

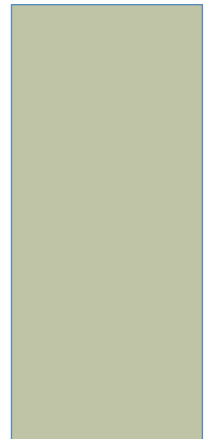


Universitat Oberta
de Catalunya

*Máster Universitario en
Ingeniería de Telecomunicación*

TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN EN EL ESPACIO (SDM): ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN

ALUMNA: ESTER SERRANO JIMÉNEZ
TUTORA: LAIA NADAL REIXATS
ÁREA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN:

- **Introducción**
- **Objetivos**

ESTADO DEL ARTE:

- **Fibra óptica**
- **Modos de propagación**
- **Tipos de multiplexación**
- **Tipos de fibra óptica que implementan SDM**
- **Dispersión y efectos no lineales de la fibra**
- **SSPROP**
- **SSPROPV**

EJECUCIÓN DEL PROYECTO:

- **Propagación de un pulso gaussiano por una SMF**
- **Propagación por una FMF de 2 modos**
- **Propagación por una FMF de 3 modos**
- **Conclusiones**

INTRODUCCIÓN

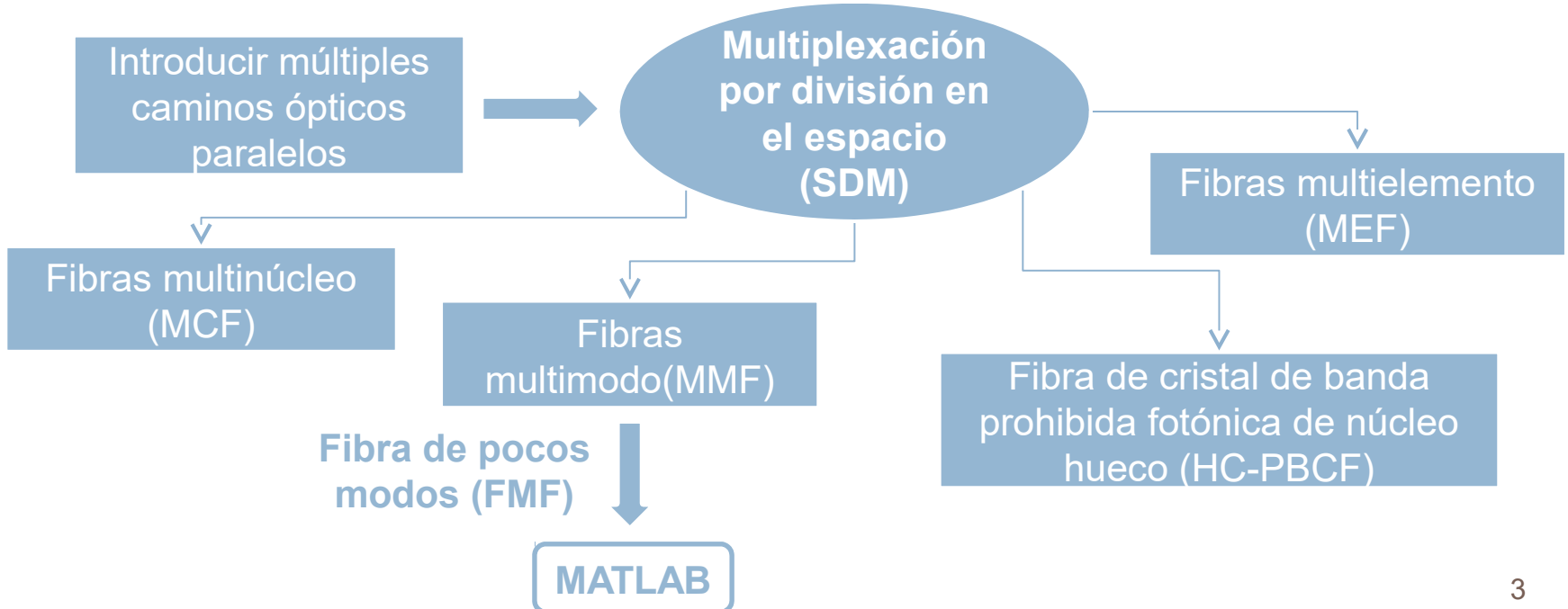
- La capacidad de la fibra óptica:

Límite teórico impuesto sobre las fibras monomodo (SMF)



Fórmula de Shannon combinada con efectos no-lineales

- ¿Qué hacer para aumentar la capacidad?

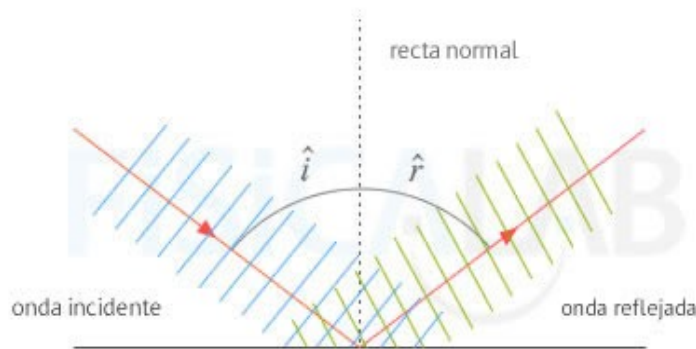


OBJETIVOS

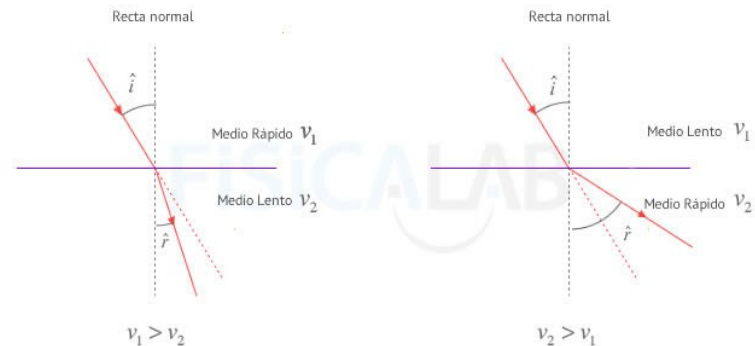
- 1. Investigar diferentes tipos de fibras que usan SDM.**
- 2. Comprender el módulo con la rutina SSPROP de Matlab.**
- 3. Diseño e implementación de uno de estos tipos de fibra en Matlab.**
- 4. Efectuar diferentes simulaciones para entender el comportamiento de la fibra.**
- 5. Analizar los resultados.**

FIBRA ÓPTICA

- ¿Qué es la fibra óptica?
- La transmisión se produce gracias a los fenómenos físicos de **reflexión** y **refracción**.



$$\hat{i} = \hat{r}$$



Ley de Snell:
$$\frac{\sin(\hat{i})}{\sin(\hat{r})} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

MODOS DE PROPAGACIÓN

Los modos se clasifican en:

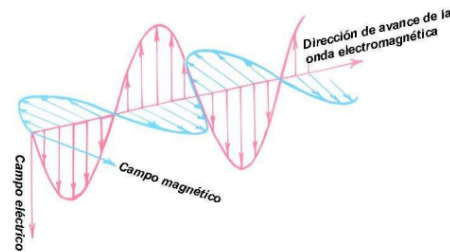
- **Modo TE** (Transversal eléctrico): $\vec{E} = 0$
- **Modo TM** (Transversal magnético): $\vec{B} = 0$
- **Modo TEM** (Transversal electromagnético): $\vec{E} = 0$ y $\vec{B} = 0$
- **Modo HE o EH** (Híbrido): $\vec{E} \neq 0$ y $\vec{B} \neq 0$

Ecuaciones de Maxwell

$$\nabla^2 E = n^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$E = E(r)e^{j(\omega t - \beta \cdot z)}$

Campo transversal estacionario Propagación



Condición $n_2 \ll 1$

Aproximación de modos débilmente guiados o weakly-guided modes (WGM)

Modos LP (ordenados por frecuencia de corte)	Modos exactos y número	Nº de modos total en el modo LP
LP ₀₁	HE ₁₁ × 2	2
LP ₁₁	TE ₀₁ , TM ₀₁ , HE ₂₁ × 2	4
LP ₂₁	EH ₁₁ × 2, HE ₃₁ × 2	4
LP ₀₂	HE ₁₂ × 2	2
LP ₃₁	EH ₂₁ × 2, HE ₄₁ × 2	4
LP ₁₂	TE ₀₂ , TM ₀₂ , HE ₂₂ × 2	4
LP ₄₁	EH ₃₁ × 2, HE ₅₁ × 2	4
LP ₂₂	EH ₁₂ × 2, HE ₃₂ × 2	4
LP ₀₃	HE ₁₃ × 2	2
LP ₅₁	EH ₄₁ × 2, HE ₆₁ × 2	4
LP _{1m}	TE _{0m} , TM _{0m} , HE _{2m} × 2	4
LP _{lm} (l ≠ 0 ó 1)	EH _{l-1,m} × 2, HE _{l+1,m} × 2	4

TIPOS DE MULTIPLEXACIÓN

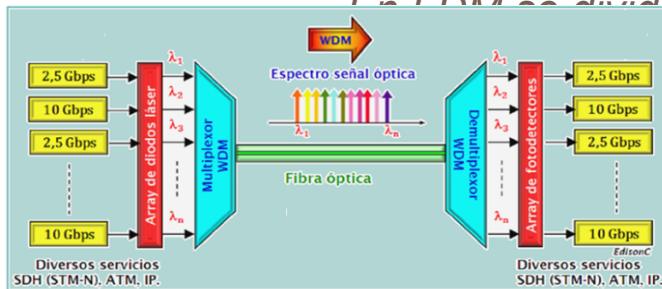
- **¿Qué es la multiplexación??**

- Técnica de combinar varias señales y transmitirlos por un solo medio de transmisión.
- Se comparte capacidad de transmisión en un mismo enlace. Eficiencia ↑
Se comparte capacidad de transmisión en un mismo enlace. Eficiencia ↑↑
- Los datos ópticos pueden transportarse empleando diferentes dimensiones físicas: tiempo, frecuencia, espacio, polaridad, etc.



TIPOS DE MULTIPLEXACIÓN

- Multiplexación por división en frecuencia (FDM) y longitud de onda (WDM)

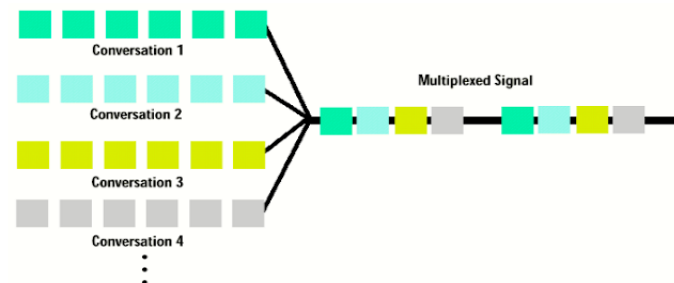


En FDM se divide el ancho de banda total en canales de frecuencia.

FDM → portadora de radiofrecuencia
WDM → portadora óptica

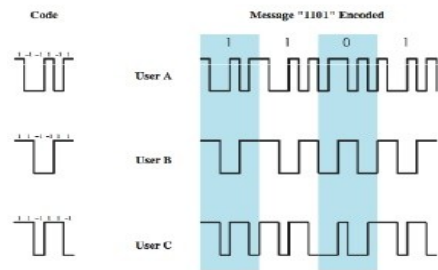
- Multiplexación por división en tiempo (TDM)

El ancho de banda total del medio de transmisión es asignado a cada canal durante una fracción del tiempo total (intervalo de tiempo).



TIPOS DE MULTIPLEXACIÓN

- Multiplexación por división de código (CDM)

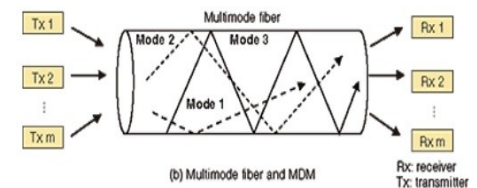
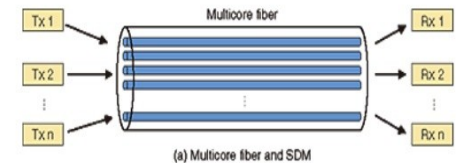


transmite sus bits como una secuencia modificada de forma única para ese canal.

- Multiplexación por división en el espacio (SDM)

- Se establecen múltiples rutas paralelas de datos dentro de una misma fibra.

