

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
SISTEMAS ELECTRÓNICOS AVANZADOS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***COMUNICACIÓN INDUSTRIAL PARA
MONITORIZACIÓN DE PANELES SOLARES***

Estudiante *Calvo, Repiso, Nerea*
Director/Directora *Aranguren, Aramendia,
Gerardo*
Departamento *Tecnología Electrónica*
Curso académico *2019-2020*

Bilbao, 31, Agosto, 2020

Resumen

Castellano

Este trabajo de fin de máster trata sobre el estudio de las alternativas disponibles para la transmisión de datos con el objetivo de monitorizar paneles solares desde un centro de control y el desarrollo del sistema de comunicación .

Mediante la realización de este trabajo de fin de master se pretenden abordar los siguientes retos:

- Desarrollar un sistema de comunicación para la monitorización de paneles fotovoltaicos FV.
- Idear un sistema para identificar los paneles FV dentro de la red de comunicaciones. Esta función es importante de cara a su monitorización y mantenimiento.

Este trabajo se engloba dentro del grupo de diseño electrónico de la UPV/ EHU, en colaboración con el Instituto de Tecnología Microelectrónica. Estos grupos están desarrollando un sistema de monitorización de paneles solares.

Este sistema debe servir para plantas solares con miles de paneles FV. Pueden ser plantas nuevas o en explotación. Una de las posibilidades que se está estudiando es realizar las comunicaciones mediante los cables de transporte de la energía eléctrica desde los módulos FV hasta la unidad de control de los mismos.

Palabras clave: monitorización, Power Line Communication, paneles FV, sistema de comunicación, instalación FV.

Inglés

This master thesis deals about the study of the different available alternatives for data transmission for the monitoring of solar panels from a control unit and the development of the communication system.

By carrying out this master thesis, it is intended to address the following dares:

- Work out a communication system for PV panels monitoring.
- Think up a system to identify the PV panels in a communication net. This function it's important for their monitoring and maintenance.

This thesis is included within the UPV/EHU electronic design group, in collaboration with the Microelectronic Technology Institute. This groups are developing a system for solar panels monitoring.

This system should serve for solar plants with thousand of PV panels. They could be new or already working plants. One of the possibilities that it's being studied is to carry out the communication through the electric energy cables from the PV panels to the CU.

Keywords: monitoring, Power Line Communication, PV panels, communication system, PV installation.

Euskera

Master amaierako lan hau, datu transmisioetarako erabilgarriak diren alternatiben ikerketa batean datza, kontrol erdigune batetik eguzki-panelak monitorizatzeko helburuarekin eta komunikazio sistemaren garapena.

Lan honen bitartez, honako erronka hauei ekin nahi da:

- FV eguzki-panel sistema monitorizaziorako komunikazio sistema bat garatzea.
- Komunikazio sarearen barruan FV eguzki-panelak identifikatzeko sistema bat burutzea. Funtzio hau monitorizatzeko eta mantentzeko garrantzitsua da.

Lan hau Teknologia Mikroelektronikoko Institutuaren partehartzearekin UPV/EHU-ko diseinu elektroniko taldean biltzen da. Talde hauek eguzki-panelen monitorizazio sistema bat garatzen ari dira.

Sistema hau, milakako FV panel dituzten eguzki-landareetarako balio behar du. Landare berriak edo ustiapenekoak izan daitezke. Ikertzen ari den aukeratariko bat, komunikazioak energia elektrikoen garraio kableen bitartez burutzea da, FV moduluetatik hauen kontrol-unitateraino.

Hitz garrantzitsuak; monitorizazioa, ower Line Communication, FV panelak, komunikazio sistema, FV instalazioa.

Índice

Resumen	1
Índice	3
Índice de figuras	5
Índice de tablas	7
Acrónimos	9
Capítulo 1. Introducción y contexto	11
Capítulo 2. Objetivos y alcance del trabajo	13
Capítulo 3. Beneficios que aporta el trabajo	15
Capítulo 4. Metodología completa	17
Capítulo 5. Análisis de requerimientos	19
5.1 Energía solar	19
5.2 Instalaciones Fotovoltaicas	20
5.3 Sistemas de monitorización	21
5.4 Requerimientos de comunicaciones	24
5.4.1 Ancho de banda	24
5.4.2 Integración	25
5.4.3 Instalación	25
5.4.4 Costo	25
5.5 Instalación FV en la UPV/EHU	26
Capítulo 6. Análisis de alternativas	31
6.1 Alternativas. Tecnologías para las comunicaciones	31
6.1.1 Medios de transmisión no guiado o inalámbricos	31
6.1.1.1 ZigBee	31
6.1.1.2 WiFi	33
6.1.1.3 WiMax	34
6.1.1.4 LiFi	36
6.1.1.5 GSM (comunicación móvil)	38
6.1.2 Medios de transmisión guiados o alámbricos	39
6.1.2.1 RS-485	39

6.1.2.2 Power Over Ethernet	41
6.1.2.3 Ethernet industrial	42
6.1.2.4 EtherCAT	43
6.1.2.5 Bus CAN	45
6.1.2.6 TTP	46
6.1.2.7 PLC	47
6.2 Selección	48
6.3 Características del sistema seleccionado	49
6.3.1 Modulación ASK	50
6.3.2 Demodulación ASK	51
Capítulo 7. Pruebas	53
7.1 Diseño del prototipo y simulaciones	53
7.1.1 Modulación	54
7.1.2 Demodulación	55
7.1.3 Acoplamiento/desacoplamiento de la red eléctrica	56
7.2 Fabricación y pruebas del prototipo	57
7.3 Pruebas pendientes de realizar	61
Capítulo 8. Análisis de riesgos	63
Capítulo 9. Diagrama de Gantt/cronograma	65
Capítulo 10. Descargo de gastos	67
Capítulo 11. Conclusiones	69
Bibliografía	71
ANEXO I	75

Índice de figuras

Figura 5.1. Evolución de anual de las instalaciones de energías renovables [6].	20
Figura 5.2. Parque solar de Bhadla Solar Park [8].	21
Figura 5.3. Distribución de un sistema de paneles fotovoltaicos [19].	23
Figura 5.4. Esquema simplificado de conexión de un MC a un módulo FV en una cadena [18].	23
Figura 5.5. Diagrama de operación del MC [18].	24
Figura 5.6. conexiones de los paneles solares.	25
Figura 5.7. Paneles FV de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.	26
Figura 5.8. Instalación de un MC.	27
Figura 5.9. cableado de un MC.	27
Figura 5.10. Conjunto de elementos que conforman el sistema.	28
Figura 5.11. Carga.	28
Figura 5.12. Conector.	29
Figuras 6.1. Topologías de la red de los dispositivos ZigBee [25].	33
Figura 6.2. varios dispositivos conectados mediante WiMax a la misma red [30].	35
Figura 6.3. Sistema LiFi complementando a los sistemas WiFi y LTE [34].	37
Figura 6.4. String de paneles solares.	39
Figura 6.5. Configuración semi-duplex del estándar de Bus RS-485 [38].	40
Figura 6.6. (a) Dos pares separados de conductores (b) Cables que se utilizan para transmitir la señal [40]	42
Figura 6.7. Estructura de un sistema TTP [49].	46
Figura 6.8. Modulación ASK (a) entrada digital (b) salida de onda modulada en amplitud [52]	51
Figura 6.9. Técnica de demodulación ASK asíncrona [53].	51
Figura 6.10. Técnica de demodulación ASK síncrona [53].	52
Figura 7.1. Conexiones entre el MCU, el PLC y el módulo FV.	53
Figura 7.2. Circuito de modulación utilizado para la simulación.	54
Figura 7.3. Simulación circuito de modulación.	54
Figura 7.4. Circuito de demodulación utilizado para la simulación.	55

Figura 7.5. Simulación circuito de demodulación.	56
Figura 7.6. Placa PLC del circuito. Conectores MKDSP 10N/2-10, 16 de 2 vías.	56
Figura 7.7. Conexiones del circuito de pruebas	57
Figura 7.8. Esquemático comunicaciones PC-PCB.	58
Figura 7.9. Montaje para las pruebas en el laboratorio.	58
Figura 7.10 Oscilograma de la señal en el test point 2.	59
Figura 7.11. Oscilograma de la señal en el test point 1 (señal verde) y la señal en el test point 2 (señal amarilla).	60
Figura 7.12. Oscilograma de la señal en el test point 2 (señal amarilla), señal filtrada (señal verde) y señal limitadora (señal naranja).	61

Índice de tablas

Tabla 6.1. Características WiFi [28].	34
Tabla 6.2. Características y aplicaciones de los PLCs [28].	48
Tabla 6.3. Tabla de valoración.	49
Tabla 9.1 Diagrama de Gantt.	66
Tabla 10.1. Gastos de personal	67
Tabla 10.2. Gastos de fabricación del prototipo	67

Acrónimos

AC	Alternating Current
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMR	Automatic Meter Reading
ASK	Amplitude Shift Keying
AWG	American Wire Gauge
BSS	Business Support System
CAN	Controller Area Network
CNI	Communication Network Interface
CU	Control Unit
DC	Direct Current
DCE	Data Communication Equipment
DCO-OFDM	Direct Current Optimized Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
DPRAM	Dual-Ported Random Access Memory
DTE	Data Terminal Equipment
EIA	Electronic Industries Alliance
EMI	ElectroMagnetic Interference
FFD	Full Function Display
FV	Fotovoltaico
FET	Field Effect Transistor
FSK	Frequency Shift Keying
GSM	Global System for Mobile
I&I	Industrial and Instrumentation
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical

LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
LiFi	Light-fidelity
LTE	Long Term Evolution
M3S	Module to Module Measurement System
MAC	Medium Access Controls
MC	Monitoring Circuit
MCU	Microcontroller
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSS	Operations Support System
PC	Personal Computer
PHY	Physical Layer
PIA	Pequeño Interruptor Automático
PLC	Power Line Communication
PV	Photovoltaic
PoE	Power over Ethernet
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RFD	Reduced Function Display
SNMP	Simple Network Management Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TTP	Time Triggered Protocol
UDP	User Datagram Protocol
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

Capítulo 1. Introducción y contexto

Durante el siglo XX se produjo un crecimiento continuo del gasto energético, junto con avances en el número de personas que tenían acceso a un nivel de vida más elevado, lo que finalmente desembocó en una situación como la del momento actual, caracterizada por la inquietud que generan problemas como el agotamiento de los combustibles fósiles o el calentamiento global, derivado de la emisión de gases con efecto invernadero.

Problemas políticos y sociales importantes relacionados con la localización de las fuentes energéticas tradicionales, junto con los anteriormente citados, han despertado un interés cada vez más extendido por encontrar nuevas fuentes de energía, caracterizadas por reponerse a un ritmo igual o superior al que son consumidas y a las que se las denomina energías renovables [1].

Las energías renovables se definen como la energía obtenida de fuentes de energía naturales y persistentes que se producen en el ambiente local, mientras que la energía no renovable es la energía obtenida de las reservas de energía estática que permanecen bajo tierra, al menos que sean liberadas por la interacción humana [2].

De entre las energías renovables, para este trabajo es de gran interés la energía solar. La energía solar es aquella que producen la luz o el calor del sol. Nuestro planeta recibe un aporte energético continuo de aproximadamente 1367 W/m^2 [3]. Esta energía se puede utilizar para la producción de energía térmica o eléctrica, y además se trata de un recurso limpio y casi inagotable.

La fuente de energía solar FV es la que más ha aumentado en las últimas décadas. La capacidad de energía solar FV instalada aumenta anualmente casi un 30% [4]. Por lo que las instalaciones solares son las principales fuentes de generación de energía FV. Estas instalaciones pueden ser de distinta categoría, de acuerdo a la cantidad de energía que pueden llegar a generar. Estas instalaciones se categorizan en: instalaciones pequeñas, medianas, grandes y centrales FV. Para mejorar la eficiencia de los sistemas FV es necesario llevar un control de todos los paneles solares. Mientras que en las instalaciones pequeñas es fácil revisar cualquier defecto que pueda afectar a cualquiera de los paneles solares, en todas las demás instalaciones es necesario realizar una monitorización de los paneles.

La monitorización de los sistemas FV, que se está desarrollando dentro de los grupos de investigación mencionados, se realiza a nivel de panel, como se explica posteriormente. Eso implica que todos los paneles mantengan una comunicación con el centro de control. En instalaciones pequeñas puede valer casi cualquier sistemas de comunicaciones. Pero para la monitorización de grandes centrales FV es necesario seleccionar y diseñar un sistema de comunicaciones específico.

Capítulo 2. Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo principal de este TFM es analizar las alternativas disponibles de sistemas de comunicaciones para la monitorización de paneles solares. El sistema de comunicaciones debe de cumplir con las exigencias de funcionamiento, instalación y costo para grandes instalaciones fotovoltaicas. Este sistema de comunicaciones debe reducir el costo y su instalación debe ser más sencilla que la del sistema actual.

Este TFM se engloba dentro de un trabajo de doctorado, por lo que su alcance es el diseño de un sistema de comunicaciones que se pueda integrar con el módulo de monitorización que se está desarrollando en la tesis doctoral.

Capítulo 3. Beneficios que aporta el trabajo

Mediante la realización de este trabajo de fin de máster se realiza una mejora de las instalaciones de monitorización de paneles solares. Actualmente se ha desarrollado e instalado un sistema de monitorización de paneles solares en la UPV/EHU. En este sistema la comunicación entre la unidad de control y el circuito de monitorización se realiza mediante la tecnología RS485. Una característica de este tipo de comunicación es que requiere de cableado adicional. Además, los componentes utilizados en el circuito de monitorización son complejos. Mediante la selección de un sistema de comunicaciones más adecuado para esta técnica se eliminan los problemas anteriores y se facilita la instalación de los módulo de monitorización. Por lo que implica una mejora funcional, de instalación y de costo respecto al sistema actual.

Un sistema da monitorización como el que se pretende diseñar, supone un gran ahorro de dinero y tiempo a las empresas del sector FV a la hora de sacar el mayor rendimiento posible a sus paneles solares y llevar un buen mantenimiento de los mismos. Mediante este sistema se permite realizar de forma remota y automatizada un análisis de todos los paneles solares de forma que se puedan localizar fácilmente aquellos que tienen algún defecto.

Capítulo 4. Metodología completa

En este capítulo se muestra un resumen de la metodología seguida largo del TFM.

- 1. Análisis de requerimientos:** Estudio de los sistemas fotovoltaicos, así como el funcionamiento de la instalación que esta implementada en los paneles solares de la UPV/EHU. Puesto que el objetivo de este trabajo de fin de máster es el desarrollo de un sistema de comunicaciones que permita transmitir los datos de monitorización desde los paneles solares hasta un centro de control se especifican los requerimientos para el sistema de comunicaciones.
- 2. Análisis de alternativas:** Análisis de las tecnologías disponibles para la comunicación entre paneles solares. Analizar distintos sistemas de comunicación industriales: inalámbricos/no guiados y alámbricos/guiados.
- 3. Evaluación de la alternativa válida:** Análisis de las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías introducidas. Además, se incluye una tabla de valoración donde se analizan características como el funcionamiento, la facilidad de instalación o el costo de las tecnologías. Una vez seleccionada la tecnología se realiza un análisis de alguna de sus características básicas.
- 4. Validación de la tecnología propuesta:** En base a la tecnología y a sus características se procede a realizar un circuito que permita la comunicación entre el circuito de monitorización y la unidad de control. Se hace uso de la herramienta *Orcad*. Para poder comprobar el diseño del sistema de comunicaciones realizado, se fabrica una PCB que permita la comunicación entre varios PCs. Este diseño únicamente sirve para realizar las pruebas. Se hace uso de las herramientas *Orcad*, *Padstack Editor* y *Allegro PCB Editor*.
- 5. Pruebas:** Realizar las pruebas necesarias para la validación del sistema de comunicaciones:
 - a) A nivel funcional.
 - b) Con un panel solar en laboratorio para probar la capacidad de conducción de las comunicaciones a través del panel.

c) Con el sistema de paneles externo y múltiples circuitos-prototipos de comunicaciones.

6. Documentación y especificaciones del circuito a integrar en el módulo de monitorización. Detallar en este documento toda la información recopilada a lo largo del desarrollo del trabajo de fin de grado, tanto del estado del arte como de la tecnología seleccionada.

Capítulo 5. Análisis de requerimientos

En este capítulo se introduce desde el recurso básico que utilizan los paneles solares, como es la energía solar, hasta el sistema de monitorización, con su tecnología de comunicaciones actual. Además, se especifican los requerimientos para el sistema de comunicaciones que se quiere seleccionar.

5.1 Energía solar

Casi toda la energía de la que disponemos proviene del sol. Este es, por tanto, la fuente principal de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta. Se calcula que en el interior del sol se quema cada segundo unos 700 millones de toneladas de hidrógeno, de las que 4.3 millones se transforman en energía. Una parte importante de esta energía se transmite a través de los rayos solares al resto de planetas, lunas, asteroides y cometas que componen nuestro sistema solar. Más concretamente, hasta la Tierra llega una cantidad de energía solar equivalente a $1.7 \times 10^{14} W$, lo que representa la potencia correspondiente a 170 millones de reactores nucleares de 1000 MW de potencia eléctrica unitaria, o lo que es lo mismo, 10000 veces el consumo energético mundial [3].

La energía solar se usa de dos maneras diferentes. La primera es la térmica, en la cual se utilizan dispositivos para recoger la energía del sol en forma de calor. Esta energía también se puede utilizar para calentar agua, calefacción espacios, secador, etc. o convertirla en electricidad mediante ciclos de conversión de energía. La segunda forma de utilizar la energía solar es directamente mediante la conversión FV, los dispositivos que se utilizan para este propósito se denominan células solares [5]. Este trabajo se enfoca en este segundo método.

En los últimos 15 años, la tecnología FV ha mostrado un crecimiento del mercado cada vez mayor gracias a la tecnología y al desarrollo de los precios. En estos últimos años, la energía FV ha pasado de ser una tecnología principalmente utilizada para la producción de electricidad a una fuente de energía convencional [6]. Como se puede ver en la figura 5.1, en el 2019, la energía solar FV representó aproximadamente el 59% de la producción total de electricidad renovable a partir de nuevos activos de producción.

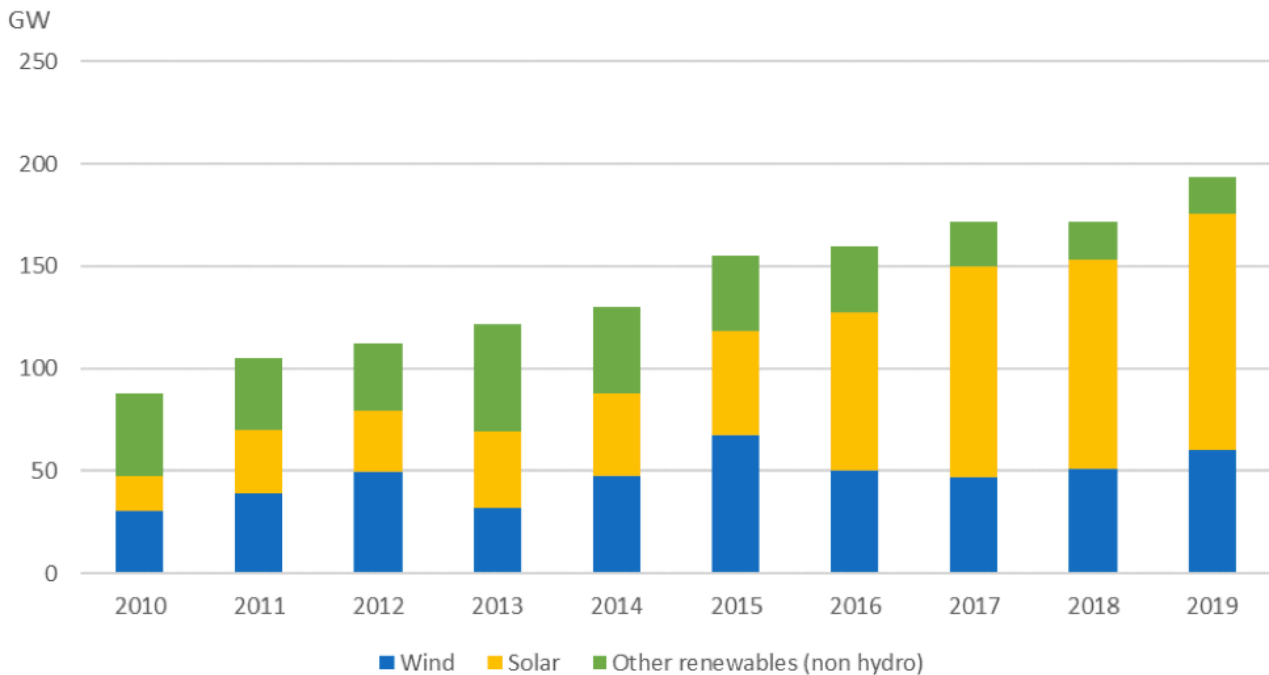


FIGURA 5.1. EVOLUCIÓN DE ANUAL DE LAS INSTALACIONES DE ENERGÍAS RENOVABLES [6].

Para finales del 2019 la capacidad total de energía FV acumulada alcanzó, al menos, 627GW. En 2019, el mercado fotovoltaico superó el umbral de los 100GW por tercera vez consecutiva y creció un 12%. Este crecimiento es el resultado de un año de estabilización y se explica por el importante incremento del mercado en todos los continentes, cuyo efecto global ha sido parcialmente oculto por la ralentización de China, líder mundial de instalaciones FV (30.1GW).

El conjunto de la Unión Europea ocupa el segundo lugar (16GW, España y Alemania entre los 10 primeros países) seguida de Estados Unidos de América (13.3GW). Después de estos tres países se encuentran: Japón (7GW), Vietnam (4.8GW), Australia (3.7GW), Ucrania (3.5GW) y Corea (3.1GW) [6].

5.2 Instalaciones Fotovoltaicas

La asociación de la Industria Fotovoltaica establece tres rangos de potencia representativos de los distintos de instalaciones de generación fotovoltaica, más un cuarto correspondiente a las centrales [7]:

- Instalaciones pequeñas, de 3kWp como planta tipo, con rango hasta 5kWp. Son aplicaciones rurales aisladas como una solución limpia y muchas veces económica, o aplicaciones conectadas a la red sobre tejados, azoteas de casas, hechas por particulares en zonas de su propiedad o influencia.
- Instalaciones medianas, de 30kWp como planta tipo, con rango entre 5 y 100kWp. Son generadores en electrificaciones rurales centralizadas, o conectadas a red en edificios, normalmente integrados en la arquitectura de los mismos, diseñadas por arquitectos innovadores y realizadas por comunidades de vecinos, empresas constructoras o corporaciones públicas y

privadas que desean incorporar energía fotovoltaica en sus edificios o construcciones emblemáticas con valor añadido.

- Instalaciones grandes, de 300kWp como planta tipo, con rango entre 100kWp y 1MWp. Generalmente están conectadas a la red, con extensas superficies, y en su mayoría están promovidas por empresas que, con interés de contribuir a una generación de electricidad limpia desean reforzar la imagen de la empresa o entidad promotora.
- Centrales fotovoltaicas, de 3MWp como planta tipo, con rango entre 1 y 50MWp. Son centrales de generación promovidas por empresas o consorcios de estas, que desean conseguir cierto rendimiento económico y una componente de generación verde.

Para garantizar la mayor cantidad de energía acumulada de las distintas instalaciones FV es necesaria la monitorización de los paneles solares. Las instalaciones pequeñas están conformadas por muy pocos paneles y no requieren monitorización, ya que son fáciles de revisar periódicamente. A partir de instalaciones medianas, y sobre todo en instalaciones grandes o en centrales fotovoltaicas donde hay miles de equipos, es de gran interés la monitorización. Para revisar un sistema como el de la figura 5.2 se requiere de personal y tiempo, mientras que si el sistema de monitorización está automatizado, se puede saber diariamente el rendimiento de cada uno de los paneles. En el momento en el que el rendimiento comience a ser bajo se puede planificar un sistema de mantenimiento a los paneles precisos, en los cuales ha surgido algún defecto.



FIGURA 5.2. PARQUE SOLAR DE BHADLA SOLAR PARK [8].

5.3 Sistemas de monitorización

Debido a la demanda de energía solar, es muy importante poder monitorizar los sistemas fotovoltaicos para aumentar la producción de energía y maximizar la vida útil de los módulos

fotovoltaicos [9]. Una instalación solar bien diseñada y correctamente instalada no tiene por qué ocasionar problemas. Como ocurre con cualquier otra tecnología, la situación y conservación del equipo dependerá del uso que se haga de él [3]. Aun así, incluso en sistemas fotovoltaicos que poseen una adecuada monitorización se pierde alrededor de un 15-20% de la energía producida [10].

Parte de la pérdida de la energía producida es debido a los defectos en los paneles solares. La corrosión [11], las roturas de las interconexiones eléctricas o mecánicas [11], los problemas de encapsulación [12], las grietas en las celdas [13], hot-spots [14], el polvo [15], el crecimiento de la vegetación o las sombras parciales [16] son algunos de los defectos que reducen el rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Los módulos FV están conectados en serie al resto de la cadena. Si estos defectos no se corrigen a tiempo, pueden reducir la potencia de salida de toda la cadena e incluso algunas de ellas pueden volverse permanentes, acelerando la degradación de los módulos [17].

La mayoría de los defectos de los módulos FV pueden presentarse como variaciones en la resistencia serie (R_s) y en la resistencia de derivada (R_{sh}) de los módulos y, posteriormente, como variaciones en las características I-V y la potencia de salida del módulo FV [18].

Muchos de estos problemas pueden evitarse mediante una correcta monitorización. Se han propuesto diferentes métodos los cuales se implementan a nivel del sistema FV, nivel de la cadena o mediante la monitorización individual de los módulos. Estos últimos, son los únicos métodos que permiten obtener la característica I-V del módulo, la cual da suficiente información para localizar la pérdida de potencia, si se da en el módulo o en el resto del sistema. Sin embargo, estos métodos presentan tres inconvenientes. En primer lugar, para obtener la característica I-V se requiere desconectar el módulo fotovoltaico del resto del sistema. En segundo lugar, estos métodos requieren de largos periodos de tiempos para realizar la medición, en condiciones atmosféricas específicas y, finalmente, requieren de componentes de electrónica de potencia, lo que supone una solución cara y poco eficiente si se quiere realizar una monitorización continua [18].

En sus trabajos [17][18] E. Ortega, G. Aranguren y J.C. Jimeno proponen un Sistema de Medición de Módulo a Módulo (M3S) que permite medir cada módulo FV sin tener que desconectarlo del resto del sistema, ni hacer uso de componentes de electrónica de potencia. Este sistema consta de un pequeño circuito electrónico al que se le denomina Circuito de Monitorización o Monitoring Circuit (MC) [19] en cada módulo FV y una Unidad de Control o Unit Control (CU) para todo el sistema FV como se muestra en la figura 5.3.

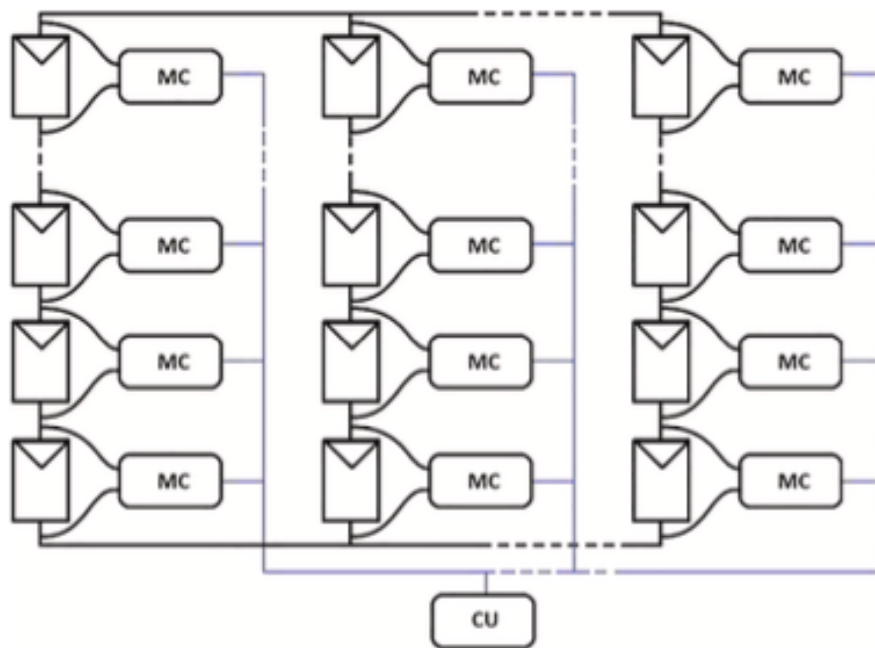


FIGURA 5.3. DISTRIBUCIÓN DE UN SISTEMA DE PANELES FOTOVOLTAICOS [19].

Cada MC se conecta en paralelo a cada módulo FV, tal y como se muestra en más detalle en la figura 5.4. De esta forma el sistema de monitorización no interfiere con el funcionamiento de los módulos FV. Desde la CU se puede medir cada módulo FV solicitándole al MC que realice la monitorización y la transmisión de los datos. Durante el proceso de monitorización el MC toma valores de corriente y voltaje del módulo fotovoltaico alrededor del punto de operación y después de la prueba, los envía a la CU. En la CU los datos se procesan y se visualizan a través de un interfaz gráfico. Una única CU es capaz de medir miles de módulos. La CU consiste en un PC.

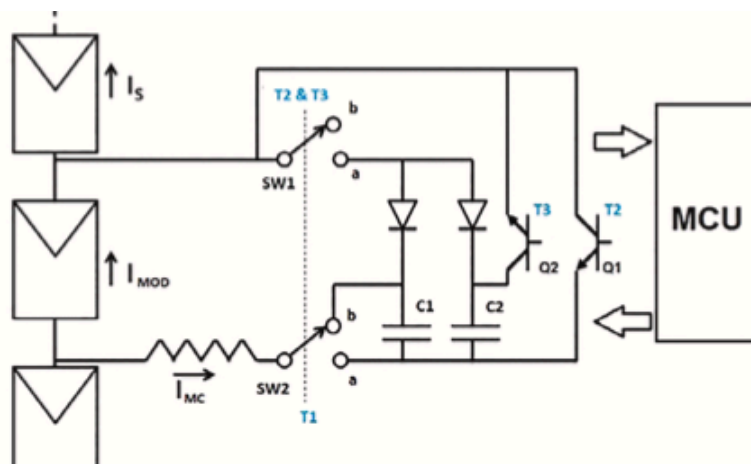


FIGURA 5.4. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE CONEXIÓN DE UN MC A UN MÓDULO FV EN UNA CADENA [18].

Cómo se puede observar en la figura 5.4 el MC está compuesto por 2 condensadores (C1 y C2), 6 interruptores, entre los que se incluyen 2 diodos y 2 transistores, y un microcontrolador (MCU) PIC de 8 bits. El MCU produce y mide pequeñas variaciones alrededor del punto de funcionamiento del

módulo FV modificando la corriente de salida con el circuito que se muestra en la figura 5.4. Primero los condensadores se cargan a la tensión de funcionamiento del módulo fotovoltaico. A continuación, los condensadores aumentan la corriente de salida de los módulos fotovoltaicos alrededor de los 300 mA, moviendo el punto de funcionamiento a cortocircuito. Una vez que el punto de operación vuelve al punto inicial, el otro condensador mueve el punto de funcionamiento de los módulos fotovoltaicos a circuito abierto en 300 m [18]. Todo el proceso de monitorización se completa en el orden de las decenas de ms. Tal y como se acaba de explicar, en la figura 5.5 se puede observar el diagrama de operación del MC.

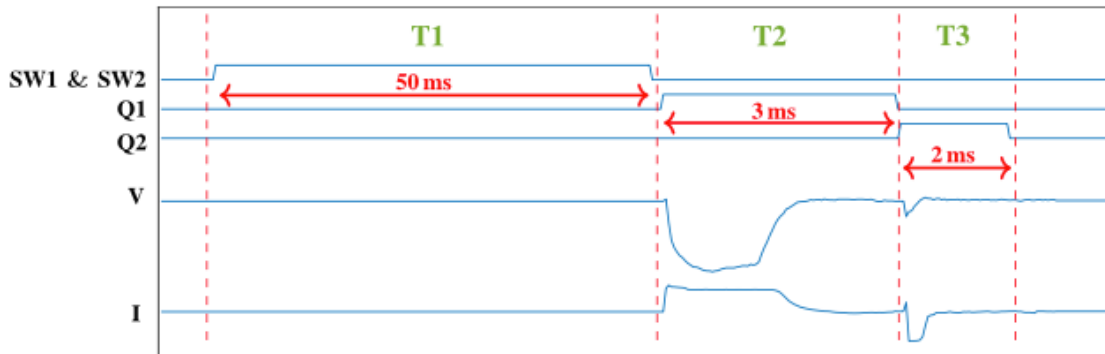


FIGURA 5.5. DIAGRAMA DE OPERACIÓN DEL MC [18].

Como se puede observar en la figura 5.3 los MCs están conectados a la CU mediante cable. Actualmente se está utilizando el estándar del Bus RS-485. Un problema de esta tecnología es que tanto los componentes que se utilizan para poder hacer uso del sistema como la necesidad de añadir cableado implica un sobrecoste en la implantación de un sistema de monitorización de una central FV. Estas pueden llegar a abarcar un área de hasta 57km², como la que se observa en la figura 5.2.

5.4 Requerimientos de comunicaciones

Para poder seleccionar un sistema de comunicaciones apto para la monitorización de paneles solares es necesario especificar ciertos requerimientos como el ancho de banda, el nivel de integración e instalación o el costo.

5.4.1 Ancho de banda

El sistema de comunicaciones debe ser capaz de transmitir 1 Kbyte de datos por cada panel FV en el menor tiempo posible. Se debe tener en cuenta que una planta solar puede disponer de miles de paneles solares. Para la monitorización es necesario muestrear y transmitir la parte de las señales V e I donde se provoca la fluctuación (figura 5.5). Cada señal se compone de unas 150 muestras de 12 bits y se muestrean 4 señales, dos las reflejadas en la figura y dos de referencia. En resumen, el sistema de comunicaciones tiene que transmitir un paquete de datos por cada panel FV del orden de 1 Kbyte.

5.4.2 Integración

El sistema de comunicaciones se debe integrar en la placa con el resto del módulo de monitorización. Sería conveniente reducir su tamaño al máximo para poder integrar todo el sistema de monitorización en la caja situada en la parte trasera de las placas solares, como la que se muestra en la figura 5.6. Además, debe poder integrarse fácilmente con el MCU PIC que dispone el módulo de monitorización. Este requerimiento no es objeto de este TFM pero se tendrá en cuenta para la selección de la tecnología.

5.4.3 Instalación

La instalación se puede realizar tanto en plantas solares ya instaladas como en plantas solares de nueva instalación. Con el sistema de comunicaciones actual, para poder instalar el sistema de monitorización habría que hacer zanjas para poder pasar todo el cableado. Se debe seleccionar un sistema de comunicaciones cuya instalación sea sencilla y no implique incrementar el precio final.

5.4.4 Costo

Un panel solar tiene un costo de entre 100-200€. Se debe realizar un sistema de monitorización cuyo coste no encarezca el precio final del panel solar. Por ello, es necesario que la parte del circuito para las comunicaciones sea lo más barata posible.



FIGURA 5.6. CONEXIONES DE LOS PANELES SOLARES.

5.5 Instalación FV en la UPV/EHU

El Instituto de Tecnología Microelectrónica, responsable del sistema de monitorización que se acaba de mencionar, cuenta con una instalación en el tejado de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Esta instalación está formada por 12 paneles FV conectados en serie como los que se observan en la figura 5.7. Esta instalación proporciona una potencia de hasta 3420W.



FIGURA 5.7. PANELES FV DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO.

Cada uno de los paneles solares incluye un MC, el cual se conecta en paralelo con el panel FV, y dispone de un conector DB-9 con el que se permite realizar la comunicación entre el MC y la CU mediante el estándar del Bus RS-485. En la figura 5.8 se puede observar la instalación de una placa de prueba de un MC. La comunicación entre los MCs y la CU se realiza mediante RS-485, lo que supone un cableado adicional, como el que se observa en lila en la figura 5.3. El área seleccionada en naranja en la figura 5.8 está dedicada para poder realizar la comunicación. Las áreas seleccionadas en rosa en la misma figura están dedicadas para conectar el panel solar con el MC. Realizar una comunicación de este tipo implica dedicar una gran parte de la placa para las comunicaciones.

Como se ha mencionado anteriormente, una comunicación de este tipo requiere de cableado adicional como el que se muestra en la figura 5.9 para comunicar los MCs con la CU. En este TFM se pretende evaluar si una de las posibilidades es este tipo de cableado, una comunicación

inalámbrica o una comunicación a través del propio cable del panel solar para evitar añadir todo este cableado.

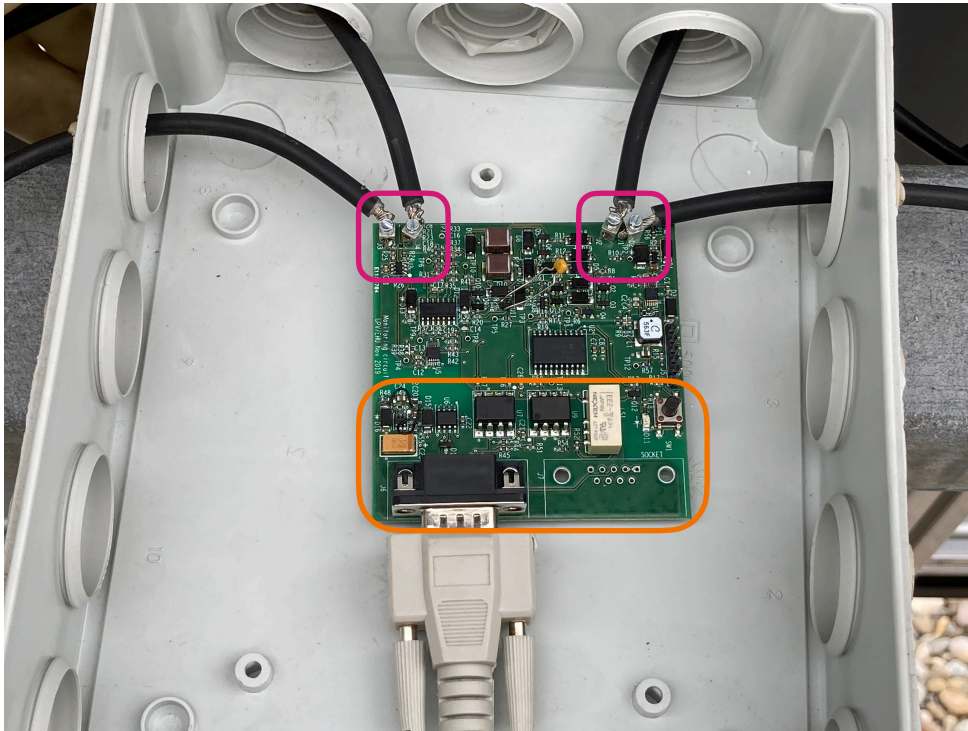


FIGURA 5.8. INSTALACIÓN DE UN MC.



FIGURA 5.9. CABLEADO DE UN MC.

La energía que se obtiene de los paneles solares se transmite mediante un par de cables, los cuales pasan por unos fusibles y llegan al inversor. El inversor por un lado está conectado a la red a través de un diferencial y un PIA y, por otro lado, convierte la electricidad obtenida por los paneles (DC)

en corriente alterna (AC) para alimentar la carga mediante energía solar cuando sea posible, según las condiciones meteorológicas. A modo de carga se encuentran unos focos. En las figuras 5.10 y 5.11 se puede observar el sistema descrito con los diferentes elementos y la carga respectivamente.

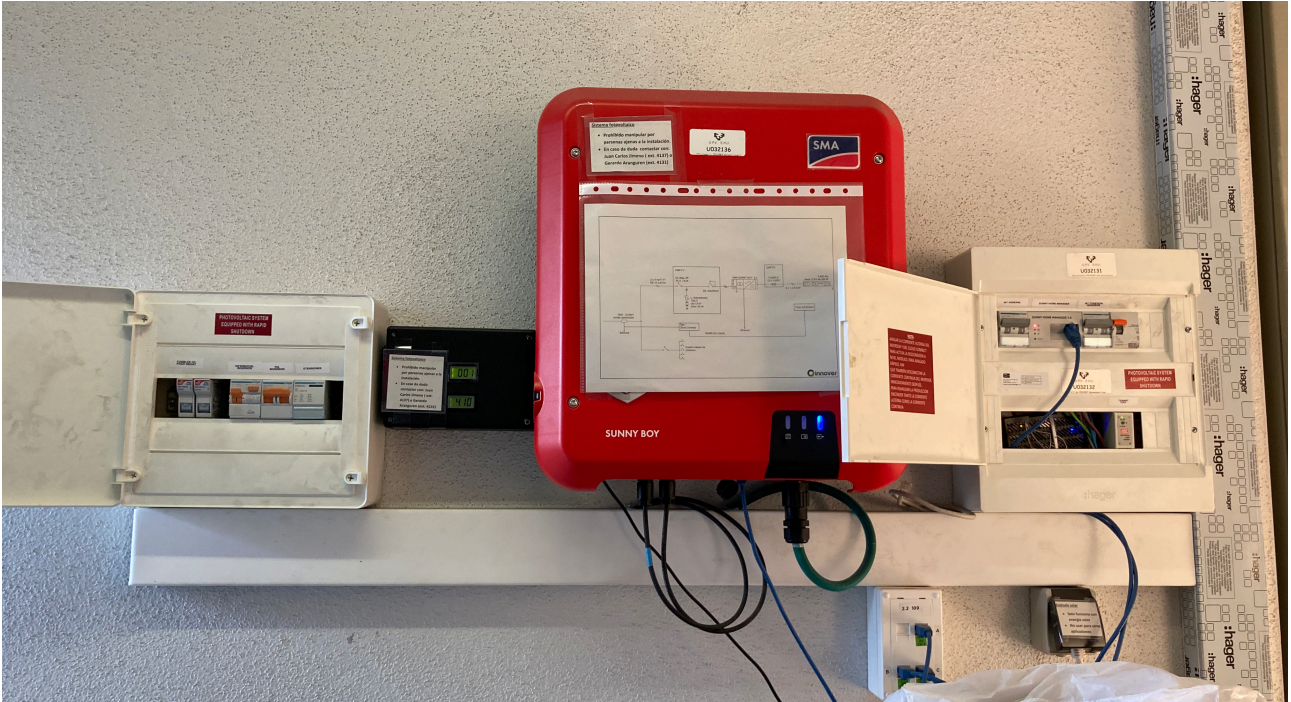


FIGURA 5.10. CONJUNTO DE ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL SISTEMA.



FIGURA 5.11. CARGA.

El otro extremo del cable que utiliza el estándar del Bus RS-485 se convierte, mediante la placa de la figura 5.12, al estándar del Bus USB-B para poder comunicarlo con la CU, un PC en este caso,

para su monitorización. Todo este cableado que va desde las MCs hasta la CU requiere de un costo adicional, especialmente en instalaciones en explotación. Por lo que este sistema no se considera adecuado para la monitorización de grandes instalaciones.

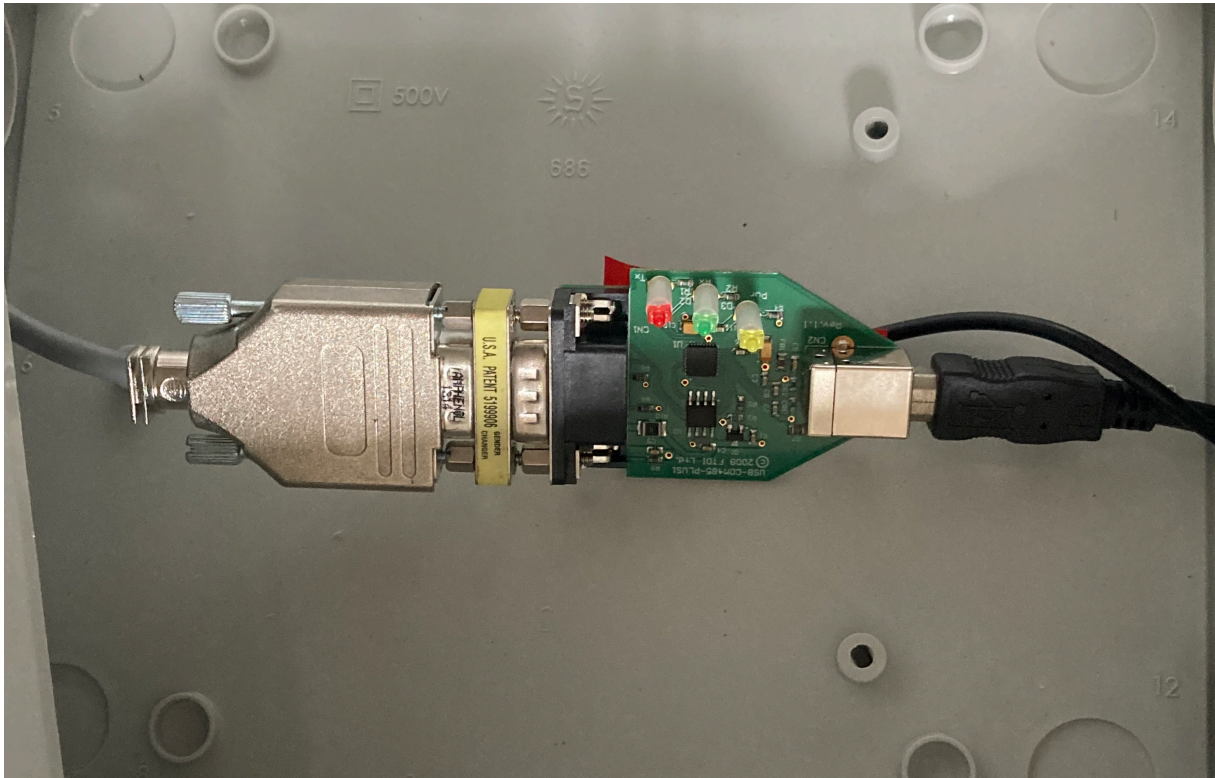


FIGURA 5.12. CONECTOR.

El objetivo del grupo de investigación es integrar la tecnología para la monitorización en los paneles FV.

Capítulo 6. Análisis de alternativas

6.1 Alternativas. Tecnologías para las comunicaciones

Por definición, se usa el término telecomunicación para referirse a cualquier tipo de comunicación a distancia. La palabra datos hace referencia a la información recogida en el formato acordado por las partes que crean y usan estos datos. Por ello se define la comunicación de datos como el intercambio de datos entre dos dispositivos mediante alguna forma o medio de transmisión. Los cinco componentes que componen un sistema de comunicación de datos son el mensaje, el remitente, el receptor, el medio y el protocolo. Los diferentes tipos de datos deben tener opción de comprensión, pueden diseñarse algoritmos que escojan únicamente la información más relevante; cifrado y autenticación, gracias a estas funciones se consigue comprobar que el receptor es el adecuado. Además, se diferencian tres tipos de flujo de datos: simplex, flujo de datos en un solo sentido; full-duplex, flujo de datos en ambos sentidos simultáneamente; y half-simplex, flujo de datos en ambos sentidos, pero no a la vez.

A continuación se muestran diferentes tecnologías que se usan en la actualidad para la transmisión de datos. Se incluirán en dos grupos diferentes: medios de transmisión guiados o alámbricos y los medios de transmisión no guiados o inalámbricos.

6.1.1 Medios de transmisión no guiado o inalámbricos

Las comunicaciones a través de medios de transmisión no guiados son comunicaciones sin cable, es decir, transportan ondas electromagnéticas sin usar un conductor físico.

6.1.1.1 ZigBee

ZigBee es un estándar desarrollado por ZigBee Alliance [20] que define un conjunto de protocolos de comunicación para velocidades de datos bajas en redes inalámbricas de corto alcance. Los dispositivos inalámbricos basados en la tecnología ZigBee operan en las bandas de frecuencias

de 868 MHz (3 canales), 915 MHz (30 canales) y 2,4 GHz (16 canales). La velocidad máxima de transmisión de datos es de 250 kbits por segundo. Las capas del protocolo ZigBee se basan en el modelo de referencia OSI. ZigBee ha adoptado del IEEE 802.15.4 los protocolos de su capa Física (PHY) y Medium Access Control (MAC) [21].

Los dispositivos ZigBee se pueden clasificar en dos categorías principales, dispositivos de función completa (FFD) y dispositivos de función reducida (RFD) [22]. Los FFD pueden realizar el establecimiento, el enrutamiento y la administración de la red, mientras que los RFD solo admiten un subconjunto de las funciones del dispositivo ZigBee, lo que las hace simples y de bajo costo. Una red ZigBee generalmente consta de un Coordinador ZigBee, uno o más enrutadores ZigBee y múltiples dispositivos finales. Un FFD puede cumplir cualquiera de las tres funciones, mientras que los dispositivos finales tienden a ser RFD. El Coordinador de ZigBee es responsable de la configuración y administración de la red. Los enrutadores ZigBee se utilizan para enrutar el tráfico entre el coordinador de red y los dispositivos finales. Los enrutadores y coordinadores pueden comunicarse con todos los dispositivos de la red, generalmente alimentados por fuentes de alimentación principales, ya que no pueden dormirse sin afectar negativamente la capacidad de enrutar el tráfico a través de la red. Los dispositivos finales se comunican con enrutadores, incapaces de comunicarse entre pares. Suelen ser dispositivos que funcionan con baterías y pasan la mayor parte del tiempo en modo de suspensión. Se despiertan periódicamente, comprueban si hay mensajes almacenados en el búfer de su enrutador principal, leen los sensores conectados, transmiten los datos medidos y vuelven al modo de suspensión [23].

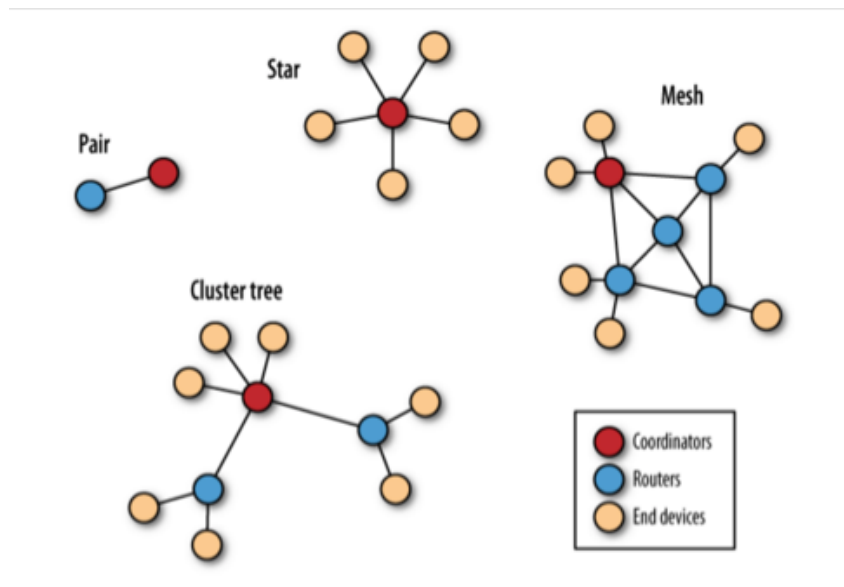
Esta tecnología permite diferentes de formaciones de redes. La topología de la red debe ser una de las topologías especificadas en IEEE 802.15.4 [21]:

- Topología en estrella: cada uno de los dispositivos de la red únicamente puede comunicarse con el coordinador.
- Topología en malla: cada uno de los dispositivos puede comunicarse directamente con cualquiera de los demás dispositivos siempre que estén lo suficientemente cerca de forma que se pueda obtener una unión estable.
 - Topología en árbol: El coordinador ZigBee establece la red inicial. Los enrutadores de ZigBee forman ramas y transmiten los mensajes.

En la figura 6.1 se pueden observar las diferentes tipologías entre los dispositivos con tecnología ZigBee. En una red ZigBee puede haber hasta 254 nodos, sin embargo, se pueden crear 255 conjuntos de nodos, de forma que se pueden alcanzar hasta 64770 nodos.

El rango de transmisión es entre 1 y 100 metros dependiendo en gran medida del entorno de implementación [22].

Los servicios que ofrece el modelo ZigBee se han propuesto en diferentes dominios de nuestra vida cotidiana como hogares, oficinas, calles, edificios y escuelas.



FIGURAS 6.1. TOPOLOGÍAS DE LA RED DE LOS DISPOSITIVOS ZIGBEE [25].

Pros y Contras

Esta tecnología es interesante por su capacidad de poder formar redes. La comunicación se traspa de un equipo a otro. En instalaciones FV donde los paneles pueden abarcar hasta $57km^2$, mediante esta tecnología es suficiente que la comunicación llegue hasta el siguiente equipo. Sin embargo, este tipo de instalaciones disponen de miles de paneles solares, mientras que esta tecnología está limitada a 256 equipos, si se utiliza una topología básica. Se podría llegar a alcanzar 64770 equipos pero en este caso la topología sería muy compleja. Además, al tratarse de un medio de transmisión inalámbrico pueden darse problemas de interferencias. Un transceptor ZigBee tienen un coste de 3-7€ y requiere de una antena.

Y. Rashidi, M. Moallem y S. Vojdani en su trabajo [24] exponen un sistema de monitorización mediante ZigBee para un array de paneles solares.

6.1.1.2 WiFi

WiFi es la tecnología de comunicación inalámbrica más utilizada y es el medio principal para el tráfico global de Internet. Durante dos décadas, el WiFi ha cambiado la forma en que el mundo opera y se comunica. La tecnología WiFi, basada en el estándar de comunicación inalámbrica IEEE 802.11, ha mejorado continuamente, con cada generación brindando velocidades más rápidas, menor latencia y mejores experiencias de usuario en una multitud de entornos y con una variedad de tipos de dispositivos [26].

Wi-Fi es el nombre dado por Wi-Fi Alliance al conjunto de estándares IEEE 802.11. 802.11 definió el estándar inicial para redes inalámbricas de área local (WLAN), pero se consideró demasiado lento para algunas aplicaciones y, por lo tanto, fue reemplazado por las extensiones 802.11a y

802.11b y más tarde por 802.11g [27]. En la tabla 6.1 se detallan las características de esta tecnología.

Esándar del protocolo	Freq (GHz)	Ancho de banda (MHz)	Velocidad de datos máxima (Mb/s)	Rango (m) interior	Rango (m) exterior
A	2.4	20	2	35	120
B	5	20	54	38	140
G	2.4	20	11	38	140
N	2.4	40	73	70	250

TABLA 6.1. CARACTERÍSTICAS WIFI [28].

Hay dos frecuencias de señalización que utilizan actualmente las redes Wi-Fi [27]:

- 2,4 GHz: consta de 14 canales, cada uno con un ancho de banda de aproximadamente 20 a 22 MHz que opera en la banda ISM. Las redes 802.11b/g operan en la banda de 2,4 GHz. Es una frecuencia congestionada puesto que en ella operan muchos dispositivos distintos a los dispositivos 802.11.
- 5 GHz: consta de 13 canales, cada uno con un ancho de banda de aproximadamente 20 MHz que opera en la banda U-NII. Las redes 802.11a operan en la banda de 5 GHz.

La intensidad de la señal recibida es función de la potencia de salida del transmisor, la frecuencia utilizada, la distancia recorrida por la señal y la pérdida de trayectoria que se produce antes de que se reciba la señal. La intensidad de la señal recibida y, por tanto, el rango utilizable, pueden variar de un momento a otro porque las características de propagación son dinámicas e impredecibles. Esto significa que pequeños cambios en el entorno pueden resultar en grandes cambios en la intensidad de la señal Rx [27].

Pros y Contras

Esta tecnología a diferencia de la tecnología ZigBee no tiene la capacidad de formar redes por lo que es necesario que la antena que se utiliza permita un alcance mayor. Además, puesto que se debe suponer que el área que se puede llegar a alcanzar sea de $57km^2$ esta tecnología no es viable, ya que tiene un alcance máximo de 250 m. Para que la señal WiFi llegase a todos los módulos sería necesario la instalación de repetidores a lo largo de la planta. Los módulos WiFi tienen un coste de entre 2-5€ y requieren de antena.

6.1.1.3 WiMax

WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) es una tecnología basada en la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), all-IP y data-centric, ideal para el uso

en la prestación de servicios móviles de 4G. Actualmente, operadores de todo el mundo utilizan la tecnología WiMax para este propósito. Hoy en día, se puede encontrar esta tecnología integrada en muchos dispositivos, incluidos los adaptadores USB, dispositivos WiFi, ordenadores portátiles y teléfonos celulares [29]. En la figura 6.2 se muestra un ejemplo de varios dispositivos conectados mediante WiMax a la misma red.

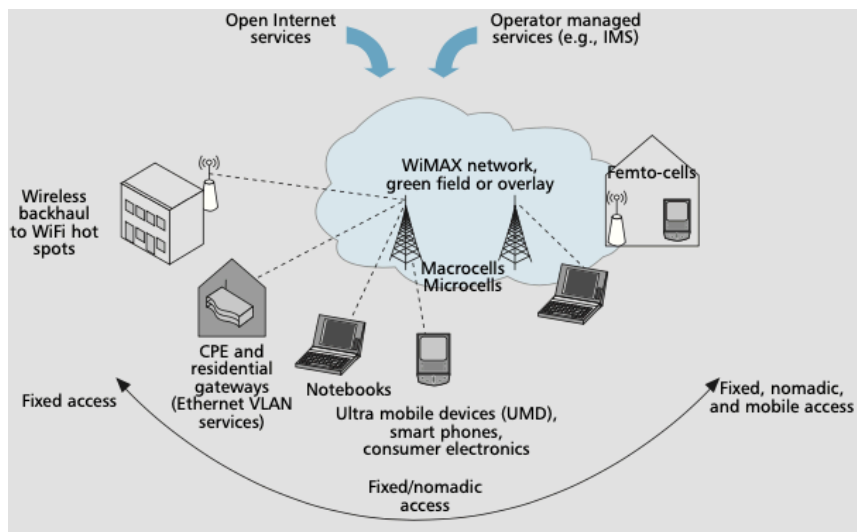


FIGURA 6.2. VARIOS DISPOSITIVOS CONECTADOS MEDIANTE WIMAX A LA MISMA RED [30].

WiMax se basa en la en el estándar IEEE 802.16 y cumple con todos los requisitos de una banda ancha personal. Además de proporcionar acceso a Internet en cualquier lugar, las 24 horas, los 7 días de la semana, WiMax admite altas velocidades en la transmisión de datos, alto rendimiento del sector, múltiples mecanismos de transferencia, mecanismos de ahorro de energía para dispositivos móviles, calidad de servicio avanzada y baja latencia para un mejor soporte de aplicaciones en tiempo real, autorización avanzada, funcionalidad de autenticación y contabilidad [29].

Después del éxito del WiFi, muchos proveedores y operadores unieron fuerzas en el Foro WiMax y en el estándar IEEE 802.16 para desarrollar una nueva solución de extremo a extremo para abordar las nuevas demandas y oportunidades. La industria llegó rápidamente a la conclusión de que dicha solución debería basarse en los siguientes conceptos y objetivos técnicos clave [30]:

- Acceso múltiple basado en OFDM con ancho de banda escalable en la conexión de bajada y en la conexión de subida.
- Tecnologías de antenas avanzadas que permiten la formación de haces y la diversidad a través de la codificación espacio-temporal y la multiplexación espacial .
- Diseño de capa PHY adaptativa que utiliza una adaptación de enlace rápida combinada con una programación rápida de tiempo y frecuencia.
- Arquitectura de red plana all-IP que admite diferentes modelos de implementación y permite tanto los servicios tradicionales de Internet gestionados por el operador como los nuevos servicios abiertos de Internet.

- Interfaces estándar abiertas que permiten la interoperabilidad inalámbrica y de red en implementaciones de múltiples proveedores.

IEEE 802.16 divide su capa de control de acceso a medios en subcapas que admiten diferentes tecnologías de transporte, que incluyen IPv4, IPv6, Ethernet y el modo de transferencia asíncrona. Esto permite a los proveedores utilizar WiMax sin importar la tecnología de transporte que admitan. WiMax tiene un rango de transmisión largo, hasta 31 millas, porque las regulaciones permiten que los sistemas WiMax transmitan a altas tasas de potencia.

A diferencia de otros estándares inalámbricos, los cuales tratan las transmisiones en un rango de frecuencia único, WiMax permite el transporte de datos en múltiples amplios rangos de frecuencia. Poder trabajar en múltiples rangos maximiza la capacidad de la tecnología para transmitir sobre las frecuencias que evitarán la interferencia con otras aplicaciones inalámbricas.

La tecnología logra altas velocidades de datos en parte a través de la OFDM. OFDM aumenta el ancho de banda y la capacidad de datos al dividir los canales amplios en múltiples canales de banda estrecha, cada uno con una frecuencia diferente, que luego pueden transportar diferentes partes de un mensaje simultáneamente.

El estándar 802.16 inicial opera en el rango de 10 a 66 GHz. En estas frecuencias más altas, IEEE 802.16 requiere una línea de visión directa entre remitentes y receptores. Esto reduce la distorsión por trayectos múltiples, que ocurre cuando las señales de transmisión que no siguen una línea de visión rebotan en objetos grandes y terminan desincronizadas, codificando así la transmisión recibida y disminuyendo el ancho de banda. Reducir la distorsión por trayectos múltiples, por lo tanto, aumenta el ancho de banda. En teoría, IEEE 802.16 puede proporcionar velocidades de datos de un solo canal de hasta 75 Mbits por segundo tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente. Los proveedores pueden utilizar varios canales IEEE 802.16 para una única transmisión para proporcionar anchos de banda de hasta 350 Mbps [31].

Pros y Contras

Esta tecnología corrige el problema del alcance que presenta la tecnología WiFi. Sin embargo, esta tecnología requiere de una antena específica cerca de la CU, lo que implica un coste de instalación. De igual manera, al tratarse de un sistema inalámbrico a ciertas frecuencias la comunicación se ve afectada por interferencias electromagnéticas.

6.1.1.4 LiFi

Light-fidelity o fidelidad a la luz (LiFi) es una continuación de la tendencia a moverse a frecuencias más altas en el espectro electromagnético. Específicamente, LiFi podría clasificarse como la comunicación por ondas en el rango de los nm. LiFi utiliza diodos emisores de luz (LED) para comunicaciones inalámbricas de alta velocidad, y se han obtenido velocidades de más de

3Gb/s de un solo micro diodo emisor de luz utilizando la modulación de multiplexación por división de frecuencia ortogonal de corriente continua optimizada (DCO-OFDM) [32].

La velocidad de esta tecnología es su fortaleza más importante. Además, se caracteriza por su seguridad, bajo costo y la falta de interferencia electromagnética [33].

Sin embargo LiFi no funciona en condiciones de luz solar. La luz solar constituye una señal de interferencia constante fuera del ancho de banda utilizado para la modulación de datos. Generalmente LiFi opera a frecuencias superiores a 1 MHz. Por lo tanto, la luz solar se filtra y no tiene ningún impacto en el rendimiento de la tasa de error de bits siempre que el receptor no esté saturado [34].

LiFi es una tecnología disruptiva que está preparada para impactar en una gran cantidad de industrias. LiFi puede descubrir el IoT, impulsar aplicaciones de la Industria 4.0, habilitar la luz como servicio en la industria de la iluminación, contribuir a la quinta generación de sistemas celulares (5G) y, más allá, habilitar nuevos sistemas de transporte inteligentes, mejorar la seguridad vial a medida que cada vez haya más automóviles sin conductor, crear nuevas redes inalámbricas ciberseguras, permitir nuevas formas de monitorización de la salud de la sociedad más envejecida y ofrecer nuevas soluciones para cerrar la brecha digital. LiFi tendrá un efecto impulsor para la fusión de dos industrias principales: la industria de las comunicaciones inalámbricas y la industria de la iluminación [34]. En la figura 6.3 se puede observar la integración de la tecnología LiFi con otras tecnologías actuales como LTE y WiFi.

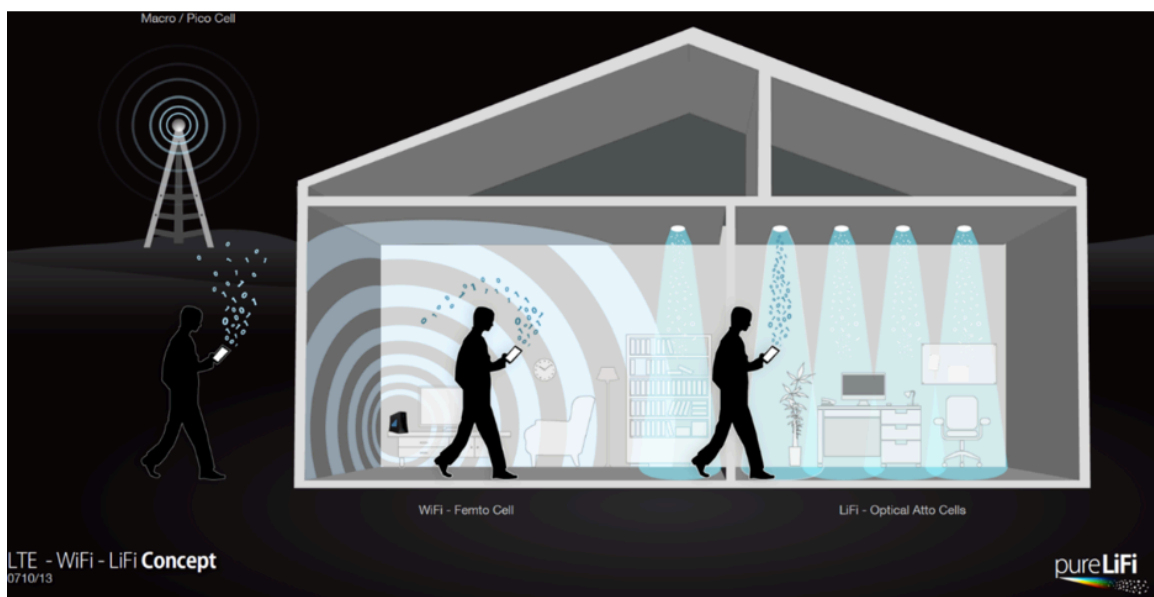


FIGURA 6.3. SISTEMA LIFI COMPLEMENTANDO A LOS SISTEMAS WIFI Y LTE [34].

Pros y Contras

Como se puede observar en la figura 6.3 esta tecnología está pensada para comunicarse a través de iluminación LED. Además, tal y como se ha especificado la tecnología LiFi no funciona en condiciones de luz solar, ya que esta supone una señal de interferencia. Para la recepción de

datos los paneles solares tiene que disponer de un fotodetector, el cual debe colocarse en la superficie en la que le infiera la luz directamente. Esto provoca que todo el sistema de comunicaciones no se pueda integrar en la parte trasera del panel solar.

Dado que se quiere hacer uso de la tecnología en grandes instalaciones FV, se deberían colocar varios emisores/receptores de señal a lo largo de toda la instalación que requieren del uso de la tecnología Ethernet para el transporte de la señal. Añadir esta tecnología implica un coste extra por el cableado necesario. Al tratarse de una nueva tecnología los sistemas LiFi tienen unos costos elevados (+1.000€).

6.1.1.5 GSM (comunicación móvil)

Global System for Mobile communications (GSM) o Sistema Global para comunicaciones Móviles, originalmente de Group Special Mobile es el estándar más popular en el mundo para teléfonos móviles. Su promotor, la Asociación GSM, estima que el 82% del mercado móvil mundial utiliza el estándar. GSM es utilizado por más de 3000 millones de personas en más de 212 países y territorios. Su ubicuidad hace que el roaming internacional sea muy común entre los operadores de telefonía móvil, lo que permite a los suscriptores utilizar sus teléfonos en muchas partes del mundo. GSM se diferencia de sus predecesores en que tanto los canales de señalización como los de voz son digitales y, por lo tanto, se considera un sistema de telefonía móvil de segunda generación (2G) [35].

El sistema GSM utiliza dos bandas de 25MHz: 890-915MHz y 935-960MHz para las bandas de transmisión y recepción del sistema móvil. Utiliza FDD para la transmisión y acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) para la recepción. La banda de recepción se divide en 128 canales cada uno con un ancho de banda de 200 KHz. Cada canal se comparte entre hasta ocho usuarios.

El sistema GSM se compone principalmente de tres partes: el subsistema de red y conmutación (NNS), el subsistema de estación básica (BSS) y el subsistema de soporte operativo (OSS). El Centro de conmutación de servicios móviles (MSC) es el corazón de la NNS. Puede terminar la función de cambio básica. La conjunción de otra red se puede conectar con la conjunción MSC. BBS está compuesto por un controlador de sistema básico, un sistema transceptor básico y un sistema móvil. OOS puede administrar y monitorear todo el sistema GSM. Está compuesto por un centro de mantenimiento operativo y un software de sistema.

La tecnología GSM actual es capaz de proporcionar un servicio de datos con un rendimiento de hasta 9,6 kbps [36].

Pros y Contras

Para poder utilizar este sistema de comunicaciones cada módulo FV debería de disponer de una tarjeta SIM, lo que supondría que habría que identificar cada módulo por su número de teléfono. Puesto que en la instalación FV se disponen de miles de paneles solares esta tecnología

resulta cara. Sin embargo esta tecnología sería viable si se quiere realizar el control de la instalación desde una lugar distante. Se podría instalar este sistema de comunicaciones en la CU para activar y obtener los datos de la monitorización. El uso de esta tecnología requiere de la instalación de una antena para la emisión/recepción de datos.

6.1.2 Medios de transmisión guiados o alámbricos

Los medios guiados son aquellos que proporcionan un conductor de un dispositivo a otro. En este grupo se van a incluir las tecnologías que hagan uso de los cables de pares trenzados, cables coaxiales o cables de fibra óptica.

Dentro de una String de paneles solares, la tensión que se obtiene en los dos cableados del MC no es la misma. Además, la tensión es diferente para cada uno de los MCs. En la figura 6.4 se puede observar una String de paneles solares, los cuales se han numerado. A la entrada del primer panel solar se tiene 0V y a la salida 40V, a la entrada del segundo panel solar se tienen 40V y a la salida 80V y así sucesivamente. Por lo que el cable que comunica con los MCs tiene una tensión y tierra diferente en cada MC. Es por ello que en este tipo de circuitos se requiere del uso de optoacopladores.

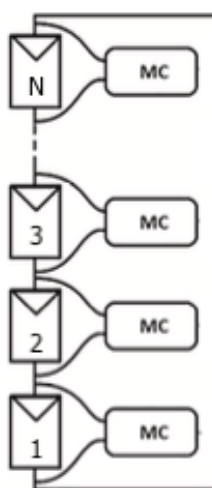


FIGURA 6.4. STRING DE PANELES SOLARES.

6.1.2.1 RS-485

RS485 es un estándar basado en RS422, RS232 establecido por EIA [37]. El estándar de Bus RS-485 es uno de los diseños de Bus de capa física más utilizados en aplicaciones I&I. Las características clave del estándar RS-485 que lo hacen ideal para su uso en aplicaciones de comunicaciones I&I son las siguientes [38]:

- Enlaces a largas distancias: hasta 1200 metros.
- Posibilidad de comunicación bidireccional a través de un solo par de cables trenzados.

- La transmisión diferencial aumenta la inmunidad al ruido y reduce las emisiones de ruido.
- Se pueden conectar varios controladores y receptores en el mismo Bus.
- El amplio rango en modo común permite diferencias en el potencial de tierra entre el controlador y el receptor.
- TIA/EIA-485-A permiten velocidades de datos de hasta 10Mbps. Los dispositivos que cumplen con las especificaciones TIA/EIA-485-A no tienen que operar en todo el rango y no están limitados a 10Mbps.

TIA/EIA-485-A es el estándar de comunicación más utilizado en la industria de las telecomunicaciones, describe la capa física del interfaz RS-485 y normalmente se usa con un protocolo de un nivel superior, como Profibus, Interbus, Modbus o BACnet. Esto permite una transmisión de datos robusta a distancias relativamente largas. La razón principal por la que RS-485 puede comunicarse a largas distancias es por el uso de líneas diferenciales o balanceadas. El voltaje de una línea es igual al inverso del voltaje de la otra línea [38].

RS-485 es un estándar multipunto. En la figura 6.5 se muestra el circuito típico de aplicación de RS-485.

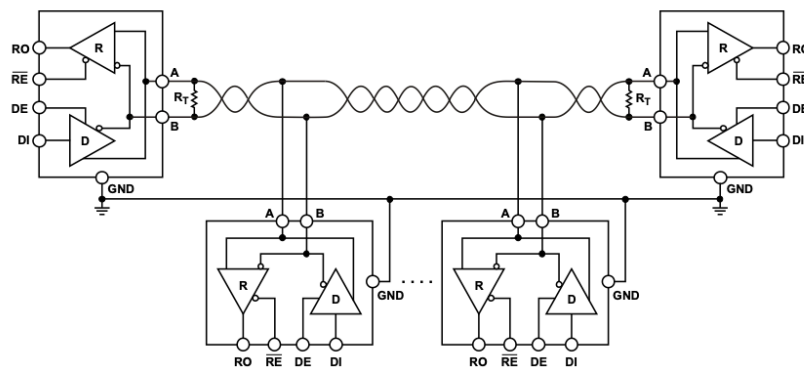


FIGURA 6.5. CONFIGURACIÓN SEMI-DUPLEX DEL ESTÁNDAR DE BUS RS-485 [38].

Pros y Contras

Debido a que mediante el estándar RS-485 únicamente se permite la comunicación con un máximo de 256 transceptores, y que además, únicamente se permite una longitud máxima de 1200 metros, esta tecnología es válida para un sistema como el que está instalado en la Escuela de Ingeniería de la EHU/UPV, en la cual se disponen de pocos paneles solares y los MCs y la CU están próximos. El uso de esta tecnología requiere de cableado, el cual tiene un precio de aproximadamente 0,5€/metro, y los componentes necesarios para realizar la comunicación tienen de un coste de 8-10€.

6.1.2.2 Power Over Ethernet

La tecnología Power over Ethernet (PoE) permite que las IPs de los teléfonos, los puntos de acceso LAN inalámbricos, cámaras de seguridad con conexión a la red y otros terminales que permite que reciban energía, a la vez que datos, a través de la infraestructura Ethernet CAT-5 existente sin la necesidad de realizar modificaciones en el mismo. La tecnología PoE integra los datos y la energía en los mismos cables, manteniendo segura la estructura del cableado y sin interferir con la operación concurrente de la red. Un sistema PoE se implementa en topología de estrella [39].

El primer estándar de comunicación que se estableció para la transmisión a través de una infraestructura PoE fue el IEEE 802.3af [39]. IEEE 802.3af requiere un alto grado de aislamiento eléctrico entre cualquier elemento conectado al cable Ethernet y cualquier circuito que envíe y reciba transmisiones a través de este cable [40].

Esta tecnología se caracteriza por [39]:

- Ahorro de costes: Ahorra tiempo y dinero al evitar la necesidad de instalar por separado las infraestructuras de datos y energía.
- Simplicidad: La energía y la infraestructura de Ethernet están completamente integradas, por lo que el acceso a lugares difíciles para el despliegue de energía se vuelve más simple.
- Movilidad: Los dispositivos con alimentación se pueden mover fácilmente sin necesidad de enchufes de AC. Donde quiera que haya una conexión Ethernet, se puede implementar fácilmente un dispositivo con alimentación. Además, PoE acelera el despliegue de puntos de acceso inalámbrico y cámaras de red, dado que ahora se puede ofrecer la energía a través del cable Ethernet.
- Fiabilidad.
- Seguridad: No utiliza la red eléctrica, solo niveles de corriente continua de 48V seguros.
- Control: Las capacidades de administración de SNMP proporcionan control y monitoreo del dispositivo PoE y los dispositivos alimentados.
- Seguridad: Apagar los dispositivos con alimentación cuando nadie los utiliza garantiza una mejor seguridad.
- Aplicaciones mejoradas: Equipar una aplicación con tecnología PoE solo requiere una adición de bajo costo por puerto, lo que permite interactuar con una creciente variedad de dispositivos.

Hay dos formas de transmitir la energía a través del cable de Ethernet. La primera utiliza dos pares separados de conductores. La segunda transmite la energía a través de los cables que se utilizan para transmitir la señal [40]. En la figura 6.6 se muestra un circuito con la diferencia entre ambos métodos.

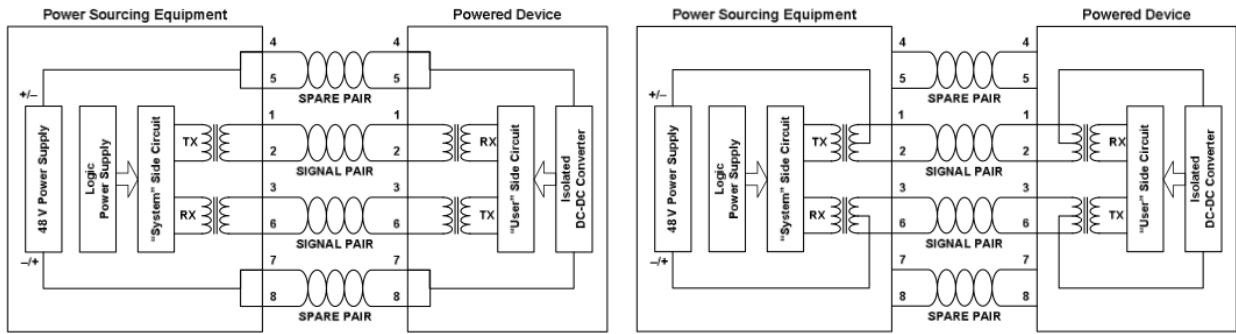


FIGURA 6.6. (A) DOS PARES SEPARADOS DE CONDUCTORES (B) CABLES QUE SE UTILIZAN PARA TRANSMITIR LA SEÑAL [40]

Hay dos formas en las que se puede introducir la energía en el cable de Ethernet. Una es que la fuente de alimentación esté incluida en el propio equipamiento de comunicación, denominado equipamiento de alimentación. Este método se puede observar en la figura 6.6. Y la otra forma utiliza una fuente de alimentación externa que se conecta entre el origen de la conexión de Ethernet y el dispositivo a conectar y alimentar [40].

Pros y Contras

Esta tecnología sería interesante si los paneles solares dispusiesen de cableado del tipo CAT-5. Sin embargo disponen de cables de transporte de energía por lo que utilizar esta comunicación requiere de cableado, el cual tiene un precio de 1-2 €/metro.

6.1.2.3 Ethernet industrial

Ethernet es la tecnología para redes informáticas más utilizada para LAN y su estándar es el IEEE 802.3. A medida que Ethernet continúa abriéndose camino hacia otras aplicaciones, se está convirtiendo en la red preferida para aplicaciones de control industrial de alto nivel. Ethernet industrial es el resultado de aplicar los estándares de comunicación de Ethernet tradicionales para la comunicación de datos a aplicaciones industriales [41].

La tecnología Ethernet industrial permite realizar comunicaciones fiables en tiempo real para entornos industriales. Una de sus características principales es el uso de Ethernet para la infraestructura de comunicación. Esto proporciona una solución muy rentable, ya que no es necesario diseñar una infraestructura de comunicación ad hoc [42]. La tecnología de Ethernet industrial comúnmente usa pares trenzados, donde los conductores que forman parte del mismo circuito están trenzados juntos. Este proceso permite cancelar las EMIs e interferencias de otras fuentes. Además, una cubierta de cable ayuda a proteger y mantener unidos los pares trenzados [41]. Ethernet industrial dispone de diferentes protocolos como: EtherCAT, EtherNET/IP, PROFINET, POWERLINK, SERCOS III, CC-Link IE o Modbus TCP, por lo que parte de sus características dependen del protocolo utilizado.

A continuación se muestran algunas características básicas de Ethernet y de las redes basadas en Ethernet [43]:

- En el modelo OSI (OSI-ISO/IEC 7498-1) Ethernet cubre la capa 1 (PHY) y parte de la capa 2 (la capa de enlace de datos). Además, está definida por IEC 802.3.
- El término "Ethernet industrial" se utiliza a menudo para describir la combinación de protocolos de comunicación basados en Ethernet dirigidos a sistemas de automatización industrial (PROFINET, EtherCAT, IEC 61850, etc.) y una amplia variedad de tecnologías fundamentales (por ejemplo, conmutación, enrutamiento, y protocolos de red).
- Se han desarrollado varias tecnologías que utilizan una capa de enlace de datos Ethernet mejorada para las aplicaciones en tiempo real más exigentes. Estas soluciones (por ejemplo, EtherCAT) admiten ciclos de comunicación muy cortos y requisitos de comunicación deterministas. Estas tecnologías suelen necesitar algún soporte de hardware adicional. El protocolo EtherCAT se estudia en el apartado 6.1.1.4.
- Las redes Ethernet modernas funcionan a velocidades de 100 Mbps y superiores. Gigabit Ethernet está entrando ahora en el dominio industrial. El desarrollo de la tecnología Ethernet ahora va más allá de los 100 Gbps.
- Las redes Ethernet modernas utilizan una comunicación dúplex sin colisiones. Sin embargo, puede haber colas en los conmutadores, enrutadores y nodos finales, lo que provoca retrasos impredecibles en la comunicación.

Las ventajas de esta tecnología son: la facilidad de instalación y configuración, y la facilidad de administración, consulta o programación de los dispositivos. Además, el hecho de tener acceso a la red industrial mediante un navegador web facilita el trabajo de los operadores y el uso de la infraestructura Ethernet facilita también los tediosos diagnósticos del medio físico y el cambio de conectores, cableado... que suelen ser el 80% de las veces la causa de errores en los buses de campo [44].

Pros y Contras

Nuevamente, al igual que con 6.1.2.2, puesto que los paneles solares no disponen de conexión a Ethernet se debe incluir el cableado correspondiente.

6.1.2.4 EtherCAT

EtherCAT es un protocolo que ofrece un gran rendimiento en tiempo real, aumentado por hardware. Teóricamente, tanto el maestro EtherCAT como los esclavos pueden implementarse utilizando interfaces de red estándar. Sin embargo, en la práctica, un esclavo EtherCAT se implementa con un hardware especial para facilitar los retrasos de envío de paquetes muy cortos en

los dispositivos esclavos. El maestro EtherCAT, normalmente se implementa únicamente con componentes estándar.

Una red EtherCAT típica consta de un maestro y varios esclavos. Actualmente, la velocidad de la red está limitada a 100 Mbps ya que no existe un hardware esclavo especial para velocidades de red del tipo Gigabit Ethernet. Sin embargo, una red EtherCAT se puede implementar en una red Gigabit Ethernet conmutada usando un hardware estándar tanto en el maestro como en el esclavo, pero el rendimiento se verá limitado por los retrasos en los reenvíos de los conmutadores estándar, la fluctuación de la red y la topología en uso.

Todos los telegramas EtherCAT son generados y enviados por el maestro utilizando la transmisión full-duplex. Los telegramas se reflejan al final de cada segmento de red y se envían de regreso al maestro. El principio de funcionamiento básico es que en una red EtherCAT todos los nodos pueden leer y escribir datos en el telegrama EtherCAT a medida que pasa, únicamente con un breve retraso constante en cada dispositivo esclavo, independientemente del tamaño del paquete. El retardo es inferior a 500 ns. Por lo general, se pueden alojar una gran cantidad de esclavos usando un único telegrama, optimizando así el uso del ancho de banda y disminuyendo las tasas de interrupción. El uso eficiente del ancho de banda es posible por el direccionamiento lógico.

Además, EtherCAT puede transportar cualquier tipo de movimiento del Ethernet estándar. Si la trama de Ethernet es demasiado grande para ser transportada en el tiempo disponible o si no cabe en el espacio disponible de una trama EtherCAT, se fragmenta y luego se vuelve a ensamblar en el extremo receptor. Las tramas EtherCAT son tramas estándar Ethernet IEEE 802.3 o encapsuladas en telegramas UDP/IP, lo que permite el enrolamiento.

El protocolo EtherCAT ofrece un rendimiento de sincronización muy por debajo de los cientos de nanosegundos gracias a la funcionalidad de temporización especial que se encuentra en la parte de aumento de hardware de los esclavos, lo cual es una característica muy atractiva para los sistemas de control de alto rendimiento y los sistemas de instrumentación.

Los dispositivos esclavos pueden tener desde uno hasta cuatro puertos, y, en principio, se admite cualquier topología, aunque la topología en línea es la más común. También se admiten otras características como la redundancia, la seguridad, etc. [45]

Pros y Contras

La principal desventaja de esta tecnología es la limitación de poder transmitir datos a 32 Bytes por cada paquete de datos. De modo que esta tecnología esta orientada a paquetes pequeños de control y no nos permite transmitir datos de monitorización. Para poder utilizar esta tecnología se deberían enviar múltiples paquetes. Nuevamente, esta tecnología requiere de cableado adicional.

6.1.2.5 Bus CAN

El bus CAN (Controller Area Network) está definido por el estándar ISO 11898. Es un bus digital de transmisión diseñado para operar a velocidades de 20 kb/s a 1 Mb/s. El bus CAN consta de un único canal digital compartido para sistemas de control distribuidos en tiempo real. La especificación del estándar define las capas PHY y las capas de enlace de datos, el enrutamiento de mensajes y el arbitraje de bus. El protocolo, originalmente desarrollado por Bosch, se ha convertido en un estándar para el control automotriz. El CAN es una solución atractiva para los sistemas de control integrados debido a su bajo costo, el manejo de protocolos ligeros y la resolución determinista de la contención.

Su principal limitación está en el máximo ancho de banda disponible, que es una consecuencia de la adopción de un bus digital multimaestro. El protocolo CAN funciona utilizando un esquema de detección y resolución de colisiones. El mensaje a transmitir entre todos los mensaje concurrentes en los nodos se elige de acuerdo a su identificador. Se transmite el mensaje identificador más bajo/alto. Esto permite codificar la prioridad del mensaje en el campo identificador e implementar la programación en tiempo real basada en prioridades de mensajes periódico y aperiódicos. Los primeros resultados sobre la programación del bus CAN se han descrito de acuerdo a un análisis de planificación de flujos de mensajes en tiempo real con una prioridad fija.

Los protocolos de programación de prioridad estática tienen muchas ventajas, en este caso la más importante es una implementación extremadamente simple y una buena eficiencia en la explotación del ancho de banda del canal disponible. CAN permite una serie de niveles de prioridad que son más que necesarios para codificar las prioridades de los mensajes [46].

Las características del bus can pueden resumirse en [47]:

- La capa PHY utiliza transmisión diferencial en un cable de par trenzado.
- Se utiliza un arbitraje no destructivo en bits para controlar el acceso al bus.
- Los mensajes son pequeños (como máximo 8 bytes de datos) y están protegidos por una suma de verificación.
- No hay una dirección explícita en los mensajes, en su lugar, cada mensaje lleva un valor numérico que controla su prioridad en el bus y también puede servir como una identificación del contenido del mensaje.
- Un elaborado esquema de manejo de errores tiene como resultado mensajes retransmitidos cuando no se reciben correctamente.
- Existen medios efectivos para aislar defectos y eliminar nodos defectuosos del bus.

Pros y Contras

El principal inconveniente de esta tecnología es el medio de transmisión de datos, ya que la longitud de la red es inversamente proporcional a la velocidad de transmisión. Al tratarse de grandes instalaciones FV la velocidad que se obtendría sería muy pequeña y no sería válida. La distancia máxima que se puede alcanzar es de aproximadamente 1000 metros y se requieren repetidores para poder aumentar esta distancia, lo que dificulta la instalación.

6.1.2.6 TTP

El protocolo de activación por tiempo o Time Triggered Protocol (TTP) está diseñada para una arquitectura que se active por tiempo. En una arquitectura de este tipo, el intercambio rápido de mensajes periódicos supone la mayor parte del contenido. El uso de TTP está diseñado para aplicaciones de control distribuido en tiempo real que requieren de una gran confianza y que garanticen puntualidad [48]. Hay dos versiones del protocolo TTP: TTP/C para sistemas en tiempo real resistentes a errores y TTP/A para aplicaciones de bajo costo [49].

Los objetivos de este protocolo se pueden resumir en [49]:

- Transporte del mensaje con baja latencia y mínima fluctuación.
- Capacidad de composición.¹
- Disposición de un servicio de membresía tolerante a errores.
- Sincronización de reloj tolerante a errores.
- Gestión de distribución redundante.
- Gastos generales mínimos, tanto en la longitud del mensaje como en la cantidad de mensajes.
- Escalabilidad a altas velocidades de datos y funcionamiento eficiente en cables trenzados y fibras ópticas.

En la figura 6.7 se puede observar la estructura de un sistema TTP. Un grupo de unidades tolerantes a errores, cada una de las cuales consta de uno, dos o más nodos, está interconectado por una red de comunicación.

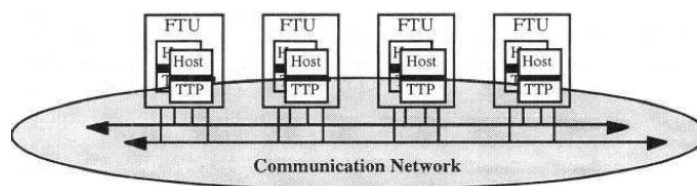


FIGURA 6.7. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA TTP [49].

¹ La capacidad de composición es un principio de diseño del sistema que se ocupa de las interrelaciones de los componentes.

En TTP, un nodo es la unidad reemplazable más pequeña que se puede reemplazar o reconfigurar en caso de falla. Un nodo consta de dos subsistemas, el host y el controlador de comunicaciones. La interfaz de red de comunicación (CNI) es la interfaz interna del nodo entre el controlador de comunicación y el host. El CNI está formado por una DPRAM, de modo que el controlador de comunicación y la computadora host pueden leer / escribir mensajes de estado en el CNI. La integridad de los datos transmitidos entre el host y el controlador de comunicación está garantizada por un protocolo de sincronización especial sin bloqueo, el protocolo Non-Blocking Write. El controlador de comunicación dentro de un nodo tiene una memoria local para contener la lista de descriptores de mensajes que determina en qué momento un nodo puede enviar un mensaje y cuándo puede esperar recibir un mensaje de otro nodo. Además, un controlador TTP contiene dispositivos de hardware independientes, los Bus Guardians, que monitorean el patrón de acceso temporal del controlador a los buses replicados y finalizan la operación del controlador en caso de que se detecte una violación de tiempo en el patrón de acceso regular [49].

Pros y Contras

Esta tecnología al igual que todos los medios de transmisión guiados que se han introducido requiere de cableado adicional.

6.1.2.7 PLC

Power Line Communication (PLC) es una tecnología de comunicación que permite enviar datos a través de cables de alimentación existentes. La comunicación PLC puede clasificarse como: PLC de banda estrecha o PLC de banda ancha. El PLC de banda estrecha funciona a frecuencias más bajas (3-500 kHz), velocidades de datos más bajas (hasta 100 kbps) y tiene un alcance más largo (hasta varios kilómetros) que se puede ampliar utilizando repetidores. El PLC de banda ancha funciona a frecuencias más altas (1.8-250 MHz), altas velocidades de datos (hasta 100 s de Mbps) y se usa en aplicaciones de rango más corto. Una de las aplicaciones en la que se ha utilizado el PLC de banda estrecha es la generación de energía inteligente, particularmente en microinversores para paneles solares.

Hay otra forma de forma de clasificar la comunicación PLC: PLC a través de líneas AC y PLC a través de líneas DC. Pero la mayoría de las empresas están orientadas a proporcionar soluciones PLC a través de líneas AC.

La tecnología PLC es cómo cualquier otra tecnología en la que un remitente modula los datos a enviar, los inserta en el medio y el receptor demodula estos datos para su lectura. La principal ventaja de la tecnología PLC es que no necesita cableado adicional, reutiliza el cableado existente. Teniendo en cuenta la existencia de las líneas eléctricas, cualquier dispositivo alimentado a través de una red eléctrica se puede controlar o monitorear [50].

En la tabla 6.2 se puede observar las características de los distintos sistemas PLC y sus aplicaciones más comunes.

Categoría	Rango de frecuencias	Aplicaciones
Frecuencias bajas	24-500 KHz	Control y protección de líneas de transmisión en sistemas de alta tensión
Frecuencias intermedias	500-1000 KHz	Control del hogar
Frecuencias altas	Por encima de 1 MHz	Comunicaciones por radio
Línea eléctrica de banda ancha	Hasta 100 MHz	AMR, AMI e Internet a través de líneas eléctricas
Frecuencias ultra altas	2 GHz y más	Automatización del hogar

TABLA 6.2. CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE LOS PLCS [28].

Pros y Contras

Puesto que el PLC utiliza el cable de la conexión a la red eléctrica para la transmisión de datos, no es necesario el uso de optoacopladores. Esta tecnología es fácil de implementar en el circuito actual para la monitorización de paneles solares, puesto que únicamente se deben incluir los conectores y la tecnología correspondiente para la modulación/demodulación. El precio de los componentes que se deben incluir es de 1-2€.

6.2 Selección

Como se ha podido observar en el apartado anterior se ha realizado una introducción de diferentes tecnologías para la comunicación. Además, se ha realizado un breve análisis dónde se han comentado los pros y contras de cada una de las tecnologías. A partir de los análisis realizados en el apartado anterior se procede a realizar una tabla de valoración, tabla 6.3. En esta tabla se valoran del 1 al 5, siendo el 1 la nota más baja y el 5 la nota más alta, algunas características de las diferentes tecnologías. Estas características son: el funcionamiento, donde se valora si la tecnología es viable para una instalación de miles de paneles solares; la instalación, donde se valora si la instalación es fácil o difícil, si requiere de personal externo para la instalación o es del tipo *plug and play*, y el costo, donde se incluye el precio de los componentes necesarios, así como el cableado necesario.

Tecnología	Funcionamiento	Instalación	Costo
ZigBEE	3	5	4
WiFi	3	4	4
WiMax	4	3	3
LiFi	0	0	0
GSM	3	4	2
RS-485	5	1	1
PoE	4	1	1
Ethernet Industrial	3	1	1
EtherCAT	2	1	1
Bus CAN	2	1	1
TTP	2	1	1
PLC	5	5	5

TABLA 6.3. TABLA DE VALORACIÓN.

En la tabla 6.3 se puede observar que la tecnología con mayor puntuación es la tecnología PLC. Por lo que a continuación, en el apartado 6.3 se procede a realizar un análisis de las características de la tecnología para su uso.

6.3 Características del sistema seleccionado

En los sistemas PLC no se necesita realizar la transmisión de datos en modo común, simplemente codificando los datos, si no transmitirlos mediante una modulación, de forma que haya una señal portadora que lleve la señal.

La información debe ser transmitida mediante señales, los datos obtenidos deben transformarse en señales para poder ser enviados de un lugar a otro. Como transformar la información depende de su formato original y del formato usado por el hardware de comunicación. En este caso, se deberá realizar una conversión digital a analógico.

La conversión digital a analógico, o modulación de digital a analógico es el proceso de cambiar una de las características de una señal de base analógica (amplitud, frecuencia o fase) en información basada en una señal digital.

Debe recordarse que el ancho de banda del medio es limitado, y en el caso de los datos digitales el ancho de banda es muy grande, por lo que en los casos en los que el medio tiene un ancho de banda bajo, las señales deben transmitirse analógicamente.

Tal y como se ha indicado, una señal digital puede ser modulada de diferentes formas [52].

- ASK, Amplitude Shift Keying: La amplitud de la portadora varía proporcionalmente a la señal de información, se produce la modulación por conmutación de amplitud.
- FSK, Frequency Shift Keying: La frecuencia de la portadora varía en forma proporcional a la señal de información, se produce la modulación por conmutación de frecuencia.
- PSK, Phase Shift Keying: La fase varía de forma proporcional a la señal de información, se produce la modulación por conmutación de fase.
- QAM, Quadrature Amplitude Modulation: La amplitud y la fase varían al mismo tiempo en proporción con la señal de información, se produce la modulación de amplitud en cuadratura.

En los sistemas PLC el tipo de modulación que más se utiliza es OFDM porque permite codificaciones más avanzadas. Sin embargo, en este trabajo se utilizará la modulación por desplazamiento de amplitud ASK. Se ha seleccionado este tipo de modulación porque resulta la más simple de implementar.

6.3.1 Modulación ASK

La técnica de modulación ASK es una forma de codificación por desplazamiento de amplitud, donde una señal de información binaria modula directamente la amplitud de una señal portadora analógica. Matemáticamente, la técnica ASK se describe como se muestra en la ecuación 6.1 [52].

$$v_{ASK}(t) = [1 + v_m(t)] \left[\frac{A}{2} \cos(w_c t) \right] \quad (6.1)$$

Donde, $v_{ASK}(t)$ es la forma de onda ASK en voltios, $v_m(t)$ la señal de información digital en voltios, $\frac{A}{2}$ la amplitud de la señal portadora sin modular en voltios y w_c la frecuencia de la señal portadora analógica en radianes por segundo.

Para una entrada lógica de 1, $v_m(t) = +1V$, la ecuación 6.1 se reduce a la ecuación 6.2.

$$v_{ASK}(t) = [1 + 1] \left[\frac{A}{2} \cos(w_c t) \right] = A \cos(w_c t) \quad (6.2)$$

Para una entrada lógica 0, $v_m(t) = -1V$, la ecuación 6.2 se reduce a la ecuación 6.3.

$$v_{ASK}(t) = [1 - 1] \left[\frac{A}{2} \cos(w_c t) \right] = 0 \quad (6.3)$$

Por lo tanto, la portadora esta “activada” (“on”) o “desactivada” (“off”). Por esta razón a ASK a veces se le denomina codificación de activación/desactivación (on/off) (OOK).

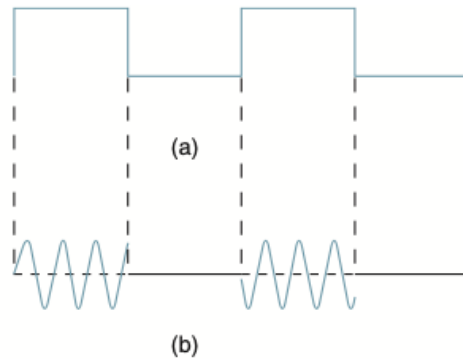


FIGURA 6.8. MODULACIÓN ASK (A) ENTRADA DIGITAL (B) SALIDA DE ONDA MODULADA EN AMPLITUD [52]

En la figura 6.8 se puede observar la modulación ASK de la señal digital. Durante todo el tiempo que la señal digital está en *HIGH*, la salida es una señal de salida constante y amplitud constante, y durante todo el tiempo que la señal digital está en *LOW*, la señal portadora no oscila.

6.3.2 Demodulación ASK

Una señal que ha sido modulada mediante modulación ASK, puede ser demodulada mediante dos métodos [53]:

- Técnica de demodulación ASK asíncrona: No se utiliza un reloj o una señal portadora de referencia para la demodulación. Esta técnica consta de un rectificador de media onda, un filtro paso bajo y un comparador. El rectificador de media onda obtiene la mitad positiva de la señal. El filtro paso bajo elimina las frecuencias más altas y proporciona un detector de envolvente del cual el comparador proporciona una salida digital. En la figura 6.9 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a esta técnica.

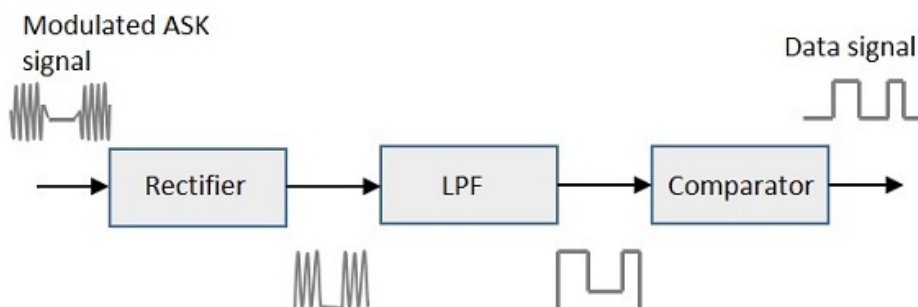


FIGURA 6.9. TÉCNICA DE DEMODULACIÓN ASK ASÍNCRONA [53].

- Técnica de demodulación ASK síncrona: Se utiliza un reloj o una señal portadora de referencia en el receptor para demodular la señal. Esta técnica consta de un detector *Square-law*, un filtro paso bajo, un comparador y un limitador de voltaje. Mediante el detector *Square-law* el voltaje de salida es proporcional al cuadrado del voltaje de entrada de la amplitud modulada. El filtro

paso bajo minimiza las frecuencias más altas. El comparador y el limitador de voltaje ayudan a obtener una salida digital limpia. En la figura 6.10 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a esta técnica.

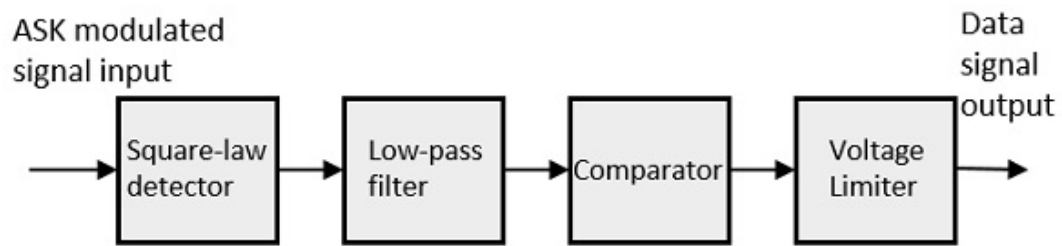


FIGURA 6.10. TÉCNICA DE DEMODULACIÓN ASK SÍNCRONA [53].

Capítulo 7. Pruebas

En este capítulo se detalla el diseño esquemático del circuito de comunicaciones, así como una explicación de las diferentes partes del mismo y sus correspondientes simulaciones. Además, se incluye el diseño de la placa fabricada para la realización de las pruebas y así poder comprobar el funcionamiento del mismo.

7.1 Diseño del prototipo y simulaciones

El circuito para las comunicaciones se conecta en paralelo con el módulo FV. Este circuito permite modular los datos de 1 Kbyte que le transmite el MCU sobre el estado del módulo FV de forma que se transmitan hasta la CU. Esta transmisión se realiza a través de los cables del módulo FV. Del mismo modo la CU puede enviar datos al MCU solicitando una monitorización del módulo FV. En la figura 7.1 se muestra un breve resumen visual sobre las conexiones entre el PLC y el MCU, y el PLC y el módulo FV.

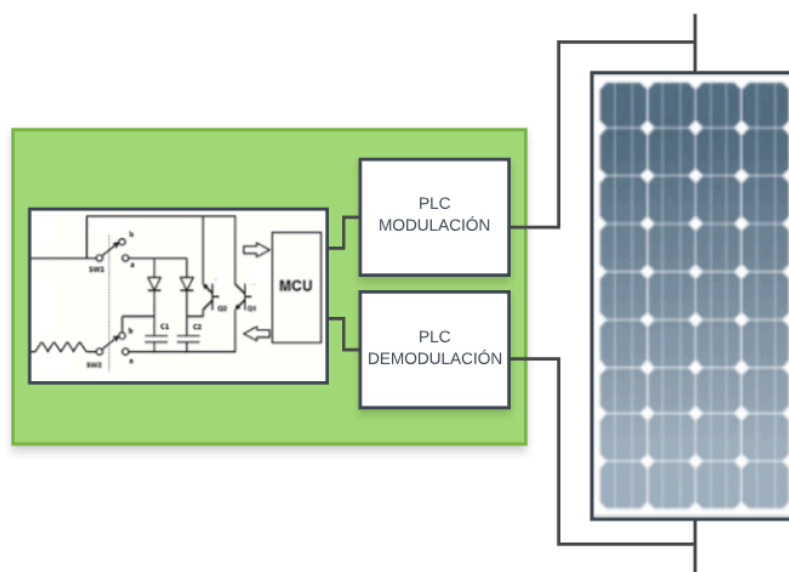


FIGURA 7.1. CONEXIONES ENTRE EL MCU, EL PLC Y EL MÓDULO FV.

7.1.1 Modulación

Tal y como se ha especificado en el apartado 6.3, la señal que se va a codificar va a ser modulada mediante modulación ASK. Para este tipo de modulación el circuito más simple que puede usarse es realizando el mismo funcionamiento que el de un switch, es decir enviando o no una señal eléctrica. Puesto que la señal que se quiere transmitir se trata de una señal digital se deberá poder diferenciar entre un '1' y un '0' binario. Un '1' binario se transmite con presencia de la portadora mediante inyección de ruido en la señal eléctrica. Un '0' binario se representa mediante la ausencia de la portadora, es decir sin insertar ninguna perturbación en la señal eléctrica.

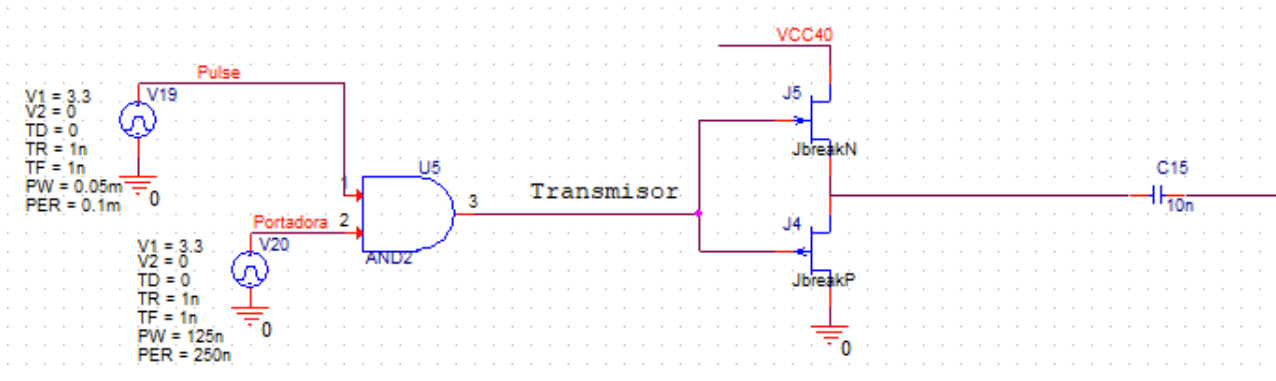


FIGURA 7.2. CIRCUITO DE MODULACIÓN UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN.

En la figura 7.2 se observa el circuito de modulación. Este circuito está compuesto por una puerta AND, la cual cumple la función de switch y un circuito Push-Pull basado en dos transistores FET para amplificar la señal modulada. El circuito Push-Pull se caracteriza por utilizar dos transistores complementarios, donde uno disipa la corriente de la carga a tierra y el otro le suministra corriente desde una fuente de alimentación positiva. Cuando uno de los transistores conmuta al estado de conducción su complemento se conmuta al estado de bloqueo.

En la figura 7.3 se muestra la simulación del circuito de modulación. La señal azul de la figura muestra la señal modulada, mientras que la verde hace referencia a la señal pulse a la entrada de la puerta AND. Se puede observar como la señal modulada únicamente transmite los datos propios de la señal portadora cuando la señal pulse está en HIGH o '1' binario.

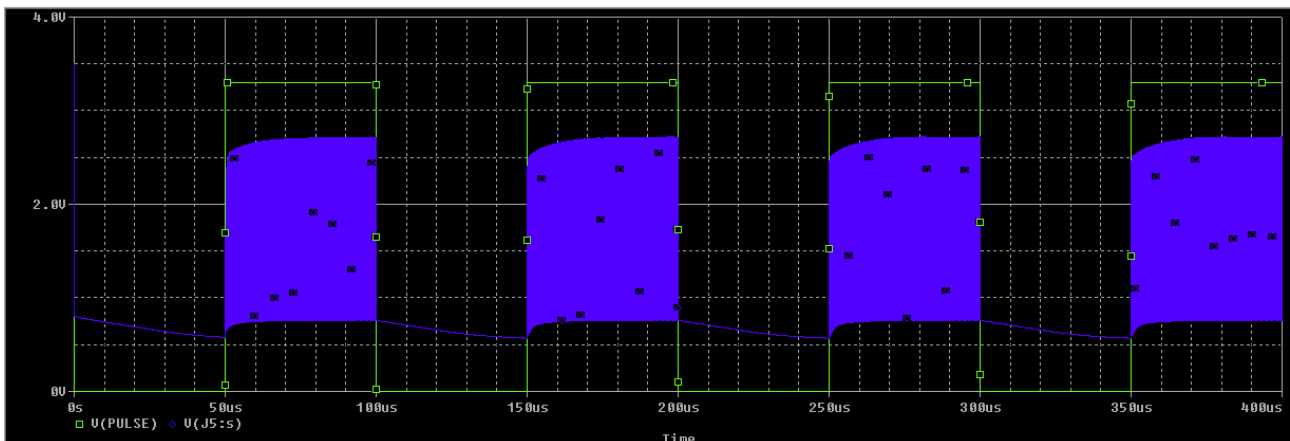


FIGURA 7.3. SIMULACIÓN CIRCUITO DE MODULACIÓN.

7.1.2 Demodulación

Nuevamente, tal y como se ha especificado en el apartado 6.3, existen dos técnicas para realizar la demodulación de la señal de recepción. Para este circuito de pruebas se ha aplicado la técnica de demodulación ASK asíncrona. En esta parte del circuito se realiza una comparación entre la señal oscilante de entrada y una señal constante que actúa como límite para identificar cuándo se están transmitiendo datos y cuándo no.

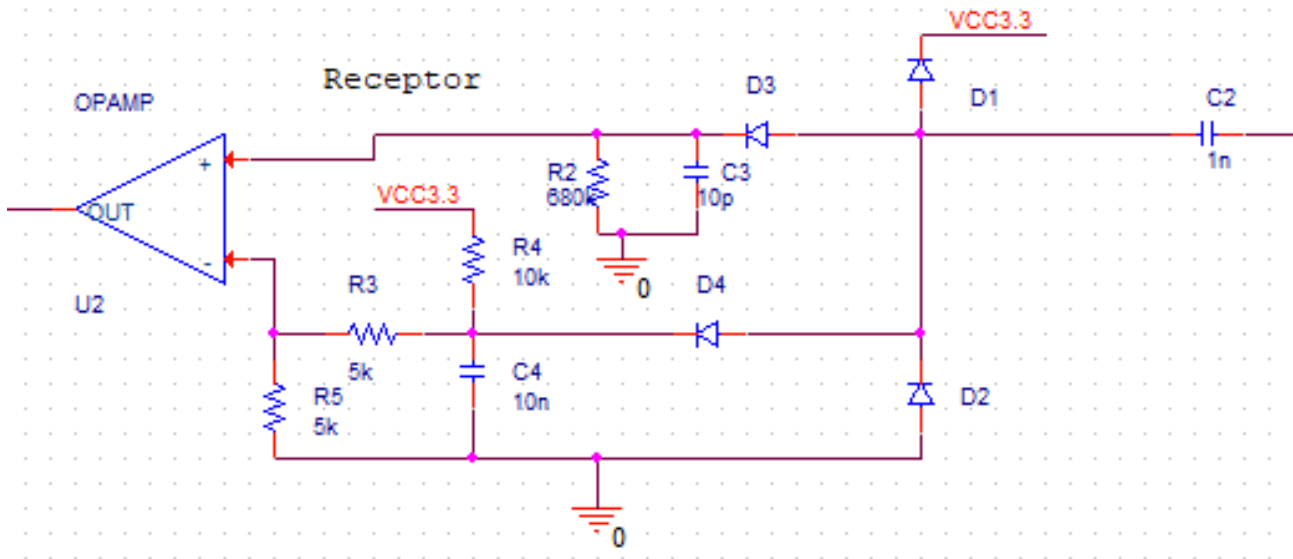


FIGURA 7.4. CIRCUITO DE DEMODULACIÓN UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN.

En la figura 7.4 se observa el circuito de demodulación. En la parte inicial del circuito, parte derecha de la figura, se pueden observar cuatro Diodos. Estos diodos limitan la señal entre 0V y 3.3V. De esta forma se protege el circuito puesto que se reducen las pérdidas de energía. En la parte superior del circuito se muestra un circuito RC que actúa como filtro de la señal de entrada, y en la parte inferior se muestra el circuito que va a limitar la señal de entrada. De esta forma, mediante el amplificador operacional, el cual actúa como comparador, cuando la señal de entrada supere la señal que actúa como límite se obtendrá un '1' binario y cuando sea inferior se obtendrá un '0' binario. Esto es debido al funcionamiento del comparador. La salida del comparador depende de las entradas, tal y como se muestra en las ecuaciones (7.1) y (7.2).

$$V_+ > V_- \rightarrow V_+ - V_- > 0 \rightarrow V_{OUT} = +V_{CC} \quad (7.1)$$

$$V_+ < V_- \rightarrow V_+ - V_- < 0 \rightarrow V_{OUT} = -V_{CC} \quad (7.2)$$

En la figura 7.5 se puede observar la simulación del circuito de demodulación. En esta figura se puede observar en verde la señal que se obtiene en la parte inicial del circuito, en la unión de los diodos. La señal roja corresponde con la que se obtiene una vez filtrada la señal verde. En azul se muestra la señal limitadora. Se puede observar que cuando la señal filtrada supera la señal

limitadora se obtiene un '1' binario o HIGH en la salida del comparador. La señal referente a la salida del comparador está pintada en amarillo.

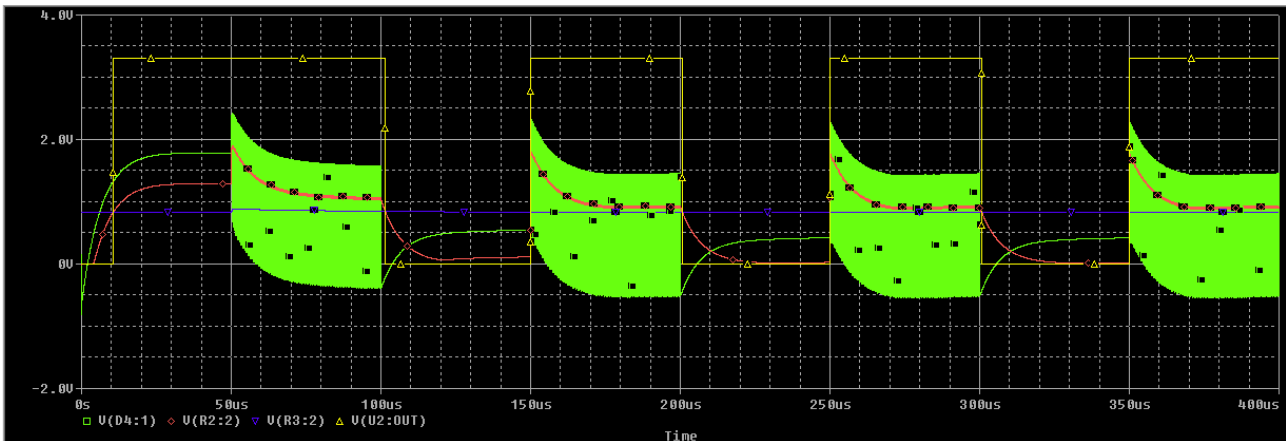


FIGURA 7.5. SIMULACIÓN CIRCUITO DE DEMODULACIÓN.

7.1.3 Acoplamiento/desacoplamiento de la red eléctrica

El acoplamiento/desacoplamiento de la señal a la red eléctrica se realiza mediante dos condensadores. Uno a la salida del circuito modulación y otro a la entrada del circuito de demodulación. En el caso del acoplamiento la función de este condensador es bloquear la entrada de la señal de DC, permitiendo únicamente el paso de la señal de AC. Mientras que la función del condensador de desacoplamiento es eliminar la componente de la señal de AC.

Para la comunicación entre varias placas de pruebas (paneles solares) se usa un conector MKDSP 10N/2-10, 16 de 2 vías, como el que se muestra en la figura 7.6. Este tipo de conector permite cables desde 20AWG² a 6AWG. Estos conectores deben sustituir a los recuadrados en rosa en la figura 5.8, ya que los conectores de la figura provocan que los cables se desconecten frecuentemente.

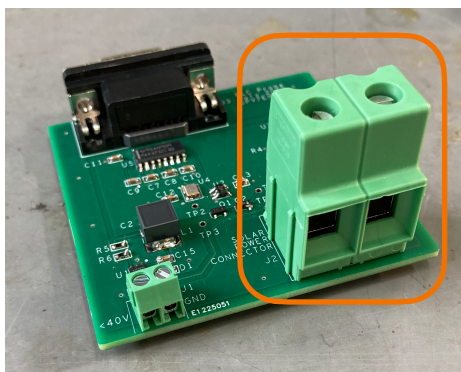


FIGURA 7.6. PLACA PLC DEL CIRCUITO. CONECTORES MKDSP 10N/2-10, 16 DE 2 VÍAS.

² AWG (American Wire Gauge) o Calibre de alambre estadounidense es una referencia de clasificación de calibres o espesor de elementos metálicos de sección circular o rectangular. Conversión AWG - Diámetro - Área: 1AWG = Diámetro : 7.348mm = Área : 42.4mm²

Como se ha comentado en el capítulo 3 el alcance de este trabajo sería integrar el sistema de comunicaciones con el módulo de monitorización que se está desarrollando.

7.2 Fabricación y pruebas del prototipo

Para poder realizar una prueba del prototipo se ha sustituido tanto el sistema de monitorización como el panel solar por un PC. El único propósito de este circuito es comprobar si la tecnología es válida para el módulo de monitorización. Mediante este circuito se pretenden comunicar varios PCs conectados en serie, tal y como se muestra en la figura 7.7. El diagrama, el diseño del PCB y los archivos proporcionados por el fabricante del prototipo se pueden consultar en el Anexo I.

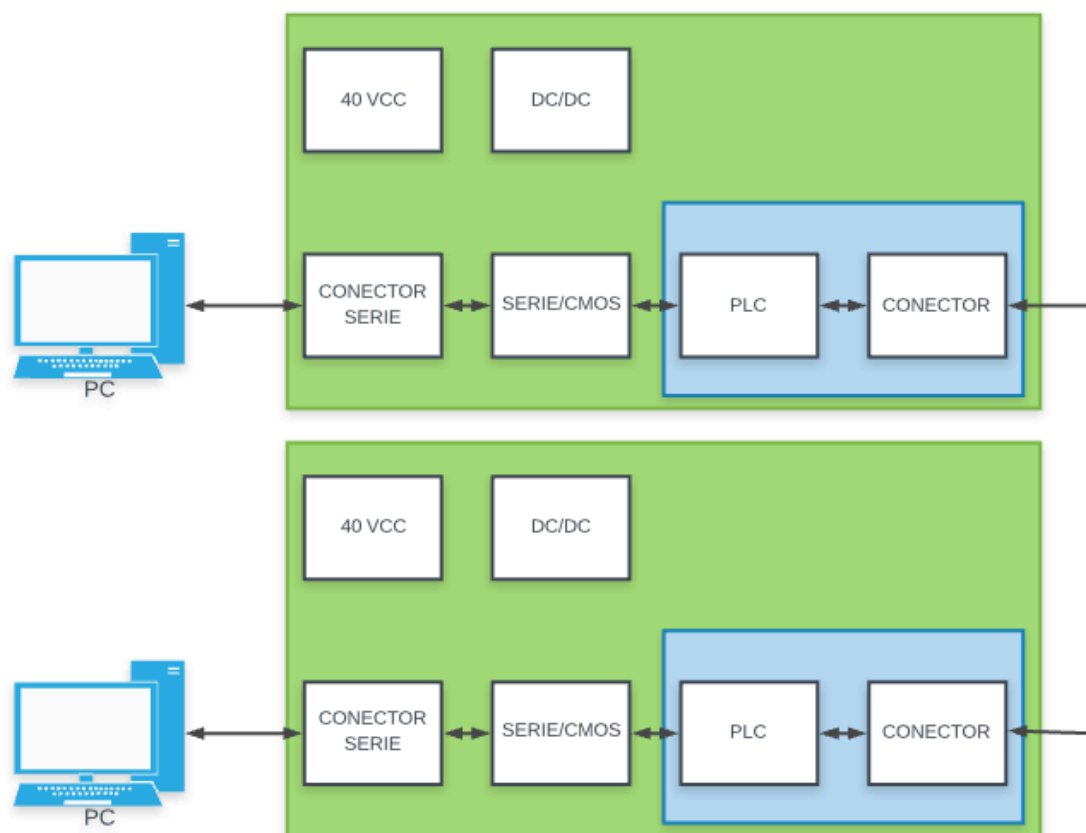


FIGURA 7.7. CONEXIONES DEL CIRCUITO DE PRUEBAS

La conexión del PC a la placa de pruebas se ha realizado mediante un conector RS232 DB9, conector analógico de 9 clavijas. Para poder recibir y transmitir datos mediante este conector se ha utilizado el controlador/receptor MAX3232CDR específico para los conectores del tipo RS232. En la figura 7.8 se muestra un diagrama de cómo se relacionan las comunicaciones entre el conector DB9 y el controlador, y los circuitos de modulación/demodulación. La comunicación entre el conector RS232 del PC y el conector RS232 de la tarjeta PCB se realiza de forma que el conector del PC actúa como DTE y el conector de la tarjeta actúa como DCE.

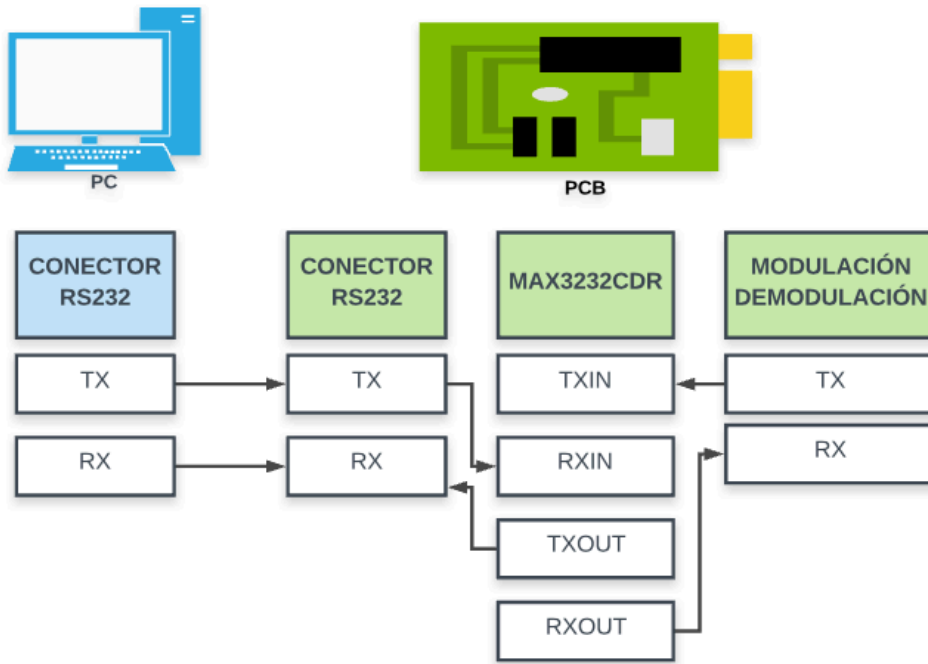


FIGURA 7.8. ESQUEMÁTICO COMUNICACIONES PC-PCB.

La situación del COVID-19 ha supuesto un retardo en la fecha de fabricación del proyecto y no se han podido realizar las pruebas necesarias para comprobar su funcionamiento. A continuación, se muestran unos oscilogramas de los datos que se han obtenido en varios puntos del circuito. Para la captura de los oscilogramas se ha realizado el montaje que se muestra en la figura 7.9. En este montaje se ha utilizado un generador de señales arbitrario en vez de un PC.

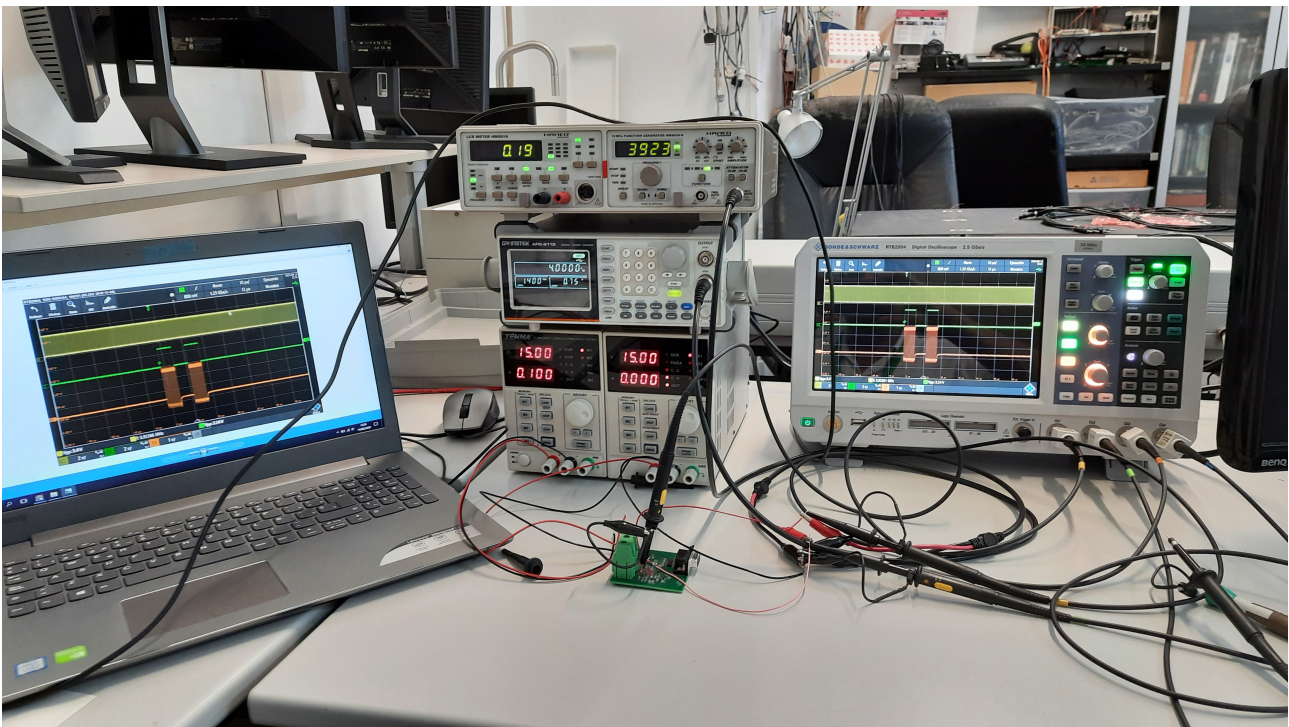


FIGURA 7.9. MONTAJE PARA LAS PRUEBAS EN EL LABORATORIO.

En la figura 7.10 se puede observar la señal que se obtiene en el test point 2, en la puerta de los transistores Q1 y Q2. En la primera figura se puede observar parte de la señal transmitida mediante el PC modulada. En la segunda figura se puede observar, en más detalle, la variación de la amplitud durante el tiempo que la señal está en HIGH.

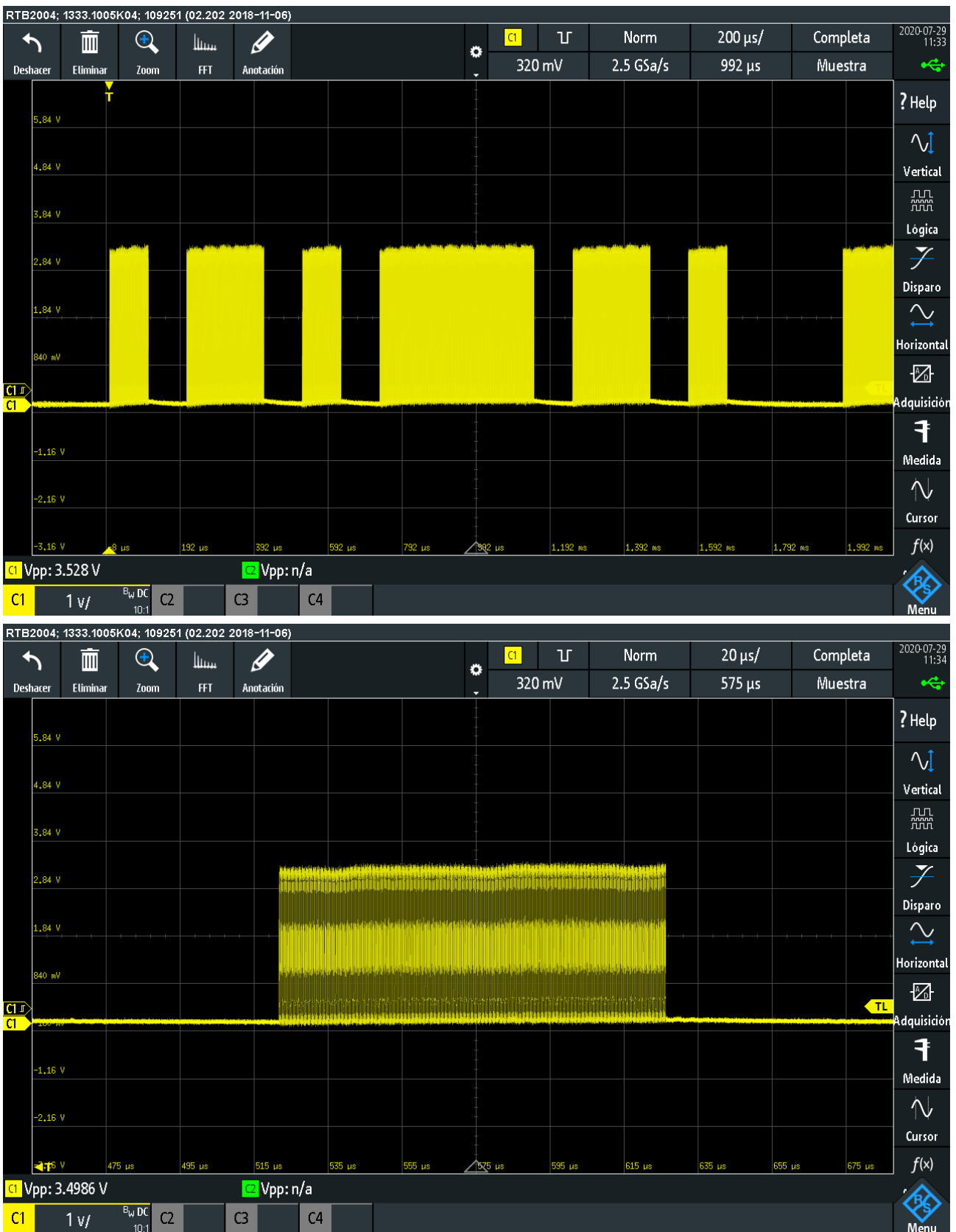


FIGURA 7.10 OSCILOGRAMA DE LA SEÑAL EN EL TEST POINT 2.

A continuación, en la figura 7.11, se puede observar la señal en el test point 1, señal verde, a la salida del circuito push-pull. Esta señal corresponde con la que se muestra en la simulación de la figura 7.3 del circuito de modulación.

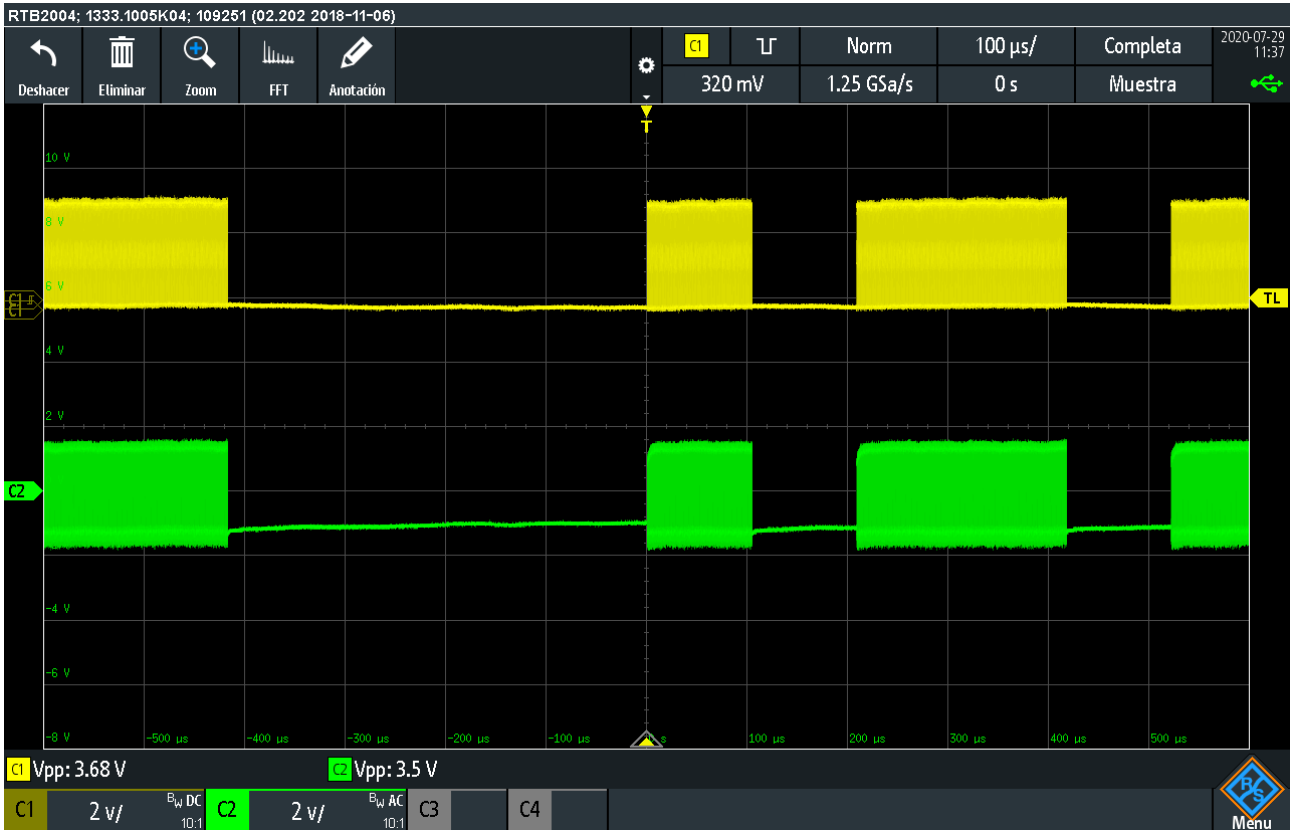


FIGURA 7.11. OSCILOGRAMA DE LA SEÑAL EN EL TEST POINT 1 (SEÑAL VERDE) Y LA SEÑAL EN EL TEST POINT 2 (SEÑAL AMARILLA).

Finalmente, en la figura 7.12 se pueden distinguir las dos señales que entran en el comparador. La señal limitadora está representada en color naranja y la filtrada en color verde. Debido a un error en controlador/receptor MAX3232CDR la señal filtrada no supera la señal limitadora, por lo que la señal de la salida del comparador se mantiene constante, lo que no permite distinguir ningún '0' o '1' lógico.

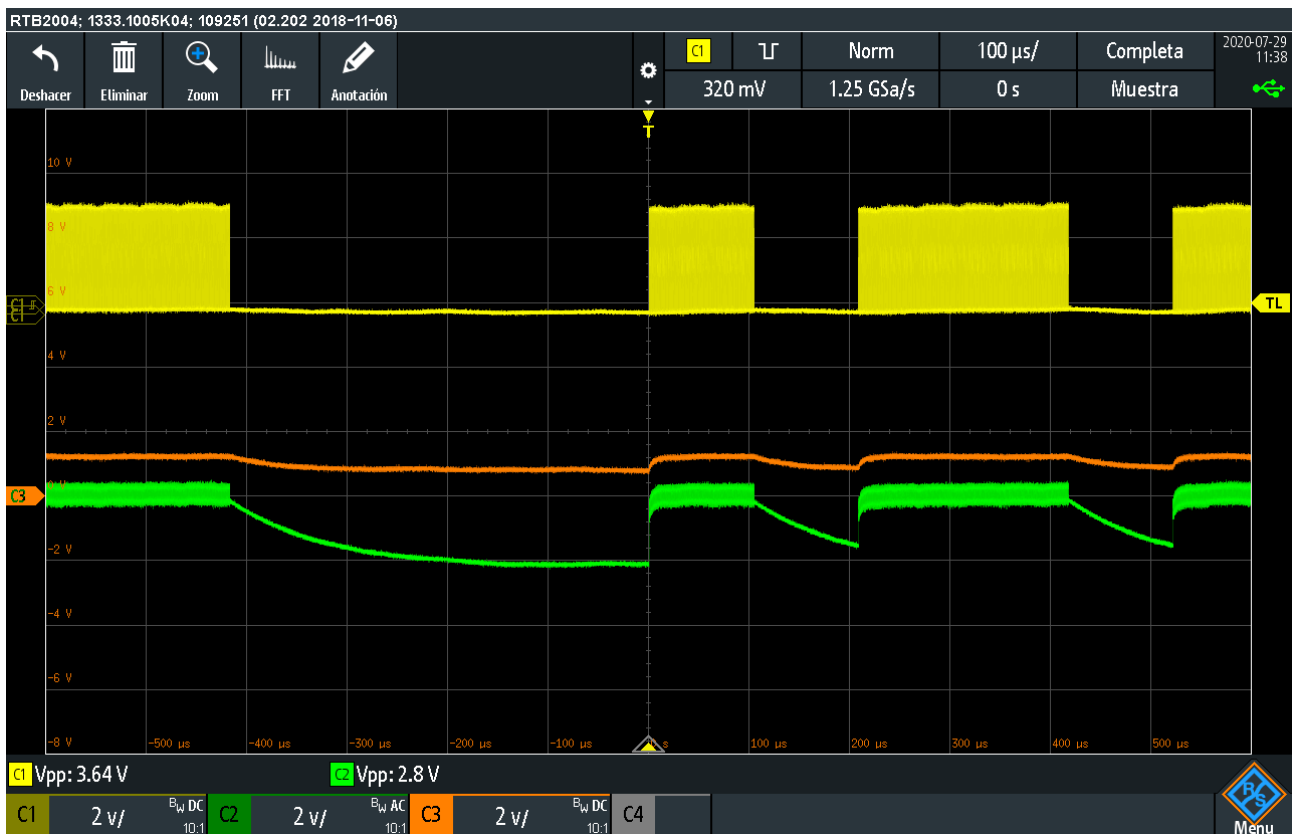


FIGURA 7.12. OSCILOGRAMA DE LA SEÑAL EN EL TEST POINT 2 (SEÑAL AMARILLA), SEÑAL FILTRADA (SEÑAL VERDE) Y SEÑAL LIMITADORA (SEÑAL NARANJA).

7.3 Pruebas pendientes de realizar

Como se ha comentado en el apartado 7.2 no se ha podido validar el circuito a causa del COVID-19. Faltarían por realizar pruebas donde se analizase la transmisión y recepción, modulación/ demodulación. Inicialmente se deberían realizar las pruebas con un cable corto. A continuación, se deberían repetir las pruebas con un cable largo energizado como el que se utiliza en los paneles solares, interponiendo en el medio un panel solar. El panel solar se debería probar a conectar en ambos sentidos para comprobar si la señal sólo puede atravesar el circuito en una determinada dirección. En el caso de que esto sucediera sería necesario colocar dos circuitos por panel solar, uno hacia arriba de la String y otro hacia abajo para transmitir la señal entre los módulos en ambos sentidos.

La monitorización se debe realizar de forma que cada módulo tiene que ser capaz de comunicar con el siguiente módulo (el primero con el segundo, el segundo por el tercero, etc.) de forma que se sabe en qué circuito de monitorización se está y se permite la identificación de los módulos dentro de una String. De esta forma se obtiene el sistema para identificar los paneles FV dentro de una String.

Sin embargo, faltaría por prever un sistema para la numeración y selección de las Strings. Una opción que se ha analizado es iluminar de forma individual los primeros paneles de cada String de forma que se pueda identificar a qué String pertenece.

Capítulo 8. Análisis de riesgos

En este capítulo se analizan los riesgos derivados de la modificación del sistema de comunicaciones. Un correcto análisis e identificación de los posibles riesgos puede marcar la diferencia a la hora de desarrollar cualquier proyecto.

Es necesario poner en contexto que el desarrollo de este trabajo se ha realizado durante el estado de alarma debido al COVID-19, lo que ha ocasionado que el trabajo haya necesitado más tiempo para su desarrollo.

El principal inconveniente que puede suponer la modificación del sistema de comunicaciones es que la tecnología seleccionada no sea válida y no se pueda establecer comunicación entre el MC y la CU.

Además, podría ocurrir que el módulo de monitorización no fuese compatible para la tecnología seleccionada. Este es un aspecto que sería conveniente analizar en otro TFM, donde se integrase el sistema de comunicaciones propuesto junto con el módulo de monitorización.

Por último, el sistema de numeración no queda completamente resuelto. La solución propuesta sería válida para una string. Para un array de strings, habría que diseñar un procedimiento que identificara al primer equipo de la string. Una incorrecta identificación de ese equipo también podría suponer un riesgo.

Capítulo 9. Diagrama de Gantt/cronograma

En la tabla 9.1 se puede observar el diagrama de Gantt en el cual se muestran las diferentes fases del proyecto y las fechas, por semanas, en las que se han desarrollado dichas fases.

El módulo de monitorización es un proyecto en el que el grupo de diseño electrónico de la UPV/EHU lleva varios años trabajando, en colaboración con el Instituto de Tecnología Microelectrónica. Este proyecto es la tesis de un estudiante de la escuela de Ingeniería que está realizando el doctorado. Puesto que la tesis finaliza dentro de poco tiempo, el objetivo del grupo de diseño electrónico de la UPV/EHU es buscar a otro estudiante que desee continuar con el trabajo de investigación. Este alumno se encargaría de integrar el sistema de comunicaciones con el módulo de monitorización que se ha diseñado y continuar con el proyecto.

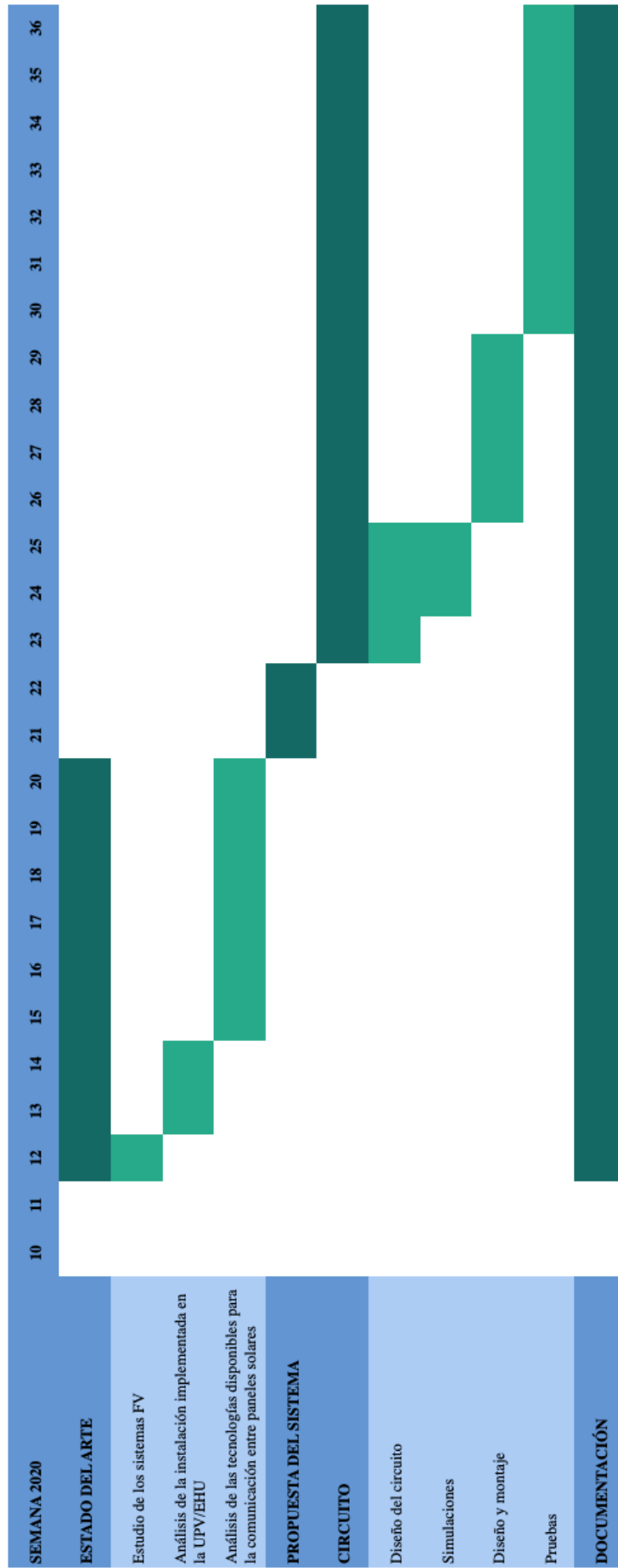


TABLA 9.1 DIAGRAMA DE GANTT.

Capítulo 10. Descargo de gastos

En el descargo de gastos se incluyen los gastos que han supuesto la realización de sistema de comunicaciones. La realización de este sistema ha necesitado de un análisis de las alternativas y un diseño y fabricación de un prototipo del sistema de comunicaciones. Para el descargo de gastos se deben incluir tanto los gastos de personal (alumno y profesor) como los de fabricación del prototipo, junto con los componentes o la amortización del material utilizado (9% del total de los gastos de personal y fabricación).

	Coste/hora	Horas	Coste total
Ingeniero Junior	25 €/hora	340	8500 €
Ingeniero Senior	70 €/hora	90	6300 €
		Total:	14800 €

TABLA 10.1. GASTOS DE PERSONAL

	Coste/unidad	Unidades	Coste total
Fabricación de prototipo	89 €/unidad	4	356 €
Amortización de equipo			1365 €
		Total:	1721 €

TABLA 10.2. GASTOS DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

El gasto total del proyecto asciende a un valor de 16.521€.

Capítulo 11. Conclusiones

La monitorización de paneles solares es de gran importancia si se quiere mejorar la eficiencia de una instalación FV, en especial, las grandes instalaciones FV o las centrales FV, en las que no es posible tener un control del estado de todos los módulos FV. Sin embargo, para que estos sistemas de monitorización sean factibles deben tener un bajo costo y ser funcionales sin importar la dimensión de la instalación.

Es por ello que en este trabajo se han decidido analizar las tecnologías disponibles para la transmisión y recepción de datos entre un módulo de monitorización que se está diseñando dentro del grupo de diseño electrónico de la UPV/ EHU, en colaboración con el Instituto de Tecnología Microelectrónica, y una unidad de control.

De entre la comparación de las tecnologías se pueden observar varias conclusiones. En primer lugar, el uso de una tecnología inalámbrica en instalaciones con miles de paneles solares resulta inviable por la cantidad de interferencias que se pueden producir. Por otro lado, utilizar una tecnología mediante transmisión guiada requiere de un sobre coste en los materiales y en la instalación del mismo, especialmente si se trata de una instalación en explotación. Además, muchas de estas tecnologías se descartan por aspectos funcionales como el ancho de banda o la velocidad de transmisión.

Entre las tecnologías analizadas, las que mejores resultados obtienen son las siguientes:

- PLC (transmisión guiada).
- ZigBee (inalámbrica).

Entre estas dos tecnologías se selecciona la tecnología PLC por no tener problemas de interferencias, ni de número máximo de módulos en los que se puede utilizar. Esta tecnología no transmite los datos en modo común, realiza una modulación de los mismos. Entre las técnicas de modulación disponibles se escoge la modulación/demodulación ASK por su sencillez y bajo costo de materiales.

Con el trabajo realizado se ha llegado al diseño de un circuito válido para comunicaciones utilizando los cables de comunicación actuales.

Se deja diseñado el circuito a falta de realizar las pruebas de validación del mismo para integrarlo en el módulo de monitorización.

Bibliografía

- [1] González, J. (2009). *Energías Renovables*. Editorial Reverté, S.A
- [2] Twidell, J., & Weir, T. (2015). *Renewable energy resources*. Routledge.
- [3] IDAE, Energía solar térmica. URL <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables>
- [4] Sawin, J., et al., 2017. Renewable energy policy network for the 21st century renewables 2017 global status report. REN21 Secretariat: Paris, France, pp. 1–302.
- [5] Sukhatme, S. P., & Nayak, J. K. (2017). *Solar energy*. McGraw-Hill Education.
- [6] International Energy Agency, Photovoltaic Power System Programme. Snapshot of global PV markets 2020. URL <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2020/>
- [7] Espejo Marín, C. (2004). La energía solar fotovoltaica en España.
- [8] El periódico de la energía. Las 20 mayores plantas fotovoltaicas del mundo: India manda en el ranking y España entra en el top 20. URL <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>
- [9] Matsumoto, Y., Norberto, C., Urbano, J. A., Ortega, M., & Asomoza, R. (2016, June). Three-year PV system performance in Mexico City. In *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 3168-3172). IEEE.
- [10] Kumar, B. S., & Sudhakar, K. (2015). Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India. *Energy reports*, 1, 184-192.
- [11] Cristaldi, L., Faifer, M., Lazzaroni, M., Khalil, M. M. A. F., Catelani, M., & Ciani, L. (2015). Diagnostic architecture: A procedure based on the analysis of the failure causes applied to photovoltaic plants. *Measurement*, 67, 99-107.
- [12] Park, N. C., Jeong, J. S., Kang, B. J., & Kim, D. H. (2013). The effect of encapsulant discoloration and delamination on the electrical characteristics of photovoltaic module. *Microelectronics Reliability*, 53(9-11), 1818-1822.

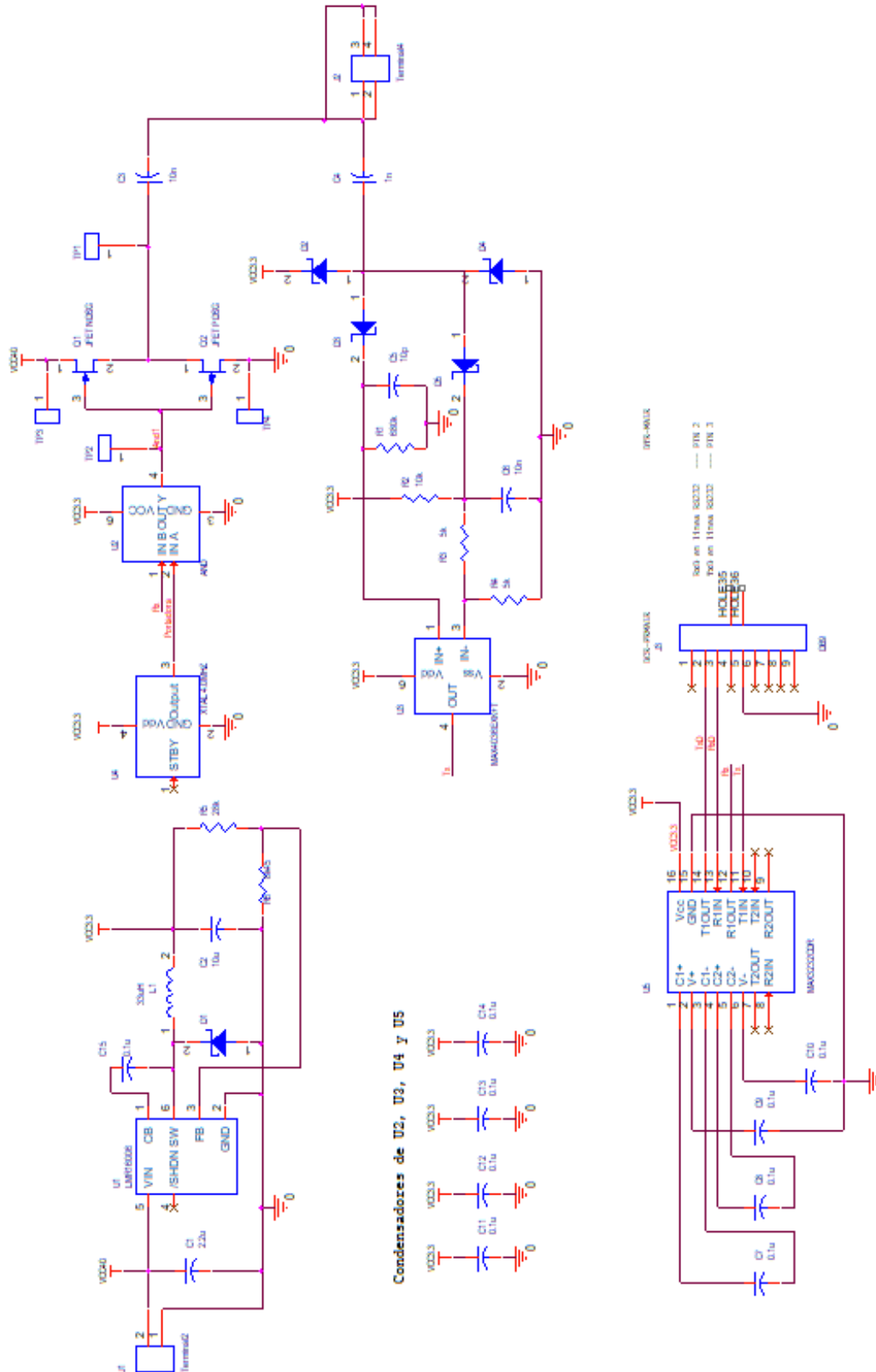
- [13] Köntges, M., Kunze, I., Kajari-Schröder, S., Breitenmoser, X., & Bjørneklett, B. (2010, September). Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks. In *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain* (pp. 3745-3752).
- [14] Kim, K. A., & Krein, P. T. (2013, September). Hot spotting and second breakdown effects on reverse IV characteristics for mono-crystalline Si photovoltaics. In *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (pp. 1007-1014). IEEE.
- [15] Caron, J. R., & Littmann, B. (2012). Direct monitoring of energy lost due to soiling on first solar modules in California. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(1), 336-340.
- [16] Mäki, A., & Valkealahti, S. (2011). Power losses in long string and parallel-connected short strings of series-connected silicon-based photovoltaic modules due to partial shading conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(1), 173-183.
- [17] Ortega, E., Aranguren, G., & Jimeno, J. C. (2019). New monitoring method to characterize individual modules in large photovoltaic systems. *Solar Energy*, 193, 906-914.
- [18] Ortega, E., Aranguren, G., & Jimeno, J. C. (2019, June). Determination of Maximum Power Point with a Module to Module Monitoring System, M3S. In *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 1288-1292). IEEE.
- [19] Ortega, E., Aranguren, G., Saenz, M. J., Gutierrez, R., & Jimeno, J. C. (2018, June). Photovoltaic module to module monitoring system. In *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)* (pp. 2703-2708). IEEE.
- [20] Zigbee alliance. URL <https://zigbeealliance.org>
- [21] Farahani, S. (2011). ZigBee wireless networks and transceivers. Newnes.
- [22] ZigBee, A. (2008). ZigBee Specification: ZigBee Document 053474r17. www.zigbee.org.
- [23] Yi, P., Iwayemi, A., & Zhou, C. (2010). Developing ZigBee deployment guideline under WiFi interference for smart grid applications. *IEEE transactions on smart grid*, 2(1), 110-120.
- [24] Rashidi, Y., Moallem, M., & Vojdani, S. (2011, June). Wireless Zigbee system for performance monitoring of photovoltaic panels. In *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 003205-003207). IEEE.
- [25] Faludi, R. (2010). Building wireless sensor networks: with ZigBee, XBee, arduino, and processing. " O'Reilly Media, Inc."
- [26] Wi-Fi alliance. Wi-Fi Generations. URL <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi>
- [27] An Introduction to Wi-Fi®. Product Manual.

- [28] Rafiei, M., & Eftekhari, S. M. (2012, May). A practical smart metering using combination of power line communication (PLC) and WiFi protocols. In *2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution* (pp. 1-5). IEEE.
- [29] WiMAX Forum. WiMAX Mobile 4G. URL <http://wimaxforum.org/Page/Initiatives/WiMAX-Advanced>
- [30] Etemad, K. (2008). Overview of mobile WiMAX technology and evolution. *IEEE communications magazine*, 46(10), 31-40.
- [31] Vaughan-Nichols, S. J. (2004). Achieving wireless broadband with WiMax. *Computer*, (6), 10-13.
- [32] Haas, H., Yin, L., Wang, Y., & Chen, C. (2015). What is lifi?. *Journal of lightwave technology*, 34(6), 1533-1544.
- [33] Leba, M., Riurean, S., & Lonica, A. (2017, June). LiFi—The path to a new way of communication. In *2017 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)* (pp. 1-6). IEEE.
- [34] Haas, H. (2016, October). LiFi: Conceptions, misconceptions and opportunities. In *2016 IEEE Photonics Conference (IPC)* (pp. 680-681). IEEE.
- [35] Felix, C., & Raglend, I. J. (2011, July). Home automation using GSM. In *2011 International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies* (pp. 15-19). IEEE.
- [36] Gu, G., & Peng, G. (2010, December). The survey of GSM wireless communication system. In *2010 international conference on computer and information application* (pp. 121-124). IEEE.
- [37] Jia, H. J., & Guo, Z. H. (2010, November). Research on the technology of RS485 over Ethernet. In *2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment* (pp. 1-3). IEEE.
- [38] Analog Devices. RS-485/RS-422 Circuit implementation guide. URL <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-960.pdf>
- [39] Mendelson, G. (2004). All you need to know about Power over Ethernet (PoE) and the IEEE 802.3 af Standard. *Internet Citation,[Online] Jun*.
- [40] White, R. V. (2006, March). Electrical isolation requirements in power-over-Ethernet (PoE) power sourcing equipment (PSE). In *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06*. (pp. 4-pp). IEEE.
- [41] Field Guide: Industrial Ethernet Connectivity. Turck
- [42] Maestro, J. A., & Reviriego, P. (2009). Energy efficiency in industrial ethernet: The case of powerlink. *IEEE transactions on industrial electronics*, 57(8), 2896-2903.

- [43] Zurawski, R. (Ed.). (2014). *Industrial communication technology handbook*. CRC Press.
- [44] Universidad de Cantabria. Ethernet Industrial. URL: <https://web.unican.es>
- [45] Prytz, G. (2008, September). A performance analysis of EtherCAT and PROFINET IRT. In *2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation* (pp. 408-415). IEEE.
- [46] Di Natale, M. (2000, November). Scheduling the CAN bus with earliest deadline techniques. In *Proceedings 21st IEEE Real-Time Systems Symposium* (pp. 259-268). IEEE.
- [47] Kvaser. The CAN Bus protocol. URL <https://www.kvaser.com/about-can/the-can-protocol/>
- [48] Kopetz, H., & Grunsteidl, G. (1993, June). TTP-A time-triggered protocol for fault-tolerant real-time systems. In *FTCS-23 The Twenty-Third International Symposium on Fault-Tolerant Computing* (pp. 524-533). IEEE.
- [49] Kopetz, H. (2011). *Real-time systems: design principles for distributed embedded applications*. Springer Science & Business Media.
- [50] Fernandes, A. D. L., & Dave, P. (2011). *Power line communication in energy markets*. CYPRESS, San Jose
- [51] Tomasi, W. (2014). *Advanced Electronic Communications Systems*. Pearson Education Limited
- [52] Tutorials point. Amplitude Shift Keying. URL https://www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_amplitude_shift_keying.htm

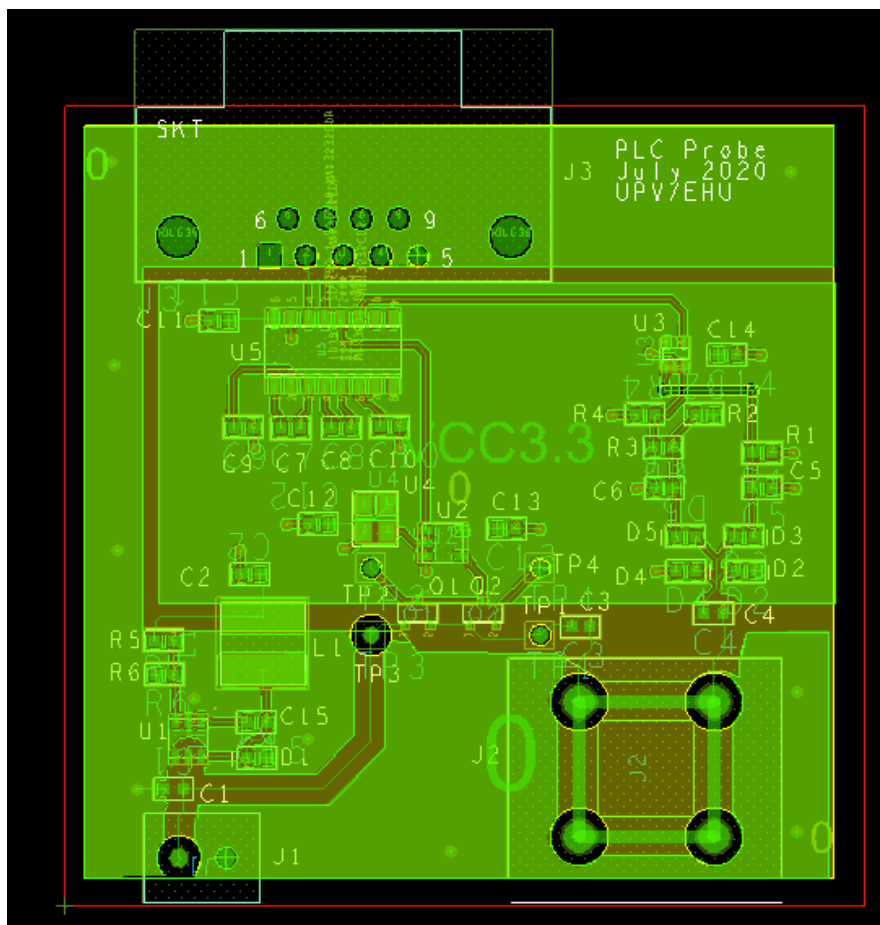
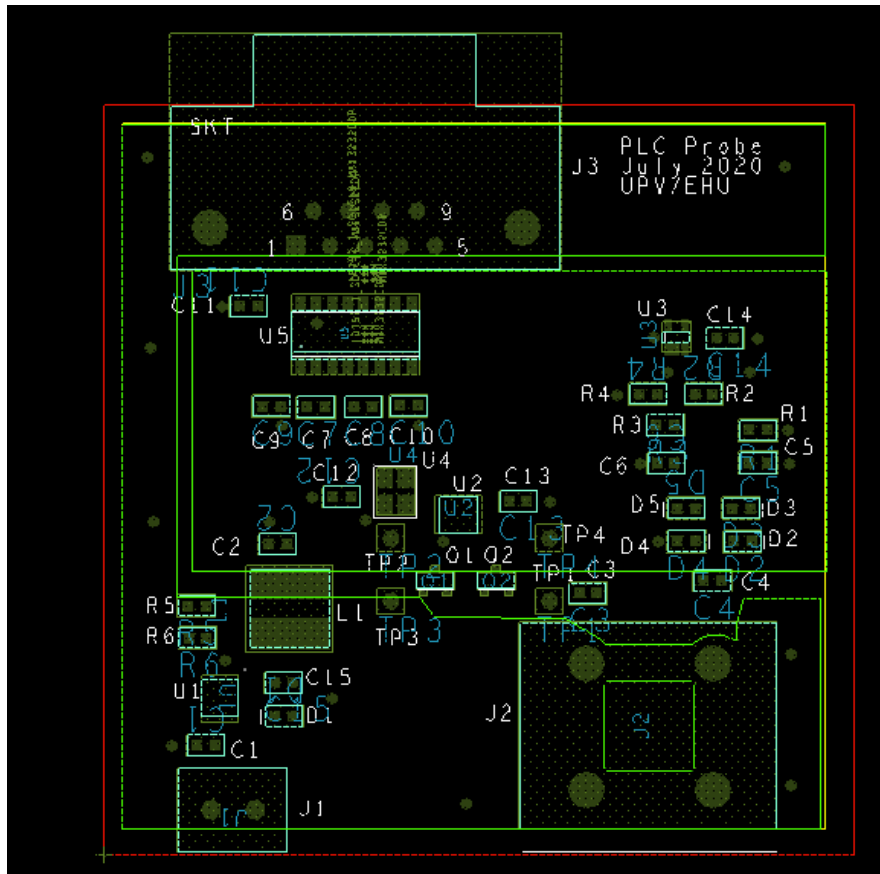
ANEXO I

Esquemático:



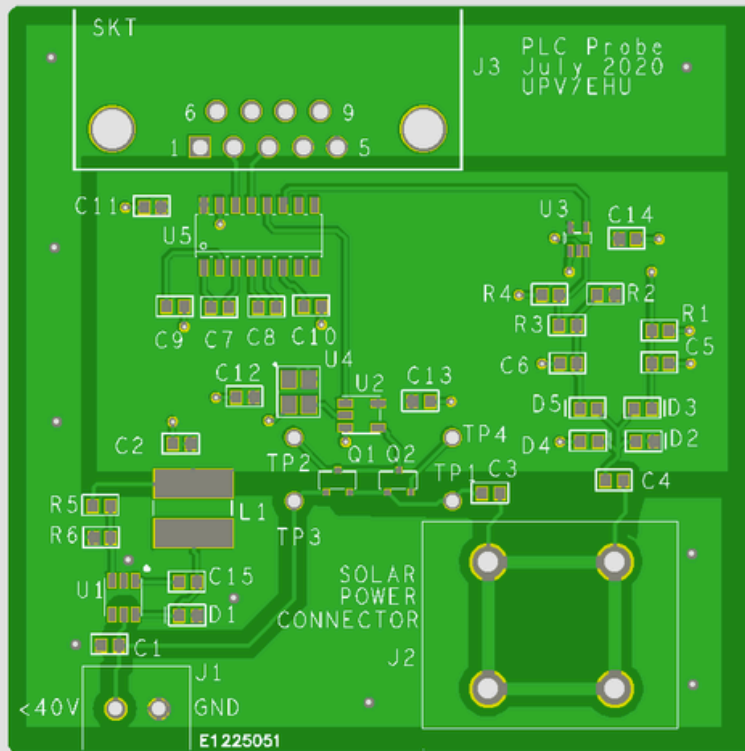
Condensadores de U2, U3, U4 y U5

Diseño de la placa de pruebas:

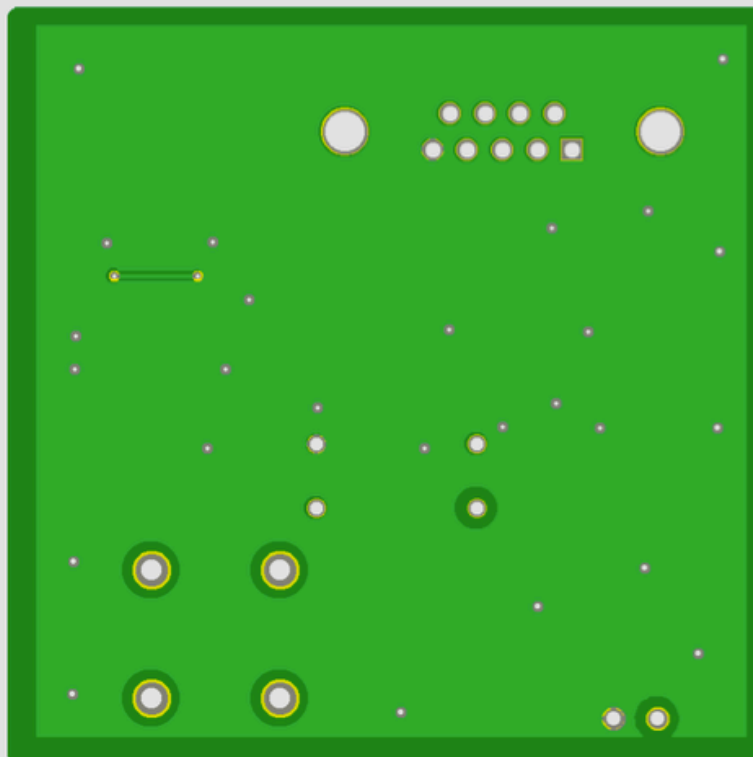


Vistas de la PCB (Top y Bottom):

E1225051 PCB view TOP (topview)

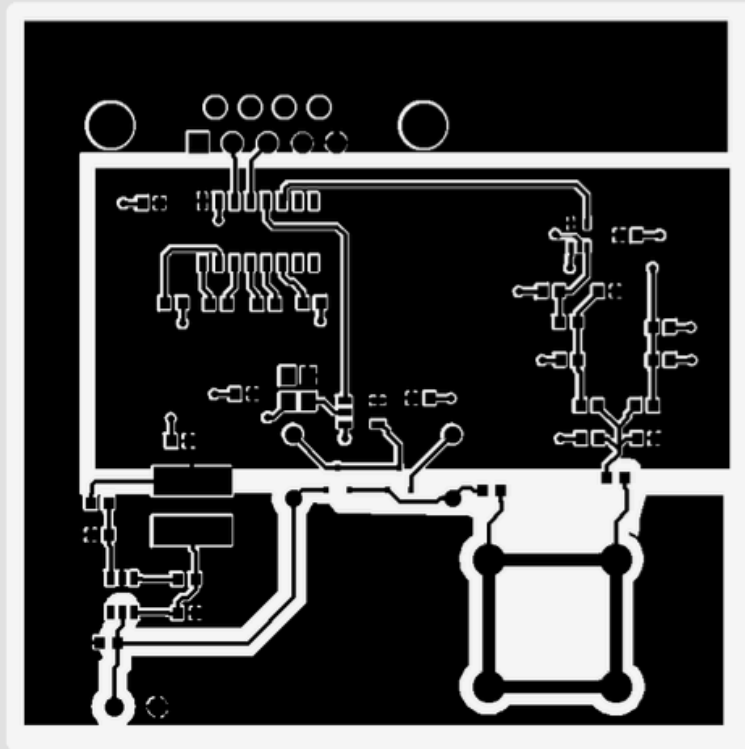


E1225051 PCB view BOTTOM (bottomview)

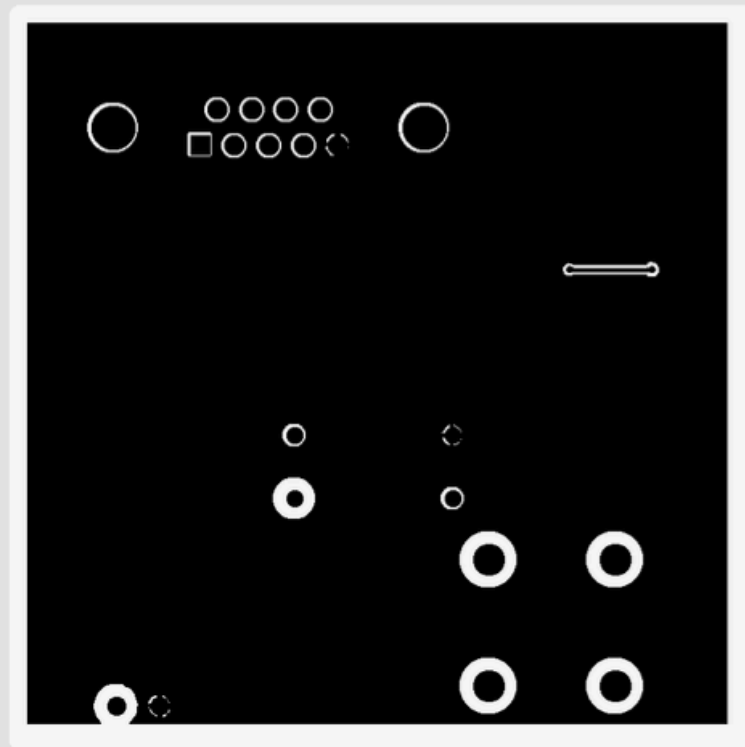


Capa Top y Bottom de la PCB:

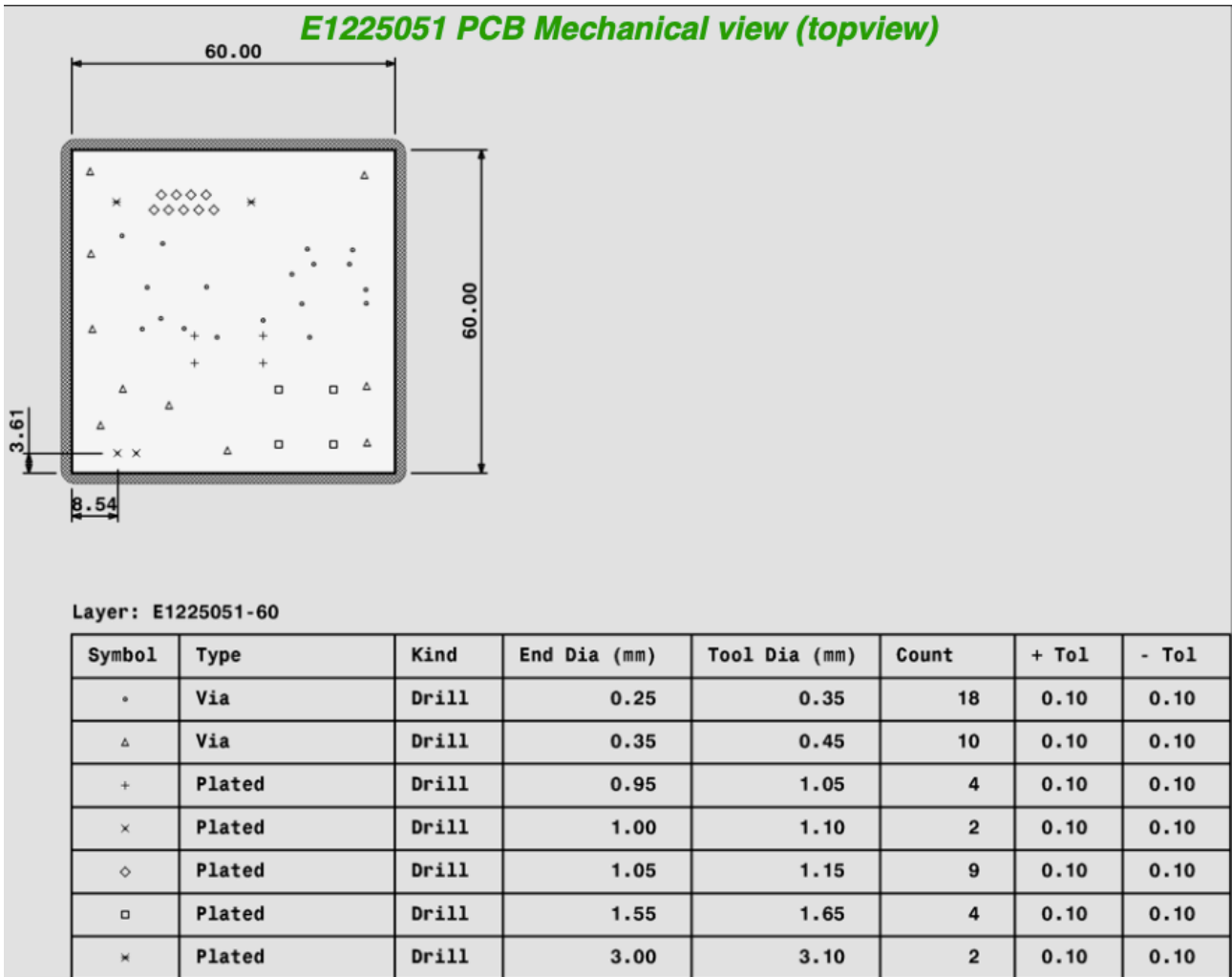
E1225051 TOP layer Image (topview)



E1225051 BOTTOM layer Image (topview)



Plano de agujeros de la PCB:



Tarjeta:

