

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LAS
TELECOMUNICACIONES

TRABAJO FIN DE GRADO

***DESARROLLO DE UNA COMUNICACIÓN A
TRAVÉS DE LA RED ELÉCTRICA PARA LA
MONITORIZACIÓN DE PANELES SOLARES***

Alumno: Peña, Villalba, David

Director: Aranguren, Aramendia, Gerardo

Curso: 2019-2020

Fecha: Bilbao, 5, noviembre, 2019

DATOS BÁSICOS DEL PROYECTO

- *Resumen trilingüe:*

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un sistema de comunicaciones nuevo, utilizando los cables de alimentación del circuito para la comunicación de datos. Se presenta la documentación necesaria para diseñar y probar el prototipo. Todo ello para que finalmente se una al proyecto de monitorización fotovoltaica.

Proiektu honen helburua komunikazio sistema berri baten garapena da. Zirkuituaren alimentazio kableen bidez informazioa komunikatzen da. Dokumentazio beharrezkoa diseinuak, prototipoak eta probak egiteko jarraitutako pausoak eskaintzen dira. Azkenean, diseinu osoa bateratzen da monitorizazio proiektu orokorran eta produzitzeko ideiak eskaintzen dira.

The goal of this project is the design and inclusion of a new communication node, by means of the wires of power supply for the data communication, in a photovoltaic monitoring system. The document shows the steps to design, manufacture and test the communication node. With the final hardware manufacturing setouts.

- *Palabras clave (trilingüe):* PLC, Comunicación, fotovoltaic

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE CONTENIDOS	ii
INDICE DE FIGURAS.....	iii
MEMORIA.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Contexto	3
2 Objetivos y alcance del proyecto.....	6
3 WBS.....	7
4 Beneficios que aporta el trabajo.....	8
5 Descripción de requerimientos	9
6 Análisis de alternativas y estado del arte.....	10
7 Análisis de riesgos	20
8 Descripción de la solución propuesta y diseño.....	23
METODOLOGÍA.....	26
1 Descripción de tareas.....	27
2 Diagrama de Gantt.....	30
3 Descripción de los resultados.....	31
4 Plan de proyecto.....	32
PRESUPUESTOS	33
1 Descargo de gastos.....	33
2 Presupuesto de fabricación	34
CONCLUSIONES.....	35
REFERENCIAS	36

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráficos del aumento del consumo energético y emisiones de carbono.....	3
Figura 2. Gráfico de energía solar fotovoltaica instalada.....	4
Figura 3. Instalación solar fotovoltaica.....	5
Figura 4. WBS del proyecto.....	7
Figura 5. PCB del sensor con comunicaciones mediante RS485.....	8
Figura 6. Tarjeta de desarrollo DV164139-2, de Microchip.....	9
Figura 7. Sistema de monitorización con comunicación vía inalámbrica.....	10
Figura 8. Conexión RS485 con 2 hilos.....	11
Figura 9. Esquema del sistema de monitorización comunicado con RS485.....	12
Figura 10. Paneles solares instalados en el tejado de la escuela.....	13
Figura 11. Sistema montado, señalizando los cables de RS485.....	14
Figura 12. Fotos de la instalación necesaria de RS485.....	14
Figura 13. Comparación instalación PLC y comunicación inalámbrica.....	15
Figura 14. PLC comercial.....	16
Figura 15. Diferentes tipos de modulaciones.....	17
Figura 16. Sistema de monitorización con comunicación vía PLC.....	18
Figura 17. Esquema de comunicación implementando PLC.....	19
Figura 18. Matriz probabilidad-impacto del proyecto.....	21
Figura 19. Diagrama de bloques sistema completo.....	23
Figura 20. Diagrama de bloques del apartado de comunicaciones.....	24
Figura 21. Diseño esquemático de las comunicaciones.....	25
Figura 22. Tareas del proyecto.....	27
Figura 23. Diagrama de Gantt del proyecto.....	30

MEMORIA

1.1 Introducción

El siguiente TFG trata sobre la comunicación entre paneles solares para su monitorización. La monitorización solar pertenece a una tesis doctoral en la que está trabajando Eneko Ortega.

Se ha llevado a cabo durante 4 meses de prácticas en la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) en el Grupo de Diseño Electrónico (GDE).

El trabajo parte de la base del diseño y desarrollo de un sensor de monitorización de paneles solares. Este sensor dispone actualmente de un sistema de comunicaciones basado en el RS485.

La función del TFG es el diseño de un sistema de comunicaciones a través de las líneas de alimentación eléctrica o PLC, *Power Line Communication*. El objetivo del sistema de comunicaciones nuevo es que el sistema completo mantenga un coste bajo, para que su implantación en instalaciones fotovoltaicas sea viable.

Aprovechando el diseño de las nuevas comunicaciones, se efectúa un rediseño del circuito impreso final, que incluye el sensor de monitorización y el PLC. Se aumenta el número de capas del circuito impreso para así reducir sus dimensiones.

Se incluye también un documento técnico en el que se explica con mayor detalle el diseño esquemático del circuito y el diseño del PCB.

1.2 Contexto

Desde la revolución industrial, iniciada en el siglo XVIII, con la proliferación de las máquinas a vapor, la civilización ha avanzado mucho, dando esos primeros pasos con las nuevas tecnologías y su progresivo acoplamiento a la sociedad. Dos siglos después, con casi todos los países ya industrializados, el mundo se enfrenta a nuevos desafíos. La proliferación de internet junto con la necesidad de estar conectados en todo momento, provoca que los consumos energéticos mundiales se disparen.

Es por eso que a lo largo de las últimas décadas y especialmente los últimos años, el consumo mundial de energía ha aumentado, siendo las energías tradicionales (carbón, petróleo, gas) las que tienen una mayor utilización [1].

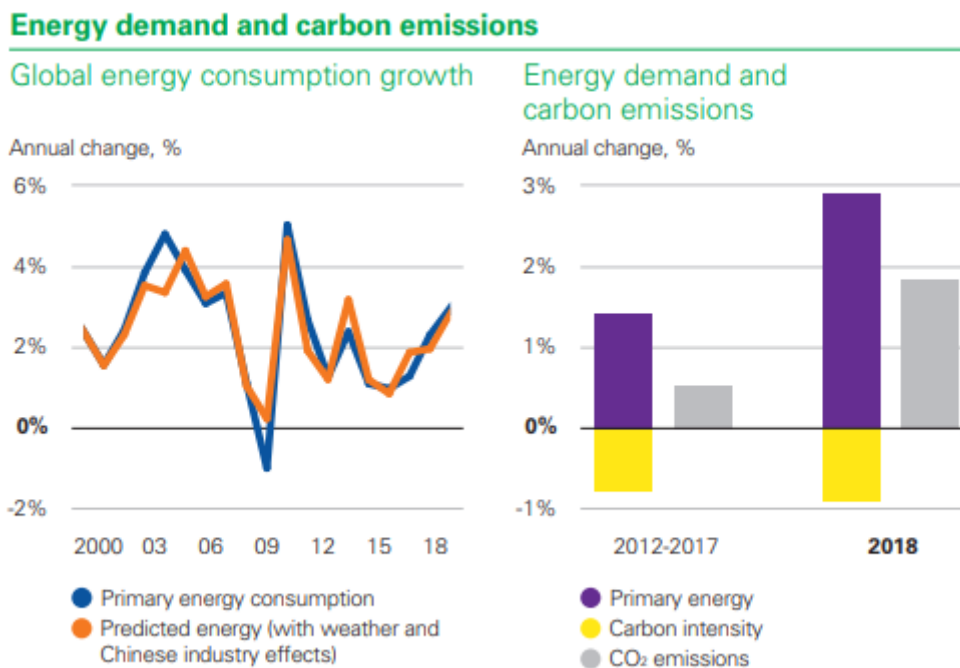


Figura 1. Gráficos del aumento del consumo energético y emisiones de carbono.

La sostenibilidad a medio-largo plazo de la energía mundial no puede depender del uso excesivo de este tipo de energías, ya que su uso genera emisiones de gases contaminantes. Además, hay que tener en cuenta que las energías tradicionales tardan millones de años en generarse, con unos yacimientos mundiales limitados.

Por ello, como el consumo de energía sigue en aumento y se espera que siga aumentando los próximos años, hay que promover una generación de energía limpia y sostenible. Las energías renovables son la mejor opción.

Las energías renovables son las que provienen de fuentes inagotables. En este caso se va a tratar la energía solar.

La energía solar es la técnica de energías renovables que más ha crecido en los países industrializados durante los últimos años. Desde el año 2008 la energía solar ha crecido a un ritmo constante al año, aumentando su crecimiento anualmente, con un crecimiento de alrededor de 100 GW los últimos años y unas previsiones que sitúan alrededor de 180-200 GW al año en 2022[2].

Solar PV generation capacity

Gigawatts, cumulative installed capacity

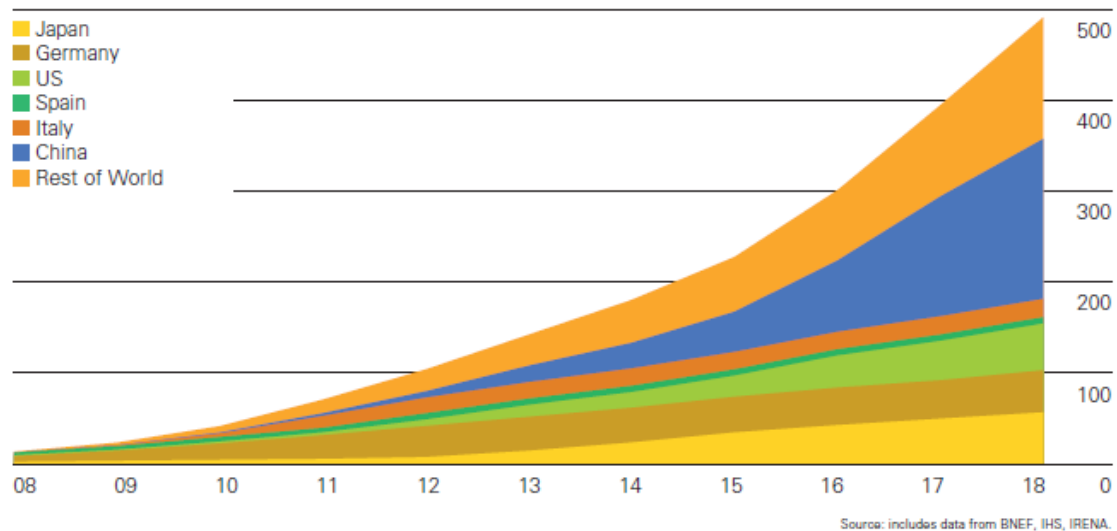


Figura 2. Gráfico de energía solar fotovoltaica instalada.

