

Universidad Nacional de San Martín  
Escuela de Ciencia y Tecnología  
Ingeniería en Telecomunicaciones  
Ingeniería Electrónica



**Universidad Nacional  
de San Martín**

## **Proyecto Final Integrador**

Sistema de telemetría IoT para el monitoreo de la instalación  
solar fotovoltaica del centro tecnológico FUNINTEC

Corominas, María Celeste

Grebneva, Alena

**Tutora:**

Dra. Ing. Mariela Videla

**Co-Tutor:**

Dr. Ing. Hernán Socolovsky

# Contenido

Anteproyecto.....	6
<b>Acta constitutiva del proyecto</b> .....	6
<b>WBS (Work Breakdown Structure)</b> .....	11
<b>Diagrama de Gantt</b> .....	14
<b>Requerimientos y gestión de la calidad</b> .....	16
<b>Análisis de riesgos</b> .....	20
<b>Análisis de costos</b> .....	24
Resumen .....	25
1. Aspectos teóricos.....	26
1.1. Energías renovables .....	26
1.1.1. Los recursos energéticos en el mundo y la energía solar .....	26
1.1.2. El Sol.....	28
1.1.3. Masa de aire.....	29
1.1.4. Radiación solar.....	30
1.1.4.1. Distribución espectral de la radiación solar .....	31
1.1.5. Hora solar pico .....	31
1.1.6. Componentes de la radiación solar .....	32
1.1.7. Efecto fotovoltaico.....	34
1.1.8. Módulos fotovoltaicos de uso terrestre.....	35
1.1.9. Características eléctricas de los módulos .....	35
1.1.10. Sistemas fotovoltaicos .....	37
1.1.11. Regulador o controlador de carga .....	38
1.1.12. Inversor – Generalidades.....	40
1.1.13. Baterías en sistemas fotovoltaicos.....	41
1.1.13.1. Función y uso del almacenamiento .....	41
1.1.14. Rendimiento de un sistema fotovoltaico .....	42
1.2. Internet de las cosas (IoT) .....	44
1.3. IoT y su integración con la energía solar fotovoltaica.....	46
1.4. Arquitectura IoT.....	48

1.4.1.	Protocolos y tecnologías en IoT .....	49
1.4.1.1.	Low Power Wide Area Network (LPWAN) .....	49
1.4.1.2.	Wi-Fi - generalidades .....	50
1.4.1.3.	Modbus - generalidades.....	50
1.4.1.	The Things Network (TTN) - generalidades .....	51
1.4.1.	AllThingsTalk (ATT) - generalidades .....	51
2.	Introducción específica.....	52
2.1.	Protocolos y tecnologías.....	52
2.1.1.	Comunicación serie.....	52
2.1.1.1.	Reglas de comunicación serie .....	53
2.1.1.2.	Cableado y hardware .....	54
2.1.2.	UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).....	54
2.1.3.	I <sup>2</sup> C .....	55
2.1.4.	Tecnología Wi-Fi.....	58
2.1.5.	Modbus .....	58
2.1.5.1.	Formato de tramas Modbus.....	59
2.1.5.2.	Modbus y el Modelo OSI .....	59
2.1.5.3.	Principios del protocolo Maestro/Esclavo Modbus.....	60
2.1.5.4.	Reglas de direccionamiento Modbus .....	61
2.1.5.5.	Diagramas de estado Maestro/Esclavo .....	61
2.1.5.6.	Modbus TCP/IP .....	63
2.1.5.6.1.	Construcción de un paquete de datos Modbus TCP .....	64
2.1.5.6.2.	Arquitectura general de comunicación Modbus TCP .....	65
2.1.5.6.3.	Códigos fuente en Modbus.....	65
2.1.6.	LoRa (Long Range) .....	66
2.1.6.1.	Descripción general de la tecnología LoRa .....	67
2.1.6.2.	LoRaWAN y arquitectura de red LoRa .....	72
2.1.6.3.	Clases de dispositivos LoRaWAN .....	74
2.1.6.4.	Trama de datos .....	75
2.1.6.5.	Asociación de los dispositivos a la red.....	76

2.1.6.6.	Seguridad de la información en LoRaWAN .....	76
2.1.6.7.	Pérdida de trayectoria en el espacio libre .....	78
2.1.6.8.	Indicador de fuerza de la señal recibida.....	78
2.1.7.	TTN en Argentina .....	79
2.1.8.	The Things Stack (TTS).....	80
2.1.8.1.	Ciclo de trabajo.....	80
2.1.8.2.	Política de uso justo.....	82
2.1.8.3.	Webhooks .....	82
2.1.9.	AllThingsTalk Maker (ATTM) .....	82
2.1.9.1.	Envío de datos desde la consola TTS y recepción en ATTM .....	83
2.2.	Instrumentos, sensores y módulos.....	83
2.2.1.	Radiómetro fotovoltaico .....	83
2.2.2.	Amplificador operacional LMP7721.....	85
2.2.3.	Termorresistencia PT1000.....	86
2.2.4.	Amplificador operacional OPA2365 .....	87
2.2.5.	Sensor de temperatura DHT11 .....	88
2.2.6.	Wemos mini D1.....	89
2.2.7.	Convertor analógico/digital ADS1115 .....	90
2.2.7.1.	Conversión ADC .....	91
2.2.7.2.	Detalle de pines del ADC.....	92
2.2.7.3.	Multiplexor de entrada del ADC .....	92
2.2.8.	Convertor lógico BSS138.....	93
2.2.9.	Panel solar.....	94
2.2.10.	Batería recargable .....	94
2.2.11.	Módulo de protección de baterías .....	95
2.2.12.	Cargador de batería para panel solar - CN3065 .....	96
2.2.13.	Módulo MAX17043.....	97
2.2.14.	Convertor DC/DC <i>Boost</i> MT3608.....	98
2.2.15.	Multitech xDot.....	99
2.2.16.	Gateway RAK7243 WisGate Developer D3.....	100

2.2.10.	Herramientas de desarrollo.....	101
2.2.10.1.	Mbed.....	101
2.2.10.2.	PlatformIO.....	102
2.2.10.3.	EAGLE.....	104
3.	Diseño e implementación.....	106
3.1.	Diseño del sistema.....	107
3.1.1.	Placa base.....	109
3.1.2.	Alimentación - Gestión y control de energía.....	110
3.1.3.	Medición de temperatura de gabinete y paneles.....	115
3.1.4.	Amplificador de transresistencia para el radiómetro fotovoltaico.....	119
3.1.5.	Comunicación Modbus/TCP.....	125
3.1.5.1.	Comunicación con el <i>inverter</i> .....	125
3.1.5.2.	Servidor Modbus/TCP.....	127
3.1.6.	Módulo de adquisición/mediciones.....	129
3.1.7.	Módulo transmisor LoRaWAN.....	130
3.1.8.	Vinculación Gateway - The Things Stack.....	131
3.1.9.	Interconexión eléctrica de módulos.....	132
3.2.	Diseño de gabinetes y estructuras.....	135
3.2.1.	Gabinete del prototipo.....	135
3.2.2.	Marco para paneles solares.....	136
3.2.3.	Montaje del radiómetro y el arreglo de paneles solares de alimentación ...	136
3.2.4.	Soporte para sensores PT1000.....	137
3.3.	Desarrollo de firmware.....	138
3.3.1.	Comunicación entre microprocesadores.....	138
3.3.2.	Firmware del Wemos D1 Mini ESP32 (Wi-Fi).....	139
3.3.2.1.	Medición del nivel de carga de la batería.....	140
3.3.2.2.	Medición de temperatura e irradiancia.....	142
3.3.2.3.	Datos del inverter.....	145
3.3.3.	Firmware del módulo xDot (LoRa).....	147
3.3.3.1.	Payload LoRa.....	150

3.4.	Configuración de la red LoRaWAN .....	151
3.4.1.	Configuración del Gateway .....	152
3.4.2.	Registro del Gateway en TTS.....	153
3.4.3.	Registro de una aplicación en TTS.....	154
3.4.4.	Registro del módulo LoRa (xDot) en TTS .....	154
3.4.5.	Integración de datos con AllThingsTalk .....	156
4.	Ensayos y resultados .....	161
4.1.	Comunicación nodo IoT – <i>gateway</i> – TTS.....	161
4.1.1.	Cálculo de atenuación del espacio libre.....	161
4.2.	Medición de nivel de batería .....	162
4.3.	Medición de irradiancia.....	163
4.4.	Medición de potencia .....	164
4.5.	Medición de temperatura .....	165
4.5.1.	Sensores PT1000 de paneles.....	165
4.5.2.	Sensor DHT11 del gabinete.....	166
4.6.	Comunicación nodo IoT – <i>inverter</i> .....	166
5.	Conclusiones.....	170
5.1.	Desafíos durante el desarrollo y pruebas.....	170
5.2.	Objetivos alcanzados.....	170
5.2.1.	Mínimo producto viable.....	170
5.2.2.	Resultados de las mediciones .....	171
5.2.3.	Comunicaciones.....	172
5.2.1.	Autonomía.....	172
5.3.	Próximos pasos.....	172
	Bibliografía .....	174

# Anteproyecto

En el marco de la asignatura Proyecto Final Integrador y como disparador para la elaboración del informe definitivo se efectúa una descripción de los principales indicadores de viabilidad del proyecto. Entre ellos se adjunta la denominada acta constitutiva o *Project Charter*, que a partir de su aprobación constituye el nacimiento del proyecto; la estructura de desglose de trabajo (WBS, *Work Breakdown Structure*) necesaria para establecer la descomposición jerárquica orientada a entregables del trabajo que sería ejecutado por el equipo del proyecto, con el fin de cumplir con los objetivos y llevar a cabo la creación de entregables que cumplieran con los requerimientos establecidos. También se incluye el diagrama de Gantt que muestra en detalle el tiempo de dedicación previsto para cada una de las actividades a lo largo de un plazo establecido; un análisis de los riesgos principales (PHA, *Process Hazards Analysis*) que permite una evaluación de posibles amenazas y probables eventos no deseados, e intentar mitigarlos en nuestro proyecto; y finalmente un detalle de los costos requeridos para la construcción del prototipo y la implementación del mismo.

