



Enginyeria electrònica industrial i automàtica

**DESENVOLUPAMENT D'UN SISTEMA
POWER-OVER-FIBER PER ALIMENTAR
EL DRIVER D'UN MOSFET**

Memòria

VÍCTOR GIMENO BENAVENTE

PONENT: SALVADOR ALEPUZ

PRIMAVERA 2024



Dedicatòria

A en Leonard Janer, qui em va animar a començar aquesta carrera al TecnoCampus
i em va donar els millors consells sempre que els vaig necessitar.

Agraïments

Vull expressar el meu més sincer agraïment a en Salvador Alepuz per l'ajuda i el suport brindats. Sense la seva orientació i coneixement, aquest projecte difícilment hauria estat possible. També a tots aquells professors i professores que en els últims quatre anys han contribuït a la meva formació acadèmica i professional.

D'altra banda, agrair també a la meva família i als meus amics el seu suport i comprensió durant la realització del treball.

Resum

L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar i muntar un sistema capaç d'alimentar el *driver* d'un MOSFET utilitzant fibra òptica en lloc del tradicional cable de coure. Per aconseguir-ho es va dur a terme una àmplia tasca de recerca documental, ja que la tecnologia aplicada, denominada Power-Over-Fiber, encara es troba en fase experimental. Les proves realitzades amb el prototip muntat al laboratori demostren la viabilitat tècnica d'aquesta tecnologia i assenten les bases per a futures investigacions.

Resumen

El objetivo de este proyecto es diseñar y montar un sistema capaz de alimentar el *driver* de un MOSFET utilizando fibra óptica en lugar del tradicional cable de cobre. Para lograrlo, se llevó a cabo una amplia tarea de investigación documental, ya que la tecnología aplicada, denominada Power-Over-Fiber, todavía se encuentra en fase experimental. Las pruebas realizadas con el prototipo armado en el laboratorio demuestran la viabilidad técnica de esta tecnología y establecen las bases para futuras investigaciones.

Abstract

The objective of this project is to design and assemble a system capable of powering a MOSFET driver using fiber optics instead of the traditional copper cable. To achieve this, an extensive documentary research work was carried out, as the applied technology, called Power-Over-Fiber, is still in the experimental phase. The tests conducted with the prototype assembled in the laboratory demonstrate the effectiveness of this technology and lay the groundwork for future research.

Índex

Índex de figures	III
Índex de taules	V
Glossari de termes	VI
1. Objectius	1
1.1. Propòsit	1
1.2. Finalitat	1
1.3. Objecte	1
1.4. Abast	1
1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del TecnoCampus... 1	
2. Antecedents i necessitats d'informació	2
2.1. Elements i aspectes clau d'un sistema PWoF	3
2.1.1. Eficiència del sistema	4
2.2. El làser	5
2.2.1. Photonic Power Module.....	5
2.2.2. Potència òptica	6
2.2.3. Làsers utilitzats en PWoF	7
2.3. La fibra òptica	9
2.3.1. Modes de propagació	11
2.3.2. Índex de refracció	12
2.3.3. Eficiència de la transmissió	14
2.4. Convertidors de potència fotònica	14
2.4.1. Materials de fabricació i longitud d'ona	15
2.4.2. Comportament elèctric.....	17
2.4.3. Tensió de sortida	18
2.4.2. Eficiència de la conversió òptica-elèctrica	19
2.5. Aplicacions de la tecnologia	21
2.5.1. Electrònica de potència	22
2.5.2. Sensors de fibra òptica	24
2.5.3. Comunicacions.....	27
3. Disseny del sistema, configuració i assajos previs	30
3.1. Plantejament de possibles solucions	30
3.2. Elecció dels components i del proveïdor	31
3.3. El mòdul d'energia fotònica	32
3.2.1. Proves preliminars amb el PPM.....	35

3.3. La fibra òptica.....	36
3.4. El convertidor d'energia òptica-elèctrica	36
3.4.1. Proves preliminars amb el PPC.....	37
3.5. El convertidor CC/CC	39
3.5.1. Verificació del convertidor	40
3.6. Estimacions de l'eficiència del sistema	40
3.7. Caracterització del <i>driver</i>	41
3.7.1. Caracterització del <i>driver</i> en buit.....	42
3.7.2. Caracterització del <i>driver</i> en càrrega	45
4. Validació experimental.....	48
4.1. Muntatge del sistema PWoF.....	48
4.2. Muntatge del circuit amb un interruptor controlat.....	51
4.3. Execució de l'experiment	53
4.4. Les dades de l'experiment	54
5. Impacte mediambiental del projecte.....	56
6. Perspectiva de gènere	58
7. Planificació del projecte	59
7.1. Organització i tasques a realitzar.....	59
7.2. Desviacions.....	64
8. Conclusions	65
9. Referències	66

Índex de figures

Fig. 2.1. Configuració bàsica d'un sistema PWoF	3
Fig. 2.2. Eficiència global del sistema, segons el tipus de fibra òptica utilitzat.....	4
Fig. 2.3. Configuració bàsica d'un controlador de refrigeració termoelèctrica	6
Fig. 2.4. Corba de relació P/I, on es mostra també la influència de la temperatura a l'hora d'establir el corrent lliandar.....	7
Fig. 2.5. Secció perpendicular d'un làser de díode amb fibra òptica acoblada.....	8
Fig. 2.6. Propagació de la llum a través de la fibra òptica.....	10
Fig. 2.7. Estructura i propagació de la llum en fibres monomode.....	11
Fig. 2.8. Estructura i propagació de la llum en fibres multimode SI.....	12
Fig. 2.9. Estructura i propagació de la llum en fibres multimode GI	12
Fig. 2.10. Estructura i propagació de la llum en fibres MCF	13
Fig. 2.11 Estructura i propagació de la llum en fibres DCF.....	13
Fig. 2.12. Estructura i modelatge elèctric característic d'un convertidor fotovoltaic.....	15
Fig. 2.13. Representació gràfica de la càrrega de potència (corba P-V) i dels punts operacionals del PPC (corba I-V)	17
Fig. 2.14. Comportament de la corba I-V en funció de la potència òptica d'entrada	18
Fig. 2.15. Representació gràfica del factor de farciment (FF).....	20
Fig. 2.16. Model simplificat d'un <i>driver</i> de MOSFET.....	22
Fig. 2.17. MOSFET de tercera generació de Toshiba.....	23
Fig. 2.18. Estructura i funcionament de la xarxa de difracció de Bragg.....	25
Fig. 2.19. Sistema per mesurar el corrent d'una línia d'alta tensió amb OFS.....	27
Fig. 2.20. Sistema PWoF/RoF desenvolupat de forma experimental.....	29
Fig. 3.1. Esquema del circuit extern al PPM necessari per fer-lo operatiu	32
Fig. 3.2. Parts principals del convertidor PPC YCH-H003-15-FC-A	36
Fig. 3.3. Esquema dels sistema emprat per mesurar els valors de sortida en el PPC	37
Fig. 3.4. Corba I-V del convertidor O/E model YCH-H003-15-FC-A.....	38

Fig. 3.5. El convertidor CC/CC DDH1800, en una de les proves realitzades.....	39
Fig. 3.6. Esquema del sistema per testejar el funcionament del convertidor estàtic.....	40
Fig. 3.7. El mòdul d'interruptor controlat utilitzat en els experiments.....	41
Fig. 3.8. Conceptes claus que intervenen en el funcionament d'un interruptor.....	42
Fig. 3.9. Esquema del circuit per mesurar el consum de corrent del <i>driver</i> en estàtic.....	43
Fig. 3.10. Variació del consum de corrent per part del <i>driver</i> en funció de la freqüència de commutació en estàtic	43
Fig. 3.11. Variació del consum de potència per part del <i>driver</i> en funció de la freqüència de commutació en estàtic, tenint en compte que $P = V \cdot I$	44
Fig. 3.12. Variació del consum de corrent per part del <i>driver</i> en funció del cicle de treball en estàtic (amb una freqüència de 30 kHz).....	44
Fig. 3.13. Circuit utilitzat per mesurar el consum de corrent del <i>driver</i> amb càrrega.....	45
Fig. 3.14. Imatge del circuit muntat en el laboratori per realitzar les proves.....	45
Fig. 3.15. Variació del consum de corrent per part del <i>driver</i> a l'augmentar la freqüència de commutació amb càrrega	46
Fig. 3.16. Variació del consum de potència per part del <i>driver</i> en funció de la freqüència de commutació en càrrega, tenint en compte que $P = V \cdot I$	46
Fig. 3.17. Variació del consum de corrent per part del <i>driver</i> en funció del cicle de treball en càrrega (amb una freqüència de 30 kHz).....	47
Fig. 4.1. Esquema simplificat del prototip utilitzat en l'experiment.....	48
Fig. 4.2. Unitat de transmissió del prototip.....	49
Fig. 4.3. Esquema simplificat de la unitat de transmissió del prototip.....	49
Fig. 4.4. Connexió entre la unitat de transmissió i el convertidor O/E o PPC.....	50
Fig. 4.5. Connexió entre el PPC i el convertidor CC/CC	51
Fig. 4.6. Circuit de potència i connexió entre el convertidor CC/CC i el <i>driver</i>	52
Fig. 4.7. Esquema simplificat del circuit de potència gestionat per l'interruptor. El prototip s'encarrega d'alimentar el <i>driver</i> que dona el senyal per obrir i tancar-lo	52
Fig. 4.8. Imatge dels diferents dispositius de control utilitzats durant l'experiment.....	53
Fig. 4.9. Muntatge del laboratori i principals elements del prototip	55
Fig. 7.1. Diagrama de Gantt de la planificació del projecte	63

Índex de taules

Taula 2.1. Comparativa de l'atenuació soferta per diferents tipus de fibra òptica.....	14
Taula 2.2. Principals materials emprats per fabricar PPC i longituds d'ona en què operen	16
Taula 2.3. Comparativa de les tensions de sortida de diferents cel·les fotovoltaïques de PPC en funció del material de fabricació	19
Taula 2.4. Eficiències de diferents PPC comercialitzats, junt amb altres paràmetres del seu rendiment elèctric.....	21
Taula 3.1. Dades vinculades a la transmissió d'energia òptica subministrades pel fabricant del PPM. El corrent de sortida s'ha calculat a partir d'aquestes.....	34
Taula 3.2. Característiques del termistor inclòs en el PPM.....	35
Taula 3.3. Rendiment del PPC, segons proves realitzades pel fabricant. Els valors per a 3W es basen en el dispositiu real i els de 5W en dades genèriques del <i>datasheet</i>	37
Taula 3.4. Resultat de les proves realitzades per conèixer els valors obtinguts després de la conversió O/E amb diferents càrregues.....	38
Taula 4.1. Recopilació dels principals elements i paràmetres vinculats a l'experiment.....	54
Taula 7.1. Quadre de tasques, terminis previstos i recursos assignats per a la realització del projecte.....	61

Glossari de termes

5G-NR	Tecnologia d'accés a ràdio per a mòbils 5G (<i>5G New Radio</i>)
5G(RAN)	Xarxa 5G d'accés per ràdio (<i>5G Radio Access Network</i>)
CC	Corrent continu
CVR	Resistència shunt (<i>Current Viewing Resistor</i>)
DCF	Fibra òptica de doble cobertura (<i>Double-Clad Fiber</i>)
EMI	Interferències electromagnètiques (<i>ElectroMagnetic Interference</i>)
E-O	Conversió elèctrica-òptica
FBG	Xarxa de difracció de Bragg (<i>Fiber Bragg Grating</i>)
GaAs	Arsenur de gal·li
GEE	Eficiència global energètica (<i>Global Energy Efficiency</i>)
GI	Índex gradual (<i>Graded Index</i>)
GPS	Sistema de posicionament global (<i>Global Positioning System</i>)
HPLD	Làser de díode d'alta potència (<i>High Power Laser Diode</i>)
HCF	Fibra òptica de nucli buit (<i>Hollow-Core Fiber</i>)
IGBT	Tipus de transistor de potència (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
LD	Làser de díode
MCF	Fibra òptica de múltiples nuclis (<i>MultiCore Fiber</i>)
MMF	Fibra òptica multimode (<i>MultiMode Fiber</i>)
MOSFET	Tipus de transistor (<i>Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor</i>)
MPP	Punt de màxima potència (<i>Maximum Power Point</i>)

NA	Obertura numèrica (<i>Numerical aperture</i>)
O-E	Conversió òptica-elèctrica
OFS	Sensor de fibra òptica (<i>Optical Fiber Sensor</i>)
PPC	Convertidor d'energia fotònica (<i>Photonic Power Converter</i>)
PPM	Mòdul d'energia fotònica (<i>Photonic Power Module</i>)
PV	Cel·la fotovoltaica (<i>PhotoVoltaic cell</i>)
PWoF	Energia a través de fibra òptica (<i>PoWer-Over-Fiber</i>)
RAU	Unitat d'antenes remotes (<i>Remote antenna unit</i>)
RoF	Ràdio a través de fibra òptica (<i>Radio over fiber</i>)
SEE	Eficiència energètica del sistema (<i>System Energy Efficiency</i>)
SHM	Monitoratge de la salut d'estructures (<i>Structural Health Monitoring</i>)
SI	Índex escalonat (<i>Step Index</i>)
SMF	Fibra òptica monomode (<i>Single-Mode optical Fiber</i>)
SRS	Dispersió Raman estimulada (<i>Stimulated Raman Scattering</i>)
TEC	Controlador de refrigeració termoelèctrica (<i>ThermoElectric Cooler</i>)
TFG	Treball de Fi de Grau
TTL	Lògica digital amb transistors (<i>Transistor-Transistor Logic</i>)
WiFi	Tecnologia de xarxes sense fils (<i>Wireless Fidelity</i>)
WiMAX	Tecnologia de xarxes sense fils amb microones (<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>)

1. Objectius

1.1. Propòsit

Disseny i implementació d'un sistema per alimentar el *driver* d'un MOSFET utilitzant fibra òptica com a mitjà transmissor d'energia.

1.2. Finalitat

Experimentar amb una tecnologia innovadora, anomenada Power-Over-Fiber, amb potencial per millorar el rendiment dels dispositius que necessiten estar aïllats elèctricament de la font d'alimentació, com és el cas dels MOSFET.

1.3. Objecte

Armar i configurar un prototip que permeti validar la viabilitat d'aquesta tecnologia experimental en l'àmbit de l'electrònica de potència.

1.4. Abast

El projecte inclou la selecció de components pel prototip, el seu disseny i muntatge, així com la verificació del seu funcionament. Atès que no és necessari subministrar grans quantitats de potència ni optimitzar l'eficiència del sistema per assolir els objectius fixats, queda fora de l'abast del projecte fer proves amb diversos tipus de components, fabricar-los o modificar els paràmetres tècnics utilitzats –potència òptica generada, longitud de la fibra òptica, etc.–.

1.5. Context en les línies de recerca i transferència de coneixement del TecnoCampus

El projecte permet aplicar de forma pràctica molts coneixements adquirits durant la carrera d'Enginyeria electrònica. A banda, busca assentar les bases per impulsar la investigació sobre la tecnologia PVoF al TecnoCampus, que avui es limita a l'àmbit teòric, dins de les línies marcades pel grup de recerca “Fabricació Intel·ligent i Innovació Industrial (FI4.0)” .

2. Antecedents i necessitats d'informació

A causa del caràcter innovador de la tecnologia PWoF, des de l'inici del projecte es va plantejar la importància de recopilar el màxim d'informació possible sobre ella, no només per conèixer els components i les claus del funcionament d'un sistema d'aquest tipus, sinó també per determinar en quin estat de desenvolupament es troba.

El primer que es va evidenciar, en aquest sentit, és que la major part dels projectes i estudis existents són bastant recents, cosa que impedeix l'existència de fonts d'informació consolidades i contrastades. Fins i tot la nomenclatura utilitzada és moltes vegades divergent. Afortunadament, pràcticament tots els experiments i investigacions realitzats arreu del món i publicats en revistes especialitzades poden consultar-se avui en dia en format digital, cosa que ha facilitat significativament la tasca documental.

Un dels articles que es van agafar com a referent a l'hora de buscar informació va ser "Recent Advancement in Power-over-Fiber Technologies", de l'enginyer i professor de la Universitat d'Electro-Comunicacions de Tokio Dr. Motoharu Matsuura. Aquest text, publicat l'agost de 2021 a la revista *Photonics*, ha estat essencial a l'hora de conèixer i estudiar els antecedents del projecte.

Un cop resolta la fase inicial d'investigació documental, es va decidir enfocar la cerca d'informació en els tres elements fonamentals del sistema: els làsers i la seva integració en sistemes PWoF, la fibra òptica i els convertidors d'energia òptica-elèctrica. Durant aquesta fase, es va evidenciar la gran importància que té l'eficiència en cada un dels processos que intervenen en la transferència d'energia, motiu pel qual s'ha posat molt èmfasi a trobar les fórmules i definicions que permeten fer els càlculs relacionats.

Finalment, s'ha buscat informació sobre les possibles aplicacions que se li podria donar al sistema projectat, donant preferència al camp de l'electrònica de potència, que presenta un especial atractiu atès el gran desenvolupament que està tenint i a les seves possibilitats.

2.1. Elements i aspectes clau d'un sistema PWO

Un sistema Power-Over-Fiber (PWO) és aquell capaç de transmetre energia a distància mitjançant fibra òptica.

La configuració bàsica del sistema (Fig. 2.1) consta de tres blocs principals: una unitat encarregada de convertir l'energia elèctrica en energia òptica i transmetre-la; la mateixa fibra òptica com a mitjà de transmissió; i una unitat receptora, responsable de convertir l'energia òptica rebuda en electricitat, amb la qual s'alimentarà la càrrega que farà funcionar un dispositiu determinat.

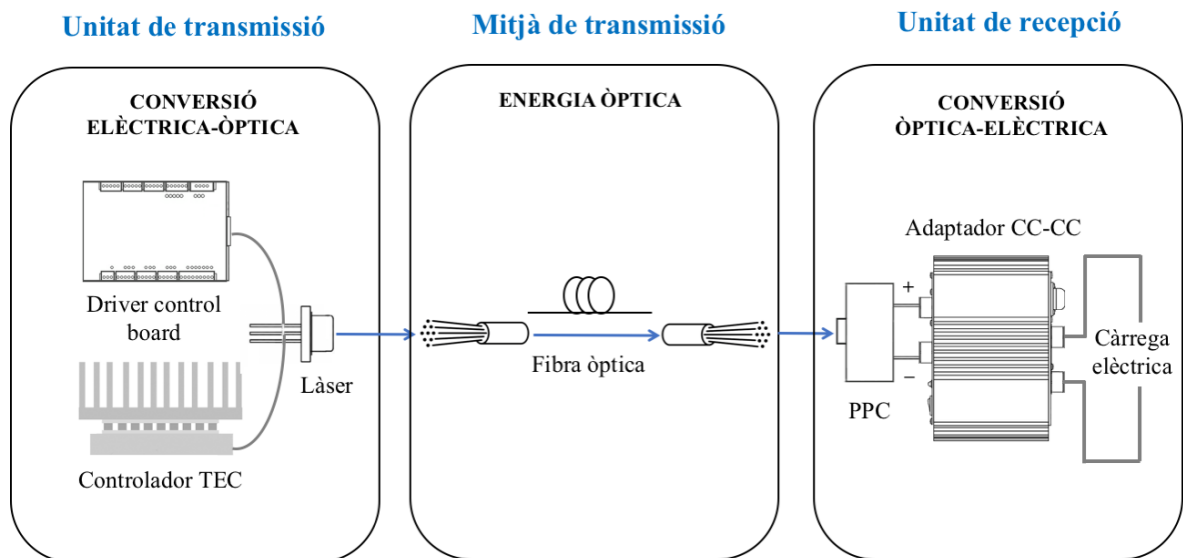


Fig. 2.1. Configuració bàsica d'un sistema PWO.

La font transmissora d'energia òptica acostuma a ser un làser d'alta potència, acoblat a un controlador de refrigeració termoelèctrica (TEC). El control i la gestió de la potència elèctrica en aquesta part del procés es realitza gràcies a una *driver control board*.

En l'actualitat, almenys dues empreses [1], [2] ofereixen solucions de transmissió integrades, conegudes comercialment com a Photonic Power Module (PPM).

La unitat receptora, per la seva banda, conté dos components essencials: un Photonic Power Converter (PPC), que realitza la conversió òptica-elèctrica, i un adaptador CC/CC, per ajustar el nivell de voltatge del corrent continu.

2.1.1. Eficiència del sistema

Un paràmetre essencial per al bon funcionament d'un sistema PWoF és l'eficiència. Per avaluar-lo, s'utilitzen diferents fórmules [3] que relacionen el rendiment obtingut en cada un dels punts crítics del procés: conversió elèctrica-òptica ($N1$), transmissió òptica ($N2$) i conversió òptica-elèctrica ($N3$).

En aquest sentit, l'Eficiència Global Energètica (GEE) és definida per la relació entre l'energia elèctrica subministrada després de la conversió òptica-elèctrica (P_{O-E}) i l'energia elèctrica d'entrada al làser (P_{INL}):

$$GEE = \frac{P_{O-E}}{P_{INL}} = N1 N2 N3 \quad (2.1)$$

També es pot avaluar l'eficiència sense tenir en compte la conversió elèctrica-òptica. En aquest cas obtenim l'Eficiència Energètica del Sistema (SEE), donada per la relació entre l'energia elèctrica subministrada després de la conversió òptica-elèctrica (P_{O-E}) i l'energia òptica de sortida del làser (P_{OUTL}):

$$SEE = \frac{P_{O-E}}{P_{OUTL}} = N2 N3 \quad (2.2)$$

El tipus de fibra òptica seleccionat, per la seva banda, determina la SEE en relació amb la distància i l'energia que es pot lliurar de forma remota [4], tal com es veu a la Fig. 2.2.

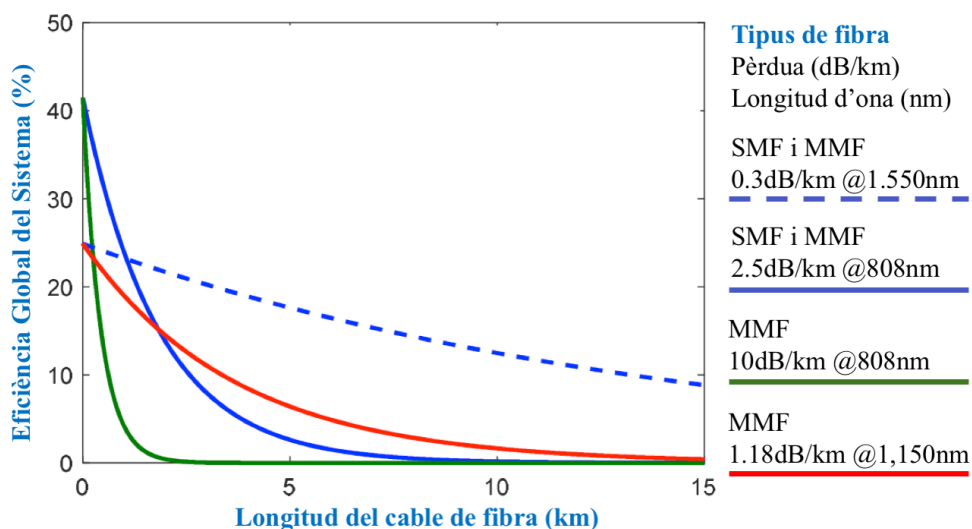


Fig. 2.2. Eficiència global del sistema, segons el tipus de fibra òptica utilitzat.

Aquest volum d'energia també estarà condicionat per aspectes com les pèrdues produïdes durant la transmissió, els danys soferts per la fibra a causa de les seves limitacions i els efectes no lineals que poden aparèixer quan camps òptics amb diferents longituds d'ona es propaguen de forma simultània. Tots aquests aspectes es tractaran amb més detall al parlar dels avantatges i desavantatges que ofereix cada tipus de fibra òptica.

2.2. El làser

En un sistema PWO, l'encarregat de generar l'energia que serà enviada a través de la fibra òptica en forma de llum d'alta intensitat és un transmissor làser, gairebé sempre de díode.

La paraula làser és un acrònim de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", que fa referència al procés pel qual un àtom o molècula en estat d'excitació són estimulats amb un fotó de llum de la mateixa longitud d'ona per tal que produeixin dos fotons idèntics al rebut, cosa que amplifica la llum.

