Gbps	-19.698	$2.91x10^{-4}$	6.199575	14.7390175	0.0005283285	50.243368	3.912865
	10 Gbps	-24.601	$1.46x10^{-25}$	10.6869	20.571341	0.001094615	52.1972565	2.560715
	2.5 Gbps	-19.9755	$1x10^{-40}$	57.68445	35.0480895	0.0754167	54.2022401	9.517715
94	40 Gbps	-19.698	$7.46x10^{-25}$	19.74541	24.014926	0.0006184995	50.2655575	3.9602
	10 Gbps	-24.5995	$2.43x10^{-16}$	10.48845	20.409933	0.00109812	52.9498635	2.584305
	2.5 Gbps	-19.9785	$1x10^{-40}$	5755.02895	34.7010515	0.07926745	54.2089725	9.51585
96	40 Gbps	-19.698	$1x10^{-40}$	56.80465	33.736333	0.000316676	50.2416065	3.92281
	10 Gbps	-24.601	$3.75x10^{-24}$	10.603	20.504105	0.00112491	52.7907945	2.578835
	2.5 Gbps	-19.978	$1x10^{-40}$	54.4	34.614425	0.0793169	54.22328	9.51239
98	40 Gbps	-19.6975	$1x10^{-3}$	352.333	34.299512	0.0002187745	50.1622365	3.934505
	10 Gbps	-24.6025	$4.81x10^{-28}$	1061595	20.5161775	0.001135595	52.5438525	2.567815
	2.5 Gbps	-19.9705	$1x10^{-40}$	54.7644	34.6774985	0.03802921	54.204013	9.51873

Tabla B.2: Variación de la compensación , rango de 90 % a 100 % en incrementos de 2 %.

# ANEXO C

## Casos de estudio

Se considera relevante explicar el proceso, que se realiza de manera implícita, para el calculo de la eficiencia espectral distribuida tanto en los casos de estudio como en el escenario general.

El proceso se inicia tomando la medida del ancho de banda dedicado para cada canal en recepción como se ilustra en la figura C.1.

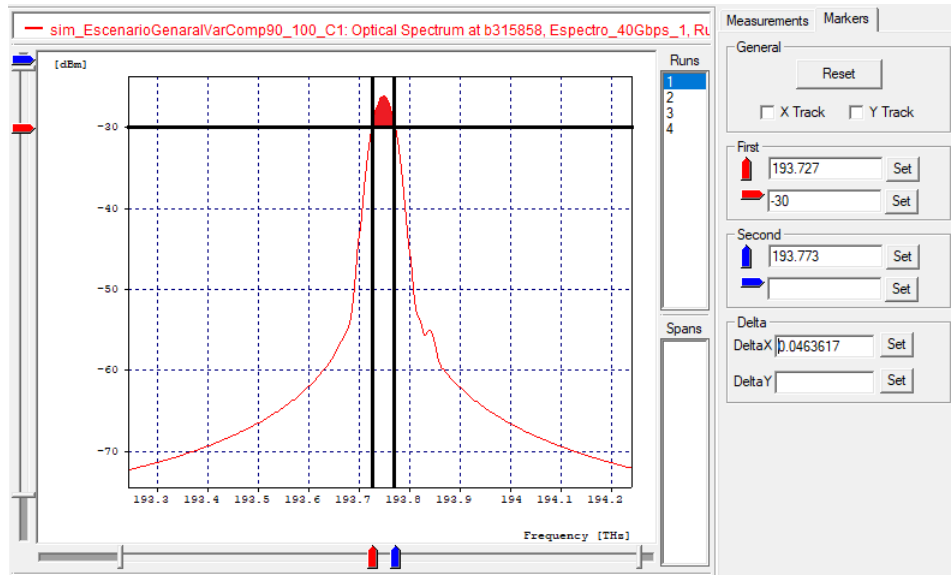


Figura C.1: Medición de BW dedicado en  $Ch_6$ .

