

# Sistemas de alimentación remota con fibras ópticas en sistemas de comunicaciones y sensado

Juan Dayron López Cardona

Tesis depositada en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de Doctor en

Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática

Universidad Carlos III de Madrid

Directora:

Carmen Vázquez García

Tutora:

Carmen Vázquez García

Marzo 2022

Esta tesis se distribuye bajo licencia “Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



*Dedicada a mi abuela Hortensia con todo el cariño del mundo.*



# Agradecimientos

El desarrollo y los resultados obtenidos en este trabajo han sido gracias al apoyo de un grupo de colegas, amigos, y familiares que en todo momento colaboraron para hacer posible la culminación de varios años de intenso trabajo, dedicación y esfuerzo.

En primer lugar, me gustaría expresar mi profunda gratitud a mi tutora y directora de tesis profesora Carmen Vázquez por su paciencia y comprensión. Estaré eternamente agradecido por confiar en mí, para llevar a cabo esta tarea. Me gustaría además reconocer el apoyo constante y la ayuda desinteresada de los profesores David Sánchez y Pedro Contreras. Roger y Arantzazu, gracias por cada consejo y en momentos de mucha presión fueron la única válvula de escape.

Fahad (فهد) y Agustín, tengo mucho que agradecerles; fueron mis “compis” de batalla. Gracias a ambos por hacerme el camino más leve.

A Jaime y a Robinson mil gracias por las tantas veces que sin vacilar me brindaron su ayuda. Muchas gracias a ambos.

Por otro lado, agradezco a todos los miembros del Departamento de Tecnología Electrónica, en especial a los técnicos de laboratorio por el soporte durante estos años, en especial a Jesús. Agradecimientos a mis colegas de laboratorio Rubén, Xabi, y Alicia.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia: Miguel, Juan, Noralis, por brindarme apoyo, comprensión y amor incondicional durante todo este largo camino. Por Uds. vivo y a Uds. también les dedico este trabajo.

*“No hay deber más urgente que el de saber  
ser agradecido”*

***James Allen (1864-1912)***

# Publicaciones

Los resultados de esta investigación se han divulgado a través de las siguientes publicaciones. En cada uno de los casos se muestra el nivel de impacto de la revista de acuerdo con el año de la publicación.

## Artículos en Revistas Internacionales

1. **J. López-Cardona** et al., “Power-over-Fiber in a 10 km-long Multicore Fiber Link within 5G Fronthaul Scenario,” *Opt. Lett.*, vol. 46, no. 21, pp. 5348–5351, Oct. 2021, doi: 10.1364/OL.439105.  
**Q1: 22/99 in Optics.**  
Documento incluido totalmente en el **capítulo 6**. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.
2. **J. D. López-Cardona**, R. Altuna, D. Sánchez Montero, and C. Vázquez, “Power over Fiber in C-RAN with Low Power Sleep Mode Remote Nodes using SMF,” *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 15, pp. 4951–4957, Aug. 1, 2021, doi: 10.1109/jlt.2021.3080631.  
**Q1: 57/273 in Engineering, Electrical & Electronic.**  
Documento incluido totalmente en el **capítulo 6**. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.
3. **J. D. López-Cardona**, P. C. Lallana, R. Altuna, A. Fresno, X. Barreiro, and C. Vázquez, “Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with Sleep Modes,” *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 24, pp. 7948–7955, Dec. 15, 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3078848.  
**Q1: 57/273 in Engineering, Electrical & Electronic**, (2 citas, Scopus).  
Documento incluido totalmente en el **capítulo 4**. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.
4. F. M. A. Al-Zubaidi, **J. D. López-Cardona**, D. Sánchez Montero, and C. Vázquez, “Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT,” *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 13, pp. 4262–4269, Jul. 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3074193.  
**Q1: 57/273 in Engineering, Electrical & Electronic**, (5 citas, Scopus).  
Documento incluido parcialmente en los **capítulos 3 y 5**. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.

5. **J. D. López-Cardona**, D. Sánchez Montero, and C. Vázquez, “Smart remote nodes fed by power over fiber in internet of things applications,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 17, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2915613.  
**Q2: 18/64 in Instruments & Instrumentation** (13 citas, Scopus).  
Documento incluido totalmente en el **capítulo 3**. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.
6. **J. D. López-Cardona**, C. Vázquez, D. S. Montero, and P. C. Lallana, “Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments,” *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 3, pp. 748–754, Feb. 2018, doi: 10.1109/JLT.2017.2776399.  
**Q1: 51/266 in Engineering, Electrical & Electronic**, (29 citas, Scopus).  
Documento incluido totalmente en el **capítulo 3**. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.
7. C. Vázquez, **J. D. López-Cardona** *et al.*, “Multicore Fiber Scenarios Supporting Power over Fiber in Radio over Fiber Systems,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2950599.  
**Q1: 51/266 in Engineering, Electrical & Electronic**, (12 citas, Scopus).  
Documento incluido parcialmente en los **capítulos 2, 3, 5 y 6**. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.
8. C. Vázquez, S. Prieto, **J. D. López-Cardona** *et al.*, “Fiber-Optic Pyrometer with Optically Powered Switch for Temperature Measurements,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 483, Feb. 2018, doi: 10.3390/s18020483.  
**Q1: 15/61 in Instruments & Instrumentation**, (14 citas, Scopus).  
Documento incluido parcialmente en el **capítulo 3**. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.

# Otros méritos de Investigación

## Contribuciones en Conferencias Internacionales

1. F.M. Al-Zubaidi, **J.D. López-Cardona**, D.S. Montero, C. Vázquez, “Power-over-Fiber impact on 5G NR transmission in standard singlemode fibers”, in *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP21)*, 17-19 Nov 2021, Virtual Conference from Rome (Italy).
2. D. S. Montero, **J. D. López-Cardona**, F. M. A. Al-Zubaidi, I. Pérez, P. C. Lallana, and C. Vázquez, “The role of power-over-fiber in C-RAN fronthauling towards 5G,” in *22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 19-23 July 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON51198.2020.9203531. (Invitada). (Bari, Italy)
3. C. Vázquez, **J. D. López-Cardona**, D. S. Montero, I. Pérez, P. C. Lallana, and F. M. A. Al-Zubaidi, “Power over fiber in radio over fiber systems in 5G scenarios,” in *21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 9-13 July 2019, doi: 10.1109/ICTON.2019.8840168. (Angers, France) (Invitada).
4. C. Vázquez, D. S. Montero, F. M. A. Al-Zubaidi, and **J. D. López-Cardona**, “Experiments on Shared-and Dedicated-Power over Fiber Scenarios in Multi-core Fibers,” in *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 18-21 June 2019, pp. 412-415, doi: 10.1109/EuCNC.2019.8802042. (Valencia, Spain).
5. G. Otero, **J. D. López-Cardona**, et al., “SDN-Based Multi-Core Power-Over-Fiber (PoF) System for 5G Fronthaul: Towards PoF Pooling,” in *European Conference on Optical Communication, ECOC*, Nov. 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ECOC.2018.8535543.  
Documento incluido parcialmente en el **capítulo 6**. El material de esta fuente incluido en la tesis no está señalado por medios tipográficos ni referencias.
6. **J. D. López-Cardona**, G. M. Peroglio, and C. Vázquez, “Optical power delivery for feeding remote sensors in health and safety applications,” in *26th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Sep. 2018, paper ThE42, doi: 10.1364/ofs.2018.the42,(Lausanne, Switzerland).
7. C. Vázquez, D. S. Montero, P. J. Pinzón, **J. D. López-Cardona**, P. Contreras, and A. Tapetado, “Integration of power over fiber on RoF systems in different scenarios,” in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2017, pp. 1–4, doi: 10.1117/12.2254805. (San Francisco, United States). (Invitada).
8. C. Vázquez, D. S. Montero, **J. D. López-Cardona** et al., “Monitoring systems and remote powering for next generation broadband Access Networks,” in *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2-6 July 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICTON.2017.8024920. (Invitada). (Girona, Spain).



9. **J. D. López-Cardona**, C. Vázquez, D. S. Montero, P. J. Pinzón, A. Tapetado, and P. C. Lallana, “Remote optical powering using fiber optics in micro-mechatronic systems,” in *8th Conference on Smart Structures and Materials and 6th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*, 2-6 July 2017, pp. 1598–1608. (Madrid, Spain).
10. C. Vázquez, A. Tapetado, P. J. Pinzón, D. S. Montero, **J. D. López-Cardona** *et al.*, “Temperature sensing using optical fibers in harsh environments,” in *19th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2-6 July 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2017.8025054. (Girona, Spain). (Invitada).

## Contribuciones en Conferencias Nacionales

1. **J. D. López-Cardona** *et al.*, “Optimized Power-over-Fiber System to Remotely Feed Smart Nodes for Low-Power Consumption Applications,” in *Proceedings of the 2021 13th Spanish Conference on Electron Devices, CDE 2021*, Jun. 2021, pp. 41–44, doi: 10.1109/CDE52135.2021.9455753. (**Best paper award**). (Oral).
2. F. M. A. Al-Zubaidi, **J.D. López-Cardona**, Rubén A. Pérez, Álvaro R. Barba, David S. Montero, C. Vázquez, “5G New Radio Transmission over Standard Fibers using Analog Radio over Fiber for Next Generation Access Networks” in *XII reunión de Optoelectrónica (OPTOEL)*, 2021. Online. España (Póster).
3. **J. D. López-Cardona**, A. Tapetado, and D. Sanchez Montero, “Optically powered Mach-Zehnder intensity modulator for Radio-Over-Fiber applications,” in *X Reunión Española de Optoelectrónica, (OPTOEL)*, 2017, pp. 152–153. (Póster).

## Patentes

1. C. Vázquez, **J. D. López-Cardona**, D.S. Montero, D. Barrera, J. Madrigal, S. Sales, “Sistema y método de monitorización de potencia y temperatura en redes de fibra óptica”. *Applicants*: UC3M-UPV. N° ES2760798-B2 (patente de invención con examen), *Priority date*: Dic. 2019. *PCT extension requested*.

## Participación en proyectos de Investigación

1. Comunidad de Madrid “Sensores e Instrumentación en Tecnologías Fotónicas 2 (SINFOTON2-CM)”, *grant no. S2018/NMT-4326, coordinated project with UC3M- UPM-UAH-URJC-CSIC*.
2. 5GPPP-H2020 European Union programme Bluespace project “Building the Use of Spatial Multiplexing 5G Networks Infrastructures and Showcasing Advanced Technologies and Networking Capabilities” *grant no.762055*.
3. Agencia Estatal de Investigación, “Tecnologías avanzadas inteligentes basadas en fibras ópticas/Advanced SMART technologies based on Optical Fibers (SMART-OF)”, *grant no. RTI2018-094669-B-C32, within the coordinated project “Polymer Optical Fiber Disruptive Technologies (POFTECH)”*.
4. Comunidad de Madrid “Sensores e Instrumentación en Tecnologías Fotónicas (SINFOTON-CM)”, *grant no. S2013/MIT-2790, coordinated project with UC3M- UPM-UAH- URJC-CSIC*.

## Otras publicaciones

1. Á. Robledo, I. Sánchez, **J.D. López-Cardona**, M.A. Losada, J. Zubia and C. Vázquez, “Simple heart rate monitoring using speckle in POF” in *28th International Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF)*, 2019.
2. Á. Robledo, I. Sánchez, **J. D. López-Cardona**, and C. Vázquez, “Wearable POF-based heart-rate monitor,” in *7th European Workshop Optical Fiber Sensors (EWOFs)*, 2019, vol. 11199, doi: 10.1117/12.2541302.

# Índice

<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación.....	2
1.2 Objetivos.....	6
1.3 Contenido de la investigación.....	7
1.4 Agradecimientos.....	9
1.5 Referencias.....	10
<b>Capítulo 2: Transmisión de energía basada en fibra óptica.....</b>	<b>11</b>
2.1 Introducción.....	12
2.2 Alimentación con luz (PoF, <i>Power over Fiber</i> ).....	14
2.3 Fuente de energía óptica.....	15
2.3.1 Parámetros electroópticos de un láser de semiconductor.....	18
2.3.2 Láser Raman.....	25
2.4 Características de transmisión de una fibra óptica.....	31
2.4.1 Principales parámetros de la fibra óptica en sistemas PoF.....	33
2.5 Conversión de la energía óptica a eléctrica.....	37
2.5.1 Longitud de onda y eficiencias.....	37
2.5.2 Modelo eléctrico de la celda.....	41
2.6 Configuraciones de los sistemas PoF.....	42
2.6.1 Configuraciones de la fuente de energía óptica.....	43
2.6.2 Configuraciones del medio de transmisión.....	43
2.6.3 Configuraciones del convertor de energía.....	44
2.7 Consideraciones y aspectos críticos.....	45
2.7.1 <i>Fiber Fuse</i> .....	45
2.7.2 Potencia máxima de operación de los dispositivos.....	47

2.7.3 Impacto del radio de curvatura de la fibra óptica .....	48
2.7.4 Efectos no lineales en la fibra óptica .....	49
2.8 Conclusiones.....	52
2.9 Referencias .....	54

### **Capítulo 3: Aplicaciones con sensores operando en primera ventana.....59**

3.1 <i>Power over fiber</i> en aplicaciones con sensores .....	60
3.2 Sistema de alimentación con luz en primera ventana .....	62
3.3 <i>Power over Fiber</i> en aplicaciones de seguridad y atmósferas explosivas.....	71
3.3.1 Descripción del escenario de aplicación.....	71
3.3.2 Demostrador de la aplicación .....	73
3.3.3 Discusión .....	77
3.4 <i>Power over Fiber</i> en aplicaciones de internet de las cosas .....	81
3.4.1 Descripción del escenario de aplicación.....	82
3.4.2 Demostrador de la aplicación .....	87
3.4.3 Discusión .....	89
3.5 Otras aplicaciones .....	93
3.6 Conclusiones.....	94
3.7 Referencias .....	95

### **Capítulo 4: Integración de la alimentación por fibra y la tecnología 5G .....98**

4.1 Introducción a la tecnología 5G .....	100
4.2 Teoría básica de 5G .....	105
4.2.1 Radio sobre fibra y formatos de modulación.....	106
4.3 <i>C-RAN: Remote Radio Head (RRH)</i> .....	110
4.3.1 Antenas .....	110
4.3.2 Amplificador de potencia .....	111
4.3.3 Acondicionamiento de la señal de radiofrecuencia .....	112
4.3.4 Control de la RRH .....	113

4.3.5 Consumo de potencia de los dispositivos.....	114
4.3.6 Integración de PoF en la alimentación de la RRH .....	117
4.4 Integración de una plataforma PoF en un escenario 5G .....	120
4.4.1 Descripción de la solución .....	120
4.4.2 Subsistema PoF/ Oficina Central (CO).....	122
4.4.3 Subsistema PoF/RRH .....	125
4.4.4 Tarjeta de comunicaciones (COM).....	130
4.4.5 Protocolo de comunicaciones: CO-RRH .....	132
4.4.6 Funcionalidades del <i>firmware</i> .....	134
4.4.7 Aplicación de Matlab .....	136
4.5 Validación experimental.....	137
4.5.1 Escenario de aplicación .....	137
4.5.2 Caracterización del montaje experimental .....	139
4.5.3 Integración de la tecnología 5G .....	142
4.6 Conclusiones.....	147
4.7 Referencias.....	149

## **Capítulo 5: Impacto de los parámetros de la fibra óptica en redes 5G con alimentación por luz..... 154**

5.1 Dispersión cromática en sistemas de radio sobre fibra.....	156
5.2 Efecto Kerr en los sistemas PoF .....	161
5.3 Efecto de la temperatura en la dispersión cromática.....	164
5.4 Validación experimental.....	167
5.4.1 Descripción del montaje experimental.....	167
5.4.2 Impacto de PoF en la respuesta en frecuencia de los ARoF .....	172
5.4.3 Impacto de PoF en el comportamiento del EVM del sistema .....	178
5.4.4 Acoplo del ruido del láser de alta potencia.....	180
5.5 Conclusiones.....	187
5.6 Referencias.....	189

<b>Capítulo 6: Integración de la alimentación por fibra en un escenario C-RAN usando fibras multinúcleo .....</b>	<b>191</b>
6.1 Introducción al Proyecto blueSPACE.....	192
6.2 Consumo en 5G.....	194
6.2.1 <i>Power over fiber</i> en el contexto de blueSPACE .....	198
6.2.2 Arquitectura ARoF en blueSPACE .....	201
6.3 Integración del sistema PoF con la tecnología 5G .....	202
6.3.1 Caracterización del sistema de Radio analógica sobre fibra .....	205
6.3.2 Implementación y caracterización del sistema PoF.....	209
6.3.3 Caracterización de la función de transferencia en un escenario compartido.....	211
6.3.4 Impacto de la transmisión de energía en el sistema ARoF.....	214
6.4 Demostrador: Optimización energética en el <i>fronthaul</i> óptico de una red 5G .....	219
6.5 Técnica de monitorización PoF basada en redes de Bragg .....	227
6.5.1 Descripción de la técnica.....	228
6.5.2 Montaje experimental .....	229
6.6 Conclusiones.....	233
6.7 Referencias.....	235
 <b>Capítulo 7: Conclusiones .....</b>	 <b>237</b>
7.1 Conclusiones.....	238
7.2 Trabajos futuros .....	241
 <b>Capítulo 8: Conclusions.....</b>	 <b>243</b>
8.1 <i>Conclusions</i> .....	244
8.2 <i>Future Work</i> .....	247

# Índice de Figuras

Figura 1.1. Escenarios sinérgicos de la tecnología PoF en el campo de las comunicaciones y los sensores. ....	2
Figura 1.2. Requerimientos energéticos de emplazamientos 2G/3G/4G/5G. RRU: <i>Remote Radio Unit</i> , AAU: <i>Active Antenna Unit</i> , BBU: <i>Baseband Unit</i> [9]. ....	4
Figura 2.1. Configuración básica de un sistema PoF, con un canal de comunicaciones (COM) para el intercambio de información entre el transmisor y el receptor. ....	14
Figura 2.2. Evolución de los picos máximos de la potencia de emisión en láseres de pulsos ultra cortos: CPA: <i>Chirped Pulse Amplification</i> ; OPCPA: <i>Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification</i> ; SEL: <i>Station of Extreme Light</i> [14]. ....	16
Figura 2.3. Brillo de los láseres de semiconductores de alta potencia [16]. ....	17
Figura 2.4. Dependencia de la potencia óptica de emisión con la corriente de polarización en un diodo láser de semiconductor. ....	19
Figura 2.5. Efecto de la temperatura: (a) en el comportamiento de la $J_{th}$ , (b) en la <i>slope quantum efficiency</i> en un láser de semiconductor [22]. ....	22
Figura 2.6. Impacto de la temperatura en el tiempo de vida de un láser de semiconductor [23]. ....	24
Figura 2.7. Espectro de la ganancia Raman en la fibra de sílice; línea continua: la señal y el bombeo tienen la misma polarización, línea discontinua: señales ortogonales [25, p. 34]. ....	26
Figura 2.8. Ancho de banda de ganancia de los materiales más comunes de los láseres de estado sólido [15]. ....	28
Figura 2.9. Láser de fibra implementado con un láser de semiconductor como fuente de bombeo y usando una fibra de doble cubierta; FBG: <i>Fiber Bragg Grating</i> [15]. ....	29
Figura 2.10. Esquema de un láser Raman: (a) con un salto en frecuencia, y en (b) en cascada, RIG: <i>Raman Input Grating</i> , ROG: <i>Raman Output Grating</i> , HR: <i>High Reflectivity</i> [28]. ....	29
Figura 2.11. Estructura de una fibra óptica [31]. ....	31
Figura 2.12. Perfil de atenuación de: (a) las fibras multimodo FG200UCC-High-OH, FT200EMT-Low-OH del fabricante Thorlabs [38][37]; (b) fibra multimodo MMF 62,5/125 $\mu$ m y la fibra monomodo SMF-28 del fabricante Corning [34][40]. ....	34
Figura 2.13. Diámetro efectivo (MFD) en la fibra SMF-28. ....	36
Figura 2.14. Bandas espectrales de los sistemas PoF, responsividad de las PVC según el material de fabricación y la atenuación de la fibra óptica [1]. ....	40
Figura 2.15. Celdas: (a) Sección transversal e imagen con microscopio de 6 uniones de una celda de GaAs apiladas verticalmente[59], (b) 6 segmentos de una PVC conectada en serie [56]. ....	40
Figura 2.16. Modelo eléctrico simplificado de una celda, diodo único y doble diodo (de izquierda a derecha). ....	41
Figura 2.17. Característica de la corriente y la potencia entregada por una PVC en función de la tensión. ....	42
Figura 2.18. Clasificación de los sistemas PoF según el número de fuentes y la topología usada en la inyección. ....	43
Figura 2.19. Alimentación de cuatro nodos (N) usando diferentes topologías: (a) Estrella; (b) Bus; (c) Árbol. SP: <i>splitter</i> o divisor óptico; CO: oficina central. ....	44
Figura 2.20. Clasificación de los sistemas PoF según el número de PVC y su conexionado eléctrico. ....	45
Figura 2.21. Daños provocados por el <i>fiber fuse</i> en una fibra óptica SMF-28 [62]. ....	46
Figura 2.22. Impurezas en la superficie de contacto entre 2 conectores [64]. ....	47
Figura 2.23. Vista frontal de conectores tipo FC/APC: (a) daño en el núcleo de un conector; (b) conector sin impurezas según la norma IEC 61300-3-35. ....	47
Figura 2.24. Efectos no lineales en la fibra óptica monomodo. ....	49

Figura 3.1. Análisis de la eficiencia del sistema, SEE, en función de la distancia del enlace para diferentes longitudes de ondas. ....	64
Figura 3.2. Imagen de las 3 versiones de los módulos de transmisión en primera ventana. ....	64
Figura 3.3. Características del láser de alta potencia; (a) componentes espectrales; (b) encapsulado del láser TO-220-3. ....	65
Figura 3.4. Solución para la disipación del calor de los láseres de potencia. ....	66
Figura 3.5. Circuito de habilitación y protección contra sobrecalentamiento del láser, basado en el <i>flip-flop</i> tipo D, SN74LVC1G175, y el comparador con histéresis TLV3702. ....	67
Figura 3.6. Análisis de la eficiencia del sistema, SEE, en función de la distancia del enlace, considerando un factor de acoplo, $\eta_a$ , del ~47 % para la fibra multimodo de 62,5/125 $\mu\text{m}$ (núcleo/cubierta) y de 100 % para la fibra multimodo de 200/225 $\mu\text{m}$ (núcleo/cubierta); se considera una eficiencia de la PVC del 52 % para ambos casos. ....	69
Figura 3.7. Curvas experimentales corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V) de la celda fotovoltaica para diferentes potencias incidentes. ....	70
Figura 3.8. Disipadores para la disipación de la potencia: (a) disipador comercial; (b) diseño específico. ....	70
Figura 3.9. Alimentación óptica mediante fibra óptica en entornos peligrosos. P2P: Punto a Punto; P2M: Punto a Multipunto. ....	72
Figura 3.10. Sistema PoF con detección de fibra. HPLD: <i>High Power Laser Diode</i> . ....	74
Figura 3.11. Pulsos transmitidos y recibidos del esquema de detección de la fibra. ....	75
Figura 3.12 Implementación del sistema PoF para alimentar ópticamente a distancia un sensor de proximidad. ....	76
Figura 3.13. Figura de mérito para cada longitud de fibra y diámetro del núcleo. Punto azul $N \times P_{PVC} = 138 \text{ W}$ , para una fibra SI con un diámetro de núcleo de 200 $\mu\text{m}$ y 300 m de longitud. ....	79
Figura 3.14. Distribución del campo del modo fundamental a 808 nm para una fibra multimodo de 62,5/125 $\mu\text{m}$ : (a) SI; (b) GI [25]. ....	80
Figura 3.15. Influencia del diámetro de campo modal (MFD) en la potencia óptica máxima inyectada en una fibra SI y GI, y para diferentes diámetros del núcleo de la fibra [25]. ....	81
Figura 3.16. Sistema de detección de intruso y fuego en una subestación eléctrica. ....	83
Figura 3.17. Diseño del nodo sensor inteligente remoto con gestor de energía integrado. El nodo inteligente comprende un sistema de detección de incendios y un sensor de temperatura/presencia [26]. ....	84
Figura 3.18. Estructura de la trama del canal ascendente e información de los sensores. ....	86
Figura 3.19. Consumo de energía del nodo inteligente: (a) Esquema de medición; (b) comportamiento de la corriente en función del modo de operación. ....	87
Figura 3.20. Imagen del sistema PoF para alimentar un nodo inteligente que incluye un sensor de temperatura/presencia, un detector de llamas, una electrónica de control basada en un microcontrolador, un gestor de energía y un canal de comunicaciones. ....	88
Figura 3.21. Prueba experimental con el sensor AMG88; actividad de uno de sus microsensores en presencia de radiación humana. ....	88
Figura 3.22. Encendido/apagado del láser a petición del nodo sensor a través del enlace de control y funcionalidad de monitorización del estado de la batería. ....	89
Figura 3.23. Esquema genérico de un sistema PoF con una configuración asimétrica para la distribución de la energía. ....	90
Figura 3.24. Imagen del sistema PoF para alimentar un conmutador (SW), con fibras MMF de 100 m de longitud y la versión 2 del módulo transmisor de energía. ....	93
Figura 4.1. Comparación de suscripciones en miles de millones en redes 5G y 4G en los primeros años de despliegue [3]. .	100
Figura 4.2. Evolución y proyección en miles de millones del número de conexiones de dispositivos IoT en función del caso de uso de la tecnología 5G [3]. ....	102
Figura 4.3. Esquemas básicos de transmisión de sistemas RoF. ....	106
Figura 4.4. Esquema de modulación externa para la generación de señales RoF; $f_{mm}$ : frecuencia en banda milimétrica [38]. .	108



Figura 4.5. Constelación de una modulación QPSK, medida en un escenario real. ....	108
Figura 4.6. Espectro OFDM. ....	109
Figura 4.7. Apariencia de diferentes tipos de antenas en un escenario 5G: (a) tradicional; (b) antena activa, AAU del fabricante Huawei; (c) antena activa AIR, del fabricante Ericsson [41] [42]. ....	110
Figura 4.8. Solución de RRH implementada con la familia de FPGA PolarFire [52]. ....	113
Figura 4.9. Bloques funciones y consumos de dos soluciones basadas en DFE para aplicaciones 5G: (a) solución S1 sin los conversores integrados; (b) con los conversores integrados. Ancho de banda de 100 MHz. DUC: <i>Digital Up-Conversion</i> ; DDC: <i>Digital Down-Conversion</i> ; DPD: <i>Digital Pre-Distortion</i> ; CFR: <i>Crest Factor Reduction</i> [57]. ....	115
Figura 4.10. Solución basada en circuito integrado Zynq/RFSoc para aplicaciones de RF [57]. ....	117
Figura 4.11. Diagrama simplificado de la alimentación de una RRH [44]. ....	117
Figura 4.12. Escenarios de alimentación de la RRH: (a) alimentación parcial; (b) alimentación total. ....	119
Figura 4.13. Integración de la plataforma en un escenario 5G (a) dentro de un escenario C-RAN; (b) propuesta de integración sinérgica de la tecnología 5G y de la plataforma de alimentación desarrollada con CO, RRH, <i>Fronthaul</i> , subsistema PoF/CO y subsistema PoF/RRH. ....	121
Figura 4.14. Bloques principales del subsistema PoF/CO y conectividad a través de un puerto Ethernet <i>CO/BBU Pool</i> . ....	124
Figura 4.15. Foto del subsistema PoF/CO; el láser HPL (1480 nm) no está representado. ....	125
Figura 4.16. Esquema funcional y principales bloques del subsistema PoF/RRH. ....	126
Figura 4.17. Foto del subsistema PoF/RRH: (a) tarjeta principal que integra los diferentes bloques; (b) tarjetas que integran el DC/DC de la solución que opera a 808 nm (izquierda.) y a 1480 nm (derecha); no se muestran las PVCs. ....	128
Figura 4.18. Esquema electrónico simplificado de la tarjeta COM. ....	131
Figura 4.19. Mapa de direcciones (AD) y escenario de direccionamiento en la plataforma basado en el protocolo. ....	133
Figura 4.20. Interfaz de programación del MSP430, usando la interfaz JTAG. ....	134
Figura 4.21. Escenario de aplicación y montaje y esquema del montaje experimental. ....	137
Figura 4.22. Foto del montaje experimental; sólo se puede apreciar el sistema PoF. ....	138
Figura 4.23. Curvas experimentales corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V) del conjunto de las cuatro PVC. ....	140
Figura 4.24. Disipador de potencia: (a) imagen del disipador con las cuatro PVC; (b) imagen térmica del disipador después de 8 minutos de operación continua con una potencia óptica total inyectada de 5,12W. ....	141
Figura 4.25. Alimentación del PA por medio del subsistema PoF/RRH. ....	143
Figura 4.26. Esquema de transmisión ARoF sobre SMF, con PA de frecuencia intermedia alimentado por PoF para aumentar la SNR y mejorar el EVM. ....	143
Figura 4.27. Estabilidad del EVM del sistema de transmisión ARoF, con $\alpha = 8$ dB. Mediciones cada 2 minutos, el EVM cumple la norma en el caso de una modulación QPSK. ....	145
Figura 5.1. Esquema de modulación externa para la generación de <i>Optical double-sideband</i> (ODSB), con un modulador de intensidad de tipo Mach-Zehnder [2]. ....	156
Figura 5.2. Esquemático implementado en la herramienta VPI para determinar las frecuencias críticas. ....	158
Figura 5.3. Frecuencias críticas para diferentes longitudes de fibras ópticas tipo SMF-28, sin considerar los efectos no lineales. ....	159
Figura 5.4. Comportamiento de la frecuencia crítica en función de la dispersión cromática en una longitud de 10,86 km. ....	160
Figura 5.5. Comportamiento de la frecuencia crítica en función de la dispersión cromática en una longitud de 25,20 km. ....	161
Figura 5.6. Esquemático utilizado en la herramienta VPI para evaluar el impacto del efecto SPM en el comportamiento del EVM. ....	164
Figura 5.7. Efecto del SPM en la respuesta del sistema (a) desplazamiento de la frecuencia crítica a causa del SPM; (b) máximo deterioro del EVM en el punto de la frecuencia crítica. La modulación utilizada en ambos casos es QPSK. ...	164
Figura 5.8. Dependencia de la dispersión cromática con la temperatura en la fibra SMF-28 para diferentes longitudes de onda. ....	166

Figura 5.9. Esquema del sistema ARoF y PoF en un escenario compartido.....	168
Figura 5.10. Montaje experimental del sistema ARoF y PoF en un escenario compartido. ....	170
Figura 5.11. Respuesta en frecuencia del sistema en función de la potencia configurada en el láser HPL usando una modulación QPSK y para diferentes longitudes y: (a) 6,51 km; (b) 10,86 km;.....	173
Figura 5.12. Esquema del modelado en la herramienta VPI del experimento de laboratorio.....	174
Figura 5.13. Valor promedio y experimental de la potencia máxima recibida en la RRH a 1480 nm y a 1552 nm, utilizando una longitud de fibra óptica de 25,20 km. ....	175
Figura 5.14. Respuesta en frecuencia del sistema ARoF simulado en la herramienta VPI en una distancia de 25,20 km; la resolución de la simulación es de 50 MHz. ....	176
Figura 5.15. Ganancia Raman del sistema para diferentes longitudes: (a) simulado; (b) experimental. ....	177
Figura 5.16. Perfil de ganancia Raman para la fibra óptica SMF-28 y con un bombeo a una longitud de onda de 1486 nm. ...	177
Figura 5.17. Comportamiento del EVM en función de la potencia configurada en el láser HPL para diferentes longitudes y usando una modulación QPSK: (a)6,51km; (b) 10,86 km; (c) 14,34 km; (d) 25,20 km. ....	178
Figura 5.18. Cumplimiento del estándar basado en el valor del EVM para una modulación QPSK para diferentes longitudes de fibra óptica: (a) 6,51 km; (b) 10,86km; (c) 14,34 km; (d) 25,20 km. ....	180
Figura 5.19. Esquema para la medición del ruido del láser HPL. ....	183
Figura 5.20. Análisis de perfil del ruido del láser HPL basado en el cálculo de la desviación estándar. ....	184
Figura 5.21. Contenido espectral del ruido del láser HPL: (a) dominio del tiempo; (b) dominio de la frecuencia. ....	185
Figura 5.22. Impacto del ruido del láser HPL en el comportamiento del valor EVM: (a), (c), (e) 10,86 km (caso B); (b), (d), (f) 25,20 km (caso D). ....	186
Figura 6.1. Configuración de la BBU y del módulo de frecuencia intermedia [3]. ....	192
Figura 6.2. Elementos principales, en el lado de la CO, desarrollados en el marco del proyecto blueSPACE: (a) BBU; (b) interfaz gráfica de la aplicación desarrollada en Matlab que se utiliza para la visualización de los parámetros. ....	193
Figura 6.3. Características de la fibra MCF: (a) pérdidas de inserción a 1550 nm; (b) dispersión cromática. ....	194
Figura 6.4. Requerimientos energéticos de emplazamientos 2G/3G/4G/5G. RRU: <i>Remote Radio Unit</i> , AAU: <i>Active Antenna Unit</i> , BBU: <i>Baseband Unit</i> [7]. ....	195
Figura 6.5. Escenario de aplicación y radio de cobertura de los diferentes tipos de celdas [9].....	197
Figura 6.6. Distribución de la cobertura de radio en interiores en el caso de: (a) picoceldas (izquierda), femtoceldas (derecha); (b) ejemplo de escenario de aplicación de las femtoceldas; proyección de su área de cobertura en un estadio[10].	197
Figura 6.7. Diferentes escenarios de aplicación de la tecnología PoF en un contexto de 5G, usando fibras multinúcleos (MCF) y monomodo (SMF) en topología en estrella; SP: divisor óptico con una entrada y múltiples salidas (N), FO: <i>Fan-out</i> de la fibra MCF. ....	198
Figura 6.8. Comportamiento del tráfico de una red 5G en un intervalo de 24 horas [12]. ....	199
Figura 6.9. Escenario <i>PoF Pooling</i> en el <i>fronthaul</i> de una red 5G con multiplexación espacial (SDM). $\lambda_1$ : potencia, $\lambda_2$ : datos, $\lambda_3$ : control, HPLD: diodos láser de alta potencia, SMF: fibras monomodo, MCF: fibra multinúcleo, FO/FI: <i>Fan-in/Fan-out</i> , (D)MUX: (de-)multiplexor, PV: celda fotovoltaica, HEM: <i>hardware energy management</i> [14]. ....	200
Figura 6.10. Suministro de energía a la RRH utilizando fuentes de energía convencionales y PoF en un escenario 5G. ....	201
Figura 6.11. Esquema del sistema ARoF propuesto en el marco del proyecto blueSPACE, usando direccionando de haz controlado desde el dominio óptico[14]. ....	202
Figura 6.12. Esquema del montaje implementado, donde se muestra la integración de la tecnología PoF en un escenario 5G, desarrollado en el marco del proyecto blueSPACE. ....	203
Figura 6.13. Montaje de laboratorio y principales elementos que integran el experimento sinérgico 5G y PoF en el proyecto blueSPACE. ....	204
Figura 6.14. Análisis de la estabilidad de la BBU en configuración B2B, para una modulación QPSK. ....	206

Figura 6.15. Caracterización de la frecuencia intermedia ( <i>IFTX</i> ) de la BBU con una modulación QPSK: (a) ancho de banda; (b) frecuencia central de la frecuencia intermedia.....	207
Figura 6.16. Configuración de la etapa de salida de la BBU en el dominio óptico. Generación de las señales LO y ARoF. ...	208
Figura 6.17. Espectro de salida del LO, cuando MZM_1 opera en modo supresión de portadora óptica .....	208
Figura 6.18. Señal ARoF con los tonos de datos a la frecuencia intermedia IF.....	208
Figura 6.19. Esquema simplificado de la integración de los sistemas ARoF y PoF. ....	209
Figura 6.20. Medición de la función de transferencia de la MCF.....	212
Figura 6.21. Función de transferencia teórica y experimental de la MCF, medida en el núcleo 7. ....	213
Figura 6.22. Inestabilidades temporales en la función de transferencia en el núcleo 7. ....	213
Figura 6.23. Función de transferencia del núcleo 7 de la MCF para una potencia del HPL= 31 dBm. ....	214
Figura 6.24. Amplificación Raman de la señal ARoF. ....	214
Figura 6.25. Configuraciones del sistema ARoF, sin radioenlace (izquierda), con radioenlace (derecha). ....	215
Figura 6.26. Comportamiento del BER para una modulación QPSK, diferentes niveles de potencia del HPL y sin radioenlace(derecha); constelación (izquierda).....	216
Figura 6.27. Comportamiento del BER para una modulación 16 QAM, diferentes niveles de potencia del HPL y sin radioenlace(derecha); constelación (izquierda).....	216
Figura 6.28. Comportamiento del BER para una modulación 64 QAM, diferentes niveles de potencia del HPL y sin radioenlace(derecha); constelación (izquierda).....	217
Figura 6.29. Análisis del valor medio y de la STD para las diferentes modulaciones; sin radioenlace: (a)QPSK, 16 QAM; (b) 64 QAM. ....	218
Figura 6.30. Comportamiento del BER para una modulación QPSK, diferentes niveles de potencia del HPL y con radioenlace(derecha); constelaciones (izquierda). ....	219
Figura 6.31. Análisis del valor medio y de la STD para la modulación QPSK con radioenlace. ....	219
Figura 6.32. Esquema del Demostrador desarrollado en el marco del proyecto blueSPACE.....	220
Figura 6.33. Control del amplificador PA por el subsistema PoF/RRH.....	221
Figura 6.34. Mapa generado por el Agente de Movilidad con 2 celdas (P1, P2) y 1 usuario.....	222
Figura 6.35. Esquemático del sistema PoF dentro de una configuración C-RAN, basado en fibra SMF [20].....	223
Figura 6.36. Montaje del sistema PoF basado en fibra SMF. ....	224
Figura 6.37. Medición de la curva P-I y I-V de la PVC para una potencia óptica de entrada de 100 mW y 200 mW por celda. ....	225
Figura 6.38. Operación de una <i>Tilted Fibre Bragg Grating</i> (TFBG) en una fibra MCF. ....	228
Figura 6.39. Esquema del montaje para validar el principio teórico de la técnica de monitorización PoF. FO/FI: <i>Fan-in/Fan-out</i> , BLS: <i>Broadband Light Source</i> , VOA: <i>Variable Optical Attenuator</i> , OSA: <i>Optical Spectrum Analyzer</i> , CIR: <i>Circulador</i> .230	230
Figura 6.40. Caracterización de la TFBG: (a) transmisión (T); (b) <i>back-crosstalk</i> (BXT), inyección de la potencia por la entrada 2. ....	231
Figura 6.41. Caracterización del <i>back-crosstalk</i> (BXT) de la TFBG, cuando se inyecta la potencia óptica por: (a) la entrada 1 del FI; (b) la entrada 3 del FI. ....	231
Figura 6.42. Caracterización del <i>back-crosstalk</i> (BXT) de la TFBG, cuando se inyecta la potencia óptica por la entrada 4 del FI. ....	231
Figura 6.43. Caracterización de la TFBG: (a) espectro en la entrada 2 del FI; (b) <i>back-crosstalk</i> (BXT) en la entrada 1 del FI. ....	232
Figura 6.44 Montaje del experimento de la técnica de monitorización PoF. ....	232

# Índice de Tablas

Tabla 2.1. Parámetros de algunos tipos de láseres y sus potencias ópticas de emisión en la longitud de onda de operación [15]. .....	17
Tabla 2.2: Eficiencias de las PVC para diferentes materiales. ....	38
Tabla 2.3. Parámetros de algunas PVC comerciales.....	39
Tabla 2.4. Umbrales de potencia para el fenómeno del <i>fiber fuse</i> en diferentes tipos de fibras ópticas. ....	46
Tabla 3.1. Parámetros de equipos comerciales de sistemas PoF.....	61
Tabla 3.2. Parámetros de los diferentes casos de estudio [25].....	63
Tabla 3.3. Potencia óptica de emisión y dimensiones en cada una de las versiones del módulo. ....	65
Tabla 3.4. Estados de las señales de control del circuito de protección de encendido y sobrecalentamiento del láser. ....	68
Tabla 3.5. Consumo de algunos sensores. ....	72
Tabla 3.6. Medición de la potencia eléctrica suministrada al nodo.....	75
Tabla 3.7. Ejemplos de sensores de bajo consumo para aplicaciones PoF en escenarios de IoT [38]. ....	82
Tabla 3.8. Modos de operación del nodo inteligente. ....	85
Tabla 4.1. Valores límites del EVM para cumplir con el estándar 5G NR, en el enlace descendente [39]. ....	109
Tabla 4.2. Parámetros y duración de símbolos en OFDM. ....	109
Tabla 4.3. Amplificadores de RF para 5G. ....	112
Tabla 4.4. Consumos de algunos circuitos integrados utilizados para implementar el procesamiento en las RRH. ....	114
Tabla 4.5. Resumen del consumo por bloques funcionales de un transmisor/receptor 5G, para un canal. ....	116
Tabla 4.6. Definición de los modos de bajo consumo del subsistema PoF/RRH. ....	129
Tabla 4.7. Configuración de la UART. ....	131
Tabla 4.8. Estructura de las tramas del protocolo. ....	132
Tabla 4.9. Balance de potencia del sistema PoF. ....	140
Tabla 4.10. Especificaciones generales y modo de bajo consumo de la plataforma, en su variante de 808 nm. ....	142
Tabla 4.11. Parámetros para el proceso de optimización. ....	146
Tabla 5.1. Variación de la frecuencia crítica en función de la temperatura para diferentes longitudes de fibra óptica de tipo SMF-28. ....	167
Tabla 5.2. Descripción de las funcionalidades de los <i>scripts</i> implementados en Matlab.....	171
Tabla 5.3. Comportamiento de la frecuencia crítica experimental y la dispersión efectiva en los diferentes casos de estudios. ....	173
Tabla 6.1. Parámetros relevantes de los diferentes tipos de celdas [9]. ....	196
Tabla 6.2. Análisis de la estabilidad de la BBU, para diferentes niveles de atenuación de la frecuencia intermedia. ....	206
Tabla 6.3. Funcionalidad de los núcleos en la fibra MCF.....	209
Tabla 6.4. Corriente de cortocircuito de la PVC y tensión en circuito abierto para diferentes niveles de potencia del HPL [17]. .....	210
Tabla 6.5. Configuración de los casos de estudio en función del escenario. ....	215
Tabla 6.6. Características del sistema PoF implementado. ....	224
Tabla 6.7. Especificaciones generales y modo de bajo consumo de la plataforma, variante de 1480 nm.....	225
Tabla 6.8. Parámetros para el cálculo de la latencia.....	227

# Lista de Acrónimos

<b>Acrónimo</b>	<b>Término en inglés</b>	<b>Término en castellano</b>
5G-NR	5G- New Radio	5G-Nueva radio
ADC	Analogue to Digital Converter	Convertidor analógico digital
ARoF	Analogue Radio over Fiber	Radio analógica sobre fibra
ASIC	Application Specific Integrated Circuits	Circuito integrado de aplicaciones específicas
B2B	Back-to-back	Extremo a extremo
BBU	Baseband Unit	Unidad de procesamiento de la banda base
BER	Bit Error Rate	Tasa de error de bits
BLS	Broadband Light Source	Fuente óptica de amplio espectro
BS	Base Station	Estación base
CFR	Crest Factor Reduction	Reductor del factor de cresta
CO	Central Office	Oficina central
CP-OFDM	Cyclic Prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Prefijo cíclico-multiplexación por división de frecuencias ortogonales
CPRI	Common Public Radio Interface	Interfaz de radio pública
CPU	Central Processor Unit	Unidad central de procesamiento
C-RAN	Centralized -Radio Access Network	Red de acceso de radio centralizada
D	Chromatic Dispersion	Dispersión cromática
DAC	Digital Analogue Converter	Convertidor digital a analógico
DDC	Digital Down-conversion	Conversión digital de bajada
DCF	Double-Clad Fiber	Fibra de doble cubierta
DMA	Direct Memory Access	Acceso directo a memoria
DPD	Digital Pre-Distortion	Pre-distorsión digital

DRoF	Digital Radio over Fiber	Radio digital sobre fibra
DSP	Digital Signal Processor	Procesador de señales digitales
DUC	Digital Up-conversion	Conversión de subida digital
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Multiplexado denso por división en longitudes de onda
eCPRI	Enhanced Common Public Radio Interface	Interfaz mejorada de radio pública
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier	Amplificador de fibra dopado con Erblio
eMBB	Enhanced Mobile Broadband	Banda ancha móvil mejorada
EMI	Electromagnetic Interference	Interferencia electromagnética
EVM	Error Vector Magnitude	Magnitud del vector de error
FC/APC	Fiber Connector/Angled Physical Contact	Conector de fibra/contacto físico angulado
FC/PC	Fiber connector/Physical Contact Connector	Conector de fibra/contacto físico
FDM	Frequency Division Multiplexing	Multiplexación por división en frecuencia
FFT	Fast Fourier Transform	Transformada rápida de Fourier
FPGA	Field Programmable Gate Arrays	Arreglo de lógica programable
FI	Fan-in	Distribuidor de entrada
FO	Fan-out	Distribuidor de salida
FTTA	Fiber-To-The-Antenna	Fibra hasta la antena
FWM	Four Wave Mixing	Mezcla de cuatro ondas
GEE	Global Energy Efficiency	Eficiencia global del sistema
HPL	High Power Laser	Láser de alta potencia
HPLD	High Power Laser Diode	Diodo láser de alta potencia
I2C	Inter-Integrated Circuit	Entre circuitos integrados
IF	Intermediate Frequency	Frecuencia intermedia
IoT	Internet of Things	Internet de las cosas
NB-IoT	Narrowband-IoT	IoT de banda estrecha
LNA	Low Noise Amplifier	Amplificador de bajo ruido

LTE	Long Term Evolution	Evolución de largo alcance
M2M	Machine-to-Machine	Máquina a máquina
MCF	Multicore Fiber	Fibra multinúcleo
MFD	Mode Field Diameter	Diámetro de campo modal
MIMO	Multiple Input-Multiple Output	Múltiples entradas y múltiples salidas
MMF	Multimode Fiber	Fibra multimodo
mMTC	Massive Machine Type Communications	Comunicaciones masiva tipo máquina
MZM	Mach-Zehnder Modulator	Modulador Mach-Zehnder
NA	Numerical Aperture	Apertura numérica
NFV	Network Function Virtualization	Virtualización de las funciones de red
NTC	Negative Temperature Coefficient	Termistor de coeficiente de temperatura negativo
ODSB	Optical double-sideband	Doble banda lateral óptica
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Multiplexación por división de frecuencias ortogonales
OSA	Optical Spectrum Analyzer	Analizador de espectros óptico
PA	Power Amplifier	Amplificador de potencia
PLL	Phase Locked-Loop	Lazo de seguimiento de fase
P2P	Point-to-Point	Punto a punto
P2M	Point-to-Multipoint	Punto a multipunto
PMD	Polarization Mode Dispersion	Dispersión dependiente de la polarización
PoF	Power over Fiber	Alimentación con luz por fibra
PVC	PhotoVoltaic Cell	Celda fotovoltaica
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Modulación de amplitud en cuadratura
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura
RAM	Random Access Memory	Memoria de acceso aleatorio

RAN	Radio Access Network	Redes de acceso de radio
RFSoc	RF System on Chip	Sistema de radio embebido en circuito integrado
RIN	Relative Intensity Noise	Ruido de intensidad
RRH	Remote Radio Head	Cabezal de radio remoto
RRU	Radio Remote Unit	Unidad de radio remota
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	Dispersión Brillouin estimulada
SDM	Space Division Multiplexing	Multiplexación por división espacial
SDN	Software Defined Networks	Redes definidas por software
SEE	System Energy Efficiency	Eficiencia energética del sistema
SMF	Single Mode Fiber	Fibra monomodo
SNR	Signal to Noise Ratio	Relación señal a ruido
SPI	Serial Peripheral Interface	Interfaz serie entre periféricos
SPM	Self Phase Modulation	Modulación de fase propia
SRS	Stimulated Raman Scattering	Dispersión Raman estimulada
STD	Standard Deviation	Desviación estándar
TFBG	Tilted Fibre Bragg Grating	Red de Bragg inclinada en fibra
UART	Universal Asynchronous Receiver- Transmitter	Interfaz serie asincrónica
uRRLC	Ultra Reliable Low Latency Communications	Comunicaciones ultra fiables de baja latencia
USB	Universal Serial Bus	Bus serie universal
V2V	Vehicle-to-Vehicle	Vehículo a vehículo
V2X	Vehicle-to everything	Vehículo a todo
VCO	Voltage-controlled oscillator	Oscilador controlado por tensión
VOA	Variable Optical Attenuator	Atenuador óptico variable
VPI	Virtual Photonic Instrumentation	Instrumentación fotónica virtual
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexación por división en longitudes de onda
XPM	Cross Phase Modulation	Modulación de fase cruzada



# Abstract

The copper conductor is the physical medium traditionally used to transport power between different points. However, in recent years a new technology called Power over Fiber (PoF) has begun to be used for the same purpose. This idea firstly developed in the 1970s by the American Telephone and Telegraph Company in the field of telephony used fiber optics to power parts of a telephone instead of traditional copper. Power over Fiber technology involves the transmission of energy using an optical fiber to feed an electronic device. In its basic configuration, it consists of an energy source, typically a high power laser (HPL), an optical fiber to transmit energy to the receiving side, and a photovoltaic converter to convert light into electrical energy.

This technology has several advantages over the use of copper, due to the intrinsic properties of optical fiber such as immunity to electromagnetic interference, galvanic isolation and low weight.

The use of this technology is of interest in monitoring applications in high-voltage networks requiring galvanic isolation, in nuclear power generation applications, as well as in the automotive and aviation sectors. On the other hand, a scenario of special attention regarding the application of this technology is the communications sector, due to the advantages that the synergy between the transmission of energy and data through the same physical medium can provide.

For those reasons, the main objective of this research is to study and develop light-powered systems that integrate solutions with intelligence in the field of sensors and communications, ensuring optimization and management of energy consumption.

This research has included one chapter for the development of applications in the sensing field and three for the analysis of Power over Fiber applications in communications scenarios, specifically in the context of 5G technology. The following is a summary of the research content by chapters.

Chapter 2 presents PoF systems as an emerging technology capable of transmitting energy over short and long distances using optical fiber to power remote devices. It also discusses the main theoretical

concepts and parameters related to each of the elements that compromise a PoF system. The main objective of this approach is to establish the principles that will help to understand the rest of the chapters within this research. The first sections define the elements employed by the technology, the state of the art and its characteristics. Finally, considerations and critical aspects that may limit the implementation of PoF systems are addressed.

Chapter 3 discusses the state of the art of PoF technology in sensing applications. Additionally, the key aspects to consider in the development of a PoF system operating in the first window are discussed. Finally, the implementation of several sensing applications in different fields such as explosive areas, in the context of Internet of Things (IoT) and pyrometry applications are discussed. Throughout the chapter, topics such as the impact of modal field diameter and fiber fuse on the power threshold supported by the fiber, and scalability analysis for powering a sensor network with a Point-to-Multipoint configuration are also analyzed.

Chapter 4 addresses the main concepts associated with 5G-NR technology and focuses on the implementation and analysis of synergistic scenarios using PoF technology in a Centralized-Radio Access Networks (C-RAN) architecture. Consumption analysis in the Remote Radio Head (RRH) is carried out to evaluate the energy requirements demanded by the 5G technology and the feasibility of using power by light. Additionally, a PoF platform is developed that implements low-power modes and remote sensing through a low-power communications channel. This functionality allows monitoring and controlling parameters of the RRH, from the Central office (CO), through a computer application implemented in Matlab. The integration of 5G and PoF (5G/PoF) technology is experimentally validated through the feeding of a RF amplifier, integrated in an Analog Radio over Fiber (ARoF) scenario. Finally, the performance of the integrated 5G/PoF system is evaluated using the EVM value as a metric.

Chapter 5 addresses the impact of the main fiber optic parameters on data transmission in a 5G scenario, because of power transmission in a shared scenario (data and power multiplexing on the same optical fiber). For the analysis, different laboratory experiments and simulations are carried out in an ARoF scenario operating in millimeter wave bands, with RF carriers below 20 GHz. Additionally, the influence of the Kerr effect and the nonlinear Stimulated Raman Scattering (SRS) phenomenon on the critical frequency behavior of the system and the appearance of the power fading phenomenon are analyzed. Finally, the

effect of the Relative Intensity Noise of the HPL and the effects of the coupled noise in the data channel through the SRS phenomenon are discussed. In all cases, the EVM is used as a metric for the characterization of the systems.

Chapter 6 addresses a PoF solution integrated in the optical fronthaul of a 5G network in a C-RAN configuration, operating at a radio frequency of 25.5 GHz. The design employs Space Division Multiplexing (SDM) integrated with PoF over a 10 km-long multicore fiber (MCF), with the objective of powering and controlling critical elements of the RRH for remotely managing its power consumption. Agent-based intelligent control is implemented in the design. Additionally, ARoF and PoF systems are characterized and the impact of power transmission on the ARoF system is evaluated for QPSK, 16 QAM and 64 QAM modulations using the BER value as a metric. In addition, two application examples based on MCF and single mode (SMF) optical fibers are explored for the optimization of the RRH power consumption. Additionally, a technique based on Tilted Fiber Bragg Gratings (TFBG) over MCF fibers for monitoring the transmitted energy is discussed.

Finally, chapters 7 and 8 summarize, in English and Spanish, the main conclusions of this research and present proposals for future work.

It is important to highlight as general conclusions of this work the integration capacity of PoF systems in different application scenarios, even though the threshold power supported by the optical fiber limits its transmission capacity, being more critical in the case of multimode (MMF) fibers with a gradual refractive index profile because of its smaller modal field diameter. On the other hand, the PoF systems developed in this research are compatible with current and future infrastructures in the context of 5G technology, based on SMF and MCF fibers. This research demonstrated in practice the transmission of hundreds of milliwatts over more than 10 km, using SMF fibers. In the case of MCF the transmitted power was sufficient to implement remote control of a power amplifier from the CO.

The main contributions of this research include the exploration and development of sensor applications integrating novel functionalities not covered by state-of-the-art solutions so far. The systems were tested in practice and demonstrated the ability to deliver an electrical power of 340 mW at a distance of 300 m, the HPL being configured at an optical emission power of 1.5 W, which represents a system efficiency of 22.6 %. PoF applications were extended to IoT and hazardous environment safety scenarios, including

capabilities such as fiber optic fault detection, which is critical in explosive atmospheres. Additionally, a PoF platform was developed in which not only the power delivered to the load was increased to 1.95 W, but also the efficiency of the system was increased up to 36 %, positioning the solution among the best reported in the state of the art. On the other hand, this research has contributed to the development of the integration of PoF systems in communications, specifically with 5G technology, where the capability of the technology for the energy control of the RRH in a C-RAN scenario was demonstrated. The developed theoretical and experimental analysis allowed understanding the impact of nonlinear phenomena in the context of PoF technology, enabling the development of more efficient synergic systems, especially in the communications scenario. Long distance systems, over 10 km, based on SMF and MCF fibers were implemented. The system based on MCF fiber is the longest distance PoF solution explored with this type of fiber in the literature. Finally, a technique for monitoring the transmitted power in PoF systems was developed and patented.

# Capítulo 1

## Introducción

Resumen:

En este capítulo se abordan los fundamentos teóricos que motivan el desarrollo de esta investigación, los objetivos generales y los específicos. Finalmente se presenta la estructura que se sigue para el desarrollo del documento, la cual incluye una breve descripción del contenido de cada capítulo.

## 1.1 Motivación

La tecnología de *Power over Fiber* (PoF) o alimentación con luz consiste en la transmisión de energía utilizando una fibra óptica con el objetivo de alimentar a un dispositivo electrónico. En su configuración básica, está integrada por una fuente de energía, típicamente un láser, una fibra óptica para transmitir energía hacia el lado receptor, y un convertor o celda que convierte la energía que viaja por la fibra en energía eléctrica. Desde su surgimiento en la década de los 70 [1] con las primeras pruebas de concepto propuestas en el campo de la telefonía hasta la fecha son múltiples las aplicaciones en las que se han explorado las ventajas de esta tecnología. La Figura 1.1 muestra dos campos potenciales para la implementación de escenarios sinérgicos con la tecnología PoF como son las comunicaciones y los sensores.

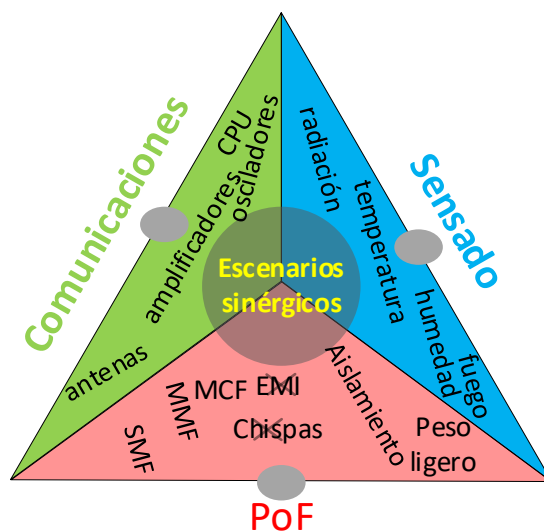


Figura 1.1. Escenarios sinérgicos de la tecnología PoF en el campo de las comunicaciones y los sensores.

En la actualidad hay una gran demanda de servicios y necesidad de conexión a la red por parte de los usuarios, siendo poco probable desempeñar las tareas cotidianas en ausencia de una conexión a internet. Gran parte de este tráfico es soportado por la red de acceso inalámbrica y se estima que para el 2023 más del 70 % de la población contará con conectividad móvil, lo cual representa un 5 % más que en el año 2018

[2]. Este incremento está aparejado a mejoras en las infraestructuras, en la calidad y en la diversificación de los servicios. Se estima que la velocidad móvil promedio aumentará hasta 43,9 Mbps en 2 años y que la infraestructura de las futuras redes 5G-NR permitirá alcanzar velocidades cercanas a los 575 Mbps en el 2023 [2]. Son múltiples las expectativas que subyacen en torno a las redes 5G-NR y el futuro de las comunicaciones.

La red 5G-NR (en adelante 5G) es una tecnología de comunicación inalámbrica de próxima generación más rápida y capaz de manejar más dispositivos que la actual red 4G/LTE. Promete ser el punto de convergencia de múltiples tecnologías y redes que dan servicio a diversos sectores, y aplicaciones, como multimedia, realidad virtual (VR), realidad aumentada (AR, por sus siglas en inglés), *Machine-to-Machine* (M2M)/ *Internet of Things* (IoT), automoción y ciudades inteligentes, entre otras [3]. Esta diversificación en los servicios y en las capacidades de la red implica un despliegue masivo de equipamientos, al tiempo que cobran mayor importancia conceptos como el consumo energético y el uso de las fibras ópticas para soportar el creciente aumento del tráfico de las redes de acceso de radio (RAN, por sus siglas en inglés) 5G como parte de la infraestructura del *back/fronthaul* para transmitir señales de radio sobre fibra (RoF) [4][5][6]. En estas redes de acceso se propone una arquitectura *Cloud-RAN* o *Centralized-RAN* (C-RAN) en donde la mayor parte de la complejidad y la gestión de red se centraliza en la oficina central (CO, por sus siglas en inglés). Esto permite una simplificación de las cabeceras de radio remotas (RRH, por sus siglas en inglés) [7], especialmente cuando se utilizan tecnologías de radio analógica sobre fibra (ARoF), con la consiguiente reducción del consumo de energía. El consumo de las unidades de radio remotas que se proponen para las redes 5G a instalar por algunos fabricantes es una parte representativa del consumo de la red, véase la Figura 1.2. Por esta razón, un punto recurrente en el análisis energético de las redes 5G son los mecanismos para la optimización de su consumo a partir de estrategias específicas [8][9][10][11]. Este aspecto alcanza mayor connotación en los escenarios de la arquitectura 5G que contemplan zonas con masivos despliegues de celdas de comunicaciones.

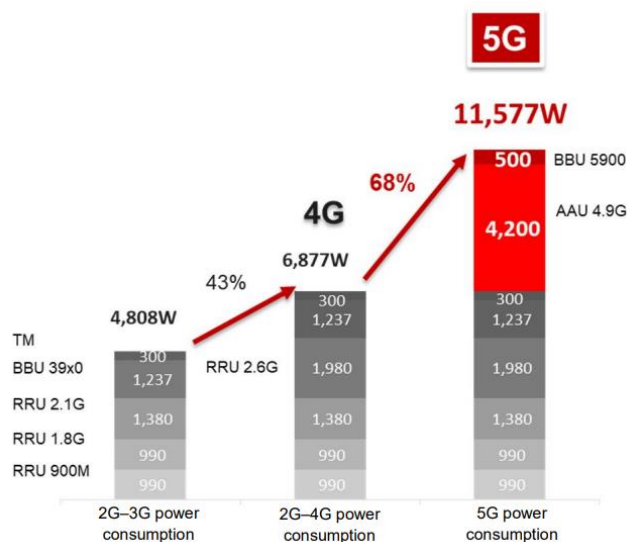


Figura 1.2. Requerimientos energéticos de emplazamientos 2G/3G/4G/5G. RRU: *Remote Radio Unit*, AAU: *Active Antenna Unit*, BBU: *Baseband Unit* [9].

Un enfoque alternativo para avanzar en resolver el problema del consumo energético en una red 5G puede ser utilizando la tecnología PoF. En este escenario se utilizaría la infraestructura basada en fibra para la transmisión de la energía y controlar distintos elementos electrónicos que permitan disminuir sustancialmente el consumo de la red, fundamentalmente en el lado de la RRH. Si bien esta filosofía de ahorro energética basada en el control ha sido parcialmente explorada, no así con tecnologías novedosas como PoF. La tecnología PoF permitiría utilizar la propia infraestructura de comunicaciones, bajo el control de un único operador, para llevar a cabo las operaciones de control energético, reduciendo los costes adicionales que supone instalar (si fuera el caso), mantener y operar una infraestructura independiente de transmisión de energía. En este contexto la tecnología PoF permitiría alimentar ópticamente elementos de bajo consumo como dispositivos de RF, dispositivos/sistemas críticos y brindar soporte a los distintos modos de bajo consumo de la RRH [12], convirtiéndose en una tecnología con capacidad de alimentar dispositivos usando la red de distribución.

Por otro lado, la arquitectura de red de banda ancha FITTA [13] o fibra hasta la antena en el contexto de 5G, favorece los escenarios sinérgicos con PoF, ya que la propia infraestructura basada en fibra se usaría para enviar la energía a los distintos elementos de radio presentes en la RRH. Esta arquitectura ha



permitido mejorar el aislamiento y aumentar la seguridad de la RRH contra descargas eléctricas, al reemplazar el cable coaxial por fibras ópticas [14][15]. No obstante, en los escenarios actuales la conexión a la RRH continúa siendo en el mejor de los casos híbrida, pues para el envío de la energía se usa el cable de cobre. En este contexto, los sistemas PoF podrían convertirse en una alternativa viable de alimentación remota de envío de datos y energía usando la misma fibra, lo cual garantiza un nivel de protección superior a la solución tradicional.

Finalmente, el campo de los sensores es un área que en los últimos años ha crecido exponencialmente motivado fundamentalmente por el desarrollo de sistemas de monitorización en el contexto de las aplicaciones de IoT y gracias a las capacidades de tecnologías como 5G, lo cual abre un amplio abanico de explotación y desarrollo de aplicaciones en diferentes sectores. La tecnología PoF, al igual que otras tecnologías, se puede utilizar para alimentar a diferentes sistemas en este contexto. Sin embargo, los sistemas PoF poseen un valor añadido gracias a utilizar la fibra óptica como medio transmisor de la energía, convirtiendo a esta como la solución de alimentación ideal en múltiples escenarios. Así, en algunos casos transmitir señales eléctricas puede ser muy peligroso por el riesgo que supone la ocurrencia de chispas en ciertas aplicaciones. Algunos ejemplos de estos escenarios pueden ser plantas químicas o refinerías de combustibles donde las atmósferas son potencialmente explosivas. En otros casos es interesante usar la tecnología gracias a la inmunidad de la fibra a las radiaciones electromagnéticas. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son: mediciones de campo electromagnético, de corriente en torres de alta tensión o monitorización de parámetros en subestaciones, entre otras.

De acuerdo con lo anterior en este trabajo de investigación se ha incluido un capítulo para el desarrollo de las aplicaciones en el campo de los sensores y 3 para el análisis de las aplicaciones de *Power over Fiber* en escenarios de comunicaciones, específicamente en el contexto de la tecnología 5G.

## 1.2 Objetivos

La alimentación con luz o *Power over Fiber* es una tecnología de transmisión de energía, que en los últimos años se ha integrado en diferentes campos como en los sensores y en las comunicaciones por brindar a los sistemas de inmunidad electromagnética y aislamiento galvánico entre otras ventajas. Por esta razón el principal objetivo de esta investigación es estudiar y desarrollar sistemas de alimentación con luz que integren soluciones con inteligencia en el campo de los sensores y de las comunicaciones, asegurando una optimización y gestión del consumo energético. Este objetivo se lleva a cabo a través de los siguientes objetivos específicos:

- Objetivo 1:** Diseñar e implementar prototipos y sistemas que permitan evaluar la tecnología de alimentación con luz en aplicaciones con sensores escalables con capacidades de gestión remota e inteligencia.
- Objetivo 2:** Diseñar e implementar sistemas que permitan evaluar la transmisión de datos y energía, usando diferentes técnicas de multiplexación y distintos tipos de fibras ópticas en el *fronthaul* óptico de una red 5G.
- Objetivo 3:** Caracterizar y evaluar el impacto de los fenómenos no lineales en los sistemas de *Power over Fiber* usando técnicas de simulación y a través de experimentos de laboratorios.
- Objetivo 4:** Evaluar los consumos y desarrollar sistemas de gestión de la energía basados en *Power over Fiber* que contribuyan a minimizar el consumo de las redes 5G, basado en el control selectivo e inteligente de elementos de radiofrecuencia (RF) en escenarios de Radio Analógica sobre Fibra (ARoF).

### 1.3 Contenido de la investigación

A continuación, se describe la organización de este documento:

En el **capítulo 2** se presentan los conceptos y la configuración básica de un sistema PoF; así como los parámetros que definen a cada uno de sus elementos. En relación con la fuente de energía, se tratan los láseres Raman y de semiconductor. En ambos casos se discuten todos aquellos parámetros que tienen un impacto directo en las eficiencias energéticas del sistema (SEE, por sus siglas en inglés) y global (GEE, por sus siglas en inglés). En el caso del láser Raman se presentan algunos ejemplos de topologías que permiten la generación de una longitud de onda de emisión de 1480 nm. En el medio de transmisión, se presentan parámetros como el área efectiva y el diámetro de campo modal (MFD), los cuales limitan el envío de energía por la fibra óptica. En la sección del conversor, se abordan algunos temas teóricos que ayudan a la comprensión del parámetro eficiencia de conversión y de los diferentes modelos eléctricos de la celda. Finalmente, se discuten las diferentes configuraciones de los sistemas PoF y los aspectos críticos que se deben considerar en su implementación en el contexto de las comunicaciones y los sensores, haciendo énfasis en los fenómenos no lineales.

En el **capítulo 3** se abordan las aplicaciones en el campo de los sensores, específicamente en aplicaciones de IoT y en entornos peligrosos. Se discuten las consideraciones más relevantes a tener en cuenta en el desarrollo de un sistema PoF que opera en primera ventana. Se presentan diferentes versiones de módulos que operan a 808 nm y de nodos sensores que se desarrollan en el marco de esta investigación, para demostrar en la práctica las diferentes aplicaciones. A lo largo del capítulo también se abordan temas como el *fiber fuse* y el impacto del diámetro modal en el umbral de potencia soportado por la fibra, y se lleva a cabo un análisis de escalabilidad en configuración Punto a Multipunto (P2M).

En el **capítulo 4** se abordan los principales conceptos asociados a la tecnología 5G, y se centra en la implementación y análisis de escenarios sinérgicos usando la tecnología PoF en una arquitectura C-RAN. Se lleva a cabo un análisis de consumo en la RRH que permite evaluar los requerimientos energéticos demandados por la tecnología 5G. Adicionalmente se desarrolla una plataforma PoF que implementa funcionalidades de bajo consumo y de medida remota con varios sensores a través de un canal de comunicaciones. Esta funcionalidad permite supervisar y controlar desde la CO parámetros de la RRH. También se valida experimentalmente la integración de la tecnología 5G y PoF (5G/PoF) a través de la

alimentación de un amplificador de RF, integrado en un escenario ARoF, usando la plataforma desarrollada. Finalmente se evalúa el comportamiento del sistema integrado 5G/PoF usando como métrica el valor del EVM.

En el **capítulo 5** se aborda el impacto de los principales parámetros de la fibra óptica en la transmisión de los datos en un escenario de comunicaciones 5G, como consecuencia de la transmisión de energía en un escenario compartido. Para el análisis se llevan a cabo diferentes experimentos de laboratorio y simulaciones en un escenario ARoF operando en bandas milimétricas, con portadoras de RF inferiores a 20 GHz. Adicionalmente, se analiza la influencia del efecto Kerr y el fenómeno de dispersión Raman estimulada (SRS) en el comportamiento de la frecuencia crítica del sistema y la aparición del fenómeno de *power fading*. Finalmente, se analiza el efecto del ruido de intensidad del láser HPL y los efectos de su acoplamiento en el canal de datos a través del fenómeno SRS. En todos los casos, se usa el EVM como métrica para la caracterización de los sistemas.

En el **capítulo 6** se aborda una solución de *Power over Fiber* (PoF) integrada en el *fronthaul* óptico de una red 5G en configuración C-RAN, operando a una frecuencia de RF de 25,5 GHz. En el diseño se emplea la multiplexación espacial (SDM) integrando la alimentación PoF sobre una fibra multinúcleo de 10 km, con el objetivo de alimentar y controlar elementos críticos de la RRH para gestionar remotamente su consumo energético. En el diseño se implementa un control inteligente basados en agentes. Adicionalmente, se caracterizan los sistemas ARoF y PoF y se evalúa el impacto de la transmisión de energía sobre el sistema ARoF para las modulaciones QPSK, 16 QAM y 64 QAM usando como métrica el valor del BER. En el capítulo también se exploran dos ejemplos de aplicación basados en las fibras ópticas MCF (*Multicore Fiber*) y SMF (*Single Mode Fiber*) para la optimización del consumo energético de la RRH. Finalmente, se discute la implementación de una técnica, basada en redes *Tilted Fibre Bragg Grating* (TFBG) sobre fibras multinúcleo, para la monitorización de la potencia recibida en el lado de la RRH.

En los **capítulos 7 y 8** se resumen, en castellano y en inglés, las principales conclusiones de esta investigación y se proponen líneas de trabajos futuros.

### 1.4 Agradecimientos

Para el desarrollo de este trabajo ha sido fundamental la financiación de los proyectos que se detallan a continuación:

- Agencia Estatal de Investigación, “Tecnologías avanzadas inteligentes basadas en fibras ópticas/*Advanced SMART technologies based on Optical Fibers (SMART-OF)*”, *grant no. RTI2018-094669-B-C32, within the coordinated project “Polymer Optical Fiber Disruptive Technologies (POFTECH)*”.
- Agencia Estatal de Investigación “Laboratorio de montaje, medida y CARacterización de antenas y dispositivos integrados fotónico para comunicaciones 5G y de espacio en milimétricas, submilimétricas y THz (hasta 320 GHz) (LACA5G)”, *grant no. EQC2018-005152-P*.
- Comunidad de Madrid “TElealimentación FotovoLtaica por fibra Óptica para medida y coNtrol en entornos extremos (TEFLON-CM)”, *grant no. Y2018/EMT-4892*.
- Comunidad de Madrid “Sensores e Instrumentación en Tecnologías Fotónicas 2 (SINFOTON-2)”, *grant no. P2018/NMT-4326, coordinated project with UC3M- UPM-UAH- URJC -CSIC*.
- 5GPPP-H2020 *European Union programme Bluespace project “Building the Use of Spatial Multiplexing 5G Networks Infrastructures and Showcasing Advanced Technologies and Networking Capabilities” grant no.762055*.

Así mismo, agradezco el apoyo brindado por todos durante el desarrollo de mis estancias en Eindhoven *University of Technology* (TUE), financiada por el Programa Propio de la Universidad Carlos III de Madrid para la movilidad de investigadores en formación predoctoral, que ha permitido la toma de medidas descritas en el capítulo 6. Igualmente, agradezco a Rubén Altuna Pérez la colaboración en el desarrollo del *software* de control y a Gabriel Otero Pérez por el apoyo en la integración con el agente de movilidad.

## 1.5 Referencias

- [1] J. B. Rosolem, “Power-Over-Fiber Applications for Telecommunications and for Electric Utilities,” in *Optical Fiber and Wireless Communications*, R. Roka, Ed. InTech Publishing, 2017.
- [2] Cisco, “Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report (2018–2023).” <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (accessed Sep. 12, 2021).
- [3] ITU, “Report ITU-R M.2083-0. Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond M Series Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services,” Geneva, 2015. Accessed: Jun. 29, 2021. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>.
- [4] P. Chanclou, L. A. Neto, G. Simon, A. El Ankouri, S. Barthomeuf, and F. Saliou, “FTTH and 5G Xhaul synergies for the present and future,” in *International Conference on Transparent Optical Networks*, Jul. 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICTON.2019.8840034.
- [5] J. I. Kani, J. Terada, K. I. Suzuki, and A. Otaka, “Solutions for Future Mobile Fronthaul and Access-Network Convergence,” *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 527–534, Feb. 2017, doi: 10.1109/JLT.2016.2608389.
- [6] T. R. Raddo, S. Rommel, B. Cimoli, and I. T. Monroy, “The optical fiber and mmwave wireless convergence for 5G fronthaul networks,” in *IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, Sep. 2019, pp. 607–612, doi: 10.1109/5GWF.2019.8911613.
- [7] C. Liu, L. Zhang, M. Zhu, J. Wang, L. Cheng, and G. K. Chang, “A novel multi-service small-cell cloud radio access network for mobile backhaul and computing based on radio-over-fiber technologies,” *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 17, pp. 2869–2875, 2013, doi: 10.1109/JLT.2013.2274193.
- [8] Huawei, “5G Ultra-Lean Site,” 2019. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: [https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019/pdf\\_v1.0/5G-Ultra-Lean-Site-White-Paper\\_en.pdf](https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019/pdf_v1.0/5G-Ultra-Lean-Site-White-Paper_en.pdf).
- [9] Huawei, “5G Power Whitepaper,” 2019. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: <https://carrier.huawei.com/~media/CNBNB/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf>.
- [10] P. Frenger and R. Tano, “A technical look at 5G energy consumption and performance - Ericsson,” *Ericsson*, 2019. <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/9/energy-consumption-5g-nr> (accessed Jun. 24, 2021).
- [11] B. Debaillie, C. Desset, and F. Louagie, “A flexible and future-proof power model for cellular base stations,” in *IEEE Vehicular Technology Conference*, Jul. 2015, vol. 2015, doi: 10.1109/VTCspring.2015.7145603.
- [12] J. Wu, Y. Zhang, M. Zukerman, and E. K. N. Yung, “Energy-efficient base-stations sleep-mode techniques in green cellular networks: A survey,” in *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Apr. 2015, vol. 17, no. 2, pp. 803–826, doi: 10.1109/COMST.2015.2403395.
- [13] EXFO, “FTTA | Fiber-to-the-Antenna | Distributed Antenna System | Remote Radio Heads | Cell Site.” <https://www.exfo.com/es/recurros/glosario/fiber-antenna/> (accessed Nov. 14, 2021).
- [14] M. Denker, “Remote Radio Head systems - Requirements and concept of lightning and overvoltage protection,” in *Intelec 2013; 35th International Telecommunications Energy Conference, Smart Power Efficiency*, 2013, pp. 1–5.
- [15] P. McClusky and J. L. Schroeder, “Fiber-to-the-antenna: Benefits and protection requirements,” in *Intelec 2012*, 2012, pp. 1–6, doi: 10.1109/INTLEC.2012.6374502.

# Capítulo 2

## Transmisión de energía basada en fibra óptica

Resumen:

En este capítulo se presentan los sistemas de *Power over Fiber* (PoF) como una tecnología emergente capaz de transmitir energía a cortas y largas distancias usando una fibra óptica para alimentar dispositivos remotos. También se abordan los principales conceptos teóricos y parámetros vinculados a cada uno de los elementos que integran a un sistema PoF. El principal objetivo de este acercamiento es sentar los principios que ayuden a la comprensión del resto de los capítulos que integran esta investigación. En los primeros epígrafes se definen los elementos que integran la tecnología, el estado de la técnica y sus características. Finalmente se abordan las consideraciones y aspectos críticos que pueden limitar la implementación de los sistemas PoF.

## 2.1 Introducción

El conductor de cobre es el medio físico que tradicionalmente se utiliza para transportar energía entre diferentes puntos. Sin embargo, en los últimos años una nueva tecnología llamada *Power over Fiber* (PoF) se ha comenzado a utilizar para el mismo propósito. Esta idea fue desarrollada por primera vez en la década de los 70 por la compañía *American Telephone y Telegraph* (AT&T) en el campo de la telefonía usando fibra óptica en la alimentación de algunas partes de un teléfono en lugar del cobre tradicional [1].

Esta tecnología tiene varias ventajas frente al uso del cobre, por las propiedades intrínsecas que posee la fibra óptica tales como: inmunidad ante las interferencias electromagnéticas, brinda aislamiento galvánico y peso reducido.

El uso de esta tecnología es interesante en aplicaciones de monitorización en redes de alta tensión con requerimiento de aislamiento galvánico, en aplicaciones de generación de energía nuclear, así como en el sector de la automoción y de la aviación. Por otro lado, un escenario de especial atención en cuanto a la aplicación de esta tecnología es el sector de las comunicaciones, por las ventajas que puede brindar la sinergia entre la transmisión de energía y datos por el mismo medio físico. A modo de ejemplo, en aplicaciones en las que se desee amplificar la señal de datos al tiempo que se transmite energía.

Estos escenarios sinérgicos de transmisión de energía y datos son un concepto ya estandarizado en la industria con la implementación de diferentes tecnologías como por ejemplo: *Power over Ethernet* (PoE), *Wireless Power Transfer* (WPT) o *Power Line Communications* (PLC), entre otras.

La tecnología PoE está basada en conductores de cobre y permite alimentar varios dispositivos de una red de área local al mismo tiempo que se intercambia información usando el cobre como medio físico. Su lanzamiento tuvo lugar a lo largo del año 2003, utilizando el estándar IEEE802.3af que entregaba una potencia máxima de 12,95 W al dispositivo remoto soportando una velocidad máxima de 100 Mbps [2]. Una versión mejorada de la tecnología fue estandarizada en el año 2017 (802.3bt), entregando potencias máximas de 71 W en una distancia de 100 metros. Actualmente, la principal desventaja es la limitación en ancho de banda y en potencia máxima que se puede transmitir sin afectar a las comunicaciones para largas distancias.



Otro ejemplo similar es la tecnología WPT, mediante la cual se transfiere energía a un dispositivo sin necesidad de contacto. El concepto fue enunciado por primera vez por Nikola Tesla en el siglo XIX. Su aparición ha permitido que dispositivos como teléfonos inteligentes, coches [3][4] e implantes biomédicos sean alimentados usando el espacio libre al tiempo que intercambian información vía protocolos WiFi o Bluetooth . En la actualidad las distancias que se emplean en esta tecnología alcanzan unas decenas de metros y las potencias transmitidas se reducen a niveles no muy elevados. En [5] se logró transferir una potencia de 10,3 W a una distancia de 7 metros usando acoplamiento inductivo, mientras que empresas tales como Emrod estudia escenarios de aplicación que abarcan decenas de metros usando antenas rectificadoras de microondas [6][7].

Otro ejemplo de tecnología que puede englobarse en la categoría de medios sinérgicos es la tecnología PLC. En dicha tecnología se utiliza el conductor de cobre, como medio conductor de energía en comunicaciones de banda ancha y se ha explorado en aplicaciones navales, en la aviación, trenes, sistemas de seguridad, entre otras, con un ancho de banda típico de decenas de MHz [8].

Por otro lado, en [9] se plantea una solución en la que se integra el cable de cobre y la fibra óptica en una misma estructura. En esta solución híbrida se aprovecha las ventajas de la fibra óptica y del cobre para el transporte de datos y de energía respectivamente.

La expansión de la tecnología *Power over Fiber* en los próximos años, al igual que ha ocurrido con las tecnologías anteriormente descritas, dependerá en gran medida de las mejoras a corto o medio plazo que se puedan introducir en los elementos claves del sistema. Si bien es cierto, que se ha mejorado mucho en el desarrollo de la tecnología, la realidad es que aún no ha motivado a las grandes compañías del sector para una implementación a gran escala. No obstante, hasta la fecha se han desarrollado un conjunto de aplicaciones en diferentes escenarios que demuestran un futuro prometedor, algunas de las cuales se presentarán en el marco de este trabajo.

## 2.2 Alimentación con luz (PoF, *Power over Fiber*)

Esta tecnología más conocida en inglés como *Power over Fiber*, abreviadamente PoF o PWO<sub>F</sub>, se define como la transmisión de energía a un dispositivo remoto usando una fibra óptica.

La configuración básica está integrada por una fuente de energía óptica, típicamente un láser, una fibra óptica y un dispositivo convertidor de energía o, en inglés, *PhotoVoltaic Cell* (PVC). La potencia se suministra a una carga eléctrica, la cual depende de la aplicación, véase la Figura 2.1.

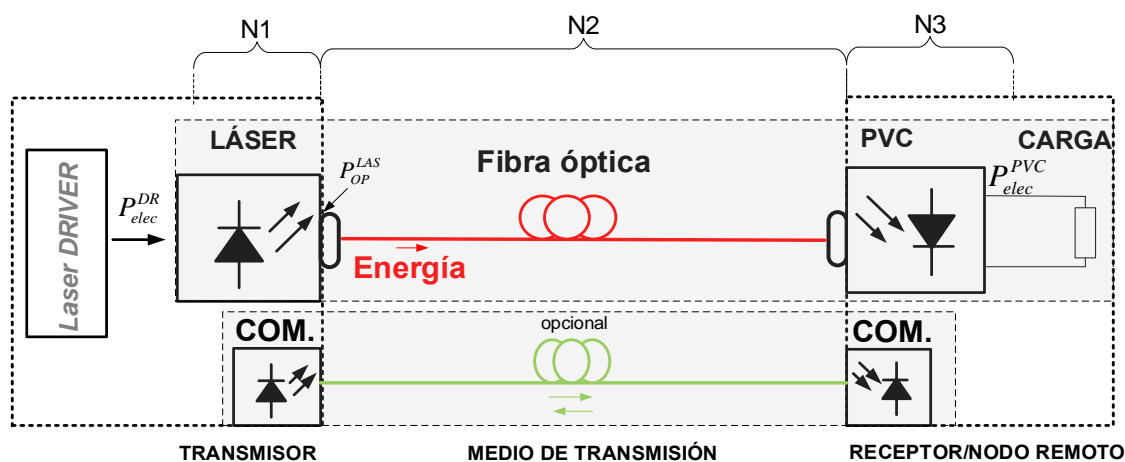


Figura 2.1. Configuración básica de un sistema PoF, con un canal de comunicaciones (COM) para el intercambio de información entre el transmisor y el receptor.