Las instalaciones solares se encuentran de muchas formas diferentes en la actualidad, desde pequeñas instalaciones de pocos módulos en viviendas, hasta las grandes instalaciones de cientos de megavatios en granjas solares.

La eficiencia de los módulos y sistemas fotovoltaicos, que siempre ha sido uno de los puntos más criticados de este tipo de energía, ha ido aumentando poco a poco hasta llegar a un ratio de alrededor de un 80% en paneles monitorizados. Sin embargo, un rendimiento completo todavía no es posible y se pierde un 20% de la energía producida. Detrás de estas pérdidas se encuentran diversas causas, como la rotura de cables, degradación inducida potencial, crecimiento de vegetación, suciedad en los paneles, etc. Algunos de estos problemas no solo reducen el rendimiento de los paneles solares, sino que reducen también su vida útil [3].

Mediante la monitorización de los paneles solares se puede reducir esa pérdida del 20% de energía, sin embargo, el problema principal de la monitorización solar actual, es que para poder medir en un panel hay que desconectarlo del *string*, dejando de producir energía durante ese tiempo. Otro de los problemas, es que depende mucho del tiempo atmosférico del momento. Por ello, acaba siendo contraproducente la monitorización [4].

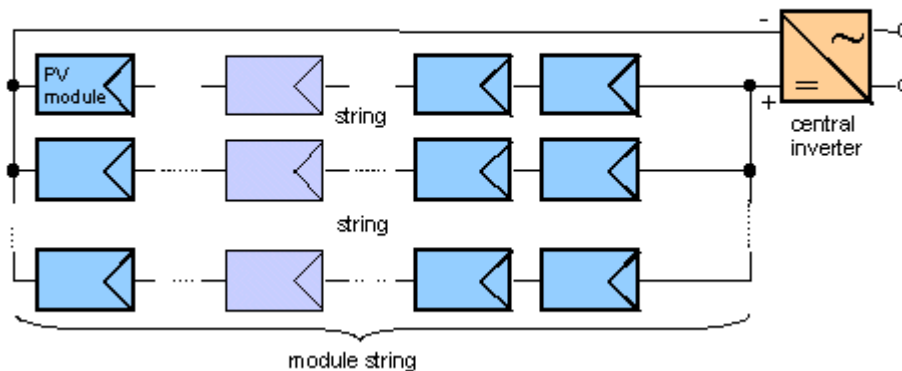


Figura 3. Instalación solar fotovoltaica.

Se pueden medir muchos parámetros para monitorizar los paneles fotovoltaicos, pero normalmente se reducen a dos eléctricos, voltaje y corriente; y dos del entorno, irradiación solar y temperatura. Estas medidas se obtienen a distintos niveles: planta, *string* y panel individual. La idea en cualquier tipo de monitorización es que cuando haya un problema se descubra lo más rápido posible, y se sepa en que módulo se ha producido. En las mediciones a nivel de planta y a nivel de *string*, que resultan más baratas que las de módulo a módulo; no se determina en que módulo se da el problema, generando a largo plazo pérdidas sustanciales.

Los métodos para monitorizar a nivel de módulo son más precisos, ya que cada módulo es caracterizado y cualquier fallo se reconoce rápido. El problema en estos casos aparece al tener que desconectar el módulo para hacer las medidas. El coste de la desconexión de un módulo es grande, ya que se desconecta todo el array del que forma parte, dejando de producir energía durante ese tiempo.

Por eso se busca un método alternativo para monitorizar la instalación fotovoltaica, que incluya una monitorización modulo a modulo, pero con un coste reducido.

Actualmente la monitorización del sistema se hace mediante un sensor, que se encarga de llevar el panel hacia cortocircuito, tomar medidas y luego lo lleva hacia circuito abierto y toma medidas, así se obtienen detalles de la curva I-V del panel solar. Todo el proceso debe tardar un tiempo reducido por panel, para que no cambien las condiciones actuales (que aparezca una nube en el cielo y tape el panel, por ejemplo), estos datos no superan 1 Kbit de información. Las medidas del sensor y la comunicación de los datos no deben superar el segundo de duración por panel.

Tras conocer todos los detalles del proyecto, se procede a explicar los distintos sistemas de comunicación que se pueden usar, con sus ventajas y desventajas para este proyecto. Principalmente se tratan las comunicaciones inalámbricas, comunicación serie y comunicación a través de la red eléctrica.

2 Objetivos y alcance del proyecto

El objetivo del proyecto es el de diseñar y cambiar el sistema de comunicaciones. Para ello se tienen una serie de características de diseño. A parte del diseño de las comunicaciones, aprovechando que hay que adaptar la placa final, se rediseña la placa reduciendo sus dimensiones. Se deben tener algunas características del proyecto en cuenta para llevar a cabo el trabajo:

- Precio final de la placa reducido
- Tiempo de procesado de información por panel menor de 1 segundo
- La alimentación proviene del panel, así que el consumo tiene que ser bajo
- Aprovechando el rediseño PCB, reducción del tamaño final

Se debe mantener un precio bajo para que el producto final sea competitivo y viable su producción.

El tiempo que se tarda en hacer los ensayos sobre el panel repercute en las condiciones iniciales del entorno, no se puede tardar mucho porque éstas cambiarían. Las comunicaciones son a 9600bps, con un tamaño menor de 1 kbit de datos. Por lo tanto, el punto más lento del circuito es el sensor y todo el proceso no supera el segundo de duración por panel.

El consumo es un punto importante, debido a que la energía con la que se alimenta la placa proviene de la generada por el panel, por tanto, el circuito debe mantenerse al mínimo coste energético.

Que el circuito tenga pocos componentes no es uno de los objetivos más importantes, está unido a los objetivos de la reducción de tamaño y precio, pero tampoco afectan mucho porque no son componentes de potencia; que son más costosos y consumen más. La reducción de tamaño de la placa es una cuestión práctica, porque con las dimensiones actuales de la placa se necesitan cajas excesivamente grandes, ocupando demasiado sitio en la instalación. Esas cajas se sustituirán por unas más pequeñas, además de no necesitarse más el cableado extra del RS485.

A largo plazo, se busca que gracias a el cambio de comunicación RS485 a PLC y la reducción de tamaño de la placa, convierta el producto final en una alternativa a las opciones de monitorización que a día de hoy se encuentran en el mercado.

3 WBS

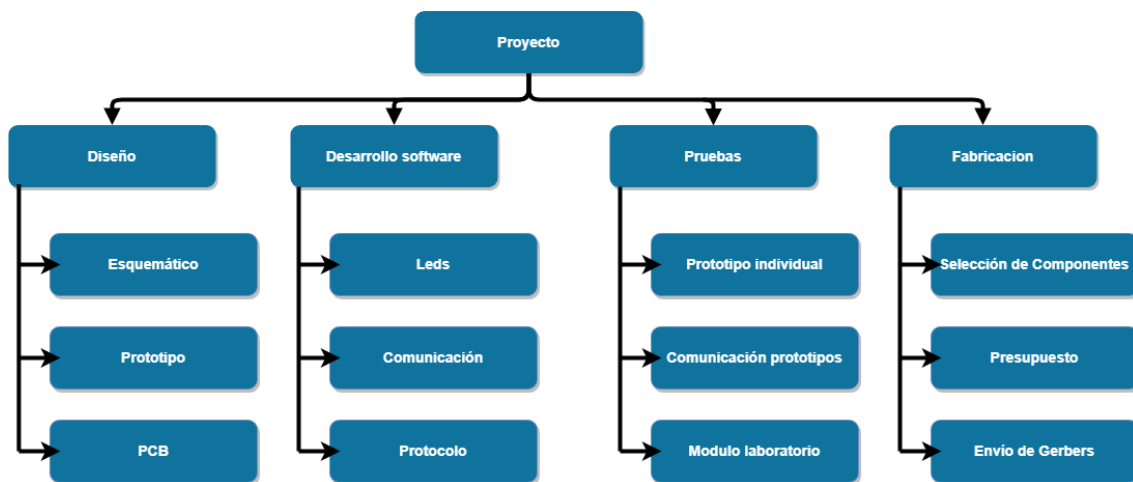


Figura 4. WBS del proyecto

El WBS del proyecto divide toda la estructura del trabajo en 4 bloques, cada uno de ellos marca un punto importante del proyecto final.

El primer bloque es el diseño, que incluye el diseño del esquemático, al inicio del proyecto; el diseño del prototipo, que permite probar el funcionamiento del circuito de comunicaciones; y finalmente, se hace el diseño del PCB, dejando todo preparado para su posterior fabricación.

En el segundo bloque se encuentra el desarrollo software, que se compone del encendido y apagado de los leds cuando se comunican datos, también es para aprender a manejar el programa con una tarea simple; la comunicación correcta de información entre dos placas y un protocolo que determine las normas de la comunicación.