- Principal desafío técnico: **cross-talk**

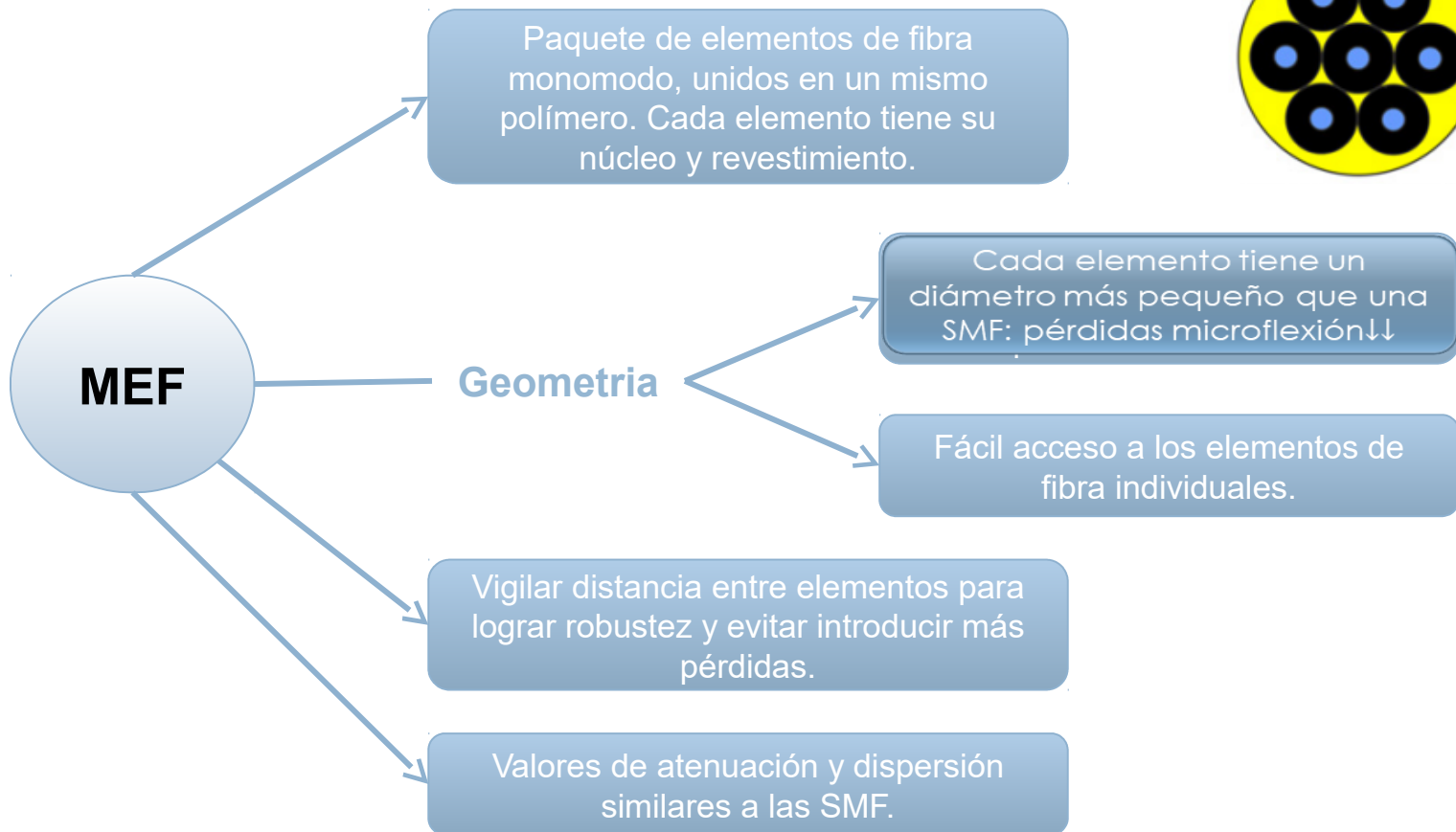
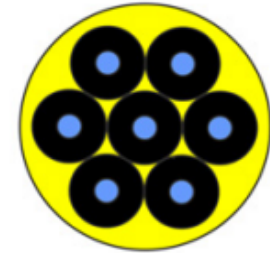


Fibras multinúcleo

Fibras multimodo

TIPOS DE FIBRA ÓPTICA QUE IMPLEMENTAN SDM

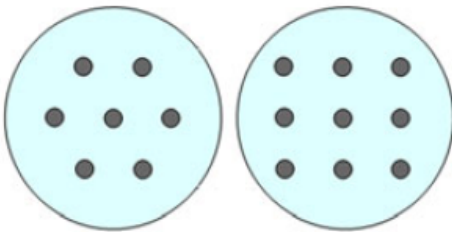
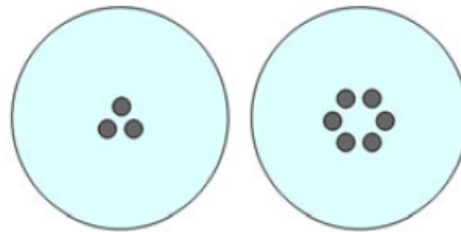
- Fibra multielemento (*multi element fiber, MEF*)



TIPOS DE FIBRA ÓPTICA QUE IMPLEMENTAN SDM

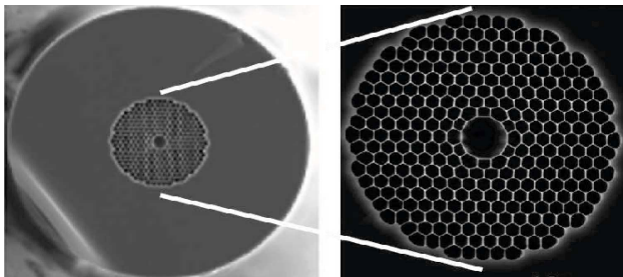
- Fibra multinúcleo (*multi core fiber, MCF*)

Consiste en incorporar múltiples núcleos dentro de una misma fibra.

	Weakly-coupled MCF	Strongly-coupled MCF
Examples of schematic cross-sectional view		
Coupling coefficient κ [m^{-1}]	$\kappa < 0.01$	$\kappa > 0.1$
Typical core-to-core distance Λ [μm]	$\Lambda > 30$	$\Lambda < 30$
MIMO for inter-core crosstalk	No need	Need

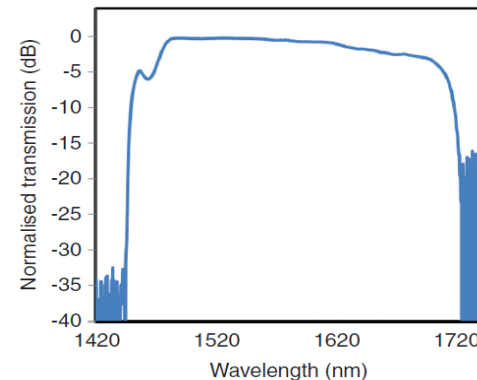
TIPOS DE FIBRA ÓPTICA QUE IMPLEMENTAN SDM

- Fibra de cristal de banda prohibida fotónica de núcleo hueco (*hollow core photonic bandgap crystal fibers, HC-PBCF*)



Utilizan una estructura altamente periódica de agujeros de aire en el revestimiento de la fibra para crear una banda prohibida fotónica.

La fibra solo guía la luz en una región espectral limitada. Alrededor de los 1550 nm, el ancho de banda es de 200 nm y, fuera de esta región, el núcleo de fibra es anti-guía.