Estos sistemas suelen tener, además de los elementos antes mencionados, otros componentes electrónicos que permiten el control y la gestión de la potencia eléctrica en el lado transmisor y en el receptor como por ejemplo el *láser driver*. En esta investigación, de manera genérica a los elementos que están situados después de la fibra óptica se les llamará nodo remoto o receptor. En cambio a los elementos ubicados en el lado del transmisor, en función del escenario, se les llamará elementos de la Oficina Central o CO. En el resto del documento, se usan los acrónimos HPL (*High Power Laser*) y HPLD (*High Power Laser Diode*), en función del tipo de láser, para hacer referencia a la fuente de energía del transmisor PoF.

Un parámetro importante en este tipo de sistema es la eficiencia, que puede tener en cuenta diferentes factores. En este trabajo hablaremos fundamentalmente de dos eficiencias: *System Energy Efficiency* (SEE) [10] y *Global Energy Efficiency* (GEE) [11]. Ambos parámetros permiten determinar el rendimiento de un sistema PoF y están definidas como:

$$SEE = \frac{\text{potencia eléctrica entregada por la PVC}}{\text{potencia de emisión del láser}} = \frac{P_{elec}^{PVC}}{P_{OP}^{LAS}} \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$GEE = \frac{\text{potencia eléctrica entregada por la PVC}}{\text{potencia eléctrica suministrada al láser}} = \frac{P_{elec}^{PVC}}{P_{elec}^{DR}} \quad \text{Ec. 2.2}$$

donde  $P_{elec}^{PVC}$  es la potencia eléctrica suministrada por la celda a la carga,  $P_{OP}^{LAS}$ , es la potencia óptica de emisión del láser, y  $P_{elec}^{DR}$  es la potencia eléctrica que el *driver* suministra al láser.

Por otro lado, los sistemas PoF, en función de la aplicación, pueden incluir un canal de comunicación (COM) para el intercambio de información entre el transmisor y el nodo remoto. La comunicación puede ser bidireccional o unidireccional, en función de la aplicación. Esta característica le brinda mayor capacidad de gestión e inteligencia al nodo. El canal COM suele usar un láser de uso típico en las aplicaciones de comunicaciones, con una potencia de emisión varios órdenes de magnitud inferior a la que suministra el HPL como fuente de energía en las aplicaciones PoF. Por último, en los sistemas PoF es recomendable minimizar el consumo de potencia de toda la electrónica complementaria que se usa para el funcionamiento del canal COM ( $P_{elec}^{COM}$ ), de forma que  $P_{elec}^{COM} \ll P_{elec}^{PVC}$ .

### 2.3 Fuente de energía óptica

El láser es la fuente de energía que típicamente se utiliza en los sistemas PoF. Estos dispositivos se caracterizan por la coherencia, direccionalidad, monocromaticidad y alta intensidad de la luz emitida a través del proceso de emisión estimulada. Por esta razón el término láser es el acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

Einstein dio la base teórica para el desarrollo del láser en 1916, cuando predijo la posibilidad de la emisión estimulada y en 1954, C.H. Townes y sus colaboradores pusieron en práctica la predicción de Einstein [12].

En los últimos años la tecnología láser ha tenido un importante desarrollo, motivado fundamentalmente por sus aplicaciones en diferentes industrias. Un requerimiento recurrente en la tecnología del láser y que ha marcado hitos en su desarrollo es el incremento en la potencia óptica de emisión, siendo esto de gran interés para el desarrollo de diferentes aplicaciones como: corte de metales, industria del armamento, alimentación de drones y transmisión de energía por sólo mencionar algunas. En la actualidad, estas potencias pico están en el orden de los Petawatt [13][14]. La Figura 2.2 muestra la máxima potencia lograda hasta la fecha y su proyección de evolución futura.

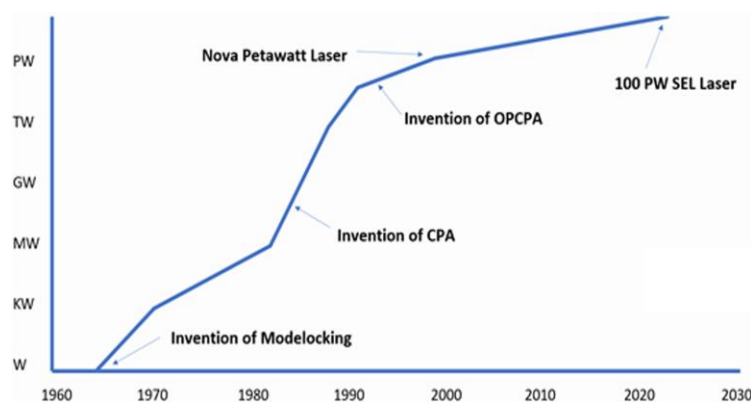


Figura 2.2. Evolución de los picos máximos de la potencia de emisión en láseres de pulsos ultra cortos: *CPA*: *Chirped Pulse Amplification*; *OPCA*: *Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification*; *SEL*: *Station of Extreme Light* [14].

Por otro lado, los láseres suelen identificarse por su medio de ganancia o medio activo y a menudo se clasifican por las especies radiantes que dan lugar a la emisión estimulada. Estas especies radiantes pueden incluir átomos y moléculas en un gas diluido, moléculas orgánicas disueltas en una concentración relativamente baja en soluciones líquidas, materiales semiconductores y dieléctricos como sólidos cristalinos dopados con una alta concentración de iones. La Tabla 2.1 muestra un resumen de diferentes tipos de láseres clasificados según su tipo y órdenes de magnitud de la potencia máxima de emisión.

## Fuente de energía óptica

Tabla 2.1. Parámetros de algunos tipos de láseres y sus potencias ópticas de emisión en la longitud de onda de operación [15].

Láser	Tipo	Longitud de onda[nm]	Potencia
AlGaInP, AlGaAs	Semiconductor	630-900	0,01 mW-10 W
Ti:Saph	Estado sólido	650-1100	10 W
Yb:YAG	Estado sólido	1030	W-kW
Nd:YAG	Estado sólido	1060	W-kW
InGaAs, InGaAsP	Semiconductor	1100-2000	mW-W
Yb-glass	Fibra	1030	W-kW

Nota: la columna potencia sólo muestra órdenes de magnitud típicos y no la potencia máxima de emisión.

Entre los láseres mostrados anteriormente destacan, para las aplicaciones PoF, los láseres de semiconductores por su pequeño tamaño, su alta potencia óptica de emisión, eficiencia y su compatibilidad con los componentes electrónicos y su brillo. Este último parámetro ha mantenido un crecimiento lineal en los últimos años, pasando de 100 mW en 105  $\mu\text{m}$  de diámetro en una fibra óptica en el año 1985 a tener en la actualidad cientos de vatios en la misma área, véase la Figura 2.3 [16].

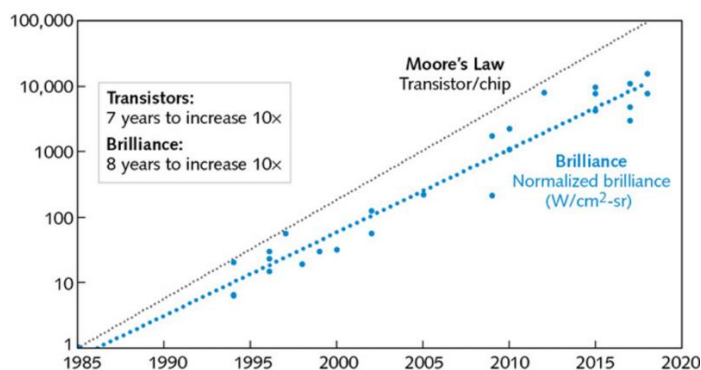


Figura 2.3. Brillo de los láseres de semiconductores de alta potencia [16].

No es de extrañar entonces que sean una de las clases de láseres más importantes en la actualidad y que se utilicen para la implementación de diferentes aplicaciones, entre ellas la PoF. Otra opción para considerar son los láseres de fibra ya que emiten potencias ópticas en el rango de interés para el desarrollo de sistemas PoF y permiten su integración con diferentes tipos de fibras ópticas. Aunque en algunas aplicaciones, como por ejemplo con sensores, su coste y tamaño pudiera ser una limitación. Este tipo de láseres son un caso

especial de los láseres de estado sólido, en los que el medio de ganancia de estado sólido junto con la cavidad resonante se fabrican dentro de la fibra óptica [15].

### 2.3.1 Parámetros electroópticos de un láser de semiconductor

El láser de semiconductor es un dispositivo, comúnmente llamado diodo láser, en el que al inyectar portadores de cargas en la región de la unión se puede producir una radiación por recombinación. Si la inyección de portadores es lo suficientemente grande se puede lograr una inversión de población lo cual permite que se pueda producir una emisión estimulada. Los láseres semiconductores más comunes son los de estructura Fabry-Perot, láseres *Distributed Feedback laser* (DFB) y los láseres *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser* (VCSEL).

Algunos de los principales parámetros que caracterizan a este tipo de láseres y que además son relevantes en aplicaciones PoF son: la potencia óptica, la longitud de onda de emisión, corriente umbral, eficiencias, el tiempo de vida del láser y el ruido de intensidad que por sus siglas en inglés se conoce como RIN.

#### 2.3.1.1 Potencia óptica de emisión

La potencia óptica ( $P$ ) de emisión del láser es uno de los parámetros más relevantes de un sistema PoF y está directamente relacionado con la corriente inyectada al láser. Esta dependencia se muestra típicamente en la curva de potencia óptica de emisión en función de la corriente que circula por el diodo láser ( $P/I$ ). Esta curva se usa para establecer el punto de operación del láser y la región de emisión espontánea y emisión estimulada, delimitada por el corriente umbral ( $I_{th}$ ), véase la Figura 2.4.

La dependencia  $P/I$  es muy relevante en los sistemas PoF por su estrecha relación con el consumo del transmisor y con el comportamiento de la GEE. El valor de  $P$  suele expresarse en unidades lineales (milivatios: mW; vatios: W) o logarítmica usando 1 mW de potencia óptica como referencia, en este caso el valor se expresa en dBm. Algunos cambios de escala que se utilizan con frecuencia en este trabajo son:  $1\text{ W} = 30\text{ dBm}$  y  $2\text{ W} = 33\text{ dBm}$ .

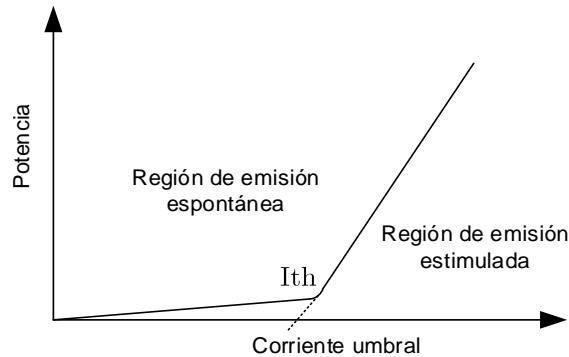


Figura 2.4. Dependencia de la potencia óptica de emisión con la corriente de polarización en un diodo láser de semiconductor.

### 2.3.1.2 Eficiencias del diodo láser

La eficiencia es un parámetro que posee un alto impacto en el diseño y en el rendimiento de los sistemas PoF. Un láser con una eficiencia baja además de tener un impacto negativo en la eficiencia global (GEE) del sistema, dificulta el manejo de mayores potencias disipadas. A continuación, se define la eficiencia cuántica externa y externa diferencial, la eficiencia cuántica interna, y la eficiencia global. La eficiencia cuántica externa diferencial ( $\eta_D$ ) se define como la relación entre el incremento en la cantidad de fotones de salida y del número de electrones inyectados. Esta se encuentra definida por [17, p. 329]:

$$\eta_D = \frac{dP_0/hf}{dI/e} = \frac{dP_0}{(E_g)dI} \quad \text{Ec. 2.3}$$

donde  $P_0$  es la potencia óptica emitida por el dispositivo,  $I$  es la corriente,  $e$  es la carga del electrón,  $hf$  es la energía del fotón y  $E_g$  es la energía de la banda prohibida expresada en electrón-volt (eV). Esta expresión también es conocida como *slope quantum efficiency*, porque define la pendiente de la curva de potencia con respecto a corriente en la zona de emisión estimulada. Otra eficiencia que define el

comportamiento de un láser de semiconductor es la eficiencia cuántica interna, la cual está definida como [17, p. 329]:

$$\eta_i = \frac{\text{número de fotones producidos en la cavidad}}{\text{número de electrones inyectados}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

La relación entre ambas eficiencias viene dada por la expresión [17, p. 329]:

$$\eta_D = \eta_i \left( \frac{1}{1 + \left( 2\bar{\alpha}L / \ln \left( \frac{1}{r_1 r_2} \right) \right)} \right) \quad \text{Ec. 2.5}$$

donde  $L$  es la longitud de la cavidad del láser,  $\bar{\alpha}$  es coeficiente de pérdidas de la cavidad del láser y  $(r_1), (r_2)$  son las reflectividades internas. Otros dos parámetros importantes, son la eficiencia cuántica externa ( $\eta_T$ ) y la eficiencia global o eficiencia del dispositivo ( $\eta_g$ ), las cuales se definen como [17, p. 329]:

$$\eta_T = \frac{\text{total de números de fotones en la salida}}{\text{total de números de electrones inyectados}} = \frac{P_0/hf}{I/e} = \frac{P_0}{IE_g}; \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$\eta_g = \frac{P_0}{P_e} \times 100 = \frac{P_0}{VI} \times 100 \quad \text{Ec. 2.7}$$

donde  $P_e$  es la potencia eléctrica inyecta, obtenida a partir de la corriente  $I$  y el voltaje  $V$  aplicado al dispositivo.

Ambas ecuaciones se pueden relacionar a través de la expresión [17, p. 329]:

$$\eta_g = \eta_T \left( \frac{E_g}{V} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 2.8}$$



Este último valor de eficiencia,  $\eta_g$ , es un parámetro clave en la determinación de la eficiencia global de un sistema PoF en donde, además de considerar esta eficiencia se tienen en cuenta la eficiencia de todos los elementos incluidos en el sistema, de modo que:

$$GEE \propto \eta_g \quad \text{Ec. 2.9}$$

Por otro lado las máximas eficiencias en láseres de semiconductor se encuentran en los láseres basados en GaAs y emitiendo en la banda de 940–980 nm, con eficiencias superiores al 70 % [18] también se han obtenido valores de ese orden a 808 nm [19] si bien comercialmente suelen ser del orden del 40 %. En la banda de 790-1000 nm se han demostrado eficiencias superiores también al 70 %, si bien es más complicado obtenerlas a 780nm, siendo típicamente del orden del 50 % frente a 940 nm donde se alcanzan valores típicamente del 65 %. En el rango de 1400-1600 nm hay soluciones comerciales con eficiencias entre el 20-40 %, incluso a temperaturas altas [20]. En [21] se presenta una eficiencia del 45 % a una longitud de onda de 1550 nm en un diodo láser basado en InGaAsP/InP.

### 2.3.1.3 Efectos de la temperatura de operación

El incremento de temperatura en un sistema PoF es un parámetro que debe ser controlado ya que incide negativamente en el buen funcionamiento del diodo láser. La potencia liberada o disipada ( $P_{\text{disp.}}$ ) en forma de calor por el dispositivo es inversamente proporcional al valor de la eficiencia global enunciada en el epígrafe anterior,  $P_{\text{disp.}} \propto \frac{1}{\eta_g}$ . Esta potencia liberada en forma de calor está típicamente entre unidades de vatios y decenas de vatios, aunque dependerá mucho del escenario de aplicación.

La disipación de calor si no es controlada adecuadamente provoca un incremento de temperatura en el dispositivo ( $\Delta T$ ). Este incremento de temperatura puede expresarse como:

$$\Delta T = R_{TH}(P_e - P_0) = R_{TH}(1 - \eta_g)P_e \quad \text{Ec. 2.10}$$

donde  $R_{TH}$  es la resistencia térmica del dispositivo. El sobrecalentamiento es un efecto no deseado en el dispositivo ya que:

- en términos generales aumenta la densidad de corriente umbral ( $J_{th}$ ) y disminuye la *slope quantum efficiency* ( $SQE$ );
- disminuye la vida útil del dispositivo;
- desplaza la longitud de onda de operación.

El incremento de la densidad de corriente umbral ( $J_{th}$ ) es aproximadamente exponencial con la temperatura en la mayoría de las estructuras de diodos láser. Esta relación viene dada por la expresión [17, p. 351]:

$$J_{th} \propto \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad \text{Ec. 2.11}$$

donde  $T$  es la temperatura del dispositivo en grados Kelvin y  $T_0$  es la temperatura característica del láser (típicamente entre 60 K a 150 K) [22]. La Figura 2.5(a), muestra el incremento de la corriente umbral en 25 mA aproximadamente con un aumento en la temperatura de operación de 60 °C, mientras que la Figura 2.5(b) muestra como la *slope quantum efficiency* disminuye 0,01 mW/mA por cada 10 °C.

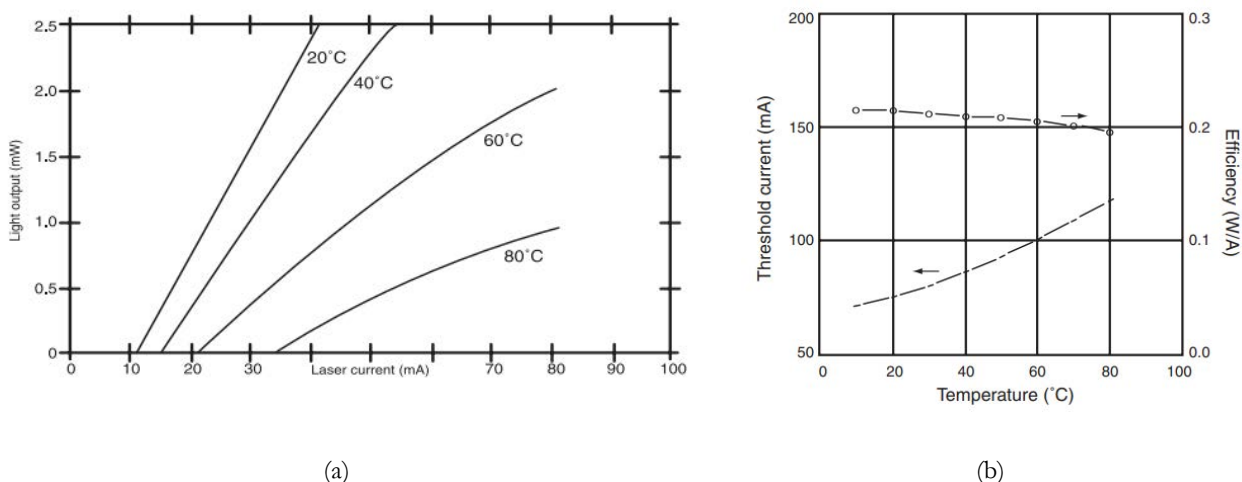


Figura 2.5. Efecto de la temperatura: (a) en el comportamiento de la  $J_{th}$ , (b) en la *slope quantum efficiency* en un láser de semiconductor [22].

Para minimizar estos efectos muchos diodos láser traen en el mismo encapsulado un fotodiodo monitor y/o un sensor de temperatura para monitorizar la potencia óptica de emisión y su temperatura de operación. Estos dispositivos permiten implementar lazos de control para compensar las desviaciones con respecto al punto nominal de operación. Típicamente se ajustan la corriente de inyección y se utilizan dispositivos activos (por ejemplo un elemento Peltier) o pasivos (disipadores metálicos de calor) para el control de la potencia de emisión y la temperatura de operación respectivamente.

Como se comentó anteriormente la temperatura es un parámetro que también afecta a la vida útil del diodo láser. El modelo de Arrhenius es el más común para analizar este efecto, el cual usa la temperatura y la energía de activación para predecir el tiempo de fallo. La expresión que modela este análisis viene dada por la expresión:

$$t_f = A \exp\left(\frac{e_a}{kT}\right) \quad \text{Ec. 2.12}$$

donde  $t_f$  es el tiempo de fallo en horas,  $A$  factor de ajuste,  $e_a$  es la energía de activación en [eV],  $k$  es la constante de Boltzman [8,617E-5 eV/K] y  $T$  la temperatura en grados Kelvin. Esta expresión muestra como el tiempo de vida disminuye con el aumento de la temperatura. En [23] se describe una metodología para estimar este tiempo de vida. La Figura 2.6 muestra como el tiempo de vida aproximadamente decrece a la mitad por cada 20°C de aumento de temperatura.

Por último, la longitud de onda es otro parámetro que varía con la temperatura debido a que modifica el valor de la banda prohibida del semiconductor. Algunos de los valores típicos de desplazamiento de la longitud de onda con respecto a la temperatura son: 0,25 nm/°C en dispositivos que operan a 780 nm y de 0,4 nm/°C a 1300 nm y 1550 nm. En los diodos láseres de tipo DFB la variación es aproximadamente de 0,1 nm/°C [22]. Esta desviación está estrechamente relacionada con el espectro óptimo de conversión o de trabajo de las celdas fotovoltaicas, ya que puede provocar una disminución en la eficiencia de conversión de la celda. Esto es debido a que las celdas en los sistemas PoF están optimizadas para operar a una longitud de onda específica.

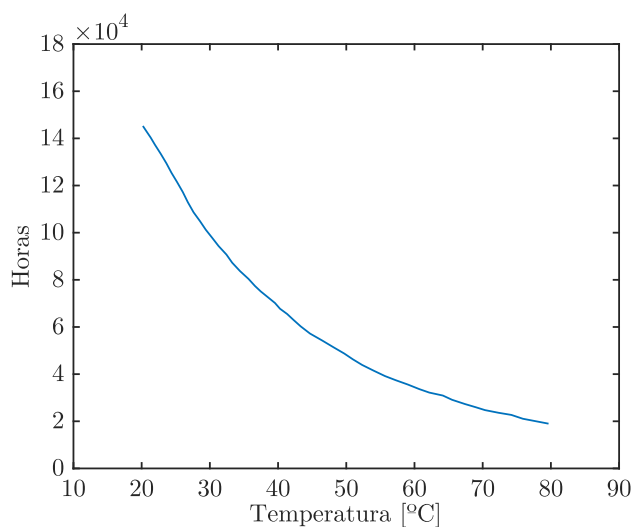


Figura 2.6. Impacto de la temperatura en el tiempo de vida de un láser de semiconductor [23].

### 2.3.1.4 Ruido Relativo de Intensidad

La salida de un láser de semiconductor presenta fluctuaciones en su intensidad, fase y frecuencia incluso cuando el láser está polarizado a una corriente constante con fluctuaciones de corrientes insignificantes. Los dos mecanismos de ruido fundamentales son la emisión espontánea y la recombinación electrón-hueco (*shot noise*). El ruido en los láseres de semiconductores está dominado por la emisión espontánea. Cada fotón emitido espontáneamente añade al campo coherente (establecido por la emisión estimulada) un pequeño componente de campo cuya fase es aleatoria, por lo que perturba tanto la amplitud como la fase. El parámetro que cuantifica estas inestabilidades temporales es el *Relative Intensity Noise (RIN)* y está definido por la siguiente ecuación

$$RIN = \frac{\langle \Delta P^2 \rangle}{P^2}; [dB/Hz] \quad \text{Ec. 2.13}$$

donde  $\langle \Delta P^2 \rangle$  es la media cuadrática de las fluctuaciones de la potencia óptica en un ancho de banda de 1 Hz a una frecuencia determinada y  $P$  es la potencia óptica promedio [17, p. 358].

### 2.3.2 Láser Raman

En este epígrafe se discuten algunas de las características específicas de los láseres Raman y se omite la discusión de los parámetros generales que son comunes para cualquier fuente óptica y que fueron abordados en los epígrafes anteriores. La discusión está dividida en dos epígrafes: amplificación y soluciones de láseres Raman que operan a una longitud de onda concreta.

Al inicio del epígrafe se enuncian las ecuaciones básicas que rigen el proceso de amplificación basado en el fenómeno Raman en fibra óptica de sílice y finalmente se presentan algunas topologías usadas para implementar el tipo de láser basado en este principio. En esta última sección se ha hecho mayor énfasis en las soluciones que operan a 1480nm, por ser la longitud onda de operación que se ha utilizado en algunos de los sistemas de los capítulos posteriores.

#### 2.3.2.1 Amplificación Raman

El Láser Raman de fibra es un tipo de láser de estado sólido donde el medio de ganancia está integrado en la propia fibra óptica y que está basado en el fenómeno no lineal *Stimulated Raman Scattering* (SRS). Durante este proceso, observado por primera vez en 1962 [24], se transfiere energía de una frecuencia óptica de bombeo a la frecuencia óptica de emisión (onda *Stoke*) durante la propagación de la onda de bombeo. Para el caso de la fibra óptica de sílice, la máxima transferencia de energía ocurre a una frecuencia óptica  $\omega_s$  desplazada 13,2 THz de la frecuencia óptica de bombeo,  $\omega_p$ . La Figura 2.7 muestra, como ejemplo, el espectro de ganancia Raman para la fibra óptica de sílice, el cual posee un ancho aproximado de 40 THz [25, p. 36].

Por otro lado, para comprender brevemente un láser Raman basado en fibra es necesario enunciar algunos conceptos y expresiones teóricas de un sistema Raman, tales como: coeficiente de ganancia, ganancia neta y eficiencia.

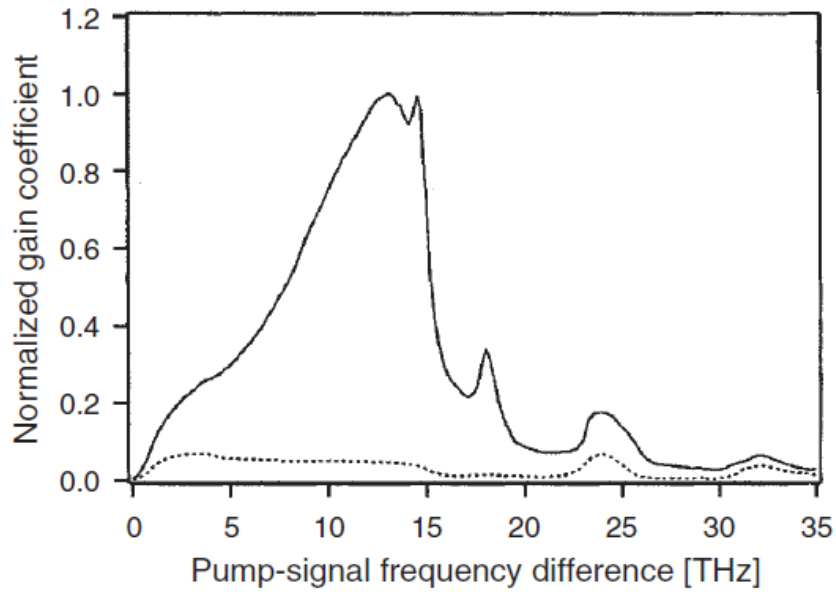


Figura 2.7. Espectro de la ganancia Raman en la fibra de sílice; línea continua: la señal y el bombeo tienen la misma polarización, línea discontinua: señales ortogonales [25, p. 34].

El proceso de amplificación Raman está gobernado por dos ecuaciones diferenciales [25, p. 40] que describen la propagación de la señal y de la onda de bombeo:

$$\frac{dP_s}{dz} = g_R P_p P_s - \alpha_s P_s \quad \text{Ec. 2.14}$$

$$\xi \frac{dP_p}{dz} = \frac{\omega_p}{\omega_s} g_R P_p P_s - \alpha_p P_p \quad \text{Ec. 2.15}$$

donde  $\omega_p$  y  $\omega_s$  son las frecuencias ópticas del bombeo y la señal respectivamente,  $\alpha_p$  son las pérdidas de la longitud de onda de bombeo,  $\alpha_s$  son las pérdidas de la longitud de onda de la señal (Stokes),  $P_p$  es la potencia de la fuente de bombeo inyectada en la fibra,  $P_s$  es la potencia óptica de la señal,  $g_R$  es la ganancia Raman del medio (con unidades  $\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$ ),  $\xi$  puede ser  $\pm 1$ , siendo  $-1$  para el caso de un bombeo contra-propagante y  $\xi=1$  cuando bombeo y señal viajan en la misma dirección (co-propagación). A partir de las las ecuaciones anteriores y considerando que la potencia de bombeo es mucho mayor que la potencia de la señal ( $P_p \gg P_s$ ), se puede asumir que  $g_R = 0$  en la Ec. 2.15 y sabiendo que  $P_p(z) = P_0 \exp(-\alpha_p z)$ ,

donde  $P_0$  es la potencia óptica en la entrada de la fibra, y sustituyendo en la Ec. 2.14 se obtiene que [25, p. 40]:

$$\frac{dP_s}{dz} = g_R P_0 \exp(-\alpha_p z) P_s - \alpha_s P_s \quad \text{Ec. 2.16}$$

Integrando la ecuación anterior se obtiene que [25, p. 40]:

$$P_s(L) = P_s(0) \exp(g_R P_0 L_{eff} - \alpha_s L) \equiv G(L) P_s(0) \quad \text{Ec. 2.17}$$

calculándose la longitud efectiva ( $L_{eff}$ ) como:

$$L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha_p L)) / \alpha_p \quad \text{Ec. 2.18}$$

En la Ec. 2.17 al término exponencial se le conoce como ganancia neta, el cual se puede expresar como [25, p. 180]:

$$G(L) = \exp\left(g_R P_0 \left(\frac{1 - \exp(-\alpha_p L)}{\alpha_p}\right) - \alpha_s L\right) \quad \text{Ec. 2.19}$$

Una vez definidos los parámetros anteriores se puede definir la eficiencia de conversión ( $\eta_{CE}$ , bombeo-señal), como:

$$\eta_{CE} = \frac{P_s(L) - P_s(0)}{P_0} \times 100 = \frac{(G(L) - 1)P_s(0)}{P_0} \times 100 \quad \text{Ec. 2.20}$$

donde  $P_s(L)$  y  $P_s(0)$  son la potencia de la señal a la salida y a la entrada respectivamente, mientras que  $P_0$  es la potencia de bombeo.

Como se observa en la expresión anterior la eficiencia del sistema es inversamente proporcional a la potencia de bombeo. Un mecanismo muy empleado para disminuir los requerimientos del bombeo es usar técnicas de dopado en la fibra óptica, convirtiéndola en un medio de ganancia más eficiente [25, p. 178].

Como se ha comentado anteriormente en este tipo de láser el medio de ganancia es la fibra óptica, la cual típicamente se encuentra dopada con iones de tierras raras (*rare-earth*). La Figura 2.8 muestra algunos de los iones más comunes tales como: Erblio (Er), Iterbio (Yb) y Tulio (Tm).

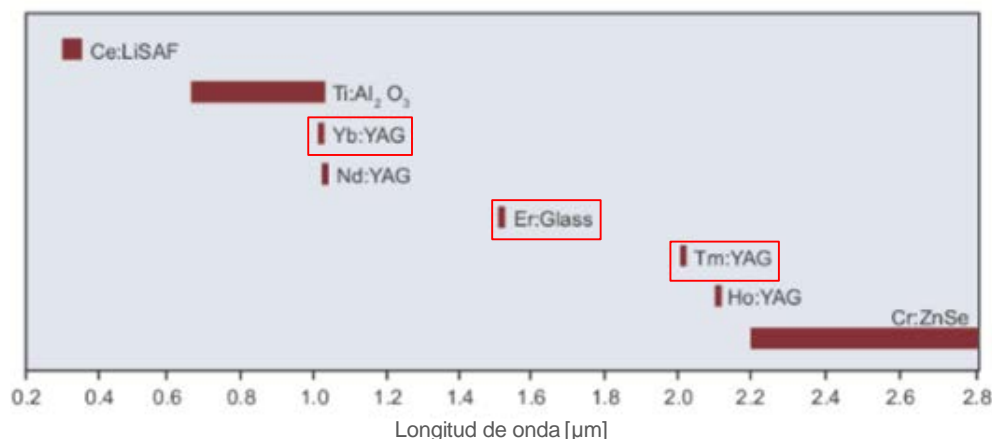


Figura 2.8. Ancho de banda de ganancia de los materiales más comunes de los láseres de estado sólido [15].

Este tipo de láser puede usar como fuente de bombeo un láser de semiconductor e incluso un láser de estado sólido [26] [27]. En la Figura 2.9 se muestra los diferentes elementos que conforman un láser Raman de fibra con un bombeo de láser de semiconductor, un medio de ganancia basado en una fibra óptica, por ejemplo con fibras de doble cubierta (DCF) y dopadas con tierras raras, y por último la cavidad resonante, la cual puede estar basada en *Fiber Bragg Grating* (FBG) [24][25, p. 24].

Las fibras de doble cubierta han jugado un papel clave en el desarrollo de los láseres Raman de fibra ya que han permitido crear un láser de fibra monomodo a partir de un láser de semiconductor que por lo general requiere de una fibra con un núcleo grande que facilite el acople de la luz. Esta limitación fue resuelta por Snitzer cuando en 1988 desarrolló una nueva estructura de fibra para acoplar mejor la luz de bombeo a la fibra. En aquella época el bombeo basado en láser de semiconductor estaba limitado a la inyección en fibras con un núcleo pequeño. Los estudios de Snitzer permitieron añadir una capa adicional entre el núcleo y el revestimiento tradicional dando origen a la fibra DCF. Esta cubierta interior tenía un índice de refracción inferior al del núcleo, pero superior al de la cubierta exterior. Así, el límite entre el núcleo y la cubierta interior confinaba la luz láser generada en el núcleo dopado, mientras que el límite



entre la cubierta interior y el exterior confinaba la luz de bombeo del diodo en la cubierta interior. Los nuevos avances a partir de esta estructura se dieron introduciendo cambios en la geometría de la fibra, en el dopaje y en las combinaciones de diodos que contribuyeron a aumentar el brillo, la potencia y la eficiencia energética. Estas mejoras han permitido que en la actualidad este tipo de láseres sean capaces de entregar varios kilovatios de potencia óptica. Para su implementación, hay dos configuraciones típicas: a través de un único desplazamiento en frecuencia (configuración de desplazamiento único) o en múltiples desplazamientos (configuración en cascada) [24].

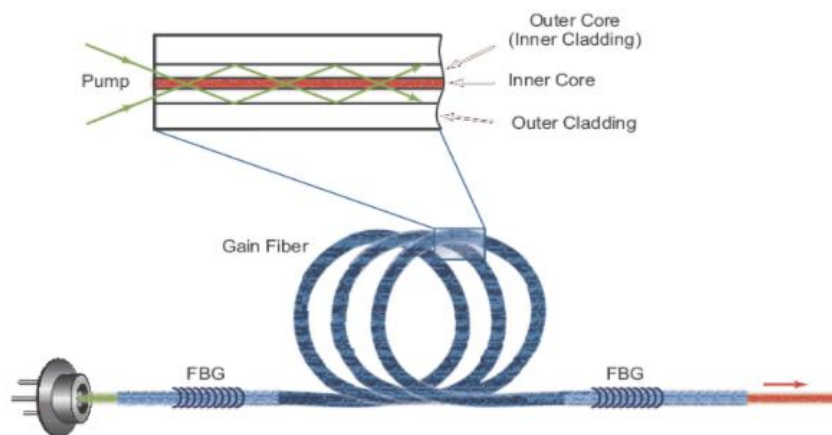


Figura 2.9. Láser de fibra implementado con un láser de semiconductor como fuente de bombeo y usando una fibra de doble cubierta; FBG: *Fiber Bragg Grating* [15].

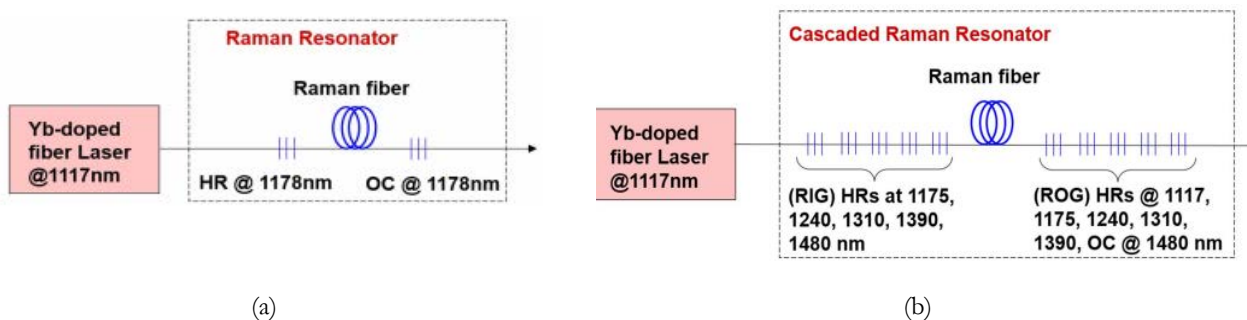


Figura 2.10. Esquema de un láser Raman: (a) con un salto en frecuencia, y en (b) en cascada, RIG: *Raman Input Grating*, ROG: *Raman Output Grating*, HR: *High Reflectivity* [28].

En la configuración de desplazamiento único, la frecuencia objetivo se obtiene a partir de un único de desplazamiento (onda *Stoke* de primer orden). Para proveer direccionalidad al láser típicamente se emplea una FBG con alta reflectividad, mayor del 99 % en la entrada y un acoplador de baja reflectividad entorno del 10 % a la salida [28].

La configuración en cascada permite la generación de la frecuencia deseada a partir de frecuencias intermedias que excitan al medio de ganancia escalonadamente o a saltos hasta alcanzar la frecuencia objetivo. En este caso se dice que el funcionamiento del láser se basa en la generación de dos o más Stokes. Esta técnica se usa para generar una longitud de onda de emisión a 1480 nm a partir de 1117 nm con una fibra dopada con *ytterbium* (Yb).

La eficiencia de conversión (bombeo-señal) es otro parámetro de interés en los sistemas PoF ya que cuantifica lo buena que es la fuente en la generación de la potencia óptica del sistema PoF. La eficiencia de conversión ( $\eta_{CE\_L}$ , bombeo-señal) para un láser Raman de fibra de un único desplazamiento en frecuencia, se puede expresar como [28]:

$$\eta_{CE\_L} = \frac{(1 - R_{oc})P_s(L)}{P_0} \times 100 \quad \text{Ec. 2.21}$$

donde  $R_{oc}$  es la reflectividad del elemento de salida,  $P_s$  la potencia de salida a la longitud  $L$  y  $P_0$  es la potencia de bombeo. Este tipo de láser puede alcanzar valores altos de eficiencia y, a modo de ejemplo, en [29] se presenta un estudio basado en una nueva arquitectura en la que se alcanza una eficiencia del 65 % a una longitud de onda de operación de 1480 nm y una potencia de emisión de 204 W. En [26] y [30], se presentan otras dos soluciones con una longitud de onda de emisión de 1480 nm y con eficiencias ( $\eta_{CE\_L}$ ) del 23 % y del 42 % respectivamente.

Como se ha visto anteriormente un láser Raman se puede bombear con un láser de semiconductor. En este escenario, para el cálculo de la eficiencia hay que considerar las dos conversiones que tienen lugar en el proceso. La primera conversión es la conversión del dominio eléctrico al dominio óptico que tiene lugar en el semiconductor y la segunda es óptica-óptica que tiene lugar en la fibra óptica dopada.

### 2.4 Características de transmisión de una fibra óptica

Charles Kao fue el primero que sugirió la posibilidad de utilizar las fibras ópticas como medio de transmisión competitivo frente al uso del cable coaxial. Sin embargo no fue hasta 1970 que Corning Glass Works fabricó una fibra que superaba el estado de la técnica existente con pérdidas bajas (del orden de 10 dB/km), abriendo las puertas a las aplicaciones comerciales a gran escala [31, p. 1.3]. Tradicionalmente ha sido un medio de comunicación con capacidad de transmitir grandes volúmenes de datos entre diferentes puntos, sin embargo recientemente también ha posibilitado el desarrollo de la tecnología PoF.

Una fibra óptica, en su definición más básica, está formada por dos cilindros concéntricos de materiales diferentes; un núcleo rodeado por una cubierta cuyo índice de refracción es ligeramente menor que el del núcleo. Adicionalmente posee diferentes capas externas que incrementan su rigidez y facilitan su manipulación (*Inner/Out jacket, Kevlar*), véase la Figura 2.11. Las fibras ópticas pueden clasificarse en dos grandes grupos: (i) según el perfil del índice de refracción y (ii) de acuerdo con el número de modos que se pueden propagar por su núcleo. Según el perfil del índice se pueden clasificar como de salto de índice (SI) y de índice gradual (GI). Las fibras con perfil de salto de índice son aquellas en las que el núcleo y la cubierta posee dos índices diferentes y constantes en cada zona, mientras que en las de índice gradual el índice del núcleo decrece gradualmente del centro a los extremos.

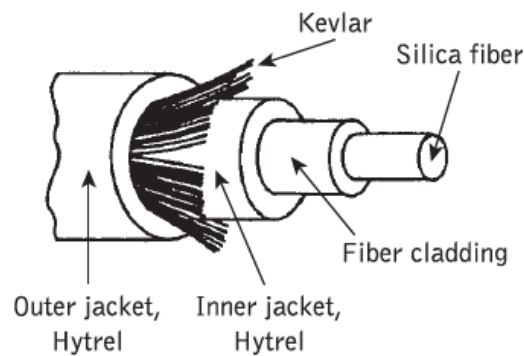


Figura 2.11. Estructura de una fibra óptica [31].

La segunda clasificación está relacionada con la frecuencia de corte normalizada ( $V_c$ ) de la fibra óptica, la cual determina el número de modos que pueden propagarse por su núcleo a una longitud de onda dada.

La condición asociada a una fibra SI monomodo se obtiene para un valor de frecuencia de corte normalizada  $V_c = 2,405$ . Se puede decir entonces que existirá un único modo propagándose por el núcleo si se cumple que:  $0 \leq V \leq 2,405$ , estando la frecuencia normalizada  $V$  determinada por la expresión [32]:

$$V = k_0 r (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad \text{Ec. 2.22}$$

donde  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $r$  es al radio de la fibra,  $n_1$  y  $n_2$  los índices de refracción del núcleo y de la cubierta respectivamente. El término  $(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$  es también conocido como la apertura numérica ( $NA$ ) y el término  $\frac{(n_1 - n_2)}{n_1}$  como diferencia de índice relativa ( $\Delta$ ) [33, p. 3]. La ecuación Ec. 2.22 se puede particularizar para la condición en la que  $V = V_c$ , en tal caso se obtiene la definición de la longitud de onda de corte  $\lambda_c$ , que viene expresada por:

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V_c} r (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad \text{Ec. 2.23}$$

Por otro lado, reescribiendo la ecuación Ec. 2.22, en función de la apertura numérica de la fibra óptica y de la diferencia de índice relativo, se obtiene que [32]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} r (NA) \quad \text{Ec. 2.24}$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad \text{Ec. 2.25}$$

Las fibras multimodo (MMF, *Multimode Fiber*) como su nombre indica, a diferencia de las fibras monomodo, soportan múltiples modos propagándose y el número de ellos depende de la frecuencia normalizada ( $V$ ) y del perfil del índice de refracción. La siguiente expresión permite calcular aproximadamente el número de modos ( $M_g$ ) que se pueden propagar por una fibra multimodo para diferentes perfiles de índice de refracción [32]:

$$M_g \simeq \left( \frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \quad \text{Ec. 2.26}$$

donde  $\alpha$  representa la dependencia con el perfil del índice de refracción, siendo  $\alpha = \infty$  para el caso de salto de índice,  $\alpha = 1$  para un perfil triangular y  $\alpha = 2$  para un parabólico.

Adicionalmente, en la tecnología PoF es muy relevante la selección de la fibra óptica, en base a su atenuación y área efectiva, pues limitan la potencia que llega al receptor y la que puede ser inyectada en la fibra respectivamente. Algunos ejemplos de fibras monomodo son: SMF-28 (Corning) [34], SMF-28e (Corning) [35], SMF-28 Ultra (Corning) [36] y de multimodo: FT200EMT [37], FG200UCC [38] del fabricante Thorlabs. Otros tipos de fibras que también se emplean en esta tecnología son las fibras ópticas de doble cubierta (DCF) y las fibras multinúcleo (MCF), especialmente en aplicaciones donde se desea incrementar la potencia transmitida junto con la transmisión de datos.

En los siguientes epígrafes se discuten algunos aspectos teóricos de los dos parámetros más relevantes del medio de transmisión en un sistema PoF: coeficiente de atenuación y área efectiva. En el epígrafe 2.7 se abordarán otros parámetros de las aplicaciones PoF.

## 2.4.1 Principales parámetros de la fibra óptica en sistemas PoF

### 2.4.1.1 Pérdidas ópticas en la transmisión

La pérdida de potencia óptica en la propagación es uno de los factores que limita la energía que puede recibir la carga en un sistema PoF. Estas pérdidas están gobernadas por la ley de Beer-Lambert [39, p. 55].

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha_p^* P \quad \text{Ec. 2.27}$$

donde  $\alpha_p^*$  es el coeficiente de atenuación y  $z$  la dirección de propagación. Este coeficiente incluye todos los efectos que pueden provocar pérdidas de potencia en la fibra óptica. Este coeficiente relaciona la potencia de salida en la fibra en función de la potencia inyectada y se expresa como:

$$P_0 = P_i \exp(-\alpha_p^* z) \quad \text{Ec. 2.28}$$

donde  $P_0$  es la potencia de salida a la distancia  $z$ , y  $P_i$  la potencia inyectada. Una manera muy habitual de expresar este coeficiente de atenuación es en unidades de dB/km que se obtiene de operar matemáticamente en la expresión anterior, obteniéndose:

$$\alpha_p^*(\text{km}^{-1}) = \alpha_p \left( \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) \left( \frac{\ln(10)}{10} \right) \quad \text{Ec. 2.29}$$

Este parámetro depende de la longitud de onda y limita la potencia que puede llegar al receptor en los sistemas PoF. Por esta razón, es necesario elegir la fibra adecuada que garantice las mínimas pérdidas posibles en el sistema, en la longitud de onda de operación. Por lo general, esta longitud de onda la define en primer lugar la celda que vayamos a utilizar y/o el láser que seleccionemos para nuestro sistema.

Por último, se debería usar la fibra óptica que satisfaga la condición de mínimas pérdidas en la longitud de onda de operación. La Figura 2.12 muestra el perfil de atenuación de un conjunto de fibras comerciales que se usan en esta investigación para la implementación de diferentes sistemas PoF.

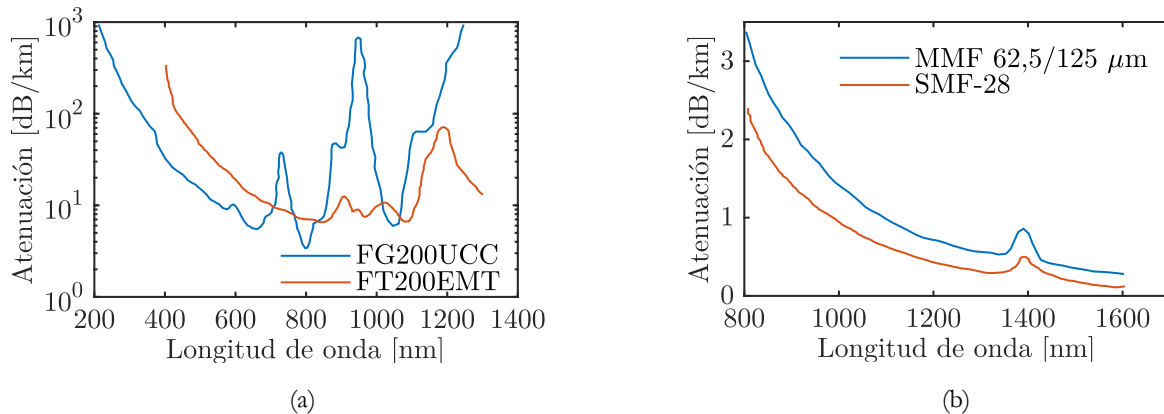


Figura 2.12. Perfil de atenuación de: (a) la fibras multimodo FG200UCC-High-OH, FT200EMT-Low-OH del fabricante Thorlabs [38][37]; (b) fibra multimodo MMF 62,5/125μm y la fibra monomodo SMF-28 del fabricante Corning [34][40].

### 2.4.1.2 Área y diámetro efectivo

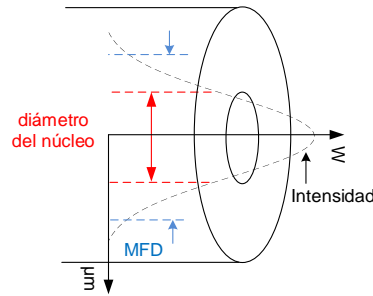
El área efectiva ( $A_{eff}$ ) es otro parámetro importante en los sistemas PoF, ya que determina la potencia máxima que puede ser inyectada en la fibra óptica. Esta área se corresponde con la distribución de campo eléctrico en la sección transversal de la fibra óptica frente a la dirección de propagación de la luz y formalmente está definida como [33, p. 43]:

$$A_{eff} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy\right)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^4 dx dy} \quad \text{Ec. 2.30}$$

donde  $F(x, y)$  es la función de distribución modal. Sin embargo, también se puede determinar a partir del *Mode Field Diameter* (MFD) usando la ecuación empírica Ec. 2.31, véase la Figura 2.13. Este parámetro caracteriza la penetración del campo en la cubierta de la fibra y se usa típicamente en fibras monomodo de salto de índice en un rango de  $0,8 \leq \frac{\lambda}{\lambda_c} \leq 1,9$  obteniéndose una precisión menor al 1 %. [17, p. 69] y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$MFD = 2r \left( 0,65 + \frac{1,619}{V^{\frac{3}{2}}} + \frac{2,879}{V^6} \right) \quad \text{Ec. 2.31}$$

donde  $r$  es el radio de la fibra y  $V$  la frecuencia normalizada. Una vez calculado el  $MFD$ , el área efectiva de la fibra óptica se obtiene aplicando la Ec. 2.32. Como ejemplo, a continuación se calcula  $A_{eff}$  de la fibra óptica monomodo de salto de índice SMF-28 Ultra, del fabricante Corning a las longitudes de onda de 1480 nm y 1550 nm. La longitud de onda de 1480 nm es de interés ya que se usa en los experimentos de los capítulos posteriores, mientras que el cálculo a 1550 nm se realiza para comparar el resultado que se obtiene, con el que brinda el fabricante en la hoja de característica.



$$A_{eff} = \pi \cdot \left(\frac{MFD}{2}\right)^2 \quad \text{Ec. 2.32}$$

Figura 2.13. Diámetro efectivo (MFD) en la fibra SMF-28.

De los datos dados por el fabricante en [36] se conoce que la  $\lambda_c = 1260$  nm y el diámetro del núcleo es  $8,2 \mu\text{m}$ , por lo que ambas longitudes de onda cumplen con la condición  $0,8 \leq \frac{\lambda}{\lambda_c} \leq 1,9$ . Como se ha comentado anteriormente para el cálculo del  $MFD$  es necesario conocer la frecuencia normalizada  $V$ . Esta frecuencia se puede calcular aplicando la ecuación Ec. 2.33 que se obtiene a partir de dividir la ecuación Ec. 2.22 con la ecuación Ec. 2.23:

$$\frac{\lambda_c}{\lambda} = \frac{V}{V_c} \quad \text{Ec. 2.33}$$

donde la frecuencia normalizada de corte  $V_c = 2,405$  y  $\lambda$  es  $1480$  nm o  $1550$  nm según el caso. Calculando se obtiene que  $V_{1550} = 1,955$  y  $V_{1480} = 2,0475$ . Aplicando la ecuación Ec. 2.31 se obtiene que a  $1550$  nm el  $MFD_{1550} = 10,6 \mu\text{m}$  y a  $1480$  nm el  $MFD_{1480} = 10,2 \mu\text{m}$ . Finalmente, el área efectiva ( $A_{eff}$ ) se calcula aplicando la Ec. 2.32 a  $1550$  nm y a  $1480$  nm, resultando que el área efectiva a la longitud de onda de  $1550$  nm es  $A_{eff_{1550}} = 88,247 \mu\text{m}^2$ , mientras que a la longitud de onda de  $1480$  nm es  $A_{eff_{1480}} = 81,713 \mu\text{m}^2$ . Se puede concluir que el área efectiva depende de la longitud de onda y como consecuencia la potencia máxima que se puede inyectar. Por otro lado, que el área efectiva es mayor que el área física de la sección transversal del núcleo que para este caso es  $51,81 \mu\text{m}^2$ .

El  $A_{eff}$  en la fibra multimodo se puede calcular directamente a partir de la Ec. 2.32. En esta aproximación se asume que el MFD se corresponde con el diámetro de la propia fibra óptica. Por ejemplo, para el caso de la fibra multimodo FG200UCC de salto de índice, aplicando la ecuación anterior se obtiene que el área efectiva es de  $3,14\text{E-}2 \text{ mm}^2$ .



## 2.5 Conversión de la energía óptica a eléctrica

Un conversor de energía, celda o PVC (*PhotoVoltaic Cell*) es un dispositivo que convierte la energía que viaja por la fibra óptica en energía eléctrica. En este documento se utilizará típicamente el acrónimo PVC.

### 2.5.1 Longitud de onda y eficiencias

Típicamente las celdas están optimizadas para operar en un rango de longitud de onda determinado. Por esta razón es necesario hacer corresponder la longitud de onda de la fuente de energía óptica con el rango de operación de la celda. La máxima responsividad se consigue cuando la celda es iluminada con una luz monocromática, cuya longitud de onda sea cercana a la longitud de onda de corte ( $\lambda_c$ ) del material absorbente.

Para que un electrón sea liberado del enlace covalente del material, la energía del fotón tiene que ser superior a la energía de la banda prohibida ( $E_g$ ) del material. Esta energía es inversamente proporcional a la longitud de onda de corte  $\lambda_c$ , y se puede calcular según la expresión:

$$\lambda_c = \frac{1240}{E_g} \quad \text{Ec. 2.34}$$

La energía ( $E_g$ ) de la banda prohibida se expresa comúnmente en función de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  a través de la ecuación de Varshni [41].

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad \text{Ec. 2.35}$$

donde  $E_g(0)$  es la energía de la banda prohibida a 0 K,  $\alpha$  está expresada en eV/K y  $\beta$  es proporcional a la temperatura de Debye en grados Kelvin. Para el caso del GaAs estos valores son:  $E_g(0) = 1,517 \text{ eV}$ ,  $\alpha = 5,5 \text{ eV/K}$  y  $\beta = 225 \text{ K}$  [42].

Con estos valores se puede obtener la energía de la banda prohibida a diferentes valores de temperatura y la frecuencia de corte,  $\lambda_c$ . Para el caso de una temperatura de 298 K, se obtiene que  $E_g(298K) = 1,424 \text{ eV}$  y la frecuencia de corte es de  $\lambda_c = 870 \text{ nm}$ .

La mayoría de las PVC exploradas en el rango espectral comprendido entre 790-850 nm están basadas en GaAs, cuya longitud de onda de corte es de 870 nm, mientras que para longitudes de ondas superiores (1400 nm a 1550 nm), se utilizan materiales como InGaAs/InP y GaSb.

Otro de los parámetros que caracteriza a la celda es su eficiencia de conversión óptico-eléctrica, que define cuanta potencia óptica se convierte en eléctrica y se determina como:

$$\eta_{o-e} = \frac{P_{e-max}}{P_o} \quad \text{Ec. 2.36}$$

donde  $P_o$  es la potencia óptica incidente y  $P_{e-max}$  es la potencia eléctrica máxima que entrega la celda a una temperatura dada.

La Tabla 2.2 muestra estimaciones teóricas de eficiencias para diferentes materiales en función de la longitud de onda. En la práctica los valores obtenidos son mucho menores debido a las pérdidas por recombinación, óhmicas y ópticas [43].

Tabla 2.2: Eficiencias de las PVC para diferentes materiales.

Material	$\lambda$ [nm]	$\eta_{o-e}$ [%]
AlGaAs/GaAs	808	80 [44][45]
InGaAsP/InP	1550	75 [46]
GaSb	1700	63 [45]

La máxima eficiencia referenciada en la literatura con GaAs, es de 68,9 % medida con un láser operando a una longitud de onda de 858 nm [47]. Otros estudios similares pueden ser consultados en [44][48], donde se alcanzan eficiencias ligeramente inferiores pero por encima del 55 %. Las eficiencias obtenidas experimentalmente en celdas basadas InGaAsP/InP son un poco menores. En [46] y [49] se muestra un estudio donde las eficiencias experimentales son del 44,6 % y el 45 % respectivamente, con una iluminación monocromática de 1550 nm. Las celdas basadas en GaSb poseen una eficiencia similar y en [45] se aborda

un estudio en el cual se obtiene una eficiencia del 45 % con una iluminación monocromática a 1550 nm. En la práctica estos dispositivos pueden alcanzar eficiencias del 34,8 % a una longitud de onda de 1550 nm [50]. La Tabla 2.3 muestra algunas celdas comerciales y sus principales características. Es importante señalar, que mientras mayor sea la eficiencia de la celda mayor será, por lo general, la eficiencia del sistema PoF. Sin embargo, también es determinante la atenuación que presenta la fibra óptica a la longitud de onda de operación, ya que el rendimiento del sistema es mucho mejor si la eficiencia de la celda es máxima y la atenuación de la fibra óptica es mínima a esa longitud de onda. Las longitudes de ondas que suelen usarse con mayor frecuencia en las aplicaciones actuales están centradas en cuatro longitudes de onda: 800 nm, 960 nm, 1050 nm y 1480 nm [1]. La Figura 2.14 muestra la superposición de la responsividad de cada material y la curva típica de atenuación de la fibra óptica de sílice. En esta investigación se utiliza el término ventana para referirse al conjunto de longitudes de ondas que con mayor frecuencia se utilizan en la tecnología PoF. La primera ventana está centrada a una longitud de onda de 800 nm, la segunda está alrededor de los 1000 nm y la tercera en torno a 1480 nm.

Tabla 2.3. Parámetros de algunas PVC comerciales.

PVC	$P_o$ [W]	Fibra	$\eta_{o-e}$ [%]	$\lambda$ [nm]	Fabricante
YCH-Lxxx	0,2-10	MMF	22-28	915-980	MH GoPower
YCH-Hxxxx		(62,5/125 $\mu$ m)			[51]
AFBR-POCxxxL	1,5	MMF	40	800-850	Broadcom [52]
		(62,5/125 $\mu$ m)			
KPC8H-FC	0,6	SMF-28	30	1300-1600	Kyosemi [53]
KPC8-T	0,2	SMF-28	30	1300-1600	Kyosemi [54]

Por otro lado, el valor de eficiencia como se enunció anteriormente está definido para una temperatura determinada y esto es debido a la estrecha relación entre ambos parámetros. Un incremento de temperatura disminuye la eficiencia [55], lo cual tiene un impacto negativo en el sistema PoF ya que a la carga llegará menos potencia eléctrica. La temperatura de la celda puede incrementarse por diferentes factores, pero uno de los más importantes es el nivel de potencia incidente en su área activa. Si este nivel de potencia no es controlado puede incluso dañar al dispositivo al superar el umbral de densidad de potencia máxima establecido por el fabricante del dispositivo. Para el control de la temperatura en muchas ocasiones es suficiente el empleo de mecanismos de disipación pasivos basados en disipadores metálicos, pero en

algunos aplicaciones pudiera ser útil la utilización de ventilación forzada o refrigeración líquida [55]. El último parámetro para considerar en una PVC es la tensión de salida del dispositivo. La tensión de salida entre otros factores depende de la banda prohibida del material y de la configuración utilizada en su fabricación: serie o apiladas [56][57], véase la Figura 2.15. Así, para una PVC basado en una sola unión de GaAs, la tensión de salida es de  $\sim 1V$ . Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones prácticas requieren una tensión de salida más alta, que típicamente puede estar entre los 3V hasta decenas de voltios [56][58]. En muchos casos la solución requerirá el uso de un convertidor continua-continua (CC-CC) para adecuar el voltaje de salida de la celda a la aplicación.

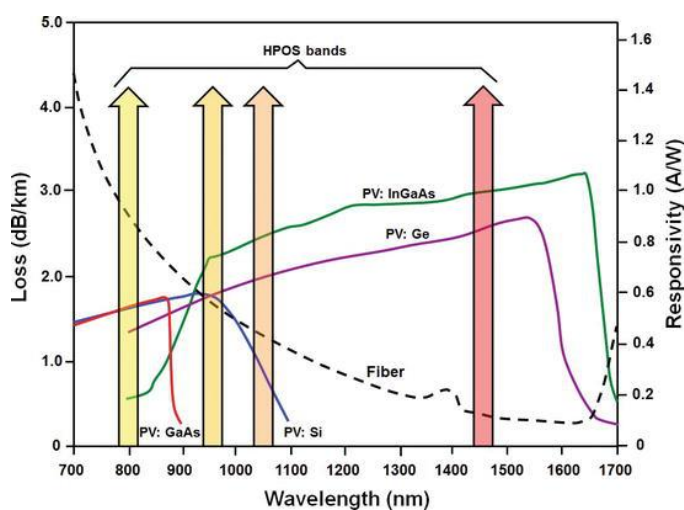


Figura 2.14. Bandas espectrales de los sistemas PoF, responsividad de las PVC según el material de fabricación y la atenuación de la fibra óptica [1].

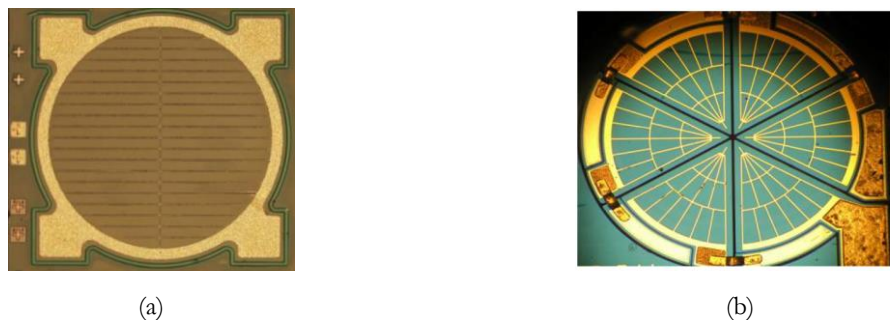


Figura 2.15. Celdas: (a) Sección transversal e imagen con microscopio de 6 uniones de una celda de GaAs apiladas verticalmente[59], (b) 6 segmentos de una PVC conectada en serie [56].

### 2.5.2 Modelo eléctrico de la celda

Un punto muy importante en los sistemas PoF es el modelado y la caracterización de las celdas desde el punto eléctrico ya que permite optimizar el diseño del sistema PoF. Tradicionalmente las celdas son modeladas por una fuente de corriente, diodos y resistencias. El modelo con un único diodo (diodo único) está integrado por una fuente de corriente (fotocorriente), un diodo, una resistencia en paralelo ( $R_p$ ) y una resistencia serie ( $R_s$ ). La resistencia serie es típicamente grande por lo que puede considerarse como un circuito abierto. Por otro lado, en el modelo con un diodo adicional se consigue una mejor aproximación del comportamiento real de la celda [60][61]. La Figura 2.16 muestra los modelos: simplificado, diodo único y doble diodo.

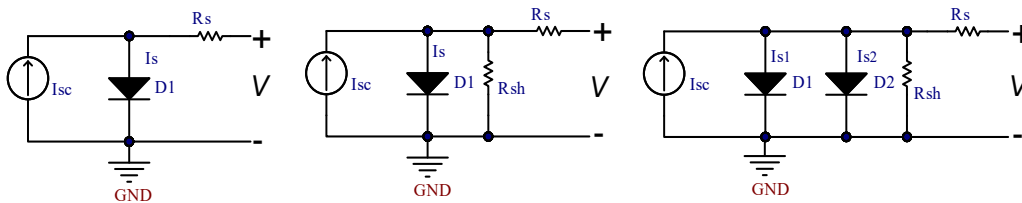
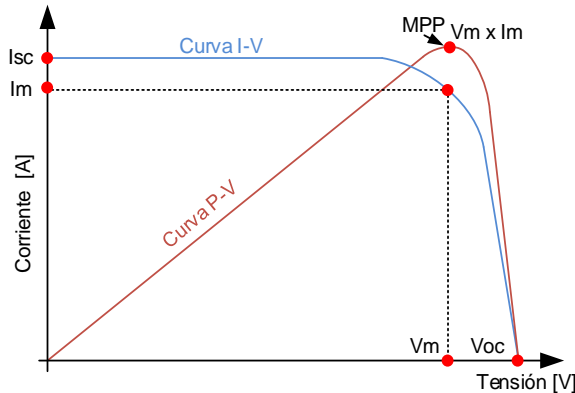


Figura 2.16. Modelo eléctrico simplificado de una celda, diodo único y doble diodo (de izquierda a derecha).

Los parámetros que definen el comportamiento eléctrico de una PVC son la corriente de cortocircuito,  $I_{sc}$ , la tensión de circuito abierto,  $V_{oc}$ , el punto de máxima potencia ( $V_m$ ;  $I_m$ ) y el factor de llenado (FF, *Fill Factor*), véase la Figura 2.17. El FF se relaciona con la eficiencia según la Ec. 2.37.

La corriente de cortocircuito se produce cuando la carga, y por tanto la tensión, es igual a cero y la tensión en circuito abierto se obtiene cuando la carga resistiva se considera infinita y no produce ninguna corriente neta. Cuando la celda está en circuito abierto, es decir, sin conectar ninguna carga, la corriente será mínima (cero) y la tensión en la celda será máxima, lo que se conoce como tensión en circuito abierto de la PVC, o  $V_{oc}$ . Entonces, el rango de la curva de características I-V de la PVC va desde la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) a cero voltios de salida hasta la corriente cero a la tensión total de circuito abierto ( $V_{oc}$ ). En la caracterización de la PVC también es relevante el comportamiento de la potencia eléctrica que entrega

la PVC a la carga en función de la tensión, o curva P-V. Esta curva se obtiene a partir de la multiplicación de las tensiones y las corrientes instantáneas, en el rango de operación de la PVC. Un punto relevante en la curva es el punto de máxima potencia o MPP, en el cual la potencia que entrega la PVC a la carga es máxima ( $V_m$ ;  $I_m$ ). Para un mejor comportamiento de un sistema PoF es ideal que la PVC opere en este punto.



$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{P_o \eta_{o-e}}{V_{oc} I_{sc}} \quad \text{Ec. 2.37}$$

Figura 2.17. Característica de la corriente y la potencia entregada por una PVC en función de la tensión.

## 2.6 Configuraciones de los sistemas PoF

Los diferentes elementos que componen a los sistemas PoF (fuente de energía, fibra óptica, PVC) pueden estar configurados de diferentes maneras y para su mejor comprensión se han agrupado según los criterios que se enumeran a continuación:

- I. Cantidad de fuentes ópticas y topología usada en la inyección de la luz.
- II. Distribución de la energía por el medio físico.
- III. Topología del medio de transmisión.
- IV. Conexionado eléctrico de las PVCs.
- V. Distribución de la potencia óptica en la PVC.

### 2.6.1 Configuraciones de la fuente de energía óptica

Un sistema PoF puede tener una única o múltiples fuentes de energía, atendiendo al criterio I previamente indicado. La configuración básica posee una sola fuente mientras en algunos casos es necesario usar más de una fuente dando lugar a la clasificación mostrada en la Figura 2.18.

En algunas aplicaciones es necesario utilizar más de una fuente (escenario de múltiples fuentes ópticas) cuando se desea:

- Implementar un sistema PoF con una potencia mayor. En este caso los láseres pueden ser combinados en una única fibra óptica o pueden ser acoplados a fibras ópticas independientes (*bundle* de fibras ópticas).
- Tener redundancia o fuentes de respaldo de la fuente óptica primaria. En algunas aplicaciones puede ser necesario poseer más de una fuente por si falla la fuente primaria.

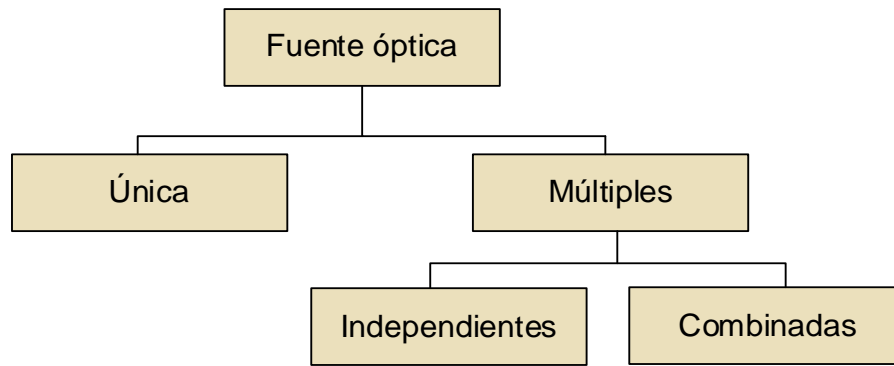


Figura 2.18. Clasificación de los sistemas PoF según el número de fuentes y la topología usada en la inyección.

### 2.6.2 Configuraciones del medio de transmisión

Según el criterio II de distribución, los sistemas PoF se clasifican en: escenario compartido o dedicado. En el escenario compartido la potencia óptica del sistema PoF comparte el mismo medio físico con las comunicaciones.

En el escenario dedicado la potencia y las comunicaciones se transmiten por fibras ópticas independientes.

Atendiendo al criterio III de topología del medio de transmisión se puede hablar de clasificaciones análogas a las que tradicionalmente se emplean en las redes de comunicaciones algunas de ellas son: topología en estrella, bus y árbol, véase la Figura 2.19.

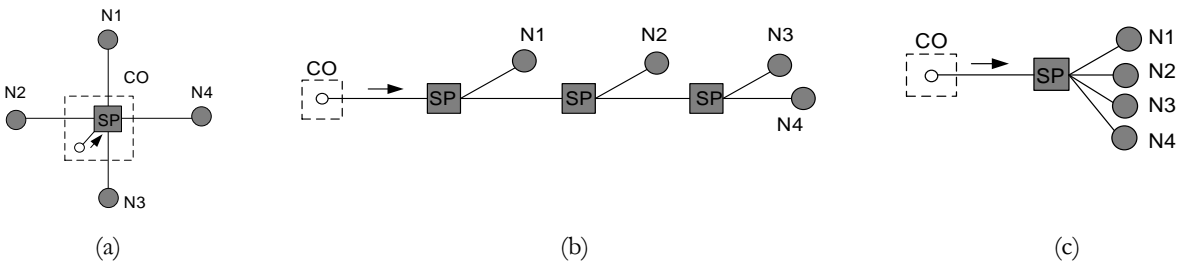


Figura 2.19. Alimentación de cuatro nodos (N) usando diferentes topologías: (a) Estrella; (b) Bus; (c) Árbol. SP: *splitter* o divisor óptico; CO: oficina central.

En la configuración en estrella la distribución de energía tiene forma de estrella ya que salen múltiples fibras ópticas desde la fuente de energía hacia múltiples localizaciones.

En la configuración en árbol, desde la fuente de energía parte una única o múltiples fibras ópticas que se ramifican.

En la configuración en bus hay una fibra óptica central y única que transporta la energía hacia los diferentes nodos remotos ubicados en diferentes posiciones a lo largo de la fibra óptica en la dirección de propagación.

### 2.6.3 Configuraciones del conversor de energía

La PVC es el elemento que convierte la potencia óptica a eléctrica y como cualquier elemento eléctrico pueden conectarse externamente en serie o en paralelo, lo que aplica en el criterio IV. La combinación serie es utilizada para lograr una mayor tensión de salida del conjunto, mientras que en el paralelo se incrementa la corriente, véase la Figura 2.20.



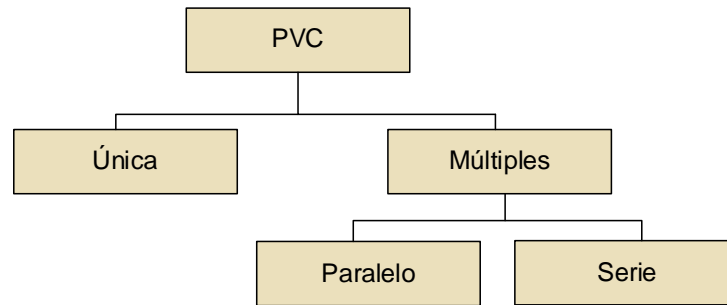


Figura 2.20. Clasificación de los sistemas PoF según el número de PVC y su conexionado eléctrico.

En cuanto al criterio V de distribución de la energía en la PVC, en un escenario donde se emplean múltiples celdas, el sistema puede estar configurado para que la potencia que llegue a cada celda sea diferente entre sí. En este caso, se dice que el sistema es completamente asimétrico pues no todos los nodos reciben la misma potencia óptica. El caso contrario es en el que todos los nodos reciben la misma potencia óptica y en tal caso se denomina alimentación simétrica.

## 2.7 Consideraciones y aspectos críticos

### 2.7.1 *Fiber Fuse*

El *fiber fuse* es un fenómeno que ocurre en el interior de la fibra óptica causando daños irreversibles en el núcleo e impide la propagación de la potencia óptica[62]. El *fiber fuse* es un factor que limita el nivel de potencia que se puede inyectar en la fibra óptica denominado como potencia umbral,  $P_{th}$ . Este límite es proporcional al  $A_{eff}$  de la fibra óptica y se calcula según la expresión:

$$P_{th} = I_{th}A_{eff} \quad \text{Ec. 2.38}$$

donde  $I_{th}$  es la densidad de potencia umbral y es un valor que se encuentra entre uno y varios  $\text{MW}/\text{cm}^2$ , en [33, p. 19] se considera  $\sim 10 \text{ MW}/\text{cm}^2$ , para la fibra de sílice. La Figura 2.21 muestra el fenómeno del *fiber fuse* por el interior de una fibra óptica SMF-28 [62].

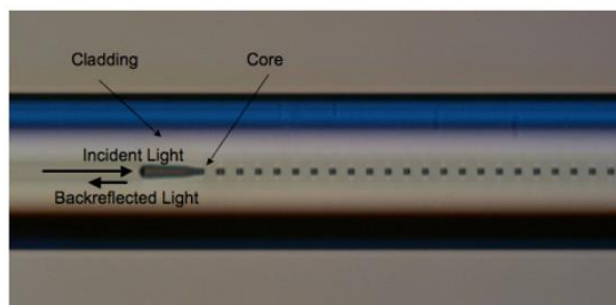


Figura 2.21. Daños provocados por el *fiber fuse* en una fibra óptica SMF-28 [62].

En [63] se llevan a cabo experimentos para demostrar el fenómeno del *fiber fuse* en diferentes tipos de fibras ópticas: SMF-28 (G.652.D), *Non-zero dispersion-shifted fiber* (NZ-DSF (G.655.C)) y *Dispersion-shifted fiber* (DSF (G.653.B)), véase la Tabla 2.4. Este fenómeno del *fiber fuse* también se puede originar en la unión entre dos conectores por dos motivos fundamentales: pérdidas en la unión superiores a lo normal, típicamente entre 0,25 dB a 1 dB [17, p. 250], o por una limpieza inadecuada de su superficie, véase la Figura 2.22.

Tabla 2.4. Umbrales de potencia para el fenómeno del *fiber fuse* en diferentes tipos de fibras ópticas.

Tipo de fibra óptica	$A_{eff} [\mu m^2]$	$P_{th} [W]$
SMF-28 (G.652.D)	85	$1,4 \pm 0,025$
NZ-DSF (G.655.C)	70-80	$1,575 \pm 0,075$
DSF (G.653.B)	50	$1,225 \pm 0,025$

Para minimizar los posibles riesgos se debe realizar una correcta limpieza e inspección con ayuda de un microscopio. Es recomendable que el instrumento incorpore algún tipo de chequeo automático de tipo *PASS/FAIL*, que analice el tamaño de las partículas depositadas en la superficie del conector. En esta investigación los análisis están basados en la norma IEC 61300-3-35. La Figura 2.23 muestra la superficie de dos conectores de tipo FC/APC de una fibra óptica monomodo. Se observa un conector dañado (izquierda) y otro que cumple con la norma IEC 61300-3-35 (derecha). Otra alternativa para minimizar el efecto del conector es evitar el conexionado realizando fusiones en el sistema. Esta alternativa es poco práctica en las etapas de experimentación y de pruebas, pero puede ser útil al final del desarrollo.

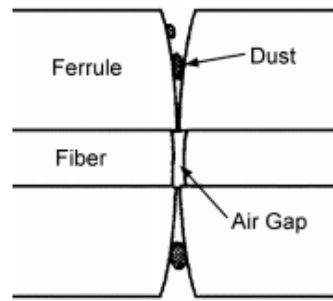


Figura 2.22. Impurezas en la superficie de contacto entre 2 conectores [64].

Por último, es importante señalar que no todos los tipos de conectores soportan el mismo nivel de potencia y que depende del tipo y de la tecnología que se emplea. Algunos de estos conectores especiales son: el de tipo SMA con tecnología *Air-Gap-Ferrule* que pueden soportar hasta 50 W de potencia [65] y el conector E2000PS. Este último es una solución que amplía el MFD de una fibra óptica monomodo usando una lente de GRIN en el extremo. De este modo, la MFD del extremo del conector se amplía en un factor 4, aumentando la superficie de contacto en un factor de aproximadamente 16. Este tipo de conector soporta una potencia máxima de 6 W y tiene unas pérdidas típicas entre 0,2 dB y 0,4 dB.



Figura 2.23. Vista frontal de conectores tipo FC/APC: (a) daño en el núcleo de un conector; (b) conector sin impurezas según la norma IEC 61300-3-35.

### 2.7.2 Potencia máxima de operación de los dispositivos

En un sistema PoF es muy importante para seleccionar los dispositivos ópticos tener en cuenta la potencia umbral o lo que es lo mismo la potencia máxima ( $P_{max-dispositivo}$ ) a la que estos pueden operar

durante un tiempo determinado. Una incorrecta selección puede ocasionar daños irreversibles en el dispositivo, propagar la rotura o en el peor de los casos liberar el haz de luz de alta intensidad.

Algunos de los criterios que se pueden tener en consideración para su selección son: (i) potencia máxima a la que opera el sistema PoF, lo cual dependerá de la fuente óptica utilizada, (ii) la posición del elemento en el sistema y (iii) el tiempo al que será expuesto el dispositivo a la potencia de operación.

Como se ha visto en los epígrafes anteriores un sistema PoF puede requerir múltiples dispositivos ópticos en función de la configuración y de la complejidad del sistema. Cada uno de ellos estará expuesto a niveles de potencias diferentes, ya que no es lo mismo un dispositivo ubicado justo a la salida del láser que otro que se encuentre en la entrada de la PVC, después de la fibra óptica.

Por otro lado, el tiempo de exposición del dispositivo a la potencia de operación es otro factor que se debe considerar. Una solución para disminuir el impacto de la variable tiempo de operación es realizar el diseño con dispositivos que soporten  $N$  veces la potencia a la que serán expuestos. Por lo general, en los diseños presentados en esta investigación, se ha utilizado un criterio de  $N \geq 2$  y en algunos escenarios se han empleado dispositivos estándar (no son de potencia), con  $P_{max\_dispositivo} = 500 \text{ mW}$ .

### 2.7.3 Impacto del radio de curvatura de la fibra óptica

Las pérdidas por curvatura tienen un gran impacto en los sistemas que emplean láseres de potencia ya que la energía radiada incrementa la temperatura en la zona curvada que afecta tanto la integridad de la fibra óptica como del recubrimiento [66][67]. Existe una dependencia exponencial entre las pérdidas (fuente de calor) y el radio de curvatura por lo que la generación de calor se incrementa rápidamente una vez alcanzado el radio crítico. Esta dependencia viene dada por la expresión:

$$a_r = c_1 \exp(-c_2 R) \quad \text{Ec. 2.39}$$

donde  $a_r$  es el coeficiente de pérdidas,  $R$  es el radio de la curvatura de la fibra óptica,  $c_1$  y  $c_2$  son constantes del sistema independiente de  $R$ .

Los radios de curvaturas críticos para la fibra óptica multimodo ( $R_c$ ) y monomodo ( $R_{cs}$ ) se pueden calcular usando las ecuaciones Ec. 2.40 y Ec. 2.41 respectivamente:

$$R_c \simeq \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} \quad \text{Ec. 2.40}$$

$$R_{cs} \simeq \frac{20\lambda}{(n_1 - n_2)^{3/2}} \left( 2,748 - 0,996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad \text{Ec. 2.41}$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de operación,  $\lambda_c$  es la longitud de onda de corte,  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del núcleo y la cubierta respectivamente. En [66], se analiza el impacto del incremento de temperatura sobre la cubierta externa de una fibra óptica SMF-28 para diferentes radios de curvatura. Como resultados de la investigación se obtuvo que la cubierta externa puede llegar a alcanzar temperaturas superiores a las recomendadas por el fabricante (85 °C) y las pérdidas se incrementaban en decenas de decibelios para aquellos radios de curvaturas menores a un centímetro.

#### 2.7.4 Efectos no lineales en la fibra óptica

Existen dos grandes categorías de efectos no lineales que pueden separarse en: efectos por *scattering* y los asociados al efecto Kerr, véase la Figura 2.24.

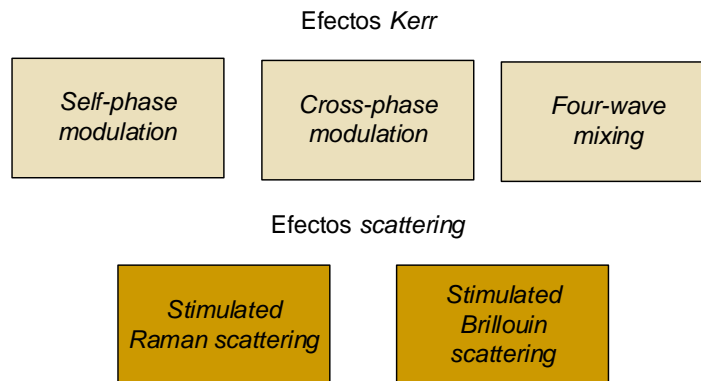


Figura 2.24. Efectos no lineales en la fibra óptica monomodo.

Este último efecto es producto de la fuerte dependencia que aparece entre el índice de refracción del medio y el nivel de potencia que se propaga. Esta relación viene dada por la expresión:

$$n = n_{\text{lineal}} + n_{\text{no\_lineal}} \left( \frac{P}{A_{\text{eff}}} \right) \quad \text{Ec. 2.42}$$

donde  $P$  es la potencia óptica promedio,  $A_{\text{eff}}$ , es el área efectiva de la fibra óptica,  $n_{\text{lineal}}$  y  $n_{\text{no\_lineal}}$  son el índice lineal y no lineal de la fibra óptica respectivamente. Para el caso de la fibra óptica de sílice el índice no lineal es  $n_{\text{no\_lineal}} = 2,2 \sim 3,4 \times 10^{-20} \frac{\text{m}^2}{\text{W}}$  [33, p. 19], en función de la composición del núcleo y de la polarización. Asociados con el efecto Kerr encontramos *Self Phase Modulation* (SPM), *Cross Phase Modulation* (XPM) y finalmente el *Four Wave Mixing* (FWM).