El tercer bloque está compuesto por las pruebas para determinar que todo funciona. En un inicio mediante el prototipo que envía y recibe su propia información, posteriormente se utilizan dos prototipos iguales y se comprueba la correcta comunicación que la comunicación. Por último, dentro del laboratorio se usa un módulo solar entre los prototipos para ver si se transmite información.

El último paso del proyecto es la fabricación, a lo largo de todo el trabajo se han ido seleccionando y actualizando todos los componentes necesarios para el proyecto en el BOM (*Bill of Materials*). Se hace un presupuesto que recoge los gastos de los trabajadores y el coste general del proyecto. Se deja todo preparado para que cuando sea necesario se envíen los *gerbers* (formato de archivo para la fabricación de circuitos impresos) a una empresa de fabricación.

4 Beneficios que aporta el trabajo

Para conocer los beneficios que aporta el proyecto hay que reconocer primero las causas de la realización del proyecto. Se ha diseñado y montado un sistema de monitorización de paneles solares que funciona de manera correcta, pero con el montaje actual, el precio final de la instalación del sistema junto con el añadido de cableado extra encarece el producto final. Además, la comunicación mediante PLC que se plantea, tiene la ventaja de ser válida para otro proyecto diferente, con el mismo circuito de comunicaciones y aplicando algún ajuste de tensión se podría reutilizar el diseño.



Figura 5. PCB del sensor con comunicaciones mediante RS485

En la figura 5, se puede ver la caja donde se encuentra el PCB del proyecto de monitorización completo. El nuevo sistema de comunicación va a permitir que se eliminen los cables de RS485 que aparecen en la imagen, reduciendo en gran medida las dimensiones de la tarjeta y de la caja que la contiene. Gracias al cambio, también se consiguen suprimir los aisladores necesarios para el mantenimiento del apartado de RS485, que con las tensiones de los paneles solares (aumentando 35-40 V por modulo) eran necesarios. Al eliminar los cables de RS485 se consigue el no tener que andar abriendo la caja cada vez que hay que hacer un cambio en el sensor.

La instalación del sistema resulta mucho más fácil. Todo el añadido de facilidades repercute en el coste final que es al fin y al cabo el apartado más importante del circuito.

En un futuro, debería poderse incluir la circuitería del sistema completo de serie en los paneles solares.

5 Descripción de requerimientos

Para llevar a cabo el proyecto se requiere, en primer lugar, un programa para el diseño del circuito inicial, en este caso se ha usado el *Orcad de Cadence*. Este programa incluye muchas herramientas, como es el *Pspice*, que se utiliza en la primera parte del proyecto para simular el correcto funcionamiento del circuito.

Para probar el prototipo se ha utilizado una tarjeta de desarrollo de *Microchip*, DV164139-2, con el microcontrolador pic16f1459, como se puede ver en la siguiente figura.

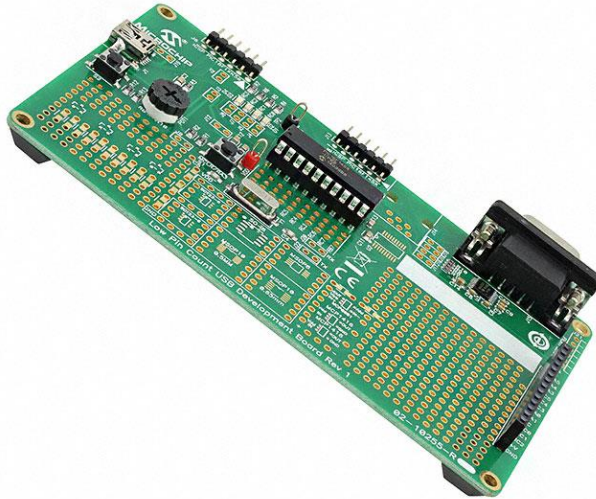


Figura 6. Tarjeta de desarrollo DV164139-2, de Microchip.

Para poder llevar a cabo las pruebas se necesitan 2 prototipos, por lo que se precisa otra placa de la misma clase que la anterior. En las dos se monta el mismo circuito.

Para el diseño del software se hace uso del programa *MPLab X*, de *Microchip*.

Para poder diseñar el hardware final se necesitan: un programa de diseño de footprints, *Padstack editor*; y uno de diseño de PCB, *Allegro PCB editor*.

Todos los programas de diseño pertenecen a la misma familia, *Cadence*, incluidos los del diseño esquemático.

6 Análisis de alternativas y estado del arte

La función de este apartado es el análisis de las alternativas y estado del arte de las distintas tecnologías que se pueden usar para la comunicación del proyecto de monitorización. Se valoran las causas del cambio de la tecnología actual, razonando sobre las virtudes que tienen otras tecnologías de comunicación.

Primero se empieza con las comunicaciones inalámbricas, ya que fue con este tipo de comunicación con la que se comenzó a hacer la intercomunicación del proyecto de monitorización. En un inicio se utilizan las bandas ISM (*Industrial, scientific and medical radio*), que son bandas de radio en unas frecuencias específicas reservadas para usos industriales, médicos o científicos. Se elige este tipo de tecnología de comunicaciones porque su implementación es sencilla. Solo se necesita añadir un componente más, como el *Anaren A110LR09C*, que funciona a una frecuencia de 868 MHz, conectándose al micro mediante SPI (*Serial Peripheral Interface*) [9].

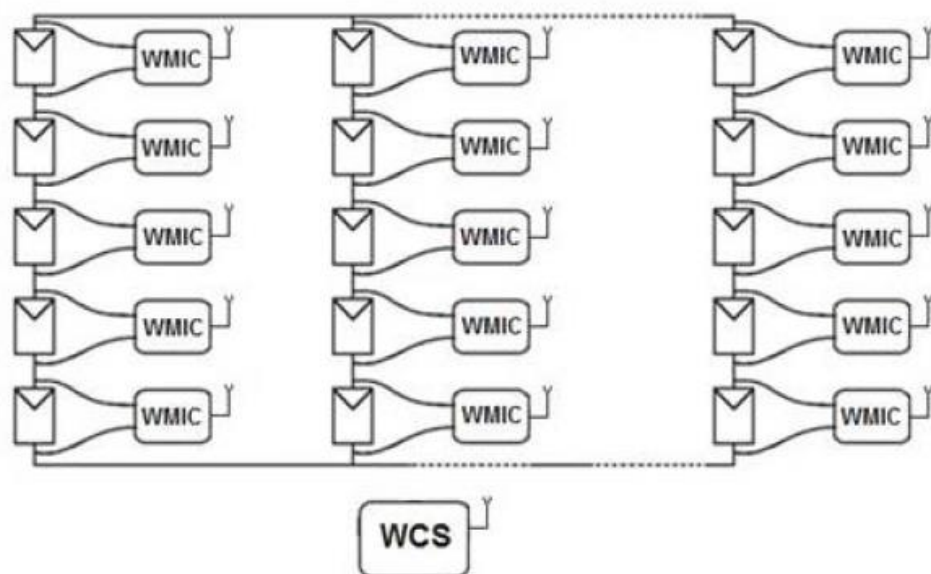


Figura 7. Sistema de monitorización con comunicación vía inalámbrica

En un comienzo, se desarrolla el sistema de monitorización mediante comunicaciones inalámbricas [10], en la que se monitoriza la curva I-V de cada módulo, con el WMIC (*Wireless Module Interconnection Circuit*) de la figura 7, que se comunica mediante comunicación inalámbrica con el WCS (*Wireless Control System*), que es el encargado de controlar los datos de todo el sistema.

El principal problema que presenta esta alternativa es que cuando nos enfrentamos a una instalación solar de tamaño considerable, con este tipo de comunicaciones de baja potencia, se tienen muchas interferencias. Para poder solucionar ese problema hay que dotar al circuito

de una potencia mayor. El sistema de monitorización funciona con la energía generada por el panel, por lo tanto, no interesa aumentar la potencia.

La siguiente alternativa a estudiar es el uso de conexiones mediante cable, en este caso RS485, que se utiliza para la transmisión de datos a alta velocidad. La comunicación es semidúplex, es decir, se hace en una línea en la que todos están escuchando y solo uno puede responder cada momento, en la figura 8 se observa cómo es una conexión de RS485 con 2 hilos [11].

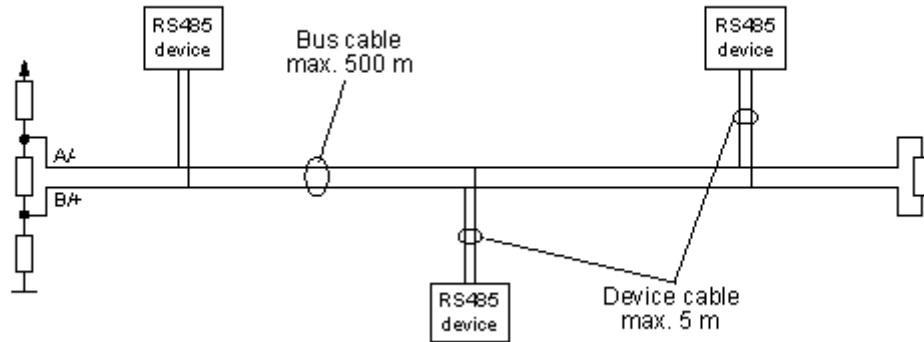


Figura 8. Conexión RS485 con 2 hilos.

El sistema funciona de manera simple, cada panel solar se conecta a la placa de monitorización, para alimentarse y hacer las medidas, mientras tanto, los PCB se conectan entre sí a través de un cable serie (RS485 en este caso). Una de las placas se tiene que conectar a un ordenador que se encarga de la gestión de todo el sistema.