TIPOS DE FIBRA ÓPTICA QUE IMPLEMENTAN SDM

- Fibra de pocos modos (*few mode fiber*, FMF)



DISPERSIÓN Y EFECTOS NO LINEALES DE LA FIBRA

- **Dispersión de velocidad de grupo (*group velocity dispersion, GVD*):**

$$D_\lambda = \frac{\partial}{\partial \lambda} \frac{1}{v_g} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \beta_2$$

- **Dispersión de orden superior:**

$$\beta_3 = \left(\frac{\lambda^2}{2\pi c}\right)^2 \cdot S - \frac{\lambda^2}{\pi c} \cdot \beta_2$$

- **Pérdidas:** $\alpha = -\frac{10}{z[\text{km}]} \log \left(\frac{P(z)}{P(0)}\right)$

- **Modulación autofásica (*self-phase modulation, SPM*):**

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad A_{eff} = \pi \left(\frac{MDF}{2}\right)^2$$

- **Pérdidas dependientes de la polarización**

- **Birrefringencia:**

$$\Delta\beta = |\beta_x - \beta_y| = \frac{2\pi}{\lambda} |n_x - n_y| = \frac{w}{c} \Delta n$$

SSPROP

SSPROP

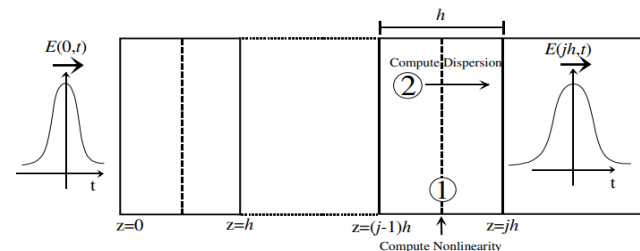
Desarrollada en la Universidad de Maryland

Ecuación no lineal
de Schrödinger

$$\frac{\partial A(t, z)}{\partial z} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(t, z)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A(t, z)}{\partial t^3} - \frac{\alpha}{2} A(t, z) + i\gamma \left[|A(t, z)|^2 A(t, z) + \frac{i}{w_0} \frac{\partial(|A|^2 A)}{\partial t} - T_R \frac{\partial(|A|^2)}{\partial t} A \right]$$

Split Step Fourier
Method

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\widehat{D} + \widehat{N})A$$



SSPROP V

SSPROP V

Desarrollada en la Universidad de Maryland

Versión vectorial
de SSPROP

Propagación fibra
birrefringente

Permite especificar:

Dispersión $\beta(\omega)$

Pérdidas (α)

Estados de
polarización

Ejes:

Direcciones x e y

Dirección arbitraria ψ

Polarización :

Lineal

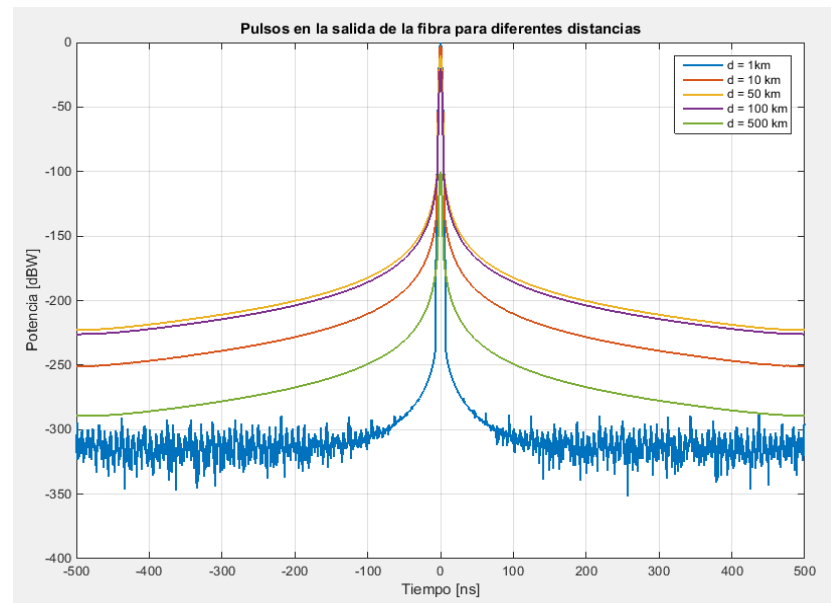
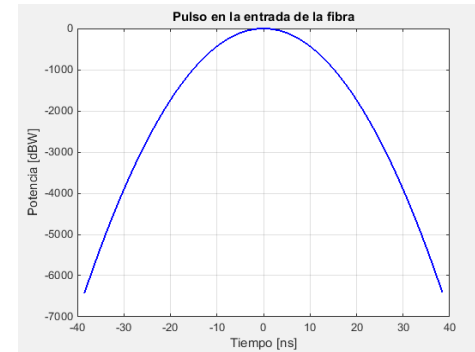
Circular

Elíptica

PROPAGACIÓN DE UN PULSO GAUSSIANO POR UNA SMF

	SMF	
Longitud de onda	1550 nm	
Dispersión	18 ps/(nm·km)	
Slope	0.092 ps/(nm ² ·km)	
Atenuación	0.02 dB/km	
Mode Field Diameter	Longitud de onda	1550 nm
	Dispersión	18 ps/(nm·km)
	Slope	0.092 ps/(nm ² ·km)
	Atenuación	0.02 dB/km
	Mode Field Diameter	10.4 μm

Tabla 1. Características de la fibra extraídas del *datasheet* SMF-28e+ de Corning.

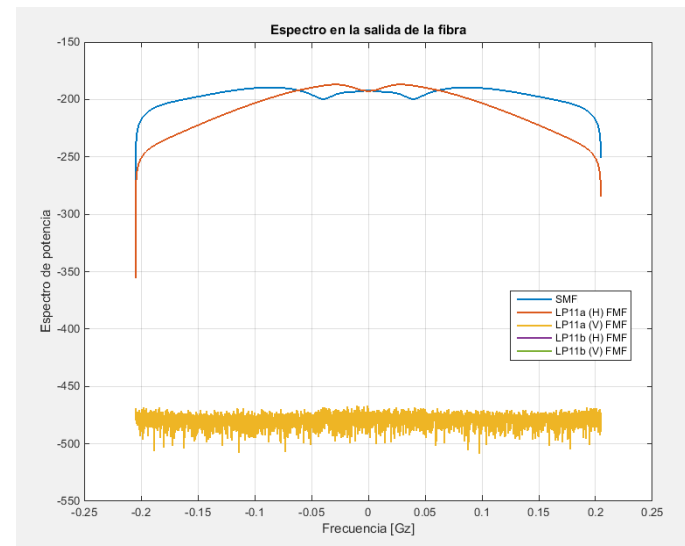
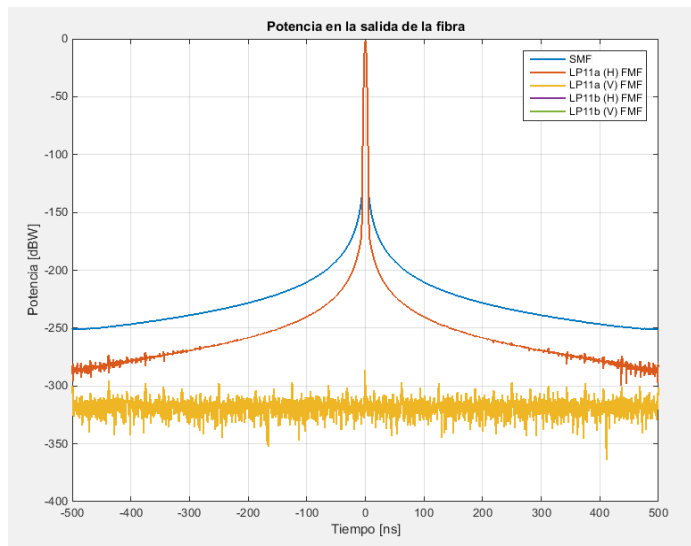


PROPAGACIÓN POR UNA FMF DE 2 MODOS

- **Modos LP11a y LP11b:**
 - Se propaga por un modo.