Los otros fenómenos no lineales ampliamente conocidos son: *Stimulated Brillouin Scattering* (SBS) y *Stimulated Raman Scattering* (SRS) y ambos fenómenos al igual que los anteriores limitan la potencia que se puede inyectar en la fibra óptica.

El SBS es un proceso no lineal que ocurre en las fibras ópticas, y limita la potencia que puede ser inyectada en la fibra óptica. Este proceso se manifiesta, una vez que se ha superado el límite SBS, como una propagación hacia atrás. Este proceso limita a los sistemas PoF porque parte de la energía transmitida no llega a la carga. La potencia umbral viene dada por:

$$P_{SBS} = \frac{21kA_{\text{eff}}}{g_B L_{\text{eff}}} \cdot \frac{\Delta\nu_B + \Delta\nu_P}{\Delta\nu_B} \quad \text{Ec. 2.43}$$

donde  $g_B$  es el coeficiente de ganancia Brillouin del orden de  $6 \times 10^{-11} \text{ m/W}$  [33, p. 18],  $k = 2$ , si se considera una polarización aleatoria del láser en el caso de la sílice,  $A_{\text{eff}}$  es el área efectiva de la fibra óptica,  $\Delta\nu_B$  ancho de banda de la ganancia de Brillouin 35 MHz) y  $\Delta\nu_P$  ancho de línea del láser de bombeo [68].

El fenómeno SRS puede ocurrir en ambas direcciones (hacia atrás o hacia delante). La potencia umbral  $P_{SRS}$  puede determinarse como:

$$P_{SRS} = \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad \text{Ec. 2.44}$$

donde  $g_R$  es el coeficiente de ganancia Raman (ejemplos:  $g_R = 3.04E10^{-14} \text{ m/W}$  a  $1,486 \mu\text{m}$ ;  $g_R = 1E10^{-13} \text{ m/W}$  a  $1 \mu\text{m}$  [33, p. 18]),  $L_{eff}$  es la longitud efectiva de la fibra óptica tanto para el fenómeno SBS y SRS y viene dada por la expresión:

$$L_{eff} = \left(1 - \exp(-\alpha_p^* L)\right) / \alpha_p^* \quad \text{Ec. 2.45}$$

donde  $\alpha_p^*$  es el coeficiente de atenuación,  $L$  es la longitud de la fibra óptica si  $\alpha_p^* L \gg 1$ , entonces  $L_{eff} = 1/\alpha_p^*$ .

Por último, si se analiza el impacto de ambos fenómenos sobre un sistema, se obtiene que el SBS típicamente es el efecto limitante. Esto es debido a que la ganancia de  $g_B$  es mayor que la  $g_R$  en varios órdenes de magnitud. Como resultado se obtiene que la potencia umbral SBS típica es de  $\sim 10 \text{ mW}$  [33, p. 18], la cual es relativamente pequeña si se compara con las potencias a las que operan los sistemas PoF. Por ejemplo, a partir de la Ec. 2.43, se obtiene que  $P_{SBS} = 5,2 \text{ mW}$ , con las siguientes características: fibra óptica tipo SMF-28,  $L = 15 \text{ km}$ ,  $g_B = 6E10^{-11} \text{ m/W}$ ,  $\alpha_p = 0,2 \text{ dB/km}$  y  $A_{eff} = 80E10^{-12} \text{ m}^2$ . Para evitar su efecto se suelen utilizar anchuras de línea del láser de potencia,  $\Delta v_p$ , elevadas para que la potencia umbral sea mayor.

## 2.8 Conclusiones

En este capítulo se abordaron los principales conceptos, características y limitaciones de los sistemas de *Power over Fiber*, al tiempo que se presentó como una alternativa de alimentación remota que en ciertos escenarios puede sustituir a la alimentación convencional.

En el análisis simplificado del estado de la técnica de los diferentes elementos que componen un sistema PoF se destaca la importancia del parámetro de la eficiencia como factor limitante para competir con otras tecnologías de alimentación, como por ejemplo las basadas en cobre. No obstante, la necesidad de proveer una alimentación segura a los dispositivos, el auge en la implementación de aplicaciones en entornos hostiles usando PoF y el desarrollo de las tecnologías de fabricación de los diferentes elementos que integran a los sistemas PoF, entre otros factores, han motivado incrementar los esfuerzos para lograr sistemas mucho más eficientes. En la actualidad se han logrado eficiencias de conversión de las PVC en primera ventana cercanas al 70 % mientras los peores valores de conversión se encuentran en segunda ventana con valores típicos inferiores al 30 %. En el caso de los láseres las mejores eficiencias están concentradas en los de semiconductor, cuyos valores están comprendidos entre el 40 % y el 70 % en función de la ventana de emisión.

Por otro lado, se abordan los diferentes parámetros que caracterizan a los sistemas PoF y se tratan un conjunto de consideraciones y aspectos críticos que afectan el rendimiento de los sistemas PoF.

Otro aspecto relevante en los sistemas PoF es el impacto del área efectiva de la fibra óptica en el nivel de potencia máxima que se puede inyectar y su relación con la aparición del fenómeno *fiber fuse*. Este fenómeno es crítico en los sistemas PoF pues puede causar daños irreversibles en el medio de transmisión. Las impurezas, suciedad y la humedad en los conectores incrementan la probabilidad de la aparición de este fenómeno, por lo que es muy importante contar con la instrumentación adecuada para llevar a cabo las inspecciones correspondientes de las superficies de los conectores antes de iniciar el sistema PoF. Los dispositivos ópticos que se usan para implementar los sistemas PoF por lo general son dispositivos especiales con la capacidad de soportar niveles de potencia superiores a los que típicamente se emplean en aplicaciones de comunicaciones, por lo que deben ser cuidadosamente seleccionados según la aplicación. Por último, el nivel de potencia también está relacionado con la aparición de los fenómenos no lineales.



Entre los más relevantes están el SRS y el SBS los cuales, en función del nivel de potencia de inyección, las características de la fibra y del láser, limitan a los sistemas PoF. Otros fenómenos como los asociados al efecto Kerr son de interés dependiendo del escenario de aplicación, con mayor relevancia en escenarios de comunicaciones y que se discutirá en los próximos capítulos.

## 2.9 Referencias

- [1] J. B. Rosolem, “Power-Over-Fiber Applications for Telecommunications and for Electric Utilities,” in *Optical Fiber and Wireless Communications*, R. Roka, Ed. InTech Publishing, 2017.
- [2] W. Paper, “Next Generation PoE The New Power over Ethernet Standards Deliver More Power, Speed, and Efficiency,” 2019. <https://www.nexans.co.uk/> (accessed May 05, 2021).
- [3] C. T. Rim and C. Mi, *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles and Mobile Devices*. John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [4] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis, and C. Cecati, “Wireless Power Transfer - An Overview,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1044–1058, Feb. 01, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2835378.
- [5] B. H. Choi, V. X. Thai, E. S. Lee, J. H. Kim, and C. T. Rim, “Dipole-Coil-Based Wide-Range Inductive Power Transfer Systems for Wireless Sensors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 5, pp. 3158–3167, May 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2517061.
- [6] “Electricidad inalámbrica de EMROD. Así es como lo hará Nueva Zelanda - World Energy Trade.” <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/investigacion/electricidad-inalambrica-de-emrod-asi-es-como-lo-hara-nueva-zelanda> (accessed May 05, 2021).
- [7] “Wireless Energy Solutions | Emrod.” <https://emrod.energy/products-services/> (accessed May 05, 2021).
- [8] C. Cano, A. Pittolo, D. Malone, L. Lampe, A. M. Tonello, and A. G. Dabak, “State of the Art in Power Line Communications: From the Applications to the Medium,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 7, pp. 1935–1952, Jul. 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2566018.
- [9] “US10855381B2 - Fiber optic communications and power network - Google Patents.” <https://patents.google.com/patent/US10855381B2/en> (accessed May 05, 2021).
- [10] Y. Bi, S. Shen, J. Jin, K. Wang, and L. G. Kazovsky, “Remotely Powered and Reconfigured Quasi-Passive Reconfigurable Nodes for Optical Access Networks,” *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2016, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1155/2016/2938415.
- [11] J. D. Lopez-Cardona, D. Sanchez Montero, and C. Vazquez, “Smart remote nodes fed by power over fiber in internet of things applications,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 17, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2915613.
- [12] J. Hecht, “Short history of laser development,” *Opt. Eng.*, vol. 49, no. 9, p. 091002, Sep. 2010, doi: 10.1117/1.3483597.
- [13] “High-power Lasers | American Scientist.” <https://www.americanscientist.org/article/high-power-lasers> (accessed May 14, 2021).
- [14] C. N. Danson *et al.*, “Petawatt and exawatt class lasers worldwide,” *High Power Laser Sci. Eng.*, vol. 7, p. 54, 2019, doi: 10.1017/hpl.2019.36.
- [15] “Types of Lasers.” <https://www.newport.com/n/laser-types#gas-lasers> (accessed Feb. 14, 2021).
- [16] “Laser Diodes: The power of brilliance -- the past and future of high-power semiconductor lasers,” 2018.

- <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16555251/laser-diodes-the-power-of-brilliance-the-past-and-future-of-highpower-semiconductor-lasers> (accessed May 14, 2021).
- [17] John M. Senior, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*, Ed. III. Edinburgh: Pearson Education Limited, 2009.
- [18] P. Crump *et al.*, “Efficient high-power laser diodes,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 19, no. 4, 2013, doi: 10.1109/JSTQE.2013.2239961.
- [19] P. Crump *et al.*, “100-W+ diode laser bars show > 71% power conversion from 790-nm to 1000-nm and have clear route to > 85%,” in *High-Power Diode Laser Technology and Applications V*, Feb. 2007, vol. 6456, pp. 193–203, doi: 10.1117/12.704496.
- [20] QPC Lasers, “High Efficiency 1300-1600nm Semiconductor Lasers .” <https://www.qpclasers.com/test/high-efficiency-1400-1600nm-semiconductor-lasers-2/> (accessed Nov. 05, 2021).
- [21] P. O. Leisher, T. Jeremy, C. Jenna, and R. Daniel, “Watt-class 1550 nm tapered lasers with 45% wallplug efficiency for free-space optical communication,” in *2016 International Semiconductor Laser Conference (ISLC)*, 2013, pp. 1–2.
- [22] Tyll Hertsens, “An Overview of Laser Diode Characteristics. Application Note,” 2005. Accessed: May 14, 2021. [Online]. Available: [https://www.newport.com.cn/medias/sys\\_master/images/images/he9/hd7/8797049520158/AN05-Laser-Diode-Characteristics-Overview.pdf](https://www.newport.com.cn/medias/sys_master/images/images/he9/hd7/8797049520158/AN05-Laser-Diode-Characteristics-Overview.pdf).
- [23]: Patrick Gale, “Estimating Laser Diode Lifetimes and Activation Energy,” 2008. [Online]. Available: [https://www.newport.com/medias/sys\\_master/images/images/hbc/h43/8797050241054/AN33-Estimating-Laser-Diode-Lifetimes-and-Activation-Energy.pdf](https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/hbc/h43/8797050241054/AN33-Estimating-Laser-Diode-Lifetimes-and-Activation-Energy.pdf).
- [24] L. Sirleto, “Fiber raman amplifiers and fiber raman lasers,” *Micromachines*, vol. 11, no. 12, MDPI AG, pp. 1–5, Dec. 01, 2020.
- [25] Clifford Headley and G. P. Agrawal, *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*. London, UK: Elsevier Academic Press, 2005.
- [26] V. I. Karpov *et al.*, “Laser-diode-pumped phosphosilicate-fiber Raman laser with an output power of 1 W at 148  $\mu\text{m}$ ,” *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 13, p. 887, Jul. 1999, doi: 10.1364/ol.24.000887.
- [27] V. R. Supradeepa, J. W. Nicholson, C. E. Headley, M. F. Yan, B. Palsdottir, and D. Jakobsen, “A high efficiency architecture for cascaded Raman fiber lasers,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 6, p. 7148, Mar. 2013, doi: 10.1364/OE.21.007148.
- [28] V. R. Supradeepa, Y. Feng, and J. W. Nicholson, “Raman fiber lasers,” *J. Opt.*, vol. 19, no. 2, p. 023001, Feb. 2017, doi: 10.1088/2040-8986/19/2/023001.
- [29] V. R. Supradeepa, J. W. Nicholson, C. E. Headley, M. F. Yan, B. Palsdottir, and D. Jakobsen, “High efficiency cascaded Raman fiber laser with output power of 204W at 1480 nm,” in *Fiber Lasers X: Technology, Systems, and Applications*, 2013, vol. 8601, pp. 8–13, doi: 10.1117/12.2002620.
- [30] V. R. Supradeepa and J. W. Nicholson, “High efficiency cascaded Raman fiber laser with output power of 301W at 1480nm,” in *2013 Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2013*, 2013, pp. 1–2, doi: 10.1364/cleo\_si.2013.ctu1k.6.

- [31] M. Bass and E. Van Stryland, *Fiber Optics Handbook: fiber, devices, and systems for optical communications*. 2002.
- [32] J. A. Buck, *Fundamentals of Optical Fibers*, 2nd Editio. Wiley, 2010.
- [33] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Ed. II. San Diego: Academic Press, 1995.
- [34] “Corning® Single-Mode Optical Fiber Optical Fiber Corning® SMF-28™ Optical Fiber Product Information.” Accessed: Aug. 21, 2021. [Online]. Available: <https://www.photonics.byu.edu/FiberOpticConnectors.parts/images/smf28.pdf>.
- [35] “Optical Fiber Corning® SMF-28e® Optical Fiber Product Information Evolving Networks Now.” Accessed: Aug. 13, 2021. [Online]. Available: [http://www.tlc.unipr.it/cucinotta/cfa/datasheet\\_SMF28e.pdf](http://www.tlc.unipr.it/cucinotta/cfa/datasheet_SMF28e.pdf).
- [36] “Optical Specifications Corning® SMF-28® Ultra Optical Fiber Product Information Maximum Attenuation vs. Wavelength,” 2019. Accessed: May 04, 2021. [Online]. Available: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI-1424-AEN.pdf>.
- [37] “Thorlabs - FT200EMT 0.39 NA, Ø200 µm Core Multimode Optical Fiber, Low OH for 400 - 2200 nm, TECS Clad.” <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FT200EMT> (accessed Aug. 21, 2021).
- [38] “Thorlabs - FG200UCC 0.22 NA, Ø200 µm Core Multimode Optical Fiber, High-OH for 250 - 1200 nm, TECS Double Clad.” <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FG200UCC> (accessed Aug. 21, 2021).
- [39] G. P. Agrawal, *Fiber-Optics Communications Systems*, Ed. III. John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [40] “Optical Specifications Corning® MMF62.5/125.” <https://www.photonics.byu.edu/FiberOpticConnectors.parts/images/mmf625.pdf> (accessed Nov. 06, 2021).
- [41] H. Shijiazhuang, “Characteristics of GaAs Concentrator Cells for High-intensity Laser,” *WSEAS Trans. CIRCUITS Syst.*, [Online]. Available: <https://www.wseas.org/multimedia/journals/circuits/2014/a365701-325.pdf>.
- [42] P. Lautenschlager, M. Garriga, S. Logothetidis, and M. Cardona, “Interband critical points of GaAs and their temperature dependence,” *Phys. Rev. B*, vol. 35, no. 17, pp. 9174–9189, Jun. 1987, doi: 10.1103/PhysRevB.35.9174.
- [43] V. M. Emelyanov, S. A. Mintairov, S. V. Sorokina, V. P. Khvostikov, and M. Z. Shvarts, “Simulation of the ohmic loss in photovoltaic laser-power converters for wavelengths of 809 and 1064 nm,” *Semiconductors*, vol. 50, no. 1, pp. 125–131, Jan. 2016, doi: 10.1134/S1063782616010085.
- [44] V. P. Khvostikov *et al.*, “Photovoltaic laser-power converter based on AlGaAs/GaAs heterostructures,” *Semiconductors*, vol. 50, no. 9, pp. 1220–1224, Sep. 2016, doi: 10.1134/S1063782616090128.
- [45] V. P. Khvostikov *et al.*, “High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming,” 2003, Accessed: Mar. 21, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/224749058>.
- [46] J. Mukherjee, S. Jarvis, M. Perren, and S. J. Sweeney, “Efficiency limits of laser power converters for optical power transfer applications,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 26, p. 264006, Jul. 2013, doi: 10.1088/0022-3727/46/26/264006.
- [47] H. Helmers *et al.*, “Pushing the Boundaries of Photovoltaic Light to Electricity Conversion: A GaAs Based Photonic Power Converter with 68.9% Efficiency,” in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Jun. 2021, pp. 2286–2289, doi: 10.1109/PVSC43889.2021.9518920.

- [48] J. Huang *et al.*, “Four-junction AlGaAs/GaAs laser power converter,” *J. Semicond.*, vol. 39, no. 4, p. 044003, Apr. 2018, doi: 10.1088/1674-4926/39/4/044003.
- [49] S. Jarvis, S. Sweeney, S. D. Jarvis, J. Mukherjee, M. Perren, and S. J. Sweeney, “Development and characterisation of laser power converters for optical power transfer applications Perovskite based photonics View project Mid-infrared materials and devices View project Development and characterisation of laser power converters for optical power transfer applications,” *IET*, vol. 8, no. 2, pp. 64–70, 2014, doi: 10.1049/iet-opt.2013.0066.
- [50] V. P. Khvostikov, S. V. Sorokina, F. Y. Soldatenkov, and N. K. Timoshina, “GaSb-based photovoltaic laser-power converter for the wavelength  $\lambda \approx 1550$  nm,” *Semiconductors*, vol. 49, no. 8, pp. 1079–1082, Aug. 2015, doi: 10.1134/S1063782615080114.
- [51] “Photovoltaic Power Converter: YCH-Lxxx, YCH-Hxxxx.” [http://www.mhgopower.com/images/PPC\\_Product\\_Brief\\_Rev\\_2.5\\_10-01-2021\\_EN.pdf](http://www.mhgopower.com/images/PPC_Product_Brief_Rev_2.5_10-01-2021_EN.pdf) (accessed Nov. 06, 2021).
- [52] Broadcom, “Optical Power Converter: AFBR-POCxxxL,” 2019. Accessed: Nov. 06, 2021. [Online]. Available: <https://docs.broadcom.com/doc/AFBR-POCxxxL-DS>.
- [53] Kyosemi, “Photovoltaic Power Converter: KPC8H-FC.” [http://www.kyosemi.co.jp/mgt/wp-content/uploads/products/kpc8h-fc/kpc8h-fc\\_en.pdf](http://www.kyosemi.co.jp/mgt/wp-content/uploads/products/kpc8h-fc/kpc8h-fc_en.pdf) (accessed Nov. 06, 2021).
- [54] Kyosemi, “Photovoltaic Power Converter: KPC8-T.” [https://www.kyosemi.co.jp/mgt/wp-content/uploads/products/kpc8-t/kpc8-t\\_en.pdf](https://www.kyosemi.co.jp/mgt/wp-content/uploads/products/kpc8-t/kpc8-t_en.pdf) (accessed Nov. 06, 2021).
- [55] E. Oliva, F. Dimroth, and A. W. Bett, “GaAs converters for high power densities of laser illumination,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 16, no. 4, pp. 289–295, Jun. 2008, doi: 10.1002/pip.811.
- [56] J.-G. Werthen, “Powering Next Generation Networks by Laser Light over Fiber,” *OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conf. Opt. Fiber Commun. Fiber Opt. Eng. Conf.*, pp. 3–5, 2008, doi: 10.1109/OFC.2008.4528749.
- [57] Y. Zhao, Y. Sun, Y. He, S. Yu, and J. Dong, “Design and fabrication of six-volt vertically-stacked GaAs photovoltaic power converter,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–9, Nov. 2016, doi: 10.1038/srep38044.
- [58] “MH GoPower.” [http://www.mhgopower.com/laser\\_pof\\_YCHPPC.html](http://www.mhgopower.com/laser_pof_YCHPPC.html) (accessed Apr. 03, 2021).
- [59] J. Huang *et al.*, “Characterizations of high-voltage vertically-stacked GaAs laser power converter,” *J. Semicond.*, vol. 39, no. 9, p. 094006, Sep. 2018, doi: 10.1088/1674-4926/39/9/094006.
- [60] W. Xiao, W. G. Dunford, and A. Capel, “A novel modeling method for photovoltaic cells,” in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2004, vol. 3, pp. 1950–1956, doi: 10.1109/PESC.2004.1355416.
- [61] Krismadinata, N. A. Rahim, H. W. Ping, and J. Selvaraj, “Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 17, pp. 537–546, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.proenv.2013.02.069.
- [62] K. S. Abedin and T. Morioka, “Remote detection of fiber fuse propagating in optical fibers,” 2009, doi: 10.1364/ofc.2009.othd5.
- [63] A. M. Rocha, F. Domingues, M. Facão, and P. S. André, “Threshold power of fiber fuse effect for different types of optical fiber,” in *13th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2011, pp. 1–3, doi: 10.1109/ICTON.2011.5971025.

- 
- [64] Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, and R. Nagase, “Fiber Fuse Generation in Single-Mode Fiber-Optic Connectors,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 174–176, Jan. 2004, doi: 10.1109/LPT.2003.820479.
- [65] “High-Power Multimode Fiber Optic Patch Cables: SMA to SMA & Fiber Fuse.” [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4393](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4393) (accessed Feb. 20, 2021).
- [66] A. M. Rocha, A. Martins, M. Facão, and P. S. André, “Effect of bending in SMF fibers under high power,” 2009, doi: 10.1109/ICTON.2009.5185323.
- [67] S. L. Logunov and M. E. DeRosa, “Effect of coating heating by high power in optical fibres at small bend diameters,” *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 12, pp. 897–898, Jun. 2003, doi: 10.1049/el:20030592.
- [68] L. Ma, K. Tsujikawa, N. Hanzawa, and F. Yamamoto, “Design of optical power delivery network based on power limitation of standard single-mode fiber at a wavelength of 1550 nm,” *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 12, p. 3720, Apr. 2015, doi: 10.1364/AO.54.003720.

# Capítulo 3

## Aplicaciones con sensores operando en primera ventana

Resumen:

En este capítulo se aborda el estado de la técnica de la tecnología de *Power over Fiber* en aplicaciones con sensores. Adicionalmente se discuten las consideraciones más relevantes a tener en cuenta en el desarrollo de un sistema PoF que opera en primera ventana. Finalmente se discute la implementación de varias aplicaciones con sensores en diferentes campos tales como en áreas explosivas, el contexto de *Internet of Things* y aplicaciones de pirometría. A lo largo del capítulo también se abordan temas como el *fiber fuse* y el impacto del diámetro modal en el umbral de potencia soportado por la fibra, y se lleva a cabo un análisis de escalabilidad en una configuración Punto a Multipunto.

### 3.1 *Power over fiber* en aplicaciones con sensores

La tecnología de *Power over Fiber* ha diversificado sus aplicaciones en las últimas cuatro décadas desde que se presentaron los primeros experimentos en 1978 en el campo de la telefonía [1][2]. Sin embargo, en el área de los sensores la tecnología ha demostrado poseer múltiples ventajas. En los últimos años se han presentado varios estudios como la alimentación remota de sensores [3][4][5] en entornos peligrosos con alta interferencia electromagnética para medir concentración de gas en subestaciones [6] y en minas [7] para la medición de descargas parciales [8], para redes de sensores inalámbricos [9], para la monitorización de la red eléctrica [10][11]. En [12] se emplea la tecnología para la alimentación de sensores subacuáticos para la observación del fondo marino y otras aplicaciones PoF se abordan en [13]. Además, en [14] se presenta una aplicación de videovigilancia específica en el sector de seguridad. En la mayoría de los escenarios se considera la alimentación remota de un sólo sensor y, en cualquier caso, no se analiza la escalabilidad del sistema, sólo se presenta una implementación simple para cuatro sensores [15] y el desarrollo de un protocolo eficiente en términos de energía consumida y ancho de banda utilizado en una configuración de 6 nodos [16]. Otras soluciones sin embargo se han enfocado en el campo de IoT tales como en [17] y con capacidades de conectividad bluetooth de bajo consumo, de carga de una batería del nodo remoto y medida de variables como temperatura, humedad, campo magnético y aceleración [18].

En los trabajos previamente citados no existe un enfoque integrado para resolver diferentes problemas en un escenario específico, como en la seguridad de infraestructuras críticas y de alta fiabilidad. Tampoco existe una propuesta de sensor inteligente con un gestor de energía (EM, *Energy Manager*) integrado que sea capaz de alimentar simultáneamente a un nodo remoto, cargar una batería externa y con un control centralizado desde la CO a través de un canal de comunicaciones. Adicionalmente, es necesario hacer un análisis de la escalabilidad de los sistemas de medida basados en PoF con un enfoque de distribución de energía en configuración Punto a Multipunto (P2M). Todos estos aspectos no contemplados en el estado del arte serán estudiados en este capítulo.

La alimentación con fibra óptica mejora la fiabilidad de cualquier solución IoT, pues proporciona inmunidad inherente a los campos electromagnéticos circundantes, evitando así el uso de cualquier técnica convencional de reducción de EMI para la red de distribución de energía de los diferentes nodos, lo que



supone un ahorro de costes. El uso de la fibra óptica para la alimentación remota también resulta en un cableado de menor peso en la distribución de la energía a los sensores remotos y más seguro debido a su naturaleza dieléctrica que evita la generación de chispas. Esto desempeña un papel importante en entornos peligrosos, como las instalaciones de los laboratorios donde se utilizan y almacenan materiales inflamables. Además, en función del escenario de uso, puede servir como una fuente redundante de energía con los beneficios antes mencionados. Por otro lado, la incorporación de baterías en los nodos asegura la continuidad del servicio en situaciones excepcionales como averías, catástrofes, entre otros fenómenos.

Por otro lado, existen soluciones comerciales de sistemas PoF de fabricantes como por ejemplo: RLH Systems, Lumentum (JDSU), Broadcom y MH GoPower. Algunas de sus características se muestran en la Tabla 3.1. Entre las soluciones destaca la del fabricante RLH System por su acabado industrial con capacidad de ser insertado en un *rack* de comunicaciones. La potencia óptica máxima de emisión ( $P_o$ ), de este sistema, es de 1 W. Además incluye en la solución un nodo receptor y un canal de comunicación como parte de la misma plataforma.

Tabla 3.1. Parámetros de equipos comerciales de sistemas PoF.

Dispositivo	Consumo [W]	$P_o$ [W]	$\lambda$ [nm]	Fibra (núcleo) [ $\mu$ m]	Dimensiones (LargoxAnchoxAltura) [cm]
RLH [19]	75	<1	830	62,5	27,94 x 33,02 x 8,89
PPM-5 [20]	-	-	750 a 850 900 a 1000	62,5 o 100	-
AFBR-PDPEK521 [21]	$\leq 30$	<10	780 a 850	62,5	15,0 x 8,5 x 4,2
PoFP Series [22]	-	<2,5	-	62,5	10,4 x 9,1 x 6,4
PoFS Series [23]	-	<2,5	-	62,5	7,5 x 4,6 x 2,5

<sup>1</sup>Compatible con IEEE 802.3at-2009; <sup>2</sup>no se proporciona el parámetro.

La solución de Lumentum (JDSU) es un módulo de bajas prestaciones que carece de funcionalidades, más allá de la transmisión de energía. Los fabricantes Broadcom y MH GoPower muestran unas mejoras con respecto a las soluciones previas en términos de funcionalidades, niveles de potencias y nivel de integración. La solución de Broadcom, recientemente lanzada al mercado, posee la novedad de ser alimentado e intercambiar datos a través de un puerto Ethernet (*Power over Ethernet*, PoE). Esta solución cuenta además con un nodo receptor para sensar variables como la temperatura y la humedad. El fabricante MH GoPower tiene entre sus soluciones más importantes las plataformas: PoFP y PoFS. La primera plataforma está orientada al desarrollo de aplicaciones de propósito general, mientras que la solución PoFS es para la

monitorización en el campo de los sensores. En general ambas plataformas presentan capacidades similares a la solución del fabricante Broadcom. Ambos fabricantes incluyen en sus soluciones un canal de comunicación bidireccional para el intercambio de información con el nodo remoto. Por último, la tecnología PoF también se ha integrado como parte de soluciones comerciales en el campo de la instrumentación. El fabricante Tektronix en [24] integra en las sondas IsoVuGen2 la tecnología PoF en aplicaciones de medida, con una longitud máxima de fibra de 10 m, con el objetivo de aumentar el nivel de aislamiento eléctrico de sus equipos de medición.

A causa de la importancia de la tecnología PoF en el campo de los sensores, en esta investigación se desarrollan aplicaciones específicas que cubren las principales limitaciones del estado de la técnica hasta el año 2019. En este capítulo se presentan las principales contribuciones que son fundamentalmente una extensión de las investigaciones presentadas en [25] y en [26].

Primeramente, se abordan las consideraciones más importantes que se tienen en cuenta para el diseño e implementación de un sistema PoF que opera en la primera ventana, así como la implementación de diferentes versiones de un módulo de transmisión de energía. También se mencionan algunas consideraciones relacionadas con el medio de transmisión de energía. Por otro lado, se implementan diferentes nodos con funcionalidades específicas en función de la aplicación. La funcionalidad de cada nodo se aborda cuando se desarrolla la aplicación correspondiente.

### **3.2 Sistema de alimentación con luz en primera ventana**

El objetivo fundamental de las aplicaciones que se desarrollan en este capítulo es entregar la máxima energía en distancias cortas para aplicaciones con sensores. Siguiendo estas consideraciones se diseña un módulo transmisor que se integra en diferentes soluciones con sensores y de alimentación remota. En el análisis se usa como figura de mérito el valor de la SEE, definida en el epígrafe 2.2.

Para llevar a cabo un diseño óptimo del sistema es necesario considerar diferentes aspectos:

- I. La correspondencia adecuada entre la longitud de onda del láser de alta potencia que suministrará la energía, la eficiencia de conversión de la celda PVC, y la atenuación de la fibra óptica para la longitud del enlace requerida.
- II. La influencia de la temperatura en el rendimiento del láser y las protecciones implementadas en el *driver* del láser.
- III. La selección del medio de transmisión e impacto de la eficiencia de acoplo entre el láser y la fibra óptica ( $\eta_a$ ).
- IV. La potencia máxima que se inyecta en la fibra para evitar el *fiber fuse* y la degradación de los elementos pasivos.
- V. El impacto de la temperatura en el rendimiento de la PVC.
- VI. La tensión de salida y la potencia eléctrica adecuadas para la carga a alimentar.

La consideración número I permite determinar en función del escenario de aplicación cuál es la solución más adecuada. Para llevar a cabo el análisis se consideran diferentes casos de estudios (CE<sub>x</sub>), véase la Tabla 3.2. Se consideran fibras ópticas de sílice disponibles en el laboratorio. El objetivo fundamental es determinar en cuál de los CE es mayor el valor de la SEE [25]. El estado de la técnica en relación con las eficiencias de las PVC se puede consultar en el capítulo 2.

Tabla 3.2. Parámetros de los diferentes casos de estudio [25].

Caso de estudio (CE <sub>x</sub> )	Atenuación [dB/km]	Longitud de onda [nm]	Eficiencia de la PVC [%]
CE1	2,5	808 (primera ventana)	52
CE2	4	980 (segunda ventana)	34
CE3	0,2	1480 (tercera ventana)	26

La Figura 3.1 muestra el comportamiento de la SEE en función de la longitud del enlace y considerando los parámetros que se muestran en la Tabla 3.2. En este primer análisis se considera que la eficiencia  $\eta_a$  es del 100 % en todos los CE. Se observa que para las longitudes menores a ~1,3 km, el CE1 es la mejor opción de diseño, mientras que para longitudes mayores es recomendable implementar soluciones que operen a una longitud de onda más larga, de 1480 nm. En el CE1 domina el efecto de la eficiencia de la PVC y, por el contrario, conforme aumenta la distancia del enlace el efecto de la atenuación comienza a dominar y por tanto CE3 pasa a tener un mejor valor de SEE.

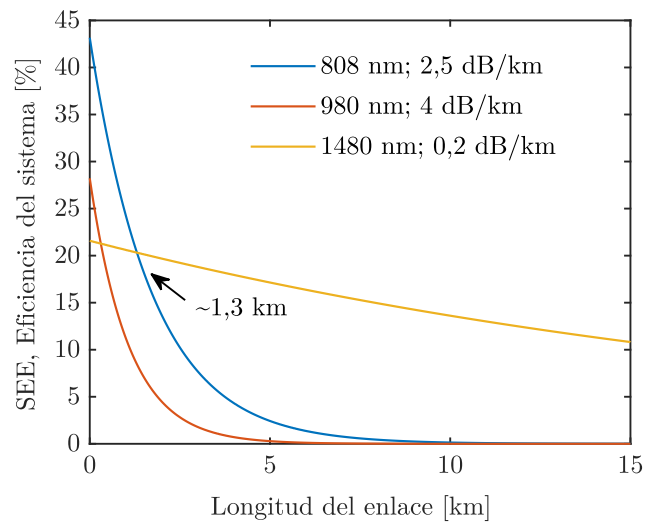


Figura 3.1. Análisis de la eficiencia del sistema, SEE, en función de la distancia del enlace para diferentes longitudes de ondas.

Como resultado, la fuente de energía debe operar a una longitud de onda de 808 nm para maximizar el comportamiento de la SEE en aplicaciones de corta distancias y menores a  $\sim 1,3$  km. Basado en este requisito se desarrolla un módulo transmisor de energía que opera en primera ventana. El proceso de diseño que se lleva a cabo durante la investigación incluye 3 versiones del módulo (V1, V2, V3), siendo V3 la última versión. La Figura 3.2 muestra la apariencia y el progreso en el nivel de integración desde la versión V1 a la V3.

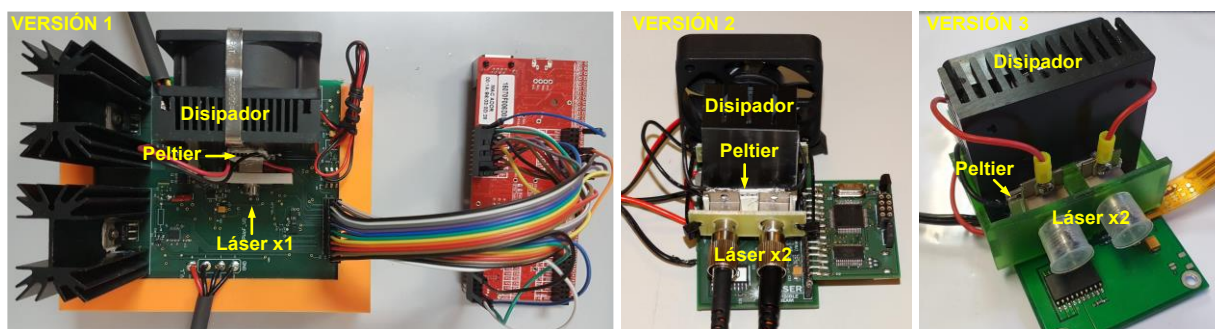


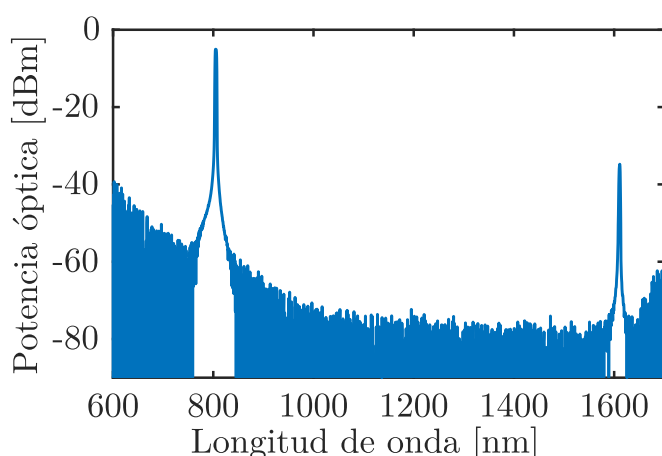
Figura 3.2. Imagen de las 3 versiones de los módulos de transmisión en primera ventana.

En la Tabla 3.3 se muestra el incremento de la potencia óptica de emisión de la versión V3 con respecto a la V1, al tiempo que su tamaño es mucho menor. Esto representa un aumento en un factor de 16 de la densidad de la potencia manejada por la versión V3 con respecto a la de V1, pasando de 1,28 mW/cm<sup>3</sup> a 20,5 mW/cm<sup>3</sup>. Para el cálculo de la densidad de potencia en cada una de las versiones, se consideran sus dimensiones físicas mostradas en la Tabla 3.3. Por otro lado, una gran diferencia de las versiones V2 y V3 con respecto a la V1 es la integración, como parte del diseño, de un bloque de control basado en microcontroladores de la familia MSP430. La versión V1 usa para el control una tarjeta de desarrollo del fabricante Texas Instruments.

Tabla 3.3. Potencia óptica de emisión y dimensiones en cada una de las versiones del módulo.

Versión del módulo	Dimensiones (Largo x Ancho x Altura)[cm]	Potencia de emisión [mW]	Densidad de potencia [mW/cm <sup>3</sup> ]
Versión 1	16,3x12,3x6	1500	1,28
Versión 2	9x4,2x4,3	3000	18,46
Versión 3	8,1x4,2x4,3	3000	20,5

La fuente de energía que se decide usar para la implementación de los módulos es un láser de semiconductor por su pequeño tamaño y su bajo precio como consecuencia de su uso en múltiples aplicaciones en la industria. El láser que se incluye en el diseño tiene una potencia óptica de emisión de 1,5 W con una corriente de operación de 2,2 A y a una longitud de onda de 808 nm; la Figura 3.3(a) muestra una caracterización de su espectro de emisión.



(a)



(b)

Figura 3.3. Características del láser de alta potencia; (a) componentes espectrales; (b) encapsulado del láser TO-220-3.

Este láser posee varias ventajas con respecto a otras soluciones similares:

- un conector tipo FC que permite un acoplo directo a fibra, sin necesidad de óptica de colimación externa para acoplar la luz a la fibra óptica. La eficiencia teórica de acoplo ( $\eta_a$ ) a una fibra de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro y apertura numérica 0,22 es del 100 %;
- posee un encapsulado TO-220-3, el cual es típico en elementos de potencia por lo que el uso de disipadores estándares supone un avance para el desarrollo del diseño, véase la Figura 3.3(b);
- posee un termistor interno tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) que permite la monitorización de su temperatura.

La consideración número II se refiere a la influencia de la temperatura en el rendimiento del láser y las protecciones electrónicas implementadas en el *driver* que evitan sobrecalentamiento y encendidos no deseados. En los láseres, la temperatura de operación se incrementa conforme es mayor la potencia disipada por el dispositivo, en ausencia de un mecanismo de disipación de calor adecuado. Un control inadecuado de la temperatura puede causar daños irreversibles, que en el caso del láser que se utiliza ocurre a los 60°C [27]. Este control se lleva a cabo en todos los módulos, a través de acciones combinadas que incluyen el *software* del módulo, la NTC, los disipadores metálicos y un elemento Peltier. El Peltier es una bomba de calor basada en el principio físico del efecto Peltier [28]. Aunque cada versión del módulo posee sus particularidades en el control de la temperatura, en la última versión el tamaño de la solución se reduce considerablemente con respecto a la solución inicial, véase la Figura 3.4.

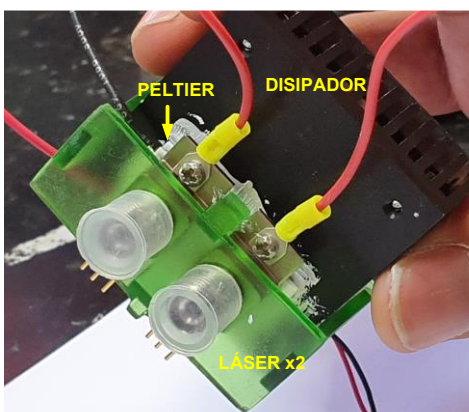


Figura 3.4. Solución para la disipación del calor de los láseres de potencia.

La solución incluye al conjunto formado por: (i) el disipador y el ventilador, con una resistencia térmica de  $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$  y (ii) el elemento Peltier. En el diseño la temperatura del láser se mantiene  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,01\%$ . Otros puntos a considerar son: (i) el encendido seguro del láser y (ii) la monitorización de su temperatura de operación. Ambos mecanismos son implementados por hardware, lo cual brinda una seguridad adicional ante fallos en la ejecución del software que controla los módulos.

El encendido del láser se controla a través de dos señales: C\_micro y E\_enable/error, véase la Figura 3.5. La señal C\_micro es generada directamente por el microcontrolador a través de uno de sus pines de propósito general, donde el '1' lógico activa el encendido del láser y por el contrario el '0' lógico lo apaga. La señal E\_enable/error tiene doble funcionalidad, ya que actúa como señal de habilitación para el encendido del láser y como señal de error cuando el *hardware* detecta que se requiere un apagado de emergencia. Ambas señales se inyectan en una compuerta lógica AND, cuya salida controla directamente el *driver* del láser. El encendido del láser se habilita cuando la señal E\_enable/error posee un valor lógico '1'. Este nivel lógico sólo es posible establecerlo si se cumplen las siguientes dos condiciones: (i) el *hardware* no detecta sobrecalentamiento, en este caso la señal D\_error posee un nivel lógico '1 y (ii) el microcontrolador genera la secuencia adecuada en los pines CLK y D en el *flip-flop* a través de las señales A\_micro y B\_micro respectivamente. La Tabla 3.4 muestra 3 de los estados más relevantes del circuito de protección diseñado y fabricado.

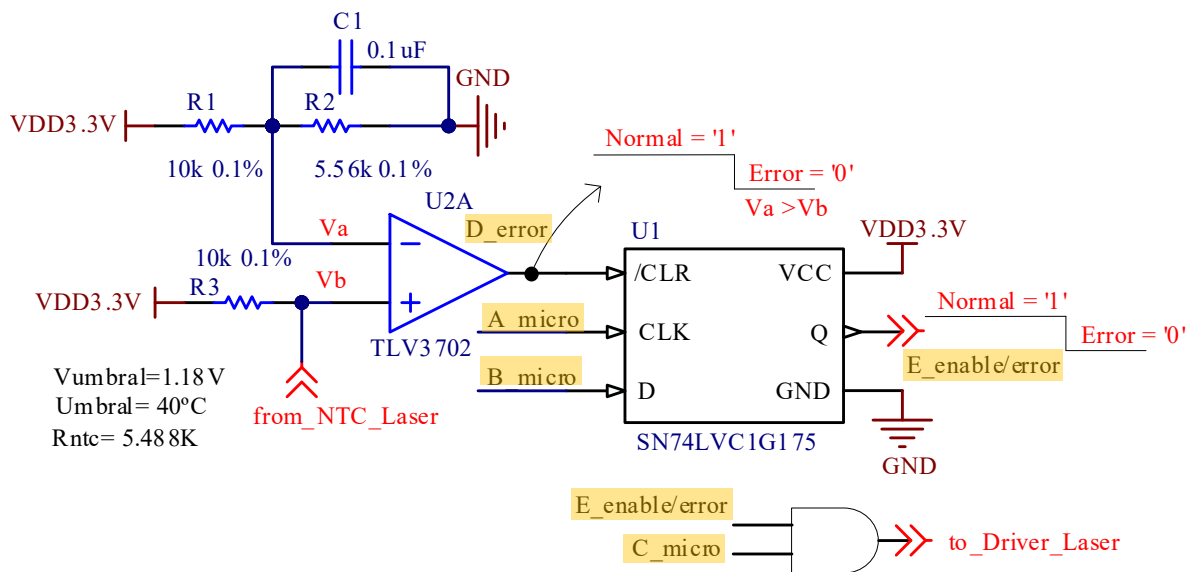




Figura 3.5. Circuito de habilitación y protección contra sobrecalentamiento del láser, basado en el *flip-flop* tipo D, SN74LVC1G175, y el comparador con histéresis TLV3702.

En cambio, si no se cumple la primera condición es porque el *hardware* detecta que la temperatura del láser supera los 40°C (sobrecalentamiento). En la detección del sobrecalentamiento actúan fundamentalmente el comparador TLV3702, el *flip-flop* tipo D y el termistor tipo NTC de uno de los láseres. El valor de temperatura umbral se fija con un voltaje de referencia ( $V_a$ , 1,18 V) que se determina a partir de la curva característica de la NTC. Para generar este voltaje se usa un divisor resistivo conectado al terminal negativo del comparador a partir de una fuente de tensión de 3,3 V. En el terminal positivo se conecta otro divisor resistivo, en el que se incluye la NTC y genera un voltaje  $V_b$  que está en función de la temperatura del láser. En esta configuración la salida del comparador ( $E\_enable/error$ ) posee un nivel lógico '0' (sobrecalentamiento) si se cumple la condición  $V_a > V_b$ , la cual a su vez genera un nivel lógico '0' en la salida del *flip-flop* tipo D.

Tabla 3.4. Estados de las señales de control del circuito de protección de encendido y sobrecalentamiento del láser.

A_micro	B_micro	C_micro	D_error	E_enable/error	Funcionalidad
	1	1	1	1	Láser encendido
x <sup>1</sup>	1/0	1/0	0	0	Láser apagado
	1	0	1	1	Láser apagado

Una vez que se selecciona la fuente de energía y en base a las características que suministra el fabricante del láser, se analiza la consideración III para evaluar el impacto del factor de acoplo con la fibra óptica ( $\eta_a$ ). Este análisis se lleva a cabo para las fibras multimodos de mayor diámetro disponibles en el laboratorio: las fibras multimodo de 62,5/125  $\mu\text{m}$  y de 200/225  $\mu\text{m}$  de diámetro y cubierta, respectivamente. En el análisis se considera un factor de acoplo del ~47 % y del 100 % para el caso de la fibra de multimodo de 62,5/125  $\mu\text{m}$  y de 200/225  $\mu\text{m}$ , respectivamente, los cuales se obtienen a partir de estimaciones y de los parámetros que brinda el fabricante del láser en las hojas de características.

La Figura 3.6 muestra la penalización del factor de acoplo en el valor de la SEE para ambas fibras en función de la longitud del enlace. Se observa que a longitudes menores a ~430 m es más eficiente usar fibras multimodo de 200/225  $\mu\text{m}$  (núcleo/cubierta) en lugar de la fibra multimodo de 62,5/125  $\mu\text{m}$  (núcleo/cubierta), a una longitud de onda de operación de 808 nm.

<sup>1</sup> Don't care



En relación con la consideración IV, la potencia máxima que se inyecta en la fibra no debe superar el límite a partir del cual ocurre el fenómeno del *fiber fuse*. Este valor límite depende de varios factores y será abordado en el epígrafe 3.3.3 . La degradación de los elementos pasivos depende fundamentalmente del nivel de potencia al que está expuesto el dispositivo y del tiempo de exposición. Por lo general, en el desarrollo de las aplicaciones se utilizan componentes que soportan al menos el doble de la potencia máxima de exposición.

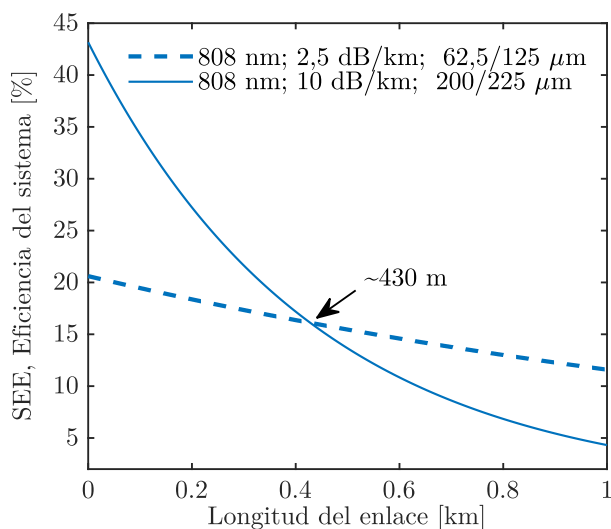


Figura 3.6. Análisis de la eficiencia del sistema, SEE, en función de la distancia del enlace, considerando un factor de acoplo,  $\eta_a$ , del  $\sim 47\%$  para la fibra multimodo de  $62,5/125\ \mu\text{m}$  (núcleo/cubierta) y de  $100\%$  para la fibra multimodo de  $200/225\ \mu\text{m}$  (núcleo/cubierta); se considera una eficiencia de la PVC del  $52\%$  para ambos casos.

La consideración V evidencia la dependencia de la eficiencia de la PVC con la temperatura. La Figura 3.7 muestra las caracterizaciones de la PVC, que se utiliza en las aplicaciones que se discuten en los próximos epígrafes. La caracterización se realiza con unas potencias ópticas de inyección de  $490\ \text{mW}$  y  $925,5\ \text{mW}$ , obteniéndose unas potencias eléctricas máximas de  $190\ \text{mW}$  y  $340\ \text{mW}$  respectivamente; esto representa una disminución de la eficiencia de conversión de  $\sim 2\%$  con el incremento de la potencia óptica incidente, al pasar de  $38,78\%$  a  $36,76\%$  respectivamente.

Este deterioro en el rendimiento es consecuencia, entre otros factores, del incremento de temperatura. Este incremento se debe fundamentalmente a la potencia óptica incidente que no es convertida en eléctrica, por lo que cuanto menor es la eficiencia mayor es la potencia que se disipa. Por otro lado, el incremento de temperatura de la PVC es proporcional a la resistencia térmica del material que se usa para disipar la

potencia. La técnica más común para disminuir el valor de la resistencia térmica es mediante la utilización de disipadores pasivos. La Figura 3.8 muestra dos ejemplos de disipadores que se usan para el manejo de la disipación de la potencia de la celda. El disipador comercial (Figura 3.8 (a)) se usa en los epígrafes siguientes en las aplicaciones de sensado. La Figura 3.8(b) muestra otro ejemplo de disipador con mayor capacidad de disipación de potencia.

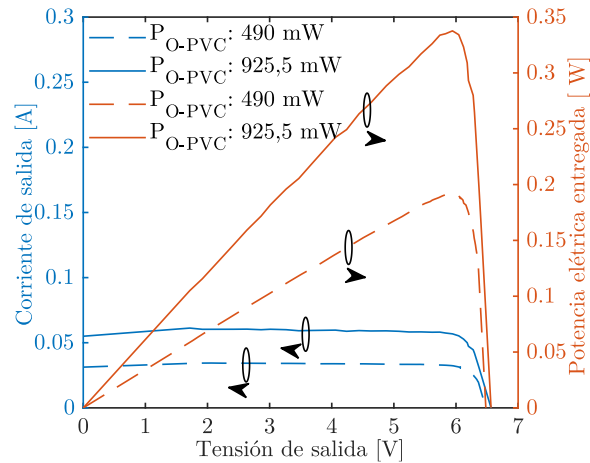
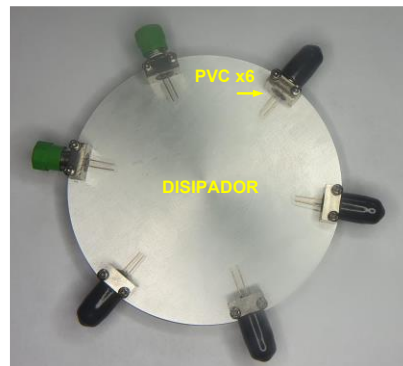


Figura 3.7. Curvas experimentales corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V) de la celda fotovoltaica para diferentes potencias incidentes.



(a)



(b)

Figura 3.8. Disipadores para la disipación de la potencia: (a) disipador comercial; (b) diseño específico.

Por último, la consideración número VI se refiere a la electrónica que es necesaria para adaptar la tensión que suministra la PVC a los requerimientos de la carga. La complejidad depende de muchos factores y suele ser más compleja en los nodos que incluyen múltiples funcionalidades.

En los siguientes epígrafes se implementan algunas soluciones con sensores basada en la tecnología PoF y basadas en las consideraciones enunciadas anteriormente. Las características comunes a todas las aplicaciones son: (i) longitud de onda de operación de 808 nm, (ii) se usan fibras de tipo multimodo de 200/225  $\mu\text{m}$ , (iv) la potencia óptica de emisión del láser es de 1,5 W y (v) las distancias de interés son menores a 430 m.

### **3.3 *Power over Fiber* en aplicaciones de seguridad y atmósferas explosivas**

En este epígrafe se implementa el diseño de un sistema PoF que se usa en escenarios de seguridad y detección de incendios [25]. Estos sistemas pueden integrarse en redes de sensores donde ya existen sistemas de detección basados en fibras o comunicaciones óptica y pueden resolver algunas de las desventajas de los sistemas tradicionales de alimentación (cobre, baterías), como la necesidad de sustituir periódicamente las baterías o su dependencia de fuentes de energía fluctuantes, como la solar. También es posible combinar diferentes sistemas de alimentación en la misma solución.

#### **3.3.1 Descripción del escenario de aplicación**

Una zona peligrosa es cualquier espacio tridimensional en el que cabe esperar que haya una atmósfera inflamable y que requiera precauciones especiales de funcionamiento. Ejemplos de zonas peligrosas son: instalaciones de laboratorio donde se utilizan y almacenan líquidos inflamables, procesos de impresión con disolventes inflamables, tanques de almacenamiento de líquidos y gases inflamables y equipos asociados, entre otras [29]. Estas áreas suelen estar situadas en entornos industriales y deben seguirse reglamentos y normas específicas para garantizar el mayor nivel de seguridad posible. Sin embargo, la violación de los pictogramas de indicación de peligro de las vallas de seguridad entre otros, son algunas de las violaciones que suelen terminar en un lamentable accidente. De ahí que existan en el mercado soluciones enfocadas a: (i) el control de acceso en entornos industriales y (ii) en la detección y monitorización de atmósferas

peligrosas. Las fibras ópticas son buenas candidatas para ser utilizadas en estos entornos peligrosos, porque una fibra rota no produce chispas y no se ven afectadas químicamente por la mayoría de las sustancias que reaccionan con algunos metales. También proporcionan seguridad pues es muy difícil intervenir una fibra sin ser detectado.

La tecnología PoF permite suministrar: (i) potencia a través de la fibra óptica, (ii) potencia bajo demanda adaptada al consumo del sensor, (iii) transmisión de datos y gestión del sensor, (iv) alimentación de múltiples sensores, entre otros. Un posible escenario de aplicación que puede beneficiarse de estas ventajas es un entorno industrial como el que se muestra en la Figura 3.9 donde confluyen muchos factores que pueden provocar un incendio o una explosión: la presencia de combustible y oxígeno en determinadas proporciones y la fuente de ignición. Estos factores suelen estar asociados a errores humanos; el control del acceso no autorizado a las zonas de riesgo puede evitar la aparición de accidentes. Las características ignífugas de las fibras ópticas (véanse las normas IEC 60332-1, IEC 60331-25), junto con la medición adecuada de las variables críticas, contribuyen a minimizar el riesgo.

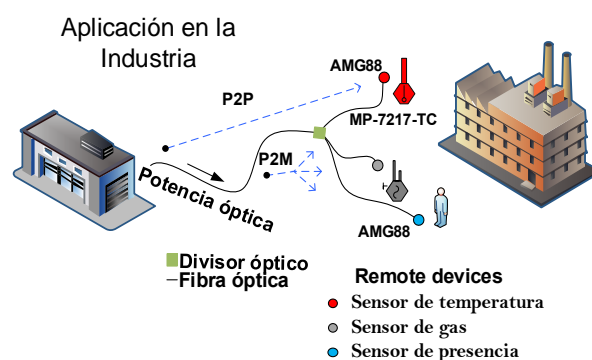


Figura 3.9. Alimentación óptica mediante fibra óptica en entornos peligrosos. P2P: Punto a Punto; P2M: Punto a Multipunto.

Tabla 3.5. Consumo de algunos sensores.

Tipo de sensor	Consumo	Aplicación
AMG88	30 mW	Detección de movimiento y temperatura
MP-7217-TC	150 mW	Detección de metano
VQ548MP	297 mW (en el encendido)	Detección de gases inflamables

En este escenario de riesgo se requiere la monitorización de varias variables como la humedad, la temperatura o la concentración de gases peligrosos, como parte de un sistema de vigilancia. En la Tabla 3.5 se muestran algunos ejemplos de estos sensores y su consumo medio, los cuales oscilan entre decenas y cientos de milivatios (mW) por lo que se pueden alimentar con sistemas PoF.

Cuando se consideran redes de sensores con múltiples parámetros a monitorizar, es necesario alimentar un número importante de sensores de forma óptica y remota con posibles topologías diferentes en configuración P2M. Si se considera una topología en estrella con un divisor pasivo, véase la Figura 3.9, todos los sensores o nodos remotos reciben la misma alimentación. Por lo general, los sensores deben colocarse en lugares específicos, lo que puede afectar a la topología seleccionada y a la longitud de la fibra requerida. Aunque es posible diseñar la topología utilizando una relación de división diferente para cada salida, esto no es tan sencillo en términos de divisores pasivos disponibles y su coste.

### 3.3.2 Demostrador de la aplicación

En esta aplicación se desarrolla un sistema PoF que proporciona todas las ventajas esperadas, como la capacidad de aislamiento galvánico entre dos extremos de la fibra, su inmunidad a la interferencia electromagnética, y se proporciona una prueba de concepto alimentando remotamente un sensor de proximidad. También se llevan a cabo diferentes análisis: (i) de escalabilidad para alimentar múltiples sensores, (ii) el límite superior del número de sensores remotos que pueden ser alimentados ópticamente y (iii) los factores limitantes; considerando diferentes tipos de fibras ópticas multimodo, longitudes de la fibra y la longitud de onda de operación.

En este experimento se utiliza la primera versión (V1) del módulo transmisor de energía el cual está integrado, como se comentó anteriormente, por un láser de semiconductor con una potencia óptica máxima de emisión de 1,5 W y está optimizado para operar con fibras ópticas de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro del núcleo.

Como ya se ha dicho, los entornos peligrosos requieren condiciones de funcionamiento seguras y el sistema PoF trabaja a altas potencias ópticas. Por esta razón se desarrolla un mecanismo de protección específico para detectar si la fibra está conectada previamente al encendido del láser. Esta protección tiene

como objetivos: (i) evitar que el láser se convierta en una fuente de ignición por sí mismo o que cause daños al operador y (ii) detectar cambios en el enlace, por ejemplo, la atenuación.

El mecanismo consiste en la transmisión de un pulso de corta duración por la fibra óptica de alimentación como parte del proceso de encendido; el receptor replica este pulso por *hardware* (eco) enviándolo de vuelta al transmisor a través de una fibra adicional, véase la Figura 3.10. Hay dos bloques, uno basado en *firmware* y *hardware* en el transmisor y el otro sólo basado en *hardware* en el lado del receptor. El transmisor utiliza el láser (HPLD) para generar el pulso pero operando alrededor de su corriente umbral. El pulso de eco es detectado por un amplificador con factor de ganancia de 70 dB, y es adquirido por el convertidor digital-analógico de 12 bits del microcontrolador para ser validado. La amplitud del pulso amplificado está en el rango de decenas a cientos de milivoltios (mV), dependiendo de las características y topología del sistema PoF. Los pulsos transmitidos y eco medidos pueden verse en la Figura 3.11. El receptor sólo utiliza el *hardware* para replicar el pulso, ya que la ejecución del *firmware* requiere un consumo de energía adicional no deseado. La amplitud del pulso eco puede utilizarse para estimar las pérdidas del enlace.

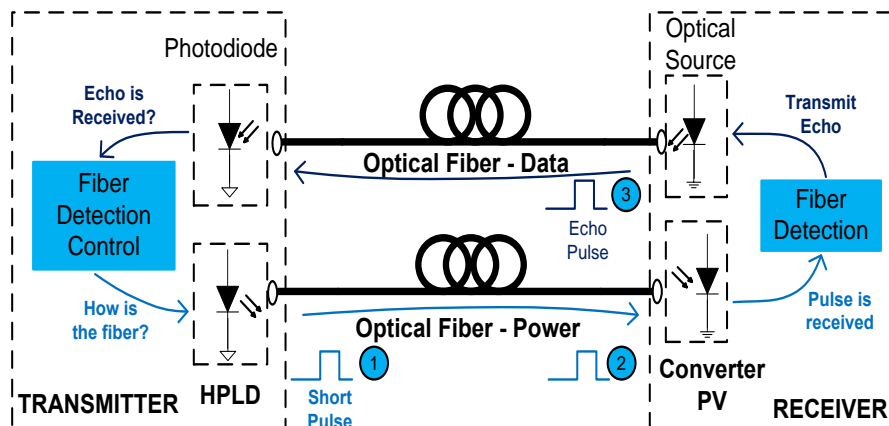


Figura 3.10. Sistema PoF con detección de fibra. HPLD: *High Power Laser Diode*.

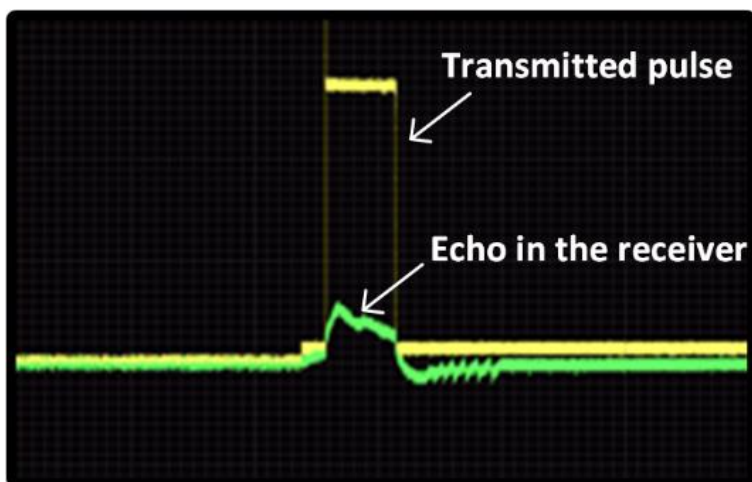


Figura 3.11. Pulsos transmitidos y recibidos del esquema de detección de la fibra.

La Tabla 3.6 resume el conjunto de ensayos experimentales realizados con el sistema PoF descrito en el apartado anterior. Se han realizado con fibras ópticas multimodo de sílice con diferentes perfiles del índice de refracción: (i) salto de índice (SI), y (ii) índice gradual (GI).

Tabla 3.6. Medición de la potencia eléctrica suministrada al nodo.

Tipo de fibra (núcleo/diámetro de la cubierta, $\mu\text{m}$ )	Longitud del enlace [m]	Potencia eléctrica entregada [mW]
GI-sílice (62.5/125 $\mu\text{m}$ )	1	240
SI-sílice (200/225 $\mu\text{m}$ )	1	409
SI-sílice (200/225 $\mu\text{m}$ )	300	360

Como prueba de concepto, se prueba el sistema PoF para alimentar a distancia un sensor de proximidad que utiliza la tecnología de detección térmica basada en MEMS, véase la Figura 3.12. En [30], se puede ver un video del experimento de laboratorio.

El sensor que se usa es el AMG88 que posee una matriz de sensores infrarrojos formada por 64 (8x8 píxeles) microsensores térmicos dentro del mismo paquete. El mismo permite la detección de la radiación corporal y de otros objetos con un alcance de 7 metros. Los módulos de *Arduino One*, el conversor I2C-1Wire y la tarjeta del AMG88 sólo sirven para el control lógico del sensor y la adquisición de datos.

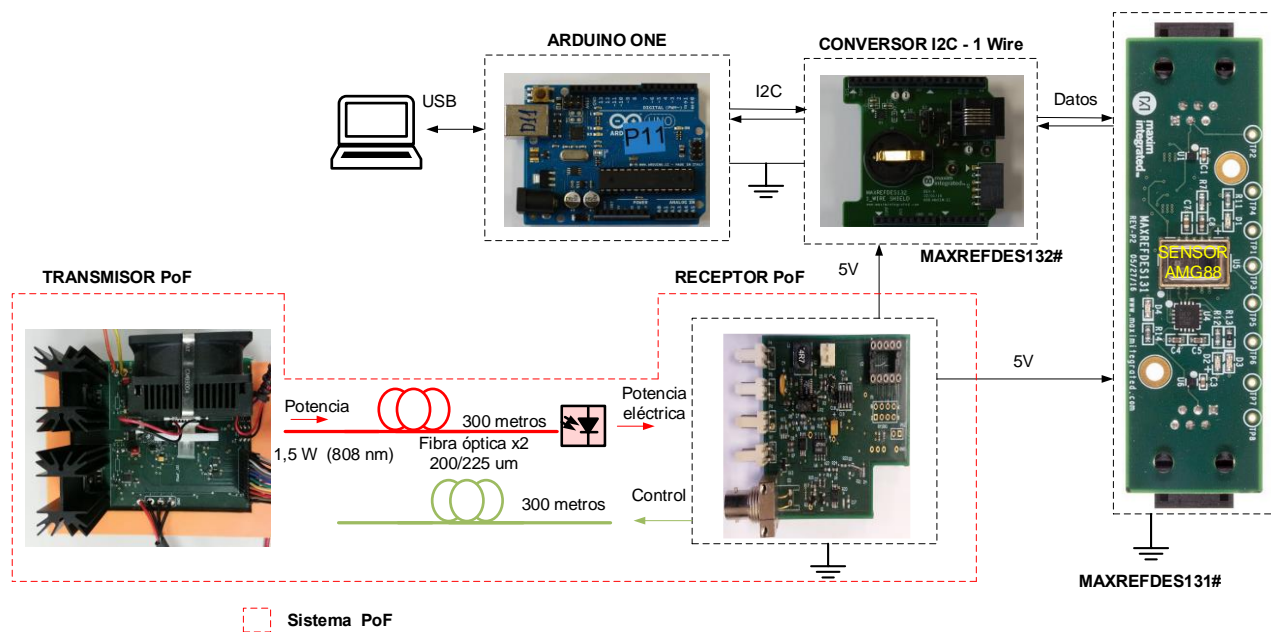


Figura 3.12 Implementación del sistema PoF para alimentar ópticamente a distancia un sensor de proximidad.

El sistema PoF emplea 2 fibras ópticas de 200/225  $\mu\text{m}$  (diámetro del núcleo/cubierta) de 300 m de longitud. Una de las fibras se utiliza para la alimentación óptica a distancia, mientras que la otra fibra se emplea para enviar información de control hacia la oficina central (lado del transmisor PoF), lo cual permite al sistema realizar una supervisión inteligente a distancia. La tasa de bits de este enlace de control es de 30 kbps, suficiente para esta aplicación.

Por otro lado, un importante parámetro a determinar en el diseño es el número de sensores o nodos,  $N_{s\text{ens}}$ , que se pueden alimentar considerando la máxima potencia que soporta la fibra óptica, lo cual permite implementar una topología P2M. El valor de  $N_{s\text{ens}}$ , se puede determinar a partir de:

$$N_{s\text{ens}} = 10^{\left\lfloor \frac{P_{in\_max} - P_{RX} - \alpha_{fibra} L_{fibra} - \alpha_{con} N_{con} - EL_{1xN}}{10} \right\rfloor} \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde  $P_{in\_max}$  es la potencia óptica máxima que puede soportar la fibra en dBm,  $P_{RX}$  es la potencia óptica suministrada a la PVC en dBm,  $\alpha_{fibra}$  es la atenuación de la fibra óptica en dB/km,  $L_{fibra}$  es la



longitud de la fibra en km,  $\alpha_{con}$  es la pérdida de cada conector en dB,  $N_{con}$  corresponde con el número de conectores, y  $EL_{1xN}$  se corresponde con las pérdidas en exceso del divisor 1xN en dB, respectivamente.

La potencia óptica suministrada a la celda,  $P_{RX}$ , debe asegurar la potencia eléctrica demandada por el sensor, así:

$$P_{RX}(\text{dBm}) = 10 \log \left( \frac{P_{PVC}(\text{mW})}{\eta_{PVC}} \right) \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde  $P_{PVC}$  es la potencia eléctrica consumida por el sensor de mayor consumo, y  $\eta_{PVC}$  es la eficiencia de conversión de la PVC.

La potencia disponible para alimentar cada sensor en una topología P2M es  $N$  veces menor que en el caso de utilizar la topología P2P. También es posible analizar el sistema utilizando una topología de bus, pero en ese caso se necesitan más elementos pasivos y hay que ajustar la relación de acoplamiento en cada división para mantener la misma potencia disponible para cada sensor [31].

En este caso, a partir de la Ec. 3.1 se estima que se podrían alimentar hasta 5 sensores de forma remota en un perímetro de 300 m. Para esta estimación se asume un coeficiente de atenuación de la fibra de 10 dB/km (808 nm), una eficiencia de acoplamiento  $\eta_a$  de 100 %, 1 dB debido a los conectores de la fibra en todo el enlace, un divisor óptico 1x2 con un exceso de pérdidas de 0,5 dB, y el nivel de potencia máximo recomendado por el fabricante [32].

Este análisis se puede generalizar a partir de determinar la máxima potencia que soporta la fibra óptica calculando el diámetro de campo modal (MFD), lo cual se discute en los próximos epígrafes.

### 3.3.3 Discusión

En este epígrafe se lleva a cabo un análisis de escalabilidad partiendo de la potencia máxima que soporta una fibra ( $P_{th}$ ) determinada por su diámetro de campo modal (MFD), lo que permite calcular el número de sensores que se pueden alimentar con un sistema PoF, de gran interés en sistemas P2M. Finalmente se discute la influencia del perfil del índice de refracción de la fibra óptica (salto de índice o gradual) en el

MFD. En relación a este parámetro de la fibra óptica existe un amplio conjunto de trabajos sobre los límites de potencia de inyección en las fibras ópticas de sílice [33][34]. Sin embargo, la magnitud relativa del umbral de daño ( $I_{th}$ ) para las fibras ópticas aún no se ha establecido estrictamente. El valor que se considera en los análisis que siguen es de 2,5 MW/cm<sup>2</sup>. La dependencia entre los parámetros  $P_{th}$  y el diámetro de campo modal, viene dada por la expresión:

$$P_{th} = I_{th}A_{eff} = \pi \cdot \left(\frac{MFD}{2}\right)^2 I_{th} \quad \text{Ec. 3.3}$$

donde  $A_{eff}$  es el área efectiva de la fibra óptica.

### 3.3.3.1 Análisis de escalabilidad

Más allá de las aplicaciones PoF que implican una única fibra óptica dedicada a la alimentación, esta sección se centra en las topologías P2M. A partir de la misma, se analiza la viabilidad de alimentar ópticamente redes de sensores inteligentes de forma centralizada. Se considera una distancia de cobertura inferior a 430 m.

La escalabilidad se analiza mediante la figura de mérito definida como  $N \times P_{PVC}$ , siendo  $N$  el número de sensores alimentados ópticamente y  $P_{PVC}$  el valor del mayor consumo de energía de todos los nodos de la red de sensores P2M. La Figura 3.13 representa la influencia de la longitud del enlace y el diámetro del núcleo de la fibra en la figura de mérito  $N \times P_{PVC}$ , para una fibra óptica de sílice SI con pérdidas de 2,5 dB/km a 808 nm. La potencia óptica total lanzada al sistema PoF,  $P_{th}$ , que se distribuirá entre los  $N$  sensores se calcula a partir de Ec. 3.1. En la simulación se asume una densidad de potencia umbral de la fibra cercana al límite teórico,  $I_{th} = 2,5 \text{ MW/cm}^2$ , y un área efectiva determinada únicamente por el diámetro del núcleo de la fibra. Para emular un escenario real de distribución PoF se considera: (i) un acoplamiento  $\eta_a$  de 100 %, (ii) una eficiencia de la PVC del 52 %, (iii) 1 dB de penalización debido a los conectores de la fibra en todo el enlace y (iv) unas pérdidas de exceso en el divisor óptico 1xN (genérico) de 0,5 dB.

Los resultados teóricos muestran, por ejemplo, que un sistema PoF que utiliza una fibra con un diámetro del núcleo de  $100\ \mu\text{m}$  y  $100\ \text{m}$  de longitud proporciona una figura de mérito ( $N \times P_{PVC}$ ) de  $57\ \text{W}$ . Esto significa que podrían alimentarse  $5700$  sensores mediante PoF a una distancia de  $100\ \text{m}$  si el consumo máximo de energía por nodo es inferior a  $10\ \text{mW}$  y se dispone de energía suficiente. El punto azul ( $N \times P_{PVC}$ ) representa otra fibra óptica de sílice SI con  $10\ \text{dB/km}$  de pérdidas a  $808\ \text{nm}$ , con un diámetro del núcleo  $200\ \mu\text{m}$  y con una longitud de fibra de  $300\ \text{m}$ . En este caso, el sistema PoF muestra un factor  $N \times P_{PVC}$  de  $138\ \text{W}$ . Una buena regla general de diseño es mantener la densidad de energía en torno a cuatro o seis veces menor que el límite superior  $I_{th}$  del umbral de daño esperado [32][33]. Los resultados de la Figura 3.13 pueden ser escalados consecuentemente para esta consideración de diseño. Por ejemplo, si se considera una densidad de energía  $I = 250\ \text{kW/cm}^2$ , un orden de magnitud inferior a lo considerado previamente ( $I_{th} = 2,5\ \text{MW/cm}^2$ ), el número de nodos remotos que se pueden alimentar con PoF se reduce en consecuencia, siendo de  $570$  sensores para el primer caso analizado.

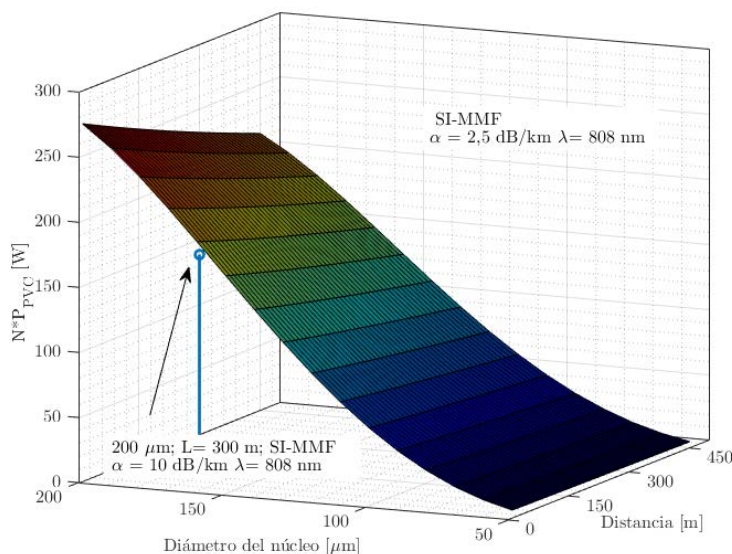


Figura 3.13. Figura de mérito para cada longitud de fibra y diámetro del núcleo. Punto azul  $N \times P_{PVC} = 138\ \text{W}$ , para una fibra SI con un diámetro de núcleo de  $200\ \mu\text{m}$  y  $300\ \text{m}$  de longitud.

### 3.3.3.2 Impacto del diámetro de campo modal de la fibra

El diámetro de campo modal (MFD) desempeña un papel importante en la determinación de la potencia óptica máxima que se puede inyectar en la fibra. La influencia del perfil del índice de refracción en el MFD se analiza en [35] utilizando ecuaciones aproximadas. En esta investigación, se emplea el método *Finite Difference Beam Propagation Method*, de la herramienta BeamProp del *software* Rsoft, para calcular el perfil del modo fundamental de dos fibras ópticas con un diámetro del núcleo de 62,5  $\mu\text{m}$  a 808 nm y distinto perfil de índice, véase la Figura 3.14.

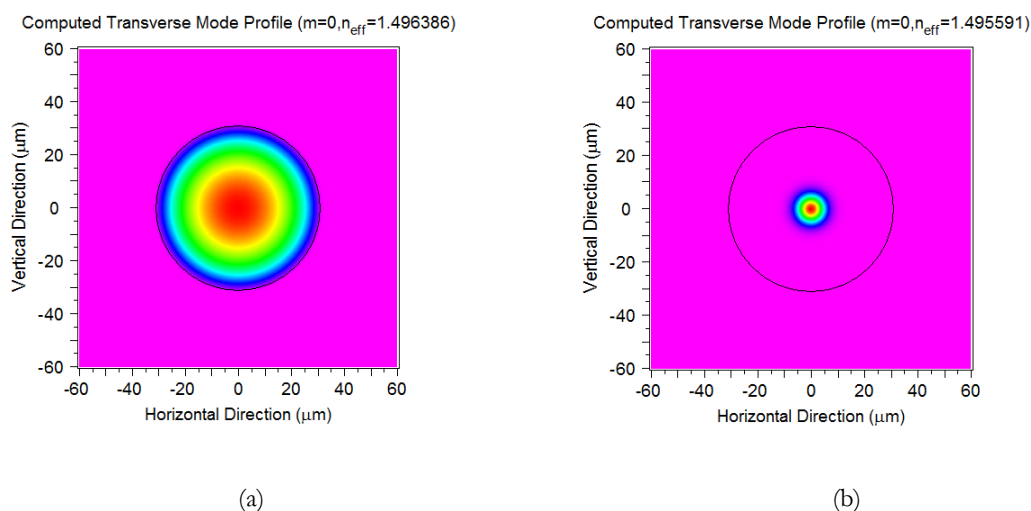


Figura 3.14. Distribución del campo del modo fundamental a 808 nm para una fibra multimodo de 62,5/125  $\mu\text{m}$ : (a) SI; (b) GI [25].

El MFD se calcula para estimar la máxima potencia óptica admisible en cada tipo de fibra óptica utilizando Ec. 3.3 del epígrafe 3.3.3.1. Tanto los cálculos de MFD como la potencia óptica máxima admisible para cada fibra óptica se muestran en la Figura 3.15.

Se observa que la tasa de incremento del MFD con el diámetro del núcleo es mayor en SI frente a las fibras ópticas GI. Por lo tanto, la potencia óptica máxima permitida aumenta exponencialmente con el diámetro del núcleo para las fibras SI. Normalmente, duplicar el diámetro del núcleo de la fibra debería permitir que se aplique un valor de potencia de entrada cuatro veces mayor hasta que se produzcan los daños, por el contrario, la variación del MFD de la fibra óptica GI es menor.

La potencia óptica máxima permitida varía de 1,69 W, para un núcleo de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro, a 8,79 W para una fibra óptica con un diámetro del núcleo de 200  $\mu\text{m}$ , sólo unas ocho veces en lugar de más de treinta veces como ocurre en la fibra óptica de SI.

Si se considera el caso de utilizar una fibra óptica SI con un diámetro del núcleo de 200  $\mu\text{m}$  y una longitud de 30 m y con 2,5 dB/km a 808 nm, el factor  $N \times P_{PVC}$  es de 232 W, por el contrario para el caso de GI se reduce a casi 3 W, es decir, dos órdenes de magnitud menor.

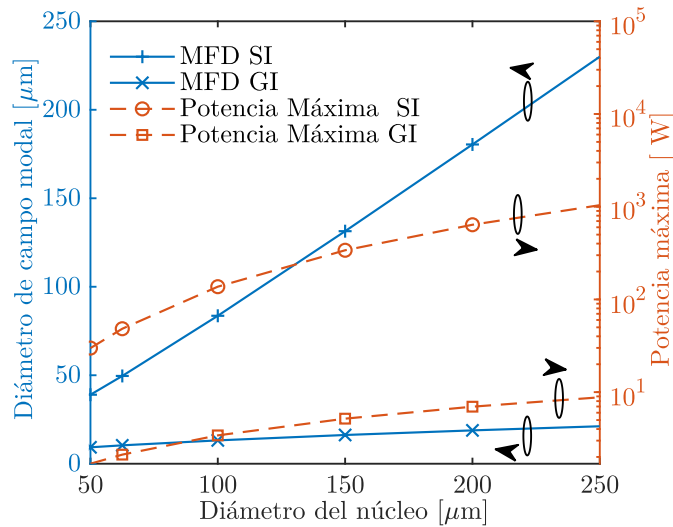


Figura 3.15. Influencia del diámetro de campo modal (MFD) en la potencia óptica máxima inyectada en una fibra SI y GI, y para diferentes diámetros del núcleo de la fibra [25].

### 3.4 Power over Fiber en aplicaciones de internet de las cosas

En este epígrafe se implementa el diseño de un sistema PoF basado en un nodo inteligente con capacidades de monitorización y gestión de la energía para aplicaciones de *Internet of Things (IoT)* [26]. Estos sistemas en la actualidad se han convertido en un paradigma de comunicación con capacidad de conectar entre sí a personas, procesos, datos y cosas a través de internet con diversas aplicaciones en la domótica, en la salud, en la industria 4.0, automatización en ciudades y de la vida cotidiana, entre otras [36] [37]. La Tabla 3.7 muestra los consumos de algunos sensores que se pueden usar en aplicaciones de IoT.

Tabla 3.7. Ejemplos de sensores de bajo consumo para aplicaciones PoF en escenarios de IoT [38].

Sensor	Funcionalidad	Consumo
Cámara OV9655	Monitorización de personas	90 mW
Sensor de visión	Control de acceso, monitorización de personas	17,9 $\mu$ W
Sensor BME	Temperatura, humedad, presión	1,32 mW
UVTRON(R13192)	Detector de chispas, fuego	1,5 mW

La implementación del sistema y del nodo son una versión mejorada de las aplicaciones abordadas en el epígrafe anterior y en [39]. Entre las principales mejoras están:

- se utiliza la versión 2 (V2) del módulo de transmisión de energía;
- el nodo remoto con sensores es más compacto e implementa más funcionalidades;
- el nodo remoto soporta una batería de baja capacidad para el respaldo energético en ausencia de la energía del sistema PoF;
- cuenta con un enlace de comunicaciones ascendente mejorado.

### 3.4.1 Descripción del escenario de aplicación

El escenario objetivo de esta aplicación son los entornos ruidosos, como por ejemplo las estaciones de la red eléctrica. Además, se amplían los resultados experimentales analizando la escalabilidad del sistema PoF propuesto, asumiendo una topología de red asimétrica de distribución de energía con nodos con diferentes requisitos de consumo de energía.

La seguridad en las subestaciones de distribución de energía eléctrica, véase la Figura 3.16, dentro de la red eléctrica es esencial para mantener el funcionamiento de infraestructuras que son críticas para el funcionamiento de la sociedad. La seguridad y la protección de las infraestructuras exigen sistemas de detección y vigilancia específicos para controlar las llamas o detectar presencias indeseables en las instalaciones de la subestación.

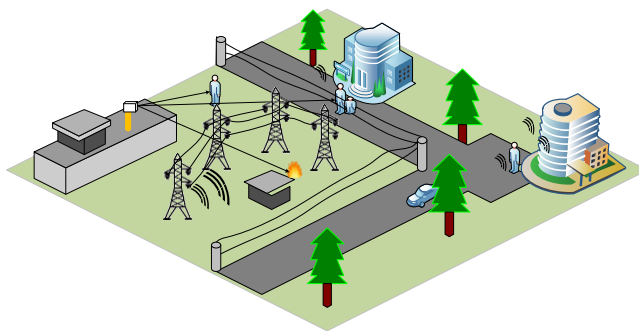


Figura 3.16. Sistema de detección de intruso y fuego en una subestación eléctrica.