## Acta constitutiva del proyecto

Título del proyecto	
Sistema de telemetría IoT para el monitoreo de la instalación solar fotovoltaica del centro tecnológico FUNINTEC	
Estudiante	Legajo
Alena Grebneva	CYT-4156
María Celeste Corominas	CYT-2724
Fecha de inicio del proyecto	Fecha tentativa de finalización del Proyecto
23/11/2020	23/11/2021
Objetivo General	
Desarrollar el prototipo de un sistema de telemetría de bajo costo y largo alcance para medir parámetros operativos en celdas fotovoltaicas en instalaciones de generación de energía solar, empleando una red de RF LoRa ( <i>Long Range</i> ) con el estándar LoRaWAN (Long Range Wide-Area Network), con integración en sistemas de monitoreo remoto.	

## Objetivos Específicos

- Identificar las variables a monitorear y estudiar los sensores típicos empleados para el desarrollo de la interfaz de E/S.
- Diseñar la electrónica para las interfaces con el equipamiento de campo.
- Realizar un estudio de los posibles despliegues geográficos de la red LoRa™.
- Realizar la selección de los módulos de comunicaciones para el nodo IoT y el concentrador que operen en la banda de frecuencia establecida y efectuar la correspondiente configuración y/o programación.
- Construir el nodo IoT con las interfaces de E/S.
- Desarrollar la interfaz para la adquisición de datos para el sistema de monitoreo.
- Efectuar la integración con un sistema de monitoreo industrial.
- Realizar pruebas de las interfaces, comunicaciones y rendimiento general del sistema
- Entregar un prototipo funcional.

El alcance del proyecto se orienta al diseño y la producción de un prototipo basado en un módulo programable con antena RF de largo alcance, incluyendo la elaboración de la electrónica necesaria para las interfaces de entradas/salidas que cumpla con exigencias y normas industriales, así como el desarrollo de la integración mediante un sistema de monitoreo remoto.

La alimentación eléctrica del dispositivo se tomará desde el inversor si la instalación lo permite. En los casos en que la alimentación externa no sea posible, la alimentación del equipo se sustentará con una batería de litio de alta capacidad.

La transmisión de datos entre el nodo IoT localizado en campo y el concentrador se realizará en la banda de frecuencia comprendida entre 902 y 928 MHz, la cual es atribuida por el ENACOM, entre otras, a la utilización por equipos de baja potencia en aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*), respetando los límites de potencia establecidos en la normativa.

En situación normal y alimentación de red, la velocidad de transmisión será la máxima soportada por el dispositivo empleado, a la máxima potencia, con flujo de datos continuo (tiempo real). Con alimentación de batería se reduce la frecuencia, la velocidad de transmisión y la potencia para garantizar la correcta transmisión/recepción de datos y menor consumo de energía, de modo que la batería tenga una vida útil mínima de 3 años, antes de tener que ser cambiada.

## Diagnóstico

Una planta solar fotovoltaica, como cualquier proceso industrial, tiene una serie de puntos críticos que, en caso de desviarse de las condiciones de operación normal, pueden suponer una reducción de su rentabilidad. El monitoreo de sistemas fotovoltaicos es fundamental

para garantizar el funcionamiento fiable y el máximo rendimiento en este tipo de instalaciones de modo de garantizar la máxima rentabilidad.

El monitoreo más simple se puede realizar leyendo los valores tales como la potencia generada por los paneles fotovoltaicos y de la red de corriente alterna en la pantalla de un inversor, la cual generalmente es parte de todos los inversores conectados a la red.

Para efectuar un monitoreo más sofisticado se pueden registrar datos ambientales, como la temperatura del panel, la temperatura ambiente y la radiación solar, y combinarlos con datos de potencia para evaluar el rendimiento de la instalación. Los requisitos varían según el modelo que se utilice para la medición del rendimiento, la precisión requerida y otras consideraciones y el tamaño del sistema.

Por ejemplo, una flota de 5.000 sistemas residenciales puede depender de datos meteorológicos locales, mientras que una flota de sistemas comerciales de 50 a 100 kW puede tener mayores requisitos para medir con precisión la irradiancia, la temperatura del módulo y el clima en cada sitio.

El avance tecnológico de las telecomunicaciones y dispositivos electrónicos de última generación, junto con la disponibilidad de *internet* a través de redes de telefonía móvil permiten la transmisión instantánea de datos de proceso de la planta de generación de energía solar a cualquier sistema de monitoreo que permita la supervisión en tiempo real.

#### Antecedentes

Desarrollo de sistema electrónico para llevar a cabo la automatización de un ensayo de medición de coeficientes de temperatura en paneles fotovoltaicos, en el marco de la asignatura Electrónica Digital III.

#### Justificación o propósito del Proyecto (Aportes y resultados esperados)

Con este proyecto se pretende diseñar una solución de telemetría empleando el concepto de *IoT* o Internet de las cosas, de modo que sea de bajo costo frente a una solución que requiera una infraestructura de comunicaciones basada en radioenlaces o fibra óptica, y que permita el monitoreo en tiempo real de variables físicas que afectan el rendimiento de paneles fotovoltaicos en sitios remotos, lo que permitiría un mejor control del funcionamiento de la planta, y además reducir el tiempo de respuesta para su mantenimiento.

Se optó por la utilización del protocolo LoRa™ y las especificaciones LoRaWAN™ ya que, a pesar de ser este un estándar patentado, es cada vez más difundido en aplicaciones de LPWAN (*Low-Power Wide-Area Network*) y cuenta con respaldo y actualización continua, además de ventajas considerables como bajo consumo, largo alcance (hasta 8 km en línea

de vista) y encriptación de datos, además permite integrar los dispositivos en una red IoT o bien una red privada sin conexión a *internet*.

Para la aplicación se utilizarán módulos programables con antena RF de largo alcance, que cuenten con la certificación del LoRa Alliance, hereden las ventajas del estándar y puedan operar a la frecuencia de la banda para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (902-928 MHz en la Región 2, con frecuencia central 915 MHz), que no requiere licencia.

#### Supuestos

- Se dispone del presupuesto por parte de la universidad para cubrir el costo del desarrollo del prototipo.
- Se dispone de un *gateway* en la universidad, junto con un *kit* de desarrollo con dispositivo transmisor y los materiales necesarios para construir el prototipo y realizar la programación y pruebas de comunicaciones.
- Es posible utilizar las instalaciones de la CNEA y/o FUNINTEC para pruebas de campo.
- Los sensores para las variables a monitorear son comercializados en el mercado local.
- La distancia máxima para la comunicación en línea de vista entre el módulo y el *gateway* no supera los 8 km.
- Se cuenta con la experiencia y conocimiento tecnológico suficiente para llevar a cabo el proyecto.
- El sistema por diseñar será de autoría de las estudiantes que conforman el grupo del proyecto.

#### Restricciones

- No disponer de fondos para la adquisición de materiales con certificación LoRaWAN.
- No disponer de las instalaciones para realizar pruebas de campo.
- Los proveedores de componentes serán locales, los plazos de entrega de materiales quedan sujetos a la logística de importación de estos.
- Las condiciones climáticas limitan la instalación del equipo en campo y el tipo de gabinete por emplear.
- Pueden existir otros equipos que operen en la banda de frecuencia especificada.
- El límite de potencia de transmisión en la banda de frecuencia especificada es de 1 Watt.
- Se garantizan 3 años de autonomía con el sistema funcionando a batería.
- Implementación de red privada sin acceso a la nube, por consideraciones de ciberseguridad.
- Las condiciones topográficas de los sitios limitan la distancia máxima entre módulos y el *gateway*.

Referencias (bibliografía inicial para comenzar el proyecto)

- Normativa del uso del espectro radioeléctrico en la Argentina
- Norma IRAM 210013-2
- Guía de Mejores Prácticas de Operación y Mantenimiento (O&M) de sistemas fotovoltaicos. Edición México.

<https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/05/Operacion-y-Mantenimiento-SPE-and-ASOLMEX.pdf>

- Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems; 3rd Edition. National Renewable Energy Laboratory, Sandia National Laboratory, SunSpec Alliance, and the SunShot National Laboratory Multiyear Partnership (SuNLaMP) PV O&M Best Practices Working Group. 2018. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-7A40-73822.

<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73822.pdf>

Dirigido por:

Dra. Ing. Mariela Videla

Codirigido por:

Dr. Ing. Hernán P. Socolovsky

Aprobado por:

Ing. Marcelo E. Romeo

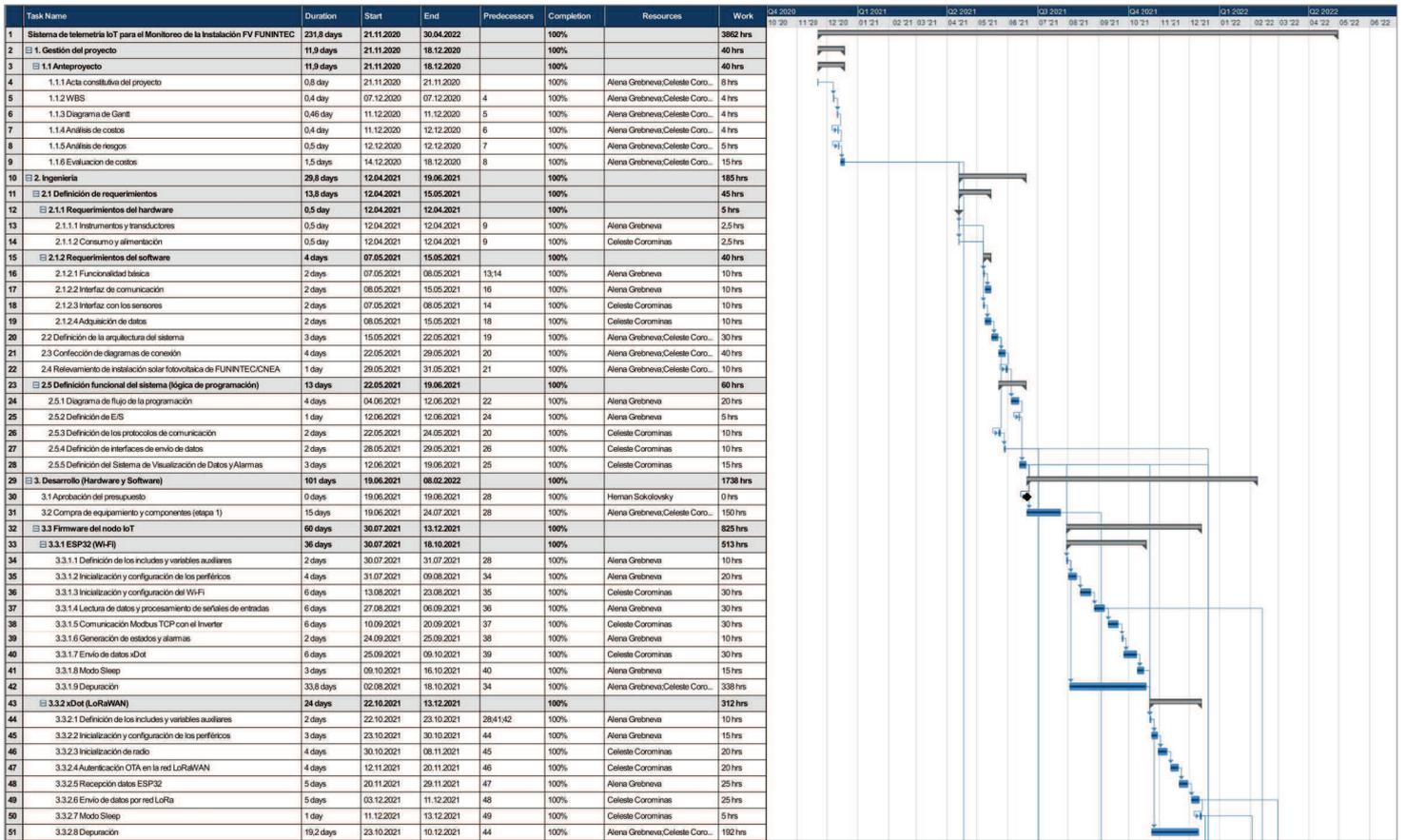
## WBS (Work Breakdown Structure)