L'emissió estimulada permet al làser emetre un feix de llum coherent; és a dir, que està en fase i amb les ones sincronitzades entre si. Això li dona una sèrie de propietats úniques:

- Intensitat
- Monocromatisme: té una única longitud d'ona.
- Estabilitat
- Pot dirigir-se amb molta precisió

El fenomen de l'emissió estimulada va ser proposat per Albert Einstein l'any 1917 i, després d'anys d'experimentació i desenvolupament, l'any 1960 va ser aplicat per primer cop de forma pràctica pel físic estatunidenc Theodore Maiman, a qui es considera inventor del primer làser funcional [5].

2.2.1. Photonic Power Module

Per simplificar i optimitzar l'ús del làser de díode, les empreses dedicades a la fabricació de dispositius òptics acostumen a comercialitzar-los dins d'un mòdul compacte anomenat PPM. A banda del làser, en aquestes unitats de transmissió integrades s'incorpora també una *driver control board*, que permet connectar el mòdul a una font d'alimentació externa, alhora que possibilita controlar la intensitat entrant i, en conseqüència, la potència transmesa [6].

Atès que els làser generen grans quantitats de calor residual, els PPM solen incloure també sistemes de refrigeració [7]. Entre els dispositius més utilitzats per realitzar aquesta tasca destaquen els controladors de refrigeració termoelèctrica (TEC), els quals actuen com a bombes de calor transferint l'excés de calor d'una superfície a una altra (Fig. 2.3).

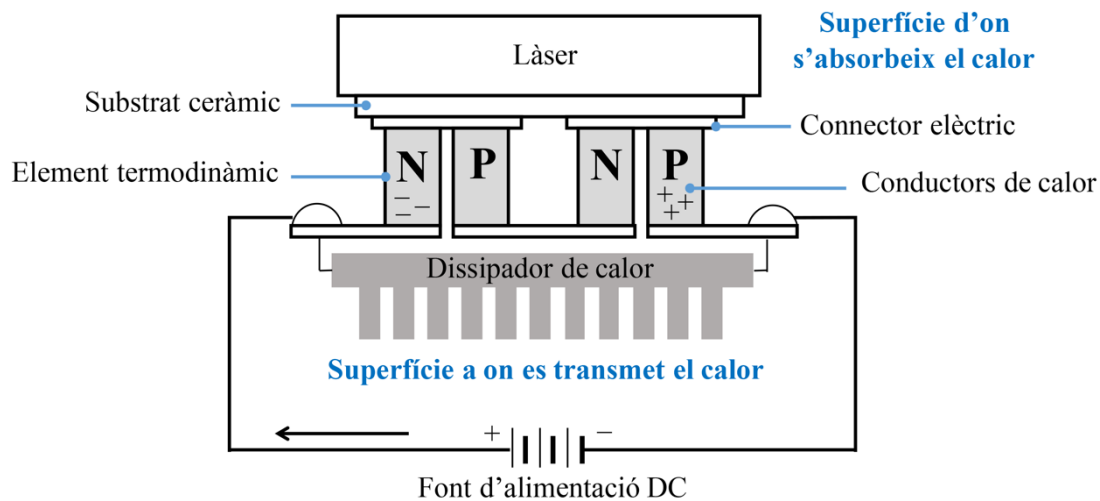


Fig. 2.3. Configuració bàsica d'un controlador de refrigeració termoelèctrica.

Un TEC acostuma a mantenir un làser a uns 25°C de temperatura. El rendiment d'un dissipador de calor s'acostuma a especificar en termes de resistència tèrmica (Q):

$$\theta = (T_s - T_a) / Q \quad (2.3)$$

On θ és la resistència tèrmica en °C per watt; T_s és la temperatura del dissipador en °C; T_a és la temperatura ambient en °C; i Q és l'entrada de calor al dissipador en watts.

Finalment, els mòduls PPM també solen incorporar un cable de fibra òptica fusionat al circuit, que per la seva forma rep el nom de *pigtail*. Aquest cable no acostuma a operar directament amb la unitat receptora, sinó que s'utilitza per facilitar i optimitzar la connexió del làser amb el *patch cord* principal de fibra òptica.

2.2.2. Potència òptica

La potència òptica d'emissió d'un làser, també coneguda com a lluentor o radiància, és la quantitat d'energia òptica que emet el làser en un segon, mesurada en watts (W). Aquesta potència ve determinada per diferents factors, tot i que els tres principals són: la potència

elèctrica que se li subministra al làser –com més rebi, més lluentor–, la seva eficiència elèctrica-òptica –la relació entre la potència elèctrica rebuda i l'energia òptica transmesa– i la longitud d'ona –com més curta sigui, més energia podrà transportar cada fotó–.

La relació entre la potència òptica i el corrent que circula pel làser es mostra en la corba de la Fig. 2.4 [8]. Aquesta corba s'utilitza per establir el punt operatiu del làser i les regions d'emissió espontània i estimulada del làser, que estan delimitades pel corrent llindar (I_{th}).

La temperatura del làser també afecta el seu rendiment. Quan s'incrementa en excés, augmenta el moviment dels fotons, cosa que perjudica la generació d'energia òptica.

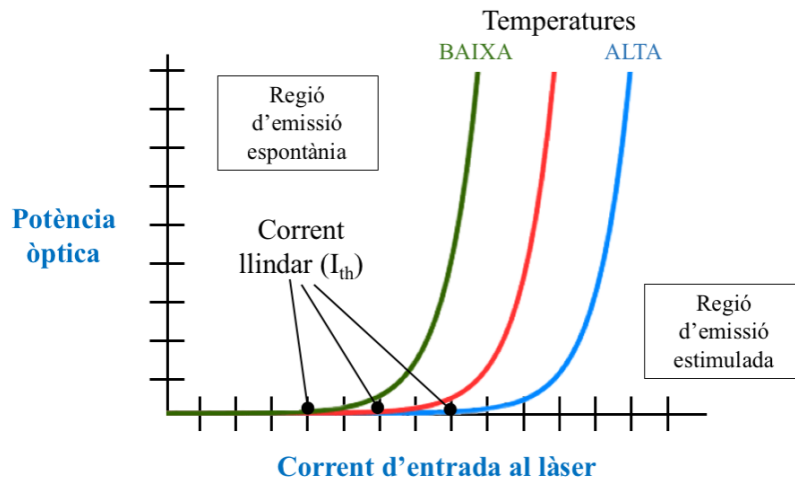


Fig. 2.4. Corba de relació P/I, on es mostra també la influència de la temperatura a l'hora d'establir el corrent llindar.

2.2.3. Làsers utilitzats en PWO F

a) High Power Laser Diode (HPLD)

D'entre els làsers existents, els més utilitzats en PWO F són els semiconductors o de díode [9], ja que són relativament petits, barats i eficients, al mateix temps que són compatibles amb els components electrònics i la seva lluentor. Durant molt de temps, aquest tipus de làsers van oferir prestacions molt limitades, però el seu desenvolupament ha permès l'aparició dels actuals làsers HPLD, d'alta potència òptica.

Els làsers de díode utilitzen una unió p-n de materials semiconductors com a medi actiu. La regió p-n conté tant portadors de càrrega majoritària –electrons en una unió n– com portadors de càrrega minoritària –forats en una unió p–. Quan s'aplica un camp elèctric a una unió p-n, els electrons de la banda de conducció de la regió n es poden excitar a la banda de valència de la regió p. Això crea forats en la banda de conducció de la regió p. Els electrons i els forats es poden recombinar, alliberant energia en forma de llum.

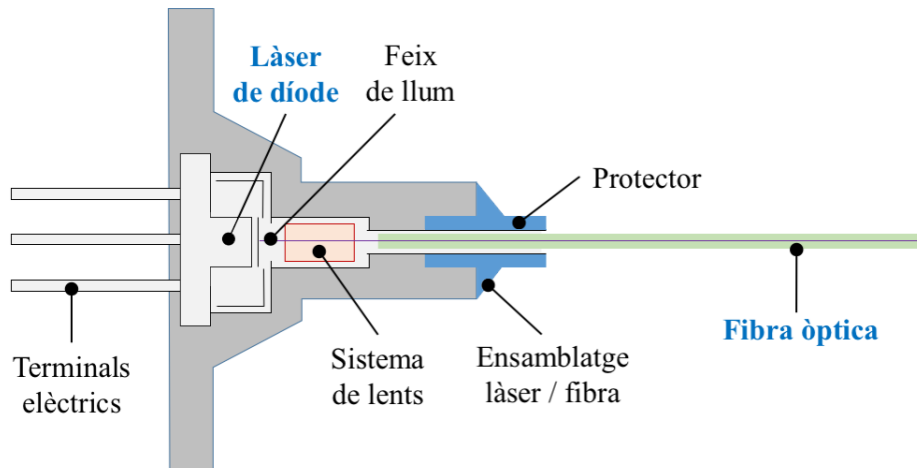


Fig. 2.5. Secció perpendicular d'un làser de díode amb fibra òptica acoblada.

Els làsers HPLD ofereixen un ampli rang de longituds d'ona que van des dels 760 nm als 2,5 μm , generant des de rajos ultraviolats (UV) fins a infrarojos (IR) [10]. Cada làser treballa dins d'un rang determinant depenent principalment del material semiconductor que utilitza per produir la llum. Molts models dedicats a la tecnologia PWoF usen una longitud d'ona que varia entre 808 nm i 840 nm, ja que dins d'aquest rang les pèrdues en la transmissió amb fibra òptica són mínimes per a distàncies inferiors als 1,3 km.

Pel que fa a l'eficiència de conversió elèctrica-òptica (E-O), acostuma a ser d'entre un 30% i un 50% [9]. Això significa que per cada 100 unitats d'energia elèctrica que s'injecten a un HPLD, s'obtenen entre 30 a 50 unitats d'energia òptica. El màxim percentatge a què s'ha arribat va ser un 76%, en un experiment realitzat amb una llargada d'ona de 940 nm [11].

L'eficiència de conversió E-O d'un làser de díode (LD) [12] és definida per l'expressió:

$$\eta_{E-O(LD)} = \eta_i \eta_d \frac{E_g}{V} \left(1 - \frac{I_{th}}{I} \right) \quad (2.4)$$

On η_i és l'eficiència de l'entrada de corrent; η_d és l'eficiència quàntica externa diferencial –definida com la relació entre l'increment de fotons de sortida i el nombre d'electrons injectat–; E_g és l'energia de la banda prohibida expressada en electró-volts (eV); V és el voltatge aplicat al dispositiu; i I_{th} és el corrent llindar, el mínim necessari per generar fotons.

b) Làsers de fibra Raman

Una alternativa als làsers de díode són els làsers de fibra tipus Raman, dins de la categoria de làsers en estat sòlid. Tot i ser més grans i costosos que els de díode, permeten una millor integració amb diferents tipus de fibres òptiques. En aquest tipus de dispositius, el medi actiu –que és sòlid– i la cavitat ressonant –una estructura òptica que ajuda a amplificar la llum emesa–, estan integrats en una fibra òptica.

Els làser Raman funcionen mitjançant un fenomen no lineal anomenat Stimulated Raman Scattering (SRS). Gràcies a aquest, la llum de bombejament d'una freqüència ω_p excita els modes vibracionals de les molècules de la fibra òptica, la qual cosa resulta en l'emissió de llum d'una freqüència ω_s desplaçada per una quantitat $\omega_s - \omega_p$, que és el que es coneix com a desplaçament Raman. Variant la freqüència de bombejament, es pot generar llum làser amb diferents longituds d'ona –s'arriba a bandes de 1.480 nm i 1.550 nm– [13].

Perquè el fenomen SRS es produeixi de manera eficient, és necessari que la potència de la llum de bombejament sigui prou alta per superar les pèrdues de la fibra òptica i excitar els modes vibracionals de les seves molècules.

2.3. La fibra òptica

La fibra òptica, utilitzada tradicionalment per a l'enviament de grans volums de dades a distància, és el mitjà per on es transmet l'energia en un sistema PWF.

Aquest conductor està format per diferents cilindres concèntrics: el nucli per on circula la llum, fet normalment amb filaments de vidre o plàstic transparent; un revestiment que rodeja al nucli, fet del mateix material però amb un índex de refracció lleugerament menor; i el recobriment, format per diferents capes externes, normalment fabricades amb polímers, que incrementen la rigidesa del cable, alhora que el protegeixen i faciliten la seva manipulació.

El funcionament de la fibra òptica es basa en un fenomen físic anomenat reflexió total interna (Fig. 2.6). Quan un raig de llum passa d'un mitjà amb un índex de refracció donat (μ_1) a un altre amb un índex de refracció diferent (μ_2), si $\mu_1 > \mu_2$, el raig es desviarà i el seu angle de sortida serà més gran que l'angle amb què havia entrat (θ_r). Això és el que succeeix quan un raig de llum que entra al nucli de la fibra arriba al seu revestiment. L'angle de sortida arribarà als 90° per a algun angle d'incidència crític (θ_c). Per a tots els angles d'incidència més grans que aquest angle crític, el raig es reflectirà per complet en el nucli. Això permet que la llum es propagui per la fibra òptica sense perdre energia.

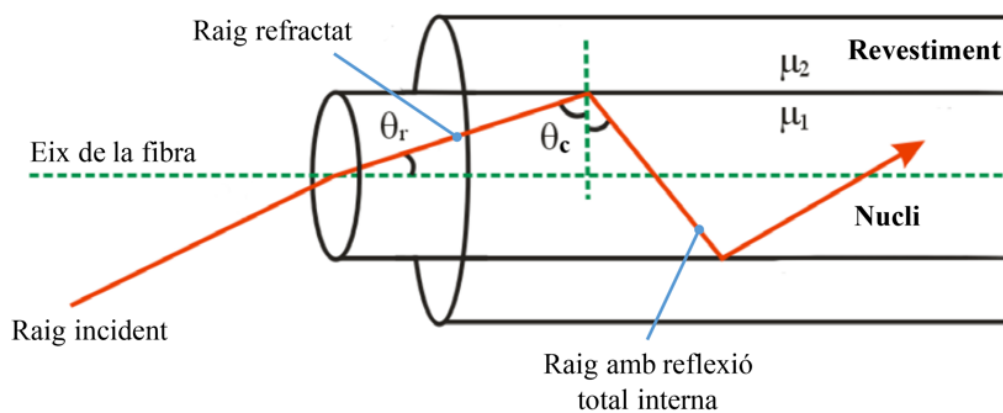


Fig. 2.6. Propagació de la llum a través de la fibra òptica.

El diàmetre del nucli juga així un paper determinant en aquest sistema: com més petit sigui, menor serà l'angle crític i, en conseqüència, la llum tindrà un índex d'incidència més alt. Però això té una contrapartida en el cas dels sistemes PWoF: a l'hora de transmetre grans quantitats d'energia, si el diàmetre no és prou gran, la llum es propagarà massa concentrada, sobreescalfant el nucli i danyant-lo –és l'efecte conegut com a *fiber fuse*– [14].

Tot i que diferents científics van posar el seu granet de sorra en l'experimentació inicial amb aquesta tecnologia, la creació d'un cable adequat que permetés la transmissió de dades no va arribar fins a la dècada dels setanta, quan tres físics de l'empresa nord-americana Corning Glass Works –Robert Maurer, Donald Keck i Peter Schultz–, van aconseguir reduir significativament l'atenuació de les fibres fabricades [15].

2.3.1. Modes de propagació

Una de les formes més habituals de classificar les fibres òptiques és en funció de la quantitat de modes de propagació que tenen a través del nucli [16]. Bàsicament, n'hi ha de dos tipus:

a) Fibres òptiques monomode (SMF)

En aquest cas, la llum només segueix una trajectòria. Les SMF es caracteritzen per tenir un nucli molt petit, de només 8 a 10 μm de diàmetre, cosa que permet la propagació de la llum en un sol mode. Això garanteix un senyal d'alta qualitat, però alhora els hi resta molta capacitat per treballar amb grans volums d'energia. S'utilitzen principalment per a transmissions a llarga distància.

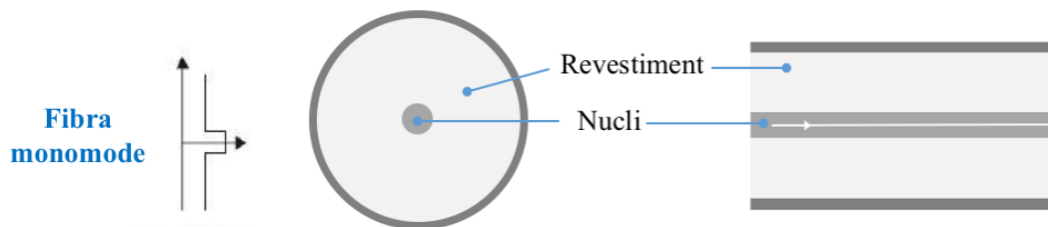


Fig. 2.7. Estructura i propagació de la llum en fibres monomode.

b) Fibres òptiques multimode (MMF)

En aquest cas, la llum pot seguir diferents trajectòries. Les MMF tenen un nucli més gran, de 50 a 100 μm de diàmetre. Això permet que la llum es propagui pel nucli amb més potència, però també en múltiples modes, cosa que alenteix la transmissió i pot provocar interferències. Donada la seva capacitat de transmetre un major volum d'energia, tot i els desavantatges, són les fibres més emprades en els sistemes PWO. F.

El paràmetre que determina la quantitat de modes d'una fibra òptica és la seva freqüència normalitzada (V), la qual s'expressa a través de (2.5) [17]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} r (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.5)$$

On λ és la longitud d'ona; r és el radi de la fibra; n_1 és l'índex de refracció de nucli i n_2 l'índex de refracció del revestiment. El terme $(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ correspon a l'obertura numèrica (NA), que caracteritza el rang d'angles pels quals un sistema accepta llum.

Si $V < 2,405$, la fibra serà monomode. Si $V > 2,405$, la fibra serà multimode.

El límit és quan $V = 2,405$. En aquest cas, es defineix la longitud d'ona de tall.

$$\lambda_{TALL} = \frac{2\pi}{2,405} r (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.6)$$

Si $V < \lambda_{TALL}$, la fibra serà monomode. Si $V > \lambda_{TALL}$, la fibra serà multimode.

En el cas de fibres multimodes, es pot calcular la quantitat de modes existents amb:

$$Modes = \frac{V^2}{2} \quad (2.7)$$

2.3.2. Índex de refracció

Una altra forma de classificar les fibres òptiques és en funció de l'índex de refracció [18]:

a) Fibres òptiques d'índex escalonat (SI)

L'índex de refracció és constant: el del nucli sempre és més gran que el del revestiment.

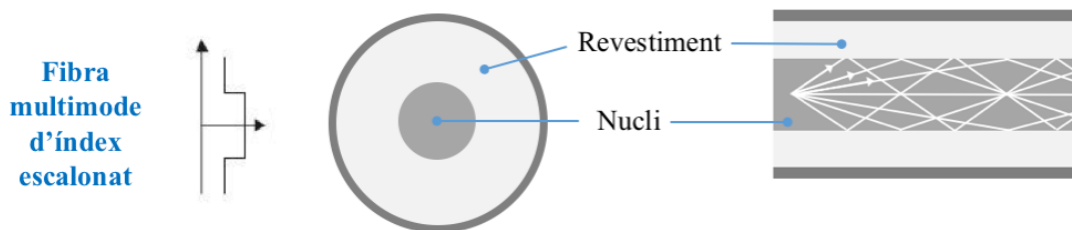


Fig. 2.8. Estructura i propagació de la llum en fibres multimode SI

b) Fibres òptiques d'índex gradual (GI)

L'índex de refracció varia gradualment des del nucli fins al revestiment.

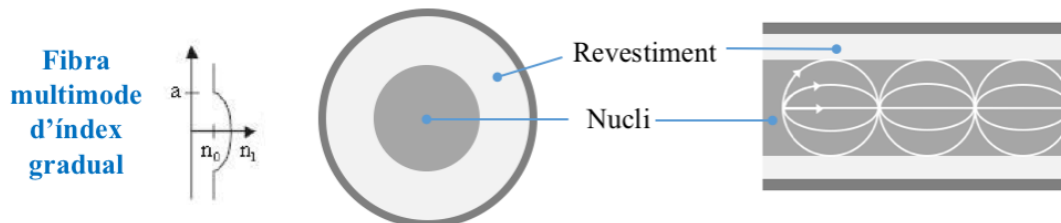


Fig. 2.9. Estructura i propagació de la llum en fibres multimode GI.

Dos tipus de fibres cada cop més utilitzades en sistemes PWF són les de múltiples nuclis (MCF) i les de doble cobertura (DCF). Tot i ser més cares i difícils d'instal·lar que les MMF tradicionals, ofereixen alta potència però mantenint la qualitat del senyal.

Les MCF [19] tenen diversos nuclis de diàmetre similar, però cadascun amb el seu propi índex de refracció. Això permet que la llum es propagui de forma simultània en diversos modes sense interferències.

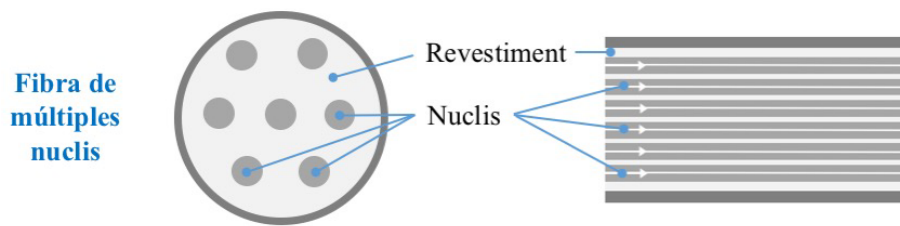


Fig. 2.10. Estructura i propagació de la llum en fibres MCF.

Les DCF [16] tenen dos revestiments envoltant el nucli en lloc d'un. L'extern té un índex de refracció més baix que l'intern, cosa que permet que en la seva intersecció també es produeixi la reflexió total interna i la llum circuli a través del revestiment interior.

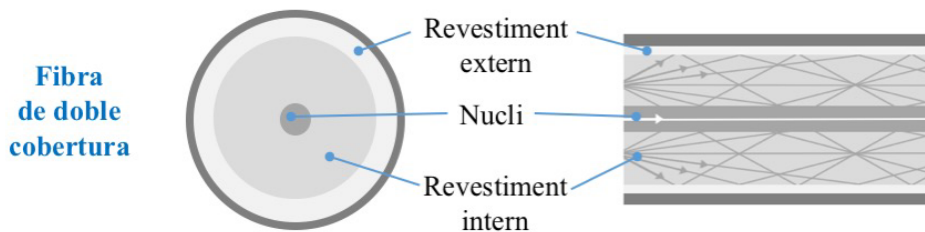


Fig. 2.11. Estructura i propagació de la llum en fibres DCF.

Donat que el sistema ofereix dues vies de transmissió paral·leles, una monomode a través del nucli i una multimode a través del revestiment interior, les fibres DCF permeten enviar de forma simultània un senyal d'alta qualitat i un gran volum de potència.

A banda de les esmentades, hi ha un altre tipus de fibra, encara en desenvolupament, que hom considera té potencial per acabar revolucionant el món de les comunicacions òptiques. Es tracta de les fibres òptiques de nucli buit (HCF) [20], anomenades així perquè, a diferència de les convencionals, no tenen un nucli sòlid.

El fet que la llum es propagui a través del buit té molts avantatges, com per exemple permetre transmetre a velocitats més altes, obtenir una major precisió –ja que la llum es modula més fàcilment– i també un senyal de més qualitat –ja que es redueix la dispersió–.

2.3.3. Eficiència de la transmissió

La transmissió d'energia mitjançant fibra òptica segueix la llei de Lambert, que estableix que el senyal s'atenuarà progressivament en funció de la distància. De cara a mesurar l'eficiència de la transmissió, per aquest motiu, és determinant conèixer la pèrdua d'atenuació de la fibra òptica utilitzada (en dB/km), que es pot trobar a partir de (2.8), on α_{in} és la quantitat de llum transmesa pel làser i α_{out} és la llum que arriba al PPC [21].

$$\rho_{dB/km} = 10 \log_{10} \left(\frac{\alpha_{in}}{\alpha_{out}} \right) \quad (2.8)$$

La Taula 2.1 mostra alguns estàndards de fibra i la pèrdua de potència en cada cas [22]:

Fibra	Longitud d'ona (nm)	Diàmetre nucli (μm)	Pèrdua energia (dB/km)
MMF	850	50	2,4
		62,5/125	3
	1300	50	0,7
		62,5/125	0,75
SMF	1310	9	0,35
	1550	9	0,22

Taula 2.1. Comparativa de l'atenuació soferta per diferents tipus de fibra òptica.