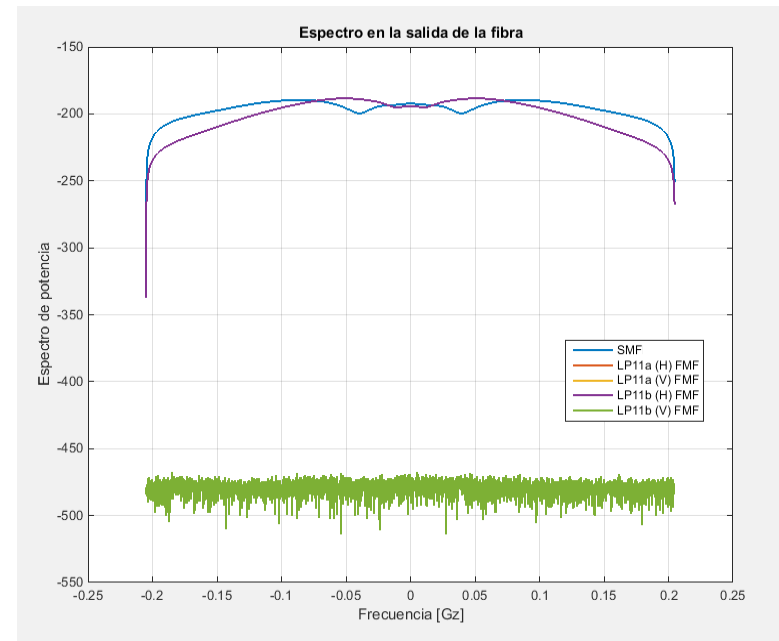
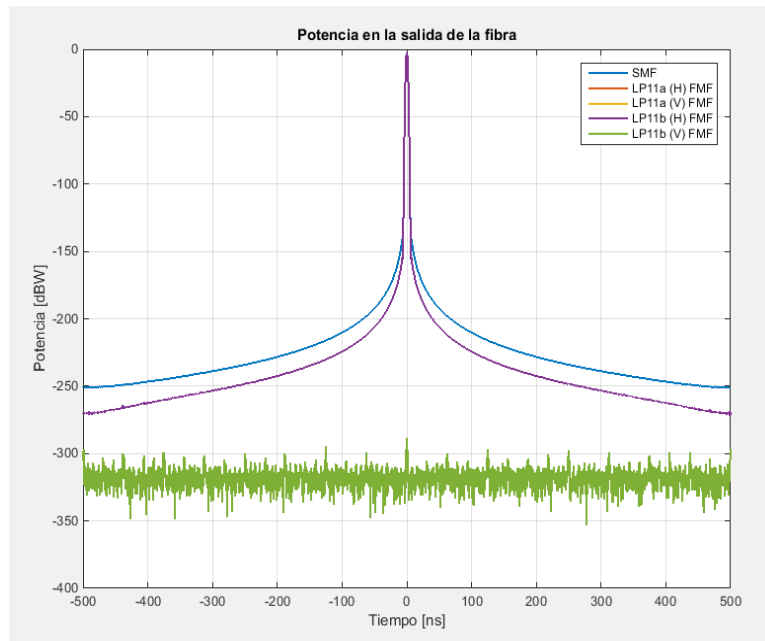
	Modo LP11
Longitud de onda	1550 nm
Dispersión	20 ps/(nm·km)
Slope	0.064 ps/(nm ² ·km)
Atenuación	0.2 dB/km
Mode Field Diameter	1.52 μm
f_{pppp}	1.0573
f_{mmp}	0.35

Tabla 2. Características de la fibra extraídas del *datasheet* 60817-FourModeStep-IndexFiber de A Furukawa Company.



PROPAGACIÓN POR UNA FMF DE 2 MODOS

- **Modos LP11a y LP11b:**
 - Se propaga por ambos modos.

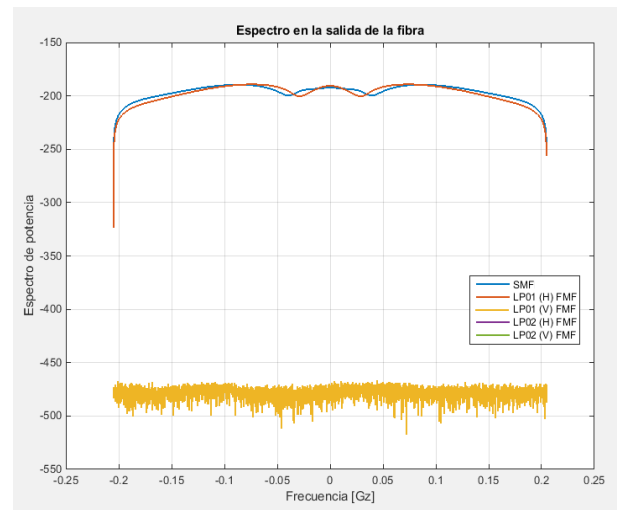
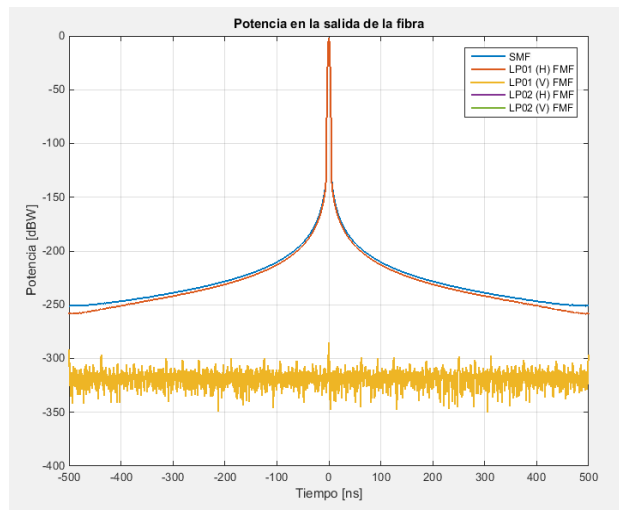


PROPAGACIÓN POR UNA FMF DE 2 MODOS

- **Modos LP01 y LP02:**
 - Se propaga por un modo (LP01).