La tecnología PoF es una buena opción en este escenario al permitir:

- alimentar múltiples sensores de forma centralizada para la detección de llamas, radiación y temperatura del cuerpo humano;
- la alimentación remota a cientos de metros desde la CO;
- redundancia y un sistema de alimentación intrínsecamente seguro (batería y fuentes de energía PoF);
- integrar un canal de monitorización para enviar hacia la CO el estado de los diferentes nodos de sensores remotos;
- el envío de energía por el sistema PoF hacia el nodo remoto, en función del estado de la batería.

En esta aplicación, se usa la versión 2 del módulo transmisor de energía para alimentar a un nodo remoto localizado a 300 m de la CO. La PVC en el nodo es una celda de múltiples uniones de AlGaAs/GaAs. La eficiencia de conversión para esta longitud de onda es de alrededor del 40 %. Para la red de distribución PoF se selecciona una fibra multimodo de salto de índice con un diámetro del núcleo/cubierta de 200/225  $\mu\text{m}$  y una atenuación de 7 dB/km. Como se comentó en epígrafes anteriores la selección de la fibra está condicionada por los resultados teóricos abordados en el epígrafe 3.2 y por el tipo de láser que se utiliza en el módulo de 808 nm, en su versión 2.

La Figura 3.17 muestra el diagrama de bloques del sistema PoF capaz de alimentar remotamente a diferentes nodos, aunque en esta prueba de concepto sólo se incluye un nodo sensor. Adicionalmente el

transmisor PoF soporta conectividad con un ordenador a través de una interfaz USB, en donde se visualizan los datos recibidos del nodo sensor, a través del canal de control de baja velocidad.

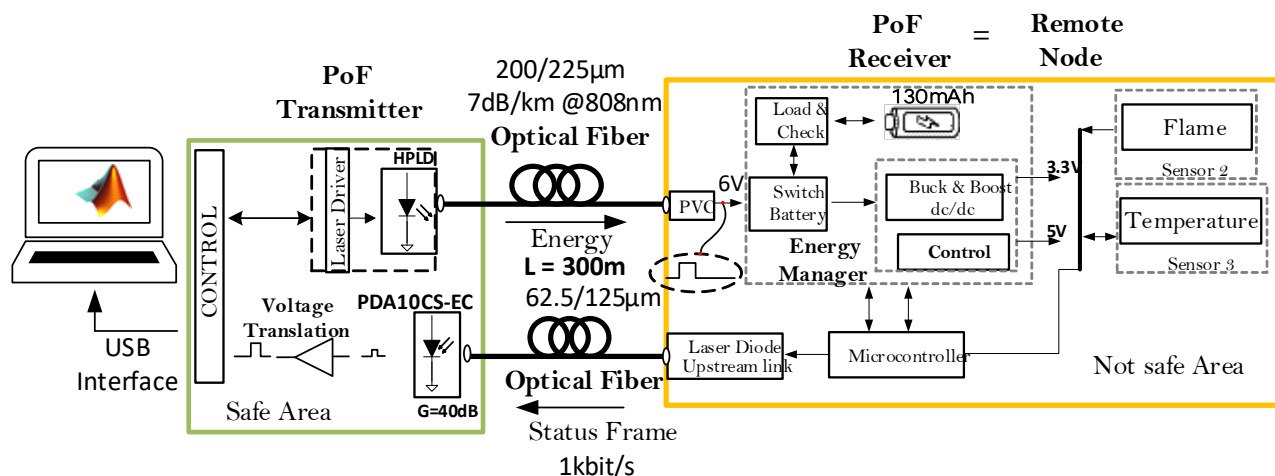


Figura 3.17. Diseño del nodo sensor inteligente remoto con gestor de energía integrado. El nodo inteligente comprende un sistema de detección de incendios y un sensor de temperatura/presencia [26].

El nodo sensor incluye al sensor AMG88, utilizado en la aplicación anterior, y al sensor UVTRON del fabricante Hamamatsu [40]. Este último permite la detección de chispas/llamas para la detección temprana de incendio, vital en infraestructuras críticas.

El nodo sensor además incluye un microcontrolador MSP430F1611 de 16 bits, con un consumo de energía en modo activo de  $330 \mu\text{A}$  a 1 MHz y 2,2 V de tensión, un VCSEL (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*) para comunicaciones ascendentes que funciona a 840nm con una corriente de consumo de  $1,5 \text{ mA}_{\text{rms}}$ , y un gestor de la energía integrado (EM). El EM integra una batería de Litio con una capacidad de 130 mAh (3,7 V, 480 mW/h) para el almacenamiento de energía, un módulo de conmutación para la carga de la batería y/o la alimentación de la carga y tres convertidores CC/CC (dos de tipo reductor y uno de tipo elevador) para adaptar las diferentes tensiones internas a los diferentes dispositivos de detección y para alimentar la electrónica de control del nodo.

El dispositivo de almacenamiento, es decir, la batería, permite que el nodo funcione de forma autónoma en ausencia de la energía enviada por el sistema PoF. El estado de la batería es computado con la ayuda de



un contador de Coulomb. La Tabla 3.8 resume los modos de operación más representativos del nodo inteligente.

Tabla 3.8. Modos de operación del nodo inteligente.

Identificador del modo	Energía PoF	Batería cargando	Descripción del modo
Modo 1 (M1)	✓	✗	La batería está cargada o desconectada. El nodo se alimenta usando la energía transmitida por el sistema PoF.
Modo 2 (M2)	✓	✓	En este modo el nodo alcanza el pico máximo de consumo.
Modo 3 (M3)	✗	✗	En este modo el nodo trabaja con la energía suministrada por la batería.

✓ Encendido o característica habilitada.

✗ Apagado o característica inhabilitada.

El VCSEL transmite los datos de los sensores a través de la fibra hasta la CO donde se encuentra el transmisor PoF. El enlace ascendente es una fibra multimodo de sílice de 62,5/125  $\mu\text{m}$  (diámetro del núcleo/ cubierta). En el lado del transmisor PoF un fotodetector de ganancia variable recibe el tráfico de datos ascendente y con la ayuda de un amplificador de transimpedancia el microcontrolador procesa los datos recibidos.

En ambos modos de funcionamiento el enlace ascendente de monitorización transmite información a la CO sobre el estado de los sensores, el estado de la batería y el estado de la sincronización del enlace, entre otros parámetros, lo que permite el correcto funcionamiento del sistema. Para el envío de los datos se implementa un protocolo de comunicación hecho a medida para este propósito, transmitiendo 25 bytes de tramas de datos (incluidos los bytes para el sincronismo) cada 300 ms a una velocidad de bits de 1 kbps, véase la Figura 3.18.

La trama está formada por 2 bytes de inicio (0xFFFE<sup>2</sup>, INIT\_FRAME) y 1 byte de parada (0x06, END\_FRAME). Ambos segmentos de la trama permiten que el enlace permanezca sincronizado. Por otro lado, cada byte está delimitado por 1 byte (0x02) adicional para el sincronismo (SYNC\_FRAME). Este byte tiene dos funciones: (i) le brinda al sistema la capacidad de detectar cuando se ha perdido el sincronismo ya que cada byte de datos siempre viene precedido por el byte 0x02 (excepto el primero que le antecede los bytes

<sup>2</sup> El símbolo 0x, denota que el número está en sistema hexadecimal.

de inicio), y (ii) esta secuencia en particular dispara una interrupción en el microcontrolador, permitiendo leer el byte de dato siguiente correctamente.

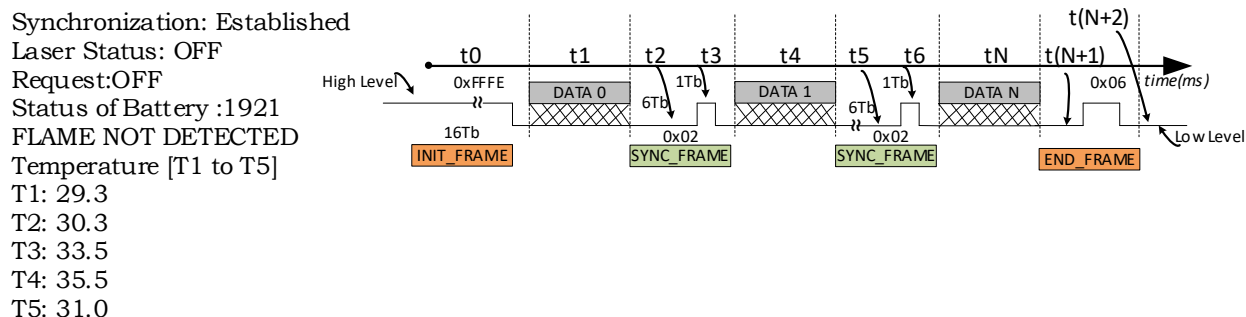


Figura 3.18. Estructura de la trama del canal ascendente e información de los sensores.

### 3.4.1.1 Análisis de consumo del nodo

La potencia óptica incidente en la PVC es de 925,5 mW y la potencia eléctrica convertida es de 340 mW, lo que da una eficiencia del  $\sim 37\%$ , la cual se determina siguiendo [41]. La Figura 3.19 muestra la corriente consumida y el esquema que se utiliza para su medición. De forma que, para llevar a cabo la medición del consumo, se implementa un programa en la herramienta LabVIEW capaz de controlar a un amperímetro a través de su interfaz GPIB. El sistema formado por ambos elementos permite llevar a cabo la adquisición de la corriente demandada por el nodo inteligente en los modos M1 y M2, descritos en la Tabla 3.8.

Según la Figura 3.19(b), cuando la batería está totalmente cargada, es decir en el modo de funcionamiento M2, la demanda media de corriente del nodo inteligente es de unos 8 mA, lo que supone un consumo de energía de unos 50 mW (6 V, 8 mA). Este consumo total de corriente incluye la demanda de corriente de los dos dispositivos sensores, el láser de comunicación ascendente y la electrónica de control. Sin embargo, cuando la potencia eléctrica proporcionada por la PVC se emplea para alimentar simultáneamente a los sensores y cargar la batería, la demanda de corriente tiene un pico de 27 mA, lo cual representa un consumo de 162 mW, un mayor análisis se encuentra descrito en [26].

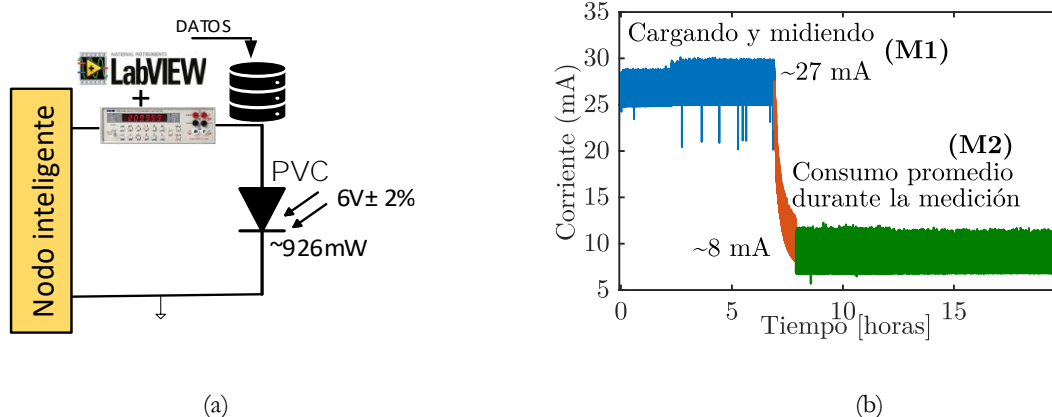


Figura 3.19. Consumo de energía del nodo inteligente: (a) Esquema de medición; (b) comportamiento de la corriente en función del modo de operación.

### 3.4.2 Demostrador de la aplicación

En este experimento se prueba la capacidad de los sensores AMG88 y del UVTRON para detectar la radiación del ser humano y la presencia de fuego estando alimentados por el sistema PoF. Adicionalmente se llevan a cabo pruebas para evaluar el ciclo de carga de la batería en presencia del sistema PoF y la autonomía del nodo sensor, cuando está operando sólo con la energía almacenada en la batería. En el experimento se comprueba la capacidad que posee el sensor AMG88 de detectar la radiación corporal a una distancia menor a 7 m, véase la Figura 3.20. El mismo es sensible al rango de temperaturas comprendido entre  $-10^{\circ}C$  a  $100^{\circ}C$  por lo que podría detectar otro tipo de radiación térmica, como pueden ser los incrementos de temperatura causados por un incendio. Esta capacidad del sensor AMG88 complementa la capacidad del sensor UVTRON de detectar la radiación causada por eventos asociados con la aparición de incendios. La señal de alarma se envía a la CO a través del canal de control y se visualizada en la aplicación de Matlab.

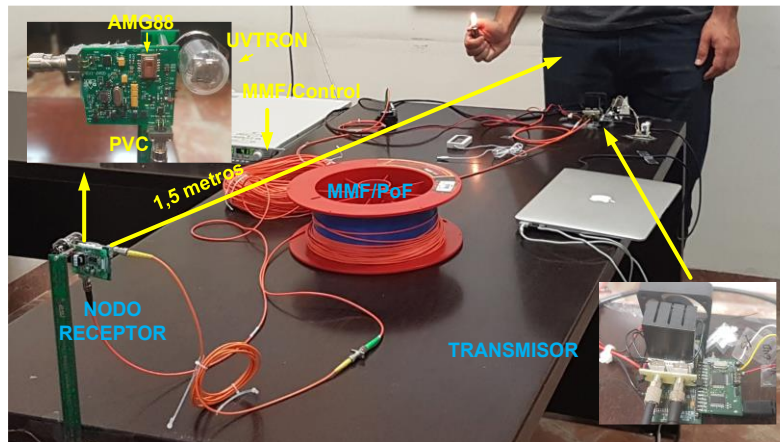


Figura 3.20. Imagen del sistema PoF para alimentar un nodo inteligente que incluye un sensor de temperatura/presencia, un detector de llamas, una electrónica de control basada en un microcontrolador, un gestor de energía y un canal de comunicaciones.

Para demostrar la capacidad de detección del nodo se envía hacia la CO, a través del enlace de control, la actividad térmica que registra uno de los 64 sensores (píxel) embebidos en el encapsulado. Estas variaciones en función de la magnitud y estabilidad en el tiempo permiten detectar la presencia de una persona en una determinada localización. La Figura 3.21 muestra el comportamiento del sensor cuando en su campo de acción se detecta radiación corporal.

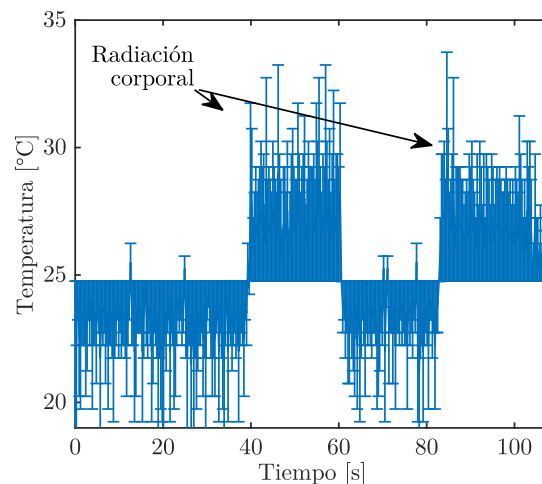


Figura 3.21. Prueba experimental con el sensor AMG88; actividad de uno de sus microsensors en presencia de radiación humana.

Para obtener la representación que se muestra en la figura, continuamente se calcula el valor medio de la temperatura recibida al tiempo que se representa el error del píxel recibido para cada instante de tiempo con respecto al valor medio previamente calculado. Para representar el valor del error se utilizan barras de errores. La segunda prueba está relacionada con: (i) el encendido del láser a petición del nodo sensor y (ii) con la determinación de la autonomía de la batería de Litio, véase la Figura 3.22.

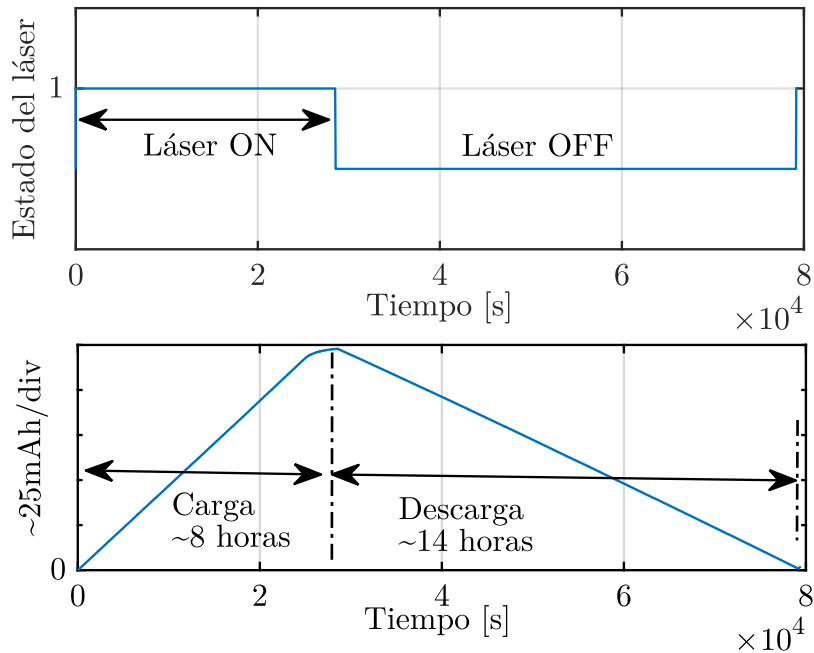


Figura 3.22. Encendido/apagado del láser a petición del nodo sensor a través del enlace de control y funcionalidad de monitorización del estado de la batería.

El control del encendido y el apagado del láser es parte de la inteligencia del nodo sensor, permitiendo gestionar la carga de la batería. Cuando la batería llega a un umbral crítico de descarga, el nodo sensor a través del canal de control solicita a la CO el encendido del láser del sistema PoF, permitiendo cargar la batería. En ausencia de la energía PoF el nodo, como se comentó anteriormente, permanece activo trabajando en el modo M3. Una vez que el control del nodo detecta que la batería está cargada envía una señal de control a la CO para el apagado del láser. Este ciclo se repite continuamente, donde 8 horas se emplean para la carga completa de la batería (Láser ON), con 14 horas de funcionamiento autónomo (Láser OFF) con un margen de carga de 2 horas (h) adicionales. Este ciclo de trabajo permite enviar con mayor

eficiencia la energía al nodo sensor al minimizar el tiempo de operación del láser. Este ciclo de trabajo del láser de un 36,36 % aumenta la vida útil del dispositivo frente a un encendido continuo.

### 3.4.3 Discusión

#### 3.4.3.1 Distribución de energía en configuración asimétrica

En una distribución de potencia simétrica, la potencia óptica se distribuye de manera uniforme a cada rama, con un divisor óptico 1xN. En esta configuración todos los nodos reciben la misma energía con independencia de su demanda energética real, lo cual es ineficiente desde el punto de vista de la distribución de la energía en el sistema PoF. Una solución para esto es la implementación de una configuración asimétrica en el reparto de la energía para cada nodo, véase la Figura 3.23.

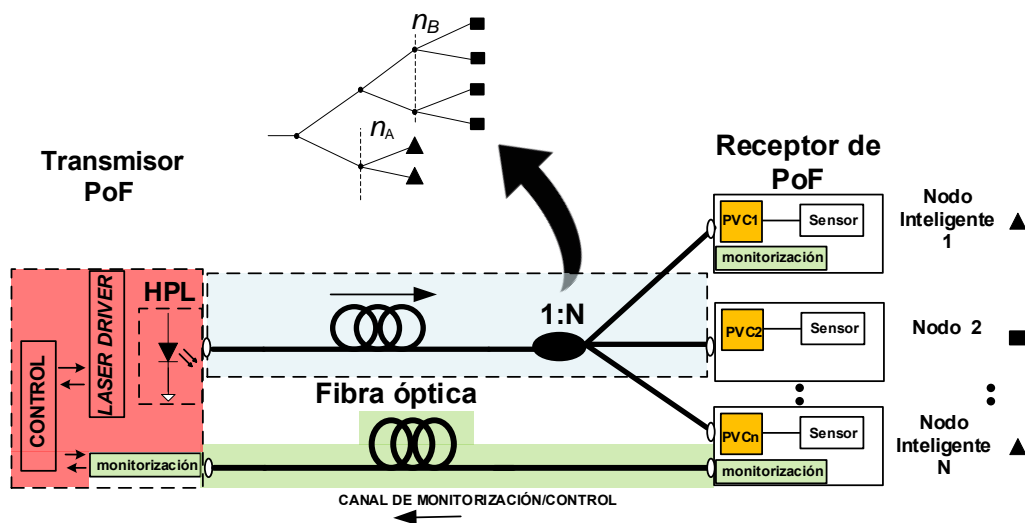


Figura 3.23. Esquema genérico de un sistema PoF con una configuración asimétrica para la distribución de la energía.

La eficiencia en la distribución de la energía se puede evaluar a partir de calcular el valor de la SEE y/o el valor de la GEE definida en [26]. La arquitectura asimétrica propuesta considera dos tipos de nodos, el nodo A y el nodo B, y se asume que los requisitos de energía en el nodo inteligente A,  $P_{NAmin}$ , son mayores

que los requisitos de energía en el nodo pasivo B,  $P_{NB_{min}}$ . A continuación, se van a describir las ecuaciones que ayudan a dimensionar este tipo de arquitectura, es decir, el máximo número de nodos que se pueden alimentar de cada tipo a partir de una potencia disponible máxima.

La arquitectura asimétrica utiliza divisores ópticos 1x2. Como  $P_{NB_{min}} < P_{NA_{min}}$ , para alcanzar a los nodos B se usan más etapas de división,  $n_B$ , que las etapas de división para llegar a un nodo A,  $n_A$ . Inicialmente, el 50 % de la potencia eléctrica en el sitio remoto,  $P_T$ , se dedica a cada uno de los nodos. En este escenario hay un número par de nodos A ( $N_A$ ) con potencia  $P_{NA}$  y nodos B ( $N_B$ ) con potencia  $P_{NB}$  dada por:

$$N_A = 2^{n_A} ; \text{ con } P_{NA} = \frac{P_T}{2^{(n_A+1)}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$N_B = 2^{n_B} ; \text{ con } P_{NB} = \frac{P_T}{2^{(n_B+1)}} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Si se asume que los nodos A tienen prioridad en la alimentación; se pueden crear  $M_A$  nuevos nodos de tipo A asignando parte de la potencia de los nodos  $M_B$  de tipo B a los nodos de tipo A, aumentando así los nodos  $N'_A$  con  $P_{NA}$  en detrimento de los nodos  $N'_B$  con potencia  $P_{NB}$ . El número total de nodos  $N$  es  $N = N'_A + N'_B$  siendo:

$$N'_A = M_A + 2^{n_A} \quad \text{Ec. 3.6}$$

$$N'_B = 2^{n_B} - M_B \text{ y } M_B = 2^{(n_B-n_A)} M_A \quad \text{Ec. 3.7}$$

En este escenario final, el número de nodos A alimentados por una potencia mínima  $P_{NA_{min}}$  viene dado por:

$$N'_A = \text{round} \left( \frac{P_T}{2P_{NA_{min}}} \right) \quad \text{Ec. 3.8}$$

A continuación, se obtienen los valores mínimos de  $n_A$  y  $M_A$  que cumplen la Ec. 3.6. Por ejemplo, si  $N_A = 5$  entonces  $n_A = 2$  y  $M_A = 1$ . Las etapas de división  $n_B$  que proporcionan una potencia mínima  $P_{NBmin}$  en los nodos B viene dada por:

$$n_B = \text{floor} \left[ \left( \log_2 \frac{P_T}{2P_{NBmin}} \right) \right] \quad \text{Ec. 3.9}$$

con  $n_B \geq n_A + 1$ . Entonces el número de nodos B,  $N'_B$ , se obtiene de la Ec. 3.7. Como ejemplo, si se considera  $P_T = 1 \text{ W}$ ,  $P_{NAmin} = 100 \text{ mW}$  y  $P_{NBmin} = 50 \text{ mW}$ , de la Ec. 3.8 resulta que  $N'_A = 5$  nodos consumiendo 100 mW, a partir de la Ec. 3.6 se obtiene  $n_A = 2$  y  $M_A = 1$ . Luego operando en la Ec. 3.9 se obtiene que  $n_B = 3$  y como resultado de la Ec. 3.7,  $N'_B = 6$  nodos con un consumo de 62,5 mW en cada uno de los divisores de 1x2 en cascada.

En un enfoque más realista de un sistema PoF se deben considerar las pérdidas por exceso del proceso de división óptica, dado en unidades naturales  $EL < 1$ , de cada etapa. Las ecuaciones anteriores son válidas si se considera un nuevo valor de potencia mínima en ambos nodos,  $P'_{NAmin}$  y  $P'_{NBmin}$ , respectivamente. Si todas las etapas de división tienen las mismas pérdidas por exceso, las potencias mínimas se pueden expresar como:

$$P'_{NAmin} = \frac{P_{NAmin}}{(EL_{NA})^{(n_A+1)}} \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$P'_{NBmin} = \frac{P_{NBmin}}{(EL_{NB})^{(n_B+1)}} \quad \text{Ec. 3.11}$$



### 3.5 Otras aplicaciones

Además de las aplicaciones que se han comentado anteriormente en este trabajo de investigación también se ha explorado el empleo de la tecnología PoF en otras áreas o campos de la ciencia, como en la pirometría [42], la medicina [43] y en las comunicaciones [44].

En [42] se demuestra la viabilidad de alimentar, usando la tecnología PoF, un conmutador óptico (SW) que está integrado en un pirómetro de fibra óptica. En la aplicación el sistema PoF alimenta al SW a una distancia de 100 metros y suministra los 300 mW necesarios para su correcto funcionamiento. El sistema usa fibras de tipo MMF (200/225  $\mu\text{m}$ ) y una PVC de GaAs. En esta propuesta de alimentación remota la fibra evita que cualquier interferencia electromagnética se acople al sistema de medición, la cual puede ser limitante en escenarios industriales. En el sistema se utiliza al SW como *chopper* óptico que, combinado con técnicas de *lock-in* mejora la SNR del sistema de adquisición. La Figura 3.24 muestra el sistema PoF que se usa para alimentar el SW.

Por último, otro ejemplo de aplicación es en el campo de las comunicaciones. En [44] se aborda la primera prueba experimental como parte de esta investigación en el contexto de las comunicaciones, que demuestra la viabilidad de alimentar a distancia un modulador electroóptico de intensidad (EOM) con un sistema PoF. En esta aplicación se usa una fibra MMF (200/500  $\mu\text{m}$ ) de 300 m de longitud. Las aplicaciones de la tecnología PoF en las comunicaciones se aborda con mayor detalle en los capítulos siguientes.

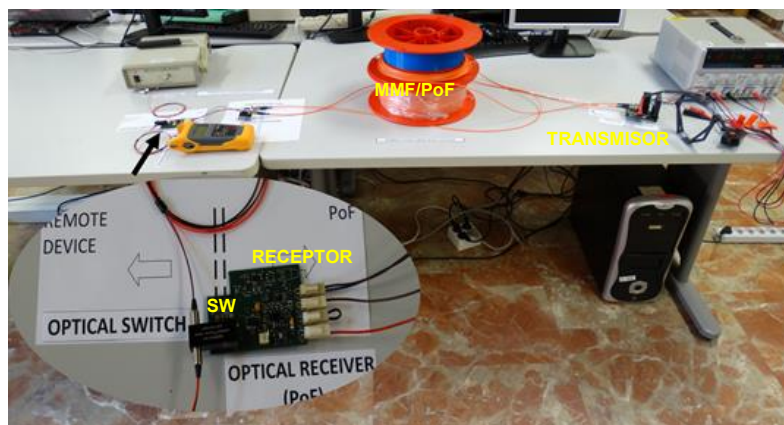


Figura 3.24. Imagen del sistema PoF para alimentar un conmutador (SW), con fibras MMF de 100 m de longitud y la versión 2 del módulo transmisor de energía.

### 3.6 Conclusiones

La tecnología PoF cada día toma más fuerza en el área de los sensores, demostrado en primer lugar por el número de investigaciones y avances en el sector y segundo motivado por el crecimiento exponencial de aplicaciones en el contexto de IoT. Los nodos de sensores electrónicos inteligentes alimentados ópticamente son adecuados para entornos industriales ruidosos y que requieren inmunidad electromagnética y un alto aislamiento galvánico.

En este capítulo se han presentado diferentes demostradores PoF basados en soluciones propias. Se han probado en diferentes escenarios de aplicación mostrando su capacidad de proporcionar una potencia óptica incidente en la PVC de 925,5 mW, y una potencia eléctrica de 340 mW a una distancia de 300 m, a una potencia óptica de emisión de 1,5 W, lo cual representa una eficiencia del sistema del 22,6 %. Estos prototipos incluyen mecanismos de protección para evitar la ignición a través de una fibra auxiliar multimodo que permite además el intercambio de información con una unidad central.

Se ha logrado la implementación de un sensor inteligente con un gestor de energía (EM) integrado capaz de alimentar simultáneamente a un nodo remoto y cargar una batería externa. Se han proporcionado las guías necesarias para el análisis de escalabilidad de una red de distribución de energía basada en PoF en una configuración P2M, al tiempo que se ofrecieron los fundamentos teóricos basados en el impacto del *fiber fuse* en la máxima potencia a transmitir. Se ha demostrado que, más allá de las limitaciones inherentes debidas al tipo de fibra óptica, su longitud y la longitud de onda de operación, hay que prestar especial atención al diámetro de campo modal (MFD), como un factor limitante que afecta dramáticamente a la escalabilidad del diseño PoF. Este análisis muestra las ventajas de utilizar fibras de salto de índice (SI) frente a las de índice gradual (GI) para altos niveles de potencia. Por último, como una contribución importante en la demostración del alcance de la tecnología PoF se ha implementado un nodo que integra en una misma solución: inteligencia, una batería con capacidad de ser cargada con la tecnología PoF con una autonomía de 14 horas (demostrado en tiempo real) y un canal de control para el intercambio de información con una unidad central.

### 3.7 Referencias

- [1] B. C. DeLoach, R. C. Miller, and S. Kaufman, "Sound Alerter Powered Over an Optical Fiber," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 57, no. 9, pp. 3309–3316, Nov. 1978, doi: 10.1002/j.1538-7305.1978.tb02205.x.
- [2] R. C. Miller and R. B. Lawry, "Optically Powered Speech Communication Over a Fiber Lightguide," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 58, no. 7, pp. 1735–1741, Sep. 1979, doi: 10.1002/j.1538-7305.1979.tb02280.x.
- [3] E. Nieuwkoop, T. Kapsenberg, G. K. Steenvoorden, and A. J. Bruinsma, "Optically powered sensor system using conventional electrical sensors," in *Proc. SPIE*, 1991, vol. 1511, pp. 255–263, doi: 10.1117/12.45999.
- [4] H. Kirkham and A. R. Johnston, "Optically powered data link for power system applications," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 4, pp. 1997–2004, 1989, doi: 10.1109/61.35623.
- [5] K. Worms *et al.*, "Reliable and lightning-safe monitoring of wind turbine rotor blades using optically powered sensors," *Wind Energy*, vol. 20, no. 2, pp. 345–360, Feb. 2017, doi: 10.1002/WE.2009/PDF.
- [6] Y. Yamagata, T. Kumagai, Y. Sai, Y. Uchida, and K. Imai, "A sensor powered by pulsed light (for gas density of GIS)," in *TRANSDUCERS '91: International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers*, 1991, pp. 824–827, doi: 10.1109/SENSOR.1991.149011.
- [7] T. H. D. Jr. and J. E. Chilton, "Fiber optic powered remote gas monitor," in *Optical Engineering Midwest '95*, Aug. 1995, vol. 2622, pp. 285–291, doi: 10.1117/12.216819.
- [8] J. B. Rosolem *et al.*, "A fiber optic powered sensor designed for partial discharges monitoring on high voltage bushings," in *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2015, pp. 1–5, doi: 10.1109/IMOC.2015.7369072.
- [9] J. Yan, J. Wang, Y. Lu, J. Jiang, and H. Wan, "Novel Wireless Sensor System Based on Power-over-Fiber Technique," no. 9, pp. 14–16, 2015.
- [10] F. V. B. De Nazaré and M. M. Werneck, "Temperature and current monitoring system for transmission lines using power-over-fiber technology," in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2010, pp. 779–784, doi: 10.1109/IMTC.2010.5488198.
- [11] F. R. Bassan *et al.*, "Power-over-Fiber LPIT for Voltage and Current Measurements in the Medium Voltage Distribution Networks," *Sensors* 2021, vol. 21, no. 2, p. 547, Jan. 2021, doi: 10.3390/S21020547.
- [12] C. Diouf *et al.*, "Design, Characterization, and Test of a Versatile Single-Mode Power-Over-Fiber and Communication System for Seafloor Observatories," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 45, no. 2, pp. 656–664, Apr. 2020, doi: 10.1109/JOE.2018.2876049.
- [13] J. B. Rosolem, "Power-Over-Fiber Applications for Telecommunications and for Electric Utilities," in *Optical Fiber and Wireless Communications*, R. Roka, Ed. InTech Publishing, 2017.
- [14] G. Bottger *et al.*, "An Optically Powered Video Camera Link," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 20, no. 1, pp. 39–41, 2008, doi: 10.1109/LPT.2007.912695.
- [15] J. Pember, C. M. France, and B. E. Jones, "A multiplexed network of optically powered, addressed and interrogated hybrid resonant sensors," *Sens. Actuat. A-Physical*, vol. 47, no. 1–3, pp. 474–477, 1995.

- [16] M. Roeger *et al.*, “Optically powered fiber networks,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 26, p. 21821, Dec. 2008, doi: 10.1364/OE.16.021821.
- [17] A. I. A. Mohammed, P. J. Ker, H. J. Lee, M. Muhamad, A. W. M. Zuhdi, and M. M. A. Gamel, “Power over Fiber for Internet of Things Application,” in *2020 IEEE 8th International Conference on Photonics, ICP 2020*, May 2020, pp. 101–102, doi: 10.1109/ICP46580.2020.9206501.
- [18] H. J. Park, S. Park, R. Kim, H. Yoo, H. Il Sun, and D. Yoo, “IoT sensor solution using a PoF module for the environmental monitoring of HVDC-MMC systems,” in *ICPE 2019 - ECCE Asia - 10th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, May 2019, pp. 2834–2839, doi: 10.23919/ICPE2019-ECCEASIA42246.2019.8797016.
- [19] “Power over Fiber (RLH Industries, Inc).” <https://www.fiberopticlink.com/product/fiber-optic-isolation-systems/power-solutions-for-fiber-optic-isolation-systems/power-over-fiber-system-pof/> (accessed Nov. 03, 2020).
- [20] J. Company, “Photonic Power Module PPM-5. Power over Fiber.” [http://www.laser-technology.com/es/component/k2/item/download/34\\_5c9f8f5b930d181a2234cbeca3404202](http://www.laser-technology.com/es/component/k2/item/download/34_5c9f8f5b930d181a2234cbeca3404202).
- [21] Broadcom, “Evaluation Kit for Optical Power and Data Link: AFBR-PDPEK521.” <https://www.broadcom.com/products/fiber-optic-modules-components/industrial/optical-power-components/optical-power-and-data-link/afbr-pdpek521> (accessed Nov. 05, 2020).
- [22] MH GoPower, “PoFP Series PoF Platform.” [http://www.mhgopower.com/laser\\_pof\\_Platform.html#lasertop](http://www.mhgopower.com/laser_pof_Platform.html#lasertop) (accessed Nov. 02, 2021).
- [23] MH GoPower, “PoFS Series PoF Sensing Platform.” [http://www.mhgopower.com/laser\\_pof\\_PoFS.html#lasertop](http://www.mhgopower.com/laser_pof_PoFS.html#lasertop) (accessed Nov. 02, 2021).
- [24] Tektronix, “IsoVu technology uses power-over-fiber.” Accessed: Nov. 01, 2021. [Online]. Available: [https://download.tek.com/document/51W-60485-2\\_IsoVu\\_Generation\\_2\\_Isolated-Probes\\_White\\_Paper\\_110920.pdf](https://download.tek.com/document/51W-60485-2_IsoVu_Generation_2_Isolated-Probes_White_Paper_110920.pdf).
- [25] J. D. Lopez-Cardona, C. Vazquez, D. S. Montero, and P. C. Lallana, “Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments,” *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 3, pp. 748–754, Feb. 2018, doi: 10.1109/JLT.2017.2776399.
- [26] J. D. Lopez-Cardona, D. Sanchez Montero, and C. Vazquez, “Smart remote nodes fed by power over fiber in internet of things applications,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 17, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2915613.
- [27] OSRAM, “Laser Diode: SPL 2F81-2S.” <https://docs.rs-online.com/1cfa/0900766b811e0652.pdf> (accessed Oct. 30, 2017).
- [28] “Thermoelectric Cooling Benefits | Adaptive®.” [https://www.europeanthermodynamics.com/news/what\\_is\\_thermoelectric\\_cooling](https://www.europeanthermodynamics.com/news/what_is_thermoelectric_cooling) (accessed Oct. 29, 2021).
- [29] Siemens, “Products and systems for use in hazardous areas,” 2010. [http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/en/brochure\\_explosion\\_protection\\_en.pdf](http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/en/brochure_explosion_protection_en.pdf) (accessed Jun. 01, 2017).
- [30] J. López-Cardona, “Proof of concept of power over fiber system for powering a proximity sensor,” 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8118084/media#media>.
- [31] E. Udd and W. B. Spillman Jr, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. New York: Wiley& Sons, 1991.

- [32] “High-Power Multimode Fiber Optic Patch Cables-Damage Threshold.” [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4393](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4393) (accessed Jan. 01, 2016).
- [33] J. W. Dawson *et al.*, “Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 17, pp. 13240–13266, Aug. 2008, doi: 10.1364/OE.16.013240.
- [34] A. Smith, B. Do, and M. Soderlund, “Deterministic nanosecond laser-induced breakdown thresholds in pure and Yb 3+ doped fused silica,” in *Proc. SPIE*, Feb. 2007, vol. 6453, p. 645317, doi: 10.1117/12.701399.
- [35] J. C. V. Silva, E. L. de Souza, V. García, J. B. Rosolem, and C. Florida, “Design of a multimode fiber optic cable to transmit optical energy for long reach in PoF systems,” in *Proc. 63rd International Wire & Cable Symposium (IWCS) Conf.*, 2014, pp. 832–839.
- [36] A. Rayes and S. Salam, *Internet of things-from hype to reality*, 2nd ed. Springer International Publishing, 2017.
- [37] N. Chen and M. Okada, “Towards 6G Internet of Things and the Convergence with RoF System,” *IEEE Internet Things J.*, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.3047613.
- [38] F. M. A. Al-Zubaidi, J. D. Lopez-Cardona, D. Sanchez Montero, and C. Vazquez, “Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT,” *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 13, pp. 4262–4269, Jul. 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3074193.
- [39] J. D. López-Cardona, G. M. Peroglio, and C. Vázquez, “Optical power delivery for feeding remote sensors in health and safety applications,” in *26th International Conference on Optical Fiber Sensors (2018)*, Sep. 2018, p. ThE42, doi: 10.1364/ofs.2018.the42.
- [40] “Discharge / Flame sensors UVTRON | Hamamatsu Photonics.” <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/R13192/index.html> (accessed Oct. 24, 2021).
- [41] E. Duran, M. Piliougine, M. Sidrach-de-Cardona, J. Galan, and J. M. Andujar, “Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: A review,” in *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, May 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/PVSC.2008.4922578.
- [42] C. Vázquez *et al.*, “Fiber-Optic Pyrometer with Optically Powered Switch for Temperature Measurements,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 483, Feb. 2018, doi: 10.3390/s18020483.
- [43] J. D. López-Cardona, C. Vázquez, D. S. Montero, P. J. Pinzón, A. Tapetado, and P. C. Lallana, “Remote optical powering using fiber optics in micro-mechatronic systems,” in *8th Conference on Smart Structures and Materials and 6th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*, 2017, pp. 1598–1608.
- [44] J. Lopez-Cardona, A. Tapetado, and D. Sanchez Montero, “Optically powered Mach-Zehnder intensity modulator for Radio-Over-Fiber applications,” in *X Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL*, 2017, pp. 152–153.



# Capítulo 4

## Integración de la alimentación por fibra y la tecnología 5G

Resumen:

En este capítulo se abordan los principales conceptos asociados a la tecnología 5G-NR (en adelante 5G) y se centra en la implementación y análisis de escenarios sinérgicos usando la tecnología PoF en una arquitectura *Centralized-Radio Access Networks*. Se llevan a cabo análisis de consumo en la *Remote Radio Head* (RRH) que permiten evaluar los requerimientos energéticos demandados por la tecnología 5G y la viabilidad del uso de la alimentación con luz. Adicionalmente, se desarrolla una plataforma PoF que implementa modos de bajo consumo y de sensado remoto a través de un canal de comunicaciones de bajo consumo. Esta funcionalidad permite supervisar y controlar desde la CO parámetros de la RRH con la ayuda de una aplicación de ordenador implementada en Matlab. También se valida experimentalmente la integración de la tecnología 5G y PoF (5G/PoF) a través de la alimentación de un amplificador de RF, integrado en un escenario ARoF, usando la plataforma desarrollada. Finalmente se evalúa el comportamiento del sistema integrado 5G/PoF usando como métrica el valor del EVM.

## 4.1 Introducción a la tecnología 5G

La red 5G es una tecnología de comunicación inalámbrica de próxima generación más rápida y capaz de manejar más dispositivos que la actual red 4G/LTE; prometiendo ser el punto de convergencia de múltiples tecnologías y redes que dan servicio a diversos sectores y aplicaciones como: multimedia, realidad virtual (VR), realidad aumentada (AR), *Machine-to-Machine* (M2M)/ *Internet of Things* (IoT), automoción y ciudades inteligentes, entre otras [1]. La primera red funcional de la tecnología (*End-to-End*) fue demostrada en las olimpiadas de invierno de 2018 en Pyeongchang, Corea del Sur [2], y hasta la fecha ha demostrado una capacidad de desarrollo exponencial en cuanto a tasa de bits transmitidos y capacidad de soportar más dispositivos conectados. Se estima que las suscripciones a la tecnología celular móvil para finales de 2026 sean aproximadamente de 8800 millones, de los cuales el 91 % corresponderá con tráfico de banda ancha, véase la Figura 4.1 [3].

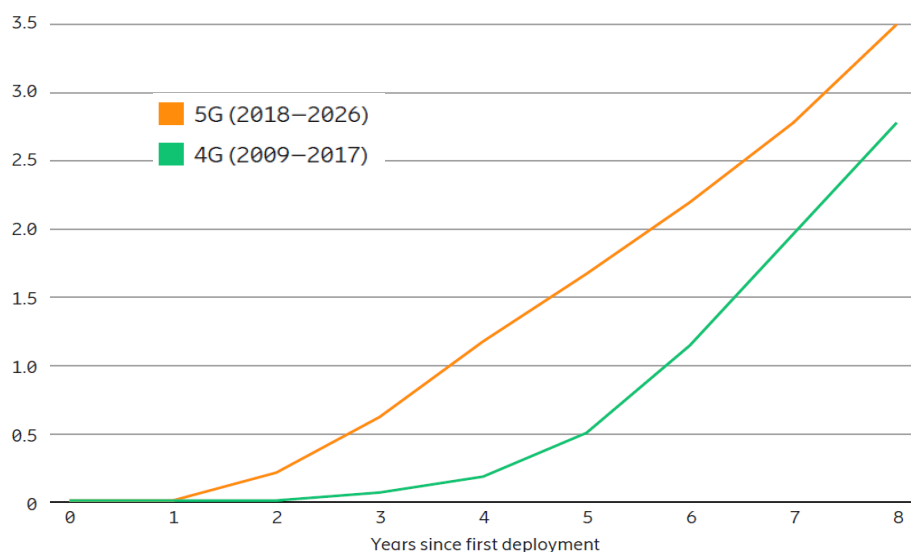


Figura 4.1. Comparación de suscripciones en miles de millones en redes 5G y 4G en los primeros años de despliegue [3].

Gran parte de la expectación en torno al 5G tiene que ver con la mejora de la calidad de servicio, la latencia y el ancho de banda. Esto se traduce en áreas de coberturas más extensas, estables, con un gran número de usuarios, y tiempos de respuesta de los servidores mínimos (virtualmente cero), diversificando los dispositivos admitidos por la red. Por último, también se produciría una mejora en la experiencia del



usuario al ser posible aplicaciones de realidad virtual, transmisión de video de alta calidad y un acceso a servicios en la nube más rápido y sencillo.

En este sentido la proyección de la red ha centrado sus servicios de acuerdo a la necesidad de cada dispositivo conectado definido por 3<sup>rd</sup> *Generation Partnership Project* (3GPP), dando lugar a tres casos de uso [4]:

- banda ancha móvil mejorada (eMBB);
- baja latencia ultra fiable (uRRLC);
- conectividad masiva (mMTC).

La banda ancha móvil mejorada (eMBB) permite aumentar el ancho de banda de datos y la eficiencia en la comunicación a través de un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico, siendo capaz de proveer servicios como transmisiones de videovigilancia 4K, descarga de mapas de alta definición (HD, *High Definition*) y telemedicina. Esta tecnología es capaz de proveer servicios a 4 dispositivos/m<sup>2</sup> con un ancho de banda de 30 Mbps [5], y una tasa de pico de bits de 20 Gbit/s, superando la tasa pico de 1 Gbit/s de la red 4G/LTE [6]. La comunicación de baja latencia ultra fiable (uRLLC) es la base de servicios con alta sensibilidad a la latencia, permitiendo la implementación de tecnologías como: *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) o *Vehicle-to everything* (V2X), automatización de fábricas y cirugía robótica a distancia, entre otras. En la conectividad masiva (mMTC) juega un papel importante la revolución introducida por el crecimiento de los dispositivos IoT, fundamentalmente en las categorías: uRRLC y mMTC. Este desarrollo ha estado motivado por tecnologías como V2X, donde los dispositivos IoT posibilitan una movilidad segura e inteligente y, por otro lado, el impacto de IoT en la industria 4.0, para la automatización y control de los procesos industriales. Este último caso de uso permitiría una densidad de usuario de 1 millón/km<sup>2</sup> [4][7]. La Figura 4.2 muestra el impacto de la tecnología 5G en el crecimiento de los dispositivos IoT para los diferentes casos de uso. Se observa como eMBB (IoT), uRRLC (IoT), y las tecnologías de conectividad masivas NB-IoT (*Narrow Band*) y Cat-M1 significarán en el 2026 hasta 4 veces las conexiones compatibles con las tecnologías obsoletas 2G/3G.

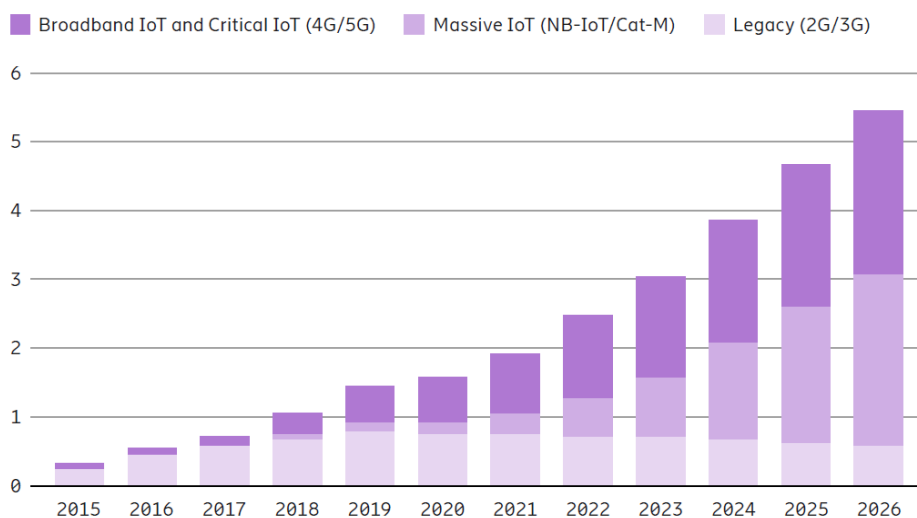


Figura 4.2. Evolución y proyección en miles de millones del número de conexiones de dispositivos IoT en función del caso de uso de la tecnología 5G [3].

Toda esta diversificación en servicios es soportada por la red gracias a las mejoras de un conjunto de tecnologías previas y a las introducidas por la propia tecnología 5G, las cuales incluyen: desplazamiento en frecuencia y el uso de las bandas milimétricas, MIMO masivo (*multiple-input multiple-output*), *beamforming* (conformación de haces), comunicación *full duplex*, la introducción en el *fronthaul* óptico de una arquitectura C-RAN, la virtualización de los recursos (NFV, *Network Function Virtualization*) y las redes definidas por software (SDN, *Software Defined Networks*). Esta visión fue expuesta por primera vez en el año 2015 en el *Mobile World Congress* (MWC) y ese mismo año el *World Radiocommunication Conferences* (WRC) también identificó las bandas del espectro de ondas milimétricas para la 5G [8][9].

El Proyecto 3GPP (*Release 15*) define dos rangos de frecuencia (FR). El FR1 va de 450 MHz a 6000 MHz, conocido como *cmWave* (banda en el orden de los centímetros). Las bandas en FR1 están numeradas del 1 al 255 y se conocen comúnmente como Sub-6 GHz. El FR2 va de 24250 MHz a 52600 MHz; este conjunto está numerado entre 257 a 511 y se denomina comúnmente *mmWave* (banda milimétrica).

A continuación se muestran algunos ejemplos de estas bandas [10][11]:

- n257 (26,5 GHz – 29,5 GHz), comúnmente conocida como espectro 28G;
- n258 (24,25 GHz – 27,5 GHz), comúnmente conocida como espectro 26G;

- n260 (37 GHz – 40 GHz), comúnmente conocida como espectro 29G;
- n261 (27,5 GHz – 28,35 GHz), espectro sub-28G.

El MIMO masivo y el *beamforming* son tecnologías que van en paralelo, las cuales le brindan a la red más capacidad, cobertura y mejor experiencia de usuario a través de un incremento del número de antenas en las estaciones bases y un redireccionamiento inteligente del haz, lo cual permite mayor eficiencia en la transmisión para un usuario en concreto y menos interferencia para los cercanos. Esta combinación de tecnologías ayuda a concentrar la energía en un punto determinado, lo que aporta mejoras drásticas en el rendimiento y la eficiencia energética.

La comunicación *full duplex* en la tecnología permite recibir y enviar datos al mismo tiempo a través de técnicas de multiplexación en tiempo (TDD) y en frecuencia (FDD). En modo FDD el enlace ascendente y descendente pueden transmitir al mismo tiempo en diferentes frecuencias, mientras que TDD usa el mismo rango espectral, pero en diferentes ventanas temporales.

Otro concepto muy propio de la tecnología 5G es el de acceso radioeléctrico centralizado o C-RAN por sus siglas en inglés. El concepto de C-RAN fue introducido por *China Mobile Research Institute* en el año 2010, para crear una nueva arquitectura de computación en la nube que sirviera de soporte a la tecnología 5G y al mismo tiempo que sirviera como una alternativa a la arquitectura de red tradicional. En ésta la mayor parte de la infraestructura está ubicada en la estación base, la cual incluye la antena, el equipamiento de radiofrecuencia, y todo el procesamiento en banda base (BBU). En esta solución la estación base está compuesta por la RRU (*Remote Radio Unit*) o RRH (*Remote Radio Head*) que se encargan del acceso al espacio radioeléctrico y al procesamiento de los datos de usuarios. Esta manera de distribuir los recursos es también llamada arquitectura de acceso distribuida, D-RAN [12]. La BBU y la RRH pueden estar o no conectadas a través de una fibra óptica, (FTTA, fibra hasta la antena) mediante un enlace que cumpla con la especificación CPRI (*Common Public Radio Interface*). Esta especificación define la comunicación entre el equipo de radio (RE, por sus siglas en inglés) y de control (REC, por sus siglas en inglés). Una versión similar pero con mayor flexibilidad en cuanto al manejo de la tasa de bits de las comunicaciones es la especificación eCPRI [13][14].

En la arquitectura C-RAN la estación base se divide en dos: BBU y RRH. Esta última permanece en la estación base junto a las funcionalidades de *software* de bajo nivel, mientras que las funciones críticas y la BBU se trasladan a una oficina central (CO), junto a otras BBU. Ambos elementos están conectados a

través de un enlace de fibra óptica (SMF, MCF) de varios kilómetros, también conocidos como el *fronthaul* de la red 5G. Esta arquitectura permite implementar en una misma plataforma de *hardware* varias BBU, (BBU virtuales), donde cada una representa un nodo virtual y la comunicación entre ellas son enlaces virtuales. Esta virtualización permite el procesamiento compartido, la asignación y el manejo de recursos de manera más eficiente [15]. Otra ventaja de esta arquitectura es que todos los recursos críticos están alojados en una misma infraestructura como puede ser un centro de datos, facilitando las tareas de seguridad y de mantenimiento de la red. Desde el punto de vista energético esta centralización representa una disminución en el consumo de la RRH debido a la simplificación de sus funciones, lo cual permite la implementación de múltiples celdas de pequeño tamaño y despliegue masivo de las mismas garantizando el área de cobertura con las ventajas de las tasas de datos del 5G.

El concepto de virtualización de las funciones de red (NFV, *Network Function Virtualization*), anteriormente mencionado, es mucho más general y su arquitectura está compuesta principalmente por cuatros bloques [16]:

- Orquestador: administra los recursos de *software* y la virtualización del *hardware* para llevar a cabo tareas en la red;
- Administrador de las funciones de red virtualizadas (VNF, *Virtual Network Functions*): instancia, termina y actualiza eventos durante el ciclo de vida de una VNF;
- Capa de virtualización: permite desvincular la implementación de una VNF de los recursos físicos disponibles (*hardware*) a través del uso de máquinas virtuales;
- Administrador de la infraestructura virtualizada: gestiona y configura los recursos de alto nivel como la red, almacenamiento y la interacción con las VNF.

Por último, las redes definidas por software (SDN, por sus siglas en inglés) permiten optimizar y programar de manera más fácil nuevas funcionalidades de la red. En esta arquitectura no existe una dependencia entre los planos de datos y de control ya que se gestionan directamente por el controlador SDN, lo cual brinda mayor flexibilidad a la red [17][18].

Por otro lado, en este capítulo se propone la integración de la tecnología 5G y PoF. Sin embargo, esta tecnología se ha propuesto en otros escenarios de comunicaciones tales como para la monitorización de redes pasivas (PON) [19][20] o redes de fibras ópticas [21][22][23], entre otras. En el contexto de 5G existen diferentes estudios en los que presentan a la tecnología PoF como alternativa a la alimentación tradicional

para alimentar a la RRH [24][25][26][27] y/o partes de las mismas. Adicionalmente, se han propuesto estrategias para la reducción del consumo en la arquitectura C-RAN [28][29]. Algunos análisis de densificación muestran que si la densidad de estaciones base (BS, por sus siglas en inglés) aumenta de 1 BS/km<sup>2</sup> a 100 BS/km<sup>2</sup>, la longitud media del enlace de transmisión se reduce 10 veces, de 500 m a 50 m [30]. Algunas soluciones en el contexto de 5G incluyen usar a la tecnología PoF en distancias de 100 m [31].

En el estado de la técnica de la alimentación de las RRH, mayoritariamente parcial, se propone el uso de diferentes fibras de acuerdo con el tipo de escenario de aplicación. La fibra SMF existente en la infraestructura actual está limitada a una potencia máxima de entrada de varios vatios [W]. También se han estudiado otros tipos de fibras ópticas como medio de transmisión de energía, como multimodo (MMF), multinúcleo (MCF) y de doble cubierta (DCF). El primer experimento con una fibra MMF de 12 m de longitud y con un núcleo de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro logró alcanzar una SEE del 33,78 % [32]. En otras soluciones se logran valores inferiores, del 12 %, pero con distancias de 100 m y usando una fibra MMF con un núcleo de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro [33]. En cambio, usando fibras DCF se han incrementado tanto las eficiencias como las longitudes. En [24] se alcanza una eficiencia del 10 % en 100 m, a partir de una potencia de inyección de 4 W a una longitud de onda de 830 nm, mientras que en [34] Matsuura *et al.* logran una eficiencia máxima de ~29 % con 43 W a la salida de la PVC y 150 W de potencia inyectada en 300 m de fibra DCF. Este último trabajo es el mejor resultado en el estado de la técnica en cuanto a potencia transmitida. Algunas propuestas de integración de PoF y RoF con fibras MCF, para celdas pequeñas, se abordan en [25].

### 4.2 Teoría básica de 5G

En este epígrafe se abordan algunos conceptos básicos relacionados con la tecnología 5G que complementan a la teoría anterior y permiten comprender con mayor claridad los resultados obtenidos a lo largo de este y de los próximos capítulos abordados en esta investigación.

### 4.2.1 Radio sobre fibra y formatos de modulación

El término *Radio over Fiber* (RoF) se refiere a la tecnología que envía señales de radiofrecuencia a través de un enlace de fibra óptica, luego de modular una portadora óptica con una señal eléctrica. Las principales ventajas de esta técnica se sustentan en la utilización de la fibra óptica en lugar del cable coaxial, brindando al sistema: (i) mayor ancho de banda, (ii) menos pérdidas en la transmisión en función de la frecuencia (típicamente menos de 0,3 dB/km), lo cual permite implementar enlaces de varios kilómetros sin necesidad de amplificación intermedia, (iii) menor sensibilidad al ruido gracias a la inmunidad a interferencias electromagnéticas y (iv) mayor seguridad en la comunicación porque es más difícil interceptar la señal.

Los sistemas ARoF suelen clasificarse en función de la naturaleza de la señal que viaja por la fibra: digital (DRoF) o analógica (ARoF) y, en función del rango de frecuencias de la señal de radio que se van a transportar: portadora de radiofrecuencia sobre fibra (RF) o frecuencia intermedia (IF) sobre fibra (IFoF) [35], véase la Figura 4.3.

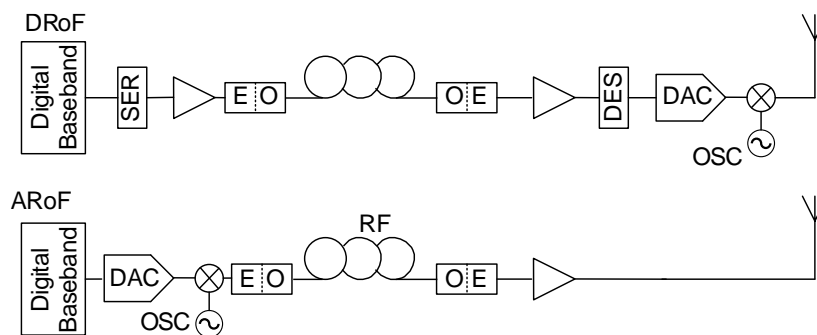


Figura 4.3. Esquemas básicos de transmisión de sistemas RoF.

En un sistema DRoF la señal que viaja por la fibra óptica es una señal digital. En esta arquitectura la señal enviada por la unidad de generación de datos en banda base es transformada a una cadena de bits en formato serie (*serializer*-SER) que luego es enviada por la fibra óptica. En el lado de la estación base se convierte la señal digital al dominio analógico con la ayuda de un convertidor digital analógico (DAC, *Digital Analogue Converter*) para llevar a cabo el proceso de *up-conversion*, donde finalmente la señal es irradiada por

la antena. El conversor serie a paralelo (*deserializer-DES*) se utiliza para convertir la cadena serie a un bus paralelo.

Por otro lado, en un sistema ARoF la señal que viaja por la fibra es una señal analógica y su arquitectura general la componen diferentes elementos tales como: conversores digital-analógico para convertir la señal de datos digitales al dominio analógico, y el módulo *up-conversion* (mezclador y generador de RF) el cual genera la portadora de radiofrecuencia que será enviada por la fibra óptica, entre otros. Una vez que esta señal llega a la estación base es acondicionada e irradiada por la antena. Como resultado, en ARoF no se requiere ninguna conversión de frecuencia en las estaciones bases, lo cual permite una implementación sencilla y una disminución en el consumo energético de la estación base. Por otro lado, existe una arquitectura similar en la que la señal enviada por la fibra óptica es la frecuencia intermedia (IF) en lugar de la portadora de radiofrecuencia; en [36] y [37] puede consultarse algunas propuestas de solución. En esta arquitectura, a diferencia de la anterior, el proceso de *up-conversion* se realiza en la estación base. Adicionalmente, debido a la presencia de la fibra óptica, es necesario pasar del dominio eléctrico al óptico (E/O) en el lado del transmisor. Esta transición se puede lograr a través de una modulación directa o externa. La implementación más sencilla consiste en un láser en onda continua (CW, por sus siglas en inglés), seguido por modulador externo (EM, por sus siglas en inglés) que modula al láser a la frecuencia intermedia (IF) o en la banda milimétrica. Para implementar esta técnica se puede usar un modulador de intensidad tipo Mach-Zehnder (MZM), o *Electro Absorption Modulator* (EAM) o *Phase Modulator* (PM). En esta investigación se emplea una modulación externa usando un MZM, véase la Figura 4.4. En el lado del receptor, para retornar al dominio eléctrico (O/E), se suelen usar fotodiodos de banda ancha [38]. En este tipo de sistemas se suelen utilizar esquemas de modulaciones complejos, donde un símbolo es codificado por más de un bit, lo cual optimiza el uso del canal y aumenta la eficiencia de la transmisión. Existen diferentes métodos de modulación y para esta investigación son de interés las modulaciones digitales. Las más relevantes se basan en la variación de parámetros de la señal como la fase (PSK, *Phase-Shift Keying*), la frecuencia (FSK, *Frequency-Shift Keying*), la amplitud (ASK, *Amplitude-Shift Keying*) y por último la modulación QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), que combina ASK y PSK en el mismo esquema de modulación. Típicamente los esquemas de modulación se representan en un diagrama de constelación. La Figura 4.5 muestra una modulación QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), la cual es una variante de PSK, en la que cada símbolo se compone de 2 bits que se codifican con 4 valores de fase de la portadora. Otros ejemplos

de modulación pueden ser 16 QAM, 64 QAM, en los que se utilizan 4 bits ( $2^4=16$ ) y 6 bits ( $2^6 = 64$ ) por símbolo respectivamente.

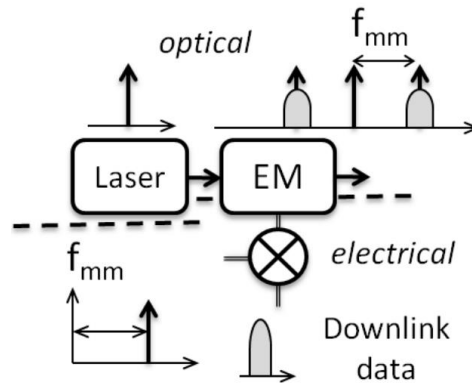


Figura 4.4. Esquema de modulación externa para la generación de señales RoF;  $f_{mm}$ : frecuencia en banda milimétrica [38].

La posición de cada símbolo en la constelación determina la calidad de la señal recibida y puede ser cuantificada con el valor del *Error Vector Magnitud* (EVM). Este valor refleja la diferencia del vector ideal con respecto al vector medido en el escenario real; en la investigación se utiliza expresado en tanto por ciento. En un escenario 5G los valores permitidos están en función del formato de modulación utilizado, véase la Tabla 4.1.

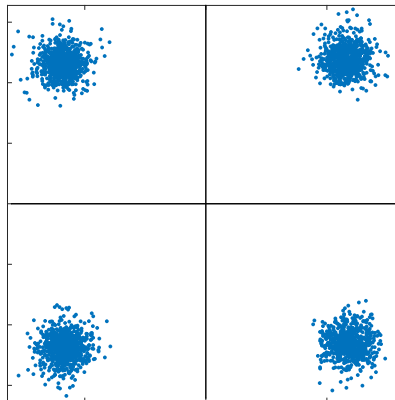


Figura 4.5. Constelación de una modulación QPSK, medida en un escenario real.



Tabla 4.1. Valores límites del EVM para cumplir con el estandar 5G NR, en el enlace descendente [39].

Formato de modulación	EVM [%]
QPSK	17,5-19
16 QAM	12-14
64 QAM	8-9
256 QAM	4,5

Por otro lado, uno de los principales atributos que define la numerología 5G es la forma de onda; en este caso, la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM). Este método combina las ventajas de la modulación en cuadratura con la multiplexación en frecuencia (FDM, por sus siglas en inglés), transmitiendo en el ancho de banda disponible múltiples subportadoras [40]. La forma típica de este tipo de transmisión se muestra en la Figura 4.6. Adicionalmente el estándar 5G especifica que el tipo de OFDM a utilizar es la de prefijo cíclico (CP-OFDM). El CP define el intervalo de tiempo que debe ser ignorado en la comunicación. La Tabla 4.2 define algunos parámetros del estándar vinculado a la generación de la señal OFDM en función de la numerología 5G ( $\mu$ ).

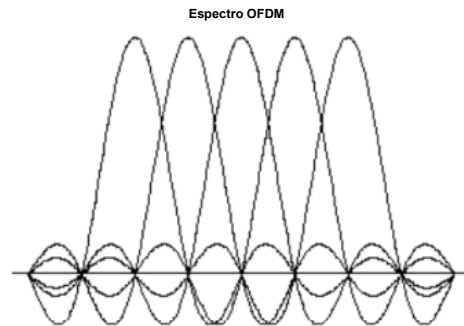


Figura 4.6. Espectro OFDM.

Tabla 4.2. Parámetros y duración de símbolos en OFDM.

Parámetro	$\mu$ :	0	1	2	3	4
Espacio entre subportadoras (kHz)		15	30	60	120	240
Duración del símbolo OFDM ( $\mu$ s)		66,67	33,33	16,67	8,33	4,17
Duración de CP ( $\mu$ s)		4,69	2,34	1,17	0,57	0,29
Duración del símbolo incluyendo CP ( $\mu$ s)		71,35	35,68	17,84	8,92	4,46

### 4.3 C-RAN: Remote Radio Head (RRH)

Las *Remote Radio Head* (RRH) en una configuración C-RAN en las redes 5G poseen menor complejidad y su consumo es mucho menor si se comparan con la infraestructura tradicional. Entre sus elementos principales están: la antena, el amplificador de potencia (amplificadores de RF de potencia, PA), el acondicionamiento de la señal de RF y el bloque de control. Por último, es importante conocer el consumo de sus distintos elementos para llevar a cabo la evaluación de los escenarios sinérgicos de alimentación tradicional con la tecnología PoF.

#### 4.3.1 Antenas

Uno de los hitos que contribuye al desarrollo de la tecnología 5G es la introducción por Ericsson[41] y por Huawei[42] de los dispositivos *Antenna Integrated Radio* (AIR) y *Active Antenna Unit* (AAU) respectivamente. Algunos ejemplos de estas antenas son AIR6449B41 y AAU5613. En estas soluciones se elimina el cable de cobre existente entre la antena y la interfaz de radio en la solución tradicional, y su longitud típica está entre 2 y 3 metros, lo cual significa unas pérdidas entre 0,6 a 0,7 dB. Esto se traduce en una mejora en la transferencia de la energía entre ambos elementos, reduciendo así el consumo energético, véase la Figura 4.7.



Figura 4.7. Apariencia de diferentes tipos de antenas en un escenario 5G: (a) tradicional; (b) antena activa, AAU del fabricante Huawei; (c) antena activa AIR, del fabricante Ericsson [41] [42].

### 4.3.2 Amplificador de potencia

El amplificador de potencia de la etapa de salida es uno de los elementos más importantes en un sistema de comunicación inalámbrica ya que amplifica la señal que se desea transmitir por la antena. Por lo general, cuanto mayor sea la ganancia introducida por el amplificador, mayor será la potencia irradiada. En esta afirmación se está considerando que el amplificador opera en una zona lineal y que dicha amplificación no introduce no linealidades en otros elementos. Este proceso de amplificación está acompañado de un incremento considerable en el consumo energético, determinado fundamentalmente por su eficiencia [43][44]. La potencia consumida por el amplificador,  $P_{PA}$ , viene dada por:

$$P_{PA} = \frac{P_{out}}{\eta_{PA}(1 - \sigma_{loss})} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde  $P_{out}$  es la potencia a la salida del amplificador,  $\eta_{PA}$  es la eficiencia del proceso de amplificación y por último  $\sigma_{loss}$  es el coeficiente de pérdidas. Generalmente, la mayor eficiencia ( $\eta_{PA}$ ) en los amplificadores se logra cuando estos operan cerca del punto de saturación del amplificador. Este modo de operación es inviable en los sistemas OFDM debido a la naturaleza variable de la envolvente, lo que fuerza al amplificador a operar en un punto entre 6 y 12 dB por debajo del punto de saturación (zona más lineal), disminuyendo aún más la eficiencia [43]. No obstante también se implementan técnicas de control de pre-distorsión y uso de amplificadores tipo *Doherty PAs* para mejorar la eficiencia [45].

El coeficiente  $\sigma_{loss}$  modela las pérdidas de los elementos comprendidos entre la salida del amplificador hasta la alimentación de la antena, como por ejemplo: filtros, adaptadores de impedancia y el alimentador de la antena. Este último elemento puede introducir unas pérdidas de hasta 3 dB y está presente en aquellos escenarios donde el equipo de radio y la antena están separados [43]. Las antenas tipo AAU y AIR minimizan estas pérdidas gracias a la compacidad de la solución. La Tabla 4.3 muestra algunos ejemplos de amplificadores de RF de diferentes fabricantes para la tecnología 5G.

Tabla 4.3. Amplificadores de RF para 5G.

Amplificador	Frecuencia [GHz]	Ganancia [dB]	Tensión (DC) [V]	Corriente de operación [mA]	Consumo máximo [mW]
PE15A3025[46]	18-40	26-30	8-12	350	4200
F1490[47]	1,8-5		5	375	375
SiGe HBT[48]	60	17	-	-	33
<i>GaAs</i>	28	24	-	-	160
<i>pHEMT</i> [49]					

- No disponible

### 4.3.3 Acondicionamiento de la señal de radiofrecuencia

El acondicionamiento de la señal de RF es el paso previo antes de la amplificación en el caso de la transmisión o el post-procesamiento que se le realiza a la señal una vez que esta es recibida por la antena. Los elementos que componen este bloque dependen en gran medida del tipo de esquema que utiliza la RRH para el tratamiento de la señal condicionado fundamentalmente por su naturaleza analógica o digital. Algunos de los elementos de RF típicos en esta etapa son:

- convertidor analógico-digital (ADC, por sus siglas en inglés) y digital-analógico (DAC, por sus siglas en inglés);
- mezcladores analógicos, *Digital Up-Conversion* (DUC), *Digital Down-Conversion* (DDC), *Crest Factor Reduction* (CFR), *Digital Pre-Distortion* (DPD);
- osciladores controlados por voltaje (VCO, por sus siglas en inglés), relojes;
- amplificadores de ganancia y de bajo ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*).

El consumo de estos elementos depende fundamentalmente de la frecuencia de RF, la cual condiciona el punto de operación de los diferentes circuitos integrados y la frecuencia de reloj del sistema. Por lo general un incremento en la frecuencia reloj, para la misma tecnología de circuito integrado, aumenta el consumo de los dispositivos electrónicos.

#### 4.3.4 Control de la RRH

El control de las RRH suele ser una combinación de diferentes tipos de dispositivos como: circuitos integrados de propósito específico (ASIC, por sus siglas en inglés), dispositivos de lógica programables (FPGA, por sus siglas en inglés) con capacidades para el manejo de señales de RF (RFSoc, *RF System on Chip*), procesadores digitales de señales (DSP, por sus siglas en inglés) y/o procesadores (CPU, por sus siglas en inglés) para aplicaciones de comunicaciones. En [50] y [51] se muestran ejemplos de diseños, en donde el control está integrado por la combinación de un FPGA y un procesador de comunicaciones con arquitectura ARM (algunos ejemplos son 66AK2E05, AM5728 de Texas Instruments). Por otro lado en [52] se muestra otra solución basada en una FPGA de bajo consumo con funcionalidades de RF embebidas (se trata de la familia PolarFire de Microchip-Microsemi), véase la Figura 4.8. La Tabla 4.4 muestra el consumo máximo de algunos de estos dispositivos.

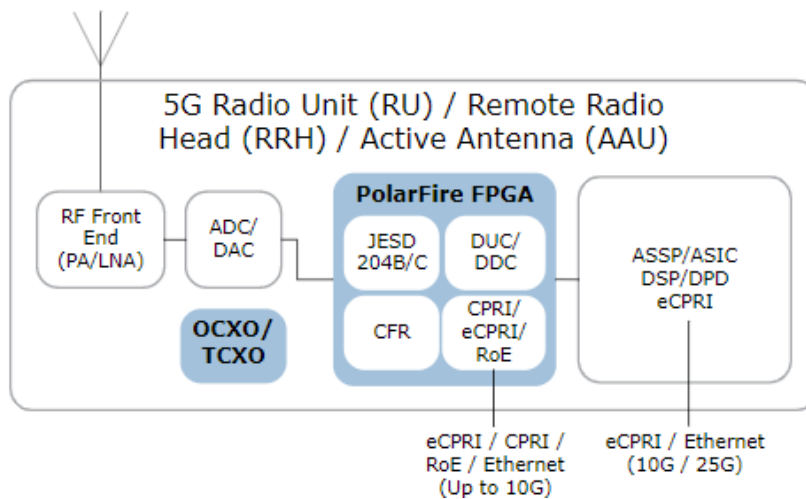


Figura 4.8. Solución de RRH implementada con la familia de FPGA PolarFire [52].

Este bloque también se encarga de las interfaces ópticas para la comunicación con la BBU, compatibles con estándares como CPRI o eCPRI. Por otro lado, es usual que el bloque de control soporte interfaces paralelas o serie de alta velocidad para la comunicación con los periféricos, como pueden ser las basadas en el estándar JESD204B/C [56]. El control también incluye soporte para desempeñar funciones diferentes

a las de radio como pueden ser el manejo de la energía e implementación de modos de bajo consumo. En el epígrafe 4.4 se implementa una solución basada en PoF que brinda esta última funcionalidad.

Tabla 4.4. Consumos de algunos circuitos integrados utilizados para implementar el procesamiento en las RRH.

Dispositivo/familia	Consumo	Fabricantes
Xilinx Zynq UltraScale+	hasta 2 W ( <i>full power</i> ) desde 30 a 400 mW dependiendo de la actividad (modo de bajo consumo) [53]	Xilinx
OMAP-L138	754,56 mW operando a 456 MHz [54]	Texas Instruments
AM572x	hasta ~6W en función de la configuración [55]	Texas Instruments

#### 4.3.5 Consumo de potencia de los dispositivos

Como se ha comentado anteriormente una RRH es un sistema complejo cuya implementación se puede llevar a cabo de varias formas y estas diferencias son aún mayores cuando las soluciones las desarrollan diferentes fabricantes. Por esta razón es difícil extrapolar o generalizar el análisis de consumo a otro diseño a partir del análisis de uno en concreto. Sin embargo, sirve como punto de partida para estimar la potencia que es necesaria suministrar con la tecnología PoF para la alimentación parcial o total de una RRH.

Tenido en cuenta estas consideraciones se analizan los consumos de 3 soluciones (S) basadas en el empleo de un *Digital Front End* (DFE): sin ADC/DAC integrados (S1) y con ADC/DAC integrados (S2) y finalmente una propuesta de diseño del fabricante Xilinx usando la FPGA de la familia Zynq/RFSoc (S3).

La Figura 4.9 muestra las soluciones basadas en los circuitos integrados DFE para aplicaciones de RF con y sin los conversores digitales integrados. La solución S1 no integra los conversores dentro del mismo encapsulado por lo que ambos circuitos deben contar con una interfaz de comunicación compatible entre sí, que permita el intercambio de señales (datos de usuario, control, y configuración) entre el DFE y el periférico (DAC/ADC). Típicamente, esta interfaz es de tipo JESD204, la cual tiene un consumo promedio de 250 mW por cada canal implementado [57].

Esta solución tiene la desventaja de que el consumo y la disipación de potencia aumenta conforme se incrementa el número de canales. Por otro lado, disminuye la eficiencia en la distribución de la potencia ya que los conversores requieren líneas de alimentación adicionales. En cambio, en la solución S2, la integración de los conversores elimina las interfaces JESD204 y por tanto los consumos asociados. Adicionalmente esta integración permite hacer una mejor optimización del consumo de los conversores. En la Tabla 4.5 se muestra una estimación del consumo de un canal para cada uno de los bloques que componen ambas soluciones: S1 y S2. Adicionalmente, se calcula qué parte en tanto por ciento representa el consumo de cada bloque sobre el total ( $S_x/T$ ). De la tabla se puede obtener que el consumo total ( $T$ ) para las soluciones S1 y S2 obteniéndose: 7,1 W y 5,85 W, respectivamente (no incluye PA, LNA).

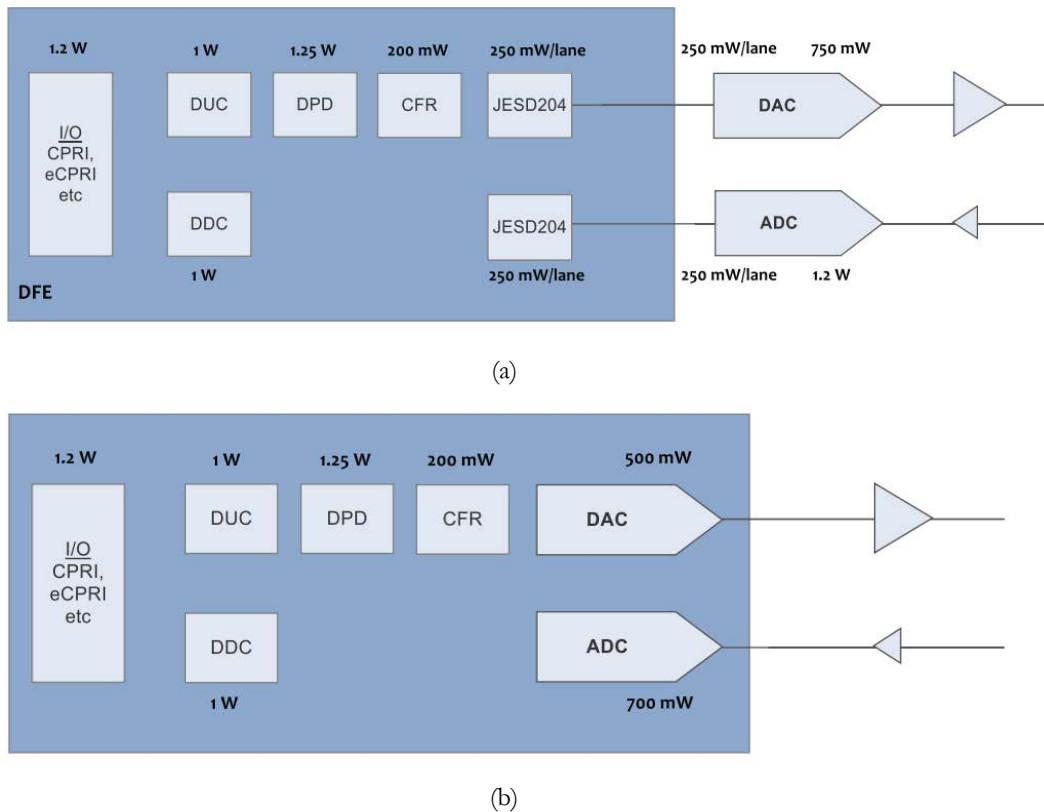


Figura 4.9. Bloques funciones y consumos de dos soluciones basadas en DFE para aplicaciones 5G: (a) solución S1 sin los conversores integrados; (b) con los conversores integrados. Ancho de banda de 100 MHz. DUC: *Digital Up-Conversion*; DDC: *Digital Down-Conversion*; DPD: *Digital Pre-Distortion*; CFR: *Crest Factor Reduction* [57].

La solución S3 basada en el Zynq/RFSoc es una solución de propósito específico para aplicaciones de RF [58]. Esta familia de FPGA tiene integrada en un mismo encapsulado ( $1,23 \text{ cm}^2$ ) tanto la capacidad de cómputo como de procesamiento de la señal de RF. La Figura 4.10 muestra un esquema simplificado de la FPGA, el cual está basado en una arquitectura ARM, con interfaces de comunicaciones de alta velocidad para la comunicación entre periféricos, interfaz CPRI para la comunicación con la BBU, 8 canales de transmisión (TX) y 8 canales de recepción (RX) para soportar funcionalidades de MIMO donde cada canal cuenta con su respectivo DUC y DAC en el caso de la TX; y ADC y DDC en el caso de la RX. En esta solución se optimiza el consumo energético de los canales con un consumo total de 9 W, o lo que es lo mismo 560 mW por cada canal (incluidos los DDC y los DUC) lo que representa una disminución en el consumo con respecto a las soluciones basadas en DFE.

Tabla 4.5. Resumen del consumo por bloques funcionales de un transmisor/receptor 5G, para un canal.

Bloque	Consumo [W]			
	S1	S2	S1/T [%]	S2/T [%]
DAC	0,75	0,50	10,56	8,55
ADC	1,20	0,70	16,90	11,97
JESD204	0,5*	-	7,04	-
CFR	0,20	0,20	2,83	3,42
DPD	1,25	1,25	17,61	21,37
DUC	1,0	1,0	14,08	17,09
DDC	1,0	1,0	14,08	17,09
CPRI (eCPRI)	1,2	1,2	19,90	20,51
Total(T)	7,1	5,85		

\*JESD204DAC+ JESD204ADC



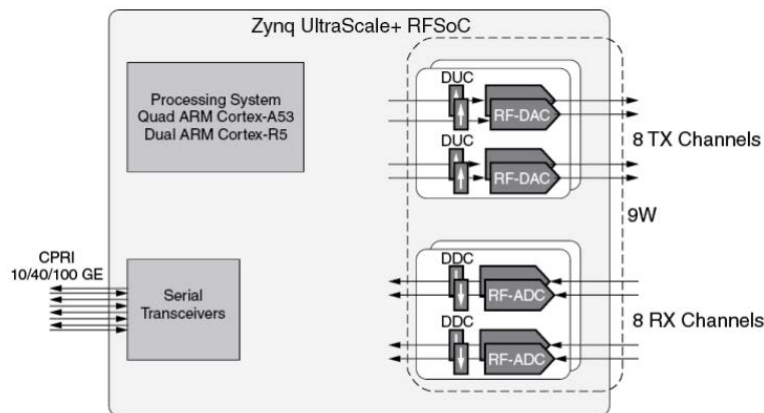


Figura 4.10. Solución basada en circuito integrado Zynq/RFSoc para aplicaciones de RF [57].