2.4. Convertidors de potència fotònica

Els Photonic Power Converter (PPC) són un altre element essencial en el procés de transmissió d'energia a través de la fibra òptica, ja que són els encarregats de convertir la llum làser en electricitat. Bàsicament, es tracta de cel·les solars optimitzades per treballar amb llum monocromàtica. Es tracta d'una tecnologia incipient, però que està tenint un ràpid desenvolupament.

Aquests dispositius basen el seu funcionament en un fenomen físic anomenat efecte fotoelèctric extern, que es produeix quan la llum incideix en un material semiconductor i allibera electrons. Aquests electrons lliures poden ser utilitzats per generar electricitat.

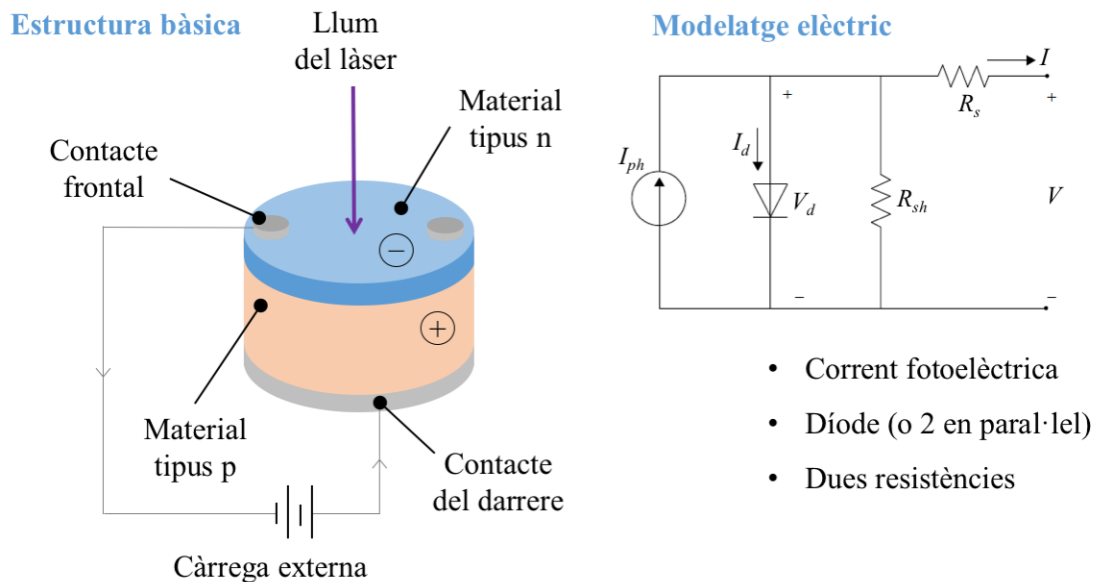


Fig. 2.12. Estructura i modelatge elèctric [23] característic d'un convertidor fotovoltaic.

L'efecte fotoelèctric va ser descobert i descrit per primer cop l'any 1887 pel físic alemany Heinrich Hertz, mentre que l'explicació teòrica va ser formulada per Albert Einstein (1905) i ampliada posteriorment per Robert Andrews Millikan (1916).

2.4.1. Materials de fabricació i longitud d'ona

A diferència de les PV que converteixen la llum solar en electricitat, les quals gairebé sempre estan fetes de silici (Si), els PPC es fabriquen també amb arsenur de gal·li (GaAs) i altres compostos semiconductors III-V [24].

Depenent del material amb què estigui fet, cada dispositiu funcionarà de forma òptima en una banda de longitud d'ona o una altra, tal com es veu a la Taula 2.2. La majoria dels convertidors que operen en un rang espectral d'entre 800-850 nm, per exemple, es fabriquen amb GaAs, mentre que per longituds d'ona més altes, per sobre dels 1400 nm, s'acostumen a utilitzar altres compostos, com l'arsenur d'indi-gal·li (InGaAs) o l'antimonur de gal·li (GaSb) [9].

Símbol	Material	Rang espectral (nm)	Màxima eficiència (λ)
Si	Silici	800-1000	980
GaAs	Arsenur de gal·li	780-900	808
InGaAs	Arsenur d'indi-gal·li	1300-1600	1550
GaSb	Antimonur de gal·li	1550-2200	1680

Taula 2.2. Principals materials emprats per fabricar PPC i longituds d'ona en què operen.

Perquè un sistema PWO_F funcioni adequadament, caldrà òbviament que la font d'energia òptica i el PPC operin dins del mateix rang espectral.

La màxima eficiència en el procés de conversió s'aconsegueix quan el PPC és il·luminat amb una llum làser de longitud d'ona similar a la longitud d'ona de tall (λ_c) del material absorbent –és a dir, aquella on l'absorció de llum és mínima–.

Donat que la longitud d'ona de tall és inversament proporcional a l'energia de la banda prohibida del material emprat, es poden conèixer ambdues magnituds partint de l'equació de Vashrni, descrita a (2.9). Aquesta equació empírica descriu la variació de l'energia de la banda prohibida (E_g) d'un semiconductor a una temperatura determinada [23].

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2.9)$$

On $E_g(T)$ és l'energia de la banda prohibida a la temperatura del semiconductor; $E_g(0)$ és l'energia de la banda prohibida a temperatura 0; α i β són dues constants que depenen del material; i T és la temperatura del material.

Coneixent el valor de E_g , es pot calcular el de λ_c , aplicant (2.10), on h és la velocitat de la llum (3×10^8 m/s) i c la constant de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J s). Arrodonint, $hc = 1.420$ eV m.

$$\lambda_c = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (2.10)$$

2.4.2. Comportament elèctric

El comportament elèctric del PPC es defineix per les corbes que es mostren en la Fig. 2.13.

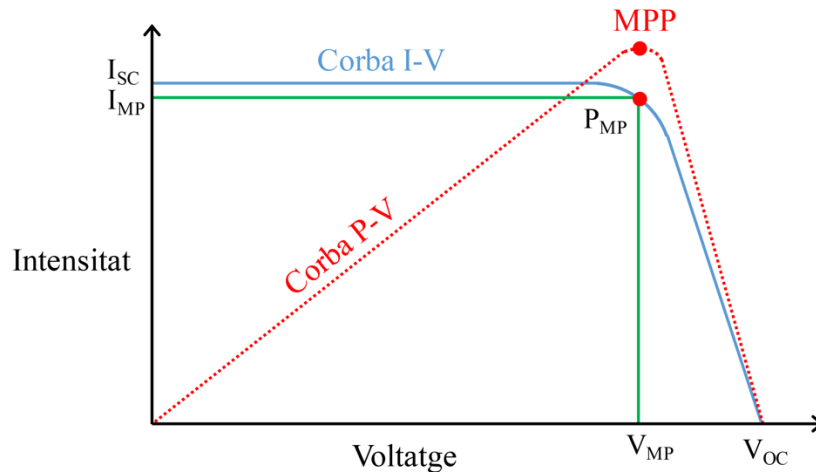


Fig. 2.13. Representació gràfica de la càrrega de potència (corba P-V) i dels punts operacionals del PPC (corba I-V) .

La tensió de circuit obert (V_{OC}) i el corrent de curtcircuit (I_{SC}) són els valors màxims de voltatge i intensitat que pot lliurar un PPC. El corrent de curtcircuit es produeix en condicions de voltatge zero i sense càrrega. La tensió de circuit obert, per la seva banda, es produeix quan la intensitat és nul·la. En conseqüència, en aquestes dues situacions la potència elèctrica serà zero.

La tensió a màxima potència (V_{MP}) i la intensitat a màxima potència (I_{MP}), per la seva banda, es corresponen al voltatge i la intensitat en què s'obté una major quantitat d'energia. La tensió a màxima potència està limitada per la tensió de circuit obert i la intensitat a màxima potència ho està pel corrent de curtcircuit.

Cada punt de la corba V-I es correspon a un punt operacional del PPC, sent P_{MP} aquell on es generarà una major potència. En cada un d'aquests punts cal aplicar una resistència de càrrega (R_{LOAD}) particular per maximitzar la generació de potència.

La corba P-V representa la relació entre el subministrament de potència a la càrrega per part del PPC i el voltatge. Es genera multiplicant la intensitat i el voltatge instantanis en el rang operacional del PPC. El punt marcat com a MPP assenyalava el punt on la cel·la aconseguiria assolir teòricament el seu màxim rendiment.

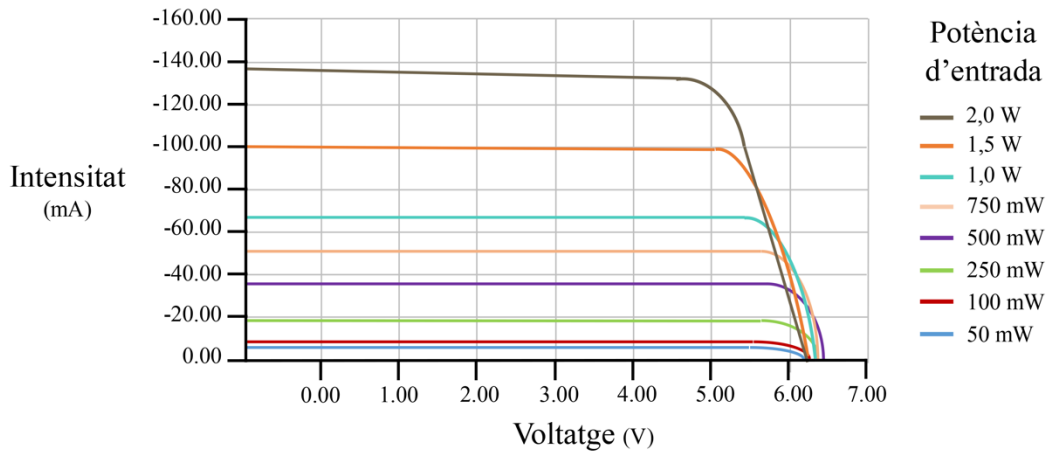


Fig. 2.14. Comportament de la corba I-V en funció de la potència òptica d'entrada en un convertidor de 6V.

Normalment, el corrent de curtcircuit és linealment proporcional a la potència òptica, mentre que la tensió de circuit obert varia de forma logarítmica (Fig. 2.14).

Les pèrdues de tensió que genera la resistència, per la seva part, fan disminuir la tensió de màxima de potència quan el nivell d'energia òptica és alt, alhora que la intensitat a màxima potència continua augmentant.

Hi ha dues maneres d'extreure energia del PPC. Escollir entre una o altra dependrà de l'aplicació en què es treballi:

a) Si es prefereix que la potència de sortida sigui constant, es pot establir que la recta de càrrega s'acosti al valor de V_{MP} / I_{MP} per extreure la màxima potència del PPC al mateix temps que la potència d'entrada es manté estable.

b) L'altre mètode és regular la tensió de sortida en un nivell fix. Amb aquest procediment es redueix l'eficiència de la conversió, però s'assegura que la R_{LOAD} no fa variar la potència.

2.4.3. Tensió de sortida

La tensió de sortida d'un PPC depèn de la quantitat de cel·les fotovoltaïques que tingui connectades. Cada cel·la d'un PPC subministra aproximadament una V_{OC} de 1 V, valor que varia segons el material utilitzat (Taula 2.3) [25]. Això és degut al fet que no tots els materials tenen la mateixa bretxa d'energia; és a dir, no tots necessiten la mateixa energia mínima per aconseguir que els fotons excitin els electrons i generin un corrent elèctric.

Símbol	Material	Bretxa d'energia (eV)	Tensió de sortida (V)
Si	Silici	1,12	0,7
GaAs	Arsenur de gal·li	1,4	1,1
InGaAs	Arsenur d'indi-gal·li	0,7	0,5
GaSb	Antimonur de gal·li	0,7	0,5

Taula 2.3. Comparativa de les tensions de sortida de diferents cel·les fotovoltaïques de PPC en funció del material de fabricació [12].

Per augmentar la tensió de sortida, existeix l'opció de connectar en sèrie diferents convertidors, però la seva fabricació és complexa, ja que tots ells necessiten rebre la mateixa intensitat lumínica, cosa que obliga a un alineament perfecte.

Una alternativa és l'apilament vertical de diversos PPC, una opció que s'ha experimentat amb èxit i que ha permès augmentar la tensió de sortida més enllà dels 6 V, transmetent 1 W de potència amb una eficiència de conversió òptica-elèctrica superior al 50% [26].

2.4.2. Eficiència de la conversió òptica-elèctrica

L'altre paràmetre fonamental per avaluar el rendiment d'un PPC és la quantitat de potència elèctrica que s'acaba subministrant des de la unitat receptora, cosa que dependrà del volum d'energia que arribi per la fibra òptica i, de forma molt significativa, de l'eficiència de la conversió òptica-elèctrica.

Aquest és un dels punts que més dubtes plantegen d'aquesta tecnologia, ja que, tot i les millores que a poc a poc es van fent per optimitzar aquesta part del procés, l'eficiència dels PPC continua sent baixa, cosa que redueix de forma significativa l'eficiència global de tot el sistema. Comparat amb el 98% d'eficiència de la transmissió d'energia amb cable de coure –només es perd un percentatge molt petit en forma de calor–, l'eficiència d'un sistema PWoF transmissor d'energia no acostuma a superar el 20%.

El càlcul de l'eficiència d'un PPC es realitza a partir de (2.11), on el corrent de curtcircuit (I_{sc}) creix proporcionalment en funció de la potència d'entrada (P_{in}) [24].

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.11)$$

El factor de farciment o *Fill Factor* (FF) és la relació entre la potència de sortida de la cel·la i la de llum incident. S'expressa com un percentatge: un FF del 100% significarà que la cel·la converteix tota la llum incident en electricitat. En la Fig. 2.15, FF apareix representat gràficament com l'àrea del rectangle més gran que s'ajusta a la corba.

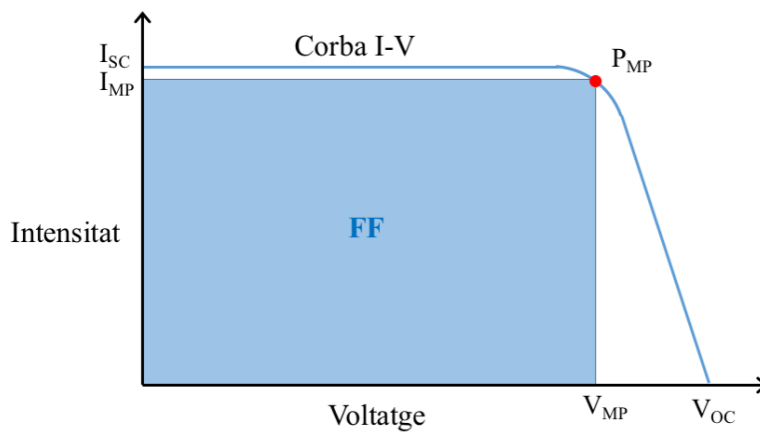


Fig. 2.15. Representació gràfica del factor de farciment (FF).

El valor resultant està lligat a una temperatura determinada i, per aquest motiu, si aquesta varia també canviarà el rendiment del dispositiu. En aquest sentit, com també passa amb els làsers, a més temperatura els convertidors generaran menys potència, motiu pel qual és necessari tenir-los sempre refrigerats.

Com s'ha pogut constatar, bona part dels esforços de millora actuals pel que fa a investigació se centren a aconseguir la màxima eficiència en aquesta part del sistema. És la que més marge de millora té. Així, per exemple, centrant l'atenció en l'experimentació amb PPC de GaAs, la màxima eficiència que s'ha obtingut amb aquest material és d'un 74,7% amb un làser operat a una longitud d'ona de 808 nm [27] i també s'ha arribat a un 68,9% amb un làser operat a 858 nm [28].

Per tenir una referència de l'eficiència en la conversió òptica-elèctrica (O-E), en la Taula 2.4 es mostren els valors que apareixen en el *datasheet* de diferents PPC comercialitzats.

Model	Refrigeració	Tensió sortida (V)	@Potència entrada (mW)	Potència sortida (mW)	Rang de freqüències òptim (nm)	Eficiència
YCH-L240 MH GoPower	–	7,3	1.000	250	915-980	25%
	Passiva	7,1	1.000	287	915-980	28,7%
YCH-L270 MH GoPower	–	7,3	250	69	915-980	27,8%
	Passiva	7,5	1.000	291	915-980	29,1%
YCH-H6424 MH GoPower	–	17	1.000	248	915-980	24,8%
	Passiva	17,7	2.000	525	915-980	26,3%
	Activa	18,2	10.000	3.000	915-980	30,1%
YCH-H003 GoPower	Passiva	17,4	3.000	889	915-980	29,6
KPC8-T Kyosemi	–	4	100	34	1300-1600	30%
KPC8H-FC Kyosemi	–	4,3	300	88	1300-1600	34%

Taula 2.4. Eficiències de diferents PPC comercialitzats, junt amb altres paràmetres del seu rendiment elèctric.

2.5. Aplicacions de la tecnologia

Els sistemes PWO_F s'han convertit en els últims anys en un dels principals focus d'investigació i desenvolupament dins el camp de la fotònica, ja que es preveu poden tenir moltes aplicacions en diferents àmbits i indústries.

A continuació es documenten tres de les principals categories on s'han generat avanços significatius, ja sigui en el camp de l'experimentació o en el desenvolupament d'aplicacions comercials: l'electrònica de potència, l'alimentació de dispositius d'instrumentació –com ara sensors i mesuradors– i les telecomunicacions.

2.5.1. Electrònica de potència

Una de les aplicacions amb més potencial dels sistemes PWoF és alimentar dispositius electrònics que necessiten estar aïllats elèctricament de la font d'energia o que estan integrats en sistemes d'alta tensió o amb moltes interferències. Aquest és el cas dels *drivers* de IGBT i de MOSFET, per exemple.

La tendència creixent cap a l'electrificació ha intensificat en els últims anys la importància de l'electrònica de potència. Per això, aquest tipus de transistors que permeten velocitats de commutació molt ràpides i treballar amb tensions cada cop més altes han agafat molt protagonisme.

Els MOSFET, en essència, són els encarregats de controlar el voltatge que rep un dispositiu a partir d'una tensió d'entrada determinada. Per aconseguir-ho, requereixen un circuit electrònic que els proporcionï el senyal de control necessari. Aquest circuit rep el nom de *driver* o *gate-drive*. La seva funció principal és amplificar el corrent subministrat a la porta del transistor que controla. Això és necessari per assolir els ràpids temps de commutació que caracteritza als convertidors electrònics de potència.

La figura 2.16 representa un model simplificat de *driver* de MOSFET [29]. Els dos canals que pot tenir, el canal P i el canal N, són responsables d'amplificar el senyal que entra per R_{in} . El transistor es podrà activar o desactivar ràpidament aplicant un voltatge positiu o negatiu a la porta, respectivament, en relació amb l'emissor.

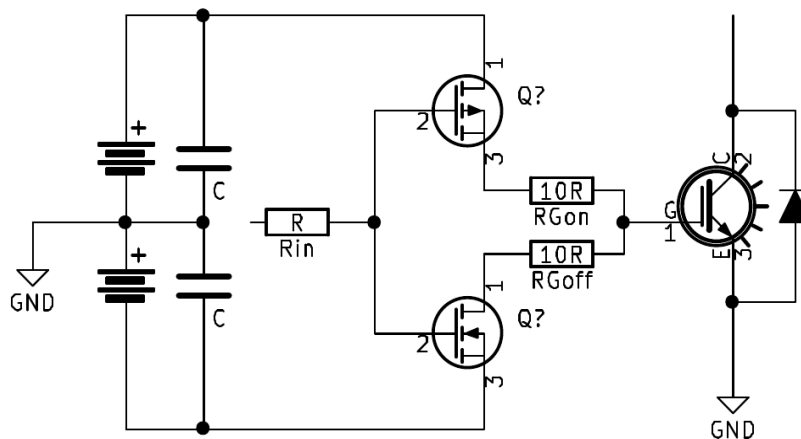


Fig. 2.16. Model simplificat d'un *driver* de MOSFET.

A la porta no hi ha una sinó dues resistències: RG_{on} i RG_{off} . Això es fa per limitar la conducció no desitjada que es produirà durant la transició d'estats a la sortida del MOSFET i per afavorir la precisió en l'activació i desactivació del transistor. Els condensadors, per la seva banda, amplifiquen la font d'alimentació del *driver*, enviant el màxim corrent possible durant la commutació. Finalment, s'ha d'afegir una resistència d'entre 10 k Ω a 100 k Ω entre la porta i l'emissor per evitar l'activació involuntària del transistor.

L'objectiu del *driver* és carregar el condensador que hi ha a la porta, conegut com a condensador d'entrada, de la forma més ràpida possible. Aquesta velocitat, però, dependrà de les característiques tant del *driver* com del transistor.

La potència requerida pel *driver* depèn de la freqüència de la commutació (f_c) i de l'energia (E) exigida en cada cicle de càrrega/descàrrega:

$$P_{driver} = E \cdot f_c \quad (2.12)$$

Tradicionalment, els transistors de potència s'han fabricat amb silici (Si), però en els últims anys s'ha produït una transició cap a l'ús de materials de banda ampla, especialment el carbur de silici (SiC). Amb aquest canvi, el seu rendiment ha augmentat de forma significativa [30]:

- Poden bloquejar voltatges 10 vegades més alts que els transistors de silici:
Suporten un voltatge d'entre 10 kV i 15 kV.
- Tenen un rendiment de gairebé un 99%.
- Poden commutar 10 vegades més ràpid: treballen amb velocitats de commutació de fins a 100 MHz.

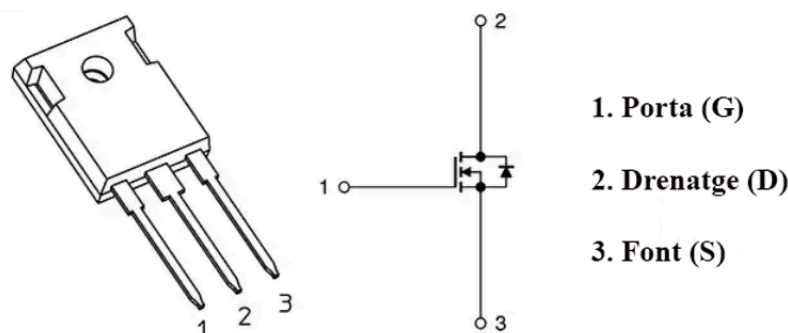


Fig. 2.17. MOSFET de tercera generació de Toshiba. N'hi ha de 650 i de 1.200 volts, tots ells amb la mateixa distribució de pins i símbol de l'esquema [31].

Aquesta capacitat per treballar amb altes taxes de canvi de voltatge (dv/dt), però, fa augmentar les interferències. Per això és fonamental optimitzar les característiques parasitàries del circuit de cara a garantir el correcte funcionament del transistor. Per a un MOSFET 15-kV de SiC, per exemple, el circuit ha de ser capaç de suportar alts voltatges d'aïllament (>15 kV) i assolir un alt rebuig en mode comú (CM) dv/dt (>110 kV/ μ s) [32].

Habitualment, aquest aïllament s'ha fet amb transformadors que exigien circuits pesats i de mida molt gran, sense que acabi de resoldre's completament el problema dels paràsits. També s'han fet proves transferint energia sense fils, però es tracta d'una solució sensible a les interferències electromagnètiques.

És en aquest punt on la tecnologia PWF ha demostrat ser el millor aliat per resoldre aquests problemes, ja que, a banda d'eliminar la capacítancia paràsita, permet reduir la mida i pes del circuit, fent-lo més fiable i segur.

2.5.2. Sensors de fibra òptica

Una altra de les aplicacions de la tecnologia PWF que ofereix moltes possibilitats és l'alimentació de sistemes de sensors de fibra òptica (OFS), els quals són cada cop més habituals en nombrosos àmbits industrials.

Un OFS és un dispositiu que permet a un agent físic o químic interactuar amb el feix de llum dins una fibra òptica mitjançant un mecanisme de transducció. Aquesta interacció es manifesta a través de la modificació d'alguna propietat del feix de llum, cosa que es pot produir de forma interna –sensors intrínsecs– o externa a la fibra –extrínsecs–:

Els OFS tenen molts avantatges respecte dels sensors tradicionals:

- Resistència a les interferències EMI.
- Dimensions compactes.
- No requereixen molta energia per funcionar.
- Alta sensibilitat, precisió i fiabilitat.
- Aïllament elèctric –la fibra òptica no condueix electricitat–.
- Possibilitat de treballar en entorns perillosos i desfavorables.
- Realitzen mesuraments a grans distàncies.

Un dels OFS més utilitzats avui en dia són les anomenades xarxes de difracció de Bragg (FBG) [33], que són microestructures creades en el nucli de la fibra òptica. Aquesta estructura consisteix en una modulació periòdica de l'índex de refracció del nucli causat per la incidència d'un raig de llum ultraviolada. Les FBG tenen la propietat de reflectir selectivament una banda de freqüències estreta centrada en la longitud d'ona de Bragg (λ_B), la qual és proporcional al període de variació de l'índex de refracció (Λ) i a l'índex de refracció efectiu (n_{eff}) del nucli de la fibra.

$$\lambda_B = 2\Lambda \cdot n_{eff} \quad (2.13)$$

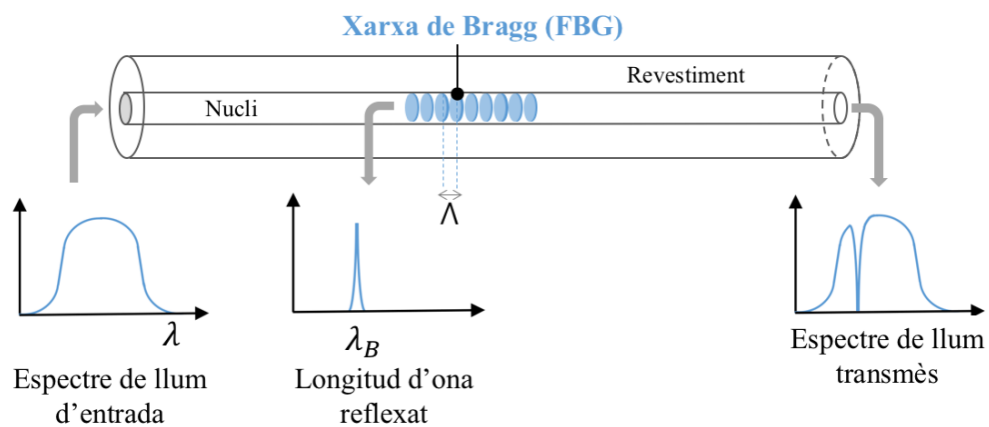


Fig. 2.18. Estructura i funcionament de la xarxa de difracció de Bragg.

La longitud d'ona de Bragg d'una FBG és sensible als canvis en l'índex de refracció del nucli de la fibra que provoquen la temperatura, la pressió o la tensió, per exemple, cosa que permet monitorar tots aquests paràmetres.

A continuació es destaquen tres aplicacions concretes dels OFS:

a) Monitoratge de la salut d'estructures (SMH)

Especialment d'estructures grans dimensions –com ara ponts, túnels, carreteres i preses– i altres activitats associades a l'aplicació de tècniques de SHM. Els paràmetres que més habitualment es mesuren són de tres categories diferents [34]:

- Tèrmics: temperatura, estrès tèrmic, transferència de calor, etc.
- Químics: corrosió, humitat, concentració de clorurs i sulfats, etc.
- Mecànics: deformació, fissuració, mòdul de l'elasticitat, etc.

b) Exploracions anatòmiques de gran precisió

Entre les aplicacions que tenen els sensors de fibra òptica en medicina destaca l'anomenada "exploració a través de la forma" (*shape sensing*) [35], que s'utilitza per visualitzar l'interior del cos humà i detectar anomalies. Per aconseguir-ho, s'introdueix en el pacient un cable de fibra òptica de múltiples nuclis (MCF) amb FBG en tot el seu llarg, cosa que permet, integrant tècniques d'imatge, obtenir una perspectiva 3D definida de la zona explorada. El sensor també es pot integrar en instrumental quirúrgic per ajudar en les operacions.

Una de les particularitats del cable de fibra òptica utilitzat en les solucions *shape sensing* és que es pot recargolar fins a 50 vegades per metre.

c) Control de xarxes i centrals elèctriques

Un dels camps on s'espera un creixement més ràpid en l'ús de sensors de fibra òptica és en el de la gestió i control de l'alta tensió elèctrica i el seu entorn. Un exemple és el projecte Memphis [36], desenvolupat per l'empresa energètica Endesa, que planteja un manteniment més efectiu de les seves centrals gràcies a implantar models predictius basats en la data. Per aconseguir-ho, per exemple, està instal·lant OFS dins de llocs que fins fa poc no es podien monitorar, com les calderes de combustió i les de recuperació de la calor. Amb aquests sensors es controla la temperatura i les deformacions dels materials en temps reals.

Altres estudis han experimentat amb bons resultats el desenvolupament de sistemes de sensors intel·ligents alimentats amb tecnologia PWF per mesurar tensions i corrents en la xarxa elèctrica [37]. L'ús de cables de fibra òptica aïlla el transductor o sensor de corrent del potencial de terra, a banda que ofereix diversos avantatges, com evitar que es produeixin fuites de materials nocius del transformador al medi ambient i eliminar la possibilitat d'explosions.

La mesura del corrent en línies d'alta tensió utilitzen sensors basats en l'efecte Faraday, que es produeix per l'aplicació d'un camp magnètic induït (ε) al voltant del corrent monitorat.

$$\varepsilon = -d\phi/dt \quad (2.14)$$

On $d\phi/dt$ és la taxa de variació temporal del flux magnètic.

Aquests sensors estan connectats a una caixa òptica –on hi ha lents i altres components– que polaritzen la llum enviada des d'una font d'energia òptica i transmesa a través de fibra. La llum rebota en un mirall i torna a la caixa òptica, on serà analitzada i convertida en dos feixos de llum amb direccions de polarització ortogonals entre si. La intensitat dels dos feixos de llum es modula en resposta a la rotació de Faraday.

Finalment, els dos feixos de llum modulada s'envien a un convertidor O/E perquè les transformi en senyals elèctrics. En el circuit de processament del senyal, es calcula la modulació de la intensitat de cada senyal i s'obté el valor mitjà com a tensió de sortida, que serà proporcional al corrent que es vol mesurar.

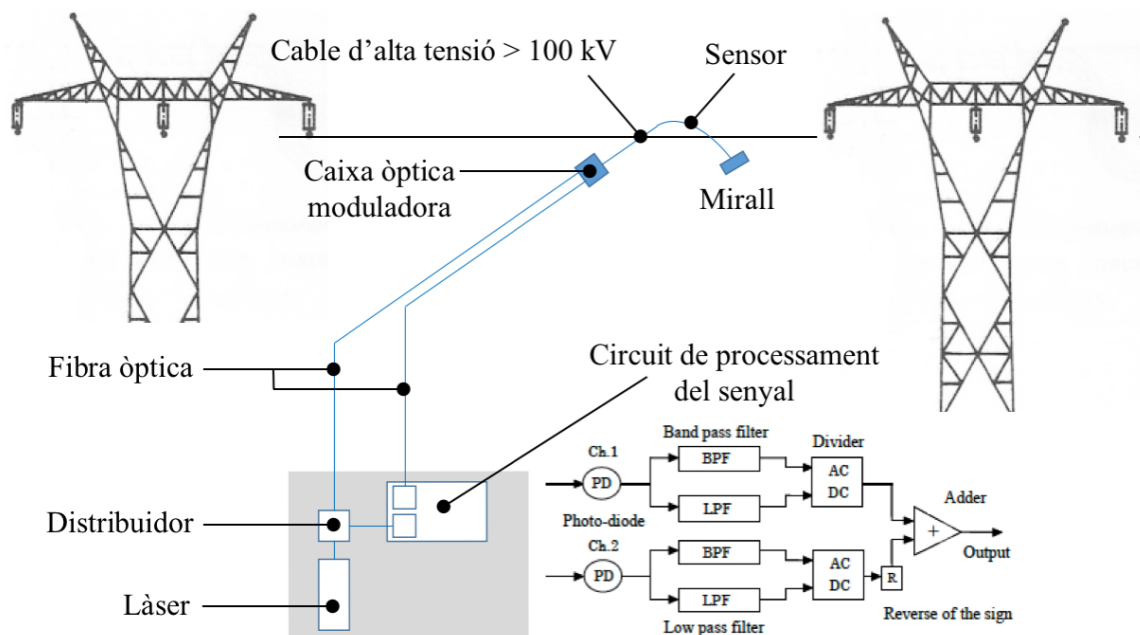


Fig. 2.19. Esquema del sistema per mesurar el corrent d'una línia d'alta tensió amb OFS.

2.5.3. Comunicacions

L'aplicació de la tecnologia PWoF en les telecomunicacions és un altre camp d'investigació preferent. En realitat, va ser el punt de partida de l'experimentació en aquest àmbit, ja que els primers que van aconseguir alimentar un dispositiu amb energia òptica –les alertes sonores d'un telèfon mòbil– van ser enginyers d'AT&T a finals de la dècada dels 70 [38].

Alguns dels avantatges que planteja l'ús de la fibra òptica com a transmissor d'energia en el món de les telecomunicacions són:

- La possibilitat d'enviar dades i energia per un únic mitjà.
- Una instal·lació més ràpida i rendible que la del cable coaxial.
- Millora de la fiabilitat i seguretat, ja que es prescindeix de bateries i cables de coure.
- Reducció de la mida i pes de les infraestructures.
- Immunitat davant els llamps i les condicions atmosfèriques severes.

En les xarxes de comunicació actuals, l'energia elèctrica requerida per alimentar les unitats d'antenes remotes (RAU) acostuma a sortir de línies comercials properes. Això dificulta tant la instal·lació com la gestió d'aquests sistemes, especialment quan es fa en llocs de difícil accés o amb molt soroll elèctric. L'aplicació de tecnologia PWoF podria resoldre aquest problema en un futur no gaire llunyà, sempre que s'aconsegueixi augmentar la capacitat de transmetre potència a través de fibra òptica per sobre dels 10 W. Hi ha diferents experiments en aquest àmbit que així ho demostren [9].

S'ha de tenir en compte que l'aposta per la PWoF en les telecomunicacions no només tindrà beneficis per a les xarxes de comunicació mòbils, sinó també per a moltes altres que utilitzen antenes similars, com les de televisió digital, les WiFi i WiMAX o les de sincronització GPS. Dispositius com preamplificadors i transceptors de baixa potència, a banda, també es podrien alimentar a través de fibra òptica, fent-los menys vulnerables a les interferències.

Tot això, afegit al fet que, gràcies a la millora de les fibres òptiques, enviar senyal de dades i energia a través d'un mateix mitjà és ja una realitat en contínua millora. Així ho demostren, per exemple, els experiments exitosos realitzats amb fibres de doble cobertura (DCF).

La fibra òptica també dona suport a la creixent demanda de capacitat per part de les xarxes de ràdio 5G (RAN), ja que es pot utilitzar per alimentar la infraestructura que transmet senyals de ràdio sobre fibra (RoF) de forma més senzilla i efectiva. Un dels experiments exitosos duts a terme en aquest àmbit [39] va ser alimentar amb 133 mW de potència el *fronthaul* d'una xarxa 5G-NR a través d'una fibra òptica MCF de 10 km de llargada. El sistema PWoF utilitzat en aquest cas incorporava un làser Raman operant a 1480 nm, un divisor òptic (SP1, 50:50), un interruptor òptic (4x4) controlat externament a través d'una interfície USB, i un PPC amb una potència òptica màxima de 200 mW.

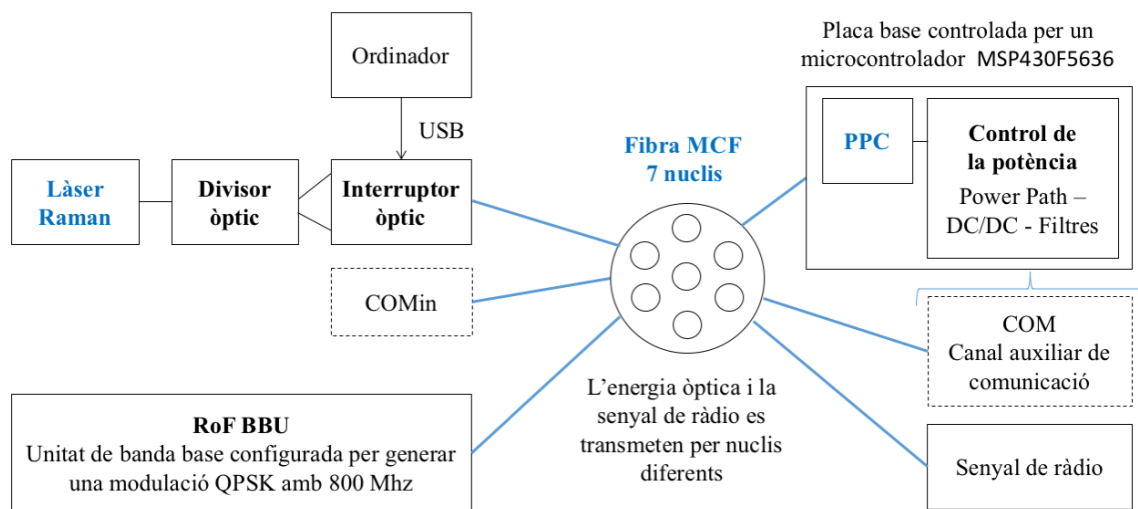


Fig. 2.20. Sistema PWoF/RoF desenvolupat de forma experimental.

Un experiment similar per demostrar com integrar la tecnologia PWoF en un sistema de videovigilància va ser desenvolupat gairebé en paral·lel a l'anterior [40]. En aquest cas es va aconseguir alimentar també amb una quantitat similar de potència el hardware d'un sistema de seguretat, que alhora estava transmetent imatge de vídeo a uns 221 Mbps amb una resolució de 640x480. El sistema PWoF incloïa un HPLD transmetent 1 W de llum làser amb una longitud d'ona de 810 nm a través d'una fibra òptica MMF de 62,5 μm . Aquest diàmetre no gaire gran, però, va limitar la potència de sortida del PPC.

3. Disseny del sistema, configuració i assajos previs

El sistema PWoF proposat per a l'experiment principal del TFG adopta l'estructura bàsica de tres blocs que caracteritza a aquesta tecnologia (Fig. 2.1):

1. Una unitat de conversió E-O i de transmissió de potència òptica, formada en aquest cas per un únic mòdul integrat.
2. La fibra òptica que ha de transportar l'energia.
3. Una unitat de recepció i conversió O-E, formada per un convertidor de potència fotònica (PPC) i un convertidor CC/CC per estabilitzar el voltatge de sortida.

En aquest capítol es mostra la solució escollida, el disseny plantejat per a cadascun dels blocs, els components que els integren, les claus per entendre i gestionar el seu funcionament, així com algunes proves de configuració i posada a punt dutes a terme.

Com que l'objectiu final és aconseguir que aquest sistema alimenti el *driver* d'un MOSFET, també s'expliquen els assajos realitzats per conèixer els requisits de consum del circuit de dispar en diferents condicions.

3.1. Plantejament de possibles solucions

Atès que la peça més determinant d'un sistema PWoF és el dispositiu encarregat de transformar l'energia lumínica en elèctrica, la generació de possibles solucions per al projecte va tenir com a punt de sortida establir els pros i contres dels models de convertidors existents. En aquest sentit, l'alternativa d'utilitzar una cèl·lula solar tradicional, l'opció més econòmica i accessible, es va descartar des d'un inici, ja que aquest dispositiu no està optimitzat per treballar amb llum làser, que és monocroma.

Les dues úniques opcions reals, arribats a aquest punt, eren:

- Fabricar un PPC propi
- Adquirir un model comercial

Fabricar un PPC propi té un gran avantatge: permet crear un dispositiu amb característiques i materials particulars, cosa que sempre ajudarà a optimitzar el seu rendiment. Apostar per

aquesta solució, però, resultava poc adequada en el marc d'aquest projecte, no només per una qüestió de temps i costos, sinó també de coneixements. A banda, maximitzar el rendiment del sistema no formava part dels objectius del projecte, fixats en validar empíricament la validesa tècnica del sistema, no la seva eficiència.

La solució escollida, d'aquesta manera, va ser l'única que feia viable el projecte: dissenyar el sistema a partir d'un PPC ja existent en el mercat.

3.2. Elecció dels components i del proveïdor

Abans de començar el projecte, es va comprovar l'existència d'unes poques versions comercials de PPC i de components compatibles. Dos dels fabricants que actualment ofereixen un ventall més ampli de convertidors fotovoltaics específics per a PWoF són l'empresa taiwanesa MHGP [41] i l'estatunidenca Broadcom [42]

Un cop avaluats els preus, condicions i característiques de cada marca, es va optar per encarregar a MHGP tot el material necessari no disponible als laboratoris del TecnoCampus. Aquesta empresa, especialitzada en la fabricació de cel·les fotovoltaïques, compta dins del seu catàleg amb la sèrie anomenada YCH, que inclou set models diferents de PPC, tots ells fabricats amb silici i optimitzats per treballar en un rang espectral d'entre 915 i 980 nm.

Es va decidir encarregar la resta de components al mateix proveïdor per assegurar la seva compatibilitat i fàcil integració amb el PPC, factor que es va considerar indispensable per garantir l'estabilitat del sistema.

Pel que fa a l'elecció de la fibra òptica, tots els models de PPC que avui dia es comercialitzen estan optimitzats per treballar amb fibres MMF, motiu pel qual aquesta va ser l'única opció disponible. Si s'hagués volgut experimentar amb els tipus de fibres més avançats, com les MCF o les DCF, caldria haver fabricat un convertidor específic per aconseguir-ho.

Pel que fa al làser, per simplificar la instal·lació i estabilitzar el rendiment de la conversió elèctrica-òptica, es va optar per adquirir un mòdul integrat del tipus PPM, totalment compatible amb el PPC anteriorment especificat.

3.3. El mòdul d'energia fotònica

La font transmissora d'energia òptica en el sistema desenvolupat és un mòdul integrat PPM model 003C50 de l'empresa MHGP, el qual està format per:

- Un làser de díode (funciona en una longitud d'ona de 976 nm).
- Un controlador de refrigeració termoelèctrica (TEC), per evitar que augmenti la temperatura del làser.
- Un cable de fibra òptica multimode per on es transmet l'energia òptica generada.
- Una *driver control board*.
- Un connector de 10 pins per alimentar el dispositiu des d'una font externa i armar un circuit per controlar el bon funcionament del làser i la potència transmesa. El circuit es va muntar per qüestions pràctiques sobre un *protoboard*.

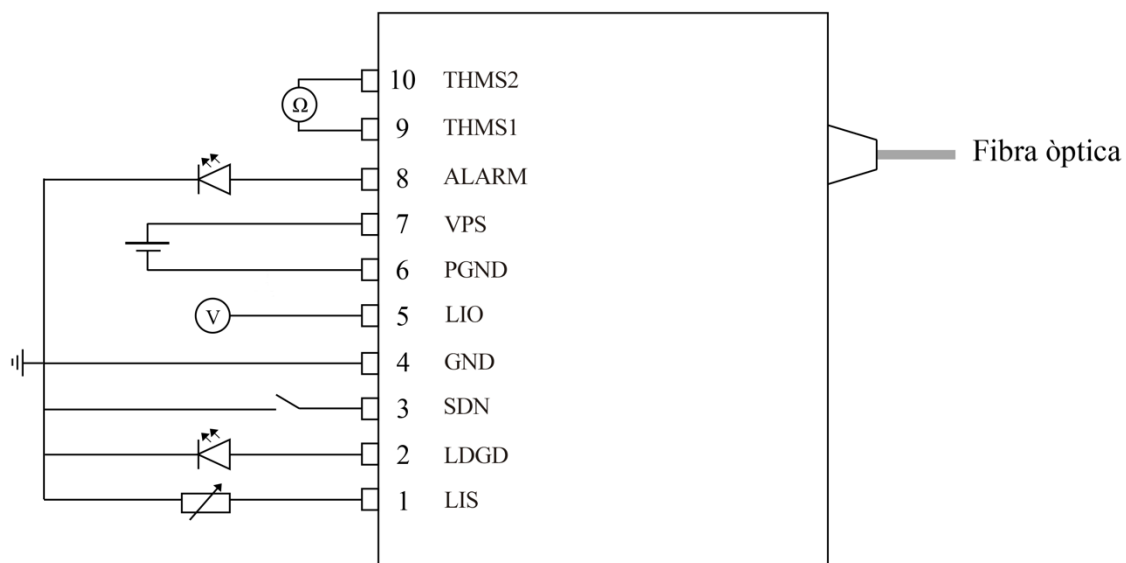


Fig. 3.1. Esquema del circuit extern al PPM necessari per fer-lo operatiu.

De la consulta del *datasheet* del producte s'extreuen algunes de les claus per configurar i gestionar correctament el dispositiu transmissor:

a) Alimentació del PPM

El mòdul s'ha de connectar a una font d'alimentació externa a través del pin VPS (pin 7). Aquesta font subministra un corrent de fins a 10,4 A, que és el màxim que admet el PPM.

El mòdul pot funcionar amb un voltatge d'alimentació que va dels 3,0 V als 5,5 V. El retorn de la font d'alimentació s'ha de fer a través del pin PGND (pin 6), que està connectat a terra.

b) Encendre i apagar el PPM

Es fa amb un interruptor incorporat al pin SDN (pin 3). Si l'interruptor està obert (ho està per defecte), el pin estarà a 5 V i s'activarà el làser. Si està tancat, el pin es curtcircuita amb GND i el làser es desactiva.

L'ordre en què s'han de fer aquestes dues accions és:

Per encendre el làser:

- Connectar la font d'alimentació al pin VPS.
- Obrir l'interruptor

Per tancar el làser:

- Tancar l'interruptor
- Desconnectar la font d'alimentació del pin VPS

c) Comprovació del correcte funcionament del làser

Es fa incorporant un díode al pin LDGD (pin 2). Si el pin està alt, per sobre de 2 V, el díode es manté encès, indicant que el làser funciona com cal. Si el pin està baix, per sota de 0,3 V, el díode s'apaga, cosa que significa que el làser no funciona bé o hi ha un curtcircuit.

d) Ajustament i monitoratge de la potència òptica subministrada

Es fa incrementant o reduint el corrent que passa pel pin LIS (pin 1). Per aconseguir-ho, cal incorporar al pin un potenciòmetre multivolta de 10 k Ω connectat a GND (pin 4), el qual regula el voltatge d'entrada a LIS, que pot variar de 0 a 2 V.

Per transmetre una potència òptica determinada, cal així ajustar el potenciòmetre i observar la tensió entrant al pin LIS. L'equivalència entre els diferents paràmetres que intervenen en el procés es mostra en la Taula 3.1.

Potència òptica transmesa (W)	Potenciòmetre (kΩ)	Voltatge de sortida (V)	Corrent de sortida (A)
3,00	3,11	1,41	3,38
3,50	4,48	1,61	3,86
4,10	9,01	1,93	4,63

Taula 3.1. Dades vinculades a la transmissió d'energia òptica subministrades pel fabricant del PPM. El corrent de sortida s'ha calculat a partir d'aquestes.

Per conèixer el corrent de conducció (I_{OUT}) a partir del voltatge que entra al pin LIS (V_{LIS}) cal aplicar (3.1):

$$I_{OUT} = 4,8 \cdot \frac{V_{LIS}}{2,0} \quad (3.1)$$

També es pot conèixer aquest paràmetre mesurant el voltatge que surt del pin LIO (pin 5) i aplicant una adaptació de la fórmula anterior. En l'experiment final, no es va considerar necessari implementar-lo.

e) Monitoratge de la temperatura de la carcassa del làser

Es fa llegint amb un ohmímetre la resistència existent entre els pins THMS1 (pin 9) i THMS2 (pin 10), que es correspon amb la del termistor de tipus NTC inclòs dins del mòdul. En aquests dispositius, quan baixa la resistència augmenta la temperatura i a l'inrevés [43].

Una vegada es té el valor de la resistència, cal aplicar (3.2):

$$Temperatura = 0 - \frac{\ln(R2/32.650)}{\ln(1 + 0,051)} \quad (3.2)$$

On R2 és la resistència registrada per l'ohmímetre. Els altres valors surten d'agafar 0°C com a punt de referència en la Taula 3.2, on es mostren les característiques del termistor especificades pel fabricant.

T (°C)	B _{25/100} = 3988 K		T (°C)	B _{25/100} = 3988 K	
	R _T /R ₂₅	α (%/K)		R _T /R ₂₅	α (%/K)
-55.0	96.3	7.4	45.0	0.4369	3.9
-50.0	67.01	7.2	50.0	0.3603	3.8
-45.0	47.17	6.9	55.0	0.2986	3.7
-40.0	33.65	6.7	60.0	0.2488	3.6
-35.0	24.26	6.4	65.0	0.2083	3.5
-30.0	17.7	6.2	70.0	0.1752	3.4
-25.0	13.04	6.0	75.0	0.1481	3.3
-20.0	9.707	5.8	80.0	0.1258	3.2
-15.0	7.293	5.6	85.0	0.1072	3.2
-10.0	5.533	5.5	90.0	0.09177	3.1
-5.0	4.232	5.3	95.0	0.07885	3.0
0.0	3.265	5.1	100.0	0.068	2.9
5.0	2.539	5.0	105.0	0.05886	2.9
10.0	1.99	4.8	110.0	0.05112	2.8
15.0	1.571	4.7	115.0	0.04454	2.7
20.0	1.249	4.5	120.0	0.03893	2.6
25.0	1.0000	4.4	125.0	0.03417	2.6
30.0	0.8057	4.3	130.0	0.03009	2.5
35.0	0.6531	4.1	135.0	0.02654	2.5
40.0	0.5327	4.0	140.0	0.02348	2.4

Taula 3.2. Característiques del termistor inclòs en el PPM.

El més important és tenir present que la temperatura ha d'estar sempre per sota dels 50°C, motiu pel qual caldrà vigilar que la resistència no baixi dels 3603 Ω. La temperatura òptima del làser són 25°C, que es correspon a 10 kΩ.

En qualsevol cas, per garantir que la temperatura es manté en paràmetres correctes, el PPM ofereix la possibilitat d'afegir una alarma visual. Si s'incorpora un LED al pin Alarm (pin 8), aquest rebrà un voltatge de 5 V i s'encendrà en cas que la temperatura del làser superi els 35°C. Si aquest fet es produeix, cal apagar ràpidament el mòdul segons les instruccions incloses en el punt "Encendre i apagar el PPM" d'aquest mateix apartat.

3.2.1. Proves preliminars amb el PPM

Tot i que inicialment es va plantejar la possibilitat de fer proves amb el PPM per verificar la seva potència, finalment es va considerar suficient i fiable la informació subministrada pel fabricant. La idea, descartada en aquesta fase preliminar, era connectar a la sortida del dispositiu un mesurador de potència òptica (OPM) per llegir l'energia que surt del sistema [44]. Va quedar com una opció a tenir en compte en cas que, durant l'experiment, es detectés que no s'estava generant prou potència de sortida des de la unitat de conversió òptica/elèctrica. Afortunadament, aquest fet no es va produir.

3.3. La fibra òptica

El PPM 003C50 incorpora tres metres de fibra òptica multimode de 62,5 μm de diàmetre i una obertura numèrica (NA) de 0,27, característiques que la fan apta per a la transmissió dels prop de 3 W de potència òptica previstos. Per si fos necessari, però, es disposa també d'un *patch cord* de 10 metres amb fibra òptica de les mateixes especificacions tècniques. Els dos cables, igual que el PPC, tenen connexió de tipus FC, cosa que facilita el seu acoblament. La llum es transmet amb un llarg d'ona de 976 nm.

A partir d'aquestes dades, es pot determinar també quina quantitat de modes té la fibra utilitzada. Això es calcula a partir de (2.5), (2,7):

$$V = \frac{2\pi}{0,976} 31,25 \cdot 0,27 = 54,32 \quad (3.3)$$

$$\text{Modes} = \frac{54,32^2}{2} = 1.475 \quad (3.4)$$

En l'experiment, la fibra òptica no té un paper determinant, ja que només es perdria eficiència, per la llei de Lambert, si la transmissió d'energia entre PPM i PPC es produís a kilòmetres de distància. En utilitzar un màxim de 10 metres de fibra, es va calcular a partir de (2.8) que, com a molt, la pèrdua seria de 0,01 mW de potència.

3.4. El convertidor d'energia òptica-elèctrica

El PPC o convertidor O-E utilitzat en l'experiment és el YCH-H003-15-FC-A de l'empresa MHGP, el qual disposa d'un sistema de refrigeració passiu per no sobreescalfar-se. El dispositiu (Fig. 3.2) està fabricat amb silici (Si) i pesa al voltant de 75 g.

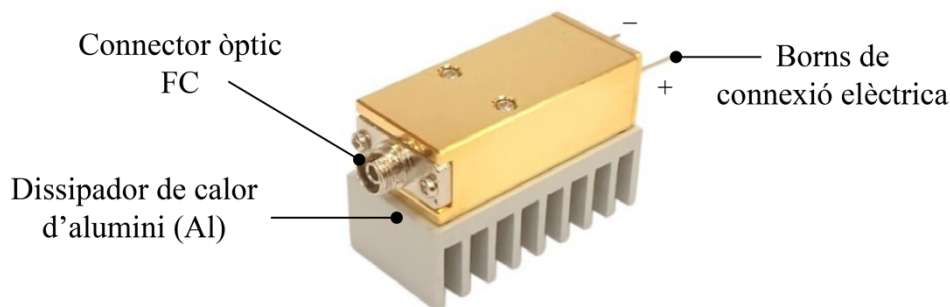


Fig. 3.2. Parts principals del convertidor PPC YCH-H003-15-FC-A.

Segons les dades subministrades pel fabricant, el PPC utilitzat pot operar en un rang de potència òptica d'entrada que va dels 3 W fins als 10 W. Donat que la capacitat màxima del PPM és de 4,10 W, però, es prenen només com a referència les dades corresponents a proves realitzades pel fabricant a 3W i 5 W, que són les que es mostren en la Taula 3.3 :

Potència òptica	Pmax (mW)	Eficiència	I _{max} (mA)	V _{max} (V)
3W	882	29,4%	50,1	17,6
5W	1.466	29,3%	87,5	16,8

Taula 3.3. Rendiment del PPC, segons proves realitzades pel fabricant. Els valors per a 3 W es basen en el dispositiu real i els de 5 W en dades genèriques del *datasheet*.

Segons es desprèn d'aquestes dades, si es fa treballar el PPM al seu màxim rendiment, es pot obtenir teòricament una potència elèctrica de sortida de ~1 W i una tensió de ~17 V. Com es podrà veure a continuació, aquests valors són els que es van agafar com a referència a l'hora de fer les simulacions i proves prèvies al muntatge definitiu del sistema.

3.4.1. Proves preliminars amb el PPC

Abans de realitzar l'experiment, es van dur a terme algunes proves per mesurar la potència elèctrica resultant de l'ús combinat del PPM i el PPC (Fig. 3.3), així com el voltatge subministrat en buit pel dispositiu.

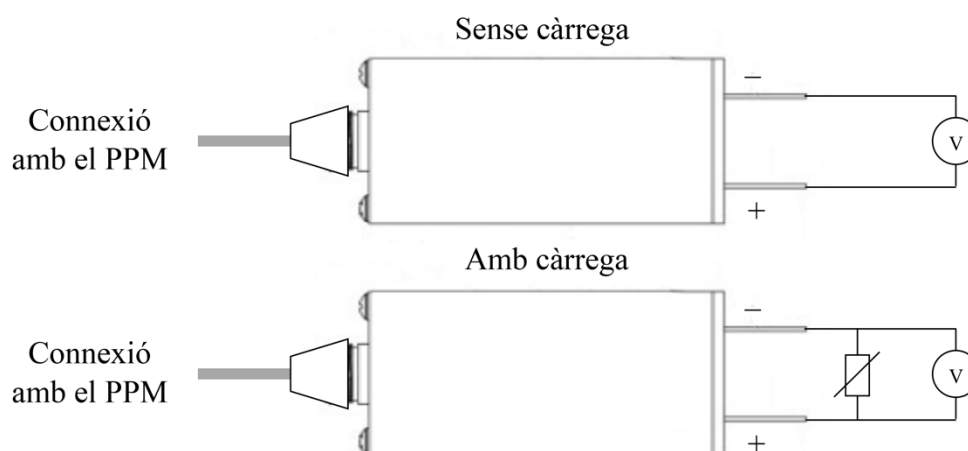


Fig. 3.3. Esquema dels sistemes emprats per mesurar els valors de sortida en el PPC.

En les proves sense càrrega, es va registrar una tensió de circuit obert (amb corrent nul) de 20,7 V, que es correspon aproximadament als valors que apareixen en el *datasheet* del producte (Fig. 3.4). Com es pot veure, el corrent es manté pràcticament invariable amb tensions baixes, però cau bruscament si es continua augmentant el voltatge.

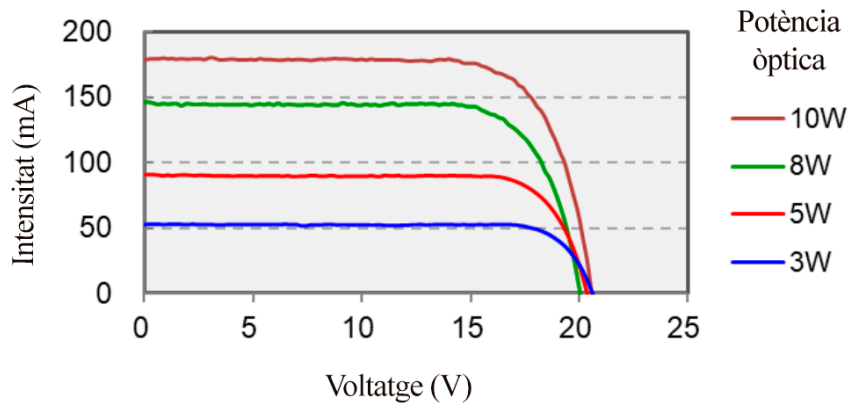


Fig. 3.4. Corba I-V del convertidor O-E model YCH-H003-15-FC-A.

Els resultats de les proves amb càrrega, incorporant al sistema resistències de 220 Ω i 470 Ω , respectivament, són els següents:

PPM (dades del datasheet)		PPC (mesura de dades)		
Potenciòmetre (K Ω)	Potència òptica (mW)	Càrrega (Ω)	Corrent sortida (mA)	Voltatge sortida (V)
3,11	3,00	220	50	11
		470	42	19,7

Taula 3.4. Resultat de les proves realitzades per conèixer els valors obtinguts després de la conversió O-E amb diferents càrregues.

En incorporar una resistència, es pot mesurar el corrent que la travessa i que li entrega el mòdul, així com la tensió subministrada. Aplicant la llei d'Ohm, cada punt de treball de la resistència en la gràfica de la Fig. 3.4 ve determinat per (3.5):

$$I = \frac{1}{R} \cdot V \quad (3.5)$$

3.5. El convertidor CC/CC

Per mantenir constant la tensió de sortida i en uns valors òptims pel correcte funcionament del *driver*, cal incorporar després del PPC un convertidor CC/CC, el qual regularà el voltatge d'entrada al circuit de dispar, tal com es veu a la Fig. 3.5.

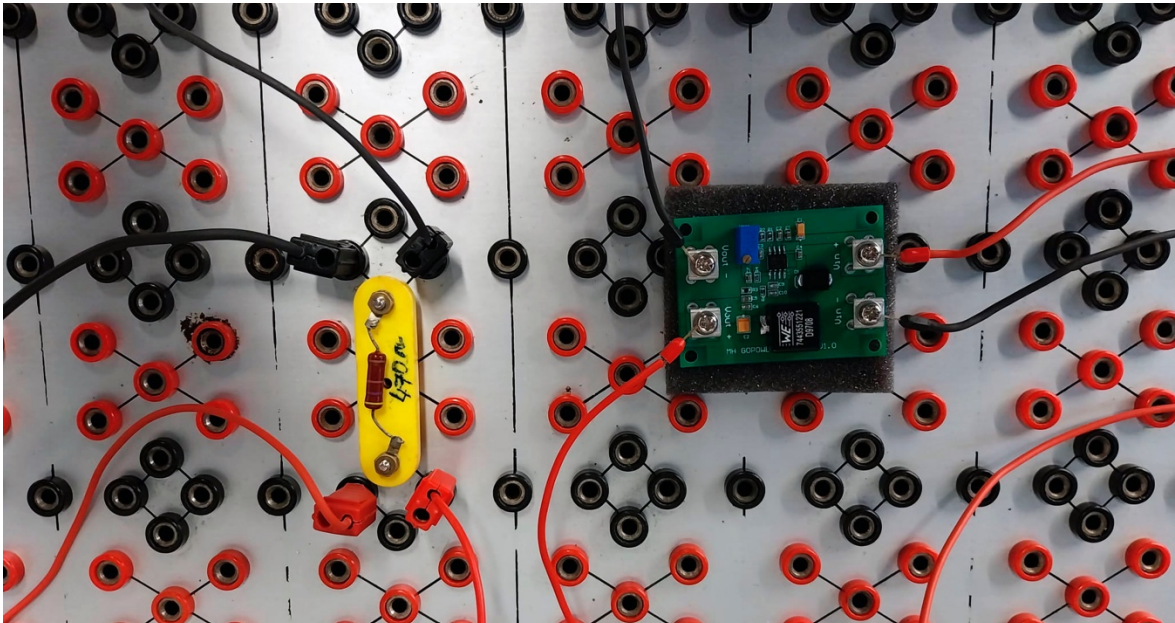


Fig. 3.5. El convertidor CC/CC DDH1800, en una de les proves realitzades.

Per a l'experiment proposat, donat que la tensió subministrada pel sistema és superior als 15 V, el convertidor CC/CC ha de ser reductor. El model emprat en aquest cas és el DDH1800, també de l'empresa MHGP, el qual està optimitzat per treballar amb convertidors O-E com a font d'alimentació. El convertidor opera amb un voltatge d'entrada d'entre 3,5 V a 28 V; és a dir, si està per sota d'aquests 3,5 V, el dispositiu es desactivarà automàticament com a mesura de seguretat.

Segons el fabricant, el DDH1800 té una eficiència de fins al 90%, motiu pel qual sempre es perdrà una mica de voltatge durant el procés de reducció.

En els tests finals realitzats pel fabricant amb tots els elements del sistema PWoF acoblats, es va aconseguir una potència de 904 mW a la sortida del convertidor CC/CC després d'haver subministrat al PPC una potència òptica de 4100 mW.

3.5.1. Verificació del convertidor

Per verificar el funcionament del dispositiu, es va utilitzar una font d'alimentació HMP4030 DC, de l'empresa Hameg Instruments, la qual va representar el paper que faria el sistema PPM/PPC en l'experiment. A la sortida del convertidor es va connectar un multímetre per mesurar el voltatge resultant de la conversió, segons l'esquema que es mostra a la Fig. 3.6.

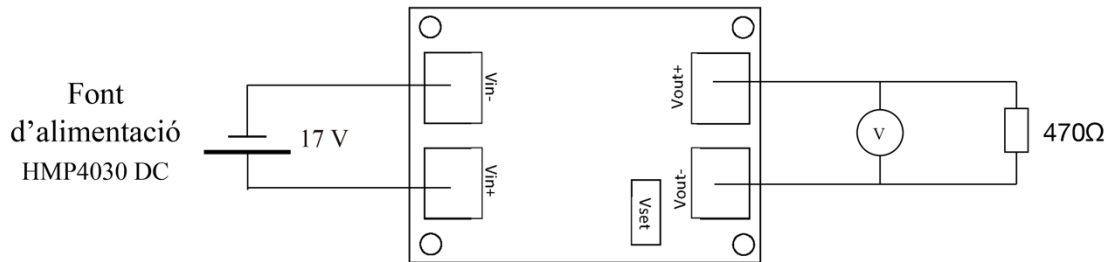


Fig. 3.6. Esquema del sistema per testar el funcionament del convertidor estàtic.

Després d'aplicar 17 V a l'entrada, es va ajustar el control V_{Set} del convertidor fins a aconseguir una lectura de 15 V en el multímetre. Amb aquesta tensió i agafant com a referència els 904 mW aconseguits pel fabricant en els seus testatges particulars, es pot calcular un corrent de sortida d'uns 60 mA.

3.6. Estimacions de l'eficiència del sistema

A partir de la definició d'eficiència explicada en l'apartat 2.1.1, es pot fer una estimació del seu valor per al prototip dissenyat.

En el cas de l'Eficiència Energètica del Sistema (SEE), on $P_{O/E}$ és l'energia elèctrica subministrada després de la conversió òptica-elèctrica i P_{OUTL} l'energia òptica de sortida del làser, l'eficiència s'estableix a partir de (2.2) en:

$$SEE = \frac{P_{O/E}}{P_{OUTL}} = \frac{0,904 \text{ W}}{4,1 \text{ W}} = 22\% \quad (3.6)$$

En el cas de l'Eficiència Global Energètica (GEE), on P_{O-E} és l'energia elèctrica subministrada després de la conversió òptica-elèctrica i P_{INL} és l'energia elèctrica d'entrada al PPM, l'eficiència màxima s'estableix a partir de (2.1) en:

$$GEE = \frac{P_{O-E}}{P_{INL}} = \frac{0,904 W}{3,366 A \cdot 5 V = 16,83 W} = 5,4\% \quad (3.7)$$

3.7. Caracterització del *driver*

Una altra prova prèvia a l'experiment va ser la caracterització del *driver*. L'objectiu era conèixer el consum de corrent exercit pel circuit de dispar tant en estàtic com en càrrega; és a dir, quan el *driver* no rep senyals de commutació i quan està gestionant l'activació o desactivació de l'interruptor, respectivament. Les necessitats de voltatge, per la seva part, ja són conegudes i s'estableixen en 15 V.

L'interruptor controlat utilitzat en l'experiment i en les proves prèvies és el mòdul creat al TecnoCampus que es mostra en la Fig. 3.7, el qual, com els MOSFET que es comercialitzen, alterna dues posicions estables: tancat o en conducció (ON) i obert o bloquejant (OFF). El dispositiu, en funció del senyal de commutació que li fa arribar el *driver* que té a la seva porta, obre o tanca el pas al corrent.

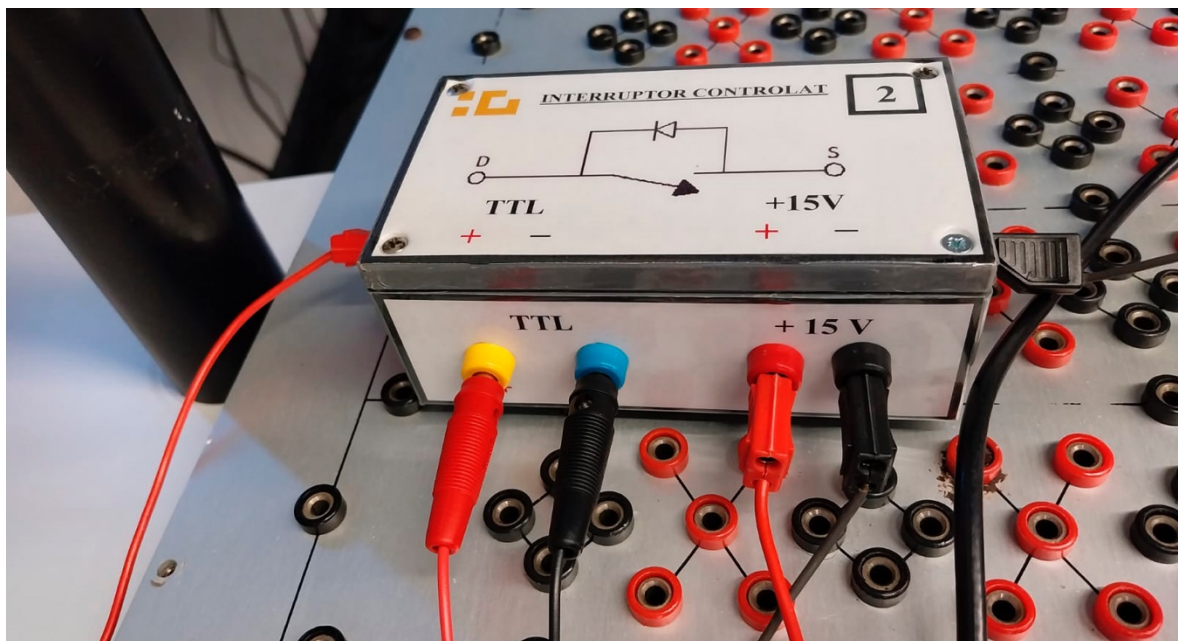


Fig. 3.7. El mòdul d'interruptor controlat utilitzat en els experiments.

La creació del senyal lògic de commutació, per la seva part, s'ha fet utilitzant un generador de funcions –en concret, el model HMF2525, de l'empresa Hameg Instruments–, amb el qual es pot definir la duració de la seqüència d'activació i desactivació de l'interruptor. Això s'aconsegueix ajustant manualment la freqüència i la relació de treball del senyal, el qual s'envia amb la lògica TTL (+5 V nivell alt, 0 V nivell baix).

En aquest punt, convé recordar alguns conceptes teòrics relacionats amb la generació del senyal lògic de commutació (Fig. 3.8) en el context de l'electrònica de potència [45], [46]. Un interruptor controlat (SW) s'obre i tanca de forma continuada a una freqüència i relació de conducció determinades.

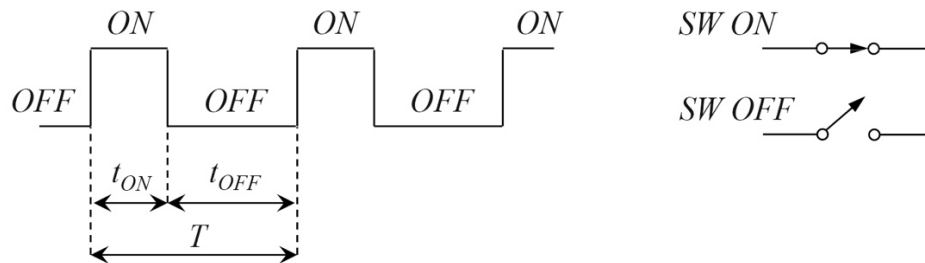


Fig. 3.8. Conceptes claus que intervenen en el funcionament d'un interruptor.

La freqüència de commutació (f_s) de l'interruptor és el nombre de vegades que aquest obre i tanca per segon. El període de commutació (T_s) és l'invers de la freqüència de commutació.

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (3.8)$$

Per la seva part, la relació de conducció (d), també anomenada cicle de treball o *duty-ratio*, és la proporció de temps que l'interruptor està connectat respecte al període de commutació.

$$d = \frac{t_{ON}}{T} \quad (3.9)$$

3.7.1. Caracterització del *driver* en buit

Abans de realitzar la caracterització del *driver*, es va considerar oportú connectar el generador de funcions a un oscil·loscopi –model HMO3524, de Hameg–, per garantir que es podia transmetre correctament el senyal de control amb lògica TTL. En aquests assajos

inicials, es va poder comprovar com l'alteració de la freqüència i la relació de conducció en el generador de funcions permet ajustar la duració de la seqüència de commutació.

Per quantificar el consum del *driver* amb el MOSFET inactiu, es va connectar el mòdul a una font d'alimentació de 15 V i se li va enviar un senyal de control des del generador de funcions. Per fer el mesurament del corrent consumit, es va afegir també un multímetre com mostra l'esquema de la Fig. 3.9.

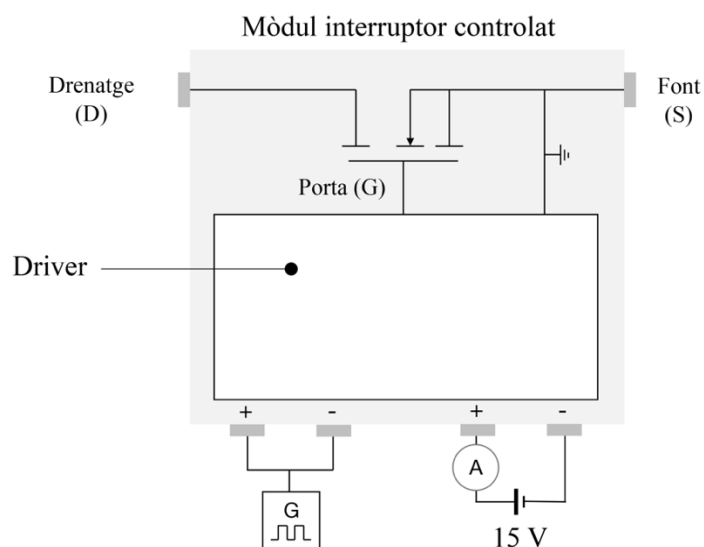


Fig. 3.9. Esquema del circuit per mesurar el consum de corrent del *driver* en estàtic.

Començant amb un valor de 5 kHz, es va anar augmentant la freqüència de commutació de 10 en 10 kHz. Com mostra la gràfica de la Fig. 3.10, tot i que l'interruptor no commuta, el consum de corrent s'incrementa de forma progressiva.