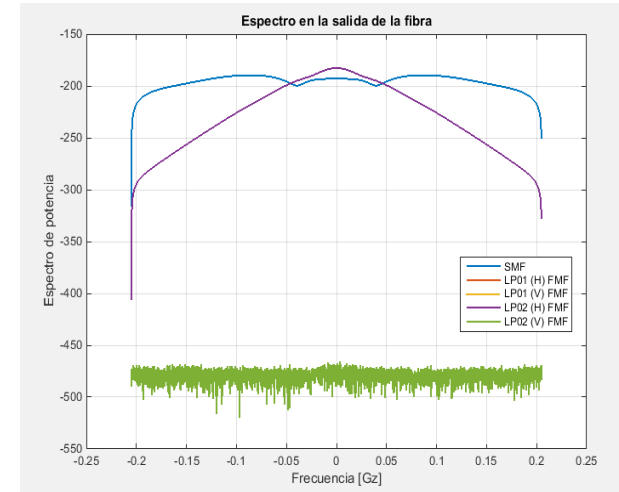
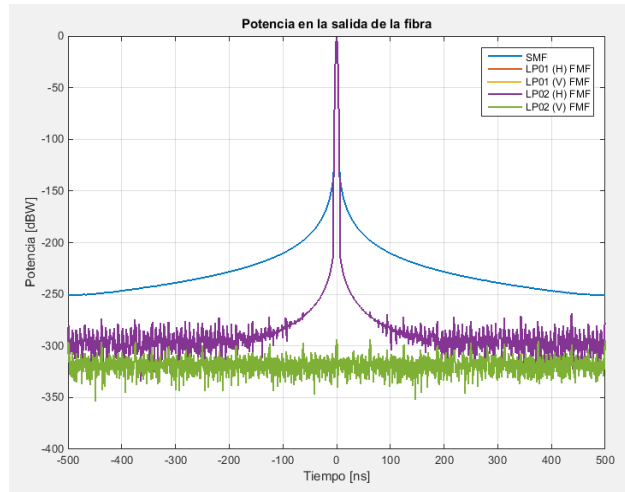
	Modo LP01	Modo LP02
Longitud de onda	1550 nm	1550 nm
Dispersión	21.1 ps/(nm·km)	17.5 ps/(nm·km)
Slope	0.066 ps/(nm ² ·km)	0.043 ps/(nm ² ·km)
Atenuación	0.02 dB/km	0.2 dB/km
Mode Field Diameter		
f_{pppp}	1	0.9742
f_{mmp}	0.1	0.1

Tabla 3. Características de la fibra extraídas del *datasheet* 60817-FourModeStep-IndexFiber de A Furukawa Company.

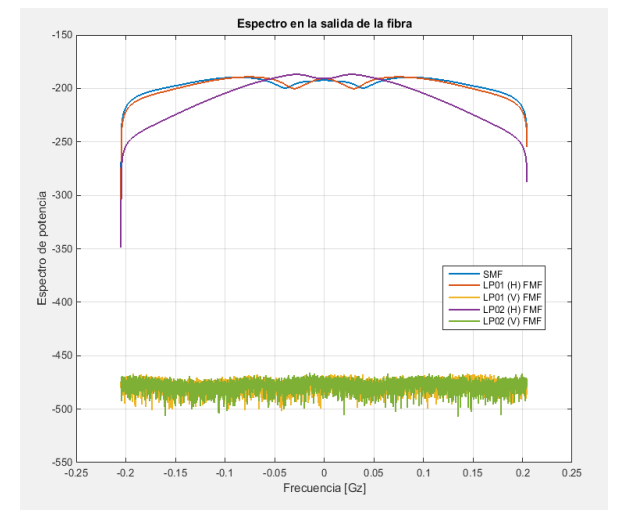
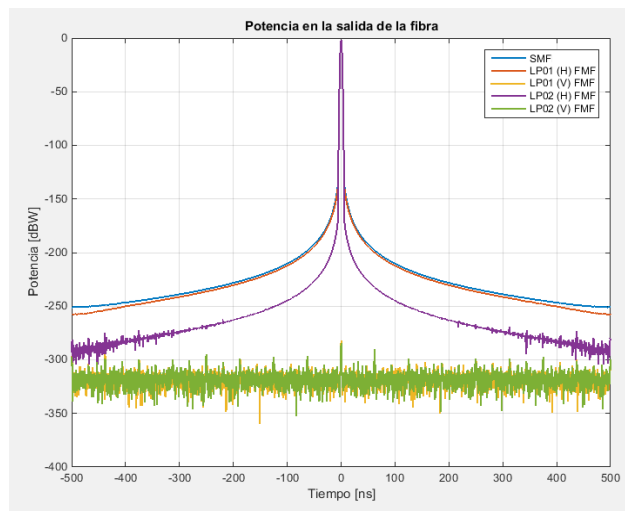


PROPAGACIÓN POR UNA FMF DE 2 MODOS

- **Modos LP01 y LP02:** Se propaga por un modo (LP02).



- **Modos LP01 y LP02:** Se propaga por ambos modos.



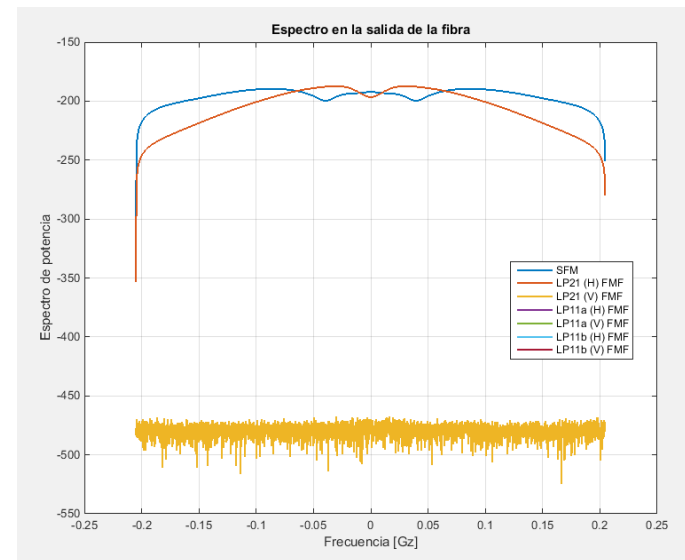
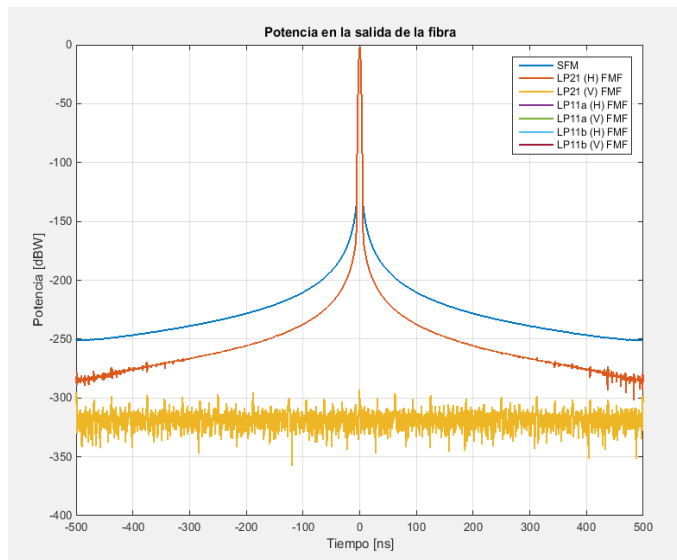
PROPAGACIÓN POR UNA FMF DE 3 MODOS

- Modos LP11a, LP11b y LP21:

Se propaga por un modo.

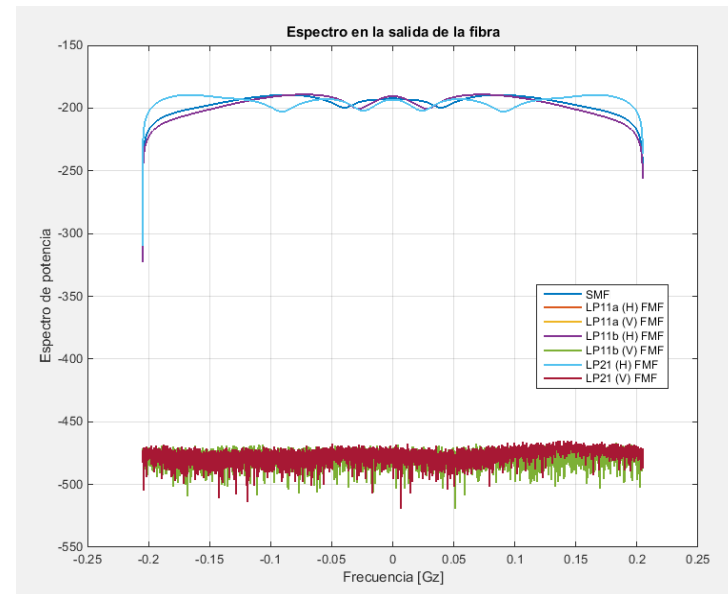
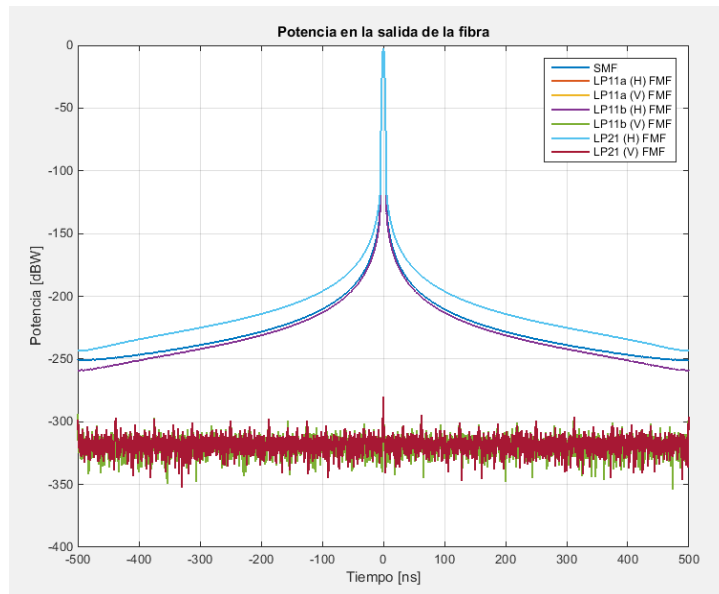
	Modo LP21
Longitud de onda	1550 nm
Dispersión	21.4 ps/(nm·km)
Slope	0.056 ps/(nm ² ·km)
Atenuación	0.2 dB/km
Mode Field Diameter	
f_{pppp}	0.9410
f_{mmp}	0.92

Tabla 4. Características de la fibra extraídas del *datasheet* 60817-FourModeStep-IndexFiber de A Furukawa Company.



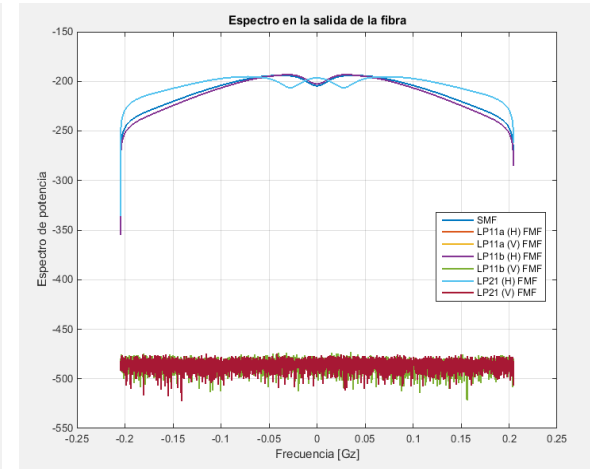
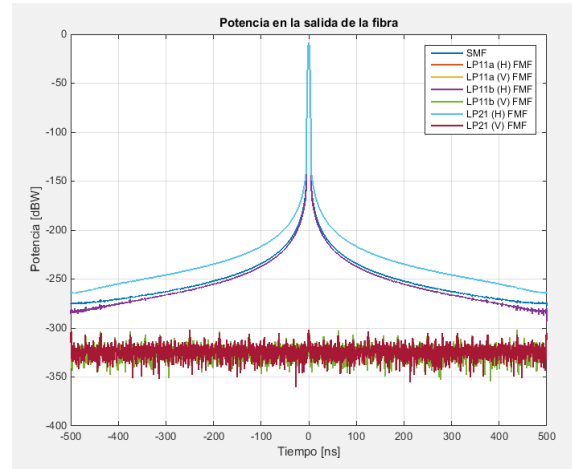
PROPAGACIÓN POR UNA FMF DE 3 MODOS

- **Modos LP11a, LP11b y LP21:**
Se propaga por los tres modos con **atenuación 0.2 dB/km.**

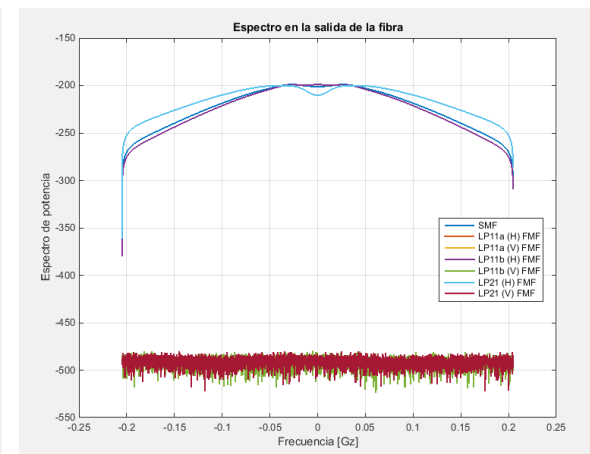
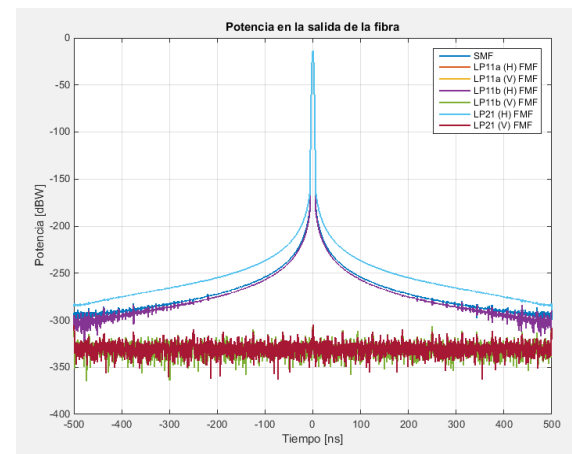


PROPAGACIÓN POR UNA FMF DE 3 MODOS

- **Modos LP11a, LP11b y LP21:**
Se propaga por los tres modos con **atenuación 0.8 dB/km.**