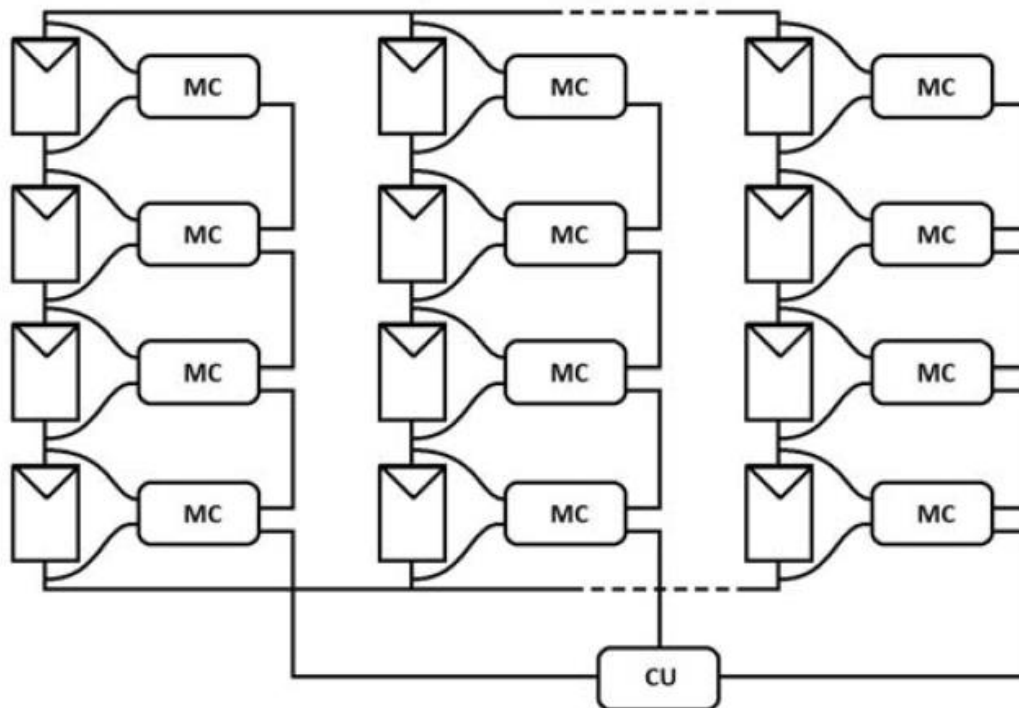


Figura 9. Esquema del sistema de monitorización comunicado con RS485

Cuando hay que tomar medidas, a cada sistema de monitorización (MC, *Measure Control*) le llega la orden de variar los valores de tensión y corriente, llevando primero hacia cortocircuito el panel, tomando medidas; y posteriormente, variando hacia circuito abierto.

Las medidas se envían hasta llegar al PC (CU, *Control Unit*) que se encarga de reconstruir la curva I-V real del módulo para ver si su funcionamiento no es el óptimo. Para el funcionamiento correcto de la comunicación, se tienen que añadir relés, que se usan para poder numerar cada MC. El relé se encarga de bloquear la comunicación mecánicamente, pudiendo así gestionar individualmente la numeración de los MC. Aparte del relé, se tienen que añadir aisladores para poder controlar los valores definidos de tensión por la tecnología RS485.

A continuación, se muestran imágenes de la instalación presente en el tejado de la escuela, formada por 12 paneles solares, de 100 W cada uno. El monitorizado está montado en los 3 primeros paneles solares.



Figura 10. Paneles solares instalados en el tejado de la escuela

En la siguiente imagen se muestra la instalación fotovoltaica por la parte trasera. Es ahí donde se hacen todas las conexiones. Se observa el principal problema de la comunicación vía RS485, puesto que hay que conectar en cada caja 6 conexiones diferentes; 2 de comunicaciones y 4 de los paneles solares. En una instalación de solo 3 paneles ya resulta tedioso el colocar las cajas, comprobando que las conexiones están en orden. Pero para el caso de una granja solar real, que cuenta con miles de paneles solares, este proceso de conexión puede resultar imposible.



Figura 11. Sistema montado, señalizando los cables de RS485

En la última figura sobre RS485, la figura 12, se presentan varias fotos realizadas en el tejado que enseñan toda la instalación necesaria para poder utilizar este tipo de conexión. Como en el caso anterior, el llevar a cabo en una planta solar fotovoltaica la comunicación vía RS485 requiere un costo mucho mayor al que se va a ahorrar por la monitorización.



Figura 12. Fotos de la instalación necesaria de RS485.

La última de las posibilidades de comunicación entre los paneles solares a destacar es la comunicación a través de las líneas de alimentación eléctrica, a la que comúnmente se refiere como PLC (*Power Line Communications*). El funcionamiento del PLC es muy parecido al cable serie, sin necesitar la instalación de ningún cableado extra, ya que usa los propios de los paneles fotovoltaicos para la alimentación. Esta solución necesita de una etapa de comunicación ente la instalación fotovoltaica y el ordenador o equipo encargado del procesado de datos. Para ello, se ha pensado en utilizar un chip de comunicaciones inalámbricas en algunos puntos de la instalación.

El PLC es una tecnología que permite el envío de datos a través de los cables de alimentación de los circuitos ya existentes. Es una tecnología con posibilidades infinitas, puesto que todo elemento electrónico necesita medios de alimentación y la mayoría utiliza algún tipo de cableado. En el campo de los PLC se reconocen dos categorías diferentes dependiendo del rango de frecuencias que se manejen, narrowband PLC, que funciona a frecuencias menores, con bajas velocidades de transmisión de datos y un rango de varios kilómetros. En cambio, el broadband PLC, funciona a frecuencias altas, con altas velocidades de transmisión y a rangos de distancia cortos [6].

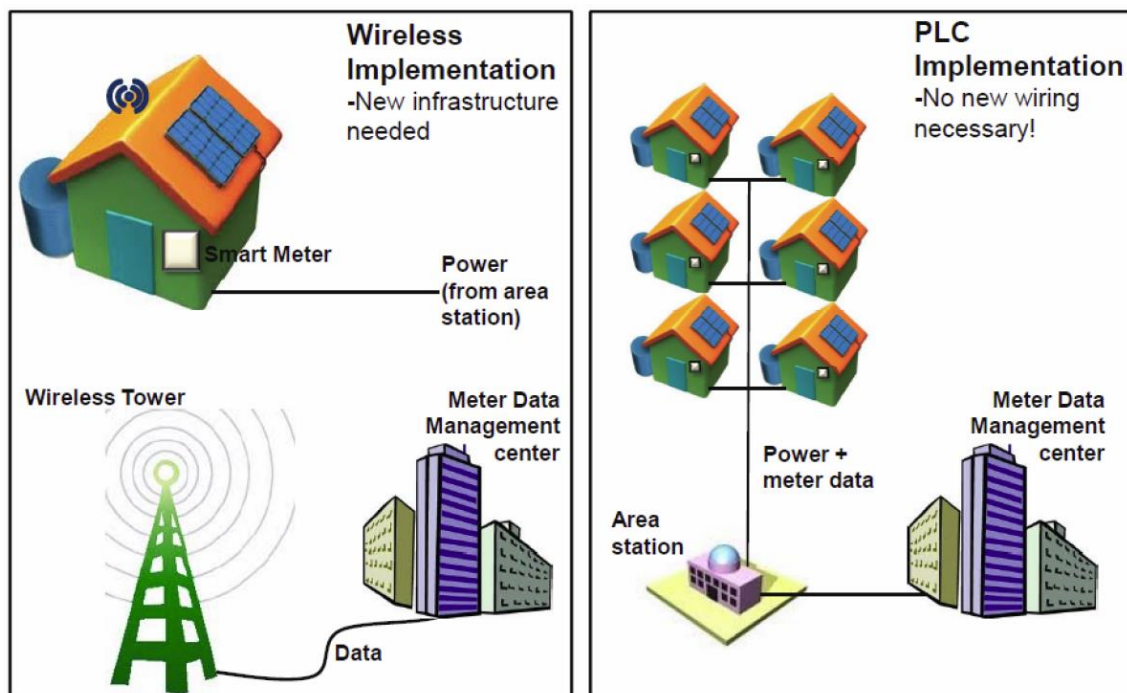


Figura 13. Comparación instalación PLC y comunicación inalámbrica.

El PLC también se puede clasificar dependiendo de si funciona en líneas de DC (Corriente continua) o líneas de AC (Corriente alterna). Su uso en líneas de DC se limita principalmente a las comunicaciones en el interior de vehículos a través de su cableado de alimentación, reduciendo parte del cableado necesario además de su peso.

El PLC actualmente tiene un uso extendido en hogar, su función es la de llevar internet a través de la red eléctrica a donde se quiera dentro del domicilio. En el proyecto se podría optar a

utilizar un sistema PLC de los que hay en el mercado. En la figura 14, se presenta el modelo más vendido en Amazon del PLC, de la marca TP-Link, que ronda los 50€ de precio; todo el circuito de monitorización junto con el PLC debe tener un coste menor de 5 €, por lo que se descarta la compra de cualquier PLC ya diseñado.



Figura 14. PLC comercial

El funcionamiento del PLC es bastante simple, a un lado de la comunicación se modulan los datos que se van a enviar a través de los cables de alimentación del circuito, y al otro lado, el receptor demodula los datos y los procesa.

La modulación que más se usa cuando el PLC funciona en redes eléctricas es la OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), debido a que permite codificaciones más avanzadas; protegiéndose en mayor medida ante las bandas de la atenuación con la frecuencia, variaciones con la impedancia, multicamino y condiciones de ruido [7].

El problema con la modulación OFDM es su coste, que es elevado por ser su modulación y programación compleja. En el proyecto actual una modulación más simple es suficiente.