1	Gestión del proyecto
1.1	Anteproyecto
1.1.1	Acta constitutiva del proyecto
1.1.2	WBS
1.1.3	Diagrama de Gantt
1.1.4	Análisis de costos
1.1.5	Análisis de riesgos
1.1.6	Evaluación de costos
2	Ingeniería
2.1	Definición de requerimientos
2.1.1	Requerimientos del hardware
2.1.1.1	Instrumentos y transductores
2.1.1.2	Consumo y alimentación
2.1.2	Requerimientos del software
2.1.2.1	Funcionalidad básica
2.1.2.2	Interfaz de comunicación
2.1.2.3	Interfaz con los sensores
2.1.2.4	Adquisición de datos
2.2	Definición de la arquitectura del sistema
2.3	Confección de diagramas de conexión
2.4	Relevamiento de instalación solar fotovoltaica de FUNINTEC/CNEA
2.5	Definición funcional del sistema (lógica de programación)
2.5.1	Diagrama de flujo de la programación
2.5.2	Definición de E/S
2.5.3	Definición de los protocolos de comunicación
2.5.4	Definición de interfaces de envío de datos
2.5.5	Definición del Sistema de Visualización de Datos y Alarmas
3	Desarrollo (Hardware y Software)
3.1	Aprobación del presupuesto
3.2	Compra de equipamiento y componentes (etapa 1)
3.3	Firmware del nodo IoT
3.3.1	ESP32 (Wi-Fi)

3.3.1.1	Definición de bibliotecas y variables auxiliares
3.3.1.2	Inicialización y configuración de los periféricos
3.3.1.3	Inicialización y configuración del Wi-Fi
3.3.1.4	Lectura de datos y procesamiento de señales de entradas
3.3.1.5	Comunicación Modbus TCP con el <i>Inverter</i>
3.3.1.6	Generación de estados y alarmas
3.3.1.7	Envío de datos módulo LoRa (xDot)
3.3.1.8	Modo Sleep
3.3.1.9	Depuración
3.3.2	Módulo xDot (LoRaWAN)
3.3.2.1	Definición de bibliotecas y variables auxiliares
3.3.2.2	Inicialización y configuración de los periféricos
3.3.2.3	Inicialización de radio
3.3.2.4	Autenticación OTA en la red LoRaWAN
3.3.2.5	Recepción datos módulo Wi-Fi (ESP32)
3.3.2.6	Envío de datos por red LoRa
3.3.2.7	Modo Sleep
3.3.2.8	Depuración
3.4	Desarrollo de placas electrónicas
3.4.1	Compra de equipamiento y componentes (etapa 2)
3.4.2	Amplificador transresistencia
3.4.2.1	Diseño electrónica y esquemático
3.4.2.2	Diseño PCB
3.4.2.3	Construcción y pruebas de PCB
3.4.2.4	Obtención de datos para calibración
3.4.2.5	Calibración de electrónica y radiómetro fotovoltaico
3.4.3	ADC y acondicionamiento de señal PT1000
3.4.3.1	Diseño electrónica y esquemático
3.4.3.2	Diseño PCB
3.4.3.3	Construcción y pruebas de PCB
3.4.3.4	Calibración de electrónica y sensores de temperatura
3.4.4	Placa Base
3.4.4.1	Diseño de electrónica y esquemático

3.4.4.2	Diseño de PCB
3.4.4.3	Construcción y pruebas de PCB
3.4.4.4	Ensamblado del prototipo en placa base
3.5	Integración hardware y firmware
3.6	Configuración del Gateway
3.6.1	Inicialización y configuración
3.6.2	Registro en TTS
3.6.3	Integración con servicio de visualización
3.7	Construcción de soportes
3.7.1	Diseño 3D soporte panel FV y sensores PT1000
3.7.2	Impresión 3D soporte panel FV y sensores PT1000
4	Instalación del prototipo en FUNINTEC
4.1	Instalación del Gateway LoRa provisorio
4.2	Instalación del gabinete
4.3	Instalación soporte y panel FV Auxiliar
4.4	Instalación de los sensores de temperatura e irradiancia
5	Puesta en servicio y pruebas de funcionamiento
5.1	Pruebas eléctricas
5.2	Pruebas de comunicaciones
5.3	Pruebas y resolución de problemas del prototipo en línea
5.3.1	Adquisición de datos
5.3.2	Medición del nivel de batería
5.3.3	Comunicación serie
5.3.4	Comunicación inalámbrica
5.3.5	Alarmas
5.3.6	Historización y visualización de datos en sistema de monitoreo
6	Generación de entregables
6.1	Planos, esquemáticos y código fuente
6.2	Informe y presentación del proyecto
7	Cierre del proyecto

## Diagrama de Gantt



Task Name	Duration	Start	End	Predecessors	Completion	Resources	Work	Gantt Chart (Q4 2020 to Q2 2022)																											
52 3.4 Desarrollo de placas electrónicas	93 days	02.07.2021	31.01.2022		100%		650 hrs	[Gantt bar for 52]																											
53 3.4.1 Compra de equipamiento y componentes (etapa 2)	15 days	03.09.2021	04.10.2021	31	100%	Alena Grebneva,Celeste Coro...	150 hrs	[Gantt bar for 53]																											
54 3.4.2 Amplificador transresistencia	78 days	02.07.2021	27.12.2021		100%		395 hrs	[Gantt bar for 54]																											
55 3.4.2.1 Diseño electrónica y esquemático	6 days	02.07.2021	12.07.2021	28,27	100%	Alena Grebneva	30 hrs	[Gantt bar for 55]																											
56 3.4.2.2 Diseño PCB	2,2 days	13.07.2021	17.07.2021	55	100%	Alena Grebneva	20 hrs	[Gantt bar for 56]																											
57 3.4.2.3 Construcción y pruebas de PCB	10 days	19.07.2021	13.08.2021	56	100%	Alena Grebneva	50 hrs	[Gantt bar for 57]																											
58 3.4.2.4 Obtención de datos para calibración	56 days	13.08.2021	20.12.2021	57	100%	Mariela Videla	280 hrs	[Gantt bar for 58]																											
59 3.4.2.5 Calibración de electrónica y radiómetro fotovoltaico	3 days	21.12.2021	27.12.2021	58	100%	Celeste Corominas	15 hrs	[Gantt bar for 59]																											
60 3.4.3 ADC y acondicionamiento de señal PT1000	16 days	20.12.2021	20.01.2022		100%		56 hrs	[Gantt bar for 60]																											
61 3.4.3.1 Diseño electrónica y esquemático	3,8 days	20.12.2021	27.12.2021	28,27	100%	Alena Grebneva	19 hrs	[Gantt bar for 61]																											
62 3.4.3.2 Diseño PCB	3 days	31.12.2021	03.01.2022	61	100%	Alena Grebneva	15 hrs	[Gantt bar for 62]																											
63 3.4.3.3 Construcción y pruebas de PCB	2,2 days	07.01.2022	10.01.2022	62	100%	Alena Grebneva	11 hrs	[Gantt bar for 63]																											
64 3.4.3.4 Calibración de electrónica y sensores de temperatura	2,2 days	28.01.2022	29.01.2022	63	100%	Alena Grebneva	11 hrs	[Gantt bar for 64]																											
65 3.4.4 Placa Base	9,8 days	10.01.2022	31.01.2022		100%		49 hrs	[Gantt bar for 65]																											
66 3.4.4.1 Diseño electrónica y esquemático	3 days	10.01.2022	15.01.2022	59,63	100%	Alena Grebneva	15 hrs	[Gantt bar for 66]																											
67 3.4.4.2 Diseño PCB	1,6 days	17.01.2022	21.01.2022	66	100%	Alena Grebneva	8 hrs	[Gantt bar for 67]																											
68 3.4.4.3 Construcción y pruebas de PCB	2,2 days	22.01.2022	24.01.2022	67	100%	Alena Grebneva	11 hrs	[Gantt bar for 68]																											
69 3.4.4.4 Ensamblado del prototipo en placa base	3 days	28.01.2022	31.01.2022	57,53,68	100%	Alena Grebneva	15 hrs	[Gantt bar for 69]																											
70 3.5 Integración hardware y firmware	4 days	02.02.2022	08.02.2022	69,64	100%	Alena Grebneva	20 hrs	[Gantt bar for 70]																											
71 3.6 Configuración del Gateway	9,8 days	17.12.2021	07.01.2022		100%	Alena Grebneva	84 hrs	[Gantt bar for 71]																											
72 3.6.1 Inicialización y configuración	4 days	17.12.2021	25.12.2021	50	100%	Celeste Corominas	20 hrs	[Gantt bar for 72]																											
73 3.6.2 Registro en TTN	1 day	01.01.2022	01.01.2022	72	100%	Celeste Corominas	5 hrs	[Gantt bar for 73]																											
74 3.6.3 Integración con servicio de visualización	2 days	01.01.2022	07.01.2022	73	100%	Celeste Corominas	10 hrs	[Gantt bar for 74]																											
75 3.7 Construcción de soportes	1,8 days	02.02.2022	05.02.2022		100%		9 hrs	[Gantt bar for 75]																											
76 3.7.1 Diseño 3D soporte panel FV y sensores PT1000	0,8 day	02.02.2022	02.02.2022	50	100%	Alena Grebneva	4 hrs	[Gantt bar for 76]																											
77 3.7.2 Impresión 3D soporte panel FV y sensores PT1000	1 day	04.02.2022	05.02.2022	76	100%	Alena Grebneva	5 hrs	[Gantt bar for 77]																											
78 4. Instalación del prototipo en FUNINTEC	0,25 day	10.02.2022	10.02.2022		100%		5 hrs	[Gantt bar for 78]																											
79 4.1 Instalación del Gateway LoRa provisorio	0,25 day	10.02.2022	10.02.2022	74	100%	Celeste Corominas	1,25 hrs	[Gantt bar for 79]																											
80 4.2 Instalación del gabinete	0,25 day	10.02.2022	10.02.2022	70	100%	Alena Grebneva	1,25 hrs	[Gantt bar for 80]																											
81 4.3 Instalación soporte y panel FV	0,25 day	10.02.2022	10.02.2022	77	100%	Celeste Corominas	1,25 hrs	[Gantt bar for 81]																											
82 4.4 Instalación de los sensores de temperatura e irradiancia	0,25 day	10.02.2022	10.02.2022	80	100%	Alena Grebneva	1,25 hrs	[Gantt bar for 82]																											
83 5. Test de funcionamiento y puesta en servicio	26 days	11.02.2022	11.04.2022		100%		148 hrs	[Gantt bar for 83]																											
84 5.1 Pruebas eléctricas	1,6 days	11.02.2022	11.02.2022	82	100%	Alena Grebneva	8 hrs	[Gantt bar for 84]																											
85 5.2 Pruebas de comunicaciones	1,6 days	12.02.2022	12.02.2022	82	100%	Celeste Corominas	8 hrs	[Gantt bar for 85]																											
86 5.3 Pruebas y resolución de problemas del prototipo en línea	24,8 days	12.02.2022	11.04.2022		100%		132 hrs	[Gantt bar for 86]																											
87 5.3.1 Adquisición de datos	3 days	12.02.2022	19.02.2022	37,84	100%	Alena Grebneva	15 hrs	[Gantt bar for 87]																											
88 5.3.2 Medición del nivel de batería	4 days	12.02.2022	21.02.2022	84	100%	Alena Grebneva	20 hrs	[Gantt bar for 88]																											
89 5.3.3 Comunicación serie	2,2 days	21.02.2022	26.02.2022	85	100%	Celeste Corominas	11 hrs	[Gantt bar for 89]																											
90 5.3.4 Comunicación inalámbrica	4 days	28.02.2022	11.03.2022	80,49	100%	Celeste Corominas	15 hrs	[Gantt bar for 90]																											
91 5.3.5 Alarmas	4,4 days	12.03.2022	19.03.2022	89	100%	Alena Grebneva	22 hrs	[Gantt bar for 91]																											
92 5.3.6 Historización y visualización de datos en sistema de monitoreo	9,8 days	20.03.2022	11.04.2022	88	100%	Celeste Corominas	49 hrs	[Gantt bar for 92]																											
93 6. Generación de entregables	168,6 days	17.04.2021	29.04.2022		100%		1746 hrs	[Gantt bar for 93]																											
94 6.1 Planos, esquemáticos y código fuente	6 days	17.12.2021	27.12.2021	50	100%	Alena Grebneva,Celeste Coro...	60 hrs	[Gantt bar for 94]																											
95 6.2 Informe y presentación del proyecto	168,6 days	17.04.2021	29.04.2022	9	100%	Alena Grebneva,Celeste Coro...	1686 hrs	[Gantt bar for 95]																											
96 7. Cierre del proyecto	0 days	30.04.2022	30.04.2022	94,92,95	0%	Alena Grebneva,Celeste Coro...	0 hrs	[Gantt bar for 96]																											