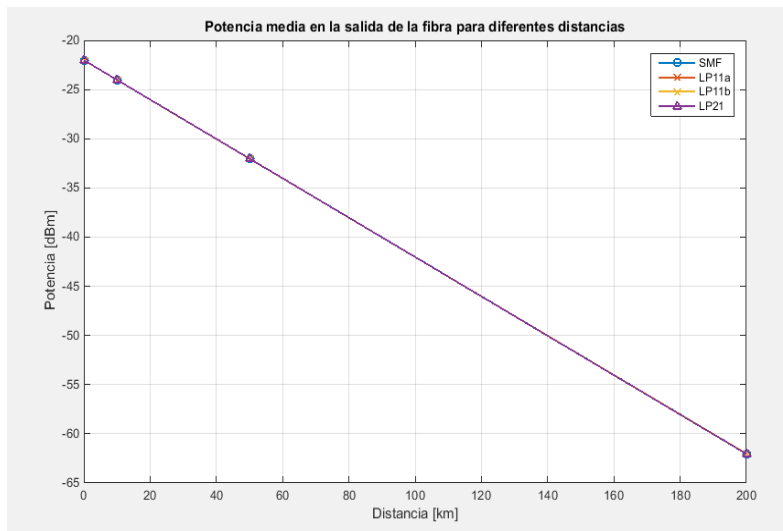
- **Modos LP11a, LP11b y LP21:**
Se propaga por los tres modos con **atenuación 1.4 dB/km.**



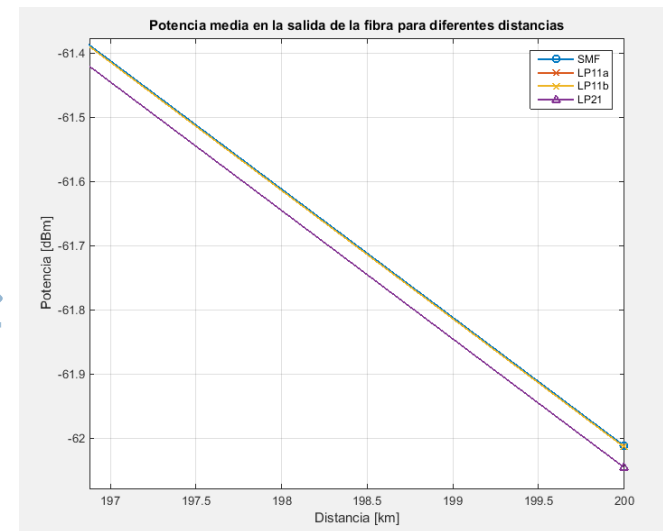
PROPAGACIÓN POR UNA FMF DE 3 MODOS

- **Modos LP11a, LP11b y LP21:**

Análisis de la potencia de salida para **diferentes distancias** de fibra.

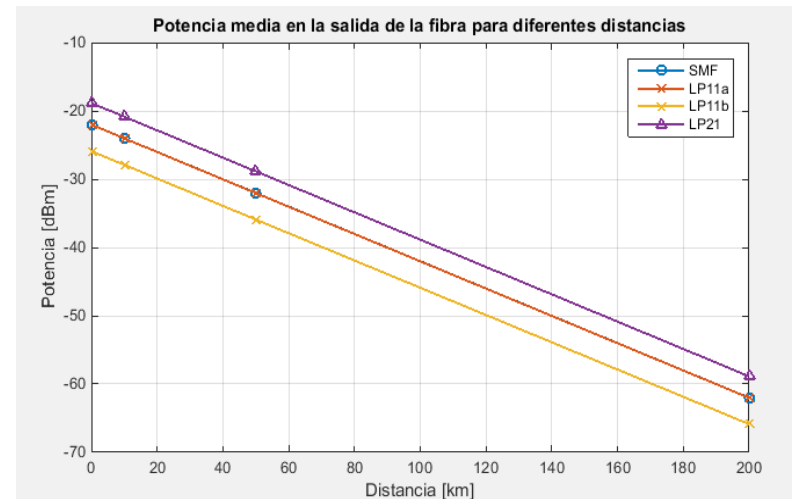
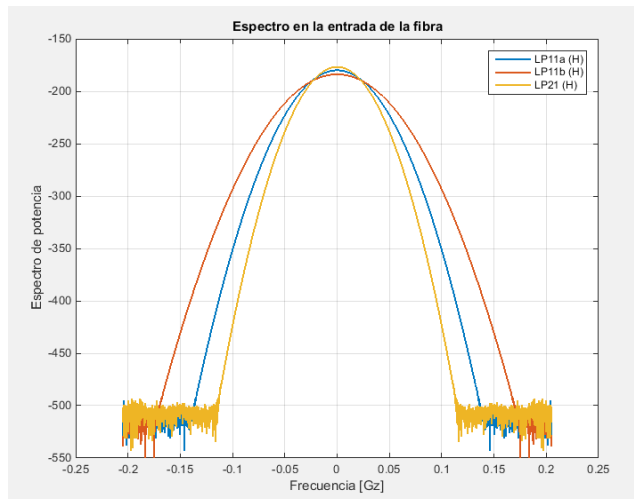
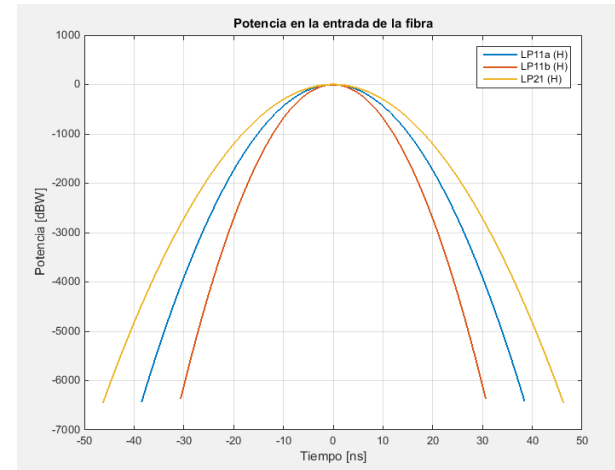


ZOOM



PROPAGACIÓN POR UNA FMF DE 3 MODOS

- **Modos LP11a, LP11b y LP21:**
Análisis de la potencia de salida para diferentes distancias de fibra con diferentes pulsos.



CONCLUSIONES

- Se consigue **aumentar la capacidad** de transmisión con las **fibras de pocos modos (FMF)**.
- Se puede **transmitir por dos y tres modos** logrando **aumentar la capacidad** sin sobrepasar el límite establecido por Shannon.
- Transmitir **pulsos más estrechos en frecuencia** presenta **mejores resultados en el nivel de potencia** de salida para diferentes distancias.
- Como **líneas futuras** plantearía:
 - Analizar la BER del sistema.
 - Aumentar el número de modos.
 - Añadir nuevos modos LP y examinar su comportamiento comparándolos con la SMF.

The end.

Muchas gracias!

Técnicas de multiplexación por división en el espacio (SDM): estudio e implementación

Alumna: Ester Serrano Jiménez



Universitat Oberta
de Catalunya

*Máster Universitario en
Ingeniería de Telecomunicación*