### 4.3.6 Integración de PoF en la alimentación de la RRH

Además de las funcionalidades comentadas anteriormente, en la RRH se deben generar con diferentes convertidores las tensiones necesarias para el funcionamiento de todos los circuitos internos, además de implementar mecanismos para el enfriamiento que permitan operar en un rango de temperatura seguro. Este bloque de alimentación genera las tensiones en dos pasos: (i) a través de la fuente principal que convierte la tensión de alterna de la red a continua (AC-DC) y (ii) la conversión de continua a continua (DC-DC) que es requerida para cada circuito integrado, véase la Figura 4.11.

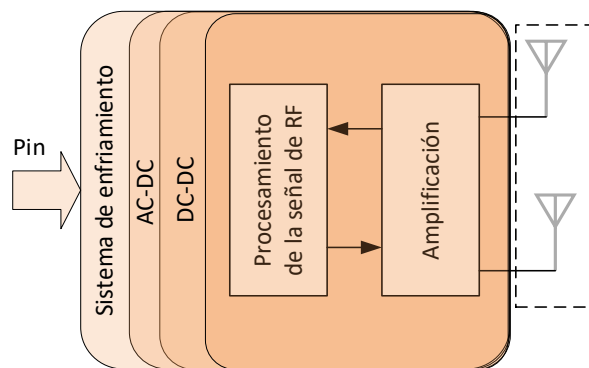


Figura 4.11. Diagrama simplificado de la alimentación de una RRH [44].

En la figura,  $P_{in}$  representa el consumo total de la RRH, el cual se incrementa conforme aumentan las pérdidas de todos los convertidores ( $\sigma$ ), el número de antenas ( $N_{tx}$ ) y la potencia de transmisión ( $P_{RF}$ ). Basado en el análisis llevado a cabo en [44], se obtiene la Ec. 4.2 que permite estimar el consumo de la RRH en un escenario C-RAN. Esta ecuación incluye la dependencia con el número de sectores ( $N_s$ ), el consumo en el procesamiento de la señal de RF ( $P_{ps}$ ), discutido en apartados anteriores, el consumo de energía debido al enfriamiento ( $P_c$ ), así como las pérdidas del convertidor de alterna a continua ( $\sigma_{ac}$ ) y de continua a continua ( $\sigma_{dc}$ ). Los términos  $\eta_{PA}$ ,  $\sigma_{loss}$  y  $P_{out}$  ya se discutieron en apartados anteriores.

$$P_{in} = N_s \frac{P_{ps} + N_{tx} \left( \frac{P_{out}}{\eta_{PA}(1 - \sigma_{loss})} + P_{RF} \right)}{(1 - \sigma_{dc})(1 - \sigma_{ac})} + P_c \quad \text{Ec. 4.2}$$

La expresión anterior se puede simplificar si se hacen las siguientes consideraciones:

- el consumo de energía para refrigeración es despreciable si se compara con el consumo de los amplificadores de potencia [43];
- se emplean antenas activas, por lo que el factor  $\sigma_{loss} \ll 1$ ;
- el número de sectores y de antenas es 1, con el objetivo de simplificar y minimizar al máximo el consumo de la RRH.

Como resultado se obtiene que la potencia consumida es:

$$P_{in} \approx \frac{P_{ps} + \left( \frac{P_{out}}{\eta_{PA}} + P_{RF} \right)}{(1 - \sigma_{dc})(1 - \sigma_{ac})} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Ahora bien, en este contexto se pueden considerar dos escenarios para alimentar la RRH usando la tecnología PoF: alimentación parcial o total, véase la Figura 4.12.

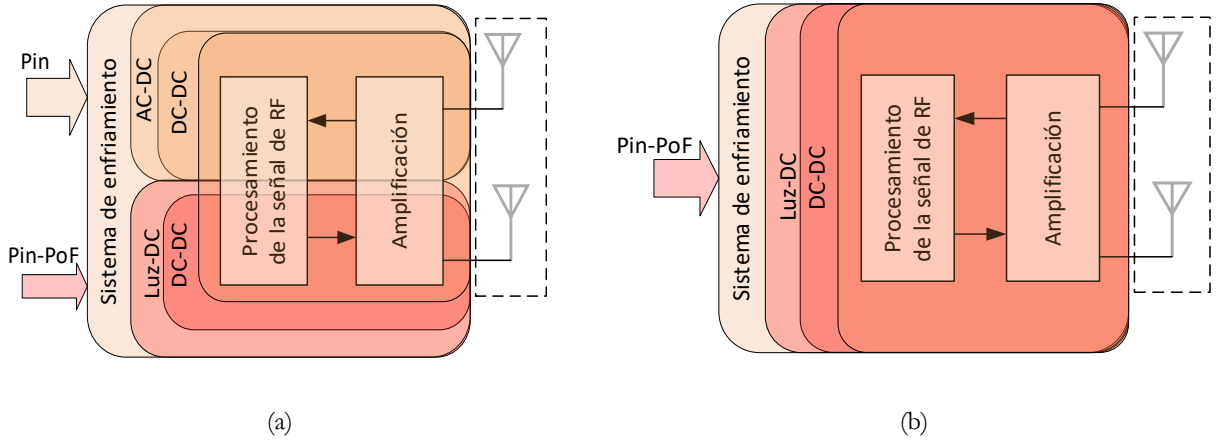


Figura 4.12. Escenarios de alimentación de la RRH: (a) alimentación parcial; (b) alimentación total.

En la alimentación parcial la tecnología PoF coexiste con la alimentación convencional y se puede emplear para alimentar diferentes elementos de bajo consumo o servir como fuente redundante para algunos sistemas críticos, a diferencia del caso de alimentación total, donde toda la energía es suministrada por PoF a la RRH. Al igual que en el caso anterior se puede determinar una expresión que modele el consumo energético, pero considerando además la eficiencia de la celda fotovoltaica  $\eta_{PVC}$ . Las expresiones que se obtienen son similares a la Ec. 4.3 pero reemplazando el término  $(1 - \sigma_{ac})$  por la eficiencia de conversión  $\eta_{PVC}$ , y multiplicada por un factor  $k$ , que representa la contribución PoF a la alimentación de la RRH, obteniéndose las Ec. 4.4 y Ec. 4.5. En la alimentación parcial el factor es menor que 1 ( $k < 1$ ), mientras que para el caso de la alimentación total el factor es igual a 1;  $k=1$ . En el caso de la coexistencia de la alimentación convencional con la tecnología PoF, la energía total que debe ser suministrada sería:

$$P_T = P_{in-PoF} + P_{in}.$$

$$P_{in-PoF} \approx k \frac{P_{ps} + \left(\frac{P_{out}}{\eta_{PA}} + P_{RF}\right)}{(1 - \sigma_{dc})\eta_{PVC}} \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$P_{in} \approx (1 - k) \frac{P_{ps} + \left(\frac{P_{out}}{\eta_{PA}} + P_{RF}\right)}{(1 - \sigma_{dc})(1 - \sigma_{ac})} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Una vez identificadas las funcionalidades y características de las RRH, es posible implementar soluciones sinérgicas en las que se incluya la tecnología PoF. En los siguientes epígrafes se discutirá el desarrollo de

una solución que permite el control y la alimentación remota de dispositivos de bajo consumo ubicados en la RRH. Además, el diseño contempla la implementación de un canal de comunicación bidireccional de bajo consumo entre la RRH y la CO.

## 4.4 Integración de una plataforma PoF en un escenario 5G

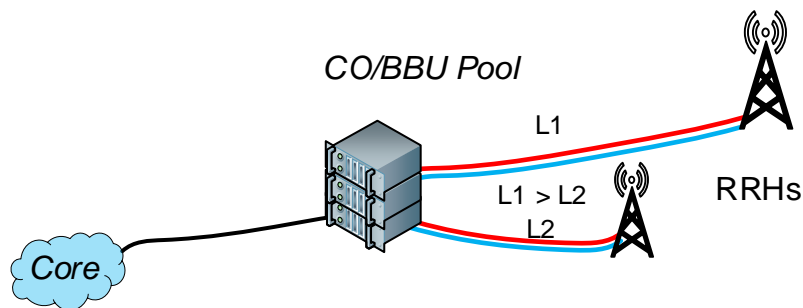
### 4.4.1 Descripción de la solución

Como se ha comentado anteriormente los sistemas PoF pueden integrarse con la tecnología 5G como parte de la estrategia del control del consumo energético y/o como solución alternativa de alimentación para dispositivos de bajo consumo. La Figura 4.13(a), muestra un escenario donde coexisten la tecnología PoF (línea roja) con la transmisión de señales de ARoF (línea azul). En los siguientes epígrafes se aborda el desarrollo de una plataforma de alimentación remota basada en la tecnología PoF que implementa las funcionalidades anteriores. La plataforma soporta fibras ópticas SMF (solución 1) y MMF (solución 2) y está integrada por 2 subsistemas: transmisor de energía PoF (PoF/CO) y por el receptor de la energía (PoF/RRH). Ambos mantienen una comunicación bidireccional a través de un canal de comunicaciones de baja velocidad (COM) basado en fibra óptica. La Figura 4.13(b) muestra el escenario sinérgico donde se integra la plataforma desarrollada con la tecnología 5G.

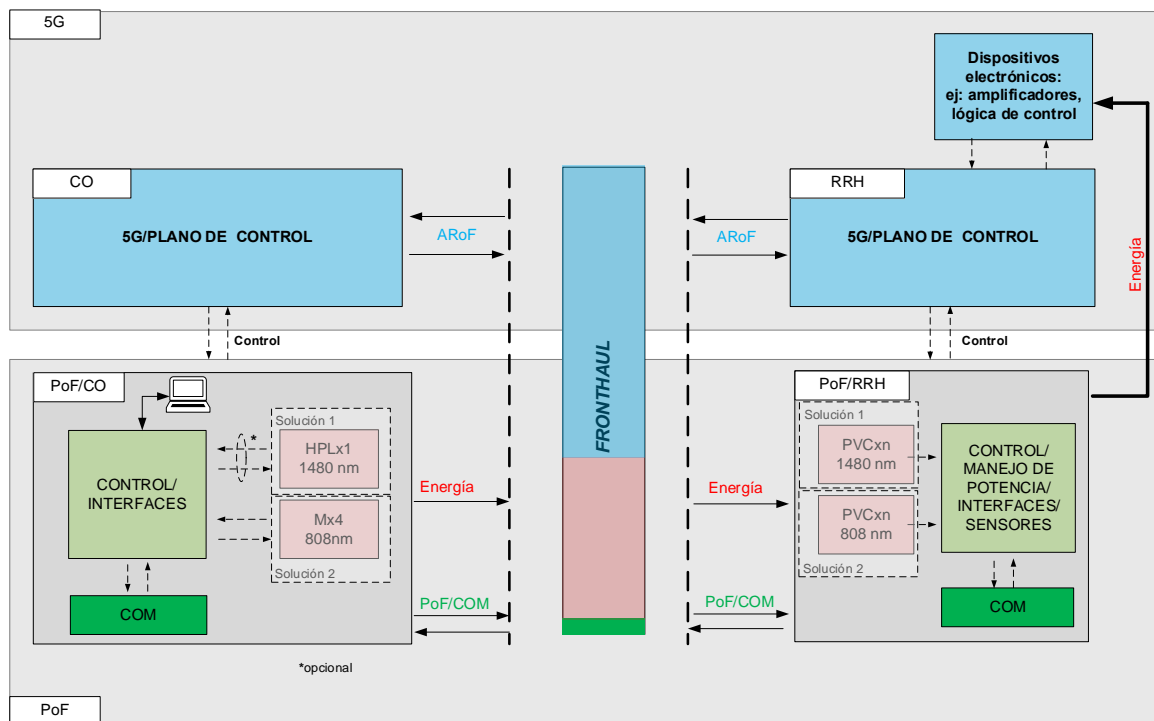
El subsistema PoF/CO tiene 2 fuentes de energía de PoF, la primera opera a una longitud de onda de 808 nm (primera ventana) y la segunda a 1480 nm (tercera ventana). La solución en primera ventana está implementada con módulos (M) similares a los utilizados en el capítulo 3. La principal diferencia con respecto al diseño anterior radica en la centralización del control de todos los módulos desde la plataforma, en lugar de ser autónomos con control propio. Esta plataforma soporta hasta 4 módulos operando simultáneamente. La solución en tercera ventana está basada en un láser Raman de fibra, con una potencia máxima de emisión de 2 W (véase el capítulo 2). Adicionalmente el subsistema PoF/CO soporta conectividad con un ordenador vía USB donde corre una aplicación desarrollada en el programa Matlab. Las funcionalidades de la aplicación serán abordadas en el epígrafe 4.4.7 . La configuración del *fronthaul* depende del tipo de escenario y el nivel de potencia que se envía hacia la RRH desde la CO.

## Integración de una plataforma PoF en un escenario 5G

El subsistema PoF/RRH es el encargado de convertir la energía óptica en eléctrica con la ayuda de las PVC, de gestionarla y de generar un voltaje estable para alimentar a la carga. Por último, con el objetivo de facilitar la comprensión de todos los subsistemas desarrollados, los mismos se discuten desde el punto de vista funcional y no a nivel de diseño.



(a)



(b)

Figura 4.13. Integración de la plataforma en un escenario 5G (a) dentro de un escenario C-RAN; (b) propuesta de integración sinérgica de la tecnología 5G y de la plataforma de alimentación desarrollada con CO, RRH, *Fronthaul*, subsistema PoF/CO y subsistema PoF/RRH.

#### 4.4.2 Subsistema PoF/ Oficina Central (CO)

Este subsistema está integrado por las fuentes de energía (solución 1, solución 2) y por 3 bloques electrónicos: control, interfaces auxiliares que intercambian información con los periféricos y con la RRH a través de la fibra óptica, y finalmente, el bloque de fuente.

El bloque de control está implementado con el microcontrolador ( $\mu$ C) de bajo consumo MSP430F5636 del fabricante Texas Instruments [59][60][61]. La familia MSP430 comprende un grupo de microcontroladores RISC (instrucciones reducidas) de 16 bits de ultra bajo consumo que, dadas sus características, permiten la implementación de sistemas que combinan procesamiento analógico y digital, al tiempo que soportan respaldo energético con baterías. Algunas de sus características más relevantes para el diseño son:

- tensión de alimentación :1,8 V a 3,6 V;
- consumo en modo activo: 270  $\mu$ A/MHz para 8 MHz, 3,0 V;
- soporta diferentes modos de bajo consumo;
- sistema de reloj flexible, diseñado para soportar operación con batería y soporta una frecuencia máxima de reloj de 32 MHz;
- posee un gran número de periféricos e interfaces de comunicación: DMA, ADC, UART, I2C, USB, SPI, entre otros;
- soporta programación *on board*;
- tamaño de la memoria de código (memoria *flash*) de 128 kB y 18kB de *Random Access Memory* (RAM);
- soporta batería secundaria para mantener la fecha y la hora.

Teniendo en cuenta lo anterior, el bloque de control posee las siguientes características:

- baja tensión de alimentación por lo que soporta alimentación por baterías de baja capacidad como respaldo energético en ausencia de la alimentación principal. La tensión de alimentación es de 3,3 V;
- consumo reducido con capacidad de implementar modos de bajo consumo en demanda, lo cual contribuye a la reducción del consumo de la CO;
- actualización del código de manera flexible, lo cual permite corregir errores fácilmente;
- soporta la implementación de código basado en proto-hilos [62], ya que el microcontrolador tiene suficiente memoria *flash* y RAM;
- la frecuencia de reloj principal es de 20 MHz (principal) y de 32,768 kHz para el reloj de tiempo real. Este último permite mantener internamente la fecha y la hora actual.

Entre las funcionalidades de este bloque están: (i) implementar el protocolo de comunicación establecido para el intercambio bidireccional de información con el subsistema PoF/RRH y el ordenador y (ii) gestionar y controlar el nivel de potencia óptica que se envía hacia la RRH.

El bloque de las interfaces está integrado fundamentalmente por: un convertor digital-analógico (DAC70508), un convertor USB a UART (FT232RL), un módulo Ethernet Lantronix y la tarjeta de comunicación sobre fibra óptica (COM), véase la Figura 4.14.

El DAC70508 es un convertidor de 12 bits que pertenece a la familia de bajo consumo del fabricante Texas Instruments. El mismo posee 8 canales analógicos, los cuales se emplean para controlar los módulos (M) transmisores de potencia que operan a la longitud de onda de 808nm. En cada uno de ellos se controla la temperatura de operación de los láseres y su potencia de emisión, para lo que se utilizan 2 salidas analógicas por cada módulo. Adicionalmente, cada módulo requiere 6 conexiones (analógicas y digitales) con el microcontrolador para la supervisión y control de cada módulo. Los parámetros supervisados son la corriente que circula por los láseres y su temperatura de operación. Las señales de control permiten la habilitación, inhabilitación, encendido y el apagado del módulo.

El circuito integrado FT232RL posibilita la conexión del subsistema PoF/CO a un ordenador con el que se intercambia información usando un protocolo estándar desarrollado como parte de esta

investigación. Este protocolo permite el intercambio de datos entre el ordenador, el subsistema PoF/CO y PoF/RRH. El módulo de Lantronix xPORT añade a la plataforma una interfaz Ethernet 100Base-TX (100 Mbps).

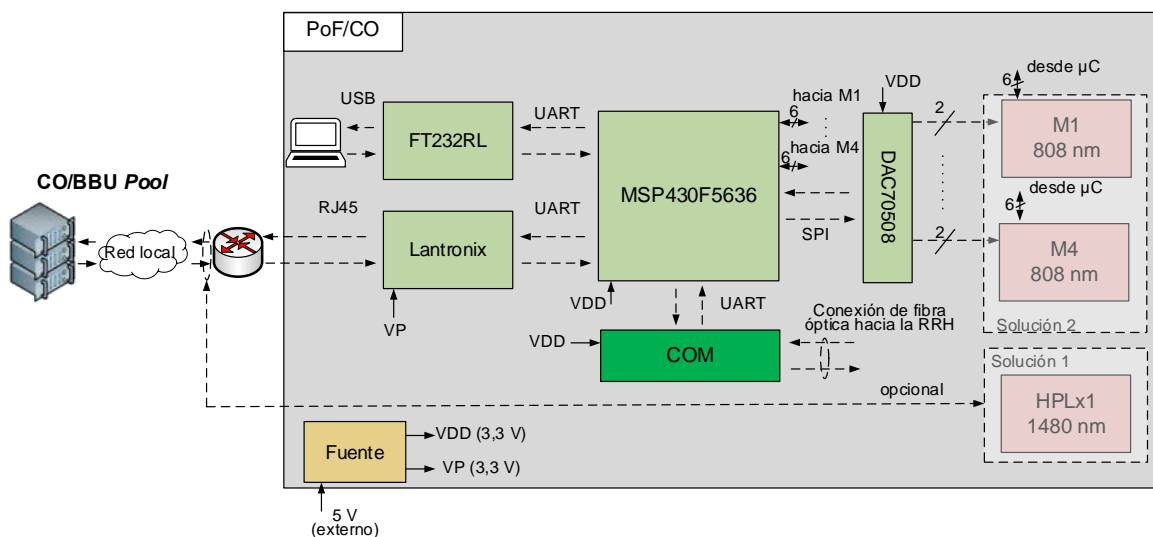


Figura 4.14. Bloques principales del subsistema PoF/CO y conectividad a través de un puerto Ethernet *CO/BBU Pool*.

Esta interfaz de conexión es muy usada por equipos de telecomunicaciones y habilita a la plataforma al intercambio de información dentro de una infraestructura de red con sistemas como por ejemplo la BBU. La interfaz COM es una tarjeta electrónica externa conectada a un puerto UART del microcontrolador y posibilita la comunicación entre el subsistema PoF/CO y PoF/RRH, para tener más información, véase el epígrafe 4.4.4 . El bloque de fuente genera a partir de una tensión externa de 5 V dos tensiones: VDD (3,3V, voltaje digital) y VP (3,3 V, voltaje de potencia), las cuales se utilizan para alimentar a la lógica de control y al módulo Lantronix xPORT respectivamente. La Figura 4.15 muestra una imagen del subsistema PoF/CO desarrollado.



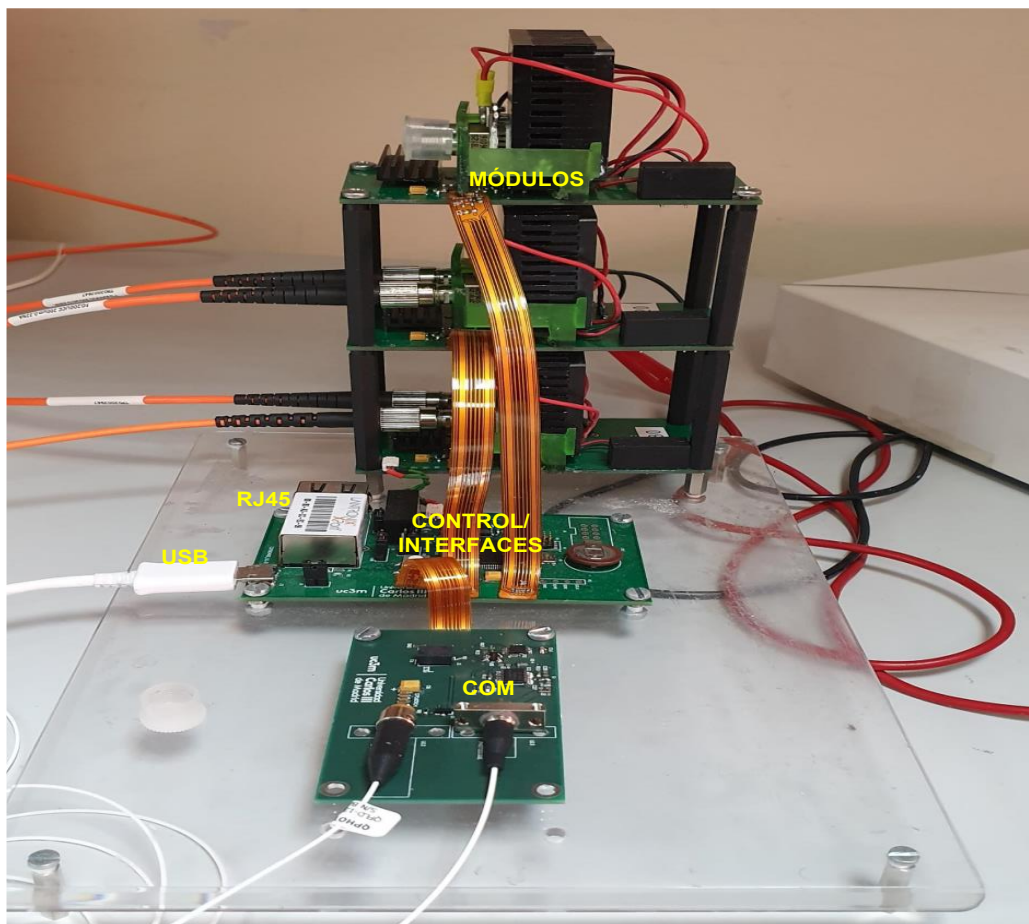


Figura 4.15. Foto del subsistema PoF/CO; el láser HPL (1480 nm) no está representado.

#### 4.4.3 Subsistema PoF/RRH

Este subsistema está integrado por las PVC en función de la solución (solución 1, solución 2) y por 4 bloques principales: control, sensores, interfaces (periféricos externos, COM) y por último el bloque de la gestión de potencia, véase la Figura 4.16.

El bloque de control del subsistema PoF/RRH es similar al desarrollado en el PoF/CO, por lo que está basado en el mismo microcontrolador. La gran diferencia con respecto al subsistema anterior es la utilización de los modos de bajo consumo con los que cuenta el microcontrolador. Estos modos permiten

optimizar aún más la eficiencia energética y emulan los estados de suspensión por los que transita una RRH real en periodos de inactividad.

Teniendo en consideración las limitaciones en potencia y la necesidad del ahorro energético, en este diseño se disminuye la tensión de alimentación del microcontrolador a 2,8 V y se utiliza su modo de suspensión LPM4.5 (identificador del modo).

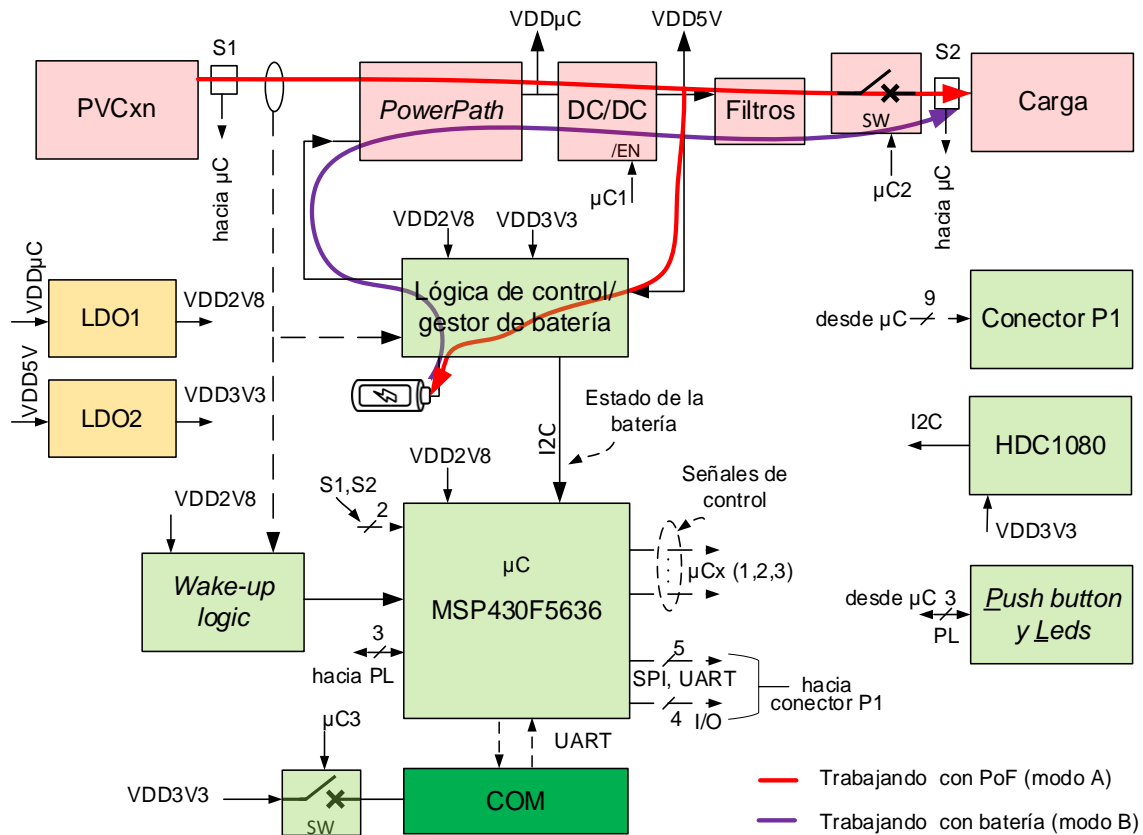


Figura 4.16. Esquema funcional y principales bloques del subsistema PoF/RRH.

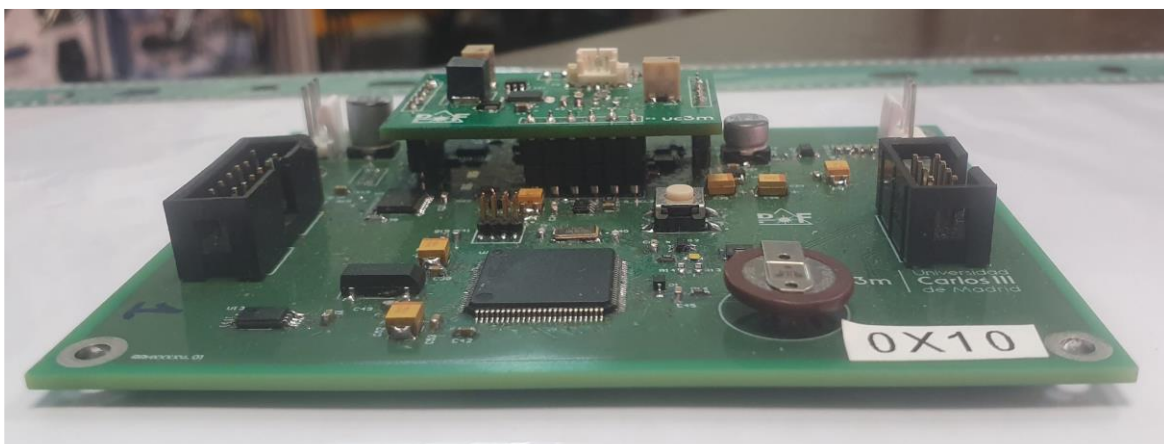
En este modo de suspensión el microcontrolador se encuentra profundamente dormido y el reinicio de las funcionalidades ocurre típicamente mediante una interrupción externa por un puerto especial. Esta característica es utilizada en la implementación de uno de los modos de bajo consumo implementados en el subsistema PoF/RRH, que se tratará posteriormente. El microcontrolador en este modo consume 3 veces menos ( $0,3 \mu\text{A}$  para 3 V) que el utilizado en el subsistema PoF/CO.

El bloque de sensado está integrado por el sensor de alta precisión y de bajo consumo HDC1080. El mismo integra en su encapsulado un sensor de temperatura ( $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ) y de humedad ( $\pm 2\text{ }\%$ ). En el diseño se alimenta con una tensión de 3,3 V e intercambia información con el microcontrolador a través de una interfaz I2C.

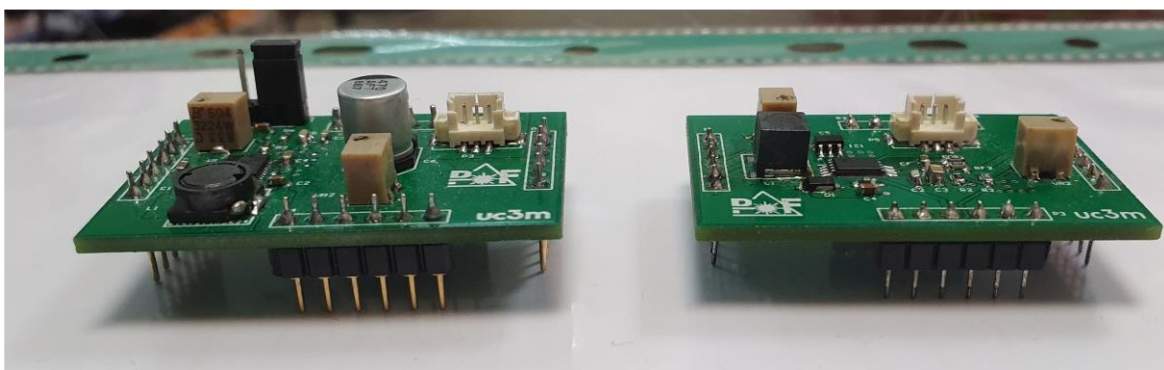
El subsistema PoF/RRH intercambia información con dispositivos externos a través de sus dos interfaces: el conector P1 y la UART que conecta a la tarjeta COM. El conector P1 habilita el acceso a un dispositivo externo a través de las interfaces SPI y UART del microcontrolador para intercambiar información de control. Adicionalmente el subsistema cuenta con indicadores lumínicos (*leds*) y botones para facilitar la interacción con el subsistema. El bloque de manejo de potencia tiene como elementos principales a los convertidores continua-continua (DC/DC): LTC3119 y SPV1040T. Cada convertidor está montado en una tarjeta electrónica de PCB independiente, las cuales se acoplan a la tarjeta principal a través de un conector, véase la Figura 4.17.

El convertidor LTC3119 se utiliza en la solución de 808 nm, mientras que el SPV1040T en la de 1480 nm. La elección de ambos convertidores está determinada por tres razones fundamentales: (i) compatibilidad con las características eléctricas de las PVCs, (ii) alta eficiencia teórica ( $> 90\text{ }\%$ ) y (iii) ambos implementan mecanismos para optimizar la eficiencia de conversión: LTC3119 (*Maximum Power Point Control*, MPPC) y SPV1040T (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT) [63][64], véase el capítulo 2. El control de potencia posee dos modos de trabajo: alimentado por PoF (modo A) y por la batería (modo B). En el modo A la energía que proviene de las PVCs se utiliza para generar el voltaje de 5 V que alimenta a la carga, al tiempo que suministra la potencia necesaria para cargar a la batería. La corriente de carga varía en función de la solución; 20 mA cuando está configurado para operar a 808 nm y de 11,17 mA en la solución de 1480 nm. Estas diferencias están determinadas por la disponibilidad de potencia eléctrica en ambas soluciones. El estado y el proceso de carga/descarga es controlado por el circuito integrado MAX17260, el cual envía a través de su interfaz I2C estimaciones relativa al proceso de carga y descarga de la batería.

En el modo B el sistema funciona con la energía extraída de la batería y que fue almacenada en los ciclos de carga en presencia de PoF. La conmutación entre ambos modos se produce automáticamente cuando el bloque de manejo de potencia detecta baja tensión a la salida de la PVC y la lleva a cabo el circuito integrado *PowerPath* de dos entradas LTC4419 [65].



(a)



(b)

Figura 4.17. Foto del subsistema PoF/RRH: (a) tarjeta principal que integra los diferentes bloques; (b) tarjetas que integran el DC/DC de la solución que opera a 808 nm (izquierda.) y a 1480 nm (derecha); no se muestran las PVCs.

En ambos modos, tal y como se había comentado anteriormente, se implementan mecanismos para optimizar el consumo energético con el objetivo de emular los períodos de inactivad o de poco tráfico de una RRH real. Estos estados por los que transita el subsistema PoF/RRH están determinados por el apagado o encendido de los siguientes dispositivos o circuitos integrados: DC/DC, COM, carga y activación de los modos de bajo consumo del microcontrolador, véase la Tabla 4.6. El tránsito por estos modos es controlado por el microcontrolador modificando el estado de sus pines correspondientes ( $\mu C1$ ,  $\mu C2$ ,  $\mu C3$ ). En el modo 1 se inhabilita el suministro de potencia a la carga y el microcontrolador se encuentra en estado activo. En este modo la entrada/salida es controlada desde la CO a través del envío del comando correspondiente o por *hardware* a través del conector P1.

Tabla 4.6. Definición de los modos de bajo consumo del subsistema PoF/RRH.

Identificador del modo	DC/DC	Carga conectada	COM	CPU (LPM4.5)	Descripción del modo
Modo 1 (M1)	✓	✗	✓	✗	PoF/RRH recibe y envía comandos a través de la tarjeta COM. El microcontrolador está en modo activo. En este modo la batería puede estar en proceso de carga: M1a, en caso contrario M1b.
Modo 2 (M2)	✗	✗	✗	✓	La tarjeta no puede recibir/enviar comandos. El microcontrolador está en modo LPM4.5. Es necesario un <i>wakeup</i> por <i>hardware</i> .

✓ Encendido o característica habilitada.

✗ Apagado o característica inhabilitada.

El M2 es el más restrictivo ya que inhabilita la mayoría de las funcionalidades del subsistema incluida la tarjeta de comunicaciones COM. En este escenario el subsistema pierde la capacidad de salir del modo de bajo consumo a través de los comandos recibidos desde la CO, tal y como ocurría en el M1. Por esta razón se implementa una lógica de *wakeup* por *hardware* que detecta e interrumpe al microcontrolador una vez que se detecta un pulso generado por el láser de PoF. Adicionalmente, el subsistema PoF/RRH puede recuperar su actividad (pasar a M2) a través de un *wakeup* programado a una determinada hora del día, configurada previamente por la CO. Esta funcionalidad es posible gracias al calendario interno con capacidades de alarma que posee el microcontrolador.

Por último, el bloque de manejo de potencia posee dos reguladores lineales (LDO1, LDO2) que generan una tensión de 2,8 V (VDD2V8) y 3,3V (VDD3V3). La tensión VDD2V8 alimenta a la lógica de control mientras que VDD3V3 se utiliza para el resto de la electrónica.

Finalmente es importante enfatizar el hecho de que el subsistema PoF/RRH posee dos variantes. Ambas poseen las mismas funcionalidades pero desde el punto de vista eléctrico son diferentes. En el epígrafe 5.5 se utiliza la variante que opera a 808 nm y en el capítulo 6 se utiliza la variante de 1480 nm.

#### 4.4.4 Tarjeta de comunicaciones (COM)

Como se ha visto en epígrafes anteriores gran parte de las funcionalidades de la plataforma dependen del intercambio de información de control entre los subsistemas PoF/CO y PoF/RRH. Esta funcionalidad requiere de un canal de comunicación bidireccional, con el que cuenta cada subsistema, basado en fibra óptica SMF (G652.D) e implementado en la tarjeta COM. El enlace de comunicaciones (extremo-extremo) suele tener una longitud menor a los 15 km, típicamente 10 km. En su configuración más básica la comunicación es de tipo punto a punto (P2P, por sus siglas en inglés), aunque con la asignación de direcciones físicas a cada tarjeta COM (direccionamiento) se pueden implementar topologías de comunicación más complejas como la topología punto a multi-punto (P2M, por sus siglas en inglés). La Figura 4.18 muestra un esquema simplificado de la tarjeta COM donde se observan sus dos interfaces principales: UART y su conexión a la fibra óptica a través de los dispositivos electroópticos (láser y fotodiodo). La UART se utiliza para el intercambio de información en ambas direcciones entre el microcontrolador y la tarjeta COM. En la transmisión (Figura 4.18, superior), el láser es manejado por una fuente de corriente ( $I_L$ ) la cual convierte la cadena binaria que genera la UART en variaciones de  $I_L$  que excitan al láser. La corriente  $I_L$  es de 10,6 mA, la cual está próxima a la corriente umbral de 9 mA del láser con el objetivo de minimizar el consumo. Adicionalmente, considerando la curva característica  $P/I_L$  del láser, se obtiene que para la corriente configurada la potencia óptica de emisión es de 0,48 mW (-3,19 dBm) a una longitud de onda de 1310 nm. La Tabla 4.7 muestra los parámetros que se configuran en la UART para la transmisión.

En la recepción (Figura 4.18, inferior) la señal recibida a través de la fibra óptica es procesada en 3 etapas. Inicialmente hay una etapa de transimpedancia para hacer la conversión de corriente a tensión, seguida de 2 etapas adicionales: amplificación/filtrado (AMP/FILT) y conformación de pulso (CP). La etapa de AMP/FILT se implementa con el amplificador operacional OPA4336, el cual es utilizado típicamente en soluciones de instrumentación y en aplicaciones con fotodiodos [66]. La conformación de pulso se implementa con el comparador TLV3702 [67] y el objetivo fundamental es generar una señal cuadrada con las mismas características que la señal transmitida. Esto último permite que el *hardware* interno del microcontrolador reconozca la secuencia de bits recibidos como válida. La misma debe cumplir con el

formato y los requisitos temporales establecidos por el protocolo de la UART. Si este proceso de validación no ocurre, en el caso específico del MSP430F5636, la secuencia de bits recibida es descartada. Finalmente, este enlace de bajo consumo soporta una comunicación bidireccional de 6,6 kbits/s.

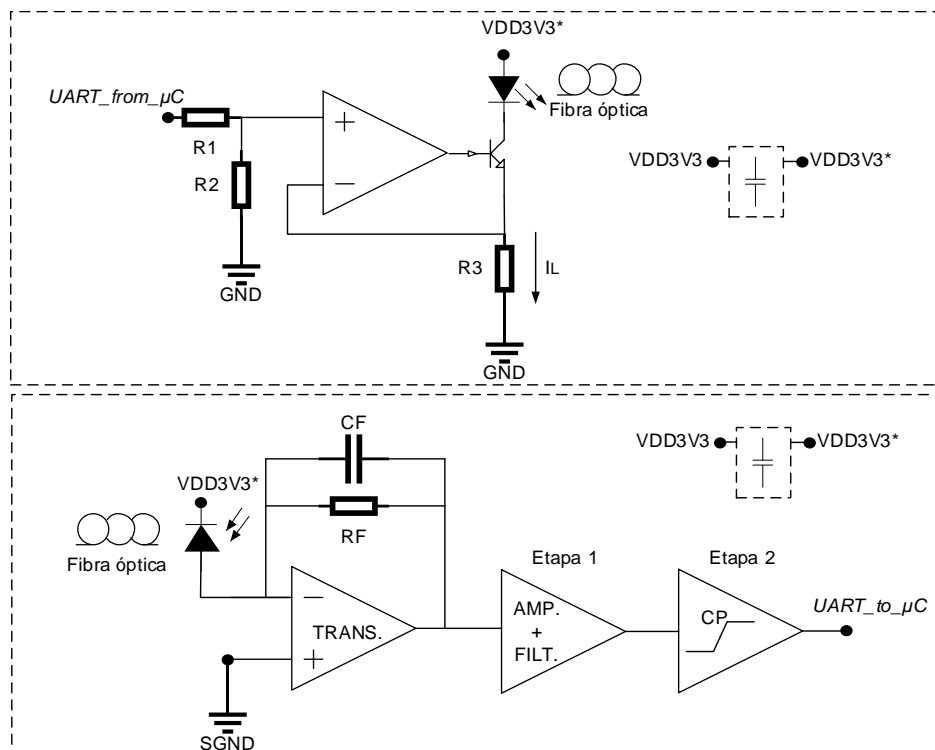


Figura 4.18. Esquema electrónico simplificado de la tarjeta COM.

Tabla 4.7. Configuración de la UART.

Parámetros	Valor
Baudrate	600 baudios
Bits de inicio	1 bit
Bits de datos	8 bits
Bits de stop	1 bit
Bits de Paridad	sí, 1 bit
Control de flujo	no

#### 4.4.5 Protocolo de comunicaciones: CO-RRH

Como se ha comentado en epígrafes anteriores, la CO y la RRH intercambian datos a través del canal de control, lo cual permite funcionalidades como por ejemplo: (i) recuperar la información de los sensores de la RRH desde la CO, (ii) activar/desactivar los modos de bajo consumo de la RRH y/o (iii) recuperar el estado de carga/descarga de la batería. El protocolo de comunicaciones que se aborda en este epígrafe describe las funcionalidades, estructura y tipos de tramas que se utilizan para el intercambio de la información de estado y/o control entre la CO y la RRH. La comunicación entre el ordenador y el subsistema PoF/CO, también cumple con el protocolo. Las tramas poseen 5 campos con un tamaño de 1 byte: TIPO DE TRAMA, DIRECCIÓN, TAMAÑO, un campo de N bytes para los DATOS y CRC, véase la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Estructura de las tramas del protocolo.

byte 1				byte N
TIPO DE TRAMA	DIRECCIÓN	TAMAÑO	DATOS	CRC
MSB <sup>3</sup>				LSB <sup>4</sup>

El protocolo contempla tramas de tipo Configuración (CONFIG\_FRAME), Petición (REQ\_FRAME) y Notificación (NOTIF\_FRAME). Las tramas CONFIG\_FRAME se emplean para configurar estados en la RRH, como por ejemplo modos de bajo consumo, mientras que las tramas REQ\_FRAME son peticiones de parámetros desde la CO, como por ejemplo, el resultado de la medición de los sensores. Las tramas de tipo NOTIF\_FRAME, tiene usos especiales, como por ejemplo cuando funciona como reconocimiento de trama recibida (ACK, por sus siglas en inglés). El campo DIRECCION (AD) especifica a la RRH que debe procesar la trama puesto que cada dispositivo en la plataforma posee una dirección física fija. En un escenario P2M, aunque todas las RRH reciben el paquete, sólo una ejecuta la acción correspondiente, según la dirección especificada en este byte. El campo TAMAÑO, especifica cuantos bytes posee la trama. El campo de DATOS es la carga útil de la trama que se envía y varía en función del tipo de trama. En algunos casos especifica cual es la acción que debe ejecutar el receptor de la misma y en

<sup>3</sup> Bit más significativo

<sup>4</sup> Bit menos significativo



otros contiene la información solicitada por la CO (un ejemplo sería incluir mediciones de sensores). El campo CRC es un código de redundancia cíclica que le permite al receptor verificar la integridad de la trama recibida. Si la trama no es válida el receptor de la trama no envía la trama correspondiente de tipo NOTIF\_FRAME, notificando el ACK. En la Figura 4.19 se muestra un ejemplo de escenario en el que se incluyen los Módulos (Mx) de PoF que operan a 808 nm, el bloque de control del subsistema PoF/CO y dos subsistemas PoF/RRH.

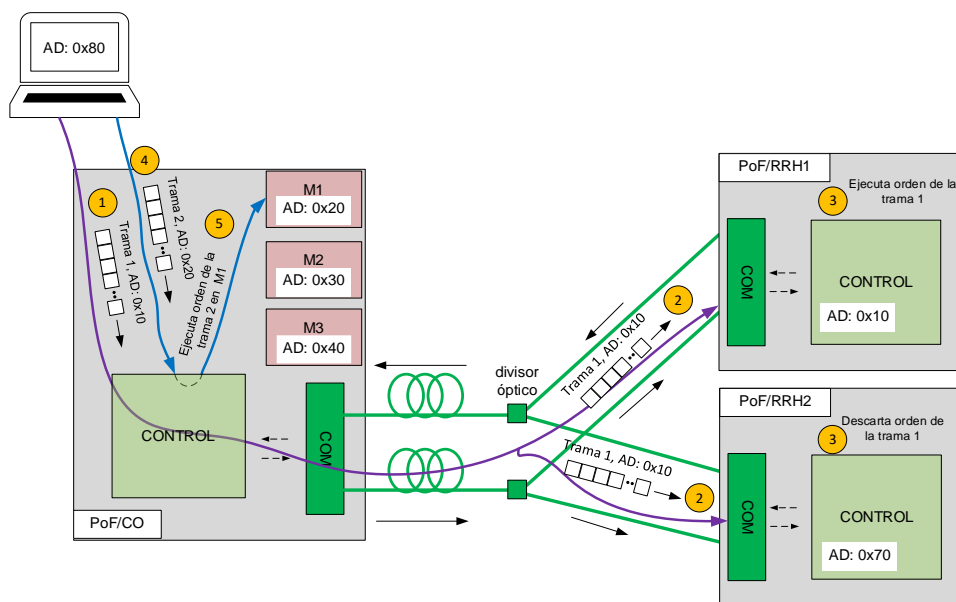


Figura 4.19. Mapa de direcciones (AD) y escenario de direccionamiento en la plataforma basado en el protocolo.

Adicionalmente se observan dos flujos de datos (trama 1 y trama 2); ambas tramas son de tipo CONFIG\_FRAME. El campo de DIRECCION (AD), en este ejemplo en particular, especifica que los destinos son los subsistemas PoF/RRH1 y M1. Se puede observar que sólo el dispositivo receptor direccionado, en este caso identificado como AD:0x10, es quien procesa o ejecuta la acción especificada por la trama recibida. Los indicadores numéricos indican la secuencia en la que ocurren los eventos.

A continuación, se muestran algunos de los comandos más utilizados:

- ENTER\_SLEEP\_MODE: el subsistema PoF/RRH entra en el modo de bajo consumo M1.
- OUT\_SLEEP\_MODE: el subsistema PoF/RRH sale del modo de bajo y pasa a modo activo.

- CONFIG\_CALENDAR: el subsistema PoF/CO utiliza este comando para configurar en el subsistema PoF/RRH la fecha y la hora actual en el calendario interno del microcontrolador.
- SET\_WAKEUP: permite configurar remotamente una alarma por *software*. Esta alarma sirve para programar eventos como por ejemplo: hacer transiciones (previamente configuradas) entre los modos M1 y M2 sin necesidad de recibir el comando OUT\_SLEEP\_MODE.
- REQUEST\_FRAME\_CURRENT\_SENSOR: al recibir esta petición el subsistema PoF/RRH envía hacia la CO la medición del sensor de corriente identificado en la trama.
- REQUEST\_FRAME\_BATTERY\_STATUS: al recibir esta petición el subsistema PoF/RRH envía hacia la CO el estado de carga de la batería.

#### 4.4.6 Funcionalidades del *firmware*

En el desarrollo de la plataforma se implementan dos *firmwares*, como parte de los bloques de control de los subsistemas PoF/CO y PoF/RRH. El *software* que se utiliza es el Code Composer Studio™ (CCS) versión 8.3.0.00009 del fabricante Texas Instruments, el cual es un entorno de desarrollo integrado que soporta un grupo de microcontroladores entre ellos la familia MSP430. Este entorno permite desarrollar y depurar el código en el propio sistema con la ayuda de la herramienta *hardware* MSP-FET, lo cual disminuye el tiempo de desarrollo. Para implementar esta funcionalidad de programación y depuración en el circuito se añade a ambos subsistemas una interfaz JTAG, véase la Figura 4.20.

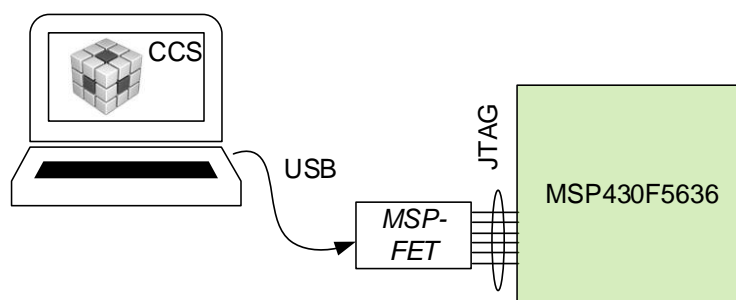


Figura 4.20. Interfaz de programación del MSP430, usando la interfaz JTAG.

Para el desarrollo de los 2 *firmwares* se ha utilizado una estructura de programación basada en protocolos, la cual es una librería *open source* ideal para el desarrollo de sistema embebidos orientado a eventos y con limitaciones de memoria. Ambas características estaban presentes tanto en el subsistema PoF/RRH como en el PoF/CO.

El *firmware* del subsistema PoF/CO, permite llevar a cabo diferentes funcionalidades tales como:

- intercambiar información con el subsistema PoF/RRH y el ordenador cumpliendo con la estructura establecida por el protocolo. Este subsistema funciona además como una pasarela virtual entre el ordenador y el subsistema PoF/RRH. Esta funcionalidad es implementada a través de interrupciones y por DMA;
- implementar el control de la potencia óptica de emisión y de temperatura de los láseres de cada uno de los módulos que operan a 808 nm;
- configurar e intercambiar información con los periféricos externos e internos del microcontrolador (*drivers*).

Un parámetro muy importante en el desarrollo es el nivel de ocupación de la memoria *flash*. En esta implementación es del 15 % o lo que es lo mismo 14,5 kbyte. La ocupación de la RAM es de tan sólo el 3 % (563 bytes). El *firmware* del subsistema PoF/RRH, permite llevar a cabo las siguientes funcionalidades:

- intercambiar información con el subsistema PoF/CO, cumpliendo con el protocolo. El envío y recepción de las tramas las lleva a cabo mediante interrupciones para minimizar el tiempo en modo activo. El resto del tiempo el *firmware* pone al microcontrolador en uno de los modos de bajo consumo;
- implementar el protocolo y ejecutar la orden recibida según el tipo de trama. En el caso de la ejecución de los modos de bajo consumo, establece la configuración que corresponde a los periféricos;
- configurar e intercambiar información con los periféricos externos e internos del microcontrolador (*drivers*).

En este caso la ocupación de la memoria flash es del 8 % (7,54 kbyte), lo cual es la mitad de la ocupación en el subsistema PoF/CO. La ocupación de la memoria RAM es del 1 %.

#### 4.4.7 Aplicación de Matlab

La aplicación que se implementa en Matlab es un complemento *software* esencial para el funcionamiento de la plataforma.

Las funcionalidades de la aplicación se pueden agrupar en dos grupos: (i) asociadas al control/supervisión de la plataforma PoF y (ii) con la emulación de algunas de las funcionalidades de una red 5G. Esta última característica permite simular el bloque 5G/Plano de Control de la tecnología 5G ubicado en la CO. Para la implementación de estas funcionalidades la interfaz gráfica se divide en 3 secciones:

- sección 1: comprende todos los botones y controles asociados a los módulos que operan a 808 nm. En esta sección se configuran manualmente la potencia óptica de emisión de cada uno de los módulos;
- sección 2: comprende los controles que envían los comandos, establecidos por el protocolo, para recuperar y visualizar los datos de los sensores del subsistema PoF/RRH;
- sección 3: emulador de movilidad 5G, formalmente denominado como Agente de Movilidad. Este agente permite emular en un mapa virtual, el movimiento de un usuario que transita a través de múltiples celdas 5G. El Agente de Movilidad permite configurar parámetros del movimiento del usuario como la velocidad de traslación y adicionalmente, puede limitar el movimiento del usuario a ciertas zonas dentro del mapa. La posición del usuario se traduce convenientemente en comandos que son enviados al subsistema PoF/RRH. En el caso de estudio típico, se vinculan los subsistemas PoF/RRH del laboratorio con una celda emulada en el mapa del Agente de Movilidad; de esta manera se simula el escenario en el que una RRH brinda servicio a una celda. Esta aproximación permite vincular la actividad del usuario con el encendido o apagado de la RRH que le brinda el servicio. En los experimentos de laboratorio el Agente de Movilidad envía al subsistema PoF/RRH



En la implementación se utilizan 2 módulos (808 nm) de la plataforma, acoplados a un *bundle* de fibras ópticas multimodo FG200UCC [69], con un diámetro de 200  $\mu\text{m}$  y una longitud de 100 m. La energía suministrada por la CO se utiliza para alimentar remotamente al subsistema PoF/RRH y a un amplificador de RF (PA, por sus siglas en inglés) conectado como una carga. En el lado de la RRH la energía es convertida con la ayuda de 4 PVCs. El enlace de comunicaciones se emplea para controlar los modos de bajo consumo M1 y M2 desde la CO, véase el epígrafe 4.4.3 . El PA se utiliza en este experimento para amplificar una señal de ARoF. Adicionalmente el montaje incluye el control por ordenador, cuya función se comentó en epígrafes anteriores.

Esta demostración permite validar los mecanismos de ahorro energético que se han estado abordando a lo largo del desarrollo de este capítulo. La Figura 4.22 muestra los principales elementos asociados al sistema PoF, donde se observa el subsistema PoF/CO, PoF/RRH y el canal de comunicaciones y las fibras MMF.

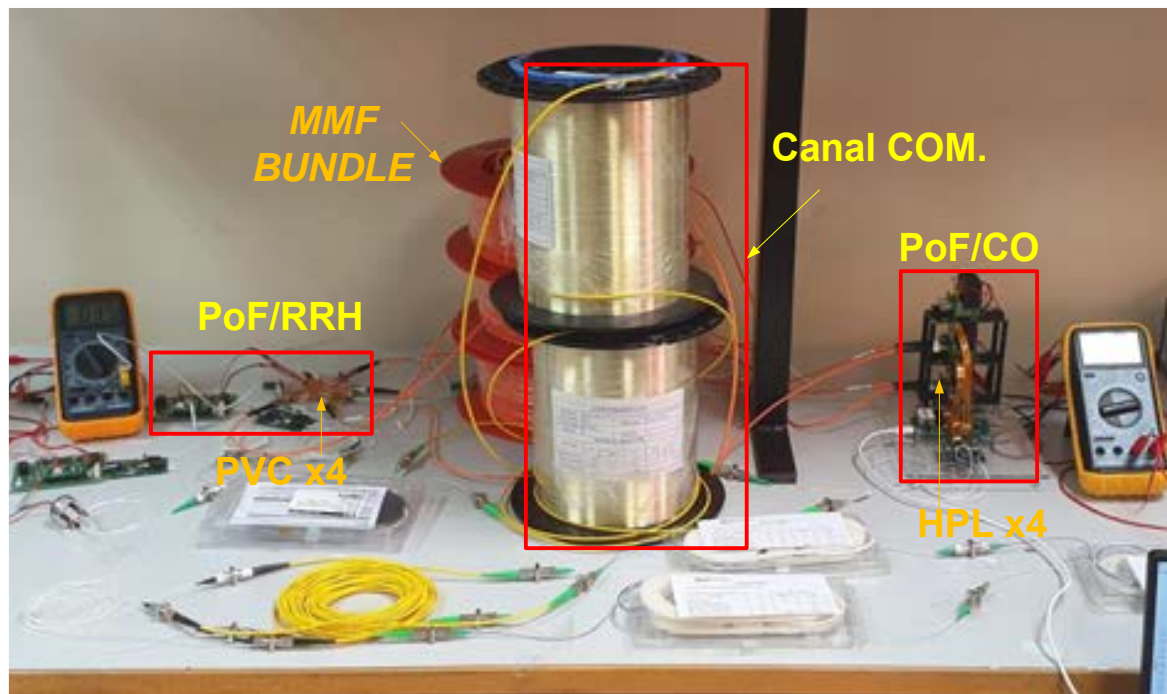


Figura 4.22. Foto del montaje experimental; sólo se puede apreciar el sistema PoF.

## 4.5.2 Caracterización del montaje experimental

### 4.5.2.1 Módulos transmisores de energía

El diseño de los módulos está orientado a la mejora de la eficiencia. El uso de láseres semiconductores de 808 nm como HPL acoplados a fibras MMF de 200  $\mu\text{m}$  evita las pérdidas de acoplamiento. El diseño incluye un controlador de temperatura (TEC) con un Peltier y disipadores para el correcto funcionamiento del sistema. No obstante, más de la mitad de la potencia eléctrica suministrada a los módulos se utiliza para el sistema de refrigeración. De la potencia eléctrica total suministrada a los HPL, 34,85 W, la potencia consumida por el sistema de refrigeración es de 17,77 W y la potencia óptica de emisión es de 5,41 W, por tanto, la eficiencia del sistema láser es del  $\sim 16\%$ . El subsistema PoF/CO permite controlar el encendido y el apagado de cada módulo por lo que el consumo energético se puede ajustar en función de la demanda en potencia de la carga.

### 4.5.2.2 Balance de potencia en el experimento

El balance de potencia depende de los dos tipos de fibras ópticas que se emplean en el experimento, la SMF G652.D y la MMF, utilizadas para las comunicaciones y la transmisión de potencia respectivamente.

Cada láser HPL está conectado a una PVC de GaAs. La potencia óptica recibida en cada una en el lado de la RRH es la potencia suministrada por el HPL en dBm, menos las pérdidas de la fibra óptica en dB. El coeficiente de atenuación típico según la hoja de datos de la MMF de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro es de 3 dB/km a 808 nm, por lo que las pérdidas de potencia máxima teórica son de 0,3 dB por cada enlace de 100 m de MMF. En la Tabla 4.9 se muestra un resumen de las pérdidas del enlace óptico PoF.

Tabla 4.9. Balance de potencia del sistema PoF.

Parámetros	Valor
Potencia óptica de emisión (HPLx4)	5,41 W
Pérdidas totales	0,29 W
Potencia total recibida (PVCx4)	5,12 W

### 4.5.2.3 Pérdidas en el subsistema PoF/RRH

En el subsistema PoF/RRH hay varios elementos que introducen pérdidas al sistema, entre los más relevantes están: la PVC y el convertor continua-continua (DC/DC) que genera la tensión que alimenta al PA. La Figura 4.23 muestra los comportamientos corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V) de las cuatro PVCs a partir de los cuales se obtiene la eficiencia del conjunto. La caracterización se realiza con una potencia óptica de entrada de 5,12 W en el conjunto de PVC, obteniéndose una potencia eléctrica máxima en la salida de 1,95 W (5,15V; 378,64 mA). Por tanto, la eficiencia de conversión es de alrededor del 38 % sin sobrecalentamiento de las PVC gracias al disipador de calor diseñado que se muestra en la Figura 4.24. La temperatura máxima alcanzada es de 37,7 °C, registrada utilizando una cámara térmica Flir One Pro, la cual tiene una precisión en la medición de  $\pm 3$  °C.

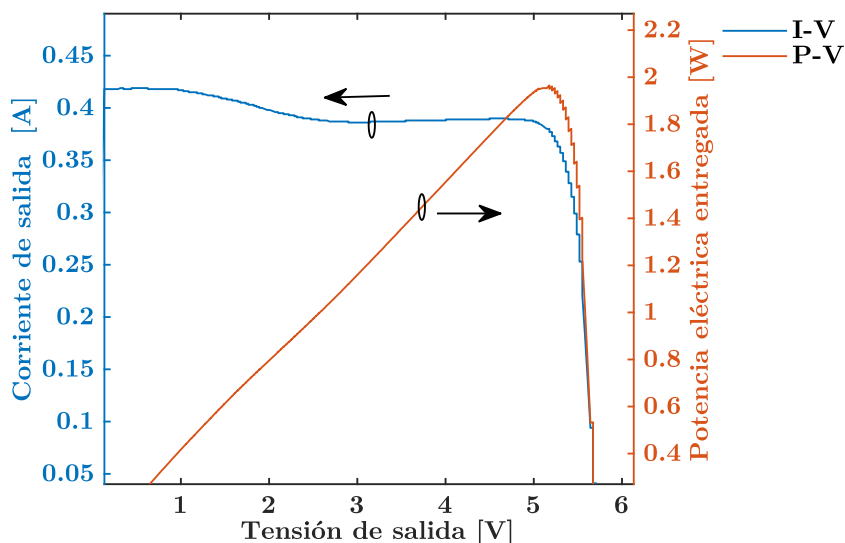


Figura 4.23. Curvas experimentales corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V) del conjunto de las cuatro PVC.



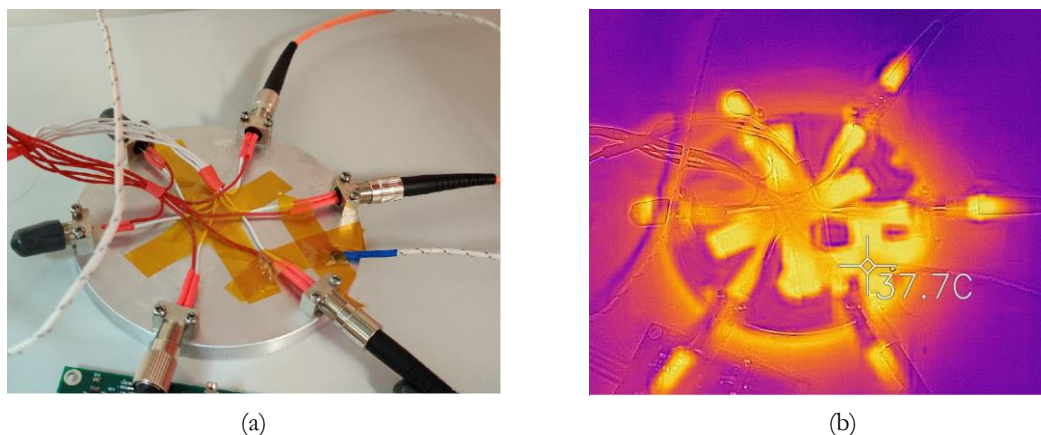


Figura 4.24. Disipador de potencia: (a) imagen del disipador con las cuatro PVC; (b) imagen térmica del disipador después de 8 minutos de operación continua con una potencia óptica total inyectada de 5,12W.

En este escenario la potencia eléctrica máxima entregada por la tarjeta es de 1,75 W, lo cual representa una eficiencia de conversión eléctrico-eléctrico del subsistema PoF/RRH de 89,74 %. Estas pérdidas son mayoritariamente debidas a la eficiencia de conversión del DC/DC.

### 4.5.2.4 Análisis global y modos de bajo consumo

Los escenarios analizados en términos de consumo de energía en la RRH son escenarios para alimentar una RRH completa de baja potencia (algunos sistemas comerciales prometen consumos de nodos 5G por debajo de 1 W) o algunos de los componentes de la RRH como los amplificadores de potencia (PA), o la propia RRH en modo de bajo consumo. La inclusión de la batería puede proporcionar una potencia extra para alimentar estos componentes en periodos cortos de tiempo.

Como se menciona en los epígrafes 4.5.2.1 y 4.5.2.2, de los 34,85 W de potencia eléctrica suministrados al subsistema PoF/CO, 5,41 W ópticos son emitidos por el conjunto de módulos y 1,75 W se entrega a la carga. Las pérdidas en la propagación son de 0,29 W, mientras que la potencia óptica recibida en el lado de la RRH es de 5,12 W. El rendimiento de la conversión óptica a eléctrica es del 38 % proporcionando 1,95 W de potencia eléctrica al subsistema PoF/RRH. Por lo tanto, las eficiencias del sistema y global definidas en el capítulo 2, son la SEE de  $\sim 36\%$  y la GEE de  $\sim 5,6\%$ .

El sistema de control sólo consume 16,47 mW, la COM. requiere ~35 mW, y la batería se carga con 20 mA a 4,2 V. Esta batería funciona como una energía de respaldo y complementaria al subsistema PoF/RRH en ausencia de la potencia óptica del sistema PoF.

Tabla 4.10. Especificaciones generales y modo de bajo consumo de la plataforma, en su variante de 808 nm.

Parámetros	Valor
Eficiencia de la PVC	38 %
Tensión de salida del subsistema PoF/RRH	5 V
Potencia máxima entregada por el subsistema PoF/RRH	1,75 W
Consumo del subsistema PoF/RRH en modo 1a,	257,58 mW (cargando batería)
Consumo del subsistema PoF/RRH en modo 1b	150,94 mW (sin cargar la batería)
Consumo del subsistema PoF/RRH en modo 2	3,15 mW

En este escenario la implementación de los modos de bajo consumo M1 y M2 contribuyen al ahorro energético. En el modo M1 los consumos experimentales son de 257,58 mW (M1a, batería cargando) y de 150,94 mW (M1b, batería cargada). Por otro lado, el consumo mínimo obtenido es de 3,15 mW en el modo M2, véase Tabla 4.10. El consumo en el modo M2 es 82 veces menor que en el modo M1a que, extrapolado a los consumos típicos enunciados en el epígrafe 4.3 , puede significar un ahorro energético de decenas de vatios en función de la aplicación.

### 4.5.3 Integración de la tecnología 5G

La integración de la tecnología 5G con PoF, en términos generales, implica dos tipos de análisis: (i) eléctrico y (ii) de impacto de PoF en la calidad de la transmisión de los datos. El análisis eléctrico tiene como objetivo satisfacer todos aquellos requerimientos impuestos por la tecnología 5G desde el punto de vista de consumo, estabilidad de los voltajes generados (ruido) y en general de todos aquellos parámetros eléctricos del sistema PoF que puedan afectar al comportamiento del sistema 5G.

En cambio, el impacto de PoF en la transmisión de los datos depende del tipo de escenario (dedicado o compartido) implementado en la solución. En el escenario dedicado no es necesario llevar a cabo este

tipo de análisis, pues los datos y la energía no comparten el mismo medio físico. En el capítulo 6 se aborda el impacto de PoF sobre los datos en un escenario compartido.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, en este epígrafe solo se analizan los requerimientos que debe de cumplir el sistema PoF en un escenario dedicado, para una aplicación específica. Como se ha comentado en epígrafes anteriores, se trata de alimentar a un elemento crítico como es el PA que amplifica la señal ARoF, sin afectar el comportamiento del sistema 5G, con el subsistema PoF/RRH, véase la Figura 4.25. La integración también incluye la generación y recepción de señales 5G, para ello se implementa el sistema mostrado en la Figura 4.26.

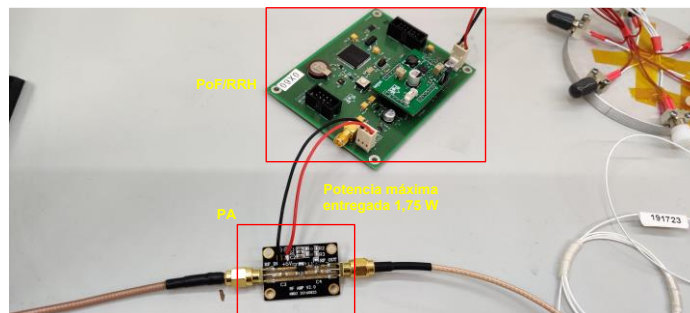


Figura 4.25. Alimentación del PA por medio del subsistema PoF/RRH.

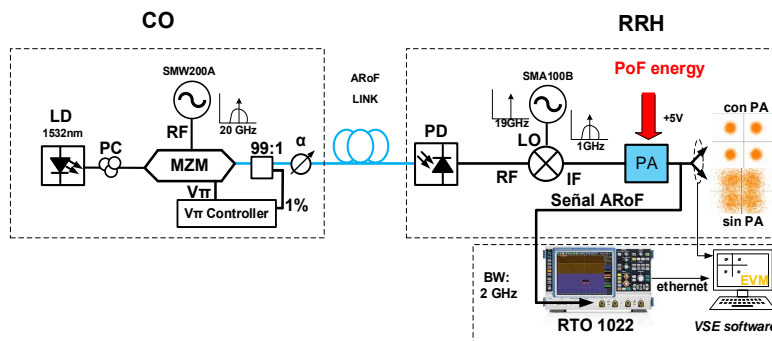


Figura 4.26. Esquema de transmisión ARoF sobre SMF, con PA de frecuencia intermedia alimentado por PoF para aumentar la SNR y mejorar el EVM.

El montaje incluye un láser (LD) que opera a 1532 nm, un controlador de polarización (PC), un generador vectorial (SMW200A, abreviadamente SMW) capaz de generar tramas que cumplan con la

numerología 5G, un modulador MZM, un controlador de polarización del MZM y un atenuador variable configurado a una atenuación fija. El generador está configurado para generar el modelo de prueba 1.1 (TM1.1), con un ancho de banda de 5 MHz, modulación QPSK, una portadora de RF de 20 GHz y utilizando la división de frecuencia dúplex (FDD), que es uno de los dos modos de transmisión utilizados por el estándar. En el lado de recepción, hay un mezclador, un osciloscopio (RTO1022, abreviadamente RTO), un analizador de señal por *software* (VSE) y un generador externo (SMB100A, abreviadamente SMB) configurado a una frecuencia de trabajo de 19 GHz. El generador de señales SMB junto con el MIX se utilizan para hacer un *down-conversion* heterodino antes de llevar a cabo el análisis de la señal recibida en la RRH. La portadora de RF que se configura en el SMW y la frecuencia del oscilador local SMB, son elegidas convenientemente de modo que la salida de la frecuencia intermedia del MIX siempre sea igual 1 GHz. Esto se debe a que el osciloscopio que se usa en la adquisición tiene un ancho de banda de 2 GHz.

En este escenario, el EVM medido es del 55 %, lo que no cumple con la norma. Por esta razón se añade al sistema el amplificador de frecuencia intermedia, el cual tiene una ganancia de 20 dB a 1 GHz, para aumentar la SNR y mejorar el EVM. El amplificador tiene un consumo eléctrico de 380 mW (76 mA a 5 V) proporcionando una potencia de salida de -55 dBm. Esto significa que el amplificador puede ser alimentado remotamente por el sistema PoF. Adicionalmente se comprueba que la tensión de alimentación generada por el subsistema PoF/RRH es lo suficientemente estable como para no deteriorar el EVM. En la verificación de la estabilidad de la tensión suministrada por el sistema PoF se utiliza una resistencia de 50  $\Omega$  en sustitución del PA. Esta resistencia se corresponde con un consumo de 500 mW que es ligeramente superior al del amplificador, siendo una condición más restrictiva en cuanto a la evaluación del ruido de salida y la potencia a suministrar por el sistema PoF. En estas condiciones el ruido medido es inferior a 50mVrms. Por otro lado, se comprueba la estabilidad del EVM mediante mediciones sucesivas tomadas cada 2 minutos en un intervalo de tiempo de 60 minutos y los resultados se muestran en la Figura 4.27. Las fluctuaciones del EVM se deben principalmente a la deriva del modulador MZM. Estas variaciones se reducen parcialmente utilizando un controlador del punto de operación polarización. Las mediciones mostradas en la Figura 4.27 son para  $\alpha = 8$  dB, que se selecciona por ser el peor escenario es decir, de máxima atenuación. En el nuevo esquema utilizando el amplificador de frecuencia intermedia alimentado con nuestro sistema PoF el EVM se mantiene siempre por debajo del 17,8 %, que cumple el límite fijado por el estándar para la modulación QPSK. En los experimentos, el valor de EVM mejora

considerablemente, pasando del 55 % a menos de 18 %. El mejor valor de EVM obtenido en el experimento es del 2,93 %, para  $\alpha= 0$  dB. Finalmente, un aspecto importante en los sistemas PoF es la optimización del diseño, con el objetivo de maximizar las eficiencias del sistema. Uno de los parámetros que se puede ajustar para este fin es la potencia de emisión del láser, con el objetivo de enviar justo la energía que necesita el sistema alimentado, en este caso el subsistema PoF/RRH. Si el subsistema PoF/CO envía más de la energía necesaria, ésta se disipa en forma de calor en la PVC y en tal caso la SEE no sería máxima.

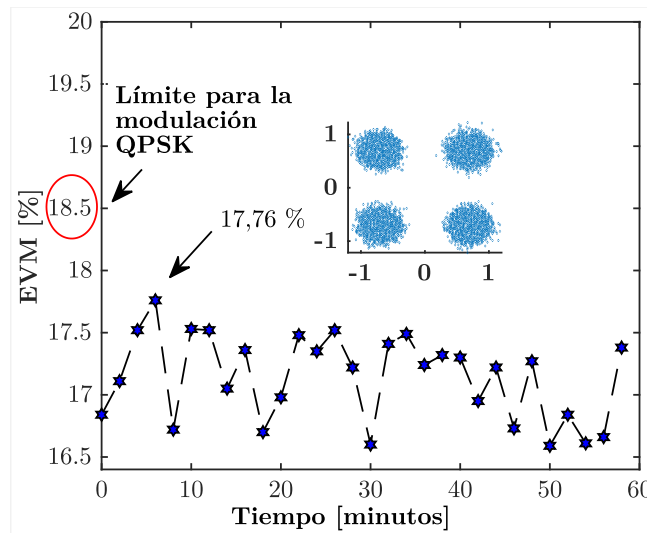


Figura 4.27. Estabilidad del EVM del sistema de transmisión ARoF, con  $\alpha = 8$  dB. Mediciones cada 2 minutos, el EVM cumple la norma en el caso de una modulación QPSK.

En el análisis se utiliza la Ec. 4.6 que se abordó en el epígrafe 4.3.6 . A partir de esta ecuación se calcula la potencia óptica que es necesario suministrar al subsistema PoF/RRH, que se corresponde justo con la potencia que demanda la carga. Para este análisis se parte de los datos mostrados en la Tabla 4.11 y de las siguientes consideraciones: (i) alimentación total de la RRH, por lo que  $k = 1$ , (ii) el término  $\frac{P_{ps}}{(1-\sigma_{dc})}$  es igual al consumo del subsistema PoF/RRH y (iii)  $\frac{P_{out}}{\eta_{PA}} \gg P_{RF}$ .

$$P_{in-PoF} \approx k \frac{P_{ps} + \left(\frac{P_{out}}{\eta_{PA}} + P_{RF}\right)}{(1-\sigma_{dc})\eta_{PVC}} \approx \frac{P_{ps} + \left(\frac{P_{out}}{\eta_{PA}}\right)}{(1-\sigma_{dc})\eta_{PVC}} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Tabla 4.11. Parámetros para el proceso de optimización.

Parámetros	Valor
Eficiencia de la PVC	38 %
Pérdidas en el enlace MMF	0,29 W
Eficiencia del DC/DC	~89,74 %
Consumo del subsistema PoF/RRH	257,58 mW
Consumo del PA ( $\frac{P_{out}}{\eta_{PA}}$ )	380 mW
Potencia de salida en el PA ( $P_{RF}$ )	-55 dBm

Calculando se obtiene que la potencia óptica que se necesita suministrar al subsistema PoF/RRH es de 1,79 W en lugar de los 5,12 W, lo que significa en el subsistema PoF/CO una reducción en la potencia óptica de emisión de 5,41 W a 2,08 W. Esta optimización representa un ahorro energético superior al 60%.

### 4.6 Conclusiones

En el capítulo se abordó el marco teórico de la tecnología 5G y se llevó a cabo un estudio del consumo de los principales elementos que se emplean en la implementación de una RRH en configuración C-RAN. Se analizaron propuestas de integración de la tecnología teniendo en cuenta la contribución energética de PoF en la alimentación de las RRH, identificando dos tipos de escenarios: alimentación parcial o total. En este sentido los amplificadores de potencia resultan de gran interés, por un lado, como consecuencia de su impacto en la reducción del consumo en las RRH actuales si se controla su apagado de forma eficiente y, por otra parte, por las nuevas soluciones integradas de bajo consumo que están emergiendo y que pueden ser interesantes para su uso en celdas de pequeño tamaño. Algunos de estos dispositivos poseen consumos de tan sólo 33 mW que se pueden alimentar directamente con la tecnología PoF. Siguiendo con esta línea, se discutió el desarrollo de una plataforma PoF de bajo consumo con capacidad de comunicación bidireccional entre los subsistemas PoF/CO y PoF/RRH que se integró en un escenario 5G usando una fibra óptica multimodo de 200  $\mu\text{m}$  y una longitud de 100 m, con capacidad de entregar 1,75 W a la carga. Se logró una eficiencia global del sistema (GEE) del 5,6 %, que se podría mejorar hasta un 10 % si en lugar de usar un sistema de enfriamiento activo (Peltier) a éste se reemplaza por disipadores pasivos, a expensas de disminuir su compacidad. La solución incluye baterías que pueden utilizarse para alimentar a la carga y un canal bidireccional de control para enviar a la CO información sobre el estado de la batería y los diferentes sensores. El consumo del bloque de control es inferior a 33 mW. El subsistema PoF/RRH dispone de dos modos de funcionamiento en reposo con un consumo mínimo de 3,15 mW. Entre las funcionalidades que se probaron están incluidas la detección de diferentes parámetros del subsistema PoF/RRH y la habilitación de diferentes modos de bajo consumo. Como prueba de concepto, el sistema se utilizó para alimentar un amplificador de RF. En el sistema de comunicación implementado se midió un valor de EVM inferior al 17,8 % con QPSK y una portadora de RF de 20 GHz. Con este experimento se demostró la viabilidad de gestionar remotamente desde la CO el control de un amplificador de RF, con el objetivo de adaptar el consumo de la RRH a su tráfico.

Por último, si se comparan otros trabajos recientes con la solución propuesta, se concluye que mejora el estado de la técnica actual. La SEE máxima lograda del 36 % supera a estudios recientes en este campo

como los planteados por Matsuura *et al.*, en [34] y aunque en [70] la GEE del 11,2 %, es mayor a la que se logra en este trabajo (5,6 %), la distancia era de tan sólo 1,5 m frente a los 100 m de esta investigación.



## 4.7 Referencias

- [1] ITU, “Report ITU-R M.2083-0. Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond M Series Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services,” Geneva, 2015. Accessed: Jun. 29, 2021. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>.
- [2] “First Intercontinental 5G Trial Begins at Winter Olympics - IEEE Spectrum.” <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/wireless/first-intercontinental-5g-trial-begins-at-winter-olympics> (accessed Jun. 28, 2021).
- [3] P. Cerwall, A. Lundval, and P. Jonsson, “Ericsson Mobility Report ,” 2021. Accessed: Jun. 28, 2021. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/49e50d/assets/local/mobility-report/documents/2021/june-2021-ericsson-mobility-report.pdf>.
- [4] Huawei, “5G Power Whitepaper,” 2019. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: <https://carrier.huawei.com/~media/CNBG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf>.
- [5] J. A. Adebusola, A. A. Ariyo, O. A. Elisha, A. M. Olubunmi, and O. O. Julius, “An Overview of 5G Technology,” Mar. 2020, doi: 10.1109/ICMCECS47690.2020.240853.
- [6] G. Barb and M. Otesteanu, “4G/5G: A Comparative Study and Overview on What to Expect from 5G,” in *2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2020*, Jul. 2020, pp. 37–40, doi: 10.1109/TSP49548.2020.9163402.
- [7] ITU, “Report ITU-R M.2410-0. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s),” Geneva, 2017. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf).
- [8] A. M. Al-samman *et al.*, “Millimeter wave propagation measurements and characteristics for 5G system,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, p. 335, Jan. 2020, doi: 10.3390/app10010335.
- [9] Z. Pi and F. Khan, “An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101–107, Jun. 2011, doi: 10.1109/MCOM.2011.5783993.
- [10] Huawei, “5G Ultra-Lean Site,” 2019. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: [https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019/pdf\\_v1.0/5G-Ultra-Lean-Site-White-Paper\\_en.pdf](https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019/pdf_v1.0/5G-Ultra-Lean-Site-White-Paper_en.pdf).
- [11] “3GPP. Release 15.” <https://www.3gpp.org/release-15> (accessed Jun. 29, 2021).
- [12] D. Apostolopoulos, G. Giannoulis, N. Argyris, N. Iliadis, K. Kanta, and H. Avramopoulos, “Analog radio-over-fiber solutions in support of 5G,” in *22nd Conference on Optical Network Design and Modelling, ONDM 2018 - Proceedings*, Jun. 2018, pp. 266–271, doi: 10.23919/ONDM.2018.8396143.
- [13] “Common Public Radio Interface.” <http://www.cpri.info/spec.html> (accessed Jun. 29, 2021).
- [14] “Common Public Radio Interface: eCPRI Interface Specification,” 2018. Accessed: Jun. 29, 2021. [Online]. Available: [http://www.cpri.info/downloads/eCPRI\\_v\\_1\\_2\\_2018\\_06\\_25.pdf](http://www.cpri.info/downloads/eCPRI_v_1_2_2018_06_25.pdf).
- [15] A. W. Dawson, M. K. Marina, and F. J. Garcia, “On the benefits of RAN virtualisation in C-RAN based mobile

- networks,” in *Proceedings - 2014 3rd European Workshop on Software-Defined Networks, EWSDN 2014*, Dec. 2014, pp. 103–108, doi: 10.1109/EWSDN.2014.37.
- [16] B. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji, and S. Lee, “Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 90–97, 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7045396.
- [17] D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. E. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, “Software-defined networking: A comprehensive survey,” in *Proceedings of the IEEE*, Jan. 2015, vol. 103, no. 1, pp. 14–76, doi: 10.1109/JPROC.2014.2371999.
- [18] “NFV C-RAN for Efficient RAN Resource Allocation NEC Corporation,” Japan, 2016.
- [19] B. Guzowski, R. Gozdur, and M. Lakomski, “WDM Power Supply for identification system of fiber optic connectors,” *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 235–244, 2018, doi: 10.24425/118172.
- [20] M. Roeger *et al.*, “In-Service Monitoring of PON Access Networks With Powerline Independent Devices,” *J. Opt. Commun. Networking, Vol. 6, Issue 11, pp. 1018-1027*, vol. 6, no. 11, pp. 1018–1027, Nov. 2014, doi: 10.1364/JOCN.6.001018.
- [21] M. Roeger *et al.*, “Optically powered fiber networks,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 26, p. 21821, Dec. 2008, doi: 10.1364/OE.16.021821.
- [22] H. Miyakawa, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, “Design approaches to power-over-optical local-area-network systems,” *Appl. Opt.*, vol. 43, no. 6, pp. 1379–1389, Feb. 2004, doi: 10.1364/AO.43.001379.
- [23] R. Penze and J. Rosolem, “Fiber powered extender for XG-PON/G-PON applications,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 3, pp. 250–258, 2014, doi: 10.1364/JOCN.6.000250.
- [24] M. Matsuura and J. Sato, “Bidirectional Radio-Over-Fiber Systems Using Double-Clad Fibers for Optically Powered Remote Antenna Units,” *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, doi: 10.1109/JPHOT.2014.2381669.
- [25] T. Umezawa, P. T. Dat, K. Kashima, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, “100-GHz Radio and Power over Fiber Transmission Through Multicore Fiber Using Optical-to-Radio Converter,” *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 2, pp. 617–623, Jan. 2018, doi: 10.1109/JLT.2017.2731991.
- [26] C. Vázquez, D. S. Montero, P. J. Pinzón, J. D. López-Cardona, P. Contreras, and A. Tapetado, “Integration of power over fiber on RoF systems in different scenarios,” in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2017, pp. 1–4, doi: 10.1117/12.2254805.
- [27] M. Matsuura and Y. Minamoto, “Optically Powered and Controlled Beam Steering System for Radio-Over-Fiber Networks,” *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 979–988, Feb. 2017, doi: 10.1109/JLT.2016.2631251.
- [28] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho, “SLEEP mode techniques for small cell deployments,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 8, pp. 72–79, Aug. 2011, doi: 10.1109/MCOM.2011.5978418.
- [29] J. Wu, Y. Zhang, M. Zukerman, and E. K. N. Yung, “Energy-efficient base-stations sleep-mode techniques in green cellular networks: A survey,” in *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Apr. 2015, vol. 17, no. 2, pp. 803–826, doi: 10.1109/COMST.2015.2403395.
- [30] J. Liu, M. Sheng, L. Liu, and J. Li, “Network Densification in 5G: From the Short-Range Communications Perspective,”

- IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 12, pp. 96–102, Dec. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1700487.
- [31] BlueSpace, “Space Division Multiplexing 5G Fronthaul with Analog and Digital Radio-over-Fiber and Optical Beamforming – the blueSPACE Concept,” Aug. 2018. doi: 10.5281/ZENODO.1403140.
- [32] A. P. Goutzoulis, J. M. Zomp, and A. H. Johnson, “Development and antenna range demonstration of an eight-element optically powered directly modulated receive UHF fiberoptic manifold,” *J. Light. Technol.*, vol. 14, no. 11, pp. 2499–2505, 1996, doi: 10.1109/50.548147.
- [33] C. Lethien *et al.*, “Energy-Autonomous Picocell Remote Antenna Unit for Radio-Over-Fiber System Using the Multiservices Concept,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 8, pp. 649–651, Apr. 2012, doi: 10.1109/LPT.2012.2185224.
- [34] M. Matsuura, H. Nomoto, H. Mamiya, T. Higuchi, D. Masson, and S. Fafard, “Over 40-W Electric Power and Optical Data Transmission Using an Optical Fiber,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 4, pp. 4532–4539, Apr. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3027551.
- [35] P. Perry *et al.*, “Comparison of Analogue and Digital Fronthaul for 5G MIMO Signals,” *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2020-June, Jun. 2020, doi: 10.1109/ICC40277.2020.9148787.
- [36] S. Ishimura, H. Y. Kao, K. Tanaka, K. Nishimura, and M. Suzuki, “IF-over-Fiber Transmission of 40\*400-MHz 256QAM OFDM Signals Using Commercial 100Gb/s EML TOSA for Analog Mobile Fronthaul Networks,” Oct. 2020, doi: 10.1109/OECC48412.2020.9273690.
- [37] A. Delmade *et al.*, “Performance analysis of analog if over fiber fronthaul link with 4G and 5G coexistence,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 3, pp. 174–182, Mar. 2018, doi: 10.1364/JOCN.10.000174.
- [38] J. Beas, G. Castanon, I. Aldaya, A. Aragon-Zavala, and G. Campuzano, “Millimeter-wave frequency radio over fiber systems: A survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1593–1619, 2013, doi: 10.1109/SURV.2013.013013.00135.
- [39] TSGR, “TS 138 141-1 - V15.0.0 - 5G; NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing (3GPP TS 38.141-1 version 15.0.0 Release 15),” 2019. Accessed: Nov. 20, 2021. [Online]. Available: <https://portal.etsi.org/TB/ETSIDeliverableStatus.aspx>.
- [40] S. B. Weinstein, “The history of orthogonal frequency-division multiplexing,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 26–35, Nov. 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.5307460.
- [41] “Nuevas soluciones AIR de Ericsson para acelerar la implementación de la banda media de 5G.” <https://www.ericsson.com/es/press-releases/2020/6/ericsson-air-answers-5g-network-site-challenges> (accessed Sep. 20, 2021).
- [42] “Huawei’s AAU Solution Awarded Best Mobile Infrastructure at MWC 2017 - huawei press center.” <https://www.huawei.com/en/news/2017/2/aau-solution-awarded-best-mobile-infrastructure> (accessed Sep. 20, 2021).
- [43] G. Auer *et al.*, “How much energy is needed to run a wireless network?,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 5, pp. 40–49, Oct. 2011, doi: 10.1109/MWC.2011.6056691.