Figura 1 - Cronograma del Proyecto

## Requerimientos y gestión de la calidad

A continuación se listan los requerimientos sobre la base de los cuales se desarrolló el prototipo. Estos surgieron del análisis de las necesidades del cliente, junto con ellos se detalla la verificación y validación que será llevada a cabo.

### 1. Requerimientos funcionales - hardware:

**Req. hardware #1.1:** el sistema deberá comunicarse y poder extraer datos del/los *inverter/s* de una instalación solar fotovoltaica.

- **Verificación:** lectura y análisis de las hojas de datos del fabricante del/los *inverter/s* y de placas de desarrollo para evaluar la compatibilidad.
- **Validación:** constatar que el cliente (maestro) recibe los datos del servidor (esclavo).

**Req. hardware #1.2:** el sistema deberá convertir las variables físicas de sensores de temperatura e irradiancia en datos digitales.

- **Verificación:** lectura y análisis de hojas de datos de los sensores y las placas de desarrollo para corroborar la posibilidad de implementación/integración al sistema.
- **Validación:** constatar que los sensores han sido correctamente implementados y que se reciben lecturas de datos que permiten determinar las variables ambientales mencionadas, mediante pruebas unitarias y de sistema.

**Req. hardware #1.3:** el sistema deberá funcionar en un microprocesador de bajo consumo y disponer de:

- a) Entradas analógicas (definidas en el cuerpo del informe)
- b) Entradas y salidas digitales (definidas en el cuerpo del informe)
- c) Unidad UART
- d) Unidad I<sup>2</sup>C
- e) Integrar un módulo de comunicación y antena LoRa
  - **Verificación:** lectura y análisis de las hojas de datos de las placas de desarrollo para corroborar la posibilidad de implementación/integración al sistema.
  - **Validación:** constatar mediante pruebas unitarias y de sistema que las placas de desarrollo han sido correctamente elegidas.

**Req. hardware #1.4:** el sistema requerirá bajo consumo en modo ocioso, el consumo del hardware en su totalidad no deberá superar los 50 mA mientras no se encuentre midiendo ni transmitiendo.

- **Verificación:** el microprocesador debe incluir entre sus modalidades de funcionamiento la opción de operación en modo de bajo consumo.
- **Validación:** se realizará la medición de corriente a la salida del nodo durante el funcionamiento en modo de bajo consumo.

**Req. hardware #1.5:** el sistema deberá implementar el protocolo de radio frecuencia LoRa y deberá transmitir los valores sensados mediante la implementación del estándar de red LoRaWAN.

- **Verificación:** se comprobará mediante el análisis y lectura de la hoja de datos del *transceiver* y se buscarán bibliotecas aptas para el manejo del protocolo.
- **Validación:** se efectuarán pruebas por medio del envío de datos a la red LoRaWAN.

**Req. hardware #1.6:** el sistema deberá implementar el estándar Wi-Fi de comunicación inalámbrica.

- **Verificación:** lectura y análisis de hojas de datos de las placas de desarrollo y del fabricante del/los *inverter/s* para corroborar la posibilidad de implementación/integración al sistema.
- **Validación:** por medio de pruebas de conexión inalámbrica entre ambos dispositivos y correcta comunicación.

**Req. hardware #1.7:** el sistema implementará un diseño modular.

- **Verificación:** se comprobará mediante documentación y diagramas esquemáticos de cada módulo del nodo.
- **Validación:** se probará el uso independiente de cada módulo de adquisición.

**Req. hardware #1.8:** el sistema deberá ser de tamaño compacto y portable.

- **Verificación:** la placa base y todos sus módulos deben poder caber perfectamente dentro de un contenedor estanco y tener un tamaño adecuado para poder transportarlo en caso de tener que trasladarlo hacia otra instalación.
- **Validación:** se dará al manipular el sistema.

**Req. hardware #1.9:** el sistema deberá enviar la telemetría interna del dispositivo para un análisis en tiempo real o fuera de línea.

- **Verificación:** se comprobará la estructura de datos de telemetría diseñada.
- **Validación:** se probarán diferentes estados del sistema y sus correspondientes notificaciones.

**Req. hardware #1.10:** el sistema incorporará a su diseño componentes que aseguren bajo consumo de energía.

- **Verificación:** se comprobará mediante la lectura y el análisis de las hojas de datos de los diferentes componentes de hardware que conformen el nodo.
- **Validación:** se realizará un registro de los valores de consumo del nodo en plena operación.

**Req. hardware #1.11:** el sistema permitirá sostener la alimentación mediante baterías en el largo plazo.

- **Verificación:** se comprobará que la batería y la electrónica se dimensionen adecuadamente para la energización y alimentación sostenida del nodo IoT.
- **Validación:** se realizará un registro de los valores de consumo del nodo en plena operación comparándola con la capacidad de las baterías y el sistema de alimentación fotovoltaico.

**Req. hardware #1.12:** se dispondrá de un sistema de recarga de baterías. El circuito de alimentación a batería deberá:

- a) Funcionar con una o varias baterías de litio de 3,7 V
- b) Entregar 5 V a la salida
- c) Ser capaz de entregar 300 mA a la salida
- d) Poseer puerto para la carga de la batería
  - **Verificación:** se comprobará mediante la hoja de datos de los diferentes componentes de hardware que conformen la etapa de alimentación.
  - **Validación:** por medio de ensayos de carga con un banco de baterías y un panel solar, ambos dimensionados para alimentar al nodo de forma autónoma.

**Req. hardware #1.13:** se podrán identificar situaciones especiales, como errores de comunicación, asociación, batería baja, entre otros.

- **Verificación:** se comprobará el diseño del módulo de visualización de estados.
- **Validación:** se probarán diferentes estados del sistema y sus correspondientes notificaciones visuales en un *dashboard*.

## 2. Requerimientos funcionales - firmware:

**Req. firmware #2.1:** el *firmware* debe manejar un módulo de comunicación LoRa y estándar LoRaWAN, I<sup>2</sup>C y Modbus.

- **Verificación:** se consultarán las bibliotecas de desarrollo para cada módulo del nodo.
- **Validación:** mediante pruebas de comunicación entre los distintos dispositivos.

**Req. firmware #2.2:** antes de configurarse en modo ocioso, el firmware debe desenergizar la etapa de medición de los sensores y el módulo de comunicaciones con el objeto de ahorrar energía.

- **Verificación:** se consultarán en las hojas de datos de cada etapa los consumos en cada modo.
- **Validación:** se medirá el consumo total del circuito al entrar en ahorro de energía.