Una vez medido el  $BW_{ded}$  de cada canal se hace uso de la ecuación adaptada de la teoría de Shannon para 3 diferentes tipos de canales [1] que esta expresada de la siguiente manera.

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{\sum_{i=1}^{\epsilon} B_{chi} \log_2 \left( 1 + \frac{P_s - chi}{N_0 B} \right) + \sum_{j=1}^{\varphi} B_{chj} \log_2 \left( 1 + \frac{P_s - chj}{N_0 B} \right) + \sum_{k=1}^{\gamma} B_{chk} \log_2 \left( 1 + \frac{P_s - chk}{N_0 B} \right)}{\frac{B_{chi}[Hz]}{2} + \frac{B_{chj}[Hz]}{2} + \frac{B_{chk}[Hz]}{2} + (N-1)\Delta_v[Hz]} \quad (C.1)$$

De esta ecuación ya se tienen algunos datos como las variables de control ( $C_N$ ,  $N$  y  $\Delta_v$ ). Los datos restantes ( $B_{chi}[Hz]$ ,  $B_{chj}[Hz]$  y  $B_{chk}[Hz]$ ) son los medidos como se expuso anteriormente.

Aunque la capacidad nominal ( $C_N$ ) no esté expresada explícitamente sobre la ecuación C.1, esta se representa como:

$$C_{N_i}[bps] = B_{chi} \log_2 \left( 1 + \frac{P_s - chi}{N_0 B} \right)$$

Dada la anterior igualdad se podría expresar la eficiencia espectral distribuida ( $\eta_{dis}$ ) como se ilustra en la ecuación C.2 para una comprensión más sencilla.

$$\eta_{dis}[bps/Hz] = \frac{\sum_{i=1}^{\varepsilon} C_{N_i}[bps] + \sum_{j=1}^{\varphi} C_{N_j}[bps] + \sum_{k=1}^{\gamma} C_{N_k}[bps]}{\frac{B_{chi}[Hz]}{2} + \frac{B_{chj}[Hz]}{2} + \frac{B_{chk}[Hz]}{2} + (N-1)\Delta_v[Hz]} \quad (C.2)$$

Con la ecuación expresada de esta manera, el único valor clave que se tiene en cuenta para el desarrollo del trabajo de grado, es el valor promedio entre canales de igual capacidad. Para ejemplificar este proceso se hace uso de la tabla C.1.

Canal	$\Delta_{v1}$ [GHz]	$C_N$ [Gbps]	$C_{TOT}$ [Gbps]	$C_{PRO}(81Km)$ [Gbps * Km]	$BW_{ded}$ [GHz]	$BW_{dis}$ [GHz]	$\eta_{ded}$ [bps/Hz]	$\eta_{dis}$ [bps/Hz]
$Ch_1$	100	40	105	8505	46.5079	494.5444	86.01 %	21.23 %
$Ch_2$	100	10			27.8390		35.92 %	
$Ch_3$	50	2.5			14.8765		16.81 %	
$Ch_4$	100	2.5			14.8937		16.79 %	
$Ch_5$	100	10			27.8912		35.85 %	
$Ch_6$	100	40			46.1693		86.64 %	

Tabla C.1: Valores ISD obtenidos en el sistema para  $\Delta_{v1}=50$  GHz, Arq. FTTF.

Continuando con el proceso, para obtener el ancho de banda dedicado de un canal tipo  $i$  se calcula el valor promedio como se mencionó anteriormente. Para el caso de los canales 3 y 4 se calcula de la siguiente manera:

$$B_{chi} = \frac{14,8765[GHz] + 14,8937[GHz]}{2} = 14,8851[GHz]$$

Tal y como se calculó anteriormente el ancho de banda para canales tipo  $i$ , se realiza para canales tipo  $j$  y tipo  $k$ , completando así las variables para el calculo de la eficiencia espectral distribuida o también denominada Densidad Espectral de Información que se presenta a continuación.

$$\begin{aligned} \eta_{dis}[bps/Hz] &= \frac{\sum_{i=1}^2 2,5[Gbps] + \sum_{j=1}^2 10[Gbps] + \sum_{k=1}^2 40[Gbps]}{\frac{14,8851[GHz]}{2} + \frac{27,8651[GHz]}{2} + \frac{46,3386[GHz]}{2} + ((4 * 100[GHz]) + 50[GHz])} \\ \eta_{dis}[bps/Hz] &= \frac{(2 * 2,5) + (2 * 10) + (2 * 40)}{494,5444} \left[ \frac{Gbps}{GHz} \right] \\ \eta_{dis}[bps/Hz] &= \frac{105}{494,5444} = 0,2123 \left[ \frac{bps}{Hz} \right] \end{aligned}$$

# Bibliografía

- [1] Gustavo Adolfo Gómez Agredo. “Mejora de la Eficiencia Espectral en redes DWDM a 40Gbps a través de los Formatos de Modulación Avanzados DPSK y DQPSK”. Tesis de maestría. Popayán-Colombia: Universidad Del Cauca, 2019.

# ANEXO D

## Recursos en Línea

En el Anexo D se sintetizan los resultados obtenidos a lo largo del trabajo de investigación y se presentan en el orden de aparición en el documento. Los casos de estudio fueron evaluados mediante dos arquitecturas FTTx, de las cuales los resultados presentados en Google Drive corresponden a:

- Resultados de Escenario general de simulación y análisis de compensación.  
[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1117-1oqVXZEKBVKIjngUpA7MfnlxPrDul2\\_mlBy01qk/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1117-1oqVXZEKBVKIjngUpA7MfnlxPrDul2_mlBy01qk/edit?usp=sharing)
- Análisis de potencia del láser para canales de 10 Gbps.  
<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Gpuu2cwxRzqb1uwQrbPaXXB19p1TaUiJq-3ELCM8V6Y/edit?usp=sharing>
- Análisis de parámetros OPM e ISD para el caso de estudio número 1.  
[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1\\_q9Q0FH75oXQ75eGiY3HXF4m7R--s7x6s4JkVQBydzw/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1_q9Q0FH75oXQ75eGiY3HXF4m7R--s7x6s4JkVQBydzw/edit?usp=sharing)
- Análisis de parámetros OPM e ISD para el caso de estudio número 2.  
[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1WfASsRS\\_Hgb5NY-1BJxSnTaSE0Art3caq106srqJ7SM/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1WfASsRS_Hgb5NY-1BJxSnTaSE0Art3caq106srqJ7SM/edit?usp=sharing)
- Análisis de parámetros OPM e ISD para el caso de estudio número 3.  
<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1A2TgHA0fmgqVPC0Ch2snVW0SEo30ySnt2tYvNJfX5IM/edit?usp=sharing>
- Análisis de parámetros OPM e ISD para el caso de estudio adicional.  
[https://docs.google.com/spreadsheets/d/11dUj-Fte4yL6L4wCtIKi6D\\_EMyiiX7SF0RqRdf08iSk/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/11dUj-Fte4yL6L4wCtIKi6D_EMyiiX7SF0RqRdf08iSk/edit?usp=sharing)
- Representaciones gráficas de todos los casos de estudio.  
[https://drive.google.com/file/d/1GFWHRjvqN5FN\\_ezIESwWZAEFQ3rDje-i/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1GFWHRjvqN5FN_ezIESwWZAEFQ3rDje-i/view?usp=sharing)
- Diagrama WBS asociado al desarrollo del proyecto.  
[https://drive.google.com/file/d/1IW4uV0M8zXRaKTiyYijr0CCSwzJz0PL8/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1IW4uV0M8zXRaKTiyYijr0CCSwzJz0PL8/view?usp=drive_link)