- [44] K. Liu, J. He, J. Ding, Y. Zhu, and Z. Liu, “Base station power model and application for energy efficient LTE,” in *International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT*, 2013, pp. 86–92, doi: 10.1109/ICCT.2013.6820352.
- [45] W. J. Kim, S. R. Stapleton, J. H. Kim, and C. Edelman, “Digital predistortion linearizes wireless power amplifiers,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 54–61, Sep. 2005, doi: 10.1109/MMW.2005.1511914.
- [46] “PE15A3025: Medium power Broadband Amplifier .” Accessed: Sep. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PE15A3025.pdf>.
- [47] R. Electronics Corporation, “High Gain RF Amplifier 1.8GHz to 5.0GHz F1490 Datasheet,” 2020. Accessed: Sep. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/f1490-datasheet?language=en&r=487391>.
- [48] N. Singh, G. Torfs, J. Van Kerrebrouck, C. Caillaud, P. Demeester, and X. Yin, “60 GHz Resonant Photoreceiver With an Integrated SiGe HBT Amplifier for Low Cost Analog Radio-Over-Fiber Links,” *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 16, pp. 5307–5313, Jul. 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3095522.
- [49] G. Roelkens *et al.*, “36 Gb/s Narrowband Photoreceiver for mmWave Analog Radio-Over-Fiber,” *J. Light. Technol. Vol. 38, Issue 12, pp. 3289-3295*, vol. 38, no. 12, pp. 3289–3295, Jun. 2020, doi: 10.1364/JLT.38.003289.
- [50] “Macro remote radio unit integrated circuits and reference designs. RRU IF Sampling.” <https://www.ti.com/solution/macro-remote-radio-unit-rru?variantid=25641&subsystemid=25664> (accessed Jul. 11, 2021).
- [51] “Macro remote radio unit integrated circuits and reference designs. RRU RF Sampling.” <https://www.ti.com/solution/macro-remote-radio-unit-rru?variantid=25365&subsystemid=25367> (accessed Jul. 11, 2021).
- [52] “Applications - 5G / LTE Radios | Microsemi.” <https://www.microsemi.com/applications/5g-mobile-infrastructure/5g-lte-radios> (accessed Jul. 11, 2021).
- [53] Xilinx and Inc, “Managing Power and Performance with the Zynq UltraScale+ MPSoC (WP482),” 2016. Accessed: Sep. 20, 2021. [Online]. Available: [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com).
- [54] “OMAP-L138 Power Consumption Summary Application Report OMAP-L138 Power Consumption Summary,” 2019. Accessed: Sep. 20, 2021. [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/an/sprabg0/sprabg0.pdf?ts=1632154545739&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOMAP-L138](https://www.ti.com/lit/an/sprabg0/sprabg0.pdf?ts=1632154545739&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOMAP-L138).
- [55] “AM572x Power Consumption Summary,” 2017. Accessed: Sep. 20, 2021. [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/an/sprac79/sprac79.pdf?ts=1632155644880&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/sprac79/sprac79.pdf?ts=1632155644880&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F).
- [56] “Standards & Documents Search | JEDEC.” [https://www.jedec.org/document\\_search?search\\_api\\_views\\_fulltext=jesd204](https://www.jedec.org/document_search?search_api_views_fulltext=jesd204) (accessed Jul. 11, 2021).
- [57] D. Mcnamara, “FPGA vs ASIC: 5G changes the equation.” Accessed: Jul. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.xilinx.com/publications/reports/mobile-experts-market-report.pdf>.
- [58] “Zynq UltraScale+ RFSoc.” <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/rfsoc.html#advantage> (accessed

- Jul. 13, 2021).
- [59] “User’s Guide: MSP430x5xx and MSP430x6xx Family User’s Guide,” Jun. 2008. Accessed: Sep. 09, 2021. [Online]. Available: [www.ti.com](http://www.ti.com).
- [60] “MSP430 Ultra-Low-Power Microcontrollers—The Solution for Battery-Powered Measurement,” 2001.
- [61] “MSP430F563x Mixed-Signal Microcontrollers,” 2021. Accessed: Sep. 10, 2021. [Online]. Available: [www.ti.com](http://www.ti.com).
- [62] Adam Dunkels, “Protothreads - Lightweight, Stackless Threads in C.” <http://dunkels.com/adam/pt/> (accessed Sep. 10, 2021).
- [63] A. Devices, “LTC3119 - 18V, 5A Synchronous Buck-Boost DC/DC Converter.” Accessed: Sep. 13, 2021. [Online]. Available: <http://www.linear.com/tapeandreel/>.
- [64] “SPV1040: High efficiency solar battery charger with embedded MPPT.” Accessed: Sep. 13, 2021. [Online]. Available: [www.st.com](http://www.st.com).
- [65] “LTC4419: 18V Dual Input Micropower PowerPath Prioritizer.” Accessed: Sep. 13, 2021. [Online]. Available: <http://www.linear.com/tapeandreel/>.
- [66] “ OPA336 series microPower CMOS.” Accessed: Sep. 15, 2021. [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa4336.pdf?ts=1631666289607&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPA4336](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa4336.pdf?ts=1631666289607&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPA4336).
- [67] “LV370x Family of Nanopower, Push-Pull Output Comparators.” Accessed: Sep. 15, 2021. [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv3702.pdf?ts=1631668179052&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTLV3702](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv3702.pdf?ts=1631668179052&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTLV3702).
- [68] J. D. Lopez-Cardona, P. C. Lallana, R. Altuna, A. Fresno, X. Barreiro, and C. Vazquez, “Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with Sleep Modes,” *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 24, pp. 7948–7955, 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3078848.
- [69] “Thorlabs - FG200UCC 0.22 NA, Ø200 µm Core Multimode Optical Fiber, High-OH for 250 - 1200 nm, TECS Double Clad.” <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FG200UCC> (accessed Aug. 21, 2021).
- [70] H. Helmers, C. Armbruster, M. Von Ravenstein, D. Derix, and C. Schoner, “6-W Optical Power Link with Integrated Optical Data Transmission,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 8, pp. 7904–7909, Aug. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2967475.



# Capítulo 5

## Impacto de los parámetros de la fibra óptica en redes 5G con alimentación por luz

Resumen:

En este capítulo se aborda el impacto de los principales parámetros de la fibra óptica en la transmisión de los datos en un escenario 5G, como consecuencia de la transmisión de energía en un escenario compartido. Para el análisis se llevan a cabo diferentes experimentos de laboratorio y simulaciones en un escenario ARoF operando en bandas milimétricas, con portadoras de RF inferiores a 20 GHz. Adicionalmente se analiza la influencia del efecto Kerr y el fenómeno no lineal SRS en el comportamiento de la frecuencia crítica del sistema y la aparición del fenómeno de *power fading*. Finalmente se analiza el efecto del RIN del láser HPL y los efectos del ruido acoplado en el canal de datos a través del fenómeno SRS. En todos los casos se usa el EVM como métrica para la caracterización de los sistemas.

## 5.1 Dispersión cromática en sistemas de radio sobre fibra

La dispersión cromática ( $D$ , [ps/nm/km]) es un parámetro que limita a los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica y causa distorsiones tanto en transmisiones digitales como analógicas. Cuando se considera una transmisión por fibra que implique alguna modulación digital, el mecanismo de la dispersión provoca un ensanchamiento del pulso transmitido ( $\tau$ , [ps]), véase la Ec. 5.1 teniendo mayor impacto conforme aumenta el ancho de línea de la fuente ( $\Delta\lambda$ , [nm,]) y la longitud del enlace ( $L$ , [km]).

$$\tau = D \Delta\lambda L \quad \text{Ec. 5.1}$$

Esta distorsión temporal del pulso es a causa de las diferencias en las velocidades de propagación entre las diferentes componentes espectrales contenidas en  $\Delta\lambda$ . En cambio, en las transmisiones analógicas la dispersión cromática se manifiesta como una distorsión de la fase de la señal transmitida. Este efecto es crítico en presencia de esquemas de modulación que generan doble banda lateral (ODSB, *Optical Double-Sideband*) [1]. La Figura 5.1, muestra un esquema de generación a partir de la modulación externa de un láser con un modulador tipo Mach-Zehnder. Los tonos o bandas son como consecuencia de la modulación del MZM con la portadora de RF; la distancia entre ambas es mayor cuando el sistema opera en bandas milimétricas. En este escenario las velocidades de propagación de ambas bandas son diferentes.

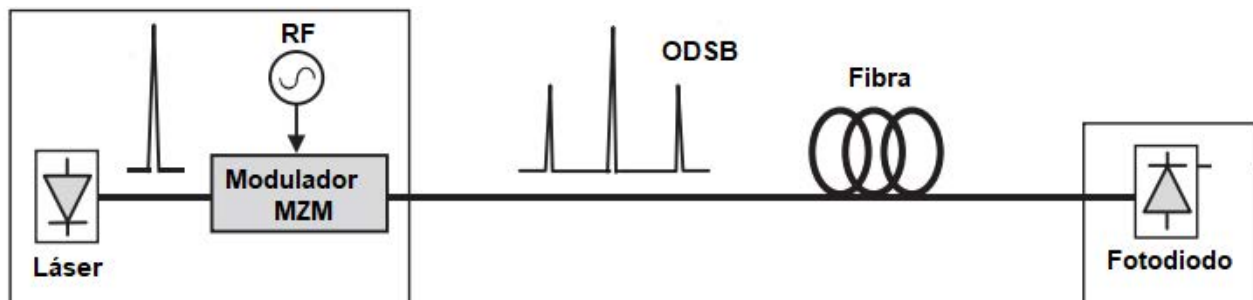


Figura 5.1. Esquema de modulación externa para la generación de *Optical double-sideband* (ODSB), con un modulador de intensidad de tipo Mach-Zehnder [2].



Esta asimetría aumenta la diferencia de fase a lo largo de la propagación y como resultado de este mecanismo, en función de la distancia recorrida por la fibra óptica, ambas bandas pueden encontrarse en una condición de interferencia destructiva o constructiva en el momento de la detección en el fotodiodo. Producto de este mecanismo ocurre lo que en la literatura se conoce como *power fading* y es uno de los factores que limita los sistemas ARoF. En [2] se presentan algunas técnicas para compensar este efecto.

Este fenómeno tiene gran impacto en la tecnología 5G debido a las distancias y a las frecuencias de modulación utilizadas en el *fronthaul* óptico. Típicamente se caracteriza a partir de la relación en decibelios portadora-ruido (C/N, por sus siglas en inglés), obtenido a partir de modelar a la fibra como un filtro paso bajo. Así, su respuesta en frecuencia está determinada por la ecuación [3]:

$$H(f) = \exp^{-j\alpha f^2} \quad \text{Ec. 5.2}$$

donde

$$\alpha = \pi D \frac{\lambda^2}{c} L,$$

$f$  es la frecuencia de la portadora de RF,  $D$  es la dispersión cromática,  $L$  es la longitud de la fibra,  $c$  la velocidad de la luz en el vacío y  $\lambda$  la longitud de onda. La penalización (C/N) que sufre la señal recuperada en el fotodiodo puede calcularse a partir de la Ec. 5.3; teniendo en cuenta la señal eléctrica reciba con  $(X_{out}(f)_{fibra})$  y sin fibra  $(X_{out}(f)_{no-fibra})$ [3].

$$P_{C/N} = 10 \log \left| \frac{X_{out}(f)_{no-fibra}}{X_{out}(f)_{fibra}} \right|^2 \quad \text{Ec. 5.3}$$

El *power fading* como se comentó anteriormente es un factor limitante en el uso de ARoF en el contexto de la tecnología 5G, por lo que es importante su comprensión para lograr una efectiva integración de los sistemas PoF en un escenario ARoF. Para este propósito se utiliza la herramienta Virtual Photonic Instrumentation (VPI Photonics<sup>TM</sup>), con la cual se simulan una serie de escenarios centrados fundamentalmente en las bandas milimétricas sub-30 GHz y en distancias de enlaces de fibra menores a ~25 km. Para llevar a cabo las simulaciones se hacen la siguientes consideraciones: (i) inicialmente no se tienen en cuenta los fenómenos no lineales, (ii) no se considera la dependencia de la dispersión con la polarización (PMD, por sus siglas en inglés), despreciable hasta 40 km (PMD<0,1/√km), (iii) la fibra que

se utiliza es la SMF-28 estándar, (iv) la dispersión cromática que por defecto se configura en la herramienta es de 17 ps/nm/km, (v) la longitud de onda del láser es de 1552 nm, (vi) la responsividad del fotodiodo en lado receptor es de 0,71 A/W, (vii) la resolución espectral utilizada en los análisis es de 50 MHz, (viii) se considera una atenuación de 0,2 dB/km y (ix) las longitudes empleadas en el análisis son: 6,51 km, 10,86 km, 14,34 km y 25,20 km. Estas longitudes en concreto son objeto de análisis ya que serán utilizadas posteriormente en las pruebas experimentales que serán discutidas en apartados posteriores.

Para llevar a cabo las simulaciones se implementa en la herramienta VPI el esquema mostrado en la Figura 5.2, donde se observan los diferentes elementos utilizados en la simulación: láser de datos configurado a una longitud de onda de emisión de 1552 nm (CW), el generador de portadora de RF sinusoidal (*FuncSineEl*), modulador de amplitud ideal, fibra óptica (*Universal*), fotodiodo receptor, medidor de potencia (*PowerMeterEl*) y objeto visualizador (*1D*). En los análisis que se llevan a cabo a continuación, se modifican los siguientes parámetros: dispersión cromática de la fibra (por defecto es 17 ps/nm/km), la longitud de la fibra y la frecuencia de la portadora de RF.

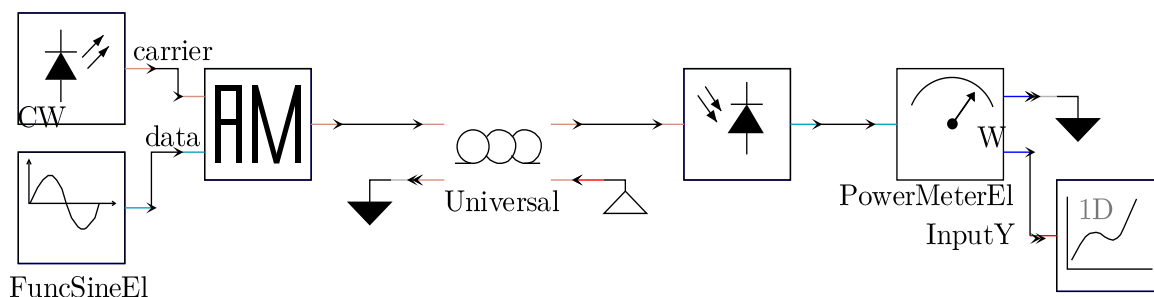


Figura 5.2. Esquemático implementado en la herramienta VPI para determinar las frecuencias críticas.

El objetivo del primer estudio es obtener la respuesta del sistema en función de la portadora de RF generada por el generador *FuncSineEl*. Para ello se lleva a cabo un barrido en frecuencia de la portadora de RF para todas las longitudes de fibra óptica. Como resultado se obtiene un comportamiento de filtro pasa bajo periódico con valores mínimos en determinados valores de frecuencias (*notch* periódicos), véase la Figura 5.3.

Estos valores de frecuencias son conocidos en la literatura como frecuencias críticas ( $f_{crítica}$ ) o de máxima extinción, por corresponderse con el mínimo del parámetro  $P_C/N$ . Este valor disminuye al aumentar la distancia, limitando las portadoras de RF a ciertas zonas del espectro. Para los casos simulados se obtiene que el valor correspondiente al primer *notch* para cada longitud son: 23,80 GHz, 18,45 GHz, 16 GHz y 12,10 GHz. Este punto de máxima extinción se obtiene justo cuando el desfase relativo de ambas bandas respecto a la portadora óptica es de  $\frac{\pi}{2}$  o lo que es lo mismo la diferencia absoluta entre ambas es igual a  $\pi$ . Dicho esto, si igualamos la fase a  $\frac{\pi}{2}$ , en la Ec. 5.2 se obtiene que la  $f_{crítica}$  se calcula a partir de la ecuación Ec. 5.4 [3].

$$f_{crítica} = \sqrt{\frac{c}{2D\lambda^2 L}} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Si consideramos las distancias representadas en la Figura 5.3, una longitud de onda de 1552 nm, la dispersión típica de una fibra SMF y aplicando la Ec. 5.4, se obtiene que las frecuencias críticas teóricas para las longitudes de fibras representadas son aproximadamente 23,72 GHz, 18,37 GHz, 15,98 GHz y 12,06 GHz respectivamente, la cuales son muy cercanas a los valores simulados en la herramienta VPI.

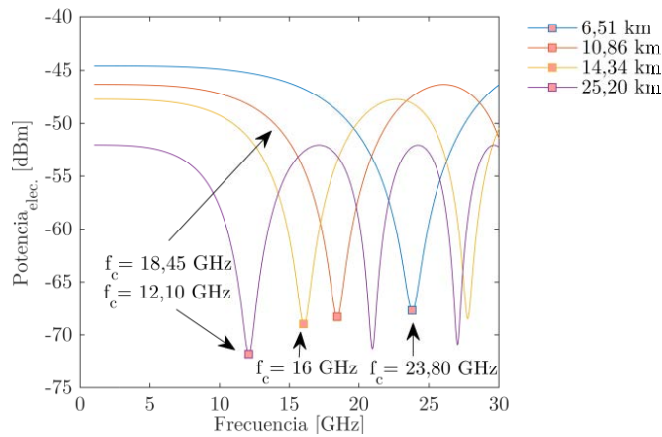


Figura 5.3. Frecuencias críticas para diferentes longitudes de fibras ópticas tipo SMF-28, sin considerar los efectos no lineales.

Adicionalmente se observa en la Ec. 5.4 la relación inversa entre la frecuencia crítica y la dispersión cromática de la fibra óptica; un aumento en la dispersión causa que la frecuencia disminuya. Para

ejemplificar este comportamiento se ha simulado para las longitudes 10,86 km y 25,20 km el efecto que causa un incremento de la dispersión cromática. Los valores considerados en el estudio son: 13 ps/nm/km, 15 ps/nm/km, 17 ps/nm/km y 19 ps/nm/km. La Figura 5.4 muestra el resultado del análisis para la longitud de 10,86 km, donde se observa la disminución de la frecuencia conforme aumenta la dispersión cromática.

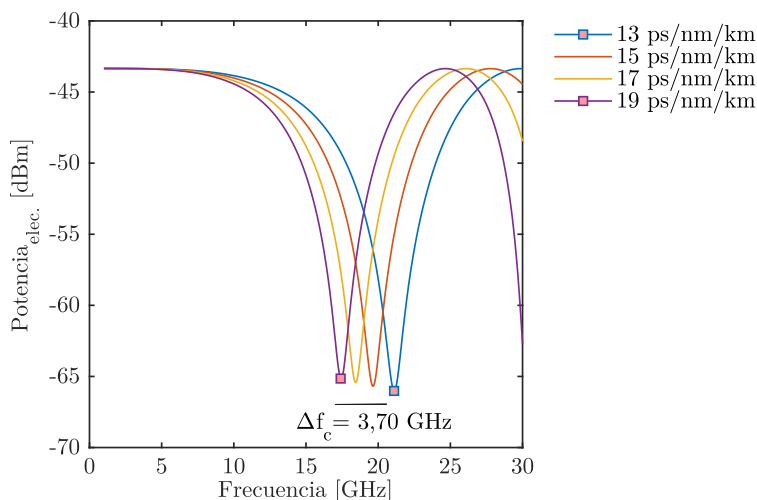


Figura 5.4. Comportamiento de la frecuencia crítica en función de la dispersión cromática en una longitud de 10,86 km.

Los valores obtenidos son 21,10 GHz y 17,41 GHz para 13 ps/nm/km y 19 ps/nm/km respectivamente, significando una variación ( $\Delta$ ) de 3,70 GHz en 6 ps/nm/km, o lo que es equivalente a decir que:  $\frac{\Delta D}{\Delta f} = -1,62$  ps/nm/km/GHz en ese intervalo. La Figura 5.5, muestra los resultados para el estudio en 25,20 km, el cual en términos de comportamiento es similar al caso anterior, salvo por la aparición de múltiples *notch* con cierta periodicidad en la banda sub-30 GHz. Esto reduce aún más el número de potadoras de RF que se pueden utilizar en el sistema ARoF sin penalizar la potencia que llega al receptor. Por otro lado, se observa una compresión del espectro, obteniéndose una variación de 2,40 GHz en el rango de dispersión estudiado,  $\frac{\Delta D}{\Delta f} = -2,50$  ps/nm/km/GHz. A partir del breve análisis anterior, se infiere la importancia que posee el parámetro de la dispersión cromática en los sistemas ARoF, ya que su comportamiento incide en la respuesta del sistema, llegando a deteriorar la potencia de RF que llega al receptor.

Por esta razón, cuando se implementa un sistema PoF es muy importante considerar todos los mecanismos o fenómenos que puedan inducir cambios en la fase y modifiquen la respuesta en frecuencia del sistema.

Algunos de los más relevantes vinculados a la tecnología PoF, además de la dispersión cromática son:

- los fenómenos no lineales asociados al efecto Kerr (SPM, XPM);
- el fenómeno no lineal SRS;
- las variaciones de temperatura en la fibra óptica.

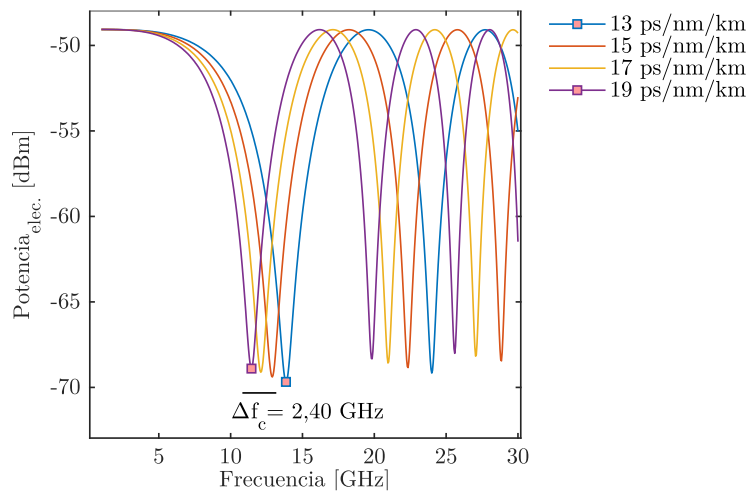


Figura 5.5. Comportamiento de la frecuencia crítica en función de la dispersión cromática en una longitud de 25,20 km.

## 5.2 Efecto Kerr en los sistemas PoF

El índice de refracción de una fibra óptica depende de la longitud de onda y de la intensidad de la onda. Este fenómeno de dependencia con la intensidad es conocido en la literatura como fenómeno Kerr y es la causa del FWM, SPM y XPM, enunciados en el capítulo 2.

El FWM es proceso de generación de una cuarta onda a partir de la combinación de tres fotones en condición de máxima potencia o en fase [4, p. 45]. Este efecto es despreciable en fibras con altos valores de dispersión cromática, como es el caso de la fibra SMF definida en el estándar ITU-G652 [4, p. 74].

El SPM es uno de los efectos más comunes y relevantes en los sistemas basados en fibra que reflejan la dependencia entre la intensidad y el índice de refracción. Esta dependencia se traduce en cambios de la fase de la señal en función de las variaciones de su potencia óptica ( $P$ ). Esto significa que la propia señal desencadena el proceso de auto-desfase [5, p. 243]. Este cambio de fase puede calcularse como:

$$\Phi_{NL} = \int_0^L \gamma P(z) dz = \gamma L_{eff} P \quad \text{Ec. 5.5}$$

donde

$$\gamma = \frac{2\pi n_{no\_lineal}}{\lambda A_{eff}} = \frac{\omega_c n_{no\_lineal}}{c A_{eff}}$$

$\omega_c$  es la frecuencia de la portadora óptica y  $n_{no\_lineal} = 2,2 \sim 3,4 \times 10^{-20} \frac{m^2}{W}$  [6]. Estas variaciones temporales provocan un ensanchamiento ( $\partial\omega$ ) del espectro alrededor de la portadora óptica  $\omega_c$  debido a la generación de nuevas componentes espectrales, el cual puede calcularse a partir de derivar la Ec. 5.5 con respecto al tiempo ( $t$ ) [4, p. 116].

$$\partial\omega = -\frac{\partial\Phi_{NL}}{\partial t} = -\gamma L_{eff} \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{Ec. 5.6}$$

Esta ecuación muestra la dependencia entre los cambios de la fase de la onda que se propaga y su potencia, de ahí la importancia de considerar y evaluar todos los mecanismos que ocasionan dichos cambios, como por ejemplo el SRS.

El XPM es similar al efecto del SPM pero involucra a más de una señal óptica. En el XPM los cambios en la intensidad de la señal resultan en cambios de la fase en un segundo canal, causando al igual que en el SPM, un ensanchamiento del espectro. Este efecto es crítico en los sistemas WDM y con un mayor impacto cuando la separación entre los canales es menor a 50 GHz [4, p. 42]. El cambio de fase ( $\Phi_{NL}$ ) que introduce el efecto del XPM se puede definir a partir de la siguiente ecuación [7]:

$$\Phi_{NL} = \gamma L_{eff} (|E_1|^2 + 2|E_2|^2) \quad \text{Ec. 5.7}$$

donde  $E_1$  y  $E_2$  son las envolventes del campo. Este efecto es despreciable en sistemas WDM con valores altos de dispersión y cuando el espaciado entre canales es grande [4, p. 74]. Por lo comentado anteriormente, los fenómenos SPM y SRS son los más relevantes, ya que el sistema PoF objeto de estudio: (i) está basado en fibras ópticas de tipo SMF-28 con altos valores en la dispersión cromática y (ii) la distancia entre el canal de datos y la longitud de onda es aproximadamente 72 nm. El impacto de ambos fenómenos se analiza usando la herramienta VPI para 25,20 km (siendo ésta la distancia más larga considerada). El objetivo fundamental es determinar el impacto del fenómeno SPM en la respuesta del sistema y evaluar en qué medida su comportamiento condiciona el valor del EVM. En la simulación se implementa un escenario compartido, ya que permite la interacción de ambas longitudes de ondas durante la propagación, véase la Figura 5.6. En esta simulación debido a que se desea asociar la respuesta del sistema con el comportamiento del EVM, se utilizan dos bloques OFDM: OFDM-rx y OFDM-tx; a este último se le adiciona una tensión de *bias* para excitar correctamente al modulador. Adicionalmente se configuran, entre otros parámetros, la portadora de RF y la modulación deseada, la cual es demodulada por el OFDM-rx para determinar el valor estimado del EVM. En la simulación se lleva a cabo un barrido discreto en la potencia del láser de datos: -3 dBm, 0 dBm y 3 dBm. Para cada uno de los valores configurados se varía la frecuencia de la portadora de RF desde 1 GHz hasta 20 GHz con una resolución de 50 MHz. En la simulación el efecto XPM está activo. En la Figura 5.7(a) se observa el desplazamiento de la frecuencia crítica cuando se aumenta la potencia de la portadora óptica como consecuencia del efecto SPM. Este aumento en la potencia puede provocar el efecto de amplificación Raman por lo que es un punto muy importante para considerar en los sistemas PoF, debido a que los altos niveles de potencia transmitidos y las distancias empleadas en algunos escenarios favorece la aparición del fenómeno SRS.

Por otro lado, se observa la correlación entre comportamiento del EVM y la frecuencia crítica. El punto de mayor degradación del EVM coincide justo con el valor de la frecuencia crítica, la véase la Figura 5.7 (b). En la curva representada en la simulación del comportamiento del EVM, sólo se ha simulado para una potencia de los datos de 0 dBm. Ambos comportamientos se corroboran en la práctica a través de un experimento de laboratorio que se muestra en los epígrafes posteriores.

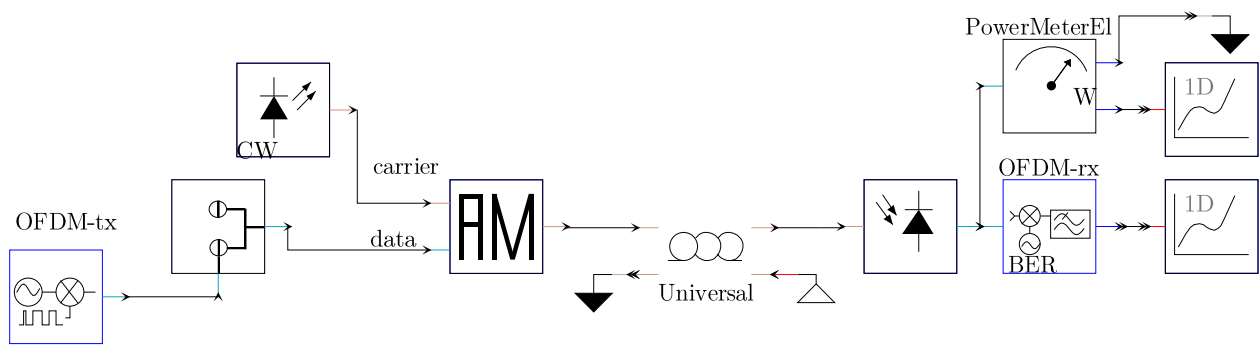


Figura 5.6. Esquemático utilizado en la herramienta VPI para evaluar el impacto del efecto SPM en el comportamiento del EVM.

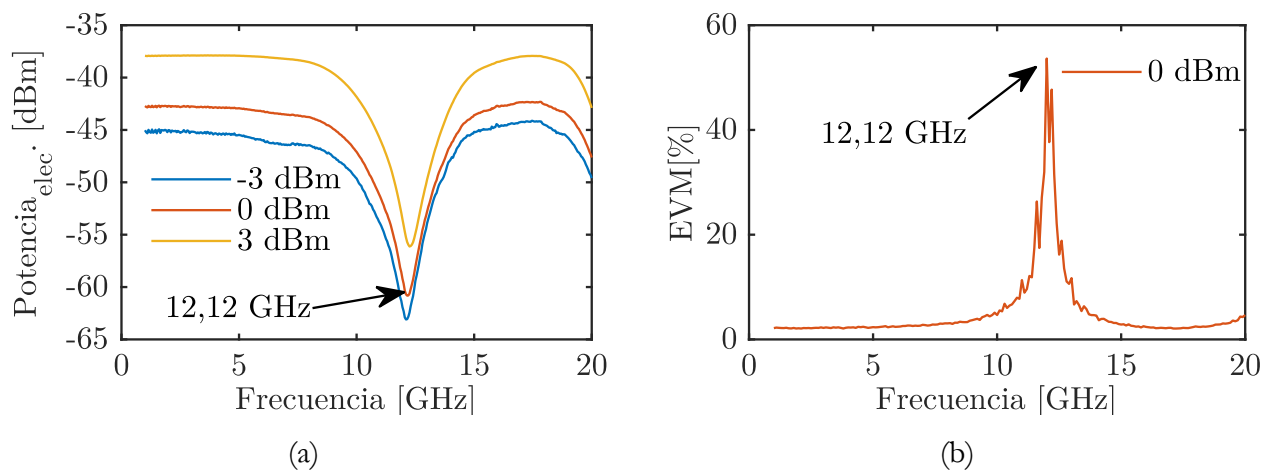


Figura 5.7. Efecto del SPM en la respuesta del sistema (a) desplazamiento de la frecuencia crítica a causa del SPM; (b) máximo deterioro del EVM en el punto de la frecuencia crítica. La modulación utilizada en ambos casos es QPSK.

### 5.3 Efecto de la temperatura en la dispersión cromática

Otro fenómeno a considerar es el efecto de la temperatura en el valor de la dispersión cromática ( $D$ ). Para ello se analiza la dependencia con la temperatura de la longitud de onda de dispersión cero ( $\lambda_0$ ) y la pendiente de la dispersión ( $S_0$ ) [8]; pues la dispersión cromática depende de ambos términos.



De forma específica para la SMF, definida en ITU-T G.652, por ejemplo SMF-28 y SMF-28e, en el rango de longitudes de onda  $1200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1600 \text{ nm}$ , se cumple:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \quad \text{Ec. 5.8}$$

En ambos casos el parámetro  $\lambda_0$  cambia linealmente en un factor  $0,025 \text{ nm}/^\circ\text{C}$   $\left(\frac{\partial \lambda_0}{\partial T}\right)$  [8][9][10] y el término  $S_0$ , en  $-2,46 \times 10^{-6} \text{ ps}/\text{nm}^2/\text{km}/^\circ\text{C}$   $\left(\frac{\partial S_0}{\partial T}\right)$ . A partir de las especificaciones del fabricante Corning sabemos que  $\lambda_0$  tiene un valor de 1313 nm para ambos tipos de fibras, mientras que la pendiente de la dispersión cromática es 0,092 ps/nm<sup>2</sup>/km en la SMF-28 y 0,086 ps/nm<sup>2</sup>/km en la fibra SMF-28e (medidas a 23°C) [11] [12]. En los epígrafes que siguen la fibra que se utiliza es la SMF-28 por lo que para este caso se determina la dependencia de  $\lambda_0$  y  $S_0$  en función de la temperatura ( $T$ ). Esta relación viene dada por las ecuaciones lineales Ec. 5.9 y Ec. 5.10 respectivamente [13].

$$\lambda_0(T) = 0,025T + 1312,43 \quad \text{Ec. 5.9}$$

$$S_0(T) = -2,46 \times 10^{-6} T + 0,092 \quad \text{Ec. 5.10}$$

Sustituyendo ambas expresiones en la Ec. 5.8 se obtiene la Ec. 5.11 que relaciona la dependencia de la dispersión cromática con la temperatura y la longitud de onda y que viene dada por:

$$D(\lambda, T) = \frac{2,46 \times 10^{-6} T + 0,092}{4} \left( \lambda - \frac{(0,025T + 1312,43)^4}{\lambda^3} \right) \quad \text{Ec. 5.11}$$

La Figura 5.8 muestra el comportamiento de la dispersión en función de la temperatura en el rango de 1530 nm a 1552 nm. Se observa que a una longitud de onda de 1552 nm y a una temperatura ambiente de 25 °C, el valor de la dispersión cromática es de  $\sim 17 \text{ ps}/\text{nm}/\text{km}$ .

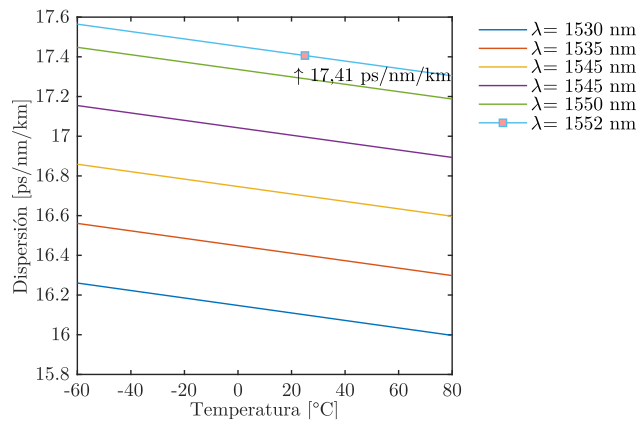


Figura 5.8. Dependencia de la dispersión cromática con la temperatura en la fibra SMF-28 para diferentes longitudes de onda.

Finalmente se pueden calcular los cambios que induce la dispersión en la frecuencia crítica a causa de los cambios en la temperatura de la fibra óptica ( $\frac{\partial f_c}{\partial T}$ ). Esta variación se calcula considerando la Ec. 5.12 y determinando a partir de las expresiones obtenidas en secciones previas los términos  $\frac{\partial D}{\partial T}$  y  $\frac{\partial f_c}{\partial D}$  según se muestra a continuación:

$$\frac{\partial f_c}{\partial T} = \frac{\partial f_c}{\partial D} \times \frac{\partial D}{\partial T} \quad \text{Ec. 5.12}$$

donde  $\frac{\partial f_c}{\partial D}$  representa la variación de la frecuencia crítica debido a los cambios en la dispersión cromática y  $\frac{\partial D}{\partial T}$  es su dependencia con la temperatura. Aplicando la definición de derivada a las ecuaciones Ec. 5.4 y Ec. 5.11, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial f_c}{\partial D} = -\frac{f_c}{2D} \quad \text{Ec. 5.13}$$

$$\frac{\partial D}{\partial T} = \frac{\partial S_0}{\partial T} \left( \lambda - \frac{\lambda_0(T)^4}{\lambda^3} \right) - \frac{\partial \lambda_0}{\partial T} \left( S_0(T) \left( \frac{\lambda_0(T)}{\lambda} \right)^3 \right) \quad \text{Ec. 5.14}$$

Aplicando la ecuación Ec. 5.12 y considerando diferentes casos de estudios (CEx), se calcula el parámetro  $\frac{\partial f_c}{\partial T}$ . Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5.1. De este estudio se concluye que si se requieren precisiones del orden de cientos de kHz en la medida de la frecuencia crítica, se debe conocer la temperatura a la que se desarrollan los experimentos y controlar la misma llegado el caso.

Tabla 5.1. Variación de la frecuencia crítica en función de la temperatura para diferentes longitudes de fibra óptica de tipo SMF-28.

Parámetro	CE1	CE2	CE3	CE4
Longitud de onda [nm]	1552	1552	1552	1552
Temperatura [°C]	25	25	25	25
Dispersión [ps/nm/km]	~17	~17	~17	~17
Longitud de la fibra [km]	6,51	10,86	14,34	25,20
Frecuencia crítica [GHz]	23,72	18,37	15,98	12,10
$-\frac{\partial f_c}{\partial T}$ [kHz/°C]	~584	~452	~393	~298

## 5.4 Validación experimental

### 5.4.1 Descripción del montaje experimental

A continuación, se llevan a cabo un conjunto de pruebas experimentales que tienen como objetivos verificar y evaluar los fenómenos discutidos teóricamente en las secciones previas. La temperatura a la que se desarrollan los experimentos es de 25°C.

El escenario objeto de análisis es el escenario compartido, por considerarse el más limitante desde el punto de vista de la transmisión de señales ARoF. En este estudio se evalúa el impacto del efecto Kerr, la ganancia Raman y la influencia del RIN del láser HPL sobre la señal de datos, utilizando como figura de mérito el valor del EVM. El rango de frecuencia utilizado está comprendido entre 10 GHz y 20 GHz, el cual está limitado a las especificaciones de la instrumentación del laboratorio. Las fibras ópticas empleadas son de tipo SMF-28 estándar del fabricante Corning, y sus longitudes son de 6,51 km, 10,86 km, 14,34 km y 25,20 km, medidas con un OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*). Para identificar a cada uno de los

estudios se ha utilizado la notación  $E_x$ , donde el subíndice denota el identificador del estudio que se lleva a cabo, ejemplo:  $E_1$ .

El montaje del experimento está integrado por un conjunto de elementos que para una mejor comprensión del mismo serán agrupados usando la terminología empleada en la tecnología 5G: CO, *fronthaul* y RRH, véase la Figura 5.9.

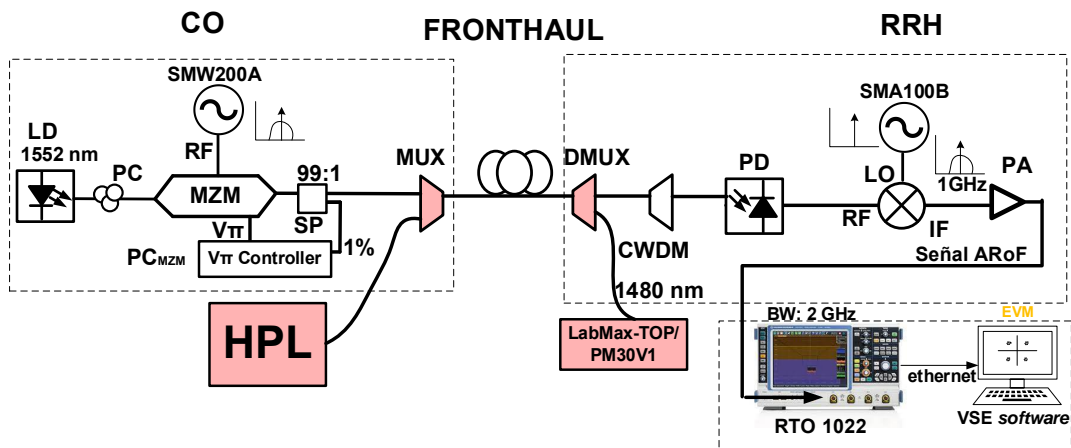


Figura 5.9. Esquema del sistema ARoF y PoF en un escenario compartido.

En la CO está ubicada la fuente láser (LD), el elemento para ajustar la polarización (“*polarization controller*” PC), el modulador de amplitud tipo Mach-Zehnder (MZM), el generador vectorial SMW200A (abreviadamente SMW), el controlador del punto de operación del MZM ( $PC_{MZM}$ ), el divisor de haz (SP, 99:1), el láser de potencia HPL y un multiplexor (MUX).

La potencia configurada en el LD es de 6 dBm con una longitud de onda de 1552 nm y la inyección óptima en el MZM se controla usando el elemento PC. El elemento  $PC_{MZM}$  está configurado para mantener al MZM operando en el punto de cuadratura, reduciendo las inestabilidades a causa de los cambios en la temperatura. El divisor de haz realimenta la salida del MZM para permitir un control dinámico de su potencia óptica de salida. La rama del 99 % está conectada al MUX y posee una potencia óptica promedio en su salida de -3,56 dBm. El generador SMW está configurado para generar una modulación QPSK, tramas tipo FR1, FDD, con un ancho de banda de 5 MHz y con un espaciado de 15 kHz entre las subportadoras de la señal OFDM(FR1-TM1-1\_FDD\_5MHz\_15kHz). La portadora de RF se configura en

el rango de 10 GHz a 20 GHz en función del caso de estudio. La potencia de RF configurada es de 10 dBm, la cual se encuentra en el rango de operación del MZM, lo cual evita las no linealidades. El láser HPL es el transmisor de energía del sistema PoF y opera en el rango de 25 dBm a 33 dBm. Finalmente se utiliza el MUX (2x2-1480/1550/*grade-P*) para implementar el escenario compartido, el cual tiene 0,35 dB de pérdidas de inserción a una longitud de onda de 1552 nm y a 1480 nm de 0,3 dB. El primer valor es una medida experimental y el segundo puede consultarse en [14]. Para implementar el *fronthaul* se emplean 3 longitudes de fibra tipo SMF-28 con unas pérdidas típicas de 0,2 dB/km. Las longitudes que se utilizan varían en función del caso de estudio. En el lado de la RRH están ubicados el demultiplexor (DMUX), el medidor de potencia a la longitud de onda de 1480 nm, el filtro CWDM, el fotodiodo de RF, el mezclador (MIX), el generador de RF SMB100A (abreviadamente SMB), el amplificador de RF (PA) y el osciloscopio RTO1022 (abreviadamente RTO), un ordenador y un analizador de señal por *software* (VSE). El DMUX se emplea para separar las longitudes de onda 1552 nm y 1480 nm y posee las mismas características que el MUX. Para medir la potencia recibida a 1480 nm se utiliza el medidor LabMax-TOP combinado con el sensor PM30V1 [15][16]. Este sensor realiza la medición sin acoplo directo y las pérdidas asociadas al proceso de medición son dependientes de la distancia entre el punto emisor de la potencia y el área activa del sensor. En este experimento las pérdidas de inserción introducidas por la interfaz al sistema de medición son de 1,16 dB. El CWDM es un segunda etapa de filtrado aplicada a la señal de datos del DMUX que adiciona 30 dB de rechazo a la componente residual de 1480 nm. Los elementos en cascada MUX y CWDM poseen unas pérdidas de inserción a la longitud de onda de 1552 de 1,49 dB (valor experimental). El fotodiodo se utiliza para la recepción directa de la señal ARoF proveniente de la CO. El mismo tiene un ancho de banda de 23,5 GHz a -3 dB y una responsividad de 0,71 A/W. El generador de señales SMB junto con el MIX se utilizan para hacer un *down-conversion* heterodino antes de llevar a cabo el análisis de la señal recibida en la RRH. La portadora de RF que se configura en el SMW y la frecuencia del oscilador local SMB son elegidas convenientemente de modo que la salida de la frecuencia intermedia del MIX siempre sea igual 1 GHz. Esto se debe a que el osciloscopio empleado en la adquisición tiene un ancho de banda de 2 GHz. La potencia de RF configurada en el generador SMB es de 10 dBm, la cual es mayor que la mínima requerida por el MIX para evitar no linealidades y es menor al valor máximo (13,5 dBm). El amplificador de potencia introduce una ganancia de 20 dB a 1 GHz para compensar las pérdidas del sistema y mejorar la adquisición y procesamiento de la señal en el RTO y en el *software* VSE,



Tabla 5.2. Descripción de las funcionalidades de los *scripts* implementados en Matlab.

Nombre del <i>script</i>	SMW	SMB	HPL	VSE	RTO	Experimentos
<i>freqScript</i>	✓	✓	✓	✓	✗	Respuesta del sistema (E <sub>1</sub> ) Evaluación del EVM (E <sub>2</sub> )
<i>potScript</i>	✓	✓	✓	✓	✗	Acoplamiento del ruido del HPL al canal de datos (E <sub>3</sub> )
<i>srsScript</i>	✗	✗	✓	✗	✓	Perfil de ganancia del sistema (E <sub>1</sub> )
<i>rScript</i>	✗	✗	✓	✗	✓	Caracterización del ruido del láser HPL (E <sub>3</sub> )

✗ El instrumento no es controlado por el *script*

✓ El instrumento es controlado por el *script*

### Barrido en potencia o *potScript*

Realiza barridos en la potencia de emisión del HPL desde 25 dBm hasta 33 dBm con una resolución de 0,1 dB. Los barridos se llevan a cabo para cada una de las siguientes frecuencias: 10 GHz, 16 GHz y 20GHz. Adquiere y representa el valor del EVM, la potencia de RF y calcula la desviación estándar (STD). En cada punto del barrido se aplica al igual que en el caso anterior la función de filtrado *fFilter*.

### Análisis del fenómeno SRS o *srsScript*

Estando configurado el RTO en acoplamiento de continua, calcula la ganancia Raman del sistema en incrementos de 1 dB desde 25 dBm hasta 33 dBm. El osciloscopio se configura manualmente previo a la medición con la siguiente configuración: ventana de adquisición en 10 ms, la resolución en 200 mV/div, y la frecuencia de muestro a 1MSa/sec. El programa permite calcular y visualizar la distribución espectral del ruido basada en la FFT y el parámetro estadístico desviación estándar (STD).

### Análisis del ruido o *rScript*

Estando configurado el RTO en acoplamiento de alterna, calcula la STD y la FFT de los valores adquiridos en una ventana de tiempo de 20 $\mu$ s. Este procedimiento se lleva a cabo en el rango de potencia del HPL comprendido entre 25 dBm a 33 dBm con una resolución de 0,1 dB. El osciloscopio se configura manualmente previo a la medición con la siguiente configuración: la resolución en 10 mV/div,

la impedancia de entrada de  $50 \Omega$  y la frecuencia de muestro a 1 GSa/sec. Esta configuración permite analizar las componentes espectrales en el rango de frecuencia comprendido desde 50 kHz a 500 MHz.

### 5.4.2 Impacto de PoF en la respuesta en frecuencia de los ARoF

En el primer estudio ( $E_1$ ) se analiza el comportamiento de la respuesta del sistema ARoF cuando se aumenta el nivel de potencia enviada por el sistema PoF. Adicionalmente se determina el desplazamiento de la frecuencia crítica experimental ( $f_c^*$ ) y se calcula el valor de la dispersión efectiva ( $D^*$ ). Este valor de dispersión cromática se obtiene a partir de aplicar la ecuación usada para calcular la frecuencia crítica, discutida al inicio del capítulo, pero usando  $f_c^*$ . El valor de  $D^*$  refleja el impacto de los efectos no lineales en el sistema con respecto al caso en el que no estuvieran presentes.

Este análisis se lleva a cabo para todas las longitudes objeto de estudio: 6,51 km (caso A), 10,86 km (caso B), 14,34 km (caso C) y 25,20 km (caso D) y se utiliza el *script freqScript* configurado con una resolución en el barrido del HPL de 2 dB. La Figura 5.11 muestra la respuesta del sistema para todas las longitudes.

En todos los casos se observa el efecto de amplificación a causa del fenómeno SRS, el cual es notable a partir de potencias superiores a  $\sim 31$  dBm. En los casos B, C y D, la frecuencia crítica experimental se desplaza hacia la derecha al aumentar la potencia transmitida por el HPL y la longitud de la fibra. En el caso B el desplazamiento tiene un valor de  $\sim 50$  MHz, mientras que para 25,20 km alcanza  $\sim 250$  MHz. Este comportamiento es causado por el efecto combinado del fenómeno SRS y el efecto Kerr. En secciones anteriores se comprobó a través de simulaciones que un aumento de la potencia del láser de datos induce a un incremento de la frecuencia crítica y por tanto a una disminución de la dispersión efectiva ( $D^*$ ). En este escenario el incremento de la potencia en el canal de datos es a causa del fenómeno de amplificación SRS. En el caso A no se aprecia el valor de  $f_c^*$  ya que es superior a 20 GHz. Las frecuencias experimentales ( $f_c^*$ ) se muestran en la Tabla 5.3, a partir de las cuales se puede calcular la dispersión efectiva cuando el láser HPL está apagado y cuando está configurado a la máxima potencia.



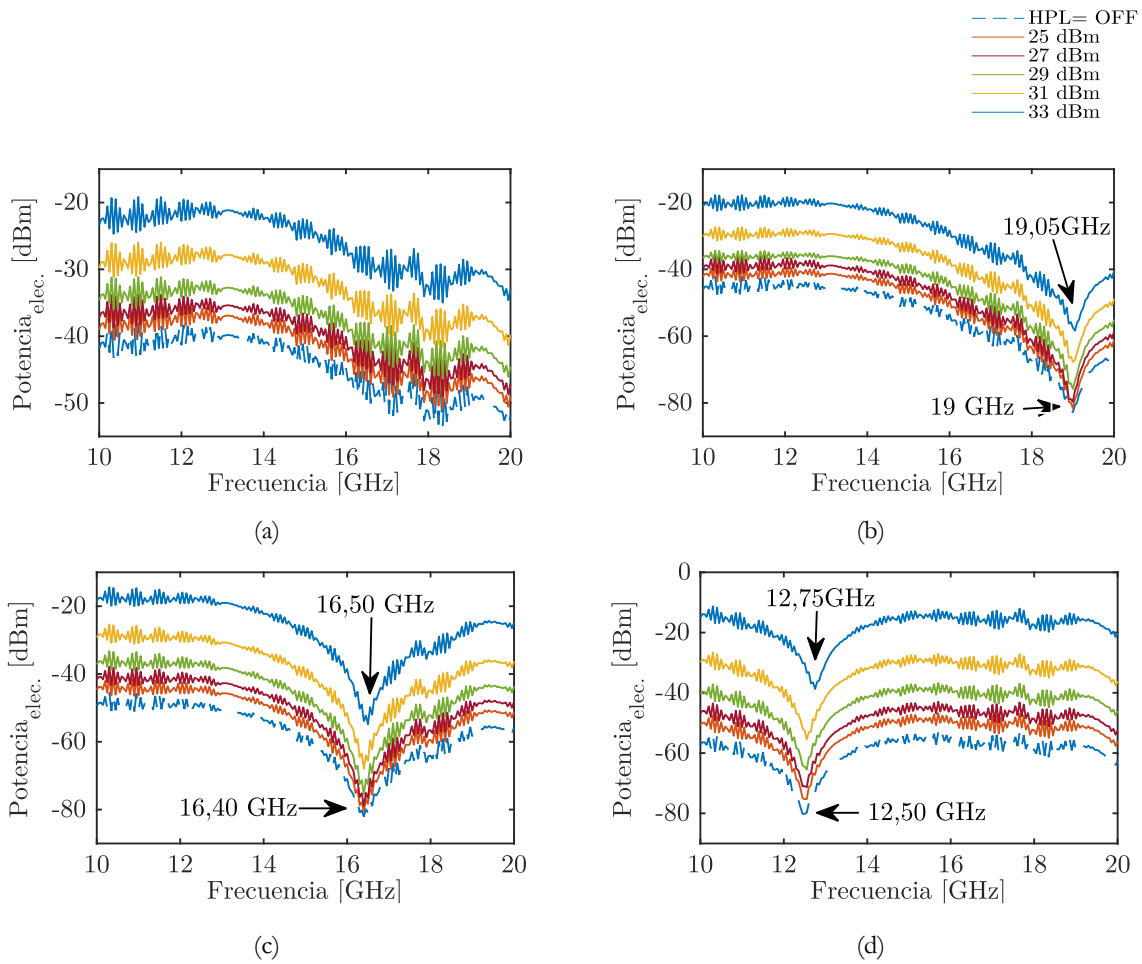


Figura 5.11. Respuesta en frecuencia del sistema en función de la potencia configurada en el láser HPL usando una modulación QPSK y para diferentes longitudes y: (a) 6,51 km; (b) 10,86 km; (c) 14,34 km; (d) 25,20 km.

Tabla 5.3. Comportamiento de la frecuencia crítica experimental y la dispersión efectiva en los diferentes casos de estudios.

Potencia [dBm]	Caso B		Caso C		Caso D	
	$f_c^*$ [GHz]	$D^*$ [ps/nm /km]	$f_c^*$ [GHz]	$D^*$ [ps/nm /km]	$f_c^*$ [GHz]	$D^*$ [ps/nm /km]
OFF	19	15,88	16,40	16,15	12,50	15,82
33	19,05	15,80	16,50	15,95	12,75	15,20

### 5.4.2.1 Modelado en la herramienta VPI de la respuesta del sistema

Adicionalmente, como parte de este estudio, se simula en la herramienta VPI la respuesta en frecuencia del caso D y la ganancia Raman para todas las longitudes. El modelo implementado se muestra en la Figura 5.12.

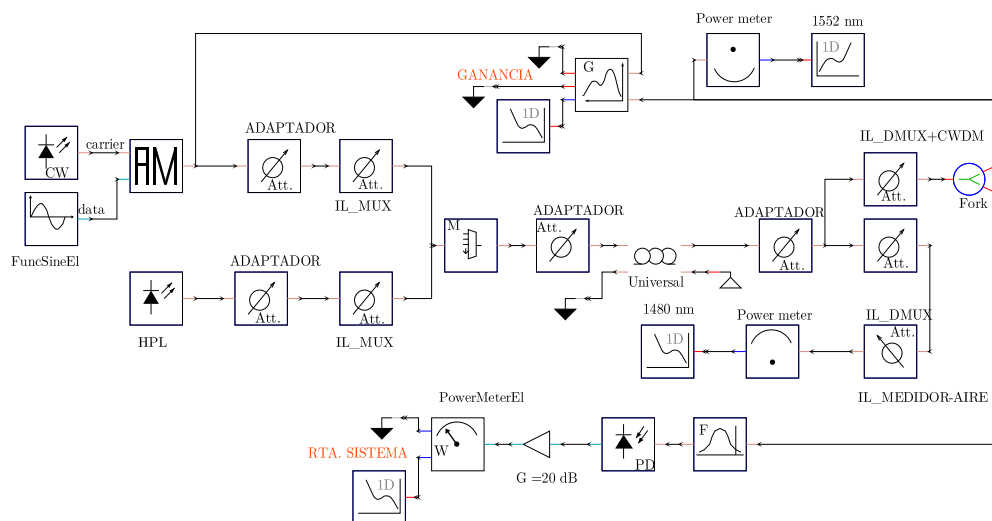


Figura 5.12. Esquema del modelado en la herramienta VPI del experimento de laboratorio.

Para el modelado se utilizan diferentes elementos ya usados en simulaciones previas y se añaden los bloques: HPL, multiplexor ideal (M), atenuadores (Att), cálculo de ganancia (G), filtro óptico (F), y *Fork*. Los parámetros para configurar cada bloque se corresponden con los parámetros experimentales descritos anteriormente.

El láser de potencia se simula con el bloque HPL. El bloque M permite multiplexar las longitudes de ondas de 1552 nm y 1480 nm (HPL). Las pérdidas de inserción de M se modelan con atenuadores (Att). Este último elemento también se utiliza para modelar las pérdidas de inserción de los diferentes adaptadores FC que se utilizan en el sistema real para interconectar los diferentes componentes ópticos. Las pérdidas de los dos caminos ópticos (1552 nm y 1480 nm) en el proceso de demultiplexación son modeladas de manera independientes en el lado receptor configurando en los bloques Att las pérdidas de inserción correspondientes. La separación de las dos longitudes de ondas ocurre internamente en los bloques P1552,

P1480, y G. Estos bloques permiten configurar a través de sus parámetros la longitud de onda de interés. El bloque *Fork* es un divisor virtual de los caminos, no implementa ninguna función real del experimento. La ganancia Raman del sistema es calculada por el bloque G.

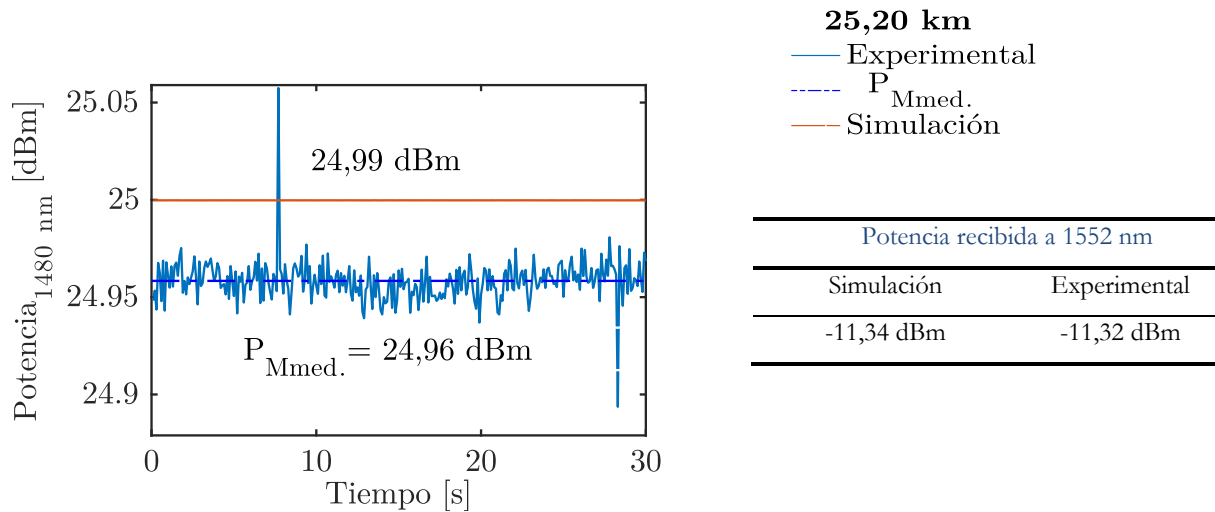


Figura 5.13. Valor promedio y experimental de la potencia máxima recibida en la RRH a 1480 nm y a 1552 nm, utilizando una longitud de fibra óptica de 25,20 km.

Antes de hacer los estudios en régimen no lineal a través de la activación de las características correspondientes en la herramienta se comprueba que el comportamiento del sistema en régimen lineal es equivalente al obtenido en el laboratorio. Para ello se comprueba que las pérdidas del sistema modelado se corresponden, etapa por etapa, a las pérdidas que se obtienen en el experimento. En la comprobación a la longitud de onda de 1480 nm se configura el láser HPL una potencia de emisión de 33 dBm y se hace un análisis temporal utilizando el medidor de potencia LabMax-TOP. La potencia que se considera es el promedio ( $P_{Mmed.}$ ) en un intervalo de tiempo de 30 segundos. La medida a la longitud de onda de 1552 nm se realiza con un medidor de potencia estándar. En ambos análisis se emplea una longitud de fibra óptica de 25,20 km. La Figura 5.13 muestra los resultados finales para ambas longitudes de ondas. El error a la longitud de onda de 1552 nm es de 0,01 dB y para 1480 nm es de 0,03 dB, por lo que se considera que ambos sistemas (simulado y experimental) se comportan de manera idéntica en régimen lineal.

Una vez verificado el comportamiento en régimen lineal se procede a activar en la herramienta las funciones que permiten modelar las no linealidades que están presente en la fibra óptica (SRS, SPM, XPM). Los parámetros configurados en la simulación son los mismos que se utilizan en secciones previas. Para obtener la respuesta en frecuencia del sistema se configura en el bloque *FuncSineEl* un barrido en frecuencia desde 10 GHz hasta 20 GHz. Este barrido se realiza para la potencia del HPL comprendida entre 25 dBm a 33 dBm con una resolución de 2 dB. El barrido en la simulación es equivalente al implementado por el *script freqScript* de las pruebas experimentales. La Figura 5.14, muestra los resultados de la simulación y se aprecia un comportamiento cercano a los resultados experimentales.

El valor de  $f_c^*$  estando el láser HPL apagado es de 12,12 GHz, muy próximo al valor experimental de 12,50 GHz; mientras que para 33 dBm es de 12,35 GHz. Esto significa un desplazamiento de 230 MHz en la simulación, a diferencia del valor experimental de 250 MHz; es decir un error absoluto de 20 MHz y un error relativo del 3,14 % ( $\frac{12,5-12,12}{12,5}$ ). Estas diferencias se encuentran dentro del margen de error que introduce la resolución espectral de 50 MHz, con la que se llevaron a cabo tanto los experimentos como las simulaciones.

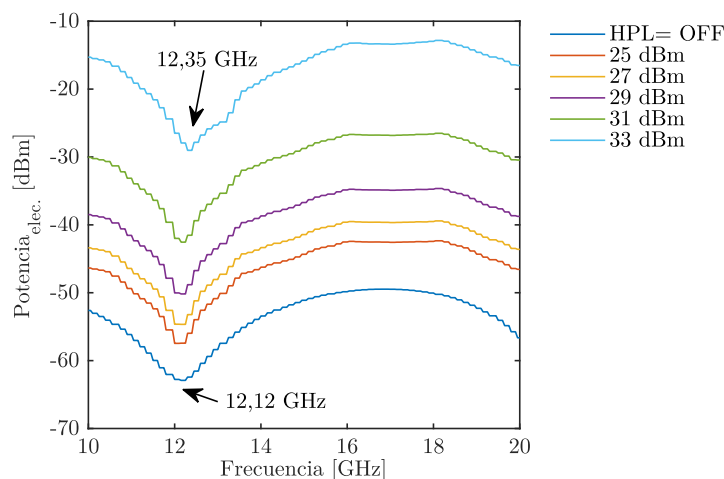


Figura 5.14. Respuesta en frecuencia del sistema AROF simulado en la herramienta VPI en una distancia de 25,20 km; la resolución de la simulación es de 50 MHz.

El otro análisis que se lleva a cabo está relacionado con la determinación de la ganancia Raman tanto experimental como teórica. El análisis experimental se realiza utilizando el *script srsScript* y la simulación

mediante el esquema mostrado en la Figura 5.12. La Figura 5.15 muestra los resultados para ambos casos y se observa que la tendencia y el comportamiento es el mismo para todas las longitudes tanto en la simulación como en los resultados experimentales. Sin embargo, las ganancias simuladas son un tanto superiores a las medidas en el laboratorio, alcanzando un error máximo de 2,7 dB en el caso D (25,20 km), cuando se configura 33 dBm en el láser HPL. Las diferencias que se observan entre el valor experimental y el teórico pueden ser como consecuencia de las diferencias entre el perfil de ganancia Raman real de la fibra y la que se usa en la simulación. En la simulación se usa un perfil genérico, véase la Figura 5.16, y no se cuenta con las especificaciones del fabricante de la fibra óptica para este tipo de simulaciones.

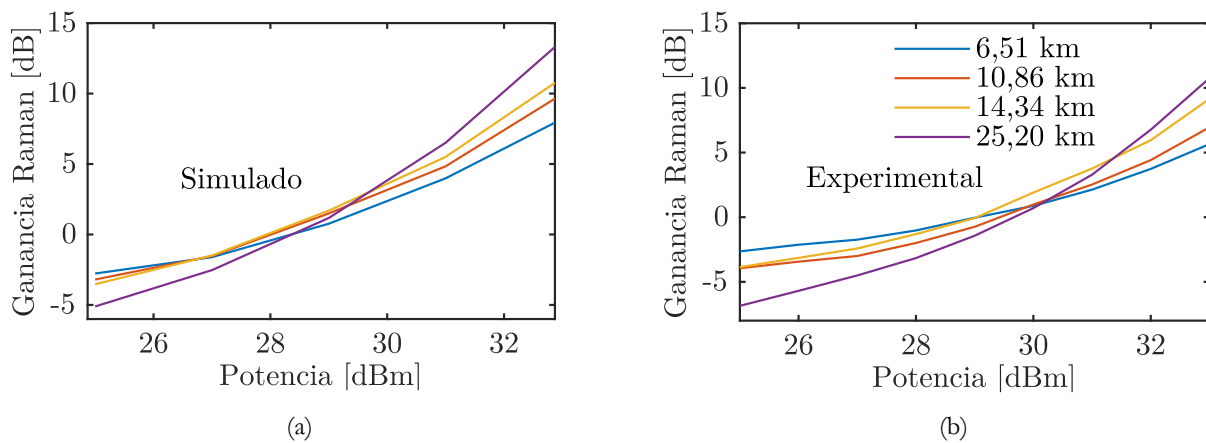


Figura 5.15. Ganancia Raman del sistema para diferentes longitudes: (a) simulado; (b) experimental.

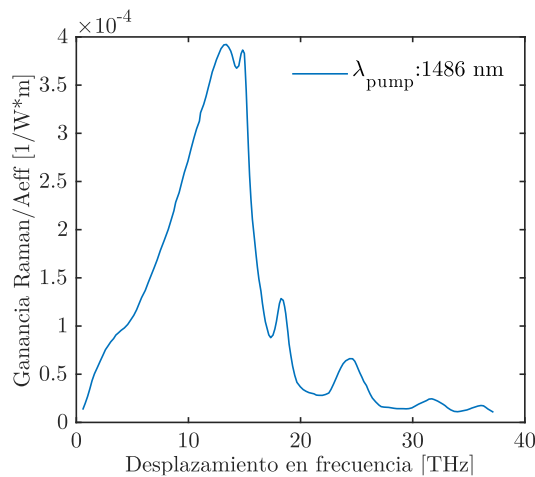


Figura 5.16. Perfil de ganancia Raman para la fibra óptica SMF-28 y con un bombeo a una longitud de onda de 1486 nm.

### 5.4.3 Impacto de PoF en el comportamiento del EVM del sistema

En el segundo estudio ( $E_2$ ), se analiza el comportamiento del EVM en el sistema ARoF a diferentes niveles de potencias configuradas en el láser HPL. El análisis se lleva a cabo siguiendo la misma metodología y procedimiento del caso anterior, pero en lugar de adquirir la potencia eléctrica recibida se adquiere el valor del EVM, véase la Figura 5.17.

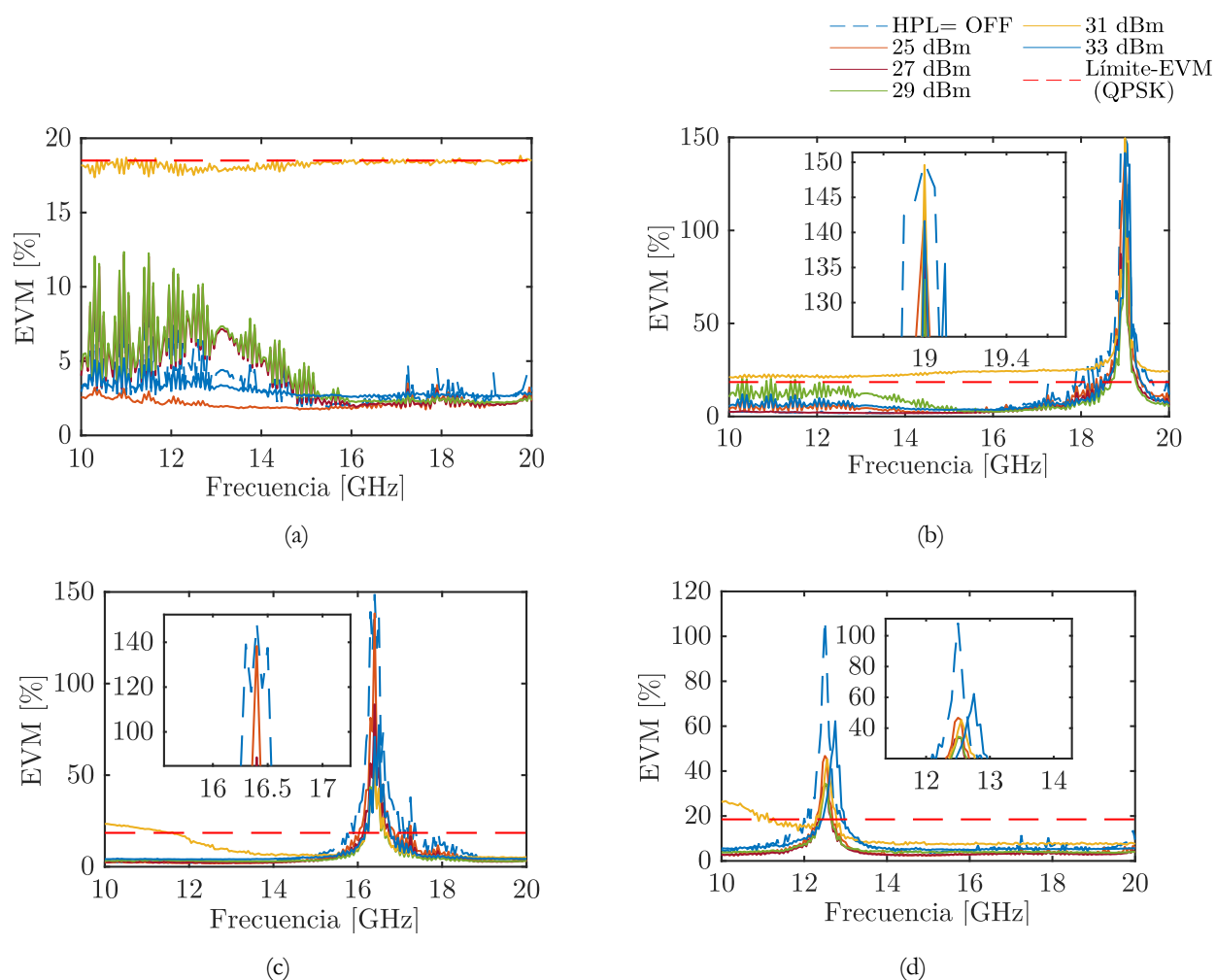


Figura 5.17. Comportamiento del EVM en función de la potencia configurada en el láser HPL para diferentes longitudes y usando una modulación QPSK: (a) 6,51 km; (b) 10,86 km; (c) 14,34 km; (d) 25,20 km.

El proceso de adquisición se implementa con el *script freqScript* configurado con una resolución en el barrido del HPL de 2 dB. En el caso A se observa que el valor del EVM permanece por debajo del establecido por el estándar como adecuado en la mayor parte de las potencias configuradas en el HPL, excepto a frecuencias altas cuando se configura a 31 dBm. Por otro lado, el sistema PoF logra reducir el valor del EVM del sistema al configurar 33 dBm y 25 dBm en el HPL, aunque la presencia de inestabilidades en el valor del EVM en el rango de 10 GHz a ~15 GHz pudiera limitar el uso de la tecnología al rango comprendido entre 16GHz y 20 GHz. En los casos B, C, D se observa que la máxima degradación del EVM coincide con los valores de las frecuencias críticas experimentales discutidos en el estudio E<sub>1</sub>, mientras que la mayor parte del resto de las frecuencias permanecen por debajo del límite establecido, a excepción de cuando se configura una potencia en el láser HPL de ~31 dBm. Esto se debe al comportamiento especial del ruido del láser en función de la potencia configurada [17]. Este efecto será discutido en el epígrafe 5.4.4 .

En el estudio E<sub>3</sub> se analiza la uniformidad y distribución del valor del EVM en función de la portadora de RF y la potencia configurada en el HPL. Para ello utiliza el *script freqScript* con una resolución de 0,4 dB en el barrido de la potencia configurada en el HPL. En el análisis se emplea un mapa de colores para representar el comportamiento del EVM, permitiendo evaluar de forma rápida el rango de frecuencias y de potencias que se deben utilizar en un sistema PoF para cumplir con el estándar. La Figura 5.18 muestra el resultado del análisis para todas las longitudes.

En las figuras se pueden observar tres colores, principalmente: verde, azul y marrón, con los siguientes significados:

- Verde: zonas en las que, la combinación de la potencia configurada en el láser HPL con la portadora de RF, generan un valor de EVM que no supera el umbral establecido por el estándar 5G.
- Azul: zonas en las que se incumple el estándar 5G. Las zonas azules verticales se corresponden con las zonas de transición próximas a la frecuencia crítica, mientras que las horizontales, se corresponden con las zonas de máximo ruido del láser HPL.
- Marrón: zonas en las que se incumple el estándar 5G por estar muy cercana o justo en la frecuencia crítica. Máxima degradación de la señal a causa del *power fading*.

En general, el cumplimiento del estándar tiene una distribución uniforme en función de la portadora de RF y de la potencia configurada en láser HPL, a excepción de las áreas de color azul y marrón, las cuales se corresponden con las zonas de mayor ruido del láser y con la frecuencia crítica.

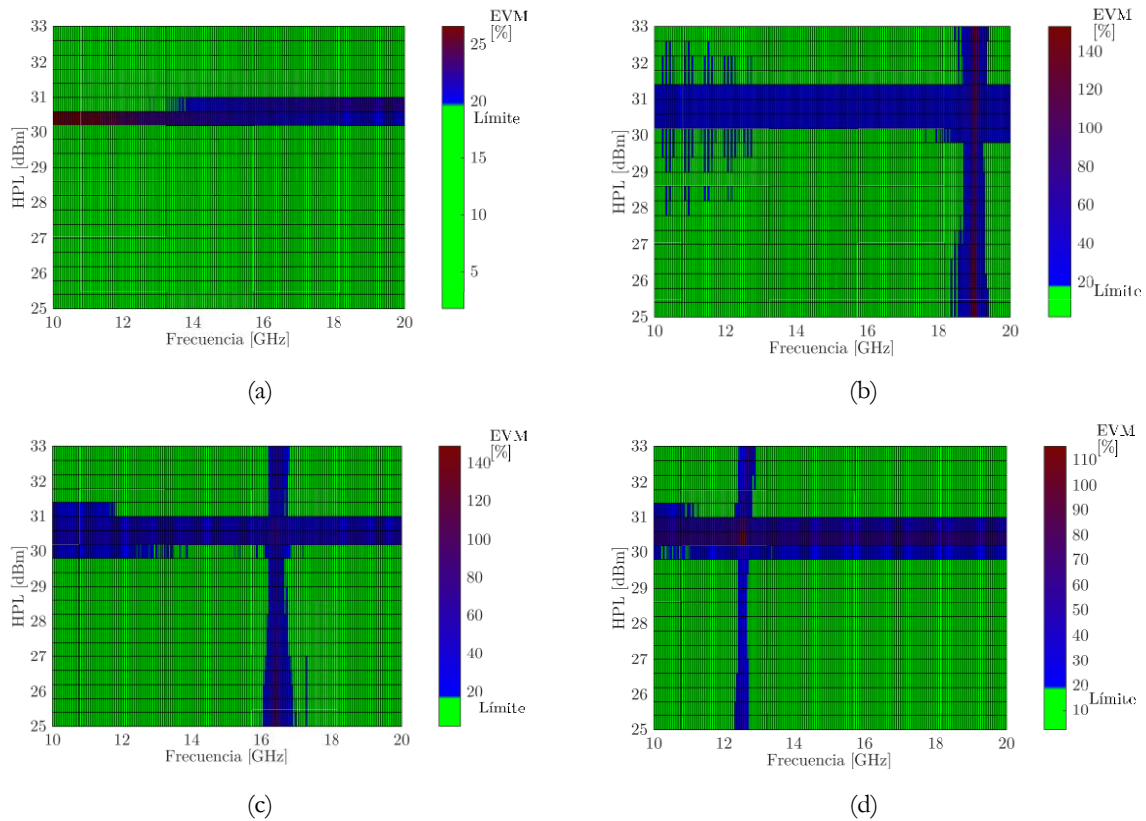


Figura 5.18. Cumplimiento del estándar basado en el valor del EVM para una modulación QPSK para diferentes longitudes de fibra óptica: (a) 6,51 km; (b) 10,86km; (c) 14,34 km; (d) 25,20 km.

#### 5.4.4 Acoplo del ruido del láser de alta potencia

El último estudio ( $E_3$ ) está relacionado con la influencia del ruido del láser en el comportamiento del sistema. Como se expresó en apartados anteriores el RIN del HPL es un parámetro muy importante en los sistemas PoF, sobre todo por su impacto en los escenarios compartidos en los que puede ocurrir transferencia de ruido del láser HPL al láser de datos en la propagación. Este fenómeno también es conocido en literatura como *Pump-Signal crosstalk* [18, p. 141] y ocurre en escenarios tanto contra-propagante



como co-propagante. Este último es objeto de estudio en esta sección ya que es el utilizado en esta investigación. El caso contra-propagante puede ser consultado en [18].

El ruido del láser se puede expresar como una fluctuación en potencia en función del tiempo de acuerdo con la Ec. 5.15 que da origen a la definición del RIN enunciado en capítulo 2, definida como:

$$P(t) = P_{HPL} (1 + \delta P(t)) \quad \text{Ec. 5.15}$$

donde  $P_{HPL}$  es la potencia óptica promedio del láser y  $\delta P(t)$  es la variación del ruido relativo de amplitud ( $\frac{\Delta P_{HPL}}{P_{HPL}}$ ) en función del tiempo ( $t$ ). Estas variaciones en potencia se acoplan a la señal de datos de manera diferente en función de la diferencia de propagación entre la señal ( $V_s$ ) y el bombeo ( $V_p$ ). Esto da lugar a dos escenarios de análisis, conocidos en la literatura como: *Walk-off* y *no-Walk-off* [18, p. 223]. Este último es el peor de los escenarios ya que la señal de datos y el láser HPL co-propagante viajan a la misma velocidad favoreciendo el acoplo del ruido. Este efecto de acoplo es proporcional a la ganancia neta Raman ( $G$ ) (descrita en el capítulo 2) por lo que se incrementa en presencia del fenómeno no lineal SRS y se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$RIN_s^o = \ln^2(G) RIN_{HPL} + RIN_s^i \quad \text{Ec. 5.16}$$

donde  $RIN_{HPL}$  es el ruido del láser HPL,  $RIN_s^i$  es el ruido de la señal de datos a la entrada y  $RIN_s^o$  es el ruido total después de producirse el acoplo. La Ec. 5.16 muestra que el RIN total ( $RIN_s^o$ ) puede superar en varios órdenes de magnitud al  $RIN_{HPL}$ , por lo que es importante la elección de la fuente HPL con bajo RIN.