## 3. Requerimientos funcionales - backend:

**Req. backend #3.1:** todos los servicios deben poder correr en un *gateway* RAK7243 WisGate Developer D3 pre-configurado.

- **Verificación:** antes de iniciar la instalación se verificará que los servicios puedan correr sobre la arquitectura del dispositivo.
- **Validación:** mediante pruebas de comunicación.

**Req. backend #3.2:** la configuración del *gateway* deberá contemplar un rápido despliegue del dispositivo desarrollado en el marco del presente proyecto.

- **Verificación:** análisis de las hojas de datos de los fabricantes del *gateway* y del módulo *transceiver*.
- **Validación:** pruebas de comunicación entre dispositivos.

**Req. backend #3.3:** el *gateway* debe poder recuperar los datos de la red LoRaWAN y almacenarlos de forma temporal, para luego publicarlos en la red pública *The Things Stack*.

- **Verificación:** análisis de hoja de datos del fabricante del *gateway*, estándar LoRaWAN y diferentes herramientas colaborativas de IoT.
- **Validación:** pruebas de publicación y visualización de parámetros y estados en el *dashboard*.

#### 4. Requerimientos funcionales - frontend

**Req. frontend #4.1:** el sistema permitirá la visualización de parámetros y estados en un *dashboard*.

- **Verificación:** análisis de tecnologías y plataformas de desarrollo compatibles con el sistema de telemetría planteado.
- **Validación:** constatar la correcta visualización de parámetros, estados y valores en la aplicación mediante pruebas de sistema.

**Req. frontend #4.2:** la visualización en el *dashboard* debe ser de fácil lectura y entendimiento para los usuarios, ya sea desde un teléfono celular o una PC.

- **Verificación:** análisis de tecnologías y plataformas de desarrollo compatibles con el sistema de telemetría planteado.
- **Validación:** constatar que la aplicación resulta fácil de utilizar, intuitiva y estética para los usuarios finales.

#### 5. Requerimientos no funcionales

**Req. NF #5.1:** el sistema priorizará el uso de herramientas libres.

- **Verificación:** se comprobará mediante la documentación de respaldo.
- **Validación:** se probará la implementación de las herramientas seleccionadas.

**Req. NF #5.2:** se realizarán pruebas de alcance de transmisión.

- **Verificación:** se comprobarán por medio de pruebas de aceptación.
- **Validación:** a partir de valores tabulados que muestren niveles aceptados para establecer las comunicaciones.

## Análisis de riesgos

Comprende la identificación de los riesgos del proyecto tanto en su planificación como en su implementación, dentro del análisis de riesgos se analizan los factores de probabilidad e impacto.

**Probabilidad de ocurrencia:** a este factor se le asigna un valor de 1 a 5 como se muestra en la tabla A, donde 1 representa una probabilidad de ocurrencia altamente baja, es decir que raramente suceda y con 5 se indica que dicha probabilidad de ocurrencia es alta.

Valor	Grado
1	Raro
2	Muy baja
3	Baja
4	Media
5	Alta

Tabla A – Escala de probabilidad de ocurrencia.

**Severidad:** se pondera qué resultado tiene la materialización de un determinado riesgo, de acuerdo con la tabla B. Se le asigna 1 en el caso en que el impacto sea insignificante y 5 cuando el nivel del riesgo evaluado sea desastroso para el proyecto.

Valor	Nivel	Descripción
1	Insignificante	Impacta levemente en el desarrollo del proyecto
2	Menor	Impacta en el desarrollo del proyecto
3	Moderado	Impacta en la operatividad del macro del proyecto
4	Mayor	Impacta en la operatividad de los procesos del proyecto
5	Desastroso	Impacta en fuertemente en la operatividad

Tabla B - Escala de impacto.

Asimismo, estos riesgos se encasillan en cuatro categorías de acuerdo con la siguiente nomenclatura:

- [PM] = Riesgos asociados a la gestión del proyecto
- [E] = Riesgos externos
- [I] = Riesgos asociados a la ingeniería del proyecto
- [C] = Riesgos asociados a la construcción

A continuación, se detalla cada uno de los riesgos posibles y una breve descripción de ellos.

- **Riesgo 1 - Definición de alcance incompleta [PM]:** no es posible determinar el límite del proyecto, implica que se soliciten cambios que no fueron previstos.
- **Riesgo 2 - Cálculo de costos incorrecto [PM]:** implica que el presupuesto del proyecto es insuficiente para llevarlo a cabo.
- **Riesgo 3 - Demoras por cuestiones organizativas [PM]:** implica que algún hito o la fecha de entrega del proyecto se atrase.
- **Riesgo 4 - Errores de estimación de tiempos [PM]:** implica que no sea posible cumplir con el cronograma de trabajo.

- **Riesgo 5 - Surgimiento de tareas que no fueron previstas [PM]:** implica que algún hito o la fecha de entrega del proyecto se atrase y el costo del proyecto se eleve.
- **Riesgo 6 - *Scope creep* [PM]:** implica que no sea posible pasar de la etapa de ingeniería a la de construcción.
- **Riesgo 7 - Fluctuación de costos [E]:** implica que se eleve el costo del proyecto.
- **Riesgo 8 - Las partes interesadas solicitan cambios de último momento [E]:** implica que algún hito o la fecha de entrega del proyecto se atrase y el costo del proyecto se eleve.
- **Riesgo 9 - Surgen nuevos interesados y solicitan modificaciones [E]:** implica que algún hito o la fecha de entrega del proyecto se atrase y el costo del proyecto se eleve.
- **Riesgo 10 - Cambios en la normativa vigente [E]:** implica que se tenga que rediseñar algún subsistema para adecuarlo a la normativa.
- **Riesgo 11 - Las partes interesadas adelantan la fecha de entrega del proyecto [E]:** implica que el proyecto no pueda ser terminado, o el prototipo no funcione correctamente.
- **Riesgo 12 - Condiciones climáticas adversas [E]:** dificulta los trabajos en la intemperie y eventualmente el funcionamiento de algún subsistema. Riesgo eléctrico.
- **Riesgo 13 - No disponer a demanda de las instalaciones/equipamiento de comunicaciones para llevar a cabo las pruebas de campo/transmisión de datos [E]:** implica un retraso en los tiempos planificados.
- **Riesgo 14 - Interferencia de otros equipos que funcionen en la misma banda de frecuencia [E]:** implica que no sea posible obtener mediciones desde el módulo.
- **Riesgo 15 - Fallas de fabricación de equipamiento/componentes [E]:** deriva en un malfuncionamiento del subsistema en el que se encuentra colocado.
- **Riesgo 16 - Cese del soporte de los fabricantes [E]:** el ciclo de vida del producto se acorta, no es posible garantizar la continuidad de servicio normal ante fallas.
- **Riesgo 17 - Retrasos en la entrega de los diversos equipos/materiales para la electrónica [E]:** importación del producto desde el país de origen del proveedor hasta Argentina.
- **Riesgo 18 - Fallas de seguridad informática [E]:** afecta la disponibilidad del servicio y compromete la confidencialidad de los datos.
- **Riesgo 19 - Relevamiento de campo incompleto [I]:** implica que el sistema no cumpla con las especificaciones de alcance.
- **Riesgo 20 - Supuestos inexactos sobre cuestiones técnicas [I]:** incumplimiento de normas y estándares, fallas del prototipo, implica que se deba hacer un rediseño.
- **Riesgo 21 - La arquitectura propuesta no es compatible con las instalaciones [I]:** implica que se deba realizar un rediseño de la arquitectura.
- **Riesgo 22 - Problemas con el cumplimiento de estándares del cliente final [I]:** implica que el producto no sea aceptado para su uso en el sitio.
- **Riesgo 23 - Solicitud de modificación por cambio en las condiciones del sitio [C]:** implica que se deba realizar un rediseño de la arquitectura o de algún subsistema.

- **Riesgo 24 - Fallas en alguna PC de trabajo [C]:** pérdida de documentos del proyecto, software y archivos del desarrollo.
- **Riesgo 25 - Errores en el diseño/implementación de la electrónica [C]:** la electrónica no cumple con los estándares de calidad requeridos.
- **Riesgo 26 - Errores en la programación [C]:** el funcionamiento del módulo no cumple con los estándares de calidad requeridos.
- **Riesgo 27 - Errores en la comunicación serie/inalámbrica [C]:** fallas en adquisición y transmisión de datos.

En la tabla C, se listan los riesgos evaluados para el presente proyecto.

Riesgo	S	O	RPN	S*	O*	RPN*
1	4	2	8	-	-	-
2	4	3	12	3	2	6
3	3	4	12	3	3	9
4	4	3	12	3	3	9
5	3	2	6	-	-	-
6	2	1	2	-	-	-
7	3	3	9	-	-	-
8	3	3	9	-	-	-
9	3	1	3	-	-	-
10	4	1	4	-	-	-
11	4	1	4	-	-	-
12	2	5	10	-	-	-
13	4	1	4	-	-	-
14	4	1	4	-	-	-
15	4	1	4	-	-	-
16	5	1	5	-	-	-
17	3	1	3	-	-	-
18	5	2	10	-	-	-
19	2	3	6	-	-	-
20	4	2	8	-	-	-
21	3	2	6	-	-	-
22	3	2	6	-	-	-
23	3	3	9	-	-	-
24	5	1	5	-	-	-
25	4	3	12	3	2	6
26	4	3	12	3	2	6
27	4	3	12	3	2	6

Tabla C – Análisis de riesgo del proyecto

En la primera columna se muestra el número de riesgo, luego su probabilidad de ocurrencia (O), seguido por la severidad (S), el número de prioridad de riesgo, también conocido como RPN (*Risk Priority Number*), y posteriormente, de acuerdo con el criterio adoptado: se tomarán medidas de mitigación en los riesgos cuyos números de RPN sean mayores a 12, los valores marcados con (\*) en la tabla corresponden luego de haber aplicado la mitigación.

Por último, se detalla el plan de mitigación de los riesgos que originalmente exceden el RPN máximo establecido:

- **Plan de mitigación – Riesgo 2:** el impacto se puede reducir si se mejora la planificación financiera, a partir de un adecuado análisis de los gastos estimados, un adecuado flujo de caja, con la compra de materiales por anticipado, a partir de un buen planteo de inventario.  
Se reduce levemente la severidad al mejorar la planificación y se reduce también la probabilidad de ocurrencia previendo compras anticipadas.
- **Plan de mitigación – Riesgos 3 y 4:** el impacto se puede reducir consultando con un comité de expertos, a partir de una adecuada revisión de las tareas por llevarse a cabo, de modo que se puedan evitar demoras innecesarias y pérdidas de la motivación. Se reduce levemente la severidad al mejorar la planificación de tareas y se reduce también la probabilidad de ocurrencia consultando con expertos en la materia.
- **Plan de mitigación – Riesgo 25:** el impacto se puede reducir con un rediseño y una nueva implementación en la electrónica, a partir de una adecuada revisión por parte de un comité de expertos que aporten su experiencia en la temática.  
Se reduce levemente la severidad al rediseñar y se reduce también la probabilidad al contar con el apoyo de profesionales capacitados en el tema.
- **Plan de mitigación – Riesgo 26:** el impacto se puede reducir con un rediseño y una nueva implementación en la programación, a partir de una adecuada revisión por parte de un comité de expertos que aporten su experiencia en la temática.  
Se reduce levemente la severidad al rediseñar y se reduce también la probabilidad al contar con el apoyo de profesionales capacitados en el tema.
- **Plan de mitigación – Riesgo 27:** el impacto se puede reducir con una nueva evaluación y análisis en los protocolos de comunicación, a partir de una adecuada revisión por parte de un comité de expertos que aporten su experiencia en la temática.  
Se reduce levemente la severidad al reevaluar y se reduce también la probabilidad al contar con el apoyo de profesionales capacitados en el tema.

## Análisis de costos

En esta sección se expone un resumen preliminar de los costos asociados al presente proyecto.

Para este análisis se tienen en cuenta tres partes principales:

- **Ingresos:** provienen de las ventas proyectadas para un período de 4 años, sobre la base de un margen de ganancia establecido sobre el costo de producción, en caso de que el producto sea comercializado en kits de 100 nodos con un *gateway*.
- **Costos:** se consideran los gastos directos (costo de los materiales y mano de obra), como gastos indirectos (servicios, gastos de mantenimiento de unidades fallidas, gastos administrativos, etc.).
- **Inversiones:** financiamiento para cubrir el desarrollo del prototipo.
- **Impuestos:** deducciones impositivas derivadas de la actividad.

Con estas variables se realiza el cálculo del flujo de fondos que se muestra en la tabla D, en donde se obtiene un valor actual neto de u\$s 97.236,15, un plazo de repago de 15,9 meses y una tasa interna de retorno del 108,42 %.

Índice inflacionario	8%				
Percepción impositiva	21%				
Capital de inversión	1 075,93 USD				
	Años				
	1	2	3	4	5
<b>INGRESO ANUAL ESTIMADO</b>	<b>1 075,93 USD</b>	<b>53 025,64 USD</b>	<b>111 101,33 USD</b>	<b>174 227,09 USD</b>	<b>181 802,18 USD</b>
<b>COSTOS OPERATIVOS</b>					
Materia prima	1 075,93 USD	29 564,78 USD	59 129,55 USD	88 694,33 USD	88 694,33 USD
Costos directos de producción	24 900,00 USD	2 592,00 USD	2 784,00 USD	2 976,00 USD	3 168,00 USD
Costos indirectos	1 000,00 USD	15 000,00 USD	16 200,00 USD	17 400,00 USD	18 600,00 USD
<b>TOTAL COSTOS OPERATIVOS</b>	<b>26 975,93 USD</b>	<b>47 156,78 USD</b>	<b>78 113,55 USD</b>	<b>109 070,33 USD</b>	<b>110 462,33 USD</b>
<b>GANANCIA NETA</b>	<b>- 20 529,00 USD</b>	<b>4 568,40 USD</b>	<b>25 992,35 USD</b>	<b>51 405,84 USD</b>	<b>56 290,48 USD</b>
<b>FLUJO NETO DE CAJA</b>	<b>- 21 518,85 USD</b>	<b>4 654,47 USD</b>	<b>26 078,42 USD</b>	<b>51 491,92 USD</b>	<b>56 376,56 USD</b>
<b>FLUJO DE CAJA ACUMULADO</b>	<b>- 21 518,85 USD</b>	<b>- 16 864,38 USD</b>	<b>9 214,04 USD</b>	<b>60 705,96 USD</b>	<b>117 082,52 USD</b>
<b>Período de repago</b>	<b>2,65</b>	La inversión se recupera en 2,65 años			
<b>VAN</b>	<b>\$97 236,15</b>	Valor actual neto			
<b>TIR</b>	<b>90%</b>	Tasa interna de Retorno			
<b>ROI</b>	<b>108,42</b>	Retorno Sobre inversión			

Tabla D – Evaluación de costos del proyecto

A continuación, presentamos el informe final del proyecto.

## Resumen

Si se considera una planta solar fotovoltaica o algún tipo de arreglo que conforme un sistema fotovoltaico, existen parámetros críticos implicados en la generación de energía solar como irradiancia, temperatura y potencia generada que, en caso de desviarse del rango normal, afectarán la eficiencia de la instalación y en consecuencia su rentabilidad.

Para tener un control sobre la eficiencia o con fines de mantenimiento, es indispensable monitorear y registrar estos parámetros para entender el comportamiento de la instalación en el tiempo.

Para medir y registrar estas variables involucradas en la evaluación del rendimiento de sistemas solares fotovoltaicos tales como temperatura de celda, irradiancia y potencia del arreglo, en el marco del presente proyecto se diseñó y se construyó un dispositivo de telemetría basado en la tecnología IoT (*Internet of Things*) para el monitoreo de la instalación solar fotovoltaica del centro tecnológico FUNINTEC (Fundación Innovación y Tecnología), ubicado dentro del predio de la UNSAM (Universidad Nacional de San Martín) en el partido de General San Martín.

La instalación fotovoltaica bajo ensayo consiste en un sistema híbrido de 12 paneles solares y un banco de baterías que puede generar una potencia pico de 3 kW y es capaz de inyectar energía a la red eléctrica, además de abastecer parcialmente las instalaciones del FUNINTEC.

El prototipo implementado está compuesto por sensores de temperatura e irradiancia junto con la electrónica necesaria para convertir las variables físicas en datos digitales, así como también módulos de procesamiento y comunicaciones y, además un sistema de alimentación autónoma a batería y energía solar.

Las mediciones obtenidas desde los sensores se envían a un repositorio central de información en la nube mediante una red de radiofrecuencia inalámbrica basada en tecnología LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) para la explotación visual de los datos de una forma amigable para los operadores y que además, permite descargar estos datos para efectuar análisis avanzado sobre la operación del sistema fotovoltaico.

# 1. Aspectos teóricos

En este capítulo se llevará a cabo un análisis detallado del marco teórico necesario para el desarrollo del prototipo, asimismo se presentarán los conceptos básicos introductorios de las principales temáticas abordadas, por un lado, las energías renovables y por otro el concepto de internet de las cosas.

## 1.1. Energías renovables

### 1.1.1. Los recursos energéticos en el mundo y la energía solar

El término energías renovables (ER) se refiere a los recursos energéticos que se reponen naturalmente. Dentro de estas fuentes de energía se incluye la energía solar. Actualmente el consumo de energía a nivel global está dominado por fuentes de energía no renovable de origen fósil (ver Figura 2), con un crecimiento sostenido del aporte de las energías renovables, fruto de los avances tecnológicos que han permitido disminuir los costos de generación y de los acuerdos mundiales para disminuir el aumento progresivo de la temperatura global del planeta.

Este acuerdo, en continua discusión, abarca un conjunto de medidas que incluyen la transición energética cuyo objetivo es disminuir el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles mediante su reemplazo por fuentes renovables [1].

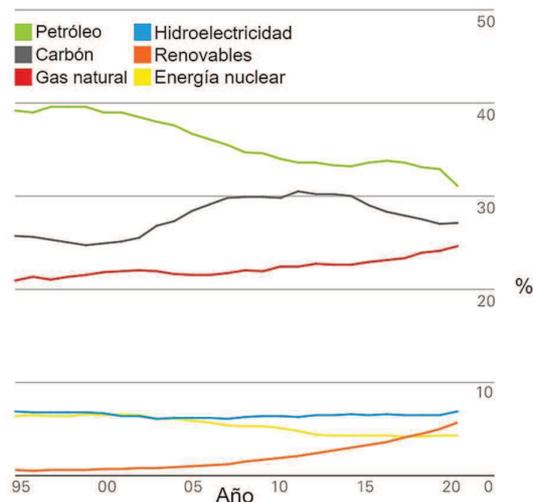


Figura 2 - Tendencia del consumo de energía primaria global en porcentajes según el año.

De acuerdo con el gráfico de la Figura 2, el incremento en cuanto al aporte de las energías renovables se mantiene [2].

Al analizar la potencia instalada a nivel mundial de energías renovables (Figura 3), es posible observar que actualmente la potencia total está dominada por la energía hidráulica, mientras que la energía solar y eólica son las fuentes que más han crecido en la última década debido a los grandes avances tecnológicos incorporados a la industria energética [3].

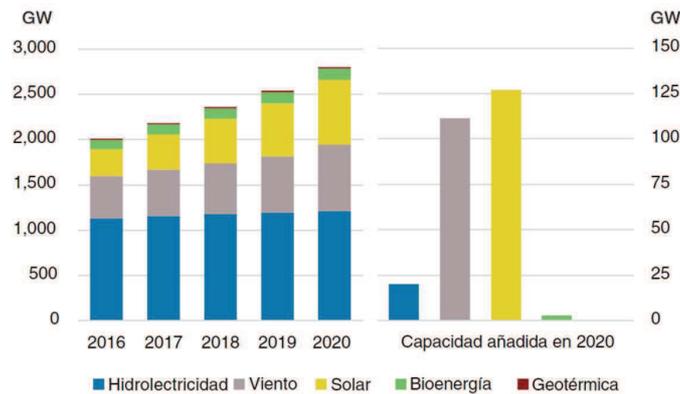


Figura 3 - Potencia renovable instalada a nivel mundial por tipo de fuente.

En cuanto al uso de la energía para generar electricidad se observa que las nuevas incorporaciones de potencia a la matriz eléctrica mundial por parte de las energías renovables comenzaron a superar a los aportes con energías no renovables alrededor del año 2010, siendo el porcentaje de participación para el 2020 de un 82 % para las renovables y de un 18 % para las no renovables. La tendencia de crecimiento de las energías renovables, es posible observarla en la línea roja de la Figura 4 [3].

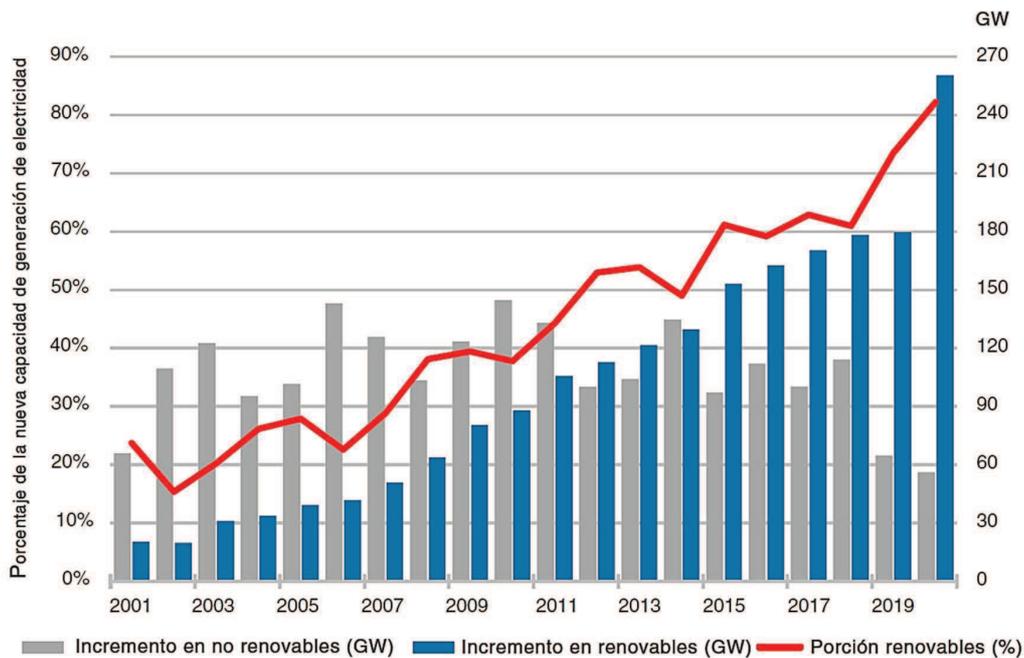


Figura 4 - Nuevos aportes a la matriz eléctrica mundial.

En cuanto a los costos de generación de energía renovable la cifra utilizada para comparar distintas fuentes es el costo nivelado promedio ponderado global de la electricidad (LCOE, *Levelized Cost of Energy*).

Este índice representa el costo de convertir una fuente de energía en electricidad y sus unidades están dadas generalmente en USD/MWh. Para su cálculo se tienen en cuenta todos los costos de producción durante su vida útil. Según las últimas cifras, calculadas en 2020, el LCOE de la energía solar fotovoltaica disminuyó en un 85 % desde el 2010 siendo esta tecnología la que más avances tuvo en cuanto a su costo de generación (Figura 4).

Otra cifra que se evalúa, tanto en el aspecto técnico como económico, es el factor de capacidad. Este factor indica la generación actual de una planta o sistema comparada con la máxima generación en un período de tiempo dado sin ningún tipo de interrupción. Este depende de la disponibilidad del recurso y de las tecnologías utilizadas.

Para el caso de la energía solar este valor está limitado por el tiempo disponible de radiación solar por día. En los últimos años este valor ha mejorado debido a los avances en cuanto a tecnologías de materiales y rendimiento de instalaciones.

	Costos totales instalados			Factor de capacidad			Costo nivelado de la electricidad		
	(2020 USD/kW)			(%)			(2020 USD/kWh)		
	2010	2020	Cambio porcentual	2010	2020	Cambio porcentual	2010	2020	Cambio porcentual
Bioenergía	2 619	2 543	-3%	72	70	-2%	0.076	0.076	0%
Geotérmica	2 620	4 468	71%	87	83	-5%	0.049	0.071	45%
Energía hidroeléctrica	1 269	1 870	47%	44	46	4%	0.038	0.044	18%
Solar FV	4 731	883	-81%	14	16	17%	0.381	0.057	-85%
CSP	9 095	4 581	-50%	30	42	40%	0.340	0.108	-68%
Energía eólica terrestre	1 971	1 355	-31%	27	36	31%	0.089	0.039	-56%
Energía eólica marina	4 706	3 185	-32%	38	40	6%	0.162	0.084	-48%

Figura 5 - Costo total instalado, factor de capacidad y costo nivelado de tendencias de electricidad por tecnología, 2010 y 2020.

De acuerdo con la información proporcionada en la Figura 5, es posible observar que el cambio porcentual para la energía solar (en especial fotovoltaica) fue de un -85 % en 10 años.

El panorama mundial es claro e indica que los desarrollos y aplicaciones en el área de las energías renovables y en particular aquellos que incorporen fuentes de energía solar y eólica son de suma importancia para satisfacer las necesidades actuales y futuras de acceso y distribución de la energía [4].

Dentro del contexto actual se llevó a cabo el presente proyecto siendo un aporte relevante desarrollar aplicaciones destinadas a mejorar la producción de energía eléctrica a través de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución.

En las secciones siguientes se presentan los conceptos básicos necesarios para comprender el proceso de generación eléctrica a través de la tecnología fotovoltaica. Estos conceptos son imprescindibles para desarrollar aplicaciones IoT destinadas al monitoreo de sistemas fotovoltaicos.

### 1.1.2. El Sol

Se trata de una esfera de gas caliente cuya temperatura interna llega a más de 20 millones de kelvin debido a las reacciones de fusión nuclear en su núcleo, que convierten el hidrógeno en helio.

La radiación del núcleo interior no es visible ya que es fuertemente absorbida por una capa de átomos de hidrógeno cerca de la superficie del sol. El calor se transfiere a través de esta capa por convección. Se puede describir como un cuerpo negro con una temperatura de 5.800 K.

La potencia total emitida por el sol se calcula multiplicando la densidad de potencia emitida por el área de la superficie del sol que da  $9,5 \times 10^{25}$  W.

La potencia total emitida desde el sol se compone de muchas longitudes de onda y, por lo tanto, aparece como blanco o amarillo para el ojo humano. Estas longitudes de onda diferentes pueden ser vistas al pasar la luz a través de un prisma, o gotas de agua en el caso de un arco iris. Diferentes longitudes de onda se muestran como diferentes colores, pero no todas las longitudes de onda se pueden ver porque son "invisibles" al ojo humano.

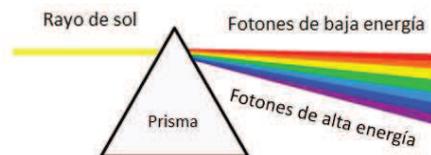


Figura 6 - Longitudes de onda a través de un prisma.

La constante solar es la cantidad de energía que el sol deposita por unidad de tiempo y superficie, y que es directamente expuesta como luz solar. La constante solar es igual a aproximadamente  $1.368 \text{ W/m}^2$  a una distancia de una unidad astronómica del sol (es decir, en la Tierra o a la misma distancia del sol que ella).

La luz del Sol en la superficie de la Tierra es atenuada por la atmósfera terrestre, de modo que, llega menos energía a la superficie (cerca de  $1.000 \text{ W/m}^2$ ) en condiciones claras cuando el sol está cerca del cenit. La luz del Sol en la parte superior de la atmósfera terrestre está compuesta (por energía total) de aproximadamente un 50 % de luz infrarroja, un 40 % por luz visible y un 10 % de luz ultravioleta.

La atmósfera terrestre filtra más del 70 % de la radiación ultravioleta solar, especialmente en las longitudes de onda más cortas. La radiación ultravioleta solar ioniza la parte superior de la atmósfera del lado diurno de la Tierra, haciendo a la ionosfera conductora de electricidad [5].

### 1.1.3. Masa de aire

Se trata de un coeficiente que se define como la distancia relativa en línea recta del espesor de la atmósfera dada por la longitud de la distancia óptica a través de la atmósfera de la tierra, se expresa como una relación entre el espesor de la atmósfera en el cenit de un punto localizado al nivel del mar.

Se utiliza para ayudar a caracterizar el espectro solar después de que la radiación solar ha viajado a través de la atmósfera. El acrónimo más utilizado para la masa de aire es AM por sus siglas en inglés *Air Mass*.

Esta distancia variará con la altura solar, de modo que cuando la altura solar sea  $90^\circ$  e incida totalmente vertical al lugar, tendremos  $AM=1$ . Fuera de la atmósfera se tiene  $AM=0$ . Al disminuir la altura solar aumentará el espesor de aire que tendrá que atravesar la radiación, disminuyendo la cantidad de energía que finalmente llega a la superficie de la Tierra.

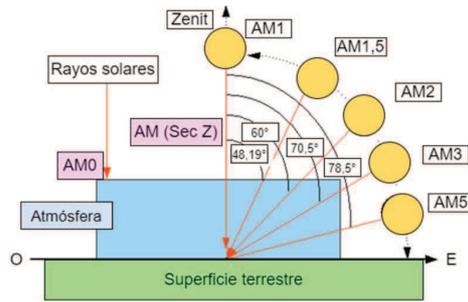


Figura 7 - Masa de aire para diferentes ángulos.

Los paneles solares fotovoltaicos son caracterizados a una masa de aire igual a 1,5, cuyo valor específico, se seleccionó en la década de 1970 con propósitos de estandarización, basándose en el análisis de datos de irradiación solar en Estados Unidos. Desde entonces, la industria solar ha utilizado ese valor de masa de aire para todas las pruebas estandarizadas o clasificación de celdas solares o módulos fotovoltaicos terrestres.

Es utilizado comúnmente para caracterizar la eficiencia de las celdas solares bajo condiciones estandarizadas.

En la Tabla 1 se puede apreciar el valor correspondiente a la masa de aire para distintas alturas solares:

AM	1	1.5	2	3	4	5	6
Altura solar	90°	41,8°	30°	19,5°	14,1°	11,5°	9,6°

Tabla 1 - Masa de aire para distintas alturas solares.

La masa de aire se relaciona con el ángulo cenital mediante la siguiente expresión:

$$AM = \frac{1}{\cos(\alpha)}$$

Ecuación 1 - Masa de aire.

El ángulo  $\alpha$ , de acuerdo con la Ecuación 1 es el resultante de restar al cenit ( $90^\circ$ ) la altura solar [6].

### 1.1.4. Radiación solar

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. La energía procedente del Sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrógeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar.

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe.

La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

Medir la radiación solar es importante, cuando se emplea como fuente alternativa de energía en la generación de electricidad en instalaciones solares fotovoltaicas [5].

### 1.1.4.1. Distribución espectral de la radiación solar

La energía solar llega en forma de radiación electromagnética o luz. La radiación electromagnética, son ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse, por lo que estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la tierra desde el Sol y las estrellas.

La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad que se define como  $C=299.792 \text{ km/s}$ .

La radiación es emitida sobre un espectro de longitud de ondas, con una cantidad específica de energía para cada longitud de onda. La longitud de onda de la luz es tan corta que suele expresarse en nanómetros.

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro en diferentes longitudes de onda, como se muestra en la Figura 8, que se extiende desde longitudes de onda corta (frecuencias muy altas), como los rayos gama, hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas) como las ondas de radio.

El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior y la energía de una fracción diminuta de radiación, llamada fotón, es inversamente proporcional a su longitud de onda, entonces a menor longitud de onda mayor contenido energético [7].

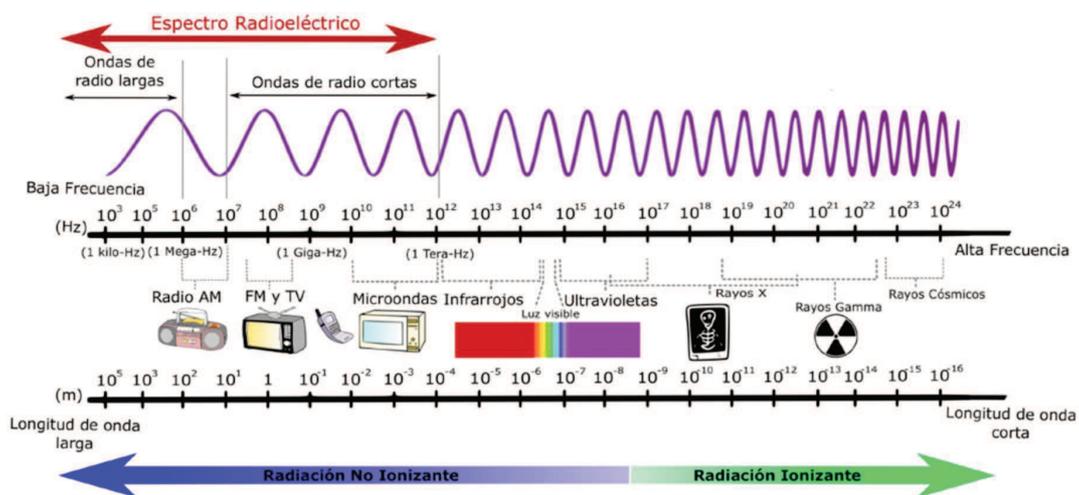


Figura 8 - Espectro electromagnético.

### 1.1.5. Hora solar pico

Se trata de la energía solar recibida en horas por metro cuadrado, y esta energía no será la misma dependiendo de la localización (cuanto más cerca del ecuador mayor será) y de la época

del año. Se puede definir como el número de horas al día con una hipotética irradiancia de  $1.000 \text{ W/m}^2$ , que en conjunto suman la misma irradiancia total que la real de ese día.

Una hora solar pico o HSP es equivalente a  $1 \text{ kWh/m}^2$ , y es un modo de contabilizar la energía recibida del sol agrupándola en paquetes.

Para calcular el valor de la HSP se debe dividir el valor de la irradiancia incidente entre el valor de la potencia de la irradiancia medida en condiciones estándar (con las que se miden los parámetros característicos de los módulos fotovoltaicos), es decir que, si se dispone de los datos de irradiancia solar de un determinado día y se divide por  $1.000$ , se pueden obtener las horas solares pico.

Si se multiplica el valor HSP por la potencia pico entregada por los módulos, se puede obtener la energía que estos proporcionan, sin considerar las pérdidas que suelen ser del orden del  $20 \%$  [8].

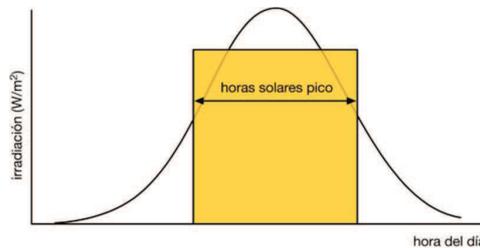


Figura 9 - Hora Solar Pico.

### 1.1.6. Componentes de la radiación solar

El Sol constituye una inmensa fuente de radiación electromagnética. Una parte de esta radiación incide en la atmósfera terrestre llegando en menor intensidad en la superficie. Esta reducción de intensidad se debe a diferentes factores.

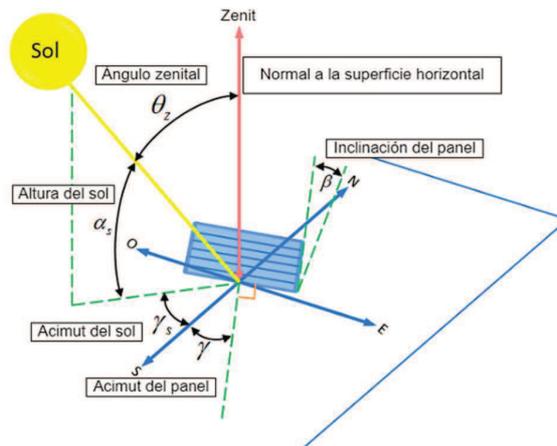


Figura 10 - Geometría solar.

Podemos diferenciar los diferentes tipos de radiación:

- **Radiación directa:** es aquella radiación que llega directamente del Sol en la superficie terrestre sin cambiar la dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

- **Radiación difusa:** es una parte de la radiación que atraviesa la atmósfera, es reflejada por las nubes o absorbida por estas. Esta radiación va en todas direcciones, efecto producido por las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque solo ven la mitad.
- **Radiación reflejada:** este tipo de radiación solar es la que refleja la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.
- **Radiación solar global:** la radiación solar global es la radiación total. Esta constituye la suma de las tres radiaciones anteriormente nombradas.

En un día despejado, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado no hay radiación directa y la totalidad de la radiación que incide es difusa.

Los distintos tipos de colectores solares aprovechan de forma distinta la radiación solar. Los colectores solares planos, por ejemplo, captan la radiación total (directa + difusa), sin embargo, los colectores de concentración solo captan la radiación directa. Por esta razón, los colectores de concentración suelen situarse en zonas de muy poca nubosidad y con pocas brumas, en el interior, alejadas de las costas.

Los colectores solares planos pueden colocarse en cualquier lugar, siempre que la insolación sea suficiente [9].



Figura 11 - Distribución de la radiación solar.

La transformación de energía solar, en energía eléctrica, se debe al efecto fotovoltaico.

En la Figura 12, se puede apreciar la distribución espacial promedio, de la irradiación solar diaria sobre un plano horizontal, en este caso se tomaron en consideración dos meses del año, enero y septiembre, la elección se debe a que el mes de enero es representativo de los valores máximos de irradiación y septiembre de los valores medios.

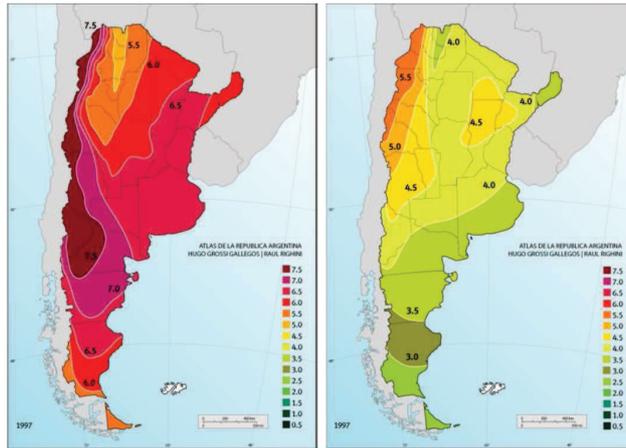


Figura 12 - Distribución espacial promedio en Argentina, de la irradiación solar diaria sobre un plano horizontal, para dos meses de enero y septiembre.

En casi todo el territorio argentino,  $4,5 \text{ kWh/m}^2$  se considera un valor representativo del promedio. En el caso de las provincias del norte de nuestro país, los valores de irradiación son notablemente mayores [10].

Para captar esa irradiación se emplean paneles solares fotovoltaico. El silicio es uno de los materiales principales que se utiliza en la fabricación de celdas solares fotovoltaicas que conforman paneles solares, se trata de un material semiconductor que, al captar la radiación solar por medio de fotones, libera dichos electrones, estos circulan de forma permanente por el material, debido a la presencia de un campo eléctrico.

El campo eléctrico se genera al combinar en la celda fotovoltaica, dos capas de material semiconductor, pero con cargas eléctricas opuestas cada capa. Un conductor externo, permite el flujo de electrones de una capa a otra, cuando la celda recibe radiación, produciendo así una corriente eléctrica.

### 1.1.7. Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es un proceso que genera una diferencia de potencial o corriente en una celda solar. Una celda solar está compuesta por dos tipos de semiconductores, tipo *n* y *p* (*unión p-n*).

Cuando incide radiación solar (fotones con una cierta longitud de onda) sobre una celda, la energía de los fotones se absorbe y se transfiere a los electrones del material. Esta energía transferida a los electrones provoca que estos salten a la banda de conducción del material y de esta manera pueden moverse libres y debido al campo eléctrico formado por la *unión pn* se crea una corriente eléctrica en la celda.

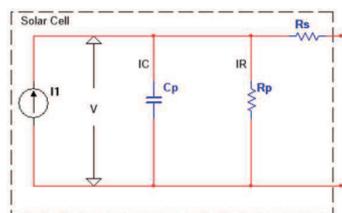


Figura 13 - Circuito equivalente de una celda fotovoltaica.

Una celda fotovoltaica puede representarse con el circuito equivalente de la Figura 13 en donde  $I_f$  es la corriente fotogenerada,  $R_s$  es la resistencia de los contactos,  $R_p$  la resistencia parásita y  $C_p$  es la capacidad de transición y difusión de la juntura [11].

Existe una variedad de materiales y procesos capaces de satisfacer los requisitos para la conversión de energía fotovoltaica, pero en la práctica casi toda la conversión de energía fotovoltaica utiliza materiales semiconductores basados en la denominada **unión pn**.

La Figura 14 representa la estructura de una celda solar convencional. La luz solar incide desde arriba, en la parte frontal de la celda. Una grilla metálica forma uno de los contactos eléctricos del diodo y permite que la luz ingrese en el semiconductor entre las líneas de la grilla, para ser absorbida y convertida en energía eléctrica.