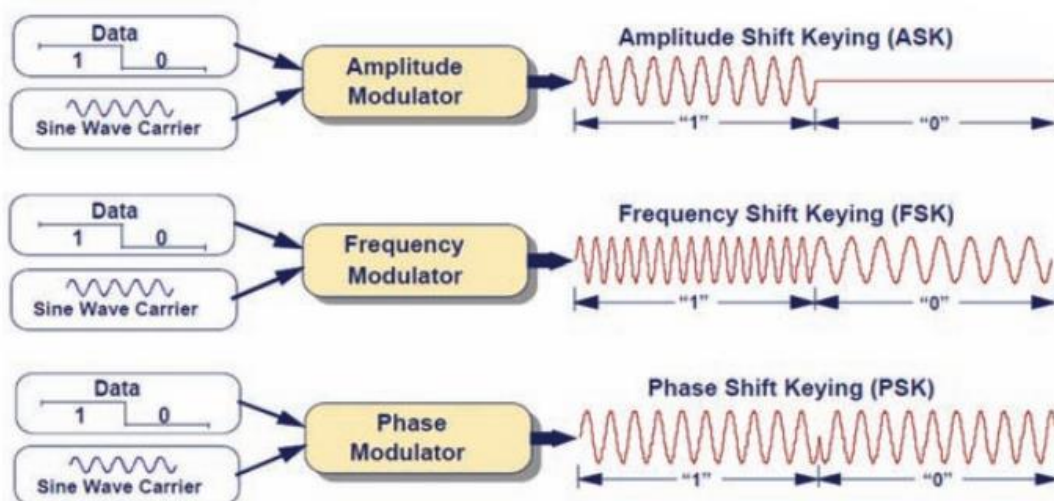


Figura 15. Diferentes tipos de modulaciones.

En la figura 15, se pueden observar diferentes formas de modular una señal de manera sencilla, así que a partir de ahora se enfoca el análisis en modulaciones de este tipo con comunicaciones solares.

Para la modulación de las señales del PLC se utiliza una modulación ASK (*Amplitude shift keying*) del tipo OOK (*ON-OFF Keying*), que consiste en el envío de la portadora cuando la moduladora está a '1' y no enviar nada si la moduladora está a '0'.

También se tiene que tener en cuenta que uno de los objetivos del proyecto de monitorización, es que algún día el panel fotovoltaico incluya de serie este sistema, por lo que el tamaño actual se debe reducir, y solo por el cambio a PLC, ya se reduce notablemente el tamaño del circuito impreso.

Otra de las características que se buscan en el proyecto es el *Plug & Play*, que tras la instalación no se necesite configurar nada o muy poco y esté listo para su utilización. Para ello se hace una numeración dinámica de los sistemas de monitorización de los paneles fotovoltaicos en el encendido. Actualmente se lleva a cabo mediante un relé, que bloquea el paso de datos de un sistema a otro si este no está numerado. Con la comunicación vía PLC se elimina este relé porque no se necesita bloquear la comunicación entre los sistemas, ya que la comunicación solo llega de un nodo al siguiente, a diferencia de la forma actual que tiene a todos los sistemas escuchando.

En el artículo de Han [8], se encuentra un ejemplo de instalación solar con PLC para las comunicaciones. Es una instalación pensada para uso residencial de 16 paneles de 400 W, con 2 strings de 8 paneles cada uno y en el que cada panel tiene un PCB para la monitorización de los datos. En este diseño añaden una placa maestra de nexos de comunicación entre las placas y el servidor; permitiendo la visualización de los datos del sistema a través de una aplicación.

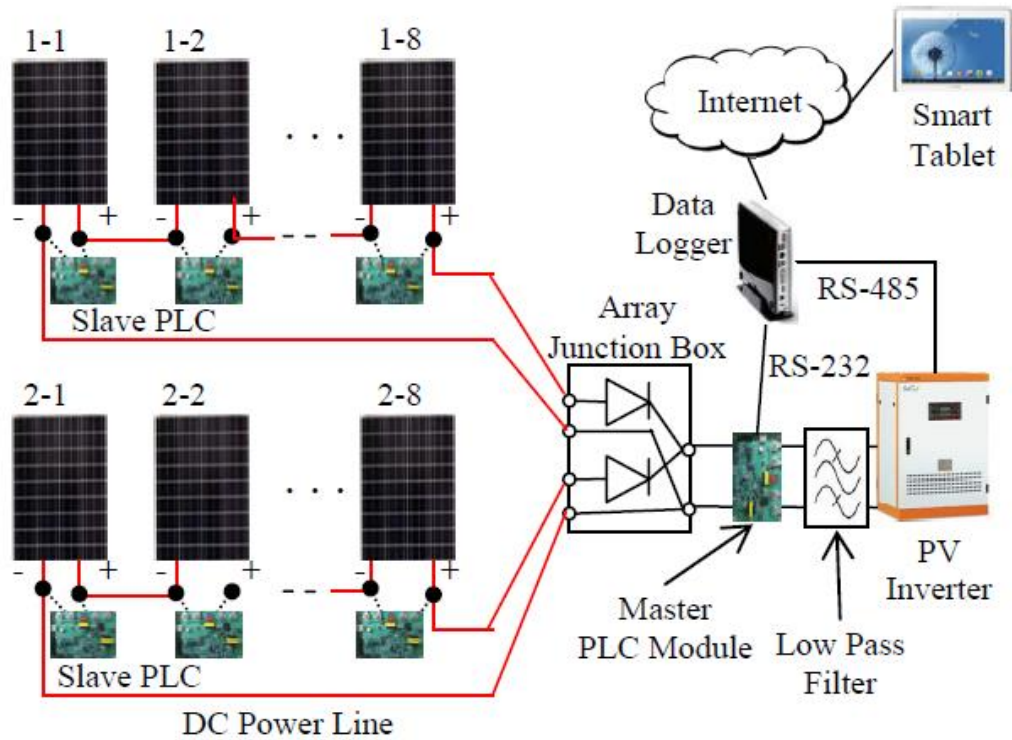


Figura 16. Sistema de monitorización con comunicación vía PLC.

Resulta muy útil conocer la información de este artículo, ya que el PLC que implementa el diseño del proyecto va a ser muy parecido.

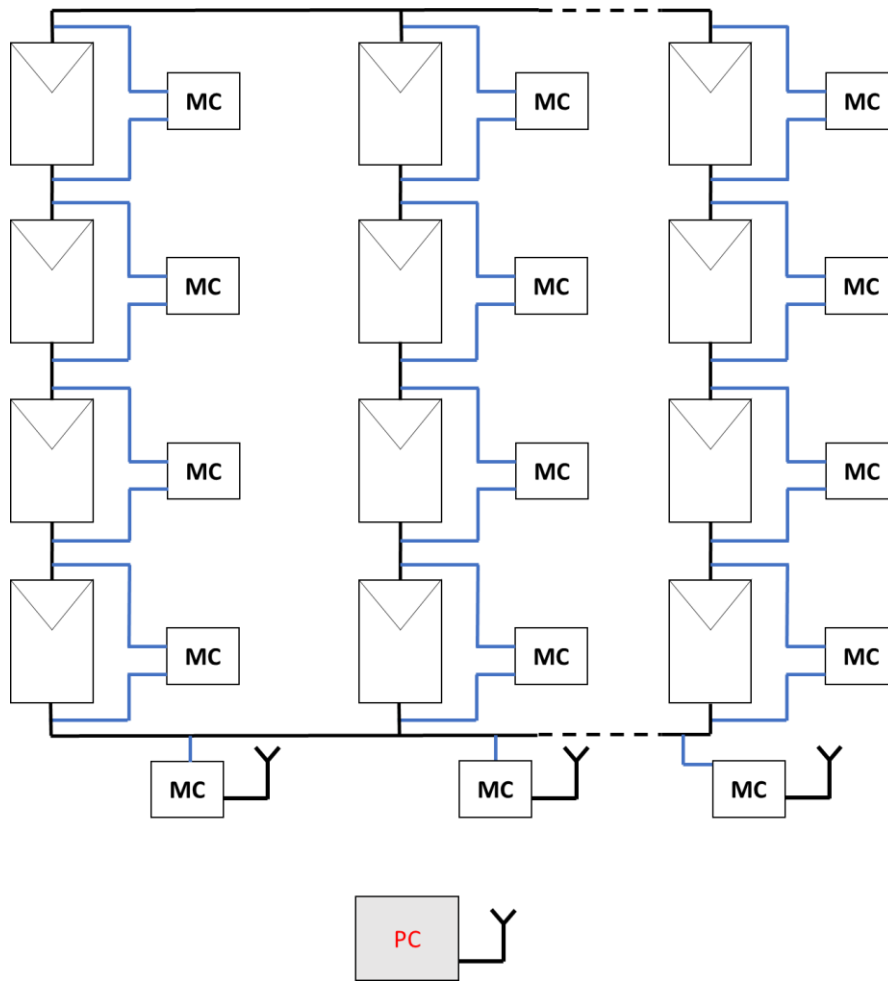


Figura 17. Esquema de comunicación implementando PLC.

En el esquema se observa como este tipo de comunicación no es solo PLC, ya que usa las comunicaciones inalámbricas para la comunicación con el PC. Una de las ventajas de este sistema es que todas las tarjetas tienen el mismo diseño, solo que en algunas se monta el chip de comunicaciones (una al inicio de cada *string*) y en el resto no. En grandes instalaciones, no presenta problemas de coste extra por el cableado ni problemas de interferencias de señal, porque solo algunas tarjetas implementan comunicaciones inalámbricas.

7 Análisis de riesgos

En este apartado se analizan los posibles riesgos que tiene este proyecto, determinando planes de contingencia mediante los que paliar posibles problemas. Los principales problemas que pueden surgir en este proyecto son los retrasos, debido a problemas o que algo no funcione correctamente en el diseño final; sobre todo en las pruebas finales. El otro problema que hay que estudiar pudiendo ser un riesgo es que la comunicación PLC no funcione cuando el diseño esté completo.

Los riesgos expresados se pueden caracterizar por los siguientes motivos:

1. El prototipo de la placa no funciona correctamente.
2. Retrasos debido al proceso de fabricación.
3. Retrasos en los envíos.
4. Los circuitos impresos no superan las pruebas finales en placa fotovoltaica.

Estos problemas no tienen el mismo impacto individualmente, por ejemplo, el que se retrase el pedido por el proceso de fabricación o por envío es un riesgo que a la totalidad del proyecto afecta muy poco, debido a que los tiempos de entrega final no están muy marcados. En cambio, el impacto de los otros riesgos es mayor, pudiendo llegar a plantear un rediseño de parte del PLC.

Un fallo en el circuito impreso podría llevar a aumentar el coste final. Es importante tener en cuenta que si el coste aumenta en exceso podría llegar a ser contraproducente la monitorización del panel, por ser mayor el coste que el beneficio.

Es por ello necesario que se trabaje correctamente, minimizando las posibilidades de ocurrencia de los riesgos, aunque sea imposible su eliminación completa.

Los riesgos que afectan al posible retraso en algún apartado del envío o fabricación no son tan importantes, puesto que el tiempo del proyecto acepta esos riesgos y se puede desarrollar mejor el software mientras ocurren.

La siguiente figura muestra la matriz de clasificación de riesgos que afectan al proyecto:

		IMPACTO			
		Muy bajo (0,05)	Bajo (0,15)	Moderado (0,3)	Alto (0,7)
PROBABILIDAD	Raramente (0,1)	Bajo 0.005 (3)	Bajo 0.015	Bajo 0.03	Moderado 0.07
	Difícilmente (0,2)	Bajo 0.01 (2)	Bajo 0.03	Moderado 0.06	Moderado 0.14 (4)
	Probable (0,4)	Bajo 0.02	Moderado 0.06 (1)	Moderado 0.12	Alto 0.28
	Posible (0,6)	Moderado 0.035	Moderado 0.09	Alto 0.21	Alto 0.42

Figura 18. Matriz probabilidad-impacto del proyecto.

Para acabar, se dispone de unas medidas como posible plan de contingencia para minimizar las amenazas:

1. Que el prototipo no funcione en algunos puntos, es bastante común, por lo que lo ideal sería que cada paso que se avance en el proyecto se documenten los cambios efectuados. Así en caso de dejar de funcionar después de avanzar en el proyecto se pueda mirar que cambios han provocado eso y volver atrás.
2. Que haya retrasos en el proceso de fabricación al final no depende del diseñador del proyecto ni puede hacer mucho para cambiarlo, porque se encarga una empresa externa. En cambio, se puede hacer el pedido ajustando el tiempo en la planificación, o lo que es lo mismo, que se de algún día de margen. También se puede contratar algún seguro para que la empresa se ciña a los tiempos estipulados y lleguen a tiempo.
3. La contingencia de este riesgo es parecida a la anterior pero aplicada a los envíos en vez de la fabricación. Se pueden aplicar las mismas medidas que en el punto anterior: contratar seguros y envío urgente. Si la empresa que fabrica los PCB está a una distancia corta se puede recoger allí, quitándose el problema de los intermediarios, aunque es un caso poco probable.
4. Este es el mayor riesgo del proyecto, el que ocurra un error que no se pueda corregir sin volver a rediseñar. La diferencia de este riesgo con el primero de la lista es que se da al final, cuando la vuelta atrás exige desechar placas fabricadas. Para evitar esto vale seguir el plan de contingencia del primero y controlar las etapas del proyecto. En

este caso se podría mandar todo el proyecto a que lo revisara alguna persona o empresa ajena, así se reducen aún más las posibilidades de un error crítico final.

8 Descripción de la solución propuesta y diseño

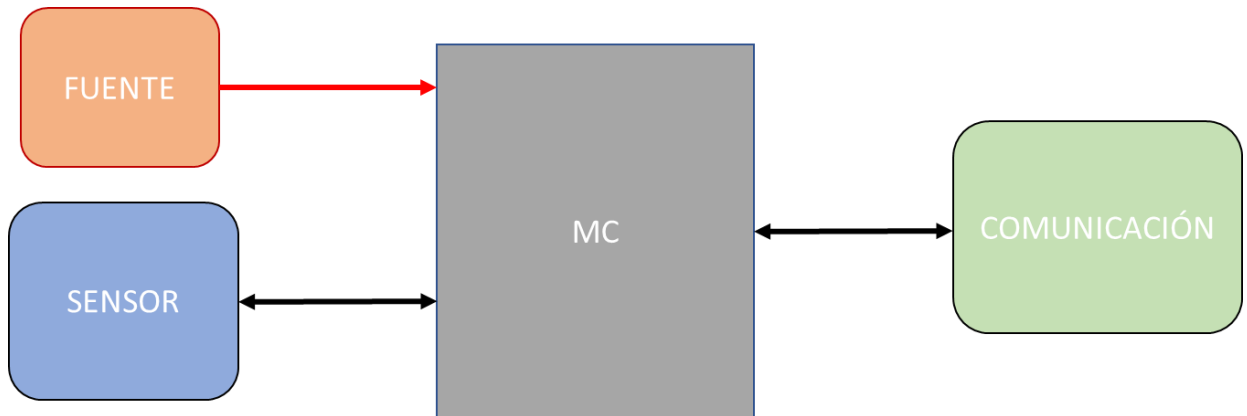


Figura 19. Diagrama de bloques sistema completo.

El diagrama de bloques del sistema completo consta de 4 bloques con una función específica para cada uno de ellos.

El bloque principal, el MC, es el bloque donde se encuentra un solo elemento, el microcontrolador, que es el cerebro de todo el proyecto encargándose del procesado de la información y el hacer funcionar el resto de bloques.

Para que funcione el MC, se necesita que la alimentación sea de un valor específico. Para ello, se encuentra el bloque de fuente, que transforma la tensión del panel fotovoltaico a un valor que permite el funcionamiento de todo el circuito. Transforma la tensión de 40-35 V a los 3.3 V en los que trabaja el circuito.

El bloque del sensor es el que se encarga de modificar los valores de tensión y corriente del panel fotovoltaico. También toma medidas que transmite al MC.

Por último, está el bloque de comunicaciones, mediante el cual se envían o reciben los datos adquiridos del sensor y se reciben las órdenes del PC.

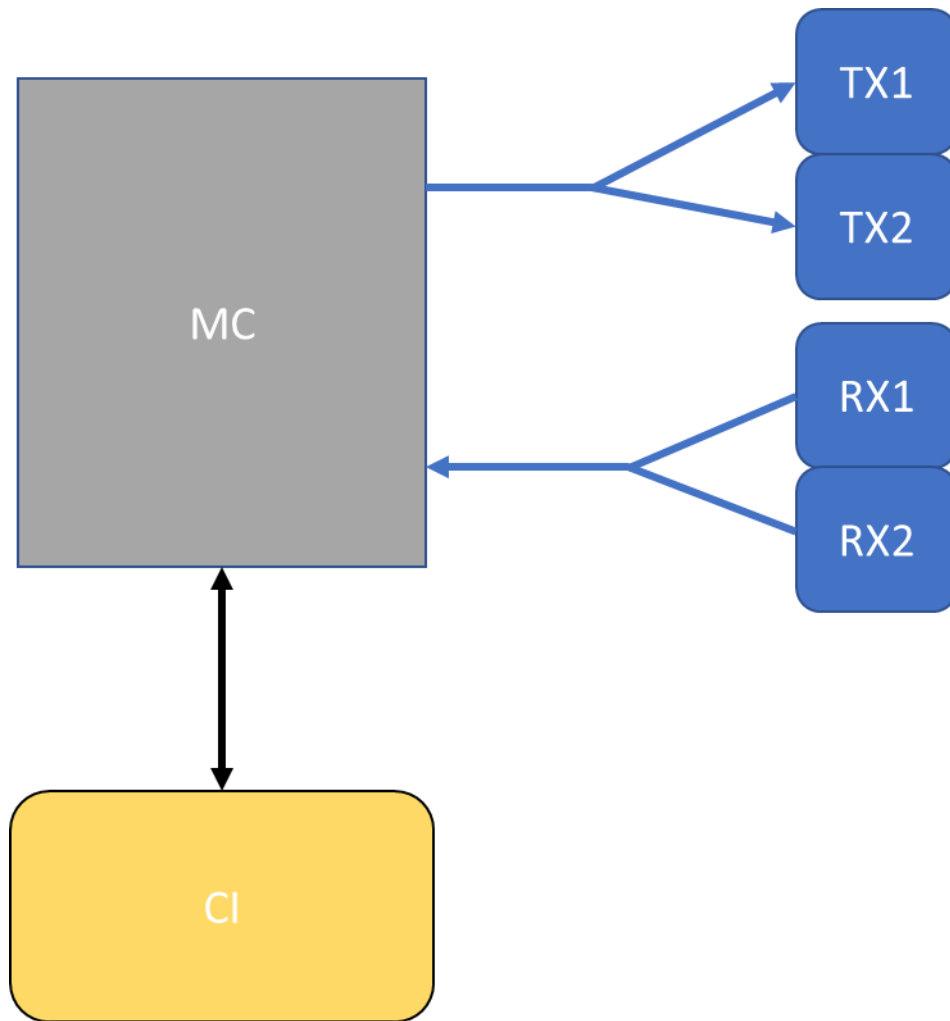


Figura 20. Diagrama de bloques del apartado de comunicaciones.

El bloque de comunicaciones está compuesto por 4 bloques: la parte del micro, que ya se ha comentado; el bloque CI (Comunicaciones inalámbricas), el bloque TX (Transmisión) y el bloque RX (Recepción).

El bloque CI es el encargado de las comunicaciones inalámbricas, se monta solo en algunos circuitos impresos de todo el sistema fotovoltaico. Se compone de un único chip conectado al microcontrolador directamente, con la función de comunicarse con el PC.

El bloque TX tiene como función el envío de información a través de la línea de alimentación de los paneles solares. En este proceso se distinguen dos etapas previas al envío, se modula la comunicación primero, y posteriormente se aumenta su valor de tensión. Este bloque está separado en dos, para permitir la comunicación en las dos direcciones posibles dentro del *string* solar.

El propósito del último bloque de comunicaciones, el RX, es la recepción de información. Se reciben datos a través de la línea de alimentación, se demodulan mediante un amplificador operacional, llegando finalmente al microcontrolador. En este apartado se reciben

comunicaciones de los nodos solares adyacentes al actual, pero no se sabe de cuál de los dos procede. Si se quiere saber el origen se debe incluir en la trama de información.

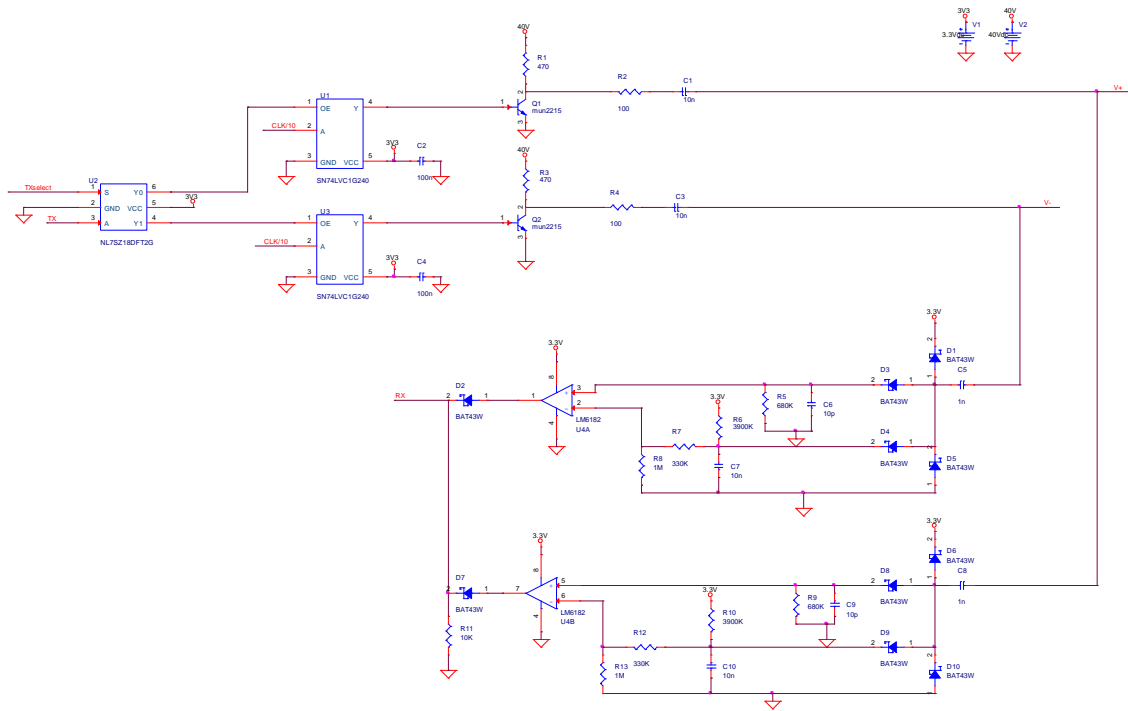


Figura 21. Diseño esquemático de las comunicaciones.

Aquí se presenta el diseño de las comunicaciones, donde se tienen las señales TXSEL, TX y RX que se conectan al microcontrolador que no aparece en esta imagen.

La explicación de este circuito junto con la de los elementos que lo conforman se encuentra en el apartado 2 del documento técnico adjunto del trabajo fin de grado.

METODOLOGÍA

1 Descripción de tareas

EDT	Código	Nombre	Duración	Predecesor
1	P.T. 1	Preparación Proyecto		
1.1	T.1.1	Licencias	2 días	
1.2	T.1.2	Prototipo	2 días	T.1.1
2	P.T. 2	Diseño		
2.1	T.2.1	Esquemático PLC	7 días	T.1.2
2.2	T.2.2	Circuito Completo	11 días	T.5.3
2.3	T.2.3	Footprint PLC	3 días	T.2.2
2.4	T.2.4	PCB Final	16 días	T.2.3
2.5	T.2.5	Bill of Materials	21 días	T.2.2
3	P.T. 3	Desarrollo Software		
3.1	T.3.1	Comunicación PLC	11 días	T.5.1
3.2	T.3.2	Protocolo PLC	10 días	T.3.1
4	P.T. 4	Montaje		
4.1	T.4.1	Prototipo PLC	5 días	T.3.1
4.2	T.4.2	Adaptaciones	3 días	T.3.2
5	P.T. 5	Pruebas		
5.1	T.5.1	Simulaciones PLC	3 días	T.2.1
5.2	T.5.2	Comunicación PLC	5 días	T.4.1
5.3	T.5.3	Panel PV y PLC	5 días	T.4.2
6	P.T. 6	Fabricación		
6.1	T.6.1	Archivos Gerber	1 día	T.2.4
6.2	T.6.2	Presupuestos	2 días	T.2.5
6.3	T.6.3	Preparado para Fabricar	0 días	T.6.2

Figura 22. Tareas del proyecto.

Preparación proyecto: Primer paso del proyecto, la función de este apartado es revisar que se va a necesitar para la consecución del mismo y efectuar preparativos. La duración de este paquete es de **4 días**.

- **Licencias:** Se revisa que el software necesario para llevar a cabo el proyecto está instalado y funcional en el ordenador de trabajo. Duración estimada: **2 días**.
- **Prototipo:** Adquisición de una placa de desarrollo, que incluya un microcontrolador con características similares al que se va a utilizar en la monitorización final, para llevar a cabo las pruebas de manera eficaz. Duración estimada: **2 días**.

Diseño: Etapa más importante del proyecto, diseño de las diferentes partes del circuito. Es el paquete más largo debido a que entre apartado y apartado se debe probar que funcione correctamente. La duración de este paquete es de **71 días**.

- **Esquemático PLC:** primer diseño del PLC, mediante Orcad, también se incluye en este apartado el tiempo que se le dedica a la búsqueda de información sobre PLC. Duración estimada: **7 días**.
- **Circuito completo:** Inclusión del diseño del PLC al sistema completo de monitorización, junto con actualización de los bloques del sistema. Duración estimada: **11 días**.
- **Footprint PLC:** Diseño en *Padstack editor* de los *footprints* de los componentes del diseño. Duración estimada: **3 días**.
- **PCB final:** Diseño de todo el circuito impreso de 4 capas mediante *Allegro*. Duración estimada: **16 días**.
- **Bill of Materials:** Lista con todos los componentes del circuito que se va actualizando con precios, referencias de fabricante y precio total. Duración estimada: **21 días**.

Desarrollo software: Apartado dedicado al desarrollo del software del proyecto, en MPLab X que luego se programa en el micro con Pickit 3. La duración del paquete es de **21 días**.

- **Comunicación PLC:** Desarrollo de una comunicación a través del cable de alimentación, cuando se recibe un dato vía PLC se enciende un LED. Duración estimada: **11 días**.
- **Protocolo PLC:** Software que implementa un protocolo para utilizar la comunicación PLC, con bits de sincronismo y bits de finalización. Duración estimada: **10 días**.

Montaje: Montaje de los componentes sobre el prototipo de acuerdo a los esquemas previamente realizados. La duración de este paquete es de **13 días**.

- **Prototipo PLC:** Primer montaje sobre la placa de desarrollo, con los componentes de los que se dispone en el laboratorio. Duración estimada: **5 días**.
- **Adaptaciones:** Cambios sobre el prototipo inicial después de haber probado el circuito para mejorar su funcionamiento. Duración estimada: **3 días**.

Pruebas: Apartado en el que se prueban los diseños, se detectan los fallos y se determinan los cambios idóneos para el circuito. La duración de este paquete es de **32 días**.

- **Simulaciones PLC:** Apartado dedicado a probar el funcionamiento del circuito diseñado antes de su montaje. Duración estimada: **3 días**.

- **Comunicación PLC:** Comunicación entre dos prototipos exactamente iguales para probar el sistema de comunicaciones. Duración estimada: **5 días**.
- **Panel PV y PLC:** Pruebas de la comunicación en el laboratorio con panel fotovoltaico entre los dos prototipos. Duración estimada: **5 días**.

Fabricación: Final del proyecto, lo que se busca en este apartado no es la fabricación en sí, sino que en el momento en que se tenga el circuito de monitorización preparado, el proceso de fabricación se pueda iniciar lo más rápido posible. La duración es de **4 días**.

- **Archivos Gerber:** Archivos necesarios para poder fabricar el PCB y que se obtienen una vez se ha acabado el diseño. Duración estimada: **1 día**.
- **Presupuestos:** Costes de fabricación del PCB, entre los que se incluyen los componentes, la placa y el emplazamiento. Duración estimada: **2 días**.
- **Preparado para fabricar:** Hito final, todo preparado para enviar a fabricar. Duración estimada: **0 días**.

2 Diagrama de Gantt

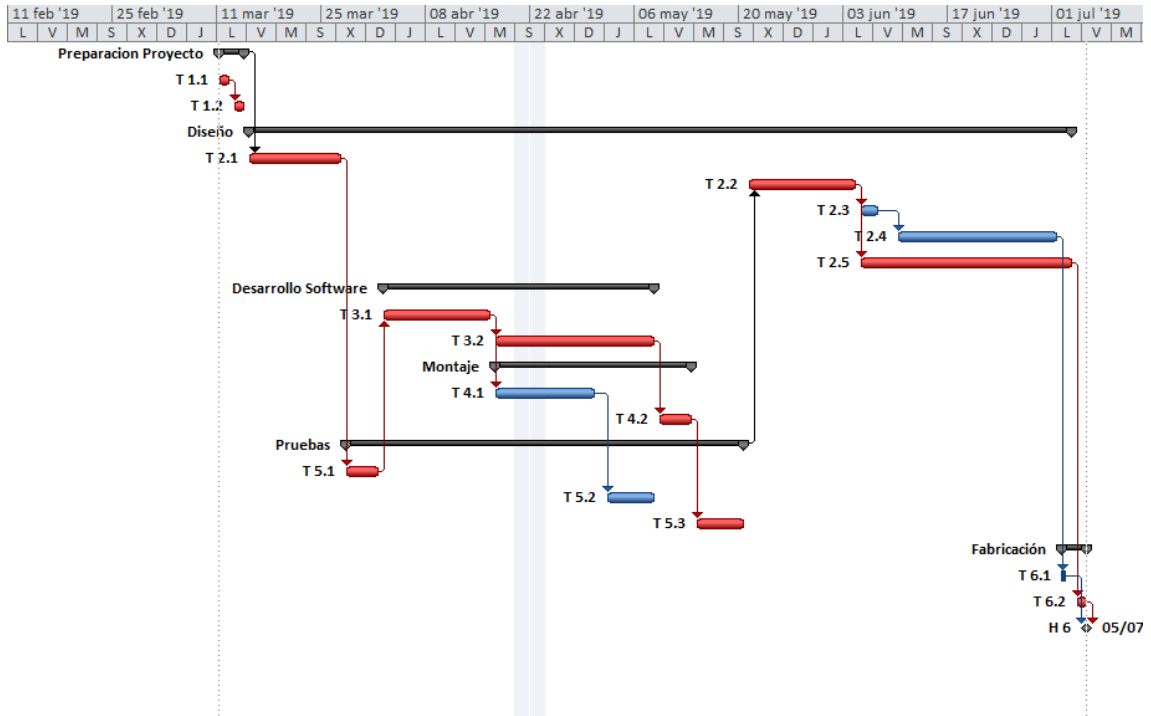


Figura 23. Diagrama de Gantt del proyecto.

3 Descripción de los resultados

En este apartado se comentan los resultados que se han obtenido en el proyecto. Estos resultados pueden dividirse en dos apartados generales: Simulación y pruebas.

Para ver los datos de las simulaciones hay que dirigirse al apartado 4 del documento técnico, para el de pruebas hay que dirigirse al 5.

Las simulaciones determinan que la tecnología del PLC funciona permitiendo la comunicación entre dos puntos diferentes. Hay que diseñar un protocolo que se encargue de solventar los problemas de pérdida de información en la recepción, pero se demuestra que se puede seguir con el diseño de las comunicaciones.

Las pruebas efectuadas en el laboratorio entre los dos prototipos, con el panel fotovoltaico incluido en el proceso, demuestran que el panel fotovoltaico funciona como un diodo, permitiendo la comunicación en una única dirección. Esto solo ocurre con el panel del laboratorio, en un módulo fotovoltaico real la comunicación no se atenúa de esa forma, por lo que requiere que se dupliquen las etapas de transmisión y recepción del PLC. Esto permite elegir a que panel fotovoltaico adyacente se envía la información.

Los resultados finales del proyecto permiten seguir adelante con la planificación, para más adelante fabricar nuevos prototipos y probar los diseños proyectados con una instalación real.

4 Plan de proyecto

La planificación del proyecto se lleva a cabo con el comienzo del diseño del circuito de comunicación vía PLC. Para ello es necesario el conocimiento de la tecnología de comunicación utilizada en las etapas previas.

El trabajo se ha planificado como un apartado dentro de un proyecto mayor, el de un sensor de monitorización solar de bajo coste. Su función es sustituir la tecnología actual por una más viable económicamente y de infraestructura.

Su planificación comienza con la contratación de alguien que se encargue del proyecto de comunicación. Se empieza conociendo el entorno de trabajo del sistema de monitorización solar. Al comienzo, se practica con los programas para diseñar la comunicación haciendo ejercicios simples en ellos. Mas adelante, cuando ya se tiene un conocimiento más amplio sobre el tema, se comienza a probar en el prototipo las posibilidades de comunicación que ofrece el PLC. Se prueba el prototipo en las circunstancias límite. Cuando funciona se pasa al siguiente paso.

A continuación, se procede a diseñar el esquemático y acoplarlo al diseño original. Se deben eliminar los elementos respectivos de la comunicación realizada mediante RS485. Cuando se acaba con el diseño esquemático se comienza el PCB, que es el esquemático llevado a una placa real.

Para la fabricación se debe tener en cuenta por un lado la creación de las tarjetas y por el otro el montaje de los componentes. Mantener unos plazos coherentes es muy importante, debido a que esos dos procesos se suelen hacer por empresas diferentes y son críticos, no se pueden añadir los componentes hasta que no se tienen las placas.

Para acabar, se deben probar los sistemas de monitorización nuevos en paneles solares reales.

PRESUPUESTOS

El presupuesto se divide en dos apartados: el descargo de gastos, incluye los gastos que se han llevado a cabo para la realización del proyecto, y el presupuesto para la fabricación de la tarjeta prototipo.

1 Descargo de gastos

En el descargo de gastos se incluyen todas las horas de trabajo de los ingenieros que han participado en el proyecto, el coste de las tarjetas para hacer el prototipo de la comunicación PLC y unos costes generales que se aplican al 15% del total, que son los costes que van para la universidad y se ocupan en pagar costes generales como mantenimiento, luz e imprevistos.

Horas internas

Concepto	Coste horario	N.º horas	Coste total
Ingeniero Senior	80 €/hora	80 horas	6400 €
Ingeniero	50 €/hora	105 horas	5250 €
Ingeniero prácticas	20 €/hora	300 horas	6000 €
Subtotal horas internas			17650 €

Gastos

Concepto	Coste unitario	N.º unidades	Coste total
Tarjeta Prototipo	50 €	2 unidades	100 €
Comp. Electrónicos	100 €	1 unidad	100 €
Subtotal gastos			200€

Total

Concepto	Coste total
Horas internas	17650 €
Gastos	200 €
Subtotal suma	17850 €
Gastos Generales (15%)	2677.5 €
TOTAL	20527.5 €

2 Presupuesto de fabricación

En este apartado se explica el resto del presupuesto, la parte que aún no se ha ejecutado, que serían los costes para fabricar un prototipo del sistema completo.

En estos costes no se incluyen las horas internas debido a que ya están incluidas en el desglose de gastos. El número de prototipos que se fabrican es 10, para tener un margen por si se estropea alguno y para probar varios a la vez. El coste del montaje es el mismo para 1 que para 10, lo que cuesta en la empresa de montaje es la preparación de la maquinaria.

Concepto	Coste tarjeta	N.º unidades	Coste total
Bill of Materials	43.89 €	10 unidades	438.9 €
Fabricación PCB	16.92 €	10 unidades	169.2 €
Montaje	800 €	10 unidades	800 €
		Subtotal fabricación	1408.1 €

CONCLUSIONES

El objetivo del trabajo es la realización de las comunicaciones de un sistema fotovoltaico utilizando las líneas de alimentación eléctrica. Se demuestra que el PLC es una solución válida para la comunicación del sensor de monitorización.

En este documento quedan detallados los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta para poder realizar el diseño, pruebas y fabricación del prototipo.

El proyecto tiene una duración de 4 meses en los que se han definido las etapas de diseño, montaje y pruebas del prototipo PLC, junto con el diseño del sistema completo de monitorización en circuito impreso. Posteriormente hay que desarrollar el software de las comunicaciones, además de la creación de un protocolo de comunicación que se ajuste al diseño del PLC.

Se realizan además pruebas en laboratorio, que determinan que la comunicación vía PLC funciona y puede tener usos en distintos circuitos electrónicos, siempre que estén interconectados entre sí por cables de alimentación. Es una alternativa a los medios de comunicación habituales con un coste bajo y sin necesidad de instalaciones extras de cableado.

En la parte final se diseña el PCB completo, incluyendo el sensor de monitorización y las comunicaciones. Se prepara el siguiente paso del proyecto, la fabricación de la nueva placa, mediante los archivos de fabricación del circuito y el presupuesto de fabricación.

REFERENCIAS

- [1] *Statistical Review of World Energy B.P.* 2018.
- [2] En línea: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/las-previsiones-de-crecimiento-a-escala-global-20180625>.
- [3] E. Ortega, G. Aranguren, M.J. Saenz, R. Gutiérrez y J.C. Jimeno, “*Study of Photovoltaic Systems Monitoring Methods*”, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE 44rd, 2017.
- [4] E. Ortega, G. Aranguren, M.J. Saenz, R. Gutiérrez y J.C. Jimeno, “*Photovoltaic Module to Module Monitoring System*”, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE 45th, 2018.
- [5] En línea: <https://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals3/index.php>
- [6] Antonio De Lima Fernandes and Pooja Dave, “*POWER LINE COMMUNICATION IN ENERGY MARKETS*”, Cypress Semiconductor Corp, 2011.
- [7] Victor Hugo Serna, “*Comunicaciones a través de la red eléctrica – PLC*”, Maxim France, marzo 2011.
- [8] J. Han, I. Lee y S. H. Kim, “*User-Friendly Monitoring System for Residential PV System Based on Low-Cost Power Line Communication*”, IEEE 2015.
- [9] Datasheet, “*A110LR09x User’s Manual*”, Anaren Microwave, Release Date 10/31/11.
- [10] E. Ortega, G. Aranguren, M.J. Saenz, R. Gutiérrez y J.C. Jimeno, “*Wireless Sensor Network for Photovoltaic modules monitoring*”, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE 43rd, 2016.
- [11] En línea: <https://www.wut.de/e-6www-11-apes-000.php>.
- [12] Datasheet, “*mun2215-NPN*” OnSemiconductor, 2011.