El otro caso es cuando la velocidad de propagación del HPL es diferente a la del láser de datos, también conocido como caso *Walk-off*. Si se considera que la fuente HPL está modulada con índice de modulación  $m$  a una frecuencia  $f$ , la Ec. 5.15 se puede expresar como:

$$P(t) = P_{HPL} (1 + m \sin(2 \pi f x(t) + \theta)) \quad \text{Ec. 5.17}$$

donde  $x(t)$  es una función del tiempo dependiente del tipo de propagación y  $\theta$  es la fase aleatoria. En el caso co-propagante,  $x(t)$  se define como:

$$x(t) = t - \frac{V_s}{V_p} t \quad \text{Ec. 5.18}$$

El caso *Walk-off*, a partir de conocer la frecuencia  $f$ , se puede definir como [18, p. 223]:

$$RIN_s^o = RIN_s^i + RIN_{HPL} \ln^2 G \frac{\left(\frac{V_s}{L_{eff}}\right)^2}{(\alpha_p V_s)^2 + (f b)^2} \times \quad \text{Ec. 5.19}$$

$$(1 - 2e^{-\alpha_p L} \cos(f t b) + e^{-2\alpha_p L})$$

donde  $t$  es el tiempo que tarda la señal en recorrer la fibra de longitud  $L$  y  $b = 2\pi D \Delta\lambda V_s$ , donde  $\Delta\lambda$  es la diferencia en nanómetros entre la longitud de onda del HPL y la señal de datos. La Ec. 5.19 se puede simplificar aplicando la aproximación  $e^{-\alpha_p L} \ll 1$  y se obtiene que:

$$RIN_s^o = RIN_s^i + RIN_{HPL} \ln^2 G \frac{1}{\alpha_p^2 + (2\pi f D \Delta\lambda)^2} \quad \text{Ec. 5.20}$$

Esta ecuación demuestra la naturaleza de filtro paso bajo de la transferencia del ruido a causa del *Walk-off*, ya que cuanto mayor es la frecuencia  $f$  menor es la transferencia del ruido. A partir de esta ecuación se obtiene la frecuencia crítica de acoplamiento ( $f_c^{RIN}$ ), determinada por:

$$f_c^{RIN} = \frac{\alpha_p}{2\pi D \Delta\lambda} \quad \text{Ec. 5.21}$$

Esta frecuencia crítica es a partir de la cual el ruido acoplado se reduce a la mitad (-3dB) [18, p. 230].

Del análisis teórico previo se concluye que:

- El ruido aumenta conforme es mayor la ganancia neta, por lo que es importante conocer el perfil de ganancia del sistema PoF para evaluar el nivel de acoplo del ruido y en consecuencia su impacto.
- El ruido de baja frecuencia se acopla con mayor facilidad por lo que es necesario caracterizar espectralmente al láser HPL, con mayor interés a bajas frecuencias.
- Los escenarios PoF serán típicamente *Walk-off*
- Los sistemas PoF en un escenario compartido en presencia de SRS y que utilicen el láser HPL para enviar además información; deberán emplear preferiblemente una frecuencia de modulación mayor que  $f_c^{RIN}$ , para minimizar el acoplo.

Basadas en las conclusiones previas se llevan a cabo un conjunto de experimentos que permiten evaluar y explicar el comportamiento del EVM, fundamentalmente cuando se configuran en el HPL las potencias superiores a 30 dBm. Las medidas se han dividido en tres grupos: espectrales, temporales y de evaluación del EVM en función de las potencias configuradas en el HPL.

Las medidas espectrales y temporales del láser HPL se llevan a cabo utilizando el montaje mostrado en la Figura 5.19. Para la adquisición se utiliza el osciloscopio RTO y el fotodiodo (PD) 83440C el cual tiene un ancho de banda de 20 GHz. El osciloscopio y el ordenador están conectados por el puerto Ethernet (categoría mínima CAT-5E). El atenuador está configurado con una atenuación de  $\sim 36$  dB (1480 nm) para no superar, incluso en el peor de los escenarios (HPL= 33 dBm), la potencia límite soportada por el fotodiodo, la cual es de 10 dBm.

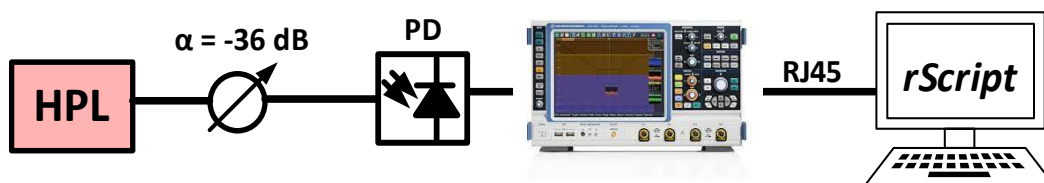


Figura 5.19. Esquema para la medición del ruido del láser HPL.

En el análisis temporal se configura el *script rScript* para realizar el barrido en el HPL desde 25 dBm hasta 33 dBm con una resolución de 0,1 dB. Por cada incremento en la potencia del láser HPL se calcula la STD de los valores adquiridos. Adicionalmente, con el objetivo de obtener un perfil de ruido más cercano al real, el ciclo de medición se repite 3 veces (M1, M2, M3), véase la Figura 5.20. Como resultado se obtiene un perfil que presenta máximos centrados en  $\sim 27$  dBm y  $\sim 30$  dBm y los valores mínimos de ruido están localizados en las potencias mayores de  $\sim 31,5$  dBm y menores de  $\sim 26,2$  dBm. A partir del comportamiento de la STD se identifican los valores de potencia 25 dBm, 27 dBm 30 dBm y 33 dBm, los cuales modelan de manera simplificada el comportamiento del ruido en el HPL.

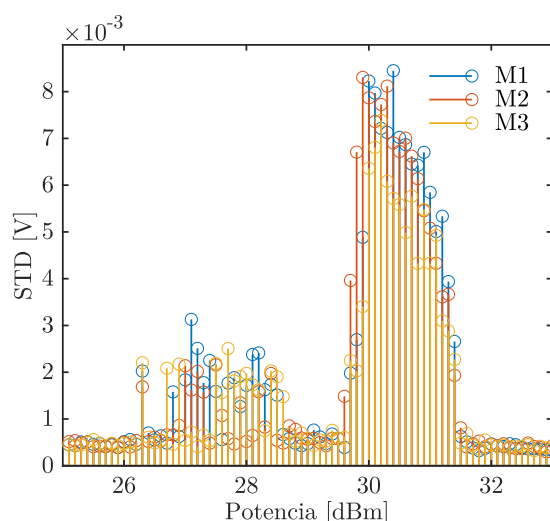


Figura 5.20. Análisis de perfil del ruido del láser HPL basado en el cálculo de la desviación estándar.

La Figura 5.21(a) muestra la salida del fotodiodo PD para cada valor de potencia configurado en el ciclo de medición M1. Se observa que el tono de mayor amplitud ocurre cuando se configura una potencia en el HPL de 30 dBm y las amplitudes mínimas se obtiene cuando las potencias configuradas en el HPL son de 25 dBm y 33 dBm, lo cual está en correspondencia con el comportamiento de la STD. La Figura 5.21(b) muestra el mismo comportamiento en el dominio de la frecuencia y se observa que los tonos tienen una frecuencia aproximada de 150 kHz.

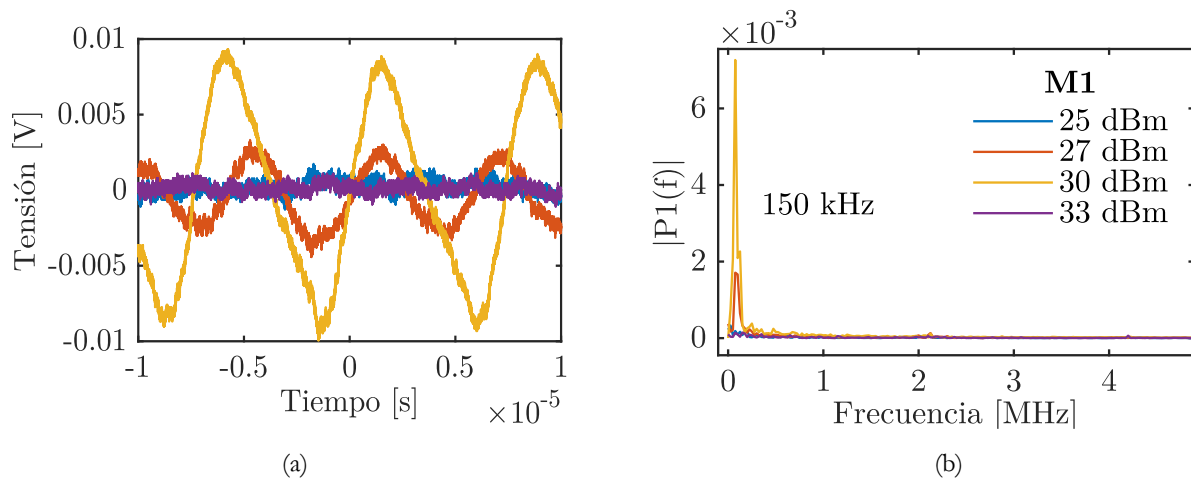


Figura 5.21. Contenido espectral del ruido del láser HPL: (a) dominio del tiempo; (b) dominio de la frecuencia.

Por último, se analiza con más detalle el impacto del acoplo del ruido del láser HPL en el canal de datos, y que influye en el valor EVM. En esta sección se utiliza el mismo montaje e instrumentación que en el apartado anterior pero, para simplificar el estudio, el análisis se lleva a cabo sólo para los casos B y D. Para ello se emplea el *script pot.Script* y los resultados se muestran en la Figura 5.22.

En el análisis se observa que: (i) la potencia eléctrica recibida en el caso D siempre es mayor si se compara con el caso B, (ii) el valor máximo del EVM es peor para el caso D en todas las frecuencias y (iii) con independencia de la frecuencia y de la longitud de la fibra, los puntos de máximo deterioro se corresponden con el rango de potencia más ruidoso del láser HPL. El comportamiento de la potencia eléctrica corrobora la amplificación de la señal en el dominio óptico y que la ganancia Raman en el caso D es mayor que en el caso B. Sin embargo, este efecto de amplificación no es capaz de compensar el deterioro del EVM. En este comportamiento también está influyendo el acoplamiento del ruido del láser HPL en el canal de datos, el cual es mayor conforme aumenta la ganancia Raman. Por esta razón es importante seleccionar en los sistemas PoF un láser HPL que posea un nivel de ruido bajo.

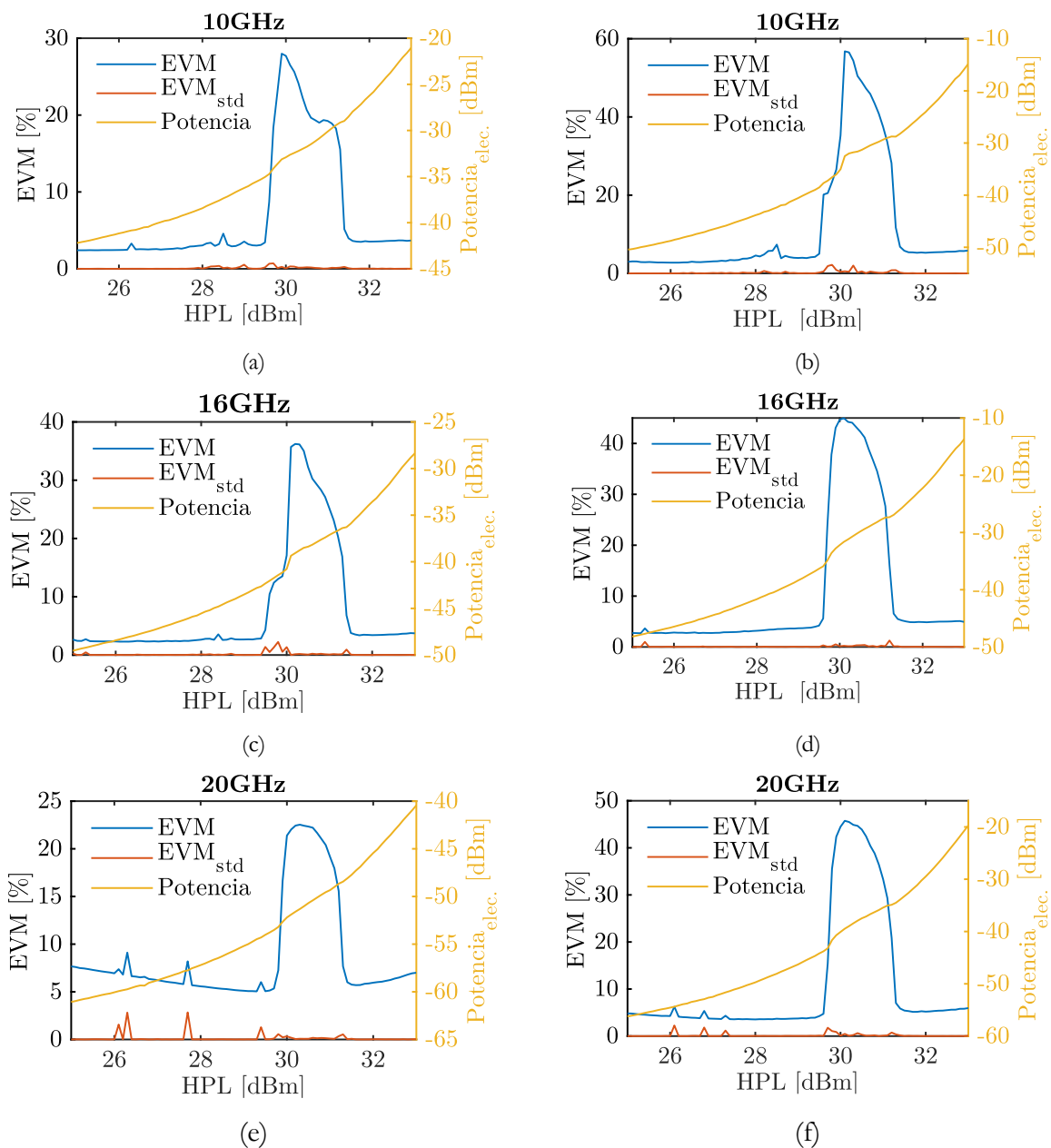


Figura 5.22. Impacto del ruido del láser HPL en el comportamiento del valor EVM: (a), (c), (e) 10,86 km (caso B); (b), (d), (f) 25,20 km (caso D).

## 5.5 Conclusiones

En este capítulo se abordó el impacto de los parámetros de la fibra óptica y su penalización en los sistemas ARoF en un escenario 5G, operando con una frecuencia de portadora de hasta 20 GHz y con longitudes inferiores a 25 km. Los análisis se llevaron a cabo en un escenario compartido por considerarse el más restrictivo en cuanto a la influencia de los fenómenos no lineales como el Kerr y el SRS.

Parte de los análisis se centraron en determinar el efecto de la transmisión de potencia en el desplazamiento de la frecuencia crítica y en la aparición del *power fading* como consecuencia de la dispersión cromática efectiva. Se utilizó un rango de frecuencia de RF entre 10 GHz y 20 GHz, una modulación QPSK de acuerdo con el estándar 5G y unas longitudes de fibras de 6,51 km, 10,86 km, 14,34 km y 25,20 km. En los últimos 3 casos el aumento de la frecuencia crítica fue al menos de 50 MHz, y un máximo de 250 MHz cuando se inyectó una potencia de 33 dBm en el experimento. En cambio la dispersión cromática efectiva disminuyó en 0,62 ps/nm/km para la longitud más larga y 0,08 ps/nm/km para una longitud de fibra óptica de 10,86 km. Este comportamiento de la frecuencia crítica es debido fundamentalmente a la acción combinada del efecto Kerr, específicamente el SPM, y al efecto de la amplificación Raman el cual favorece la compensación de la dispersión. Por lo tanto, el sistema PoF introduce un efecto positivo en este sentido al sistema ARoF implementado. Este experimento fue modelado en la herramienta VPI para la distancia de 25,20 km, pudiéndose corroborar los resultados experimentales, fundamentalmente los relacionados con el efecto Kerr, y la amplificación SRS. En el análisis se utilizó el valor del EVM como métrica para evaluar el comportamiento del sistema ARoF para el rango de potencia PoF de inyección analizado. En este sentido el comportamiento del EVM fue muy variado, existiendo rangos de potencias ópticas de inyección para algunas frecuencias de RF en las que el valor del EVM mejoraba con respecto a la condición del láser HPL apagado. Por otro lado, también se estudiaron las principales causas de la degradación del valor del EVM, lo cual se atribuyó a dos factores: la presencia de la frecuencia crítica a causa del *power fading* y al acoplo del RIN del láser HPL a la señal ARoF a través del fenómeno SRS. Por esta razón es importante la elección de un láser para el sistema PoF con bajo nivel de RIN.

Además, se evaluó la influencia de la temperatura en la dispersión cromática, en donde a menor longitud del enlace la variación de la frecuencia crítica es mayor. La mayor variación que se obtuvo fue de

~584 kHz/°C para una longitud de 6,51 km, por lo que en mediciones de precisión de cientos de kHz se debe conocer la temperatura a la que se desarrollan los experimentos y controlar la misma llegado el caso.



## 5.6 Referencias

- [1] J. Beas, G. Castanon, I. Aldaya, A. Aragon-Zavala, and G. Campuzano, “Millimeter-wave frequency radio over fiber systems: A survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1593–1619, 2013, doi: 10.1109/SURV.2013.013013.00135.
- [2] D. Hervé *et al.*, “Techniques for the compensation for chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems,” *URSI Radio Sci. Bull.*, vol. 2004, no. 309, pp. 26–37, 2004, doi: 10.23919/URSIRSB.2004.7909614.
- [3] U. Gliese, S. Norskov, and T. N. Nielsen, “Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 44, no. 10 PART 1, pp. 1716–1724, 1996, doi: 10.1109/22.538964.
- [4] L. N. Binh, *Optical fiber communication systems with MATLAB and Simulink models*. CRC Press, 2015.
- [5] J. A. Buck, *Fundamentals of Optical Fibers*, 2nd Editio. Wiley, 2010.
- [6] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Ed. II. San Diego: Academic Press, 1995.
- [7] J. Toulouse, “Optical Nonlinearities in Fibers: Review, Recent Examples, and Systems Applications,” *J. Light. Technol. Vol. 23, Issue 11, pp. 3625-*, vol. 23, no. 11, pp. 3625–3641, Nov. 2005, doi: 10.1364/OL.439105.
- [8] P. S. André, A. N. Pinto, and J. L. Pinto, “Effect of temperature on the single mode fibers chromatic dispersion,” *J. Microwaves Optoelectron.*, vol. 3, no. 5, pp. 64–70, 2004, doi: 10.1109/IMOC.2003.1244863.
- [9] W. H. Hatton and M. Nishimura, “Temperature Dependence of Chromatic Dispersion in Single Mode Fibers,” *J. Light. Technol.*, vol. 4, no. 10, pp. 1552–1555, 1986, doi: 10.1109/JLT.1986.1074637.
- [10] M. J. Hamp, J. Wright, M. Hubbard, and B. Brimacombe, “Investigation into the temperature dependence of chromatic dispersion in optical fiber,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 14, no. 11, pp. 1524–1526, Nov. 2002, doi: 10.1109/LPT.2002.803902.
- [11] “Optical Fiber Corning® SMF-28e® Optical Fiber Product Information Evolving Networks Now.” Accessed: Aug. 13, 2021. [Online]. Available: [http://www.tlc.unipr.it/cucinotta/cfa/datasheet\\_SMF28e.pdf](http://www.tlc.unipr.it/cucinotta/cfa/datasheet_SMF28e.pdf).
- [12] “Corning® Single-Mode Optical Fiber Optical Fiber Corning® SMF-28™ Optical Fiber Product Information.” Accessed: Aug. 21, 2021. [Online]. Available: <https://www.photonics.byu.edu/FiberOpticConnectors.parts/images/smf28.pdf>.
- [13] P. S. André and A. N. Pinto, “Chromatic dispersion fluctuations in optical fibers due to temperature and its effects in high-speed optical communication systems,” *Elsevier*, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.optcom.2004.11.017.
- [14] “Single Mode WDM: 1x2(2x2).” <http://www.dkphotonics.com/product/1x2-single-mode-wdm.html> (accessed Aug. 27, 2021).
- [15] “Thermopile Power Sensors: PM30V1.” [https://coherentinc.force.com/Coherent/ccrz\\_\\_ProductDetails?sku=1098429](https://coherentinc.force.com/Coherent/ccrz__ProductDetails?sku=1098429) (accessed Aug. 26, 2021).
- [16] “Medidor de potencia: LabMax-TOP | Coherent.” <https://es.coherent.com/measurement-control/measurement/labmax-top> (accessed Aug. 26, 2021).

- [17] F. M. A. Al-Zubaidi, J. D. Lopez-Cardona, D. Sanchez Montero, and C. Vazquez, “Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT,” *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 13, pp. 4262–4269, Jul. 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3074193.
- [18] Clifford Headley and G. P. Agrawal, *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*. London, UK: Elsevier Academic Press, 2005.

# Capítulo 6

## Integración de la alimentación por fibra en un escenario C-RAN usando fibras multinúcleo

Resumen:

En este capítulo se aborda una solución de *Power over Fiber* integrada en el *fronthaul* óptico de una red 5G en configuración C-RAN, operando a una frecuencia de RF de 25,5 GHz. En el diseño se emplea SDM integrado con PoF sobre una fibra multinúcleo de 10 km, con el objetivo de alimentar y controlar elementos críticos de la RRH para gestionar remotamente su consumo energético. En el diseño se implementa un control inteligente basados en agentes. Adicionalmente se caracterizan los sistemas ARoF y PoF y se evalúa el impacto de la transmisión de energía sobre el sistema ARoF para las modulaciones QPSK, 16 QAM y 64 QAM usando como métrica el valor del BER. Además, se exploran dos ejemplos de aplicaciones basados en las fibras ópticas MCF y SMF para la optimización del consumo energético de la RRH. Finalmente se discute una técnica basada en *Tilted Fibre Bragg Grating* sobre fibras MCF para la monitorización de la energía transmitida.

## 6.1 Introducción al Proyecto blueSPACE

El proyecto blueSPACE se centra en el desarrollo de una arquitectura única de *fronthaul* analógico (ARoF) basado en multiplexación espacial (SDM, por sus siglas en inglés) sobre una fibra multinúcleo (MCF) para aumentar la capacidad en el *fronthaul* de una red 5G. La introducción de SDM ha permitido extender la capacidad de los sistemas de comunicación óptica más allá del límite de la fibra monomodo (SMF) convencional de unos 100 Tbits/s al aumentar el número de canales en los diferentes núcleos dentro de una misma fibra MCF [1][2]. Entre los objetivos claves para el desarrollo del proyecto están: (i) el desarrollo de *chip* fotónicos para la implementación de un *beamforming* óptico (conformación de haces), (ii) mejoras de la eficiencia energética usando la tecnología PoF, y (iii) el desarrollo de una BBU-ARoF para el procesamiento en tiempo real de señales 5G con un ancho de banda máximo de 800 MHz en la banda n258.

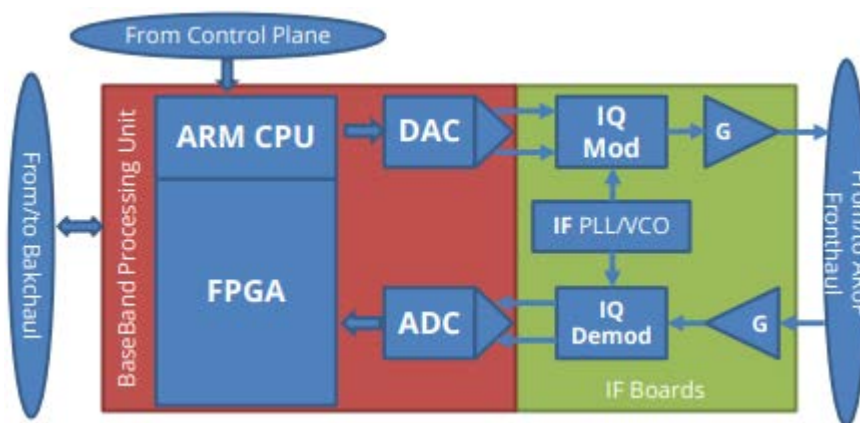


Figura 6.1. Configuración de la BBU y del módulo de frecuencia intermedia [3].

Una unidad de banda base (BBU) es una unidad que procesa la banda base en los sistemas de telecomunicación y se encarga de la comunicación a través de la interfaz física. Una estación de telecomunicaciones inalámbrica típica está formada por la unidad de procesamiento de banda base y la unidad de procesamiento de RF (unidad de radio remota RRU o RRH en la terminología 5G). La BBU desarrollada incluye: una FPGA, una CPU con arquitectura ARM para el control y el procesamiento, un DAC/ADC de alta velocidad y un reloj de referencia. El módulo de Frecuencia Intermedia (módulo IF) es

capaz de generar un rango de frecuencia entre 2,25 GHz y 5,5 GHz y está formado por los (de)moduladores de cuadratura (componentes IQ), osciladores controlados por tensión (VCO, *Voltage-Controlled Oscillator*), lazo de seguimiento de fase (PLL, *Phase Locked-Loop*), amplificadores eléctricos y controladores de MZM, véase la Figura 6.1.

La Figura 6.2(a) muestra una foto de la solución desarrollada durante el proyecto en la que se incluyen los 4 módulos principales: Frecuencia Intermedia (IF, por sus siglas en inglés), BBU, Interfaz óptica (EDFA, MZM, divisores ópticos) y el módulo de los convertidores de medio SFP (*Small Form-factor Pluggable transceiver*), 10G Ethernet. Por simplicidad en los epígrafes que siguen, el término BBU comprenderá todos los módulos mencionados anteriormente. Adicionalmente existe una interfaz gráfica implementada en Matlab en la que se visualizan los principales parámetros de la BBU, tales como: constelaciones (CONS), estados de los ecualizadores, potencia de transmisión de la frecuencia intermedia ( $IF_{TX}$ ), potencia de recepción de la frecuencia intermedia ( $IF_{RX}$ ), el *Bit Error Rate* (BER) y el EVM, entre otros parámetros. La aplicación se ejecuta en un ordenador independiente conectado a la BBU a través de una interfaz Ethernet (RJ45). La Figura 6.2(b) muestra la interfaz gráfica de la aplicación.

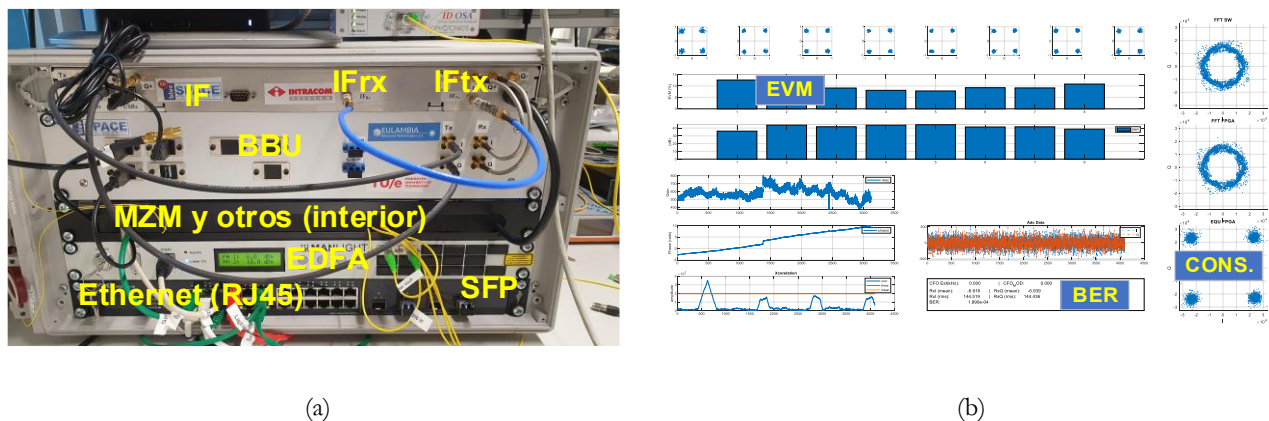


Figura 6.2. Elementos principales, en el lado de la CO, desarrollados en el marco del proyecto blueSPACE: (a) BBU; (b) interfaz gráfica de la aplicación desarrollada en Matlab que se utiliza para la visualización de los parámetros.

Como se comentó anteriormente, como parte del proyecto se plantea la utilización de la tecnología PoF como una fuente de energía alternativa para alimentar dispositivos de bajo consumo ubicados en la RRH. Adicionalmente se explora la implementación de un control inteligente de ahorro de energético, así como el envío de energía centralizado y escalable a través del concepto de *PoF Pooling* [4]. Estos conceptos son de gran importancia en las redes 5G por los posibles altos niveles de consumo requeridos que llevan a la

necesidad de desarrollar estrategias que permitan la optimización del consumo de la red. Algunos conceptos relacionados con estos temas serán tratados a lo largo del desarrollo del capítulo.

Por otro lado, como se comentó anteriormente, un elemento de gran importancia en blueSPACE es la fibra MCF que se emplea, la cual está compuesta por 7 núcleos y tiene una longitud de 10 km. Los dispositivos FIFO (*Fan-inFan-out*) permiten la inserción y extracción de la señal de los diferentes núcleos y están fusionados directamente a la fibra MCF, reduciendo así las pérdidas de inserción del conjunto. La Figura 6.3(a) muestra las pérdidas medidas de la fibra en cada uno de los núcleos a una longitud de onda de 1550 nm. Por último, la Figura 6.3(b), muestra las medidas de la dispersión cromática, que brinda el fabricante, para cada uno de los núcleos a esa misma longitud de onda.

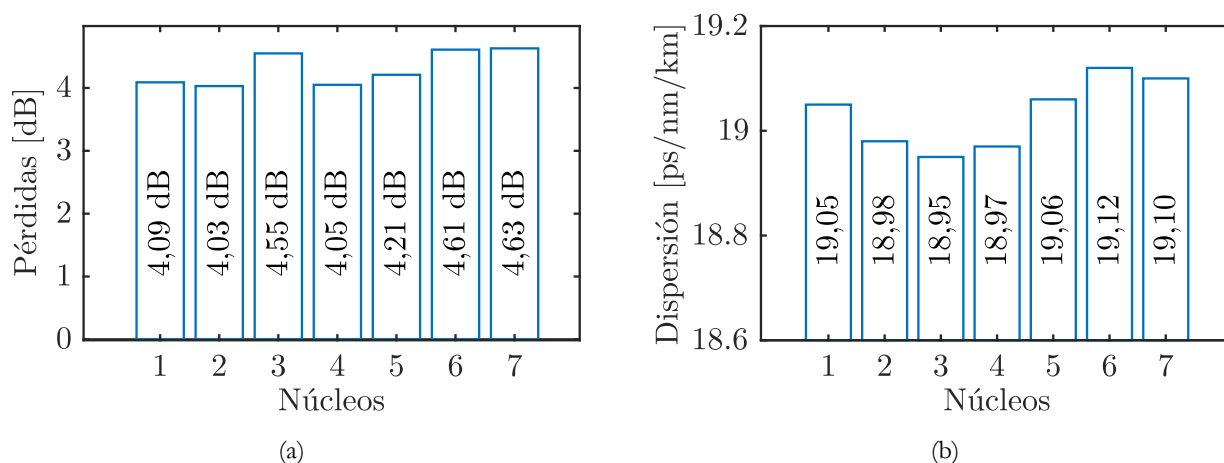


Figura 6.3. Características de la fibra MCF: (a) pérdidas de inserción a 1550 nm; (b) dispersión cromática.

## 6.2 Consumo en 5G

Un requisito fundamental para el futuro de las redes de comunicación 5G es proporcionar alta velocidad y reducir significativamente el consumo de energía de la red. La red 5G está diseñada para permitir despliegues de red más densos y, al mismo tiempo, ofrecer una mayor eficiencia energética, reduciendo así tanto los costes operativos como el impacto medioambiental. Estudios recientes de Nokia y Telefónica muestran que la tecnología 5G es hasta un 90 % más eficiente por unidad de tráfico que las tecnologías inalámbricas anteriores [5][6]. No obstante, el consumo de un sólo emplazamiento de 5G está en el orden

de 12 kW, de donde 4,2 kW se consumen en la antena activa (AAU). Esto representa un incremento considerable con respecto al consumo de energía de los emplazamientos 2G/3G/4G ya que una estación base 5G puede llegar a consumir más de 2 veces lo que consume una estación 4G, véase la Figura 6.4.

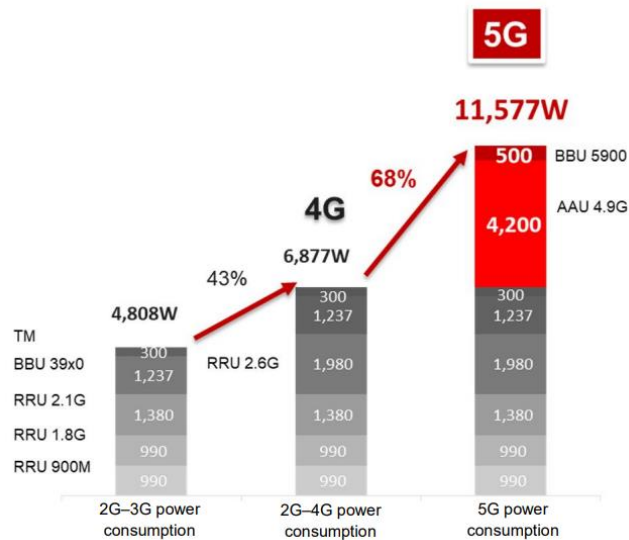


Figura 6.4. Requerimientos energéticos de emplazamientos 2G/3G/4G/5G. RRU: *Remote Radio Unit*, AAU: *Active Antenna Unit*, BBU: *Baseband Unit* [7].

Esto supone nuevos retos en relación con el suministro energético, tales como [8][7]:

- insuficientes fuentes de energía y cuya ampliación supone un coste elevado y retrasos en el despliegue de la tecnología;
- capacidad insuficiente de las baterías, lo cual disminuye el tiempo de respaldo energético del equipamiento;
- incapacidad de transmitir grandes volúmenes de energía eficientemente hacia emplazamientos distantes a causa de las pérdidas en los cables;
- aumento brusco de las tarifas de las operadoras eléctricas, lo cual afecta a los ingresos de los operadores de telecomunicaciones.

No obstante, el tamaño de las celdas tiene una función determinante en el consumo de la red. Las mismas pueden clasificarse según su área de cobertura y la potencia irradiada por la antena en macroceldas, microceldas, picoceldas y femtoceldas. Estas últimas son las más pequeñas y las de menos nivel de potencia

irradiada por la antena. La Tabla 6.1 muestra los radios de cobertura para cada celda y los niveles de potencia de transmisión típicos de cada una de ellas, véase la Figura 6.5.

Tabla 6.1. Parámetros relevantes de los diferentes tipos de celdas [9].

Tipo de celda	Potencia de salida [W]	Radio de cobertura [km]	Número de usuarios	Área de aplicación
Femto	0,001 a 0,25	0,01 a 0,1	1 a 30	Interiores
Pico	0,25 a 1	0,1 a 0,2	30 a 100	Interiores/Exteriores
Micro	1 a 10	0,2 a 2,0	100 a 2000	Interiores/Exteriores
Macro	10 a >50	8 a 30	>2000	Exteriores

La potencia irradiada por las femtoceldas y las picoceldas está en el orden de 250 mW y 1 W como máximo respectivamente. Esta característica supone menos demanda en el requerimiento total de energía lo que las convierte en potenciales candidatas para el uso de la tecnología PoF.

Las femtoceldas se utilizan más en escenario interiores y cubren áreas pequeñas, pero en este entorno abundan diferentes tipos de obstáculos que dificultan la propagación de ondas de radio creando zonas oscuras. La solución a este problema es aumentar el número de femtoceldas para crear una zona de cobertura más homogénea. En cambio, las picoceldas se utilizan tanto en escenarios interiores como en exteriores y por su potencia de emisión más elevada, brindan un mayor radio de cobertura. Sin embargo, ésta puede llegar a ser no homogénea en función del despliegue. Por otro lado, aumentar la densidad en número por área supone incrementar el consumo energético [10]. La Figura 6.6 muestra una comparativa entre la homogeneidad de la cobertura en las picoceldas y las femtoceldas, así como un escenario de aplicación. Considerando lo descrito anteriormente pueden enumerarse al menos 3 contextos de aplicación de interés en la tecnología PoF: (i) escenario Femto, (ii) Pico y (iii) Micro. El primero de ello comprende un gran número de celdas de poco consumo, mientras que en el segundo la demanda energética es mayor y el número de celdas se reduce para las mismas condiciones de cobertura. El escenario Micro es más restrictivo en términos de consumo y aplica en zonas urbanas y/o suburbanas.



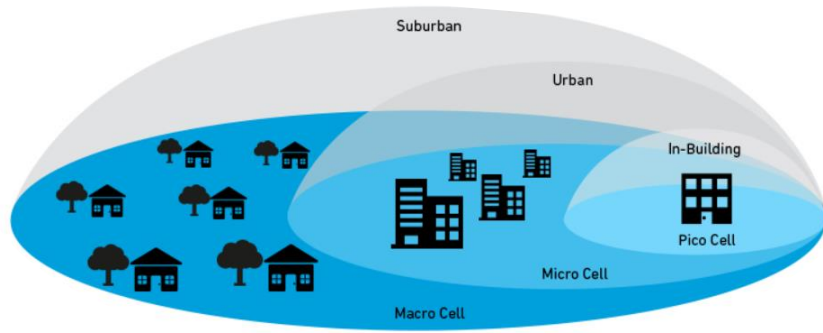


Figura 6.5. Escenario de aplicación y radio de cobertura de los diferentes tipos de celdas [9].

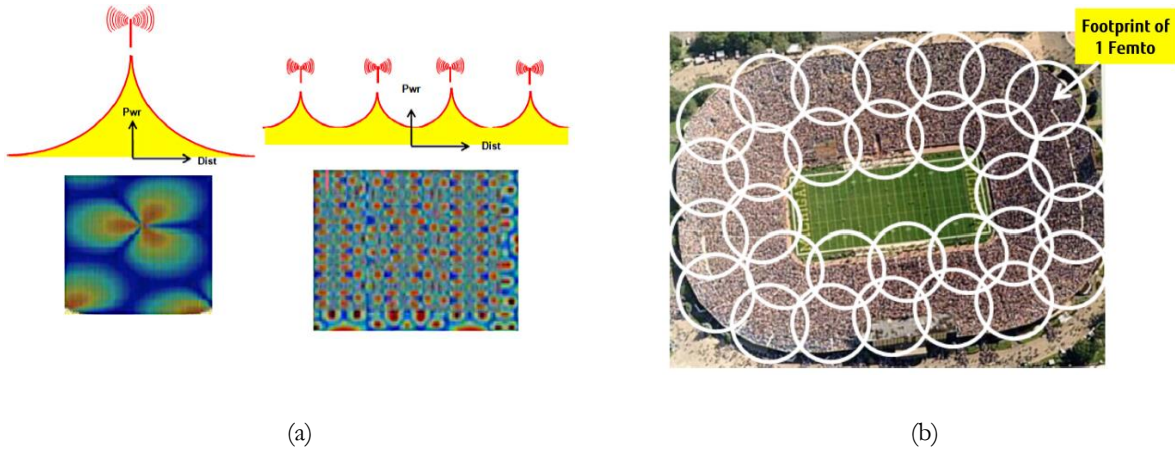


Figura 6.6. Distribución de la cobertura de radio en interiores en el caso de: (a) picoceldas (izquierda), femtoceldas (derecha); (b) ejemplo de escenario de aplicación de las femtoceldas; proyección de su área de cobertura en un estadio[10].

La Figura 6.7 muestra diferentes escenarios de aplicación de la tecnología PoF en un contexto de 5G, utilizando fibras SMF y MCF, para enviar la energía hacia las diferentes RRH. La topología que se utiliza en ambos casos, a modo de ejemplo, es la de estrella, (véase el capítulo 2), donde la potencia se divide en el lado remoto para alimentar a los diferentes nodos. En la división de la energía se pueden utilizar diferentes dispositivos, como divisores ópticos (SP, por sus siglas en inglés) y/o *Fan-out* (FO), en el caso de la MCF.

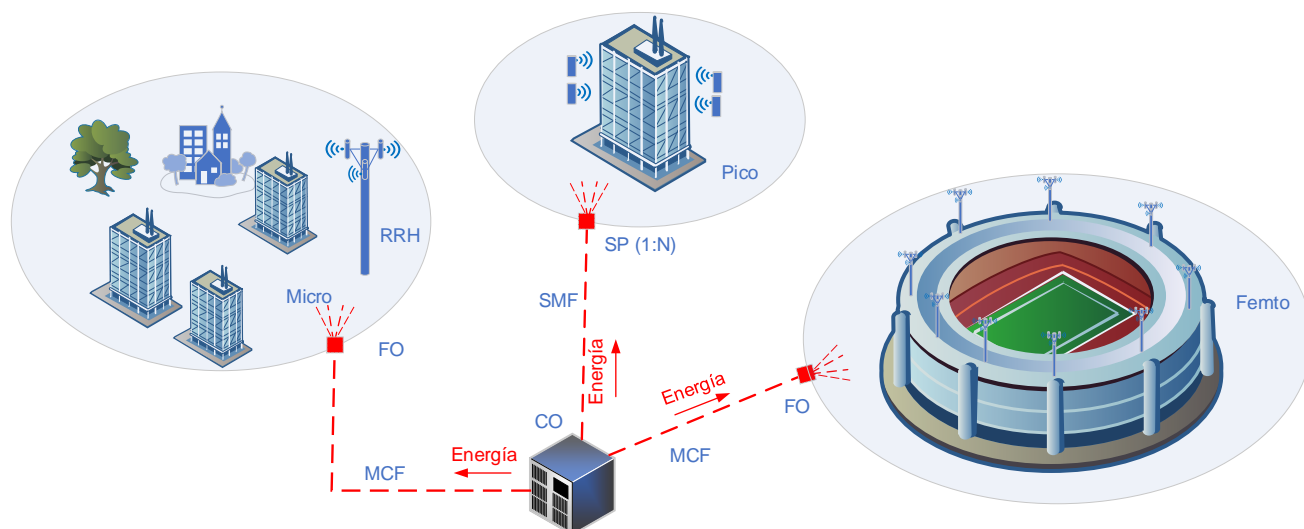


Figura 6.7. Diferentes escenarios de aplicación de la tecnología PoF en un contexto de 5G, usando fibras multinúcleos (MCF) y monomodo (SMF) en topología en estrella; SP: divisor óptico con una entrada y múltiples salidas (N), FO: *Fan-out* de la fibra MCF.

### 6.2.1 *Power over fiber* en el contexto de blueSPACE

Como se comentó anteriormente el consumo de la red puede llegar alcanzar niveles altos que, sin la implementación de las estrategias adecuadas, puede hacer que la red 5G fuera insostenible. Por esta razón un tema recurrente en este tipo de redes es la implementación de nuevas actuaciones y mejoras a las ya existentes para reducir el consumo. Dentro de las mismas se encuentran aquellas centradas en el análisis de las fluctuaciones de tráfico que presenta la red durante el día, observándose que incluso hay períodos de inactividad, véase la Figura 6.8. Algunos operadores como Ericsson implementan funciones de ahorro logrando disminuir hasta un 15 % en el consumo de las estaciones bases [11]. Este comportamiento permite a la red transitar por modos de bajo consumo o de reposo a través del apagado selectivo de diferentes componentes de *hardware*, en aquellos instantes en los que no hay tráfico que atender [12][13].

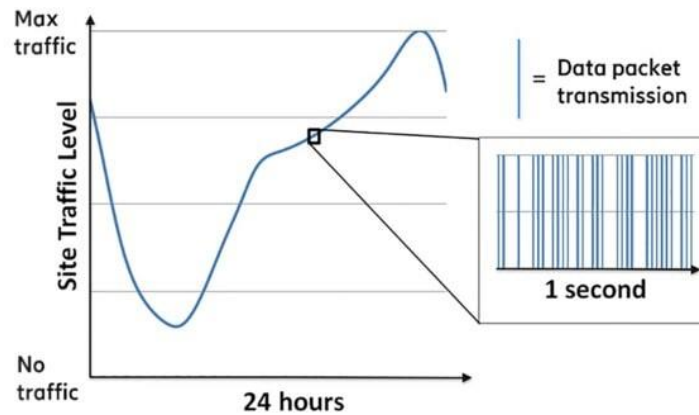


Figura 6.8. Comportamiento del tráfico de una red 5G en un intervalo de 24 horas [12].

Continuando con esta filosofía, en el contexto del proyecto blueSPACE se desarrollan dos líneas de investigación que, por un lado, se centran en la alimentación remota de dispositivos de bajo consumo ubicados en la RRH usando la tecnología PoF y, por el otro, en la conceptualización del *PoF Pooling*. Ambas líneas tienen como objetivos globales, en primer lugar, la optimización energética a través del control inteligente de consumo de la RRH y, en segundo, lugar crear una topología de alimentación centralizada a través del *PoF Pooling*.

El concepto *PoF Pooling* es similar al de C-RAN pero aplicado a la tecnología PoF. En el *PoF Pooling* se plantea la centralización de los recursos asociados a la tecnología, lo que permite un mejor aprovechamiento del espacio, escalabilidad, mejor manejo de los recursos, y posibilita una gestión óptima de la energía que se envía a las RRH. La Figura 6.9 muestra un escenario en el que se aplica el concepto *PoF Pooling* basado en fibra MCF, propuesto en el marco del proyecto blueSPACE, para alimentar celdas de bajo consumo energético [4]. En la misma se representa un conjunto de láseres (HPLD) encargados de suministrar la energía a través de la MCF hacia la RRH. El sistema propuesto permite controlar el nivel de potencia de cada láser en función de los requerimientos energéticos de la RRH, determinados fundamentalmente por el tráfico que maneje cada una.

Por otro lado, también permite redireccionar dinámicamente la energía por medio del control de un conmutador óptico de potencia ubicado en la CO, ya que una asignación estática de fibras para la alimentación remota puede dificultar la asignación flexible de recursos de la red. Los dispositivos ópticos MUX/DMUX permiten implementar el escenario compartido sobre la fibra MCF. Adicionalmente la propuesta cuenta con un canal de comunicación bidireccional con el propósito de transmitir señalización

de control para la gestión de la energía en el lado de la RRH y para recibir información acerca de su estado. En el lado de la RRH hay implementado un control de energía (HEM) capaz de gestionar tanto la energía que viene del sistema PoF como de otras fuentes como la solar (*harvesting*).

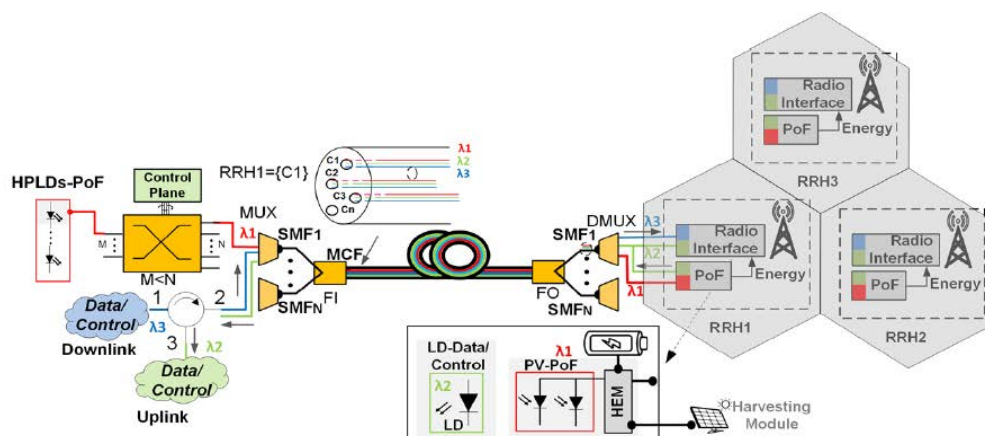


Figura 6.9. Escenario *PoF Pooling* en el *fronthaul* de una red 5G con multiplexación espacial (SDM).  $\lambda_1$ : potencia,  $\lambda_2$ : datos,  $\lambda_3$ : control, HPLD: diodos láser de alta potencia, SMF: fibras monomodo, MCF: fibra multinúcleo, FO/FI: *Fan-in/Fan-out*, (D)MUX: (de-)multiplexor, PV: celda fotovoltaica, HEM: *hardware energy management* [14].

Por último, enfatizar en la posibilidad de la coexistencia de la tecnología PoF con las fuentes tradicionales de suministro energético. La tecnología PoF permitiría un reemplazo, parcial o total, de aquellas fuentes de suministros, ya sean por conductor o baterías, que actualmente son utilizadas en las estaciones bases a la vez que se utiliza la misma infraestructura basada en fibra óptica para el envío de la energía PoF. Esto último disminuye tanto el coste de implementación del nuevo sistema, así como los asociados al mantenimiento de los ya existentes. La tecnología PoF se convertiría en una segunda fuente de suministro energético al tiempo que le brinda redundancia en potencia eléctrica a aquellos sistemas críticos que garantizan una disponibilidad permanente de la red 5G, véase la Figura 6.10.

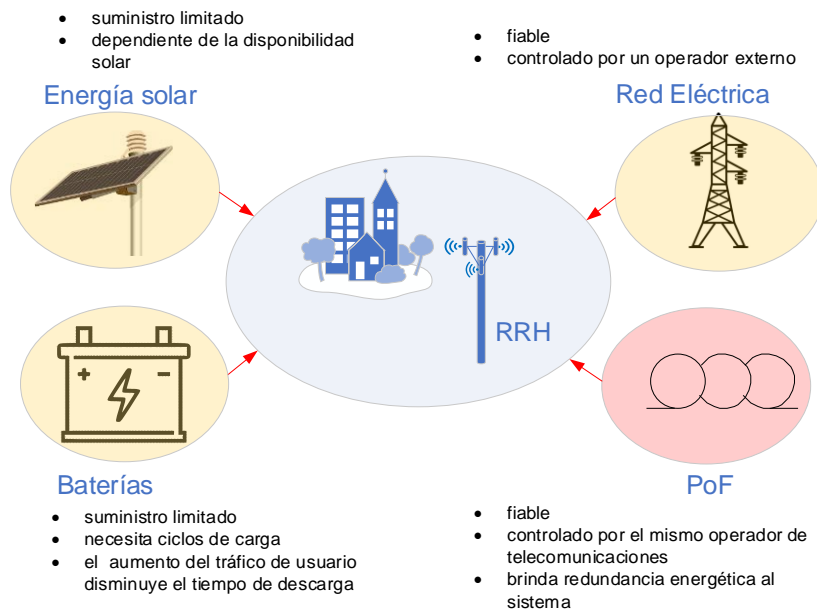


Figura 6.10. Suministro de energía a la RRH utilizando fuentes de energía convencionales y PoF en un escenario 5G.

## 6.2.2 Arquitectura ARoF en blueSPACE

El proyecto blueSPACE, está basado en la transmisión de señales de radio sobre fibra. El concepto de radio analógica sobre fibra (ARoF) de blueSPACE se centra en el envío de señales 5G con modulación OFDM a la frecuencia intermedia IF (IFoF). Los datos generados por la BBU son modulados por los moduladores en cuadratura (señales IQ) para finalmente obtener la frecuencia intermedia (IF), la cual se inyecta en la fibra óptica.

En la propuesta inicial, el conjunto de señales IF moduladas se amplifican y se aplican a los moduladores electroópticos que a su vez son inyectadas al *chip* controlador del *beamforming* óptico (OBFN). Estas señales son enviadas hacia la RRH a través de la fibra MCF, véase la Figura 6.11. En el lado de la RRH se generan las portadoras de RF a partir del batido en el fotodiodo de las componentes espectrales contenidas en la información que viaja por la fibra óptica. El direccionamiento del haz se logra a partir del desfase, controlado por el *chip* OBFN, de las distintas portadoras de RF generadas en la RRH. A pesar de la novedad de la solución que se propone en el proyecto blueSPACE, la propuesta de integración que se incluye en este capítulo no incluye el *chip* OBFN. El motivo fundamental es simplificar la integración del sistema

ARoF con la tecnología PoF. La generación de las diferentes componentes espectrales y el esquema de modulación de la señal ARoF se aborda conforme se desarrollan los diferentes temas a lo largo del capítulo.

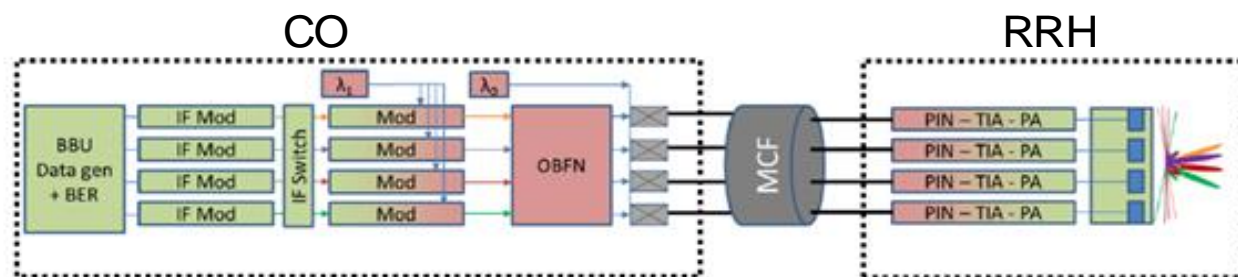


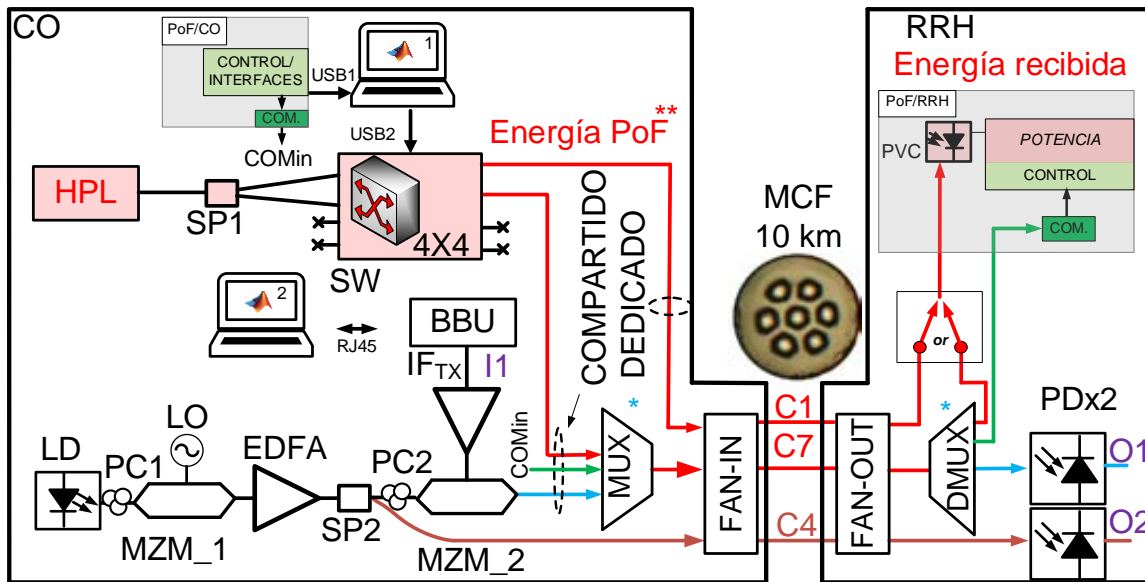
Figura 6.11. Esquema del sistema ARoF propuesto en el marco del proyecto blueSPACE, usando direccionando de haz controlado desde el dominio óptico[14].

### 6.3 Integración del sistema PoF con la tecnología 5G

En el experimento se plantea una solución en la que se integra la tecnología PoF en el *fronthaul* de una red 5G en la que se usa como medio de transmisión la fibra MCF. La sinergia MCF y PoF en el contexto del proyecto tiene varias ventajas: (i) aumento de la capacidad de transmisión de energía sin que suponga un incremento del espacio físico, aplicando técnicas de multiplexación espacial, y (ii) posibilidad de enviar energía a múltiples RRH usando múltiples núcleos. En el contexto de este trabajo los principales objetivos son: (i) diseñar, implementar, caracterizar la integración de la tecnología PoF con el sistema ARoF, y (ii) evaluar el impacto de la transmisión de energía sobre los datos enviados por la BBU en los diferentes escenarios, tomando el valor del BER como figura de mérito. Para alcanzar estos objetivos se implementa el montaje mostrado en la Figura 6.12. Este montaje es la configuración general que se utiliza en todos los experimentos posteriores. La Figura 6.13 muestra una foto panorámica del entorno en donde se desarrollan los experimentos con algunos de sus elementos.

El sistema PoF está integrado por: el láser Raman HPL de 2 W utilizado en los experimentos descritos en capítulos previos como fuente de energía, el divisor óptico SP1, el conmutador óptico de 4 entrada y 4 salidas (SW, 4x4), la MCF (incluyendo *Fan-in* y *Fan-out*), el multiplexor de la CO (MUX), el demultiplexor

de la RRH (DMUX), el subsistema PoF/CO y el subsistema PoF/RRH. Estos 2 últimos elementos se describieron en el capítulo 4 de esta investigación.



\*Representa 2 mux/dmux en cascada

\*\*Sólo una salida esta activa en un instante de tiempo

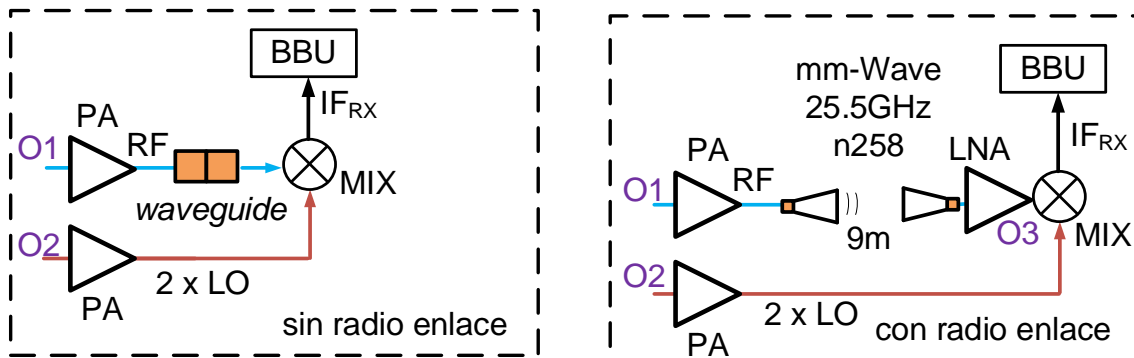


Figura 6.12. Esquema del montaje implementado, donde se muestra la integración de la tecnología PoF en un escenario 5G, desarrollado en el marco del proyecto blueSPACE.

El sistema ARoF está integrado por: la BBU, el láser de datos (LD), 2 controladores de la polarización (PC1, PC2) colocados cada uno de ellos a la entrada de los Mach-Zehnder (MZM\_1, MZM\_2), el oscilador local (LO), el amplificador óptico (EDFA), el divisor óptico SP2, el multiplexor de la CO (MUX), el demultiplexor de la RRH (DMUX), 2 fotodiodos (PDx2), amplificadores de RF (PA, LNA), la guía de onda (*waveguide*) y un par de antenas que operan en la banda milimétrica. Ambos sistemas son controlados



y monitoreados a través de 2 ordenadores desde la CO. El sistema tiene 2 posibles configuraciones: sin radioenlace o con un radioenlace de 9 metros entre las antenas.

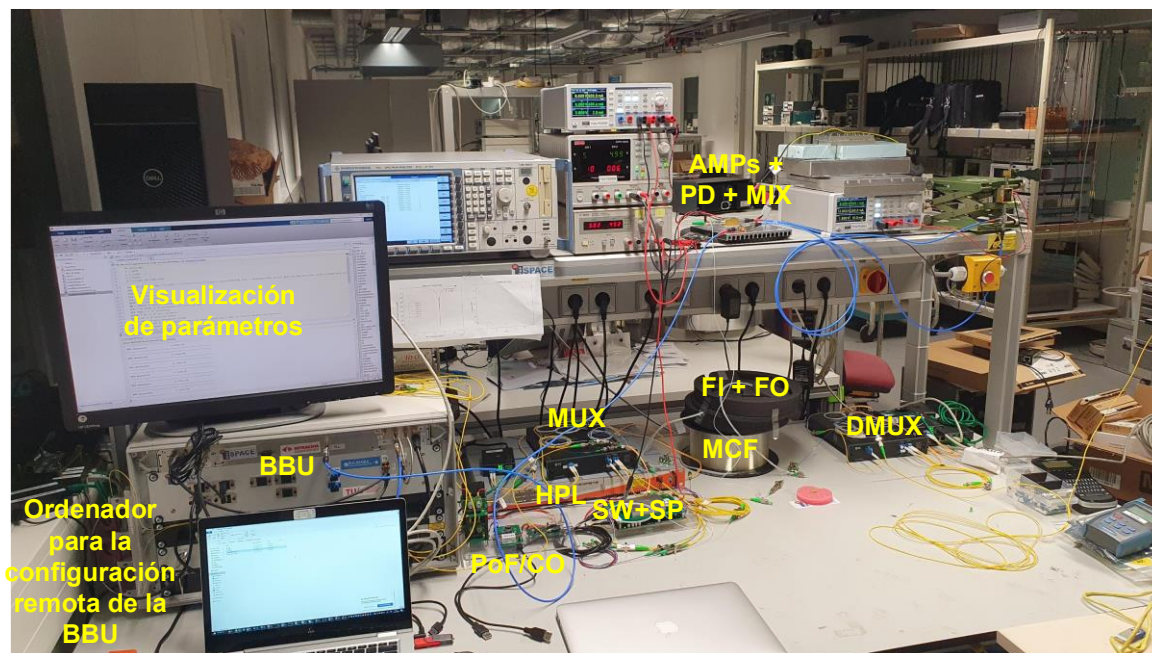


Figura 6.13. Montaje de laboratorio y principales elementos que integran el experimento sinérgico 5G y PoF en el proyecto blueSPACE.

La salida del HPL (1480 nm) se conecta a la entrada del divisor óptico (50:50) SP1. Esta combinación permite generar dos fuentes de energía a partir de la salida del láser HPL; lo cual es equivalente a tener dos láseres virtuales con el control de la potencia de emisión compartido y con capacidad de generar hasta  $\sim 1$  W de potencia óptica. Ambas salidas están conectadas al SW, el cual se controla a través de un puerto USB desde un ordenador. Esta capacidad permite redireccionar dinámicamente, desde una aplicación de control, ambas entradas de potencia a la salida adecuada para enviar la energía a una RRH en concreto. Por otro lado, esta función de conmutación permite seleccionar qué escenario está activo en un instante determinado: compartido o dedicado. Los multiplexores y demultiplexores se usan para implementar estos escenarios permitiendo enviar por un mismo núcleo, en el caso del compartido, los datos ARoF (1550 nm), la energía PoF y el canal de control PoF (1310 nm). La energía que se envía hacia la RRH la gestiona el subsistema PoF/RRH y la energía es convertida con una PVC. Este convertidor está optimizado para operar en el rango de longitudes de onda comprendido entre 1300 nm a 1600 nm, soporta una potencia



óptica máxima de 200 mW y posee una eficiencia de conversión del  $\sim 30\%$ . El subsistema PoF/RRH tiene la capacidad de ser controlado remotamente por el subsistema PoF/CO a través del canal de comunicaciones COM, véase el capítulo 4.

La descripción e implementación del sistema ARoF se aborda conforme se desarrolla el capítulo. Adicionalmente se puede consultar en [15] y en [16].

### 6.3.1 Caracterización del sistema de Radio analógica sobre fibra

El sistema ARoF posee como elemento principal a la BBU, capaz de generar un total 4096 subportadoras, de las cuales solo están activas 3168 espaciadas a 240 kHz, resultando un ancho de banda efectivo de 760,32 MHz y un *bitrate* de 1,4 Gbits/s [15][16].

El primer experimento tiene como objetivo caracterizar algunos de sus parámetros como: la estabilidad temporal del BER, el espectro eléctrico de emisión y el nivel de potencia. Los resultados de estas caracterizaciones sirven de referencia para comparar con otros experimentos.

Antes de iniciar el proceso de análisis es necesario configurar algunos parámetros como tipo de modulación, la frecuencia intermedia de trabajo y el ancho de banda de transmisión. En nuestro caso se configura una modulación QPSK, ya que es la que mayormente se utiliza en los experimentos posteriores. La frecuencia intermedia ( $IF_{TX}$ ) es 5 GHz, pues en conjunto con la frecuencia del oscilador local de 10,25 GHz ( $F_{LO}$ ) se genera la portadora de RF de 25,5 GHz que se utiliza en el proyecto:  $F_{RF} = IF_{TX} + 2 \times F_{LO}$ . Por último, el ancho de banda configurado es aproximadamente de 800 MHz, el cual se corresponde con el máximo posible soportado por la BBU. De esta manera la configuración global que se selecciona se corresponde con los parámetros que con mayor frecuencia se utilizan en el proyecto y por otro lado, se corresponde con el escenario más crítico en términos del ancho de banda de los datos.

Para el análisis de estabilidad temporal del BER se configura el módulo de frecuencia intermedia de la BBU en modo *back-to-back* (B2B). En esta configuración se conectan entre sí la salida y la entrada de frecuencia intermedia ubicadas en la parte frontal de la BBU. Por otro lado, la potencia de la salida  $IF_{TX}$  es atenuada con diferentes atenuadores eléctricos:  $\alpha_{IF} = 1, 3, 4, 10$  y  $14$  dB. Estos valores de atenuación simulan las posibles pérdidas de inserción introducidas por el sistema ARoF. En cada caso, con la ayuda

de un *script* implementado en Matlab, se analiza la estabilidad del BER en un intervalo de tiempo de 600 s con un tiempo de muestreo de 3 s y finalmente se calcula la desviación estándar (STD). La Tabla 6.2 y la Figura 6.14 muestran los resultados del análisis donde la curva discontinua se corresponde con el comportamiento del BER cuando  $\alpha_{IF} \leq 4$  dB. En este caso el valor medio del BER se mantiene siempre por debajo de  $1E-9$ ; mientras que para  $\alpha_{IF} = 10$  dB y  $\alpha_{IF} = 14$  dB se obtiene  $8,97E-8$  y  $1,87E-5$  respectivamente. El valor del BER, como era de esperar, aumenta a medida que disminuye la potencia de la señal de la frecuencia intermedia. La STD permanece inferior al valor medio y se incrementa conforme aumenta el nivel de atenuación. Adicionalmente se observa que la estabilidad temporal del BER tiene un comportamiento similar a una onda cuadrada periódica, modulada por una función exponencial. Este comportamiento se aprecia más cuando  $\alpha_{IF} = 14$  dB y es propio de la BBU.

Tabla 6.2. Análisis de la estabilidad de la BBU, para diferentes niveles de atenuación de la frecuencia intermedia.

Atenuación [dB]	Valor medio	STD
0 a 4	<1E-9	<1E-9
10	8,97E-8	1,41E-8
14	1,87E-5	1,96E-6

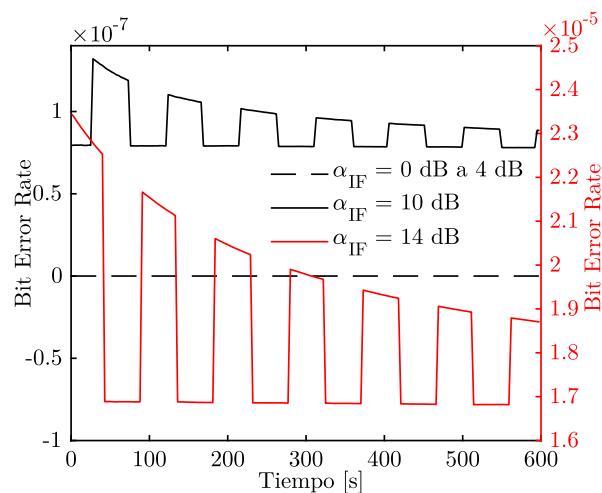


Figura 6.14. Análisis de la estabilidad de la BBU en configuración B2B, para una modulación QPSK.

En el siguiente estudio se caracteriza la salida de frecuencia intermedia ( $IF_{TX}$ ) cuando la BBU se configura con una modulación QPSK y un ancho de banda de  $\sim 800$  MHz. Los resultados se muestran en la Figura 6.15, donde se aprecia la comprobación del ancho de banda y la IF configurada. El espectro de la Figura 6.15(a) se corresponde con una potencia eléctrica aproximada de  $-12$  dBm ( $\alpha_{IF} = 0$  dB).

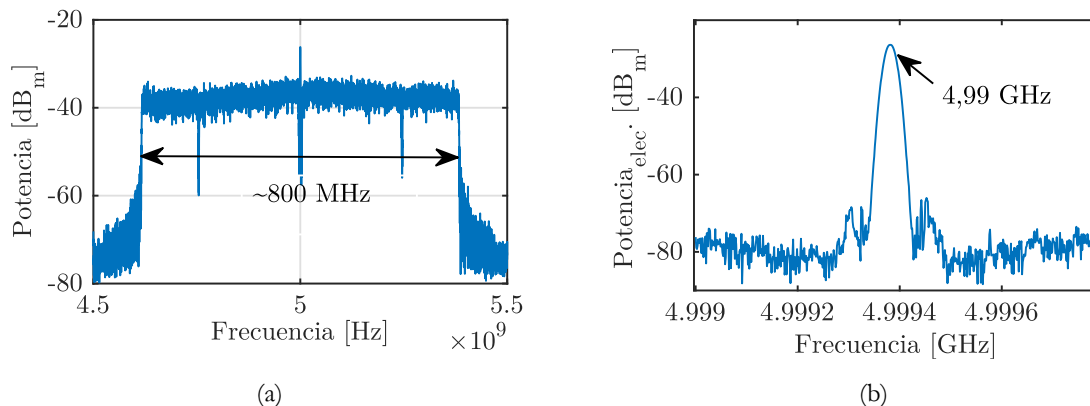


Figura 6.15. Caracterización de la frecuencia intermedia ( $IF_{TX}$ ) de la BBU con una modulación QPSK: (a) ancho de banda; (b) frecuencia central de la frecuencia intermedia.

Una vez caracterizado el puerto de salida de la frecuencia intermedia, la BBU se integra al dominio óptico lo cual se realiza a través de dos moduladores Mach-Zehnder (MZM\_1, MZM\_2) como se muestra en la Figura 6.16. El láser que se usa (LD) opera a una longitud de onda de 1550 nm con una potencia óptica de emisión de 16 dBm y se inyecta en el MZM\_1. El puerto de RF excita al LO con una frecuencia de modulación de 10,25 GHz ( $F_{LO}$ ). El punto de operación del MZM\_1 se configura en modo supresión de portadora óptica, obteniéndose en su salida dos tonos con una separación de 20,5 GHz ( $2 \times F_{LO}$ ). El voltaje de polarización se ajusta manualmente hasta lograr una relación de extinción de unos 25 dB, véase la Figura 6.17.

Ambos tonos son amplificados por un EDFA configurado en modo control automático de la potencia de salida (APC, por sus siglas en inglés), que se ajusta a un valor de 18 dBm. Adicionalmente se utiliza un divisor óptico con una relación de división de 70:30. La salida de mayor potencia (70 %) es conectada al MZM\_2. Este modulador se configura en modo cuadratura y es excitado con la señal de salida del puerto de frecuencia intermedia ( $IF_{TX}$ ) de la BBU. Debido al bajo nivel de la señal  $IF_{TX}$  se coloca un amplificador o *driver* intermedio antes de conectarse al MZM\_2. La rama del 30 % del SP2 se inyecta directamente a la MCF y se utiliza en la RRH para demodular la señal ARoF. El esquema también incluye en la entrada de

MZM\_1 y MZM\_2 un controlador de la polarización (PC1, PC2) para optimizar la potencia inyectada en ambos MZM.

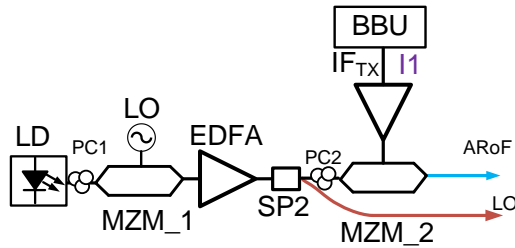


Figura 6.16. Configuración de la etapa de salida de la BBU en el dominio óptico. Generación de las señales LO y ARoF.

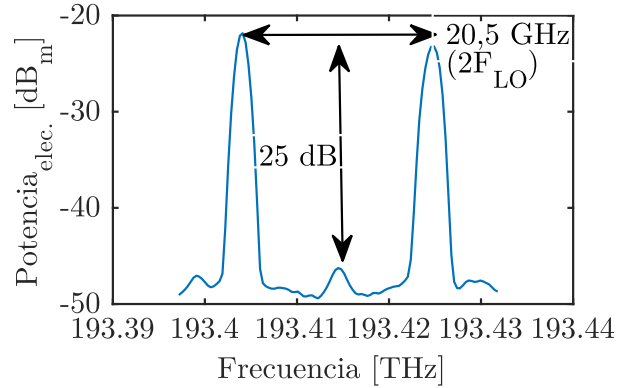


Figura 6.17. Espectro de salida del LO, cuando MZM\_1 opera en modo supresión de portadora óptica

Adicionalmente se caracteriza la potencia óptica en las salidas ARoF y LO, resultando 5,71 dBm y 11,66 dBm respectivamente. La potencia de salida de 5,71 dBm es obtenida justo cuando MZM\_2 es configurado en el punto de operación de cuadratura donde este valor es verificado continuamente. La Figura 6.18 muestra el espectro de salida que finalmente es inyectado en el FI de la fibra MCF.

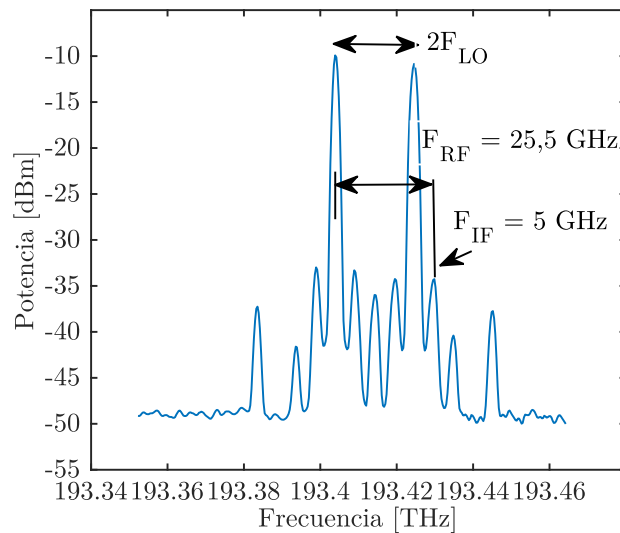


Figura 6.18. Señal ARoF con los tonos de datos a la frecuencia intermedia IF.

El LO es inyectado en el núcleo 4, mientras que para la señal ARoF se utiliza el núcleo 7. La portadora de RF se genera en la RRH a partir de una detección heterodina en el PD que incluye, entre otros componentes, la portadora de RF de interés la cual se obtiene como:  $F_{RF} = IF_{TX} + 2 \times F_{LO}$ . En el sistema se utilizan otros elementos de RF para la amplificación y el acondicionamiento de las señales ARoF y LO.

### 6.3.2 Implementación y caracterización del sistema PoF

Una vez que se caracteriza el sistema ARoF se procede al montaje del sistema PoF, el cual incluye los 2 tipos de escenarios: compartido y dedicado. La Tabla 6.3 muestra la funcionalidad de cada núcleo en el experimento.

Tabla 6.3. Funcionalidad de los núcleos en la fibra MCF

MCF (núcleo)	Funcionalidad	PoF/Escenario
1	PoF	Dedicado
4	BBU/ $F_{LO}$	-
7	BBU/ARoF + PoF	Compartido

Por otro lado, el experimento está limitado por la máxima potencia ( $P_{max\_FI}$ ) que se puede inyectar en el FI de la MCF, la cual es de 500 mW. El objetivo de esta limitación es evitar posibles daños en el dispositivo que comprometa el desarrollo del proyecto. No obstante, esta potencia se puede incrementar si se emplea en el desarrollo del sistema dispositivos que soporten potencias mayores.

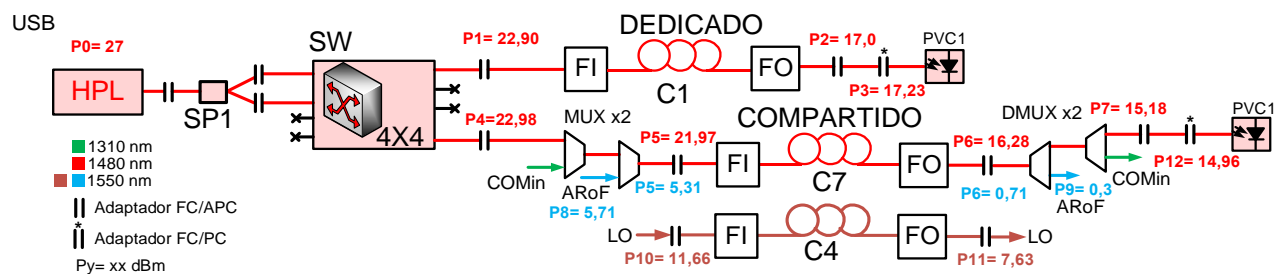


Figura 6.19. Esquema simplificado de la integración de los sistemas ARoF y PoF.

El primer parámetro que se determina en el experimento es la potencia máxima que se puede configurar en el láser HPL ( $P_{max\_HPL}$ ), para cumplir la condición de  $P_{max\_FI}$ . Este valor depende de las pérdidas de inserción (IL) que introducen todos los elementos intermedios entre la salida del láser HPL y la entrada del

FI, en ambos escenarios. El valor de IL determina la potencia en los puntos P1 y P5, y se determina configurando en el láser HPL un valor de 27 dBm ( $\sim 500$  mW), lo cual garantiza que  $P_{max\_FI} < 500$  mW (27 dBm), véase la Figura 6.19. De las mediciones que se llevan a cabo una vez que se monta el experimento resulta que: P1 y P5 cumplen la condición de  $P1 > P5$ . De esta manera, el valor de P1 limita la máxima potencia que se puede configurar en el láser HPL. Teniendo en cuenta lo anterior el valor de  $P_{max\_HPL}$ , se calcula como:

$$P_{max\_HPL} = 27 \text{ dBm} + P_{max\_FI} - P1 \quad \text{Ec. 6.1}$$

A continuación se obtiene que el valor máximo que se puede configurar en el láser HPL cumpliendo la condición de  $P_{max\_FI}$  es de 31,09 dBm ( $\sim 31$  dBm), lo que supone un incremento de 4,09 dB con respecto a la condición inicial de la potencia óptica que se configuró en el láser HPL (27 dBm). Finalmente, en el experimento se configura una potencia máxima de 31 dBm, lo cual representa un incremento de 4 dB respecto a la condición inicial.

Tabla 6.4. Corriente de cortocircuito de la PVC y tensión en circuito abierto para diferentes niveles de potencia del HPL [17].

$P_{HPL}$ [dBm]	$P_{PVC}$ [dBm]	$I_{sc}$ [mA]	$V_{oc}$ [V]
ESCENARIO DEDICADO			
29	19,19	10,14	3,95
30	20,21	13,04	3,97
31	21,23	15,98	3,99
ESCENARIO COMPARTIDO			
29	16,98	6,24	3,87
30	17,96	7,95	3,91
31	18,96	9,87	3,96

Por otro lado, se determinan las potencias de todos los puntos intermedios ( $P_x$ ) representados en la Figura 6.19. A partir de todos los valores medidos se pueden determinar los parámetros típicos que caracterizan a los sistemas PoF como: atenuación del medio de transmisión, valores de eficiencia SEE en cada escenario y potencias óptica y eléctrica máximas recibidas en el receptor. De los datos anteriores

resulta que las pérdidas que introduce la MCF son de 5,90 dB (C1) y 5,69 dB (C7) para los casos dedicado y compartido respectivamente; incluyendo al FI y al FO. Las potencias ópticas máximas recibidas, al configurar una potencia de 31 dBm, son de 21,23 dBm (dedicado) y de 18,96 dBm en el caso compartido.

Adicionalmente se caracteriza la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de la PVC cuando las potencias configuradas en el HPL ( $P_{HPL}$ ) son: 29 dBm, 30 dBm, y 31 dBm. La Tabla 6.4 muestra los resultados del análisis. Las diferencias entre ambos escenarios son producto de dos razones fundamentalmente: las pérdidas de inserción adicionales, típicas de los escenarios compartidos, a causa del MUX/DMUX y por las diferencias en términos de pérdidas de inserción que existen entre ambos caminos ópticos debido a los adaptadores, atenuación de la MCF y pérdidas de inserción del FI/FO. Por último, se calcula el valor de la eficiencia SEE en los dos escenarios cuando se configura en el láser HPL la máxima potencia;  $P_{HPL} = 31$  dBm. En esta condición se obtiene que en el escenario compartido la SEE es aproximadamente un  $\sim 2\%$  y en el caso del escenario dedicado es  $\sim 3\%$ . Como conclusión, es más eficiente enviar energía usando el escenario dedicado; por esta razón es el escenario que se emplea en el ejemplo de aplicación que se discute en el epígrafe 6.4

### 6.3.3 Caracterización de la función de transferencia en un escenario compartido

Como se comentó anteriormente en este experimento se evalúa el impacto de la tecnología PoF sobre el sistema ARoF, implementado en el marco del proyecto blueSPACE. Entre los objetivos fundamentales están: (i) analizar el comportamiento de la función de transferencia del sistema: *power fading* y dispersión cromática, y (ii) analizar el comportamiento del BER en el escenario dedicado y compartido para 3 tipos de modulaciones: QPSK, 16 QAM y 64 QAM.

La medición de la función de transferencia de la MCF permite estimar el comportamiento del BER a causa del impacto combinado de la dispersión cromática y los efectos no lineales Raman, SPM y el XPM, de gran relevancia en los sistemas PoF. El impacto del efecto Brillouin no se considera ya que el ancho de línea del láser HPL es mayor que 2 nm [18]. A partir de estas caracterizaciones se obtiene una estimación práctica de la dispersión cromática de la fibra óptica y el punto crítico de la frecuencia para el cual se obtiene el máximo deterioro de la señal ARoF (*power fading*), véase el capítulo 5. La función de transferencia se mide sólo en el escenario en el que los datos y la energía comparten el mismo núcleo (núcleo 7). Inicialmente en

el análisis se caracteriza la función de transferencia en ausencia de transmisión de energía (HPL= OFF), lo cual permite estimar la dispersión cromática. Para ello se emplea el analizador de redes N9918A para determinar el parámetro de transmisión S21, el cual permite determinar la respuesta del sistema en régimen de transmisión.