Freq. (kHz)	Consum (mA)
5	1
10	1,2
20	1,8
30	2,2
40	2,7
50	3,2

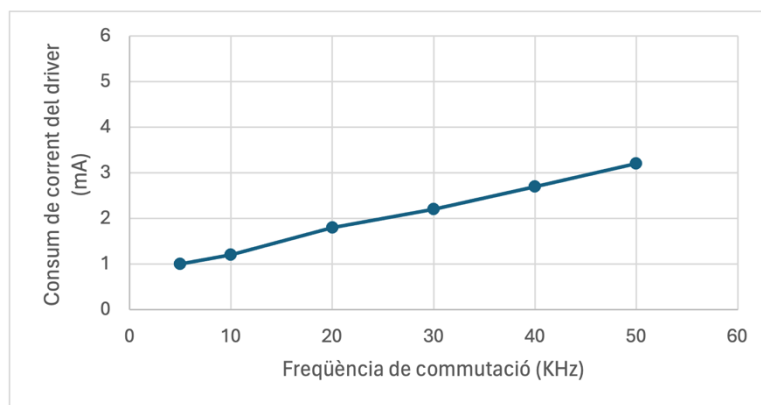


Fig. 3.10. Variació del consum de corrent per part del *driver* en funció de la freqüència de commutació en estàtic.

Donat que el voltatge és constant, això fa que també s'incrementi proporcionalment la potència consumida com es pot veure en la gràfica de la Fig. 3.11.

Freq. (kHz)	Potència (mW)
5	15
10	18
20	27
30	33
40	40,5
50	48

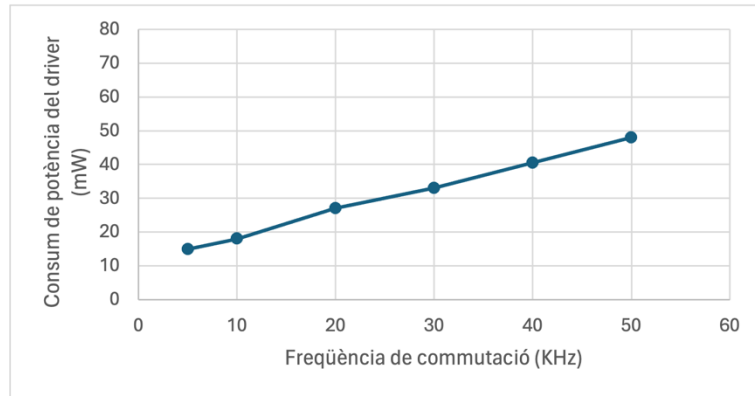


Fig. 3.11. Variació del consum de potència per part del *driver* en funció de la freqüència de commutació en estàtic, tenint en compte que $P = V \cdot I$

A continuació es va repetir el procediment però deixant una freqüència fixa i augmentant progressivament el *duty ratio* o relació de conducció. Tal com es mostra en la gràfica de la Fig. 3.12, alterar aquest paràmetre no influeix en el consum de corrent, que es manté regular tota l'estona. En conseqüència, tampoc fa variar el consum de potència.

Duty ratio (%)	Consum (mA)
10	2,2
20	2,2
40	2,2
60	2,2
80	2,2
100	2,2

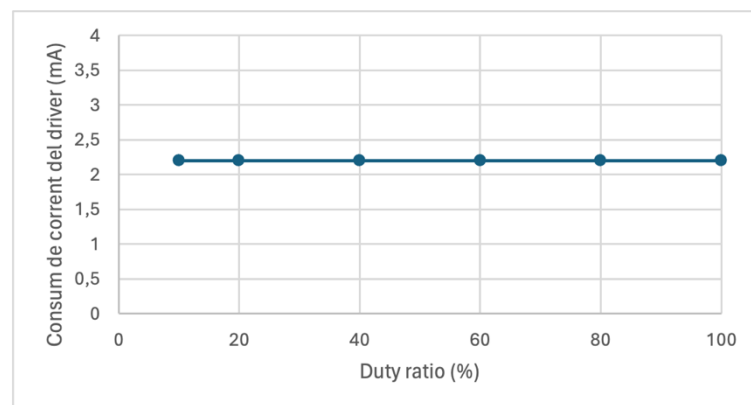


Fig. 3.12. Variació del consum de corrent per part del *driver* en funció del cicle de treball en estàtic (amb una freqüència de 30 kHz)

3.7.2. Caracterització del *driver* en càrrega

El següent pas va ser quantificar el consum del *driver* quan està commutant, és a dir, quan està activant i desactivant el canal de conducció entre el drenatge (D) i la font (S) de l'interruptor. Amb aquest objectiu, es va recórrer a una segona font d'alimentació, encarregada de subministrar 12 V a un circuit format pel mateix mòdul i una resistència. L'esquema resultant es pot veure en la Fig. 3.13 i una foto del mateix en la Fig. 3.14.

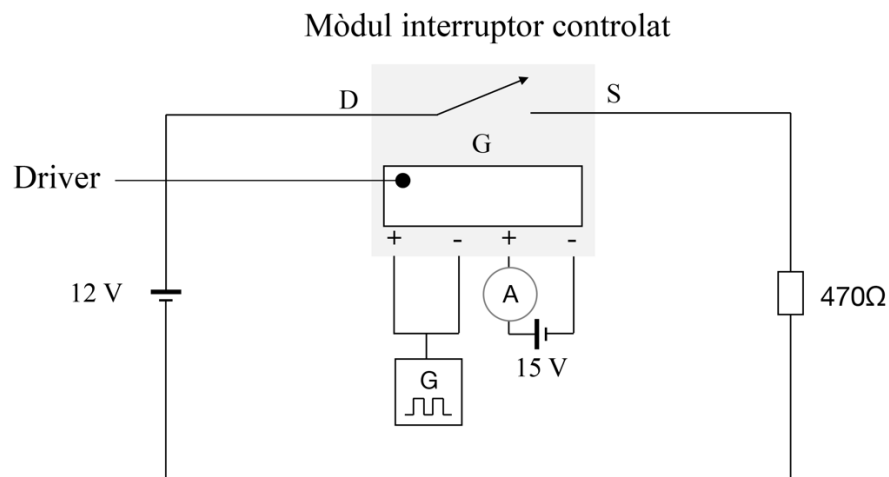


Fig. 3.13. Circuit utilitzat per mesurar el consum de corrent del *driver* amb càrrega.

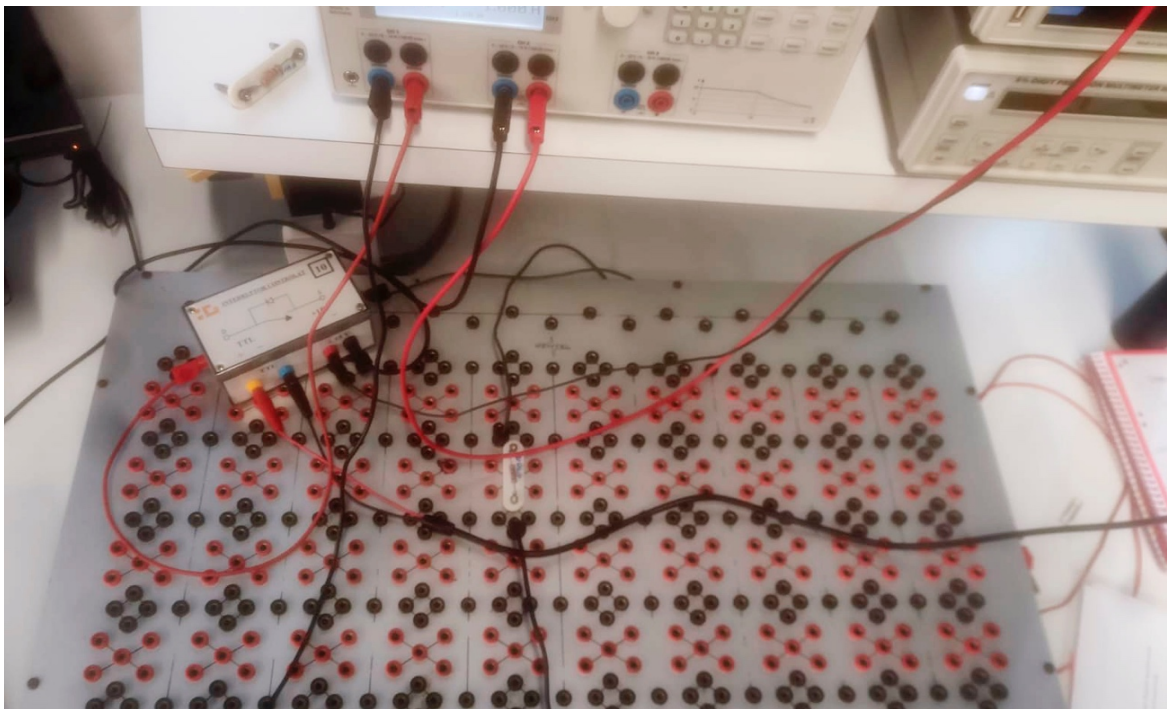


Fig. 3.14. Imatge del circuit muntat en el laboratori per realitzar les proves.

El procediment va ser idèntic a la caracterització en buit, però aquest cop amb l'interruptor operatiu. Començant amb un valor de 5 kHz, novament es va anar augmentant la freqüència de commutació de 10 en 10 kHz i registrant els mesuraments de corrent i potència obtinguts. Com s'observa en la gràfica de la Fig. 3.15, l'augment del consum per part del *driver* en incrementar-se la freqüència amb càrrega és lleugerament més alt que en el cas de la caracterització en estàtic.

Freq. (kHz)	Consum (mA)
5	1,2
10	1,7
20	2,5
30	3,1
40	3,5
50	4,6

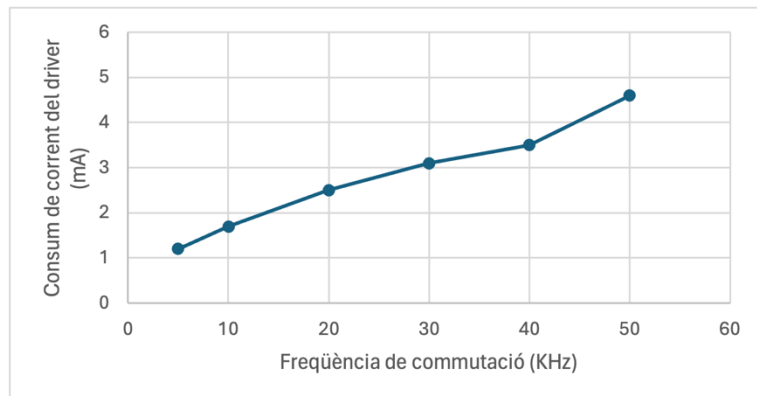


Fig. 3.15. Variació del consum de corrent per part del *driver* a l'augmentar la freqüència de commutació amb càrrega.

El consum de potència en càrrega també és superior que en buit. A major freqüència, major consum (Fig. 3.16)

Freq. (kHz)	Potència (mW)
5	18
10	25,5
20	37,5
30	46,5
40	52,5
50	69

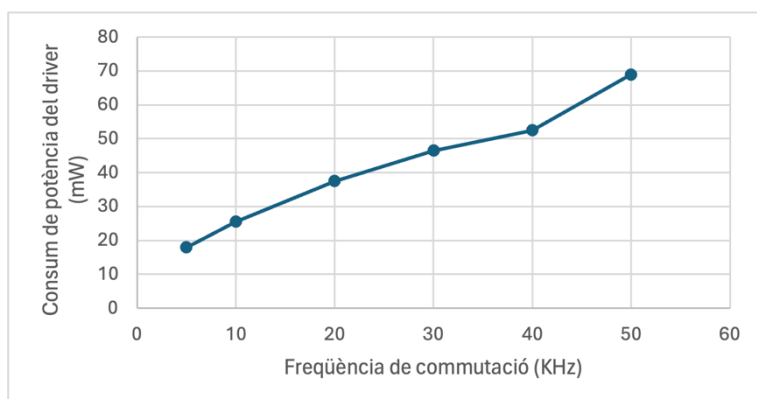


Fig. 3.16. Variació del consum de potència per part del *driver* en funció de la freqüència de commutació en càrrega, tenint en compte que $P = V \cdot I$.

És important assenyalar que, durant els testatges amb càrrega realitzats, van sorgir problemes en intentar treballar amb freqüències superiors als 50 kHz. Els valors obtinguts en aquests mesuraments van deixar de ser regulars i molts d'ells mancaven de lògica. El problema, tot i que no s'ha verificat, podria estar en les interferències que es creen quan es treballa amb altes taxes de canvi de voltatge. És possible, segons s'ha plantejat, que el circuit de potència no estigui preparat per treballar amb freqüències tan altes sense que li afecti la inductància paràsita. Aquesta situació s'explica en l'apartat 2.5.1.

Finalment, es va avaluar com afecta variar el cicle de treball del senyal en càrrega. Com havia passat en buit, tampoc augmenta en aquest cas el consum de corrent per part del *driver*.

Duty ratio (%)	Consum (mA)
10	3,1
20	3,1
40	3,1
60	3,1
80	3,1
100	3,1

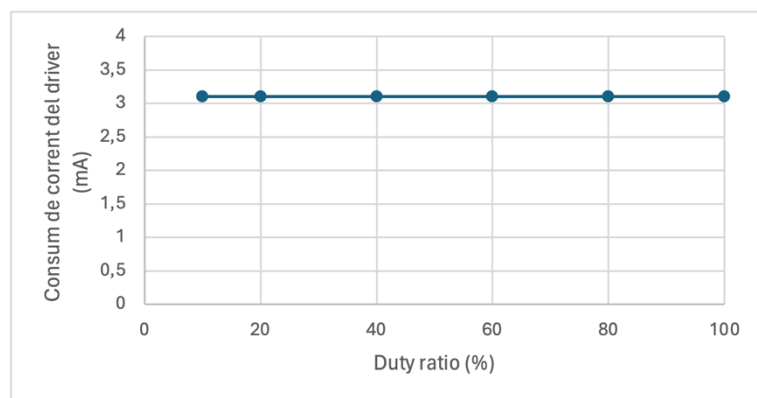


Fig. 3.17. Variació del consum de corrent per part del *driver* en funció del cicle de treball en càrrega (amb una freqüència de 30 kHz).

4. Validació experimental

En l'última etapa del projecte, es va procedir a integrar tots els elements i blocs del sistema dissenyat per validar que aquest era capaç d'alimentar remotament, a través de fibra òptica, el *driver* d'un MOSFET.

L'experiment es va desenvolupar en tres sessions: la primera centrada en el muntatge i configuració dels diferents dispositius, la segona en avaluar el seu rendiment i la tercera en posar a prova l'operativitat del sistema.

4.1. Muntatge del sistema PWoF

El muntatge es va dur a terme en els laboratoris del TecnoCampus. D'aquesta forma va poder desenvolupar-se en condicions de seguretat adequades i alhora es va tenir accés a equipament complementari necessari per a l'experimentació. El model armat es pot veure en l'esquema de la Fig. 4.1, on es mostra la configuració final del sistema, a banda dels diferents dispositius de monitoratge utilitzats.

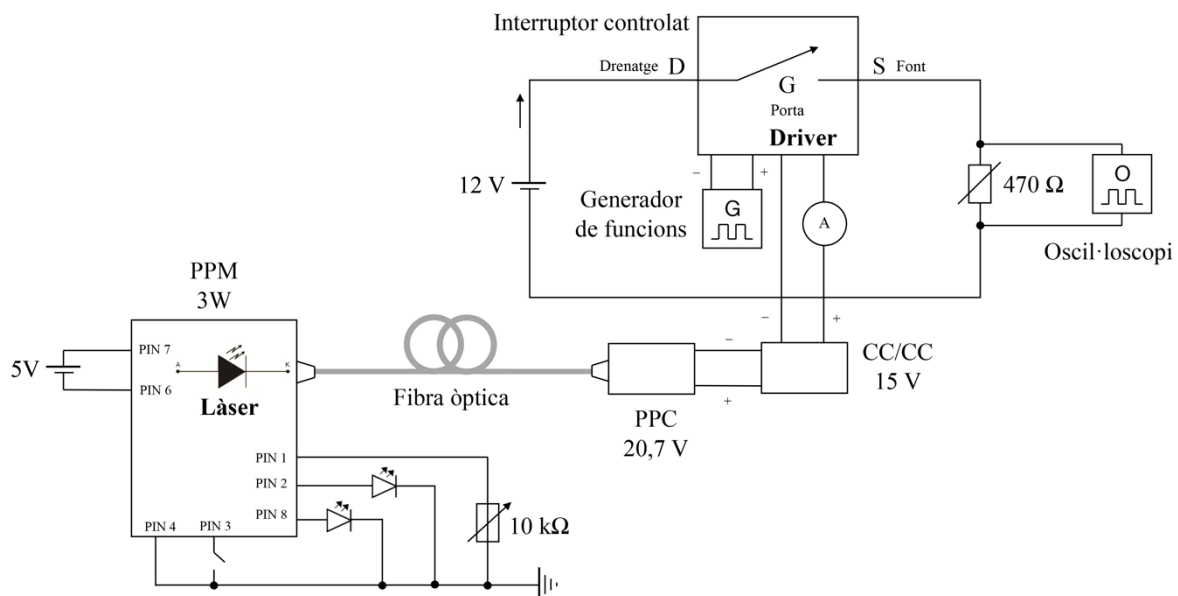


Fig. 4.1. Esquema simplificat del prototip utilitzat en l'experiment.

Pel que fa al PPM, el circuit per controlar el funcionament del làser i regular la potència transmesa es va muntar sobre un *proto-board* MB10B de la marca Ariston (Fig. 4.2). De cara a l'experiment, es van habilitar totes les funcionalitats del dispositiu excepte dues: el

monitoratge del corrent de conducció al pin LIO (pin 5), ja que es va considerar més adient mesurar el comportament elèctric del sistema a la sortida del PPC; i la lectura de la resistència del termistor situat entre els pins THMS1 (pin 9) i THMS2 (pin 10), ja que va estimar-se innecessari davant l'existència d'un LED de control de la temperatura (pin 8).

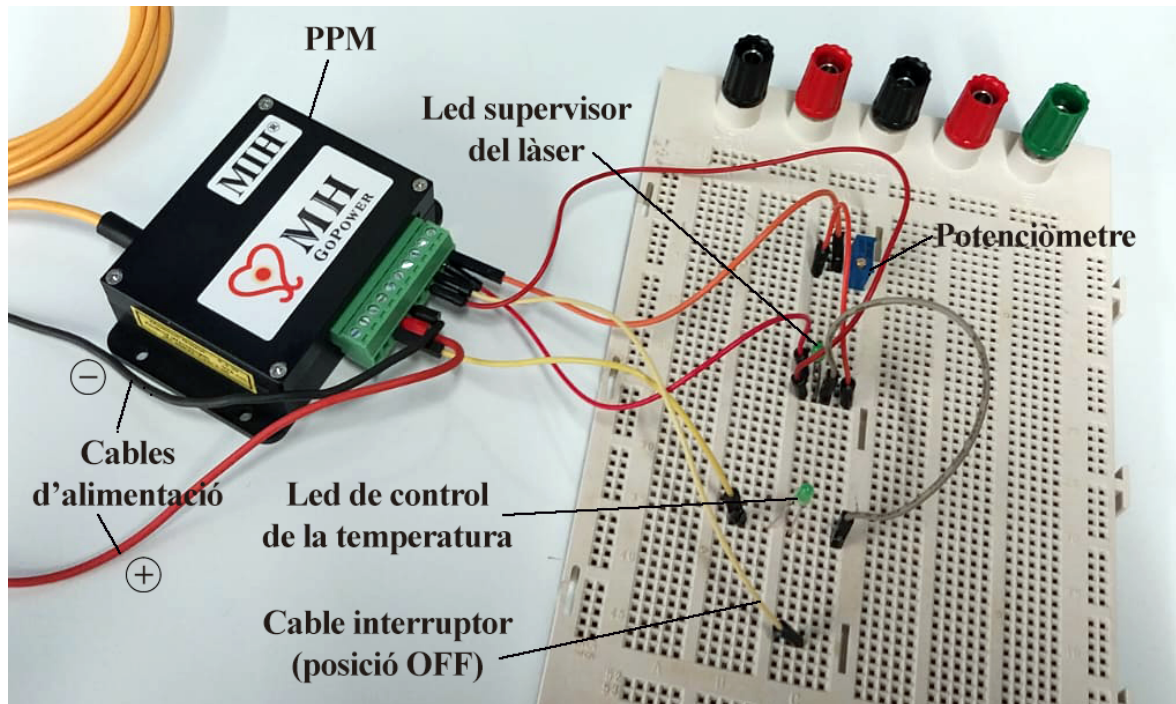


Fig. 4.2. Unitat de transmissió del prototip.

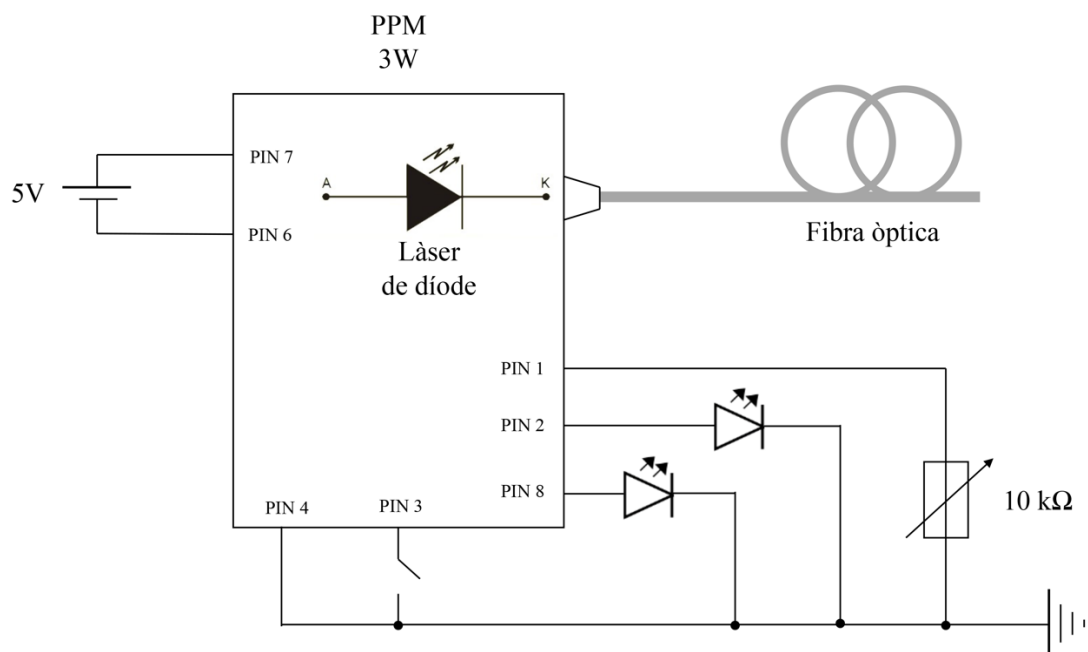


Fig. 4.3. Esquema simplificat de la unitat de transmissió del prototip.

El PPM es va connectar a una de les fonts d'alimentació HMP4030 DC disponibles al laboratori. Amb aquesta es va subministrar un corrent de 5 V i 3,4 A al dispositiu, valors calculats com a adequats pel seu funcionament.

Després d'unir la fibra òptica integrada en el PPM amb el PPC, com es mostra a la Fig. 4.4, es va procedir a realitzar els assajos descrits en l'apartat 3.4.1.

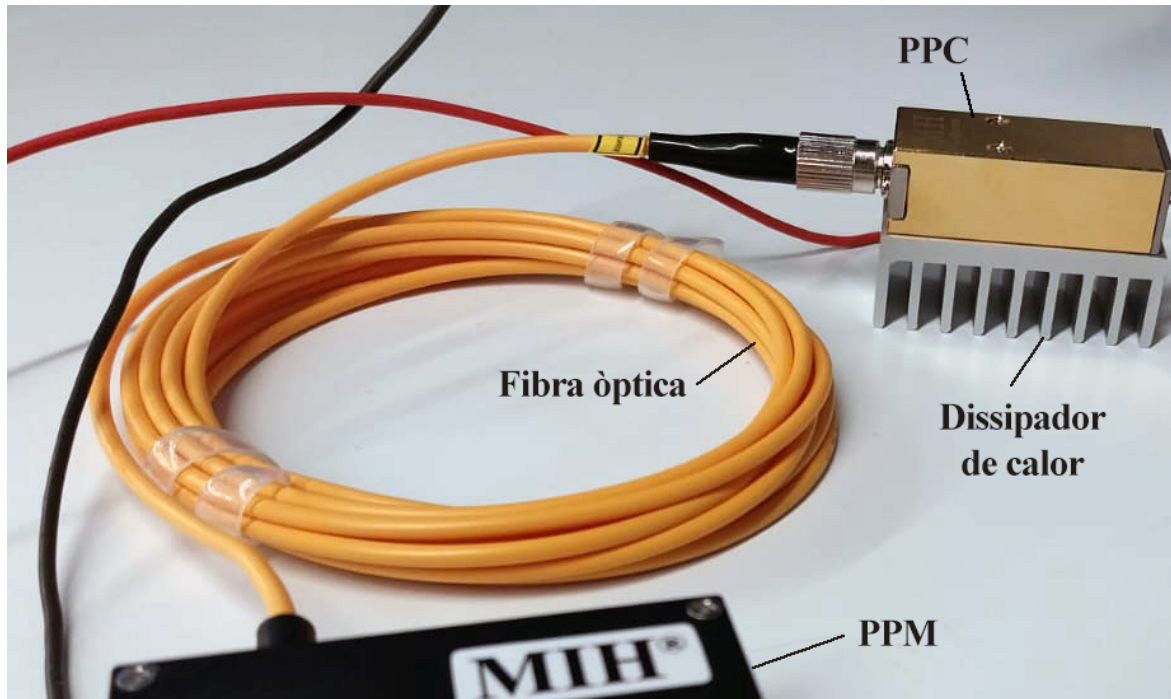


Fig. 4.4. Connexió entre la unitat de transmissió i el convertidor O/E o PPC.

En els primers intents, no es va aconseguir fer arribar al convertidor O/E la potència necessària. Això va obligar a desmuntar i tornar a muntar les connexions del PPM i a provar diferents potenciòmetres multivolta de 10 k Ω , el component que es va comprovar estava donant problemes, fins a trobar-ne un que funcionés de forma adequada.

Per culpa del petit diàmetre dels connectors del PPC, es va haver de recórrer a una regleta per unir aquest mòdul al convertidor CC/CC, com s'aprecia en la Fig. 4.5. Posteriorment, amb el regulador de voltatge es va configurar el dispositiu per reduir el voltatge de 20,7 V, que era el valor registrat a la sortida del PPC, a 15 V, el valor demandat a l'entrada de l'interruptor.

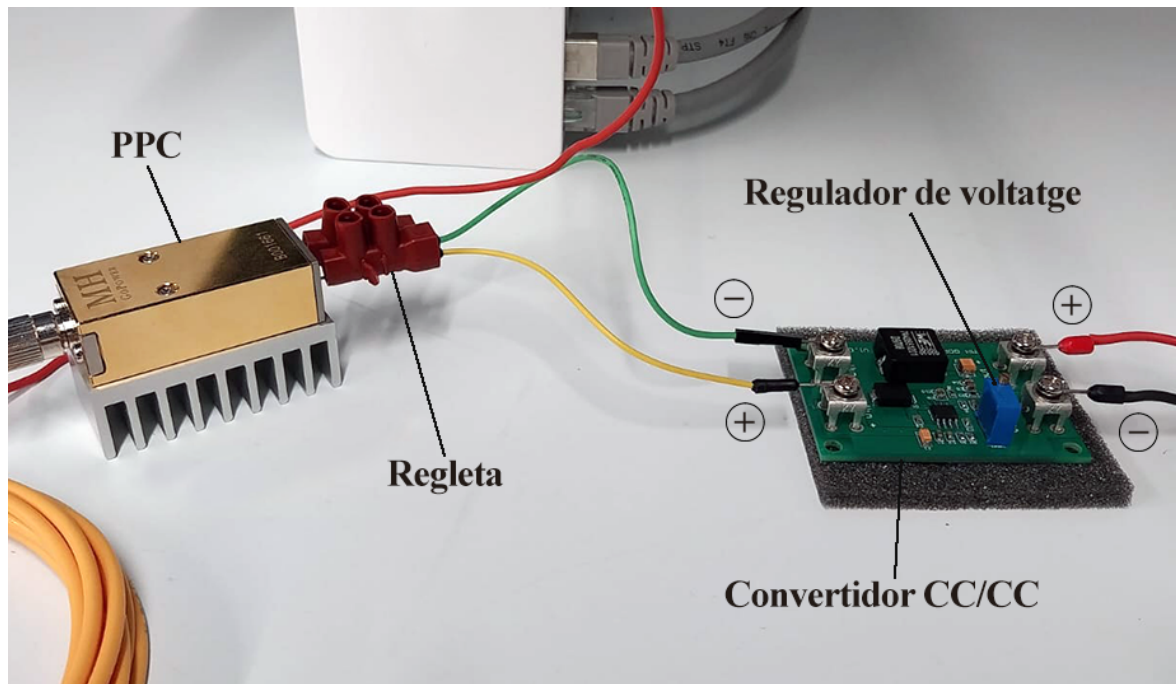


Fig. 4.5. Connexió entre el PPC i el convertidor CC/CC.

4.2. Muntatge del circuit amb un interruptor controlat

Un cop finalitzada la instal·lació i configuració del sistema i verificat el seu correcte funcionament, es va tornar a muntar el circuit que durant la fase de proves s'havia emprat per mesurar el consum del *driver* amb càrrega (Fig. 4.6).

Per abastir-lo de corrent, es va utilitzar un segon canal de la font d'alimentació HMP4030 DC, el qual es va connectar al drenatge (D) de l'interruptor controlat. De la font (S) es va connectar un cable de retorn al subministrament de corrent, amb una resistència de 470 Ω . En última instància, es va connectar el convertidor CC/CC al *driver* encarregat d'activar/desactivar l'interruptor des de la seva porta (G).

De cara a generar el senyal lògic de commutació, en aquest cas, es va recórrer a un generador de funcions model HM8030-6, de l'empresa Hameg Instruments, el qual va quedar unit al mòdul de l'interruptor a través del connector TTL.

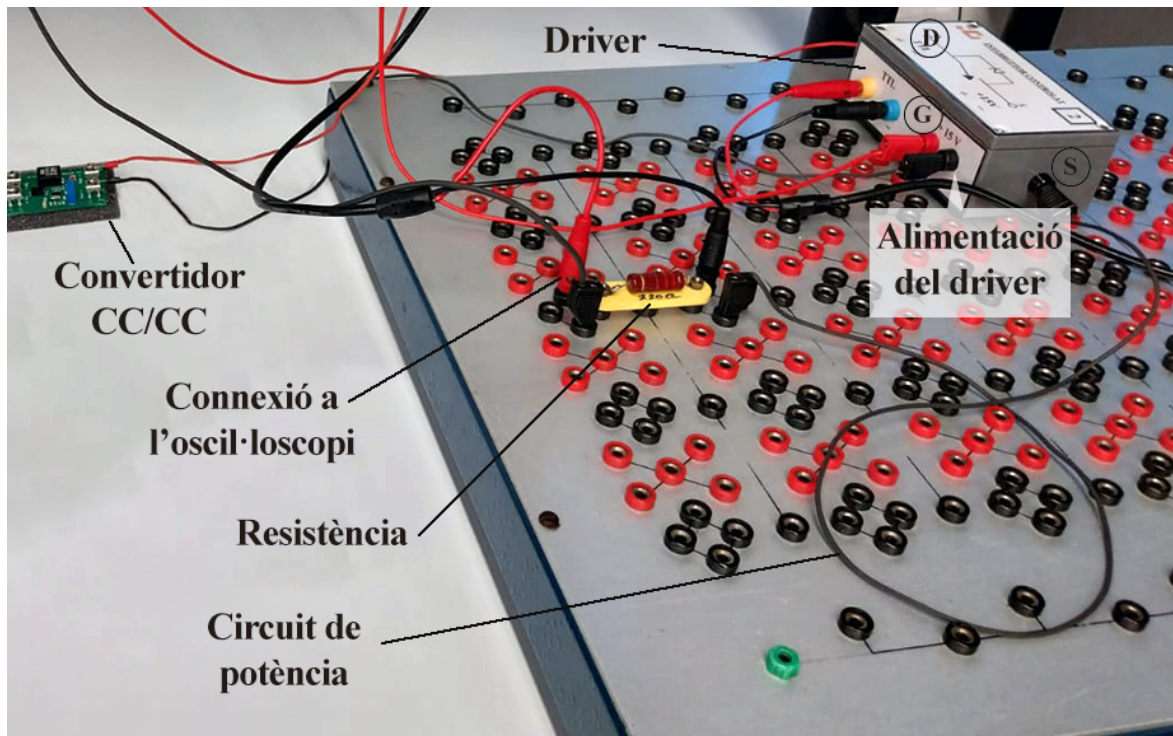


Fig. 4.6. Circuit de potència i connexió entre el convertidor CC/CC i el *driver*.

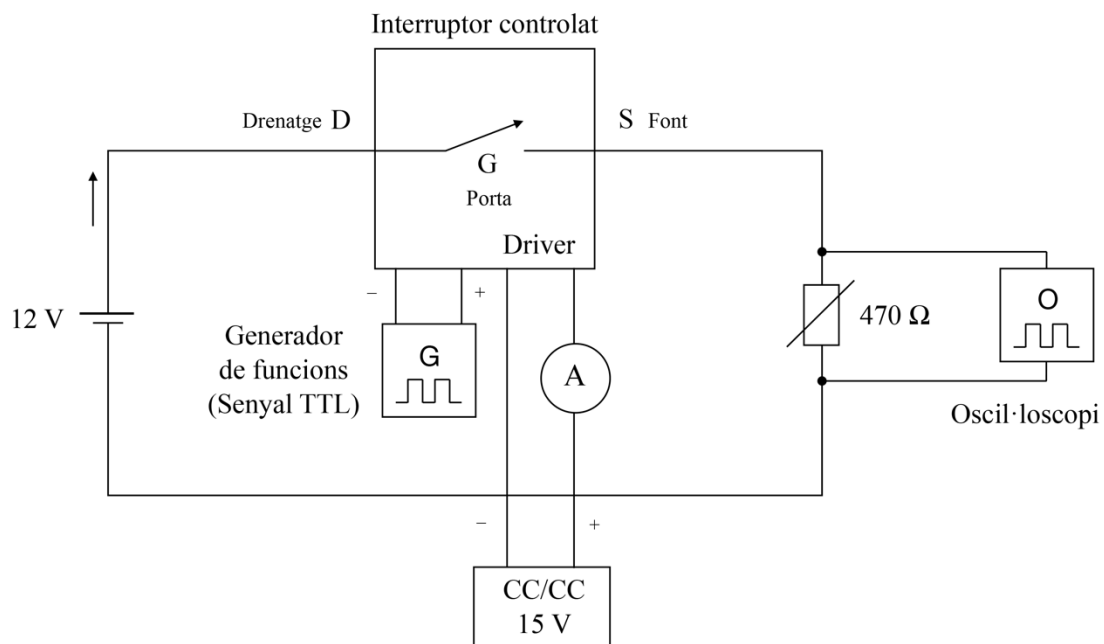


Fig. 4.7. Esquema simplificat del circuit de potència gestionat per l'interruptor. El prototip s'encarrega d'alimentar el *driver* que dona el senyal per obrir i tancar-lo.

4.3. Execució de l'experiment

La certificació de què s'havia complert l'objectiu perseguit en l'experiment –alimentar amb un sistema PWoF el *driver* d'un MOSFET– es va realitzar amb una doble comprovació:

- D'una banda, es va connectar un multímetre entre la sortida del PPC i l'entrada del *driver* per monitorar el corrent subministrat. Un cop en marxa el sistema, es van registrar una intensitat d'1,42 mA, valor adequat pel consum demandat pel *driver*.
- D'altra banda, es va analitzar amb un oscil·loscopi el senyal en la resistència del circuit. Com va quedar demostrat, l'interruptor estava treballant amb la freqüència (5,15 kHz) i relació de conducció establertes des del generador de funcions.

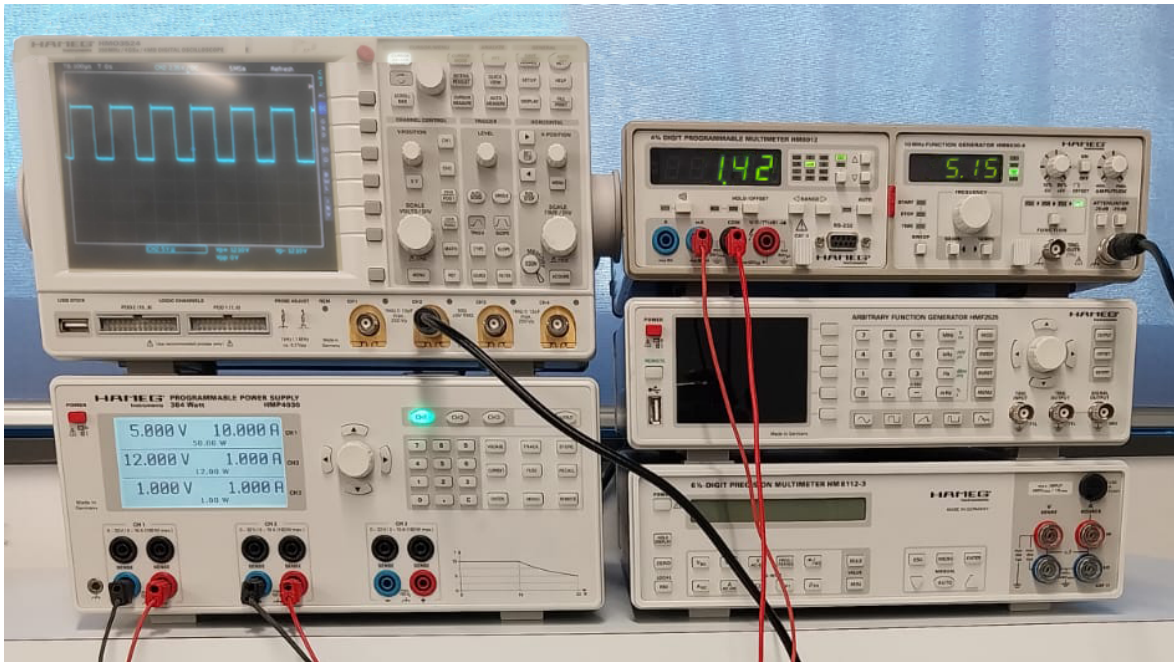
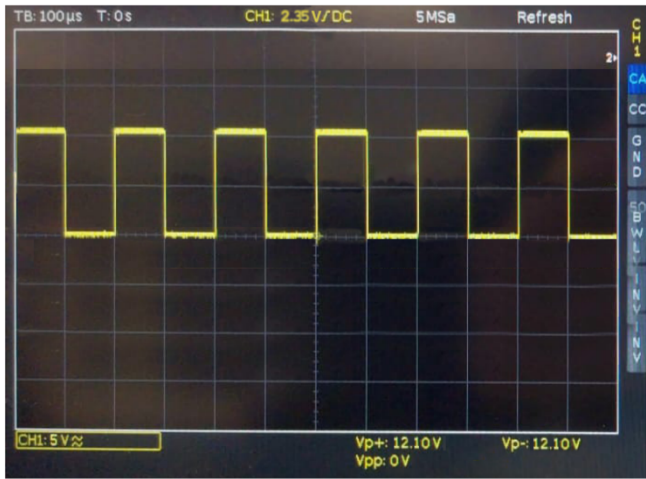


Fig. 4.8. Imatge dels diferents dispositius de control utilitzats durant l'experiment, amb alguns dels valors obtinguts o definits en pantalla.

Cal esmentar que, durant la sessió final d'experimentació, es va intentar treballar amb freqüències més altes, però no es va aconseguir. De la mateixa manera que va passar al fer la caracterització del *driver* amb càrrega, es planteja com a causa probable d'aquesta circumstància la generació d'interferències en el circuit de potència.

4.4. Les dades de l'experiment

Dispositiu	Configuració
Font d'alimentació HMP4030 DC	Tensió: 5V. Corrent: 3,366A Potència subministrada al PPM: 16,83W
PPM 003C50	Potenciòmetre: 3,11K Ω . Temperatura: <35°C Potència emesa pel làser: 3W
PPC YCH-H003-15-FC-A	Tensió de circuit obert: 20,7V Tensió a màxima potència: 17,6V
Convertidor CC/CC DDH1800	Tensió de sortida: 15V
Generador de funcions HM8030-6	Senyal TTL generada (Frequència: 5 kHz. Duty rate: 30%)
Font d'alimentació HMP4030 DC	Tensió subministrada al circuit: 12V
Circuit	Resistència: 470 Ω
Instrument de monitoratge	Resultat obtingut
Multímetre HM8012	1,41V a l'entrada del driver
Oscil·loscopi HMO3524	

Taula 4.1. Recopilació dels principals elements i paràmetres vinculats a l'experiment.

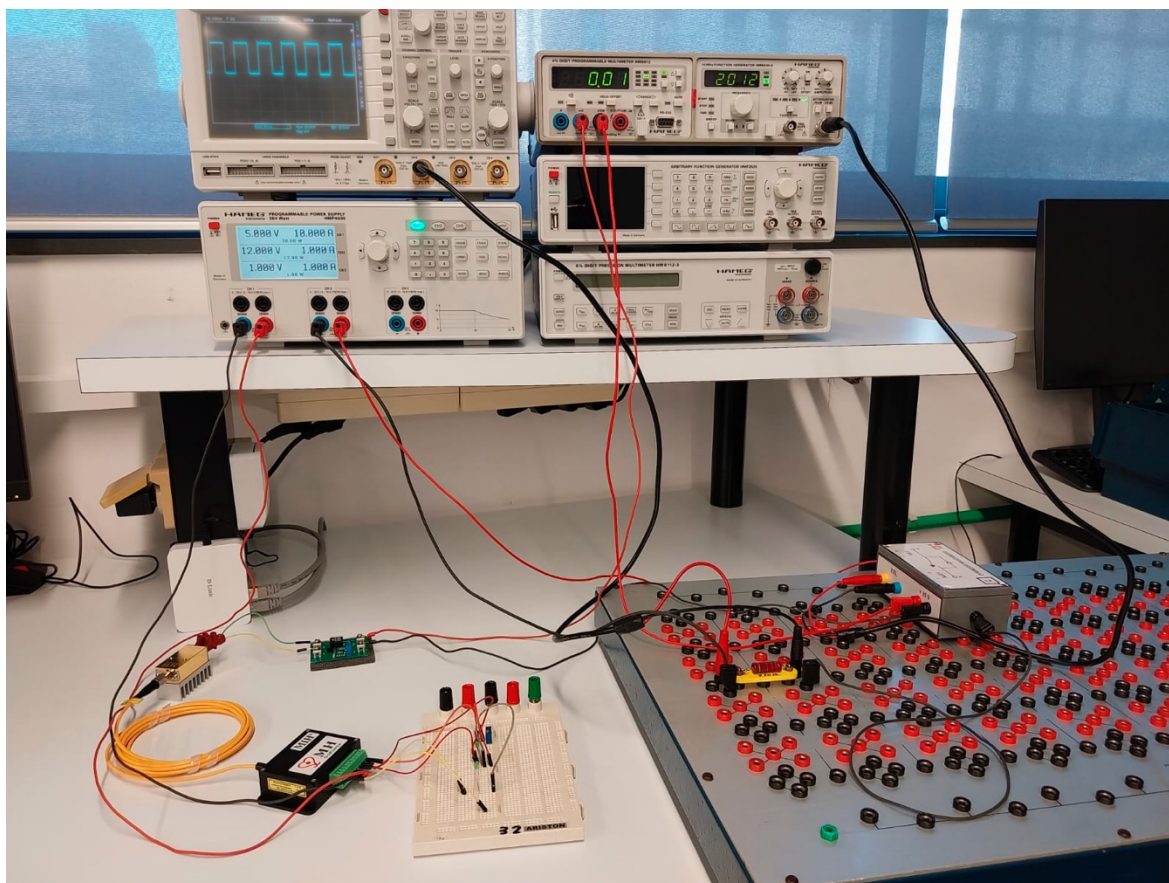


Fig. 4.9. Muntatge del laboratori i principals elements del prototip.

5. Impacte mediambiental del projecte

Un experiment de laboratori a petita escala com el realitzat en aquest projecte té un impacte mínim en el medi ambient: l'únic element computable és el transport de les peces adquirides des de l'illa de Taiwan al TecnoCampus.

Això, però, no implica que es pugui prescindir de fer un estudi de detall en aquest àmbit, ja que el desenvolupament de sistemes PWF comporta beneficis i perjudicis que cal tenir en compte. A continuació es llisten els més importants, així com accions que es proposen per garantir que la implementació d'aquesta tecnologia es fa de forma sostenible i respectuosa amb el medi ambient.

Per començar, un dels principals aspectes que cal tenir en compte és la producció i instal·lació d'infraestructures de fibra òptica com a alternativa als tradicionals cables de coure. Això es contempla com un valor positiu, ja que la fabricació de cables de fibra òptica té un impacte molt menor quant a petjada de carboni, contaminació i generació de residus que la fabricació de cables de metall. Segons un informe del Banc Mundial de 2021, el cable de fibra òptica és un 85% més eficient des del punt de vista energètic que el de coure [47].

La fibra òptica es fabrica principalment a partir de sílice (diòxid de silici), un element abundant i que, a diferència del coure, no necessita mineria d'extracció [48], una pràctica que causa la degradació del sòl, la contaminació de l'aigua i la pèrdua de biodiversitat. Per purificar la sílice i produir vidre d'alta qualitat, s'acostumen a emprar productes químics, però en quantitats relativament petites. A banda, el consum energètic per a la fabricació de la fibra òptica, si bé és intensiu per la necessitat de treballar amb altes temperatures, resulta força menor que en el cas del coure.

L'únic però que se li pot posar a l'ús de fibra òptica en lloc de cables de coure és el del reciclatge, ja que en el primer cas el procés és complex i poc rendible, motiu pel qual no està gaire implementat [49].

Un altre aspecte que cal considerar és l'impacte que genera al medi ambient la fabricació de semiconductors, elements que, en el sistema plantejat, són imprescindibles per fer la conversió elèctrica-òptica i òptica-elèctrica. La indústria dels semiconductors, productora també dels xips i la major part dels components electrònics que formen part dels circuits, es

calcula que consumeix prop de 100.000 milions de litres d'aigua a l'any i genera 100 milions de tones d'emissions de gasos d'efecte hivernacle –un 0,2% del total mundial–, a banda de consumir milions de tones de metalls de terres rares i generar molts residus tòxics [50].

Es tracta de xifres certament preocupants, però que els experts consideren el preu a pagar de cara a fer possible la descarbonització de l'energia. Segons l'Agència Internacional de l'Energia, per assolir l'any 2050 l'objectiu de zero emissions de gasos d'efecte hivernacle, és necessari que la proporció d'electricitat en el consum energètic augmenti del 20% actual fins al 50% [51]. Per aconseguir-ho, els semiconductors, especialment aquells lligats a l'electrònica de potència, resulten imprescindibles.

De cara a reduir aquest impacte, però, és important que durant el procés de manufactura dels materials, tant la fibra òptica com els semiconductors, se segueixin pràctiques respectuoses amb el medi ambient, com per exemple utilitzar fonts d'energia renovable. També és essencial seguir els estàndards i reglamentacions de la indústria, així com revisar els processos de transport i manteniment dels materials.

Com ja s'ha plantejat al llarg d'aquest treball, però, un dels principals problemes associats a la tecnologia PWF és la seva baixa eficiència energètica, factor que afecta directament l'impacte mediambiental. Cal recordar que el GEE del prototip desenvolupat, sense anar més lluny, se situa en un discret 5,4%. Augmentar l'eficiència dels dispositius utilitzats, d'aquesta manera, és necessari per a una implementació sostenible i ambientalment responsable d'aquesta tecnologia.

6. Perspectiva de gènere

Tot i que la perspectiva de gènere és sempre una qüestió important i a tenir en compte en tots els projectes, l'experimentació en el camp de la tecnologia PWoF no presenta afortunadament cap aspecte discriminatori ni de desigualtat, motiu pel qual, tot i que s'ha tingut present en tot moment, la seva aplicació ha estat innecessària.

No hi ha cap barrera específica que impedeixi a persones de certs gèneres participar en el desenvolupament o l'ús d'aquesta tecnologia, raó per la qual es pot garantir que l'experiment realitzat afecta a tots els grups de manera equitativa.

Creiem important destacar, però, el paper protagonista que les dones estan tenint en la investigació dins d'aquest àmbit, com demostra el fet que, per exemple, una de les capdavanteres en l'estudi de la tecnologia PWoF a Espanya sigui Carmen Vázquez, catedràtica de Tecnologia Electrònica de la Universitat Carlos III de Madrid (UC3M) i codirectora del Grup de Displays i Aplicacions Fotòniques [52].

Vázquez segueix les petjades d'altres científiques espanyoles en l'àmbit de l'òptica teòrica i experimental, com ara la catedràtica emèrita de la UAB María Josefa Yzuel [53], a qui també volem destacar pel seu paper militant en la inclusió en el camp de la física, participant de forma activa en l'Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas (AMIT) i en el programa SPIE Women in Optics.

7. Planificació del projecte

7.1. Organització i tasques a realitzar

A continuació es llisten les tasques incloses en la planificació del projecte:

a) Cerca d'informació sobre la tecnologia PWoF

Inclou la cerca de referents, fonts i claus generals. Un cop trobades, recopilar el màxim d'informació al respecte. En última instància, revisar i ampliar si és necessari el material obtingut. Organitzar-lo per temes.

b) Redacció de l'avantprojecte

Començar per l'objecte del projecte i continuar amb els antecedents i la informació recopilada en el punt anterior. A mesura que s'escriu el text, cal pensar les figures, taules i equacions que poden ajudar a entendre la matèria. Anar marcant les referències utilitzades. Un cop enllestit el bloc documental, s'haurà de desenvolupar la resta d'apartats. Cal deixar un temps suficient per a la revisió i la paginació del document, que acostuma a ser una tasca més exigent del que sembla.

c) Presentació de l'avantprojecte

d) Estudi previ

Es tracta de familiaritzar-se amb els elements dels experiments. Això implica, per exemple, estudiar amb detall les característiques dels components adquirits i de l'interruptor controlat. També cal trobar informació sobre el muntatge i la configuració de cadascun dels dispositius i aparells de monitoratge. Un altre pas necessari és conèixer l'espai de treball on es faran els experiments i detectar possibles mancances a resoldre. Informar-se també sobre els requisits de seguretat al manipular el làser i la resta de dispositius òptics.

e) Proves preliminars

Es tracta simplement de garantir que tot funciona correctament abans de tirar els experiments endavant. Si hi ha alguna peça que falla o genera problemes, s'haurà de buscar una solució o una alternativa de la forma més ràpida possible.

f) Disseny del sistema Power-Over-Fiber

Convé començar fent un diagrama de blocs simplificat i anar-lo ampliant fins a incloure tots els detalls. S'ha de tenir en compte que, amb molta probabilitat, a banda dels components òptics principals, també caldrà incloure en el circuit diferents components electrònics.

g) Càlcul teòric de rendiments

A partir dels valors definits en els *datasheet* i del disseny proposat, realitzar càlculs per valorar el rendiment teòric del sistema. Per fer-los, cal tenir en compte les diferents fórmules incloses en l'apartat 2 i altres que puguin plantejar-se.

h) Explicació del disseny

Arribats a aquest punt, revisar el disseny a partir dels càlculs fets, ja sigui per confirmar la seva validesa com per ajustar-lo si cal. Un cop acomplida aquesta tasca, pot redactar-se l'explicació del disseny per a la memòria.

i) Armat del sistema i experimentació

En primer lloc, muntar i connectar els components segons el disseny. Un cop armat el sistema i aplicada la configuració definida, realitzar l'experiment principal: intentar alimentar el *driver* de MOSFET i comprovar que aquest fa treballar l'interruptor de forma correcta. Durant l'experiment, cal mesurar els resultats de sortida obtinguts i altres que es consideri interessants. També poden fer-se proves amb configuracions alternatives: variant la freqüència del senyal TTL generat, etc.

j) Explicació de l'experiment principal

Mentre es realitzen els experiments, cal passar a net totes les dades recopilades i comparar-les amb les subministrades en els *datasheet*. A continuació, avaluar els resultats aconseguits i redactar per a la memòria l'explicació de l'experiment. També és el moment de veure si ha quedat pendent alguna cosa –que es podrà acabar de resoldre en el pas següent–.

k) Ampliació de l'experimentació (opcional)

A partir dels resultats obtinguts en l'experiment principal, es poden plantejar qüestions on seria interessant aprofundir o que caldria revisar. Es pot fer una llista de totes les possibles i

seleccionar només aquelles que siguin més interessants. Un cop definides, si s'escau, fer els nous experiments que s'hagi considerat.

l) Explicació dels nous experiments (opcional)

Seguir la mateixa pauta definida per a l'experiment principal. L'objectiu és incloure la informació sobre els nous experiments a la memòria.

m) Redacció de la memòria

En aquest punt, l'explicació del disseny i dels experiments ha d'estar feta. Cal plantejar i redactar la resta d'apartats, deixant pel final les conclusions i el resum. Com en el cas de l'avantprojecte, cal reservar temps per fer l'edició final de la publicació. També s'ha de tenir en compte que és important presentar un esborrany de la memòria al ponent perquè pugui proposar correccions.

n) Entrega de la memòria i altra documentació

o) Preparació de l'exposició/Defensa del TFG

És l'últim punt que cal planificar. Comença amb la preparació dels materials, tenint clar quin és l'objectiu que es persegueix, per acabar elaborant i editant els continguts.

p) Exposició/defensa del projecte davant del tribunal.

A continuació s'inclou un quadre (Taula 7.1) que recull:

- Les tasques a realitzar
- Les dates d'inici i final previstes de cada una
- El nombre d'hores dedicades.
- Altres recursos assignats

Tasca	Data d'inici	Data de finalització	Hores	Altres recursos assignats
Cerca d'informació sobre la tecnologia PWO _F	15/11/2023	5/12/2023	32	PC / Ofimàtica
Redacció de l'avantprojecte	6/12/2023	11/01/2024	150	PC / Ofimàtica
Entrega de l'avantprojecte	12/01/2024			
Estudi previ	15/01/2024	26/01/2024	20	Adquisició components òptics i electrònics
Proves preliminars	29/01/2024	02/02/2024	4	Laboratori
Disseny del sistema PWO _F	29/01/2024	14/02/2024	24	PC / Ofimàtica
Càlcul teòric de rendiments	05/02/2024	23/02/2024	24	PC / Ofimàtica
Explicació del disseny (memòria)	29/01/2024	28/02/2024	12	PC / Ofimàtica
Armat del sistema i experimentació	29/02/2024	22/03/2024	40	Laboratori
Explicació de l'experiment principal (memòria)	29/02/2024	22/03/2024	20	PC / Ofimàtica
Ampliació de l'experimentació	02/04/2024	17/04/2024	24	Laboratori
Explicació dels nous experiments (memòria)	02/04/2024	24/04/2024	18	PC / Ofimàtica
Redacció dels apartats restants de la memòria	25/04/2024	29/05/2024	120	PC / Ofimàtica
Entrega de la documentació	03-04/06/2024			
Preparació de l'exposició/defensa del TFG	30/05/2024	24/06/2024	60	PC / Ofimàtica
Exposició/defensa del TFG	25-28/06/24			Laptop / Projector

Taula 7.1. Quadre de tasques, terminis previstos i recursos assignats per a la realització del projecte.

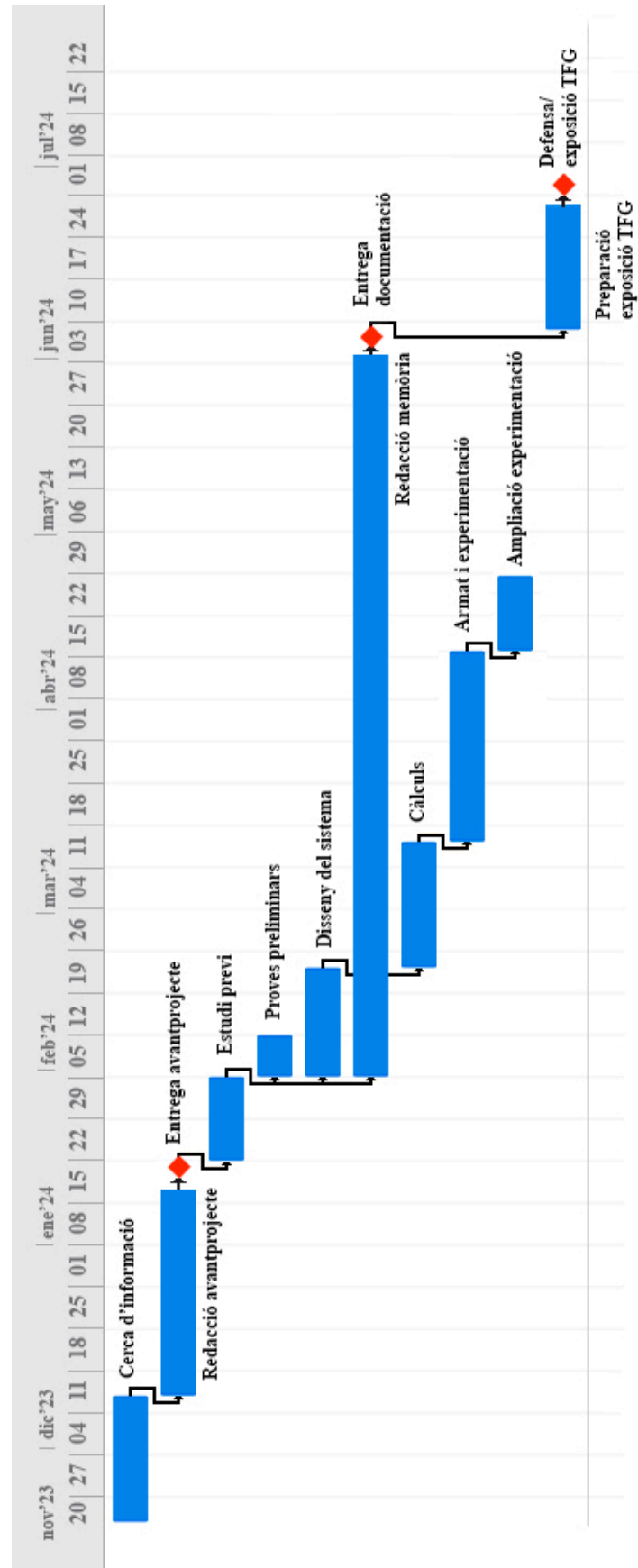


Fig. 7.1. Diagrama de Gantt de la planificació del projecte.

7.2. Desviacions

La planificació establerta en l'avantprojecte es va seguir de forma força estricta, tot i que es va haver d'ajustar els temps d'execució previstos en algunes etapes intermèdies.

La fase de disseny i configuració del sistema, en aquest sentit, es va allargar una mica més del previst, cosa que va endarrerir l'inici de la fase experimental, prevista pel març, però que finalment es va realitzar a l'abril. Com durant aquesta fase no hi va haver contratemps, però, aquest endarreriment no va afectar les dates d'entrega previstes.

Respecte a la definició de tasques a realitzar, només van canviar dues coses respecte de la planificació inicial:

- Atès que la informació donada en els *datasheet* és prou àmplia, el càlcul teòric de rendiments que en principi s'havia previst es va substituir per assajos i caracteritzacions de tipus pràctic. Això va permetre una avaluació més directa i fiable del rendiment real dels components i circuits integrats en el sistema.
- Finalment, no es va considerar necessari realitzar experiments complementaris, ja que això hagués desplaçat el focus de l'objectiu principal del projecte.

8. Conclusions

El prototip dissenyat per alimentar el *driver* d'un MOSFET utilitzant fibra òptica com a mitjà de transmissió d'energia ha complert el seu objectiu.

Això permet validar que la tecnologia PWoF és tècnicament viable, especialment en el camp de l'electrònica de potència, i assenta les bases perquè el TecnoCampus pugui participar directament en el seu desenvolupament. Cal destacar que, fins a la realització d'aquest treball, al centre només es tenien referències de tercers sobre aquests tipus de sistemes.

Entre els pros de la tecnologia PWoF destaca el fet que permet un aïllament galvànic total, ja que la fibra òptica no és conductora. Això redueix el risc de curtcircuits i descàrregues elèctriques, comuns en els cables de coure, millorant la seguretat del sistema i reduint les necessitats de manteniment. A banda, a la fibra òptica no li afecten les interferències electromagnètiques, abundants en els circuits de potència.

Però com l'experiment ha posat en evidència, aquesta tecnologia també té els seus contres.

El principal és que és ineficient. En l'experiment realitzat, l'eficiència global del sistema no va arribar ni al 6%. En cada conversió, tant l'elèctrica-òptica com l'òptica-elèctrica, es dissipa molta energia, cosa que a més provoca l'escalfament dels convertidors.

A banda, és una tecnologia cara. Per fer-la rendible, haurien de reduir-se els costos vinculats a la fabricació i adquisició de material, circumstància que segurament no es produirà fins que no augmenti considerablement la demanda.

Tenint en compte tots aquests factors, s'arriba a la conclusió que la tecnologia PWoF té un gran potencial en aplicacions específiques on la seguretat i la immunitat a les interferències són fonamentals, però és difícil que pugui utilitzar-se de forma generalitzada degut a la seva baixa rendibilitat i ineficiència. De cara a investigacions futures, seria bo centrar l'experimentació en aplicacions dins d'aquest context.

Per concloure, es pot dir que el projecte ha complert amb els objectius que s'havien fixat, obrint una línia de recerca amb molt potencial però també amb força limitacions.

9. Referències

- [1] MIH Laser Source. PPM Series. Recuperat de mhgopower.com/laser_pof_PPM.html
- [2] Fiber-Coupled Diode Lasers. Recuperat de lumentum.com/en/products/photonic-power-solutions
- [3] López Cardona, J.D., Sánchez Montero, D., & Vázquez, C. (2019). Smart Remote Nodes Fed by Power Over Fiber in Internet of Things Applications. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 19, No. 17, 7328-7334. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2915613
- [4] Vázquez, C. et al. (2019). Multicore Fiber Scenarios Supporting Power Over Fiber in Radio Over Fiber Systems. *IEEE Access*. Vol. 7, 158409-158418. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2950599
- [5] Sabadell, M.A. (2022, 26 abril). El láser, la batalla por una patente más larga de la historia. Recuperat de muyinteresante.es/ciencia/20182.html
- [6] Paul, C. (2022, 5 abril). How Exactly Does a Laser Diode Driver Work? Recuperat de arroyoinstruments.com/blog/how-exactly-does-a-laser-diode-driver-work
- [7] Gromov, T. Thermoelectrics Coolers Intro: The Basics. TEC Microsystems. Recuperat de tec-microsystems.com/faq/thermoelectic-coolers-intro.html.
- [8] Manikandan, S. (2019). *Switching of Lasing Wavelength and Threshold Current of Semiconductor Laser by Temperature Variation* [Arxiu PDF]. Recuperat de researchgate.net/publication/333821157_Switching_of_Lasing_Wavelength_and_Threshold_Current_of_Semiconductor_Laser_by_Temperature_Variation. DOI: 10.20944/preprints201906.0150.v1
- [9] Seufer, J. et al. (2005). DFB laser diodes in the wavelength range from 760 nm to 2.5 μm . *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy*. 60(14):3243-7. DOI: 10.1016/j.saa.2003.11.043
- [10] Matsuura, M. (2021) Recent Advancement in Power-over-Fiber Technologies. *Photonics, Special issue*. 8(8), 335. DOI: 10.3390/photonics8080335

- [11] Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., & Roth, B. (2013) Lighting with laser diodes. *Advanced Optical Technologies*. Vol. 2 No. 4. 313-321. DIO: 10.1515/aot-2013-0031
- [12] Miyakawa, H., Tanaka, Y., & Kurokawa, T. (2004). Design approaches to power-over-optical local-area-network systems. *Applied Optics*. Vol. 43 No. 6. 1379-1389. DOI: 10.1364/AO.43.001379
- [13] Agrawal, G., et al. (2023). Stimulated Raman Scattering. *Fiber-Optic Measurement Techniques*. Recuperat de [sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/stimulated-raman-scattering](https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/stimulated-raman-scattering)
- [14] Xiao, Q., et al. (2019). Exploring the initiation of fiber fuse. *Nature Portfolio. Scientific reports*, 9(1). DOI:10.1038/s41598-019-47911-0
- [15] Won, R. (2010). The birth of optical communications. *Nature materials*. N° 9 Suppl. 1. DOI: 10.1038/nmat2650
- [16] Paschota, R. *Fibers* / R.P.Photonics Encyclopedia. Recuperat de [rp-photonics.com/fibers.html](https://www.rp-photonics.com/fibers.html). DOI: 10.61835/11k
- [17] Carmona Bustos, S. (2017, abril). *Fibras Ópticas. Capítulo Modos*. Recuperat de docplayer.es/336477-Fibras-opticas-capitulo-2-2-1-modos.html
- [18] Larmeu, L. (2021, abril) *Step-Index Multimode Fiber vs Graded-Index Multimode Fiber*. Recuperat de community.fs.com/article/step-index-multimode-fiber-vs-graded-index-multimode-fiber.html
- [19] Awaji, Y., et al. *Multicore Fiber. Optical Fiber Telecommunications*. Recuperat de www.sciencedirect.com/topics/engineering/multicore-fiber
- [20] Zhu, B. et al. (2020). First Demonstration of Hollow-Core-Fiber Cable for Low Latency Data Transmission. *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)* pp. 1-3.
- [21] Ari, M., & Taplamacioglu M.C. (2010). Electrical power over fiber optics. *IJTPE Journal*. Iss. 5 Vol. 2 No. 4. 85-91.

- [22] Calculating Fiber Loss and Distance. Llibre blanc. Recuperat de advantech.com/en/resources/white-papers/024e7c77-bc88-40f7-bc81-33c5a6d62dc3
- [23] Shan, T., & Qi, X. (2014). Characteristics of GaAs Concentrator Cells for High-intensity Laser. *Wseas Transactions on Circuits and Systems*. Vol. 13. 440-444.
- [24] Algora, C., et al., (2022). Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light. *Joule*. Vol. 2 No. 2. 340-368. DOI: 10.1016/j.joule.2021.11.014
- [25] Schubert, J., et al. (2009) High-Voltage GaAs Photovoltaic Laser Power Converters. *IEEE Transactions on electron devices*. Vol. 56 No. 2. DOI: 10.1109/TED.2008.2010603
- [26] Fafard, S., & Masson D. (2023). Vertical Multi-Junction Laser Power Converters with 61% Efficiency at 30W Output Power and with Tolerance to Beam Non-Uniformity, Partial Illumination, and Beam Displacement. *Photonics*, 10, 940. DOI: 10.3390/photonics10080940
- [27] Fafard, S., & Masson D. (2002). 74.7% Efficient GaAs-Based Laser Power Converters at 808 nm at 150 K. *Photonics*, 9(8), 579. DOI: 10.3390/photonics9080579
- [28] Record Efficiency of 68.9% for GaAs Thin Film Photovoltaic Cell Under Laser Light. Nota de premsa. (2021, 28 juny). Recuperat de ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2021/record-efficiency-68-9-percent-for-gaas-thin-film-photovoltaic-cell.html
- [29] Haustveit, E. (2017, 25 juliol) Gate drivers. Recuperat de switchcraft.org/learning/2016/12/9/gate-drivers
- [30] Huang, A.Q., et al. (2017). 15 kV SiC MOSFET: An Enabling Technology for Medium Voltage Solid State Transformers. *CPSS transactions on power electronics and applications*. Vol. 2 No. 2: 118-130. DOI: 10.24295/CPSSTPEA.2017.00012
- [31] Schweber, B. (2022, 11 febrer). Cómo aplicar los MOSFET de SiC de tercera generación a los diseños de potencia para obtener un mayor rendimiento y eficiencia.

- Recuperat de [digikey.es/es/articles/how-to-apply-third-generation-sic-mosfets-to-power-designs](https://www.digikey.es/es/articles/how-to-apply-third-generation-sic-mosfets-to-power-designs)
- [32] Zhang X., et al. (2016). A Gate Drive With Power Over Fiber-Based Isolated Power Supply and Comprehensive Protection Functions for 15-kV SiC MOSFET. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 1967-1973. DOI: 10.1109/JESTPE.2016.2586107
- [33] Jin W., et al. Fibre Bragg Grating Sensor. Guided Wave Optical Components and Devices. Recuperat de [sciencedirect.com/topics/engineering/fibre-bragg-grating-sensor](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fibre-bragg-grating-sensor)
- [34] Navarro-Henríquez, F. (2014). Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes. Revista tecnología en marcha. 27(4):3. DOI: 10.18845/tm.v27i4.2080
- [35] Floris, I., et al. (2022). Fiber Optic Shape Sensors: A comprehensive review. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 139. 143-166. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106508
- [36] MEMPHIS: monitorización con sensores de fibra óptica en centrales térmicas. Nota de prensa. (2019, 11 abril). Recuperat de [endesa.com/es/proyectos/todos-los-proyectos/transicion-energetica/digitalizacion/memphis-monitorizacion-sensores-centrales-termicas](https://www.endesa.com/es/proyectos/todos-los-proyectos/transicion-energetica/digitalizacion/memphis-monitorizacion-sensores-centrales-termicas)
- [37] Rosolem, J.B. (2017). Power-Over-Fiber Applications for Telecommunications and for Electric Utilities. En Roka, R. (Ed), *Optical Fiber and Wireless Communications*. InTechOpen. DOI: 10.5772/68088
- [38] De Loach, B.C., Miller, R.C. & Kaufman, S. (1978). Sound alerter powered over an optical fiber. The Bell System Technical Journal. Vol. 57 No. 9. 3309–3316. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1978.tb02205.x
- [39] López-Cardona, J.D. et al. (2021). Power-over-fiber in a 10 km long multicore fiber link within a 5G fronthaul scenario. Optics Letters. Vol. 46 No. 21. 5348-5351. DOI: 10.1364/OL.439105

- [40] Wang, J., et al. (2021). Video monitoring system based on power-over-fiber technique. 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN). 1-3 IEEE. DOI: 10.1109/ICOCN53177.2021.9563818
- [41] MIH Photovoltaic Converter. A novel electrical power delivery Technology. Recuperat de mhgopower.com/laser_pof_YCHPPC.html
- [42] Optical Power Converters. Recuperat de broadcom.com/products/fiber-optic-modules-components/industrial/optical-power-components/optical-power-converters
- [43] ¿Qué significa NTC en un termistor y cómo funciona? Recuperat de sdindustrial.com.mx/blog/que-significa-ntc-en-un-termistor/
- [44] Wilkins, J.T. (2020, agost). Medidor de potencia óptica (OPM): ideal para las pruebas de cables de fibra. Recuperat de community.fs.com/es/article/optical-power-meter-an-essential-tester-for-fiber-optic-testing.html
- [45] Alepuz, S. & Filbà, A. (2023). *Pràctiques d'Electrònica de Potència* [PDF]. Escola Superior Politècnica TecnoCampus
- [46] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2009). *Electrónica de potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño. 3ª edición*, México DF: McGraw Hill.
- [47] Cull, B. et al. (2021). *La huella de carbono de los datos, Informe sobre el desarrollo mundial 2021: Datos para una vida mejor* [PDF]. Recuperat de wdr2021.worldbank.org/es/the-report
- [48] Cómo la fibra óptica salvarà el mundo. Beyontech (2016, abril). Recuperat de beyondtech.us/blogs/beyondtech-en-espanol/98494593-como-la-fibra-optica-salvara-el-mundo
- [49] Wright, E. et al. (2005). Improving recyclability by design: a case study of fibre optic cable. Resources, Conservation and Recycling. No. 44. 37–50. DOI: 10.1016/j.resconrec.2004.09.005

- [50] Diana, L. (2023, 23 de setembre). Semiconductores, ¿problema o solución medioambiental? *Cinco Días*. Recuperat de cincodias.elpais.com/opinion/2023-12-23/semiconductores-problema-o-solucion-medioambiental.html
- [51] Gielen, D. (2021). World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency. Recuperat de www.irena.org/publications.
- [52] Entrevista a Carmen Vázquez García. Área de Mujer, Óptica y Fotónica de la Sociedad Española de Óptica. Recuperat de areamujersedoptica.wordpress.com/conoce-a-las-investigadoras/junio-carmen-vazquez-garcia-catedratica-de-tecnologia-electronica-uc3m
- [53] Biografía de María Josefa Yzuel Giménez a la web de l'AMIT –Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas–. (2014, juliol). Recuperat de amites.org/cientificas/maria-josefa-yzuel-gimenez