En el análisis, el N9918A se configura con una potencia de salida de -20 dBm, 1601 puntos, una resolución espectral de 100 Hz y un ancho de banda de 26,5 GHz. La Figura 6.20 muestra un esquema simplificado del sistema de medición en el que se han omitido MZM\_1, LO, EDFA y SP2. Para medir la función de transferencia, se desactiva al LO. Inicialmente se caracteriza la función de transferencia en ausencia de transmisión de energía, lo cual permite estimar la dispersión cromática. Para llevar a cabo la medición es necesario realizar una calibración previa al equipo, la cual se realiza inyectado la excitación del analizador a través del *driver* del MZM\_2 (punto I1) y midiendo la respuesta en la salida del PD (punto O1). En la calibración se mantiene la configuración del sistema inicial sin la fibra MCF, con el objetivo de eliminar el efecto en la medición del resto de elementos del sistema.

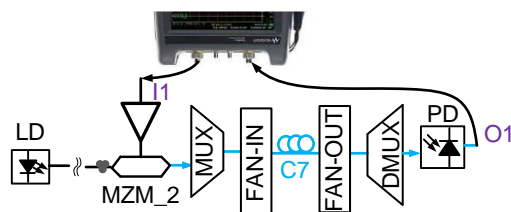


Figura 6.20. Medición de la función de transferencia de la MCF.

Una vez que se finaliza el procedimiento de calibración, se procede a medir el parámetro de transmisión S21. Antes de la medición se comprueba que la potencia óptica en la salida del MZM\_2 es de 5,71 dBm, ya que la función de transferencia depende de la potencia óptica (a causa del efecto SPM, véase el capítulo 5). La Figura 6.21 muestra la medición y la estimación teórica de la función de transferencia de la MCF, en la que se observa que el valor de la frecuencia crítica experimental ( $f_c^*$ ) es aproximadamente 18,20 GHz, mientras que la frecuencia crítica teórica ( $f_c$ ) es de 18,08 GHz. Para el cálculo de  $f_c$  se considera que el valor de la dispersión del núcleo 7 es de 19,1 ps/nm/km. Considerando los valores anteriores se obtiene que la dispersión efectiva ( $D^*$ ) es de 18,85 ps/nm/km [19]. Por otro lado, al momento de realizar la



medición anterior, se observa que existen inestabilidades temporales en el comportamiento de la función de transferencia, que se manifiesta en un desplazamiento de la frecuencia crítica en función del tiempo. Una de las causas probables puede ser las inestabilidades en potencia a la salida del MZM\_2 del sistema ARoF. Por tal razón, se analiza dicho comportamiento en intervalos de tiempo ( $t$ ) de 5 minutos, véase la Figura 6.22.

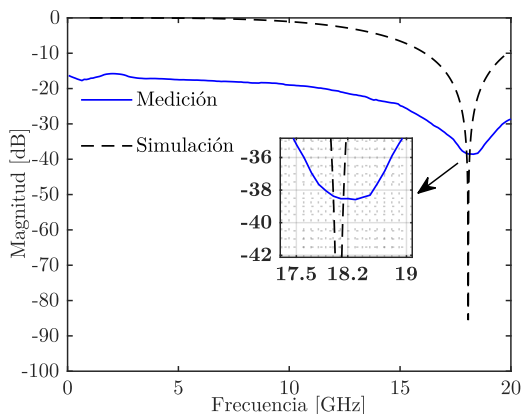


Figura 6.21. Función de transferencia teórica y experimental de la MCF, medida en el núcleo 7.

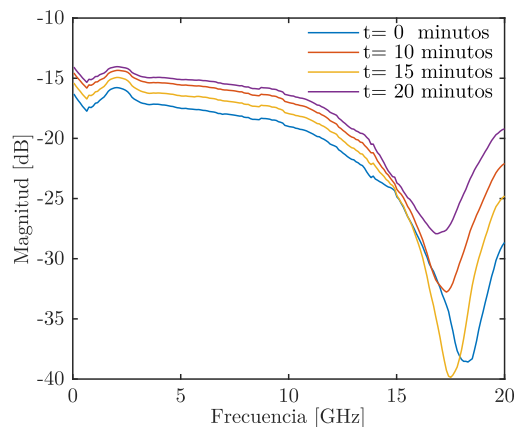


Figura 6.22. Inestabilidades temporales en la función de transferencia en el núcleo 7.

La traza que se toma para el instante  $t=0$  s, se corresponde con el punto de operación ideal en cuadratura configurado en el MZM\_2; el resto de las trazas son muestra de las inestabilidades del punto de operación. Del análisis en frecuencia, resulta que las variaciones en el valor de las frecuencias críticas están acotadas al intervalo de 17 GHz a  $\sim 18,5$  GHz. Estos desplazamientos en frecuencia aunque no son deseados, se corresponden con valores de  $f_c$  que están alejados de las frecuencias de interés del sistema ARoF que viajan por el núcleo 7 de la MCF: IF,  $F_{LO}$ . Esta condición minimiza el impacto de este comportamiento sobre el valor del BER; no obstante puede inducir a algunas inestabilidades en su valor. De igual manera se analiza el cambio de la función de transferencia en el núcleo 7 de la MCF cuando se configura en el láser HPL una potencia de 31 dBm. En la Figura 6.23, se observa la función de transferencia del sistema con y sin el láser HPL encendido. Para la estimación de la frecuencia crítica se aplica a las curvas medidas un ajuste gaussiano de orden 8 (curvas denotadas con el símbolo \*). Del análisis se obtiene que existe un incremento de 50 MHz de la  $f_c^*$  como consecuencia de la transmisión de la potencia. Este comportamiento fue estudiado en el capítulo 5 para el caso de fibras SMF, siendo equivalente al que se mide con la fibra MCF. La medición se realiza con una resolución espectral de 5 MHz. Para analizar el posible efecto de amplificación a causa del fenómeno SRS, se analiza el espectro óptico de la señal ARoF, justo en la salida del demultiplexor en

la RRH. Como resultado se obtienen los espectros mostrados en la Figura 6.24. En la misma se observa un incremento en la potencia de salida de 2,65 dB. La potencia óptica del espectro sin amplificar es de 0,26 dBm y amplificada es de 2,91 dBm.

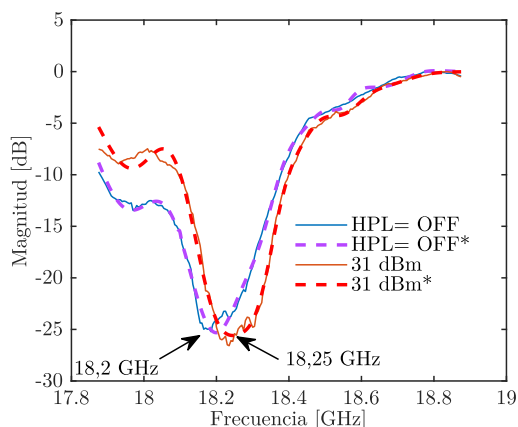


Figura 6.23. Función de transferencia del núcleo 7 de la MCF para una potencia del HPL= 31 dBm.

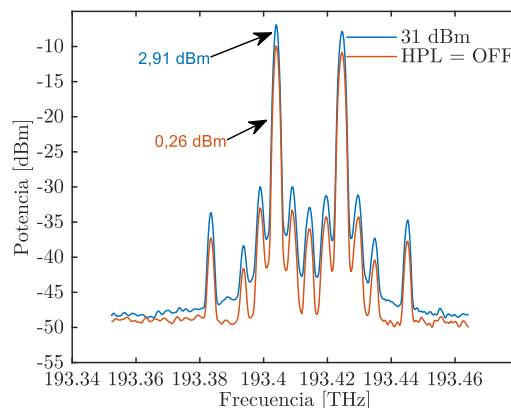


Figura 6.24. Amplificación Raman de la señal ARoF.

### 6.3.4 Impacto de la transmisión de energía en el sistema ARoF

Una vez conocidas las funciones de transferencias se evalúa el impacto de la transmisión de energía en el comportamiento del BER, para diferentes escenarios y con diferentes modulaciones, véase la Tabla 6.5. Los análisis se llevan a cabo en las dos configuraciones del sistema ARoF (véase la Figura 6.25) y se analiza el impacto de la transmisión de energía cuando se configuran en la BBU las modulaciones QPSK, 16 QAM y por último 64 QAM. En los análisis se usa el mismo *script* de adquisición empleado anteriormente, configurado con un intervalo de muestreo ( $t_m$ ) de 3 s y un tiempo total de adquisición ( $t_{adq}$ ) de 72 s. En los análisis se configura el láser HPL en el rango de potencias comprendidas entre 27 dBm a 31 dBm, en pasos de 1 dB. El primer análisis que se realiza es en un escenario compartido, sin radioenlace (sRadio) y para las modulaciones QPSK, 16 QAM y 64QAM, configuradas en la BBU secuencialmente. Para evaluar el impacto en el BER de la transmisión de potencia es necesario tener un valor medio de referencia con el cual comparar, una vez que se analicen los diferentes casos. Estos valores se miden en la condición de reposo del sistema, o lo que es lo mismo, en ausencia de transmisión de energía (HPL apagado). Como



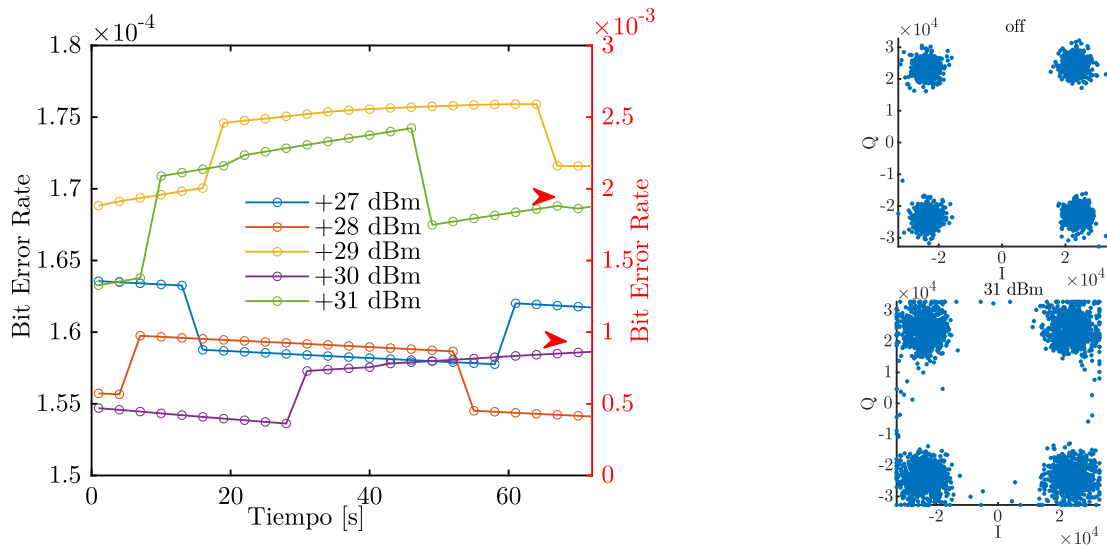


Figura 6.26. Comportamiento del BER para una modulación QPSK, diferentes niveles de potencia del HPL y sin radioenlace(derecha); constelación (izquierda).

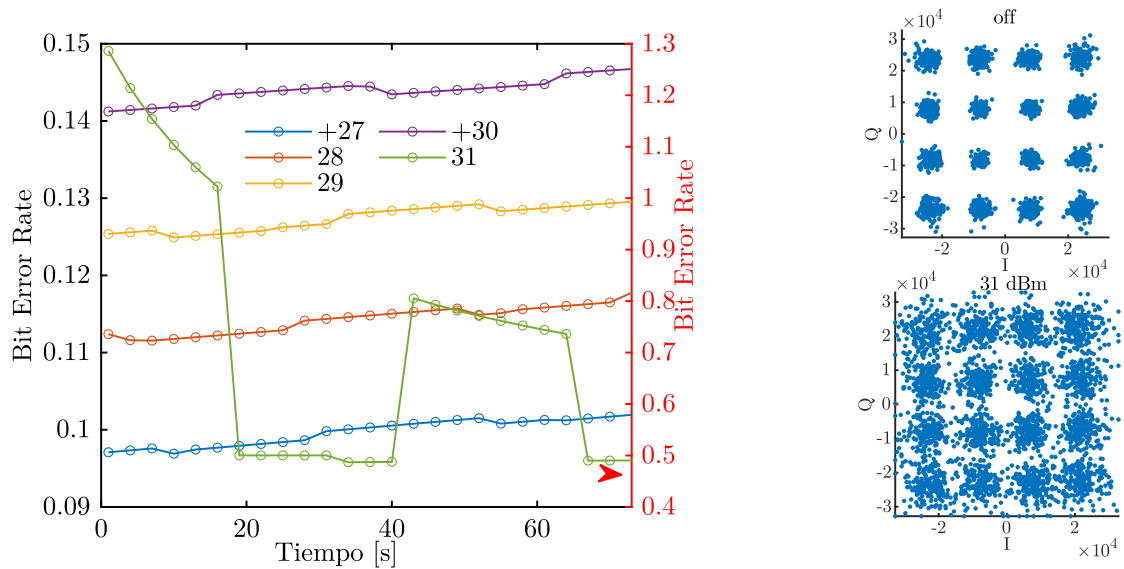


Figura 6.27. Comportamiento del BER para una modulación 16 QAM, diferentes niveles de potencia del HPL y sin radioenlace(derecha); constelación (izquierda).

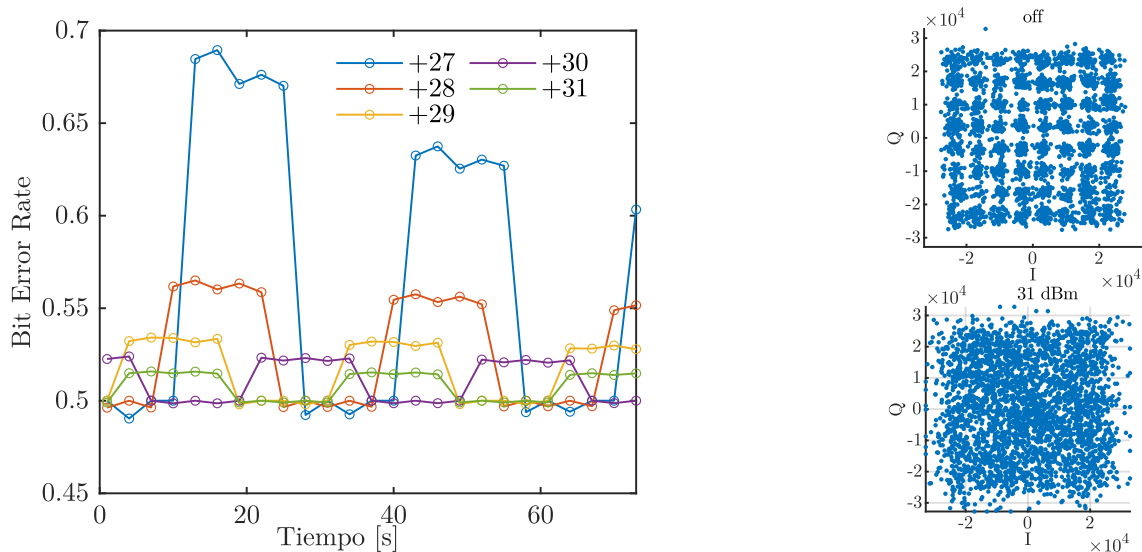


Figura 6.28. Comportamiento del BER para una modulación 64 QAM, diferentes niveles de potencia del HPL y sin radioenlace(derecha); constelación (izquierda).

Otro aspecto importante es el cumplimiento del estándar 5G para los diferentes niveles de potencias para cada una de las modulaciones. Como resultado se obtiene que sólo las potencias inferiores a 29 dBm de la modulación QPSK cumplen con el estándar, alcanzando un valor máximo de EVM del 15,7 %. El resto de los casos superan los límites de 19 %, 14 % y 9 %, establecidos para las modulaciones QPSK, 16 QAM y 64 QAM respectivamente. Los valores de EVM se visualizan en la aplicación de Matlab.

Para complementar el análisis de los resultados anteriores, se calcula el valor medio y la desviación estándar (STD) del valor del BER para cada una de las potencias configuradas en el HPL. La STD se representa para cada valor de potencia usando barras de errores, véase la Figura 6.29; los valores de referencia se corresponden con el láser HPL apagado. Como se observa en la figura, por lo general, el comportamiento del BER se deteriora ligeramente con el aumento de la energía inyectada, aunque en la modulación QPSK se observa una mejoría para potencias menores de 29 dBm.

En esta última, y en la modulación 16 QAM se aprecia que para las potencias bajas la pendiente de la curva es casi cero mientras que a partir de 29 dBm, en la modulación QPSK, y en 30 dBm, para la modulación 16 QAM, las pendientes aumentan considerablemente. Este cambio de tendencia es principalmente debido a que el ruido del láser HPL se incrementa en el rango de potencia analizado y es transferido al canal de datos, como se describe en el capítulo 5. En el análisis de la modulación 64 QAM

se observa una tendencia lineal con la pendiente cercana a cero. Por otro lado, analizando el comportamiento de la desviación estándar (barras de errores), se observa que en todos los casos es menor que el valor medio correspondiente.

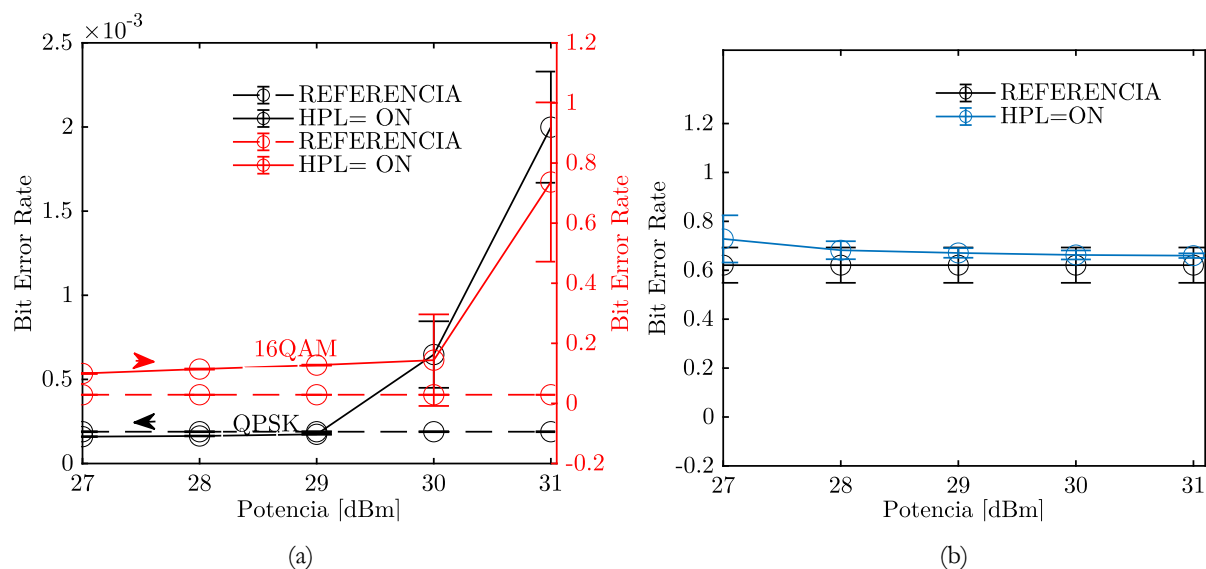


Figura 6.29. Análisis del valor medio y de la STD para las diferentes modulaciones; sin radioenlace: (a) QPSK, 16 QAM; (b) 64 QAM.

En el segundo análisis se configura un enlace inalámbrico al escenario compartido. En esta configuración se analiza el comportamiento del sistema cuando la modulación configurada en la BBU es QPSK. Al igual que en el experimento anterior se obtiene el valor medio del BER, cuando el láser está apagado, cuyo resultado es  $5,32E-4$ . Adicionalmente se miden los valores instantáneos del BER y se calculan los valores medios para cada potencia configurada en el láser HPL, observándose una ligera mejora en presencia de la transmisión de energía, véase la Figura 6.30 y la Figura 6.31.

El último experimento que se lleva a cabo es un escenario dedicado y se observa que no existe una diferencia significativa en los valores instantáneos del BER, entre la condición del láser HPL apagado con respecto a cuando está configurado a 31 dBm (peor caso). Finalmente, se obtienen los siguientes valores medios del BER:  $1,71E-4$ ,  $1,31E-2$  y  $2,61E-1$  para las modulaciones analizadas: QPSK, 16 QAM y 64 QAM. Como se observa en esta condición, los valores del BER son muy similares a los mostrados en el estudio del escenario compartido cuando el láser HPL está apagado. Por tanto, se concluye que el impacto de la tecnología PoF es mínimo.

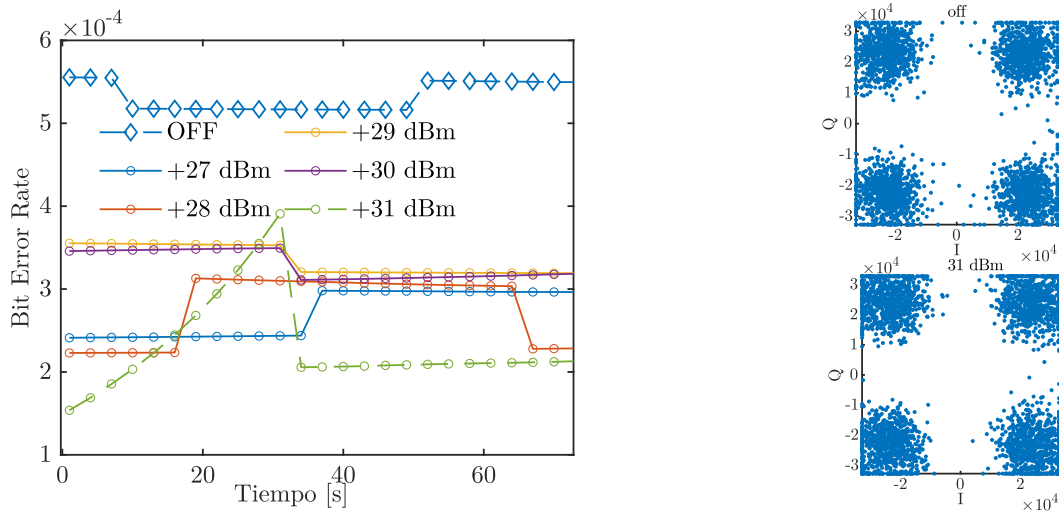


Figura 6.30. Comportamiento del BER para una modulación QPSK, diferentes niveles de potencia del HPL y con radioenlace(derecha); constelaciones (izquierda).

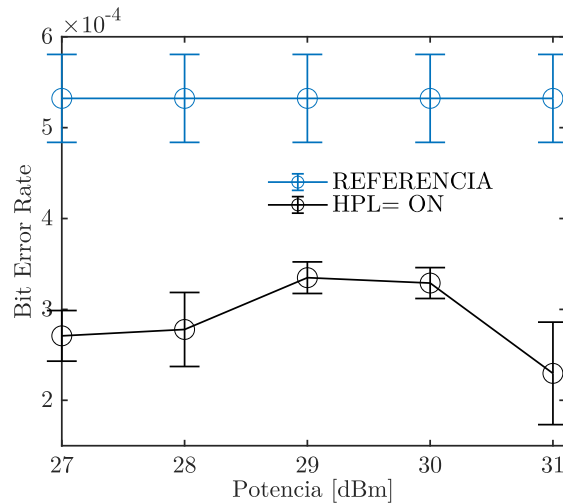


Figura 6.31. Análisis del valor medio y de la STD para la modulación QPSK con radioenlace.

#### 6.4 Demostrador: Optimización energética en el *fronthaul* óptico de una red 5G

En este epígrafe se discute la implementación de 2 soluciones de PoF desarrolladas en el marco del proyecto blueSPACE. La primera de ellas es un demostrador basado en los sistemas PoF y ARoF discutidos en los epígrafes previos y en la segunda solución se utiliza una fibra SMF. Ambos desarrollos están

centrados en demostrar la viabilidad de utilizar medios de transmisión monomodo para la gestión de la eficiencia energética en la RRH. La importancia de este tema se abordó en el epígrafe 6.2 .

El Demostrador se implementa en un escenario 5G, en donde sus elementos se encuentran ubicados en dos localizaciones diferentes: Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) y en la Universidad Tecnológica de Eindhoven (TUE). En la UC3M está ubicada una parte del sistema de control, que comprende un Agente PoF/UC3M y el Agente de Movilidad, véase la Figura 6.32.

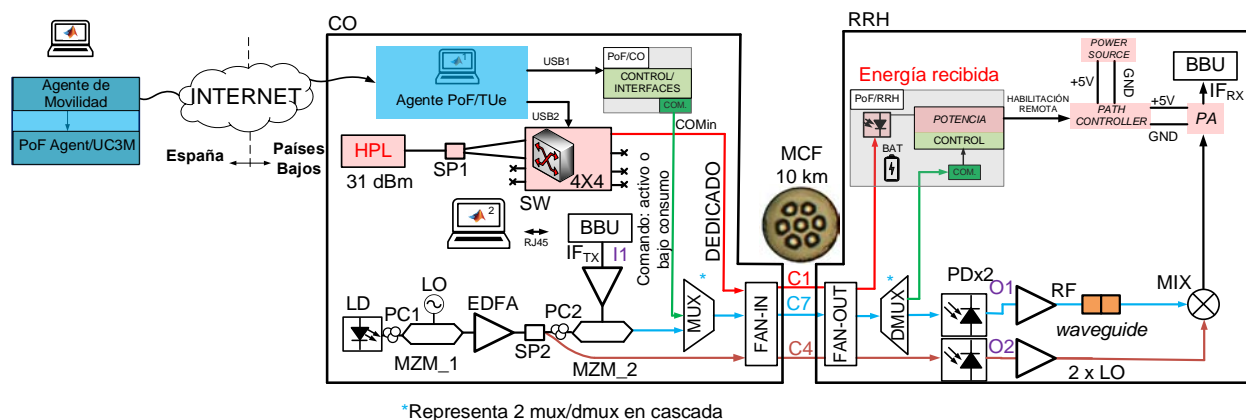


Figura 6.32. Esquema del Demostrador desarrollado en el marco del proyecto blueSPACE.

Las funcionalidades de este último elemento se enunciaron en el capítulo 4. En TUE, están ubicados el resto de los elementos, integrados por el *hardware* del sistema PoF, ARoF y adicionalmente el Agente PoF/TUe. Ambos agentes soportan conectividad a través de una interfaz Ethernet, lo cual permite intercambiar información entre ambas localizaciones a través de internet. Por otro lado, el subsistema PoF/CO utiliza el canal de control COM para enviar información con la RRH. Teniendo en cuenta lo anterior y los posibles flujos de datos el Agente PoF/UC3M puede controlar y recuperar la información de la RRH, ubicada en TUE.

Al igual que en sistemas previos, se utiliza el láser HPL y se configura a una potencia máxima de emisión de 31 dBm. En este escenario la potencia óptica que llega a la PVC es de 21,23 dBm, lo cual significa unas pérdidas de 9,77 dB. Por otro lado, considerando la eficiencia típica de conversión de este convertidor (~30 %) se obtiene que la potencia eléctrica máxima que se entrega al subsistema PoF/RRH es de 39,82 mW. Este nivel de potencia es insuficiente para el completo funcionamiento del subsistema PoF/RRH.



Por esta razón con el objetivo de minimizar el consumo se inhabilita el canal ascendente de la tarjeta COM. Es decir, en el demostrador el subsistema PoF/RRH sólo recibe los comandos generados por el Agente PoF/UC3M. El subsistema PoF/RRH también incluye una batería de litio recargable que se utiliza como respaldo energético, permitiendo su funcionamiento en ausencia de PoF.

Adicionalmente, en el lado de la RRH se utiliza un amplificador (PA) conectado al subsistema PoF/RRH y controlado con la ayuda de una tarjeta auxiliar alimentada por el sistema PoF. El PA está conectado a la entrada de frecuencia intermedia de la BBU, lo cual permite habilitar o inhabilitar la recepción de la señal ARoF en función del estado de su alimentación, véase la Figura 6.33.

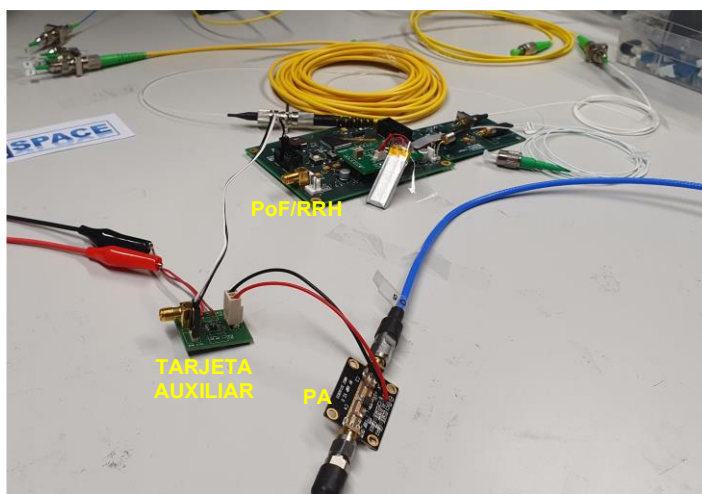


Figura 6.33. Control del amplificador PA por el subsistema PoF/RRH.

En la demostración del proyecto blueSPACE, la capacidad del control de la alimentación del PA por el subsistema PoF/RRH se extiende hasta el Agente PoF/UC3M ubicado en la UC3M. Esta nueva funcionalidad permite gestionar desde una localización remota (UC3M) el consumo energético de la RRH en función de criterios de ahorro preestablecidos. El estado del PA se determina por la ubicación de un usuario simulado en el Agente de Movilidad. En el demostrador el escenario de simulación comprende un área de 1 km<sup>2</sup> en el que se incluyen 2 microceldas (P1, P2) y 1 usuario, véase la Figura 6.34. El Agente PoF/UC3M se encarga de generar y enviar el comando adecuado hacia el subsistema PoF/RRH usando como pasarela al subsistema PoF/CO. El intercambio de información cumple con el protocolo abordado

en el capítulo 4. Para modificar el estado de la alimentación del PA el Agente PoF/UC3M utiliza los comandos: ENTER\_SLEEP\_MODE y OUT\_SLEEP\_MODE, véase el capítulo 4.

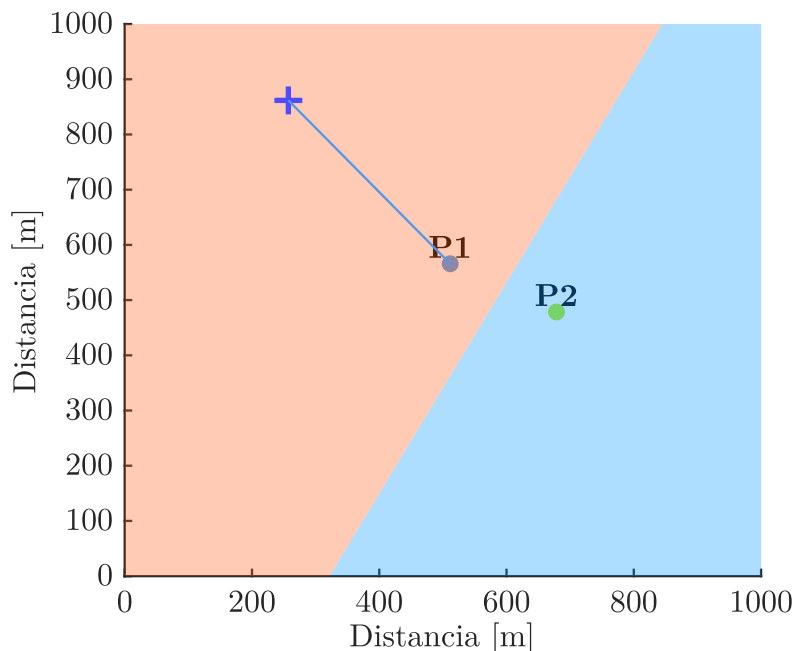


Figura 6.34. Mapa generado por el Agente de Movilidad con 2 celdas (P1, P2) y 1 usuario.

El segundo experimento viene a cubrir las limitaciones que tiene el Demostrador anterior. Entre sus limitaciones más importantes están:

- no se puede configurar una potencia en el HPL superior a los 31 dBm limitada por la potencia umbral soportada por el FI;
- el escenario compartido no suministra la suficiente energía al subsistema PoF/RRH, para llevar a cabo las funcionalidades del control del PA;
- no se puede validar el control dinámico y redireccionamiento de la energía usando el conmutador óptico (SW), ya que en esta aplicación el escenario compartido no es funcional. El SW permite conmutar entre ambos escenarios.

Teniendo en cuenta lo anterior, se implementa el sistema que se muestra en la Figura 6.35. El objetivo fundamental del sistema es aumentar la capacidad de transmisión y cubrir las limitaciones anteriores.

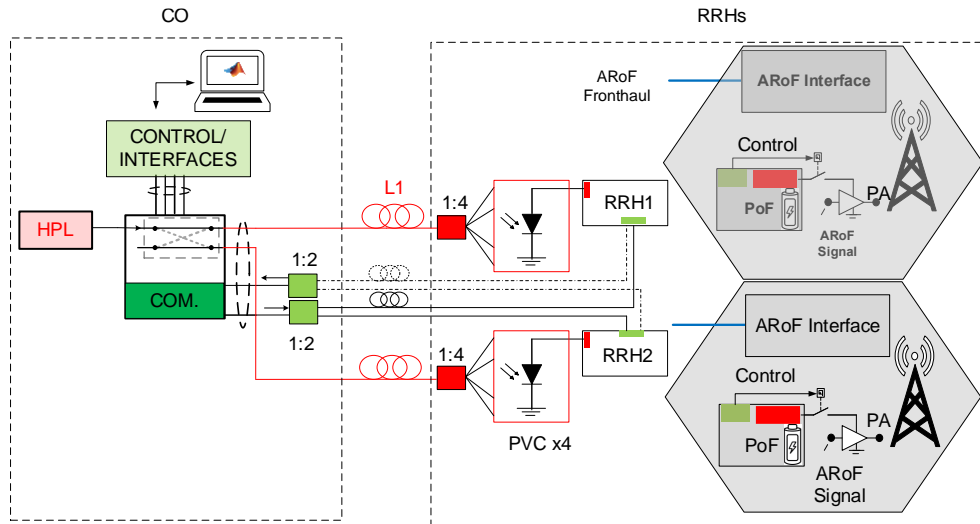


Figura 6.35. Esquemático del sistema PoF dentro de una configuración C-RAN, basado en fibra SMF [20].

El mismo incluye: un subsistema PoF/CO, un conmutador óptico, dos subsistemas PoF/RRH (RRH1, RRH2), el HPL, y un ordenador con la aplicación de control (véase el capítulo 4). La Figura 6.36 muestra el montaje de laboratorio [20]. El sistema emplea 3 fibras SMF G652.D, 2 de ellas para las comunicaciones de enlace ascendente/descendente y una fibra de una longitud de unos 14,43 km de SMF (14,429 km medidos con OTDR) para la transmisión de energía. En el lado de la RRH se utiliza un divisor 1x4 formado por dos etapas de divisores 1x2 en cascada, ambos capaces de manejar una potencia máxima de 5 W. La potencia configurada en HPL se ajusta para no superar la potencia máxima de cada PVC, que es de 200 mW. En el lado receptor se utilizan 4 celdas conectadas en paralelo con el objetivo de aumentar la capacidad energética del sistema. Cada una en función de la potencia óptica incidente puede entregar hasta 20 mA y 3 V a su salida. En la Tabla 6.6 se muestra un resumen de las características con la transmisión de energía del sistema PoF.

La Figura 6.37 muestra las curvas P-V y I-V medidas en las 4 PVC para las potencias ópticas de entradas ( $P_{O-PVC}$ ) de 100 y 200 mW. La eficiencia de conversión, como se comentó anteriormente, se sitúa en torno al 30 % en el rango de longitudes de onda comprendido entre 1300 nm a 1600 nm, sin que se produzca un sobrecalentamiento de las celdas gracias al disipador de calor mostrado en la figura. El conjunto permite entregar en una potencia eléctrica total superior a 220 mW con picos máximos de 226 mW.



Figura 6.36. Montaje del sistema PoF basado en fibra SMF.

Tabla 6.6. Características del sistema PoF implementado.

Parámetros	Valor
Potencia del HPL	33,49 dBm (Láser Raman de Fibra hasta 5 W)
Pérdidas en la fibra	3,89 dB (14,43 km de SMF)
Pérdidas en los adaptadores y conectores	0,82 dB
Potencia óptica total en las 4 PVC	28,78 dBm

Esta potencia eléctrica entregada por el conjunto de celdas es suficiente para lograr un completo funcionamiento del sistema PoF/RRH, incluido el canal ascendente de comunicaciones y la funcionalidad de cargar la batería de litio con la energía de PoF. El canal implementado funciona a una velocidad de 6,6 kbits/s y la corriente de carga de la batería es de 11,17 mA a un voltaje de 4,20 V. Adicionalmente suministra una potencia eléctrica de 100 mW a la carga, que se puede corresponder con diferentes amplificadores de RF. En el capítulo 4, se citaron algunos ejemplos de amplificadores de RF, cuyos consumos son permisibles para la tecnología PoF en aplicaciones de bajo consumo.

Una vez cargada la batería ésta es capaz de brindar respaldo energético al subsistema y a la carga por 4,3 horas, en ausencia de PoF. La Tabla 6.7 resume algunas de las características del subsistema PoF/RRH.

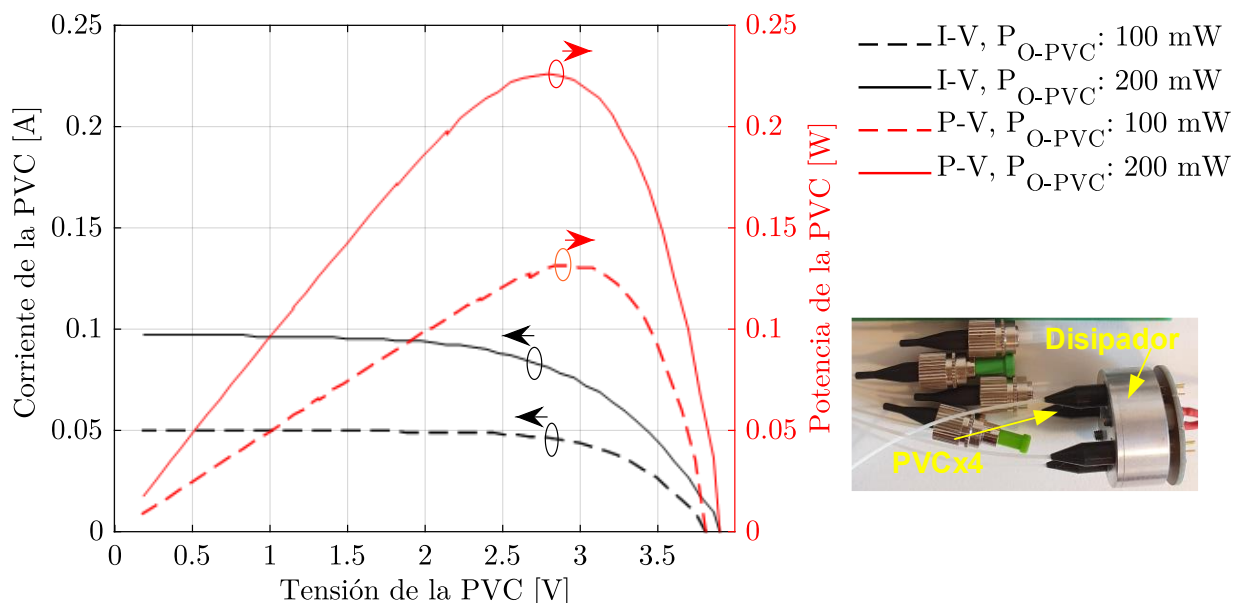


Figura 6.37. Medición de la curva P-I e I-V de la PVC para una potencia óptica de entrada de 100 mW y 200 mW por celda.

Tabla 6.7. Especificaciones generales y modo de bajo consumo de la plataforma, variante de 1480 nm.

Parámetros	Valor
Eficiencia de la PVC	30 %
Potencia eléctrica entregada (PVCx4)	226 mW (eléctrica)
Tensión de salida del subsistema PoF/RRH	5 V
Potencia máxima entregada por el subsistema PoF/RRH	100 mW
Consumo del subsistema PoF/RRH en modo 1a	115 mW (cargando batería)
Consumo del subsistema PoF/RRH en modo 2	5,8 mW

Para comprobar el funcionamiento del sistema, se definen e implementan diferentes pruebas básicas utilizando el *software* desarrollado en Matlab. Dichas pruebas incluyen: el control dinámico del conmutador óptico, la visualización de parámetros en CO como el estado de la batería entre otros, así como las pruebas de funcionalidad de los modos dormidos.

Finalmente es importante comprobar si las soluciones propuestas cumplen con los requisitos temporales recogidos en la ITU-R M.2410-0 [21]. La misma establece una latencia del plano de control de 20 ms como máximo para transiciones entre los estados “*idle state*” y “*active state*”, recomendando valores inferiores a 10

ms. Este requisito está definido para los escenarios eMMB y URLLC. Estas transiciones son equivalentes a los modos M1 y M2, abordados a lo largo del documento.

Para llevar a cabo el análisis se definen dos casos de estudios (CEx) y se analizan en el intervalo comprendido entre la CO y la RRH. El caso de estudio 1 (CE1) comprende aquellos escenarios en los que no está presente el conmutador óptico o en los que para la transición no es necesario realizar la conmutación. En este caso el tiempo de conmutación del SW no afecta al cálculo de la latencia. El CE2 es el caso opuesto a CE1, y es el más restrictivo pues se considera que el tiempo de conmutación del SW aumenta el tiempo de respuesta del sistema, en la transición.

En los casos de estudio, la latencia se considera como el retardo en tiempo ( $t_r$ ) desde la toma de la decisión en la CO hasta que se ejecuta en la RRH. El análisis se lleva a cabo en la situación más restrictiva: transición entre los modos M1 y M2, ya que el tiempo de arranque del bloque de potencia introduce un retardo adicional a la latencia.

Los tiempos que se consideran en el análisis son los siguientes:

- $t_{\text{PRO\_CO}}$ : tiempo que se tarda en el microcontrolador, en el lado de la CO, en tomar una decisión y la atención a las interrupciones (ISR). En el microcontrolador el tiempo de atención de la ISR es de 6  $\mu\text{s}$ . El tiempo de decisión es de  $\sim 100 \mu\text{s}$ .
- $t_{\text{ENVÍO\_TRAMA}}$ : tiempo que tarda la UART en enviar la cadena;
- $t_{\text{PROPAGACIÓN\_FIBRA}}$ : tiempo que tarda el comando en viajar por la fibra;
- $t_{\text{PRO\_RRH}}$ : tiempo que se tarda en el microcontrolador, en el lado de la RRH, en tomar una decisión y en la atención a las interrupciones (ISR);
- $t_{\text{SOFT\_START\_DC}}$ : tiempo que tarda el convertidor DC/DC (continua-continua) en tener en su salida un voltaje válido para la carga;
- $t_{\text{SW}}$ : tiempo que tarda el conmutador óptico en conmutar una entrada de una salida a otra.

Para el cálculo se considera la longitud de la fibra óptica de 10 km, un índice de refracción de 1,467, que la velocidad de la luz en el vacío es de  $3 \times 10^8$  km/s y los comandos ENTER\_SLEEP\_MODE y

OUT\_SLEEP\_MODE tienen una longitud de 5 bytes. El valor de *soft-start* ( $t_{SOFT\_START\_DC}$ ) que se considera es de 6 ms. Este valor no es suministrado por el fabricante del convertidor de la solución que opera a 1480 nm, en su lugar se utiliza el valor de la solución de 808 nm. Para el tiempo de conmutación del SW se considera su valor típico de 3 ms. A partir de la Ec. 6.2 y de los datos de la Tabla 6.8 se obtiene que en el CE1 el retardo ( $tr$ ) es de 12,37 ms y en el CE2 es de 15,37 ms; este último es ligeramente superior por el retardo que introduce el SW. Ambos casos de estudio cumplen con el estándar.

$$tr = t_{PRO\_CO} + t_{ENVÍO\_TRAMA} + t_{PROPAGACIÓN\_FIBRA} + t_{PRO\_RRH} + t_{SOFT\_START\_DC} + t_{SW} \quad \text{Ec. 6.2}$$

Tabla 6.8. Parámetros para el cálculo de la latencia.

Parámetros	Valor
Velocidad del canal COM	6,6 kbits/s
$t_{ISR}$	6 $\mu$ s
$t_{PRO\_CO}$	100 $\mu$ s + (6 $\mu$ s) *5 bytes =130 $\mu$ s
$t_{ENVÍO\_TRAMA}$	$\left(\frac{1}{6,6 \frac{kbits}{s}}\right) * 5 \text{ bytes} * 8 \text{ bits} = 6,06 \text{ ms}$
$t_{PROPAGACIÓN\_FIBRA}$	$\frac{10 \text{ km}}{3E8/1,467} = 48,9 \mu$ s
$t_{PRO\_RRH}$	100 $\mu$ s + (6 $\mu$ s) *5 bytes =130 $\mu$ s
$t_{SOFT\_START\_DC}$	6 ms
$t_{SW}$	3 ms

## 6.5 Técnica de monitorización PoF basada en redes de Bragg

A continuación se va a describir una técnica que permite la monitorización de la energía enviada de forma centralizada [22], también desarrollada en el contexto de blueSPACE en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia.

### 6.5.1 Descripción de la técnica

Se ha visto a lo largo de la investigación que las redes 5G suponen un gran despliegue de infraestructura para soportar todas sus capacidades, en el que las fibras MCF, como parte del *fronthaul* óptico, permiten implementar técnicas SDM para aumentar el ancho de banda. Este escenario también favorece la integración de la tecnología PoF con las redes 5G al ser posible la implementación de diferentes configuraciones.

Por otro lado, es previsible que en los escenarios sinérgicos, dado el gran número de RRH, sea necesario contar con una técnica para monitorizar la transmisión de la energía, con una mínima penalización de la eficiencia del sistema PoF y sin interferir con la transmisión de los datos de los canales 5G.

La técnica propuesta se basa en la utilización de *Tilted Fibre Bragg Grating* (TFBG) embebidas en una fibra MCF. En una TFBG, además de los modos acoplados en el núcleo de la fibra en la transmisión (T) y en la reflexión (R), también tiene lugar el acoplamiento de la luz a los diferentes núcleos en forma de *crosstalk*. Este último ocurre en las 2 direcciones, hacia delante (*crosstalk*, XT) y en el sentido opuesto a la propagación de la luz (*back-crosstalk*, BXT). Básicamente una TFBG en una MCF permite, entre otras características, que la luz que se propaga en uno de los núcleos se acople a cualquiera de los otros núcleos. La potencia que se acopla a través del XT o el BXT es una fracción de la potencia inyectada, véase la Figura 6.38.

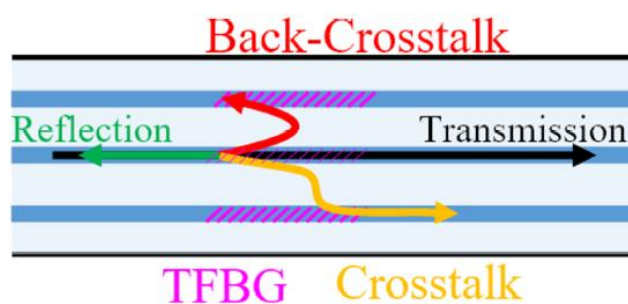


Figura 6.38. Operación de una *Tilted Fibre Bragg Grating* (TFBG) en una fibra MCF.



La técnica que se discute a continuación permite estimar la potencia PoF recibida en la RRH a partir de la potencia óptica BXT que se recibe en la CO. Esta técnica sigue la misma filosofía de centralización de los recursos y tareas planteadas en la tecnología 5G.

### 6.5.2 Montaje experimental

A continuación, se muestra una prueba experimental preliminar con el objetivo de demostrar el principio de la monitorización. La temperatura a la que se desarrolla la validación es a  $\sim 27$  °C. El experimento está basado en una fibra MCF de 4 núcleos (C1, C2, C3, C4) con una longitud de 100 m donde en cada extremo de la MCF se conecta el *Fan-in* (FI) y el *Fan-out* (FO). La TFBG que se usa está grabada a la mitad de un latiguillo FC/PC y tiene una frecuencia de resonancia, a esta temperatura, comprendida entre 1520 nm y 1530 nm. La longitud aproximada del latiguillo es de 1,5 m, el cual en el experimento se coloca antes del FO. Los conectores que se usan en la MCF son de tipo FC/PC para lograr un acoplo uniforme de la luz de los diferentes núcleos en las conexiones. Los laguillos monomodo del FI y el FO, usan conectores de tipo FC/APC.

Por otro lado, además del conjunto integrado por la MCF y la TFBG, en el experimento se emplean diferentes componentes ópticos integrados por una *Broadband Light Source* (BLS), un *Variable Optical Attenuator* (VOA), un *Optical Spectrum Analyzer* (OSA) y un circulador (CIR). Estos elementos se usan para caracterizar el espectro de la BLS y de la TFBG, véase la Figura 6.39.

Estos elementos permiten: (i) inyectar la potencia óptica de la BLS al FI de la MCF (salida A) cubriendo la banda donde se enviaría la energía, (ii) caracterizar el comportamiento de la TFBG dependiendo de la colocación del OSA; si está en el puerto 3 del CIR (punto B) permite caracterizar las reflexiones (R), mientras que conectado directamente en el FI y en el FO permite caracterizar los espectros BXT, T y R de la TFBG. Para identificar los espectros se usa una notación de la forma T<sub>xy</sub>, B<sub>xy</sub>, R<sub>xx</sub>. La letra B, significa *Back-reflexion* (hacia atrás), la letra T significa transmisión (hacia delante) y R la reflexión medida en la misma entrada de inyección, el subíndice “x” indica la entrada por donde se inyecta la luz y la “y” la salida de medición. Por ejemplo B12 significa que la luz se inyecta por la entrada 1 del FI y que el BXT se mide en la entrada 2 del FI.

El espectro de emisión de la BLS está comprendido en el rango 1250 nm a 1650 nm, lo cual cubre el ancho espectral de interés de la TFBG (1520 nm a 1530 nm). El VOA se usa al final del experimento, inicialmente el factor de atenuación ( $\alpha$ ) es 0 dB. El OSA se emplea para obtener los diferentes espectros.

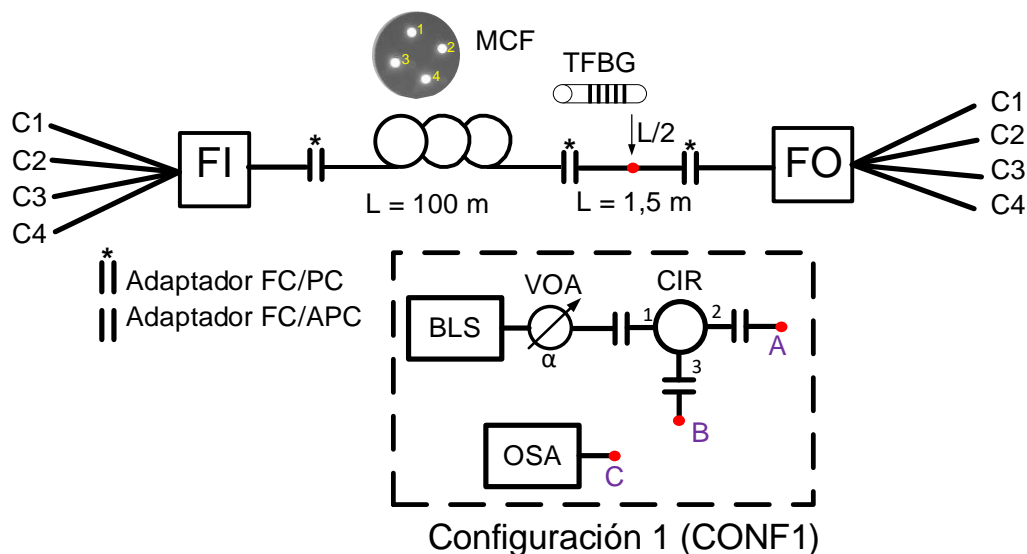


Figura 6.39. Esquema del montaje para validar el principio teórico de la técnica de monitorización PoF. FO/FI: *Fan-in/Fan-out*, BLS: *Broadband Light Source*, VOA: *Variable Optical Attenuator*, OSA: *Optical Spectrum Analyzer*, CIR: *Circulador*.

La primera tarea es identificar en qué núcleo está grabada la TFBG. Para ello, la luz se inyecta en cada una de las entradas del FI secuencialmente, usando el punto A de CONF1 y, en cada caso, se caracterizan con el OSA todos los puertos del FO. El objetivo de este procedimiento es detectar en cuál de los núcleos ocurre la resonancia de la TFBG. En la Figura 6.40(a), se observa que la resonancia ocurre para el caso T22 (entrada 2 del FI, salida 2 del FO). De esta manera queda identificada la entrada que se debe usar para inyectar la energía PoF. Es importante recordar que la transmisión de energía no se afecta con el pico de la resonancia ya que el sistema PoF opera a 1480 nm (fuera de la banda). La segunda tarea es identificar los núcleos fuertemente acoplados cuando se inyecta la energía por la entrada 2. Como se observa en la Figura 6.40(b), estas entradas son: la 1 y la 4, ya que se corresponden con los picos máximos de BXT. Adicionalmente se caracteriza el BXT cuando se inyecta potencia por el resto de las entradas del FI, véase las Figura 6.41 y Figura 6.42. En estas gráficas se puede comprobar el fuerte acoplamiento de las entradas: 1-2 (2-1) y 4-2 (2-4).

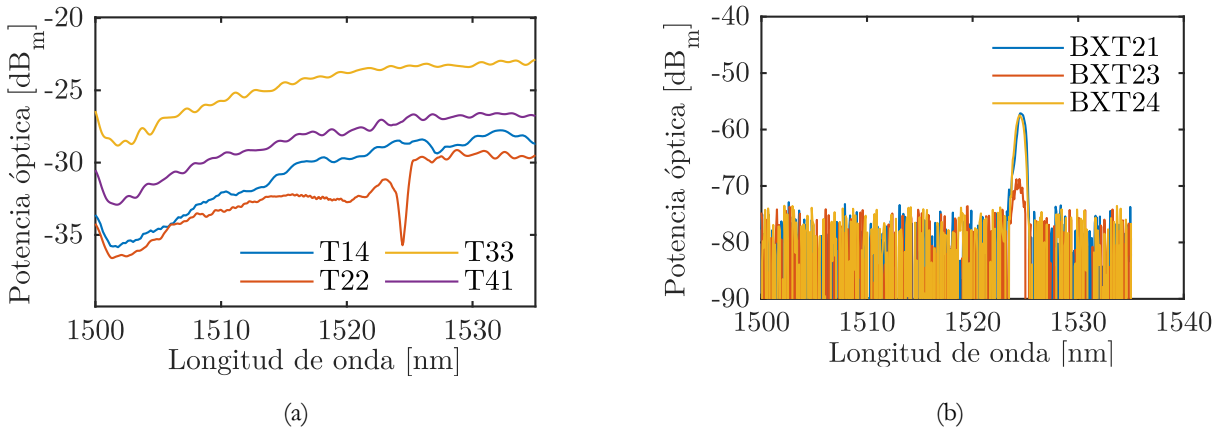


Figura 6.40. Caracterización de la TFBG: (a) transmisión (T); (b) *back-crosstalk* (BXT), inyección de la potencia por la entrada 2.

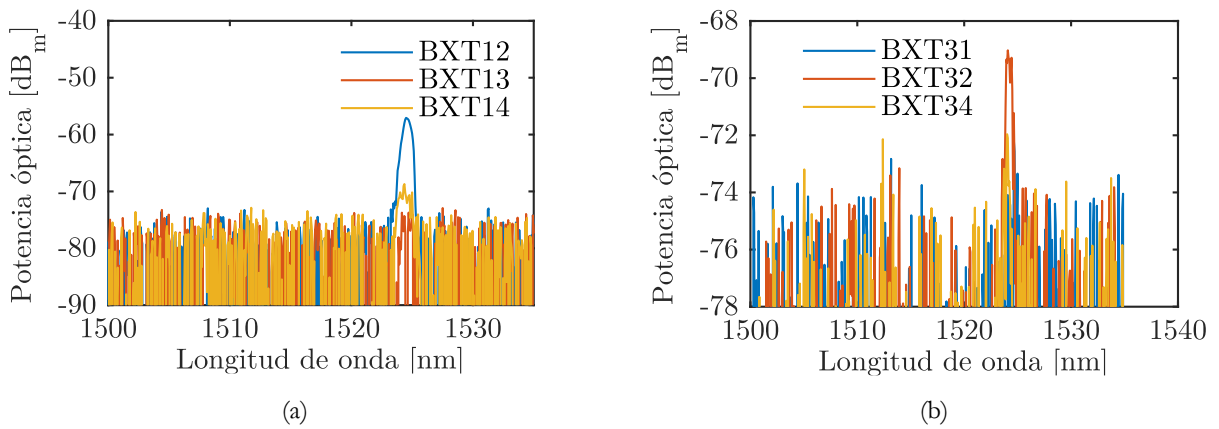


Figura 6.41. Caracterización del *back-crosstalk* (BXT) de la TFBG, cuando se inyecta la potencia óptica por: (a) la entrada 1 del FI; (b) la entrada 3 del FI.

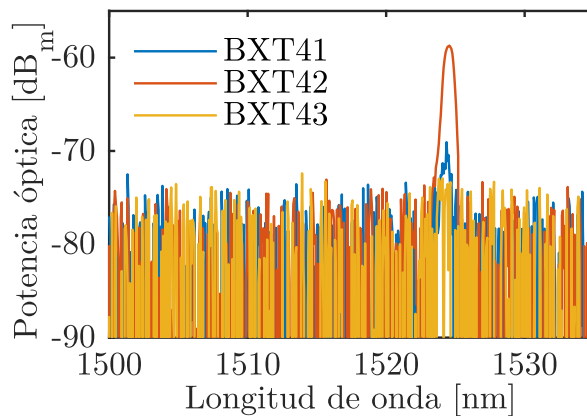


Figura 6.42. Caracterización del *back-crosstalk* (BXT) de la TFBG, cuando se inyecta la potencia óptica por la entrada 4 del FI.

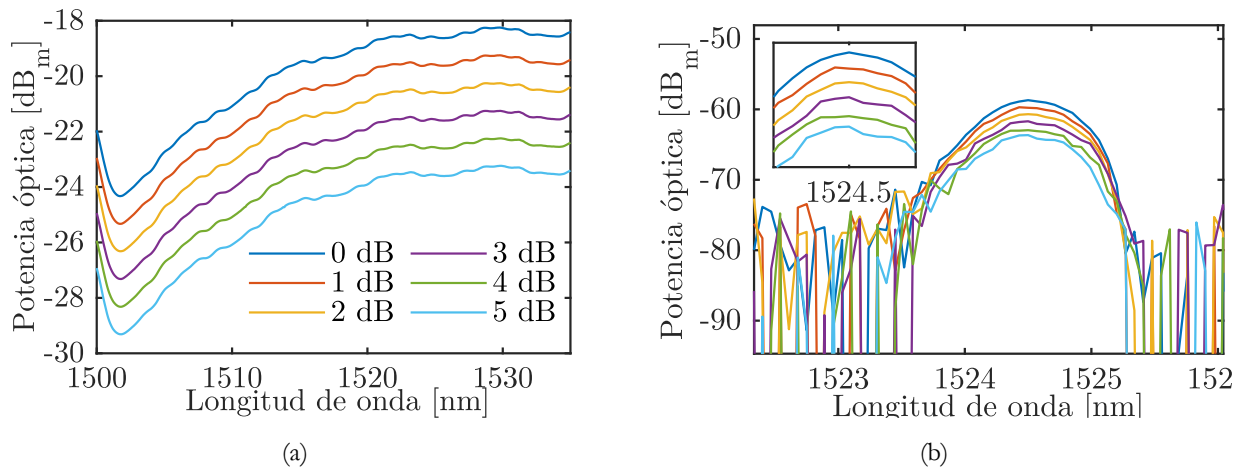


Figura 6.43. Caracterización de la TFBG: (a) espectro en la entrada 2 del FI; (b) *back-crosstalk* (BXT) en la entrada 1 del FI.

Finalmente se caracteriza la dependencia entre la potencia inyectada por la entrada 2 y el BXT que se mide en la entrada 1. En el experimento se usa el VOA para atenuar la potencia de la BLS y el OSA se coloca en la entrada 1 del FI. Los diferentes niveles de potencia se logran incrementando el valor de  $\alpha$ , desde 0 dB a 5 dB, en pasos de 1 dB. La Figura 6.43(a) muestra los diferentes espectros y en la Figura 6.43(b) la disminución del BXT conforme aumenta el valor de  $\alpha$ . Estos resultados preliminares demuestran que existe una dependencia entre la potencia inyectada y la potencia reflejada, base teórica en la que se basa la técnica de monitorización. La Figura 6.44 muestra los principales elementos que se usan en el experimento.



Figura 6.44 Montaje del experimento de la técnica de monitorización PoF.

## 6.6 Conclusiones

En este capítulo se abordó la implementación e integración de un sistema ARoF con la tecnología PoF en el *fronthaul* óptico de una red 5G en configuración C-RAN, desarrollado en el marco del proyecto blueSPACE. Este proyecto se centró en el desarrollo de una arquitectura única de *fronthaul* analógico (ARoF) basado en multiplexación espacial (SDM) sobre una fibra multinúcleo (MCF) para aumentar la capacidad en el *fronthaul* de una red 5G. En este contexto se discutió la importancia de implementar estrategias de ahorro energético como vía para dar solución a los problemas de consumo que supone el despliegue de la tecnología 5G con múltiples RRHs. Como solución complementaria a las estrategias existentes, se planteó usar la tecnología PoF para optimizar el consumo de las RRHs, basado en un control inteligente del consumo de diferentes dispositivos electrónicos.

Como parte de la propuesta de solución se implementó y caracterizó un sistema ARoF en dos configuraciones diferentes, con y sin un radioenlace inalámbrico de 9 m y a una portadora de RF de 25,5 GHz. En ambos casos se integró la solución PoF en el enlace MCF de 10 km y se evaluó el impacto de la transmisión de energía en un escenario compartido y dedicado. En este último escenario, y en ambas configuraciones, el impacto de la transmisión no fue significativa. Sin embargo, en el escenario compartido los resultados obtenidos dependieron de la complejidad de la modulación, del tipo de configuración y de los niveles de potencia inyectados.

Se observó una degradación del BER en las modulaciones estudiadas conforme se hizo más compleja la modulación y se aumentó el nivel de potencia de inyección. Adicionalmente se observaron mayores inestabilidades del BER en las zonas que se corresponden con un mayor nivel de ruido del láser. El peor BER obtenido fue de 0,8 para la modulación 64 QAM y para un nivel de potencia de inyección de 31 dBm, aunque el valor de referencia de partida en este escenario ya estaba deteriorado (0,6) como consecuencia de la transmisión ARoF. El mejor escenario se obtuvo en la configuración con radioenlace y para una modulación QPSK en donde, independientemente del nivel de potencia inyectada, el valor del BER mejoró en todos los casos estudiados. Para evaluar el efecto de PoF sobre el sistema ARoF se consideraron diferentes parámetros tanto del sistema ARoF como PoF, tales como: la atenuación, nivel de ruido del láser, estabilidad de la BBU, efectos de amplificación a causa del SRS y la dispersión cromática; este último para considerar en los análisis el efecto de fenómenos no lineales como el SPM. En este sentido se concluye

que el nivel de ruido posee un impacto directo en el comportamiento del BER como consecuencia del acoplamiento por el efecto del SRS.

Además, se demostró experimentalmente la estrategia para el control del consumo energético planteada en el marco del proyecto y se implementó con 2 tipos de fibras, SMF y MCF. En la estrategia se alimentó y controló un amplificador de frecuencia intermedia desde la CO, en función de la movilidad de un usuario dentro de una celda de radio. En aquellos casos en los que el usuario estaba ausente de la celda, el amplificador se apagaba remotamente y la RRH entraba en modo de bajo consumo. Esta estrategia permite incluso apagar completamente los sistemas y, sin la necesidad de una infraestructura adicional de alimentación, retornar al modo activo de la RRH. La novedad de esta estrategia es que la tecnología PoF permitió utilizar la propia red de comunicaciones, bajo el control de un único operador, para llevar a cabo las operaciones de control energético, reduciendo los costes adicionales que supondría instalar (si fuera el caso), mantener y operar una infraestructura independiente de transmisión de energía. Por otra parte, la implementación de esta tecnología supuso llevar a cabo una alimentación remota segura, aislada y libre de interferencias electromagnéticas, lo que aumentó la fiabilidad de la solución implementada. En la solución SMF se logró transmitir una potencia óptica total de 28,78 dBm; mientras que en la solución MCF fue de 21,23 dBm, en esta última implementación la potencia máxima que se podía transmitir estaba limitada por requisitos previos del diseño de otros elementos del proyecto.

Por último, se demostró experimentalmente el principio teórico de una técnica basada en TFBG sobre fibras MCF para monitorizar la transmisión de energía. Aplicando esta técnica se puede medir, a partir del comportamiento del *back-crosstalk* (BXT), la energía que llega a la RRH. En el experimento implementado se demostró la dependencia entre la potencia inyectada en una fibra MCF de 100 m y la potencia medida en el transmisor como consecuencia del BXT.

## 6.7 Referencias

- [1] W. Klaus *et al.*, “Advanced space division multiplexing technologies for optical networks [invited],” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 9, no. 4, pp. C1–C11, Apr. 2017, doi: 10.1364/JOCN.9.0000C1.
- [2] D. Soma *et al.*, “10.16 Peta-bit/s Dense SDM/WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core Fibre Across C+L Band,” *Eur. Conf. Opt. Commun. ECOC*, vol. 2017-September, pp. 1–3, Sep. 2017, doi: 10.1109/ECOC.2017.8346082.
- [3] “European Conference on Networks and Communications: Poster,” 2019. [https://eulambia.com/wp-content/uploads/2019/11/blueSPACE\\_EuCNCDemo2019\\_Poster.pdf](https://eulambia.com/wp-content/uploads/2019/11/blueSPACE_EuCNCDemo2019_Poster.pdf) (accessed Oct. 06, 2021).
- [4] G. Otero *et al.*, “SDN-Based Multi-Core Power-Over-Fiber (PoF) System for 5G Fronthaul: Towards PoF Pooling,” in *European Conference on Optical Communication, ECOC*, Nov. 2018, pp. 1–3, doi: 10.1109/ECOC.2018.8535543.
- [5] “Nokia confirms 5G as 90 percent more energy efficient | Nokia.” <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/12/02/nokia-confirms-5g-as-90-percent-more-energy-efficient/> (accessed Mar. 18, 2021).
- [6] B. Maloku, B. Krasniqi, and F. Ademaj, “Optimizing the energy efficiency for future 5G networks,” in *International Conference on Systems, Signals, and Image Processing*, Jun. 2016, vol. 2016-June, doi: 10.1109/IWSSIP.2016.7502751.
- [7] Huawei, “5G Power Whitepaper,” 2019. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: <https://carrier.huawei.com/~media/CNBBG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf>.
- [8] Huawei, “5G Ultra-Lean Site,” 2019. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: [https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019/pdf\\_v1.0/5G-Ultra-Lean-Site-White-Paper\\_en.pdf](https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019/pdf_v1.0/5G-Ultra-Lean-Site-White-Paper_en.pdf).
- [9] T. Nguyen, “Small Cell Networks and the Evolution of 5G - Qorvo.” <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g> (accessed Oct. 06, 2021).
- [10] “High-Capacity Indoor Wireless Solutions: Picocell or Femtocell?” Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: <https://www.fujitsu.com/us/Images/High-Capacity-Indoor-Wireless.pdf>.
- [11] Ericsson., “Breaking the energy curve: 5G energy efficiency - Ericsson,” 2019. <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/2/breaking-the-energy-curve-5g-energy-efficiency> (accessed Jun. 24, 2021).
- [12] P. Frenger and R. Tano, “A technical look at 5G energy consumption and performance - Ericsson,” *Ericsson*, 2019. <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/9/energy-consumption-5g-nr> (accessed Jun. 24, 2021).
- [13] B. Debaillie, C. Desset, and F. Louagic, “A flexible and future-proof power model for cellular base stations,” in *IEEE Vehicular Technology Conference*, Jul. 2015, vol. 2015, doi: 10.1109/VTCSpring.2015.7145603.
- [14] BlueSpace, “Space Division Multiplexing 5G Fronthaul with Analog and Digital Radio-over-Fiber and Optical Beamforming – the blueSPACE Concept,” Aug. 2018. doi: 10.5281/ZENODO.1403140.
- [15] S. Rommel *et al.*, “Towards a Scaleable 5G Fronthaul: Analog Radio-over-Fiber and Space Division Multiplexing,” *J. Light. Technol.*, vol. 38, no. 19, pp. 5412–5422, Oct. 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.3004416.
- [16] S. Rommel *et al.*, “Real-time high-bandwidth mm-wave 5G NR signal transmission with analog radio-over-fiber fronthaul over multi-core fiber,” *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.* 2021, vol. 2021, no. 1, pp. 1–20, Feb. 2021, doi: 10.1186/S13638-021-01914-6.
- [17] J. Lopez-Cardona *et al.*, “Power-over-Fiber in a 10 km-long Multicore Fiber Link within 5G Fronthaul Scenario,” *Opt.*

- Lett.*, vol. 46, no. 21, pp. 5348–5351, Oct. 2021, doi: 10.1364/OL.439105.
- [18] C. Vázquez *et al.*, “Multicore Fiber Scenarios Supporting Power over Fiber in Radio over Fiber Systems,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2950599.
- [19] U. Gliese, S. Norskov, and T. N. Nielsen, “Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 44, no. 10 PART 1, pp. 1716–1724, 1996, doi: 10.1109/22.538964.
- [20] J. D. Lopez-Cardona, R. Altuna, D. Sanchez Montero, and C. Vazquez, “Power over Fiber in C-RAN with Low Power Sleep Mode Remote Nodes using SMF,” *J. Light. Technol.*, vol. 39, no. 15, pp. 4951–4957, 2021, doi: 10.1109/jlt.2021.3080631.
- [21] ITU, “Report ITU-R M.2410-0. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s),” Geneva, 2017. Accessed: Jun. 23, 2021. [Online]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf).
- [22] C. Vázquez, D. S. Montero, J. D. López-Cardona, J. Madrigal Madrigal, D. Barrera Viral, and S. Sales Maicas, “System and method of monitoring power and temperature in fiber optics networks,” Nov. 2019.



# Capítulo 7

## Conclusiones

Resumen:

En este capítulo se resumen las principales conclusiones de esta investigación y los trabajos futuros.

## 7.1 Conclusiones

En este trabajo se abordó la integración de la tecnología PoF en el sector de las comunicaciones y en varias aplicaciones con sensores. Ambos campos han despertado el interés de diferentes grupos de investigación en los últimos años, lo cual ha favorecido el desarrollado del estado de la técnica de la tecnología y ha potenciado su divulgación como posible alternativa o complemento de la alimentación basada en cobre.

En las aplicaciones dentro del campo de los sensores se exploró su uso en entornos de IoT y de seguridad, entre otros. Se demostró en la práctica la capacidad de gestión remota e inteligencia en las soluciones implementadas. Entre sus características más relevantes cabe destacar que: (i) son sistemas basados en microcontrolador, lo cual brinda flexibilidad en la implementación de funcionalidades, (ii) en su desarrollo se usaron circuitos integrados de bajo consumo favoreciendo la gestión energética y la autonomía del nodo, (iii) se implementaron con fibra de tipo MMF con un núcleo de 200  $\mu\text{m}$ , posibilitando el envío de más energía, y un mayor escalado en la alimentación de los nodos remotos usando esquemas complejos de distribución de la energía, como la configuración P2M.

En el sector de las comunicaciones los sistemas basados en PoF también han ganado más protagonismo, siendo más común el planteamiento de soluciones sinérgicas de transmisión de datos y energía, sobre todo en bandas milimétricas, como consecuencia del gran desarrollo en torno a la tecnología 5G. A lo largo del desarrollo de esta investigación se abordaron diferentes soluciones de alimentación remota usando fibras SMF, MMF y MCF en escenarios 5G. En cada uno de los casos se analizó el impacto de la transmisión de la energía sobre los datos usando como métrica el valor del EVM y del BER y, por otro lado, se evaluó la capacidad de los sistemas para transmitir energía a partir de los valores de las eficiencias energéticas del sistema y global.

Cabe destacar como conclusiones generales de este trabajo la capacidad de integración de los sistemas PoF en diferentes escenarios de aplicación. Sin embargo la potencia umbral que soporta la fibra óptica limita su capacidad de transmisión, siendo más crítico en el caso de las fibras MMF con un perfil gradual del índice de refracción como consecuencia de su menor diámetro de campo modal. Por otro lado, los

sistemas PoF desarrollados en esta investigación son compatibles con las propuestas de infraestructuras en el contexto de la tecnología 5G, basadas en fibras SMF y MCF. En la investigación se demostró en la práctica la transmisión de cientos de milivatios en más de 10 km, usando fibras SMF. En el caso de la MCF la potencia transmitida fue suficiente para implementar el control remoto de un amplificador de potencia desde la oficina central.

De forma más específica, se resumen a continuación las principales contribuciones de esta investigación:

- Se implementó un sistema PoF para alimentar a varios nodos sensores que integraba en una misma solución varias capacidades y características únicas hasta el momento de su desarrollo, tales como la capacidad de control, carga de una batería externa e integración de un canal de control de bajo consumo que le brindó al sistema la capacidad de monitorización remota. Se abordaron las soluciones con un enfoque de implementación escalable en configuración P2M frente a las soluciones previas mayoritariamente P2P. Se proporcionaron además las guías necesarias para el análisis de la escalabilidad de una red de distribución de energía basada en PoF en una configuración P2M, al tiempo que se ofrecieron los fundamentos teóricos para analizar el impacto del *fiber fuse* en la máxima potencia a transmitir.
- Se llevó a cabo un estudio del consumo de los principales elementos que se emplean en una RRH en configuración C-RAN y se analizaron propuestas de integración de la tecnología teniendo en cuenta la contribución energética de PoF en la alimentación de las RRH, identificando dos tipos de escenarios: alimentación parcial o total. Se implementó una plataforma PoF con funcionalidades de bajo consumo, optimizada para operar con fibras con un núcleo de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro con un valor de eficiencia energética del sistema del 36 % en 100 m, el cual está entre los más alto referenciados en la literatura. Esta plataforma se usó para demostrar la capacidad de controlar remotamente un amplificador de RF, a través de un canal de comunicación bidireccional. El experimento permitió demostrar la capacidad de los sistemas PoF para gestionar el consumo energético de una RRH en el *fronthaul* óptico de una red 5G.
- Se analizó experimentalmente y a través de simulaciones, en un escenario compartido, el impacto de los efectos no lineales en la transmisión de los datos en presencia de PoF, a partir de evaluar el efecto de la dispersión cromática en la respuesta en frecuencia de la fibra óptica. Se demostró experimentalmente que los sistemas PoF pueden mejorar el valor del EVM y que factores como

el RIN del láser de potencia, los efectos no lineales y la frecuencia de la portadora determinan el comportamiento del EVM. A partir de este análisis se identificó el rango de potencia del láser HPL donde el valor del EVM cumple con el estándar 5G.

- Se implementó el primer experimento PoF reportado sobre una fibra MCF de 10 km para aplicaciones de optimización energética en redes 5G. Se demostró experimentalmente el control de un amplificador de frecuencia intermedia controlado desde la oficina central a través de un canal de comunicaciones. Se analizó el impacto de la distribución de energía con PoF en la transmisión de datos en un escenario compartido y dedicado con diferentes modulaciones.
- Se demostró experimentalmente el principio teórico de una técnica basada en TFBG sobre fibras MCF para monitorizar la transmisión de energía a partir de la medida en la oficina central del *back-crosstalk* generado por la energía que se envía a la RRH.

Los principales resultados de esta investigación están respaldados por varios artículos publicados en revistas de alto impacto.

## 7.2 Trabajos futuros

Finalmente, existen varias mejoras que pueden contribuir al desarrollo de la tecnología y que se abordaron parcialmente o no fueron objeto de estudio de la investigación entre los que se encuentran:

- Ampliar el estudio de los láseres Raman para desarrollar soluciones propias con el objetivo de optimizar algunos parámetros de los sistemas, como la eficiencia GEE.
- Desarrollar, en el contexto de sistemas PoF para entornos peligrosos (atmósferas explosivas), sistemas PoF más robustos, fundamentalmente el nodo remoto, que es el que típicamente está expuesto a zonas peligrosas o de exclusión. En sentido sería recomendable consultar normativas y estándares que se aplican a zonas de altos riesgos, tales como normativa ATEX.
- Evaluar la utilización de las fibras DCF para la transmisión de energía, con el objetivo de aumentar la potencia transmitida hacia al lado remoto, permitiendo en el campo del sensado implementar configuraciones complejas como P2M, con un gran número de sensores mientras que en los escenarios de comunicaciones permitiría la alimentación de dispositivos electrónicos de un consumo mucho más allá de los requeridos en las aplicaciones prácticas cubiertas en el marco de la investigación.
- Desarrollar sistemas SDM, basados en fibras MCF, con mayor capacidad de transmisión de energía más allá de los niveles de potencia alcanzados en el marco de este trabajo de investigación.



# Capítulo 8

## Conclusions

Summary:

This chapter summarizes the main conclusions and the future work of this research.

## 8.1 *Conclusions*

In this work, the integration of PoF technology in the communications sector and in several sensor applications was addressed. Both fields have gained the interest of different research groups in recent years, which has allowed the development of the state of the art of the technology and has boosted its dissemination as a possible alternative or complement to copper-based power transmission.

In the field of sensor applications, their use in IoT and security environments, among others, was explored. The remote management and intelligence capacity of the implemented solutions was demonstrated in practice. Among their most relevant characteristics, it could be highlighted that: (i) they are microcontroller-based systems, which provide flexibility in the implementation of different functionalities, (ii) low power consumption integrated circuits were used in their development, improving energy management and node autonomy, (iii) they were implemented with MMF (200  $\mu\text{m}$ ) thus allowing more energy to be sent, and greater scalability in powering remote nodes, using complex energy distribution schemes, such as P2M configurations.

In the communications sector, PoF-based systems have also become more relevant, being more usual the approach of synergic solutions for data and power transmission, especially in millimeter bands, as a consequence of the great development around 5G technology. Throughout the development of this research, different remote powering solutions using SMF, MMF and MCF fibers in 5G scenarios were addressed. In each of the cases, the impact of power transmission on data was analyzed using the EVM and BER values as figures of merit. On the other hand, the capacity of the systems to transmit power was evaluated, based on the values of the system and global energy efficiencies.

It should be noted as general conclusions of this work the integration capacity of PoF systems in different application scenarios. However, the threshold power supported by the optical fiber limits its transmission capacity, being more critical in the case of MMF fibers with a graded refractive index profile as a result of its smaller modal field diameter. On the other hand, the PoF systems developed within this research are compatible with infrastructure proposals in the context of 5G technology, based on SMF and MCF fibers. The research experimentally demonstrated the transmission of hundreds of milliwatts over



more than 10 km using SMF fibers. In the case of MCF the transmitted power was sufficient to implement remote control of a remote power amplifier from the central office.

More specifically, the main contributions of this research are summarized below:

- A PoF system was implemented to power several sensor nodes which integrates in the same solution several unique features in the state of the art that provided the system with remote monitoring capability, such as external battery charging, integration of a low-power control channel and power management. The solutions provided a scalable implementation approach in P2M configuration, in contrast to P2P solutions which are mostly investigated. The necessary guidelines for analyzing the scalability of a PoF-based power distribution network in a P2M configuration were also provided, and the theoretical background for analyzing the impact of fiber fuse on the maximum power to be transmitted was presented.
- A study of the consumption of the main elements used in a RRH in C-RAN configuration was carried out and proposals for PoF technology integration were analyzed taking into account the energy contribution of PoF in the RRH power supply identifying two types of scenarios: partial or total power supply. A PoF platform was implemented with low power consumption functionalities and optimized to operate with 200  $\mu\text{m}$  core diameter fibers with a system energy efficiency value of 36 % over 100 m, which is among the highest referenced in the literature. This platform was used to demonstrate the ability to remotely control a RF amplifier through a bidirectional communication channel. The experiment demonstrated the capacity of PoF systems to manage the power consumption of an RRH in the optical fronthaul of a 5G network.
- The impact of nonlinear effects on data transmission in the presence of PoF was analyzed both experimentally and through simulations in a shared scenario by evaluating the effect of chromatic dispersion on the frequency response of the optical fiber. It was experimentally demonstrated that PoF systems can enhance the EVM value and factors such as power laser RIN, nonlinear effects and carrier frequency determine the EVM behavior. From this analysis, the HPL laser power range allowing EVM values in compliance with the 5G standard was identified.
- The first worldwide demonstration of energy delivery using PoF in a 10 km MCF fiber for energy optimization applications in 5G networks was reported. The control of an intermediate

frequency amplifier from the central office via a communication channel was experimentally demonstrated. The impact of PoF power distribution on data transmission in a shared and dedicated scenario with different modulation formats was analyzed.

- The theoretical principle of a technique based on TFBG on MCF fibers to monitor power transmission was experimentally demonstrated based on the measurement at the central office of the back-crosstalk generated by the optical power sent to the RRH.

The main results of this research are supported by several articles published in high impact journals.

### 8.2 *Future Work*

Finally, there are several improvements that can contribute to the development of the technology that were partially addressed or were not studied in this research:

- To extend the study of Raman lasers to develop our specific solutions in order to optimize some system parameters, such as GEE efficiency.
- To develop, in the context of PoF systems for hazardous environments (explosive atmospheres), more robust PoF systems, especially at of the remote node site, which is typically exposed to hazardous or exclusion zones. In this sense, it would be recommended to consult regulations and standards that apply to high risk areas, such as ATEX regulations.
- To evaluate the use of DCF fibers for power transmission, with the aim of increasing the power transmitted to the remote site, thus allowing in the sensing field to implement complex configurations such as P2M, with a large number of sensors. In communications scenarios it would allow the power supply of electronic devices of a consumption far beyond those required in the practical applications covered in the framework of this research.
- To develop SDM systems, based on MCF fibers, with higher power transmission capacity beyond the power levels achieved in this research work.
- To continue the evaluation of ARoF systems, with higher powers, different bandwidths, carriers, etc., in order to evaluate the behavior of nonlinear phenomena with SMF and MCF. And its integration with other infrastructure monitoring techniques.
- To develop a measurement technique to measure the temperature increase that occurs in the fiber when power transmission takes place, in order to evaluate its influence on data transmission as a consequence of its impact on chromatic dispersion behavior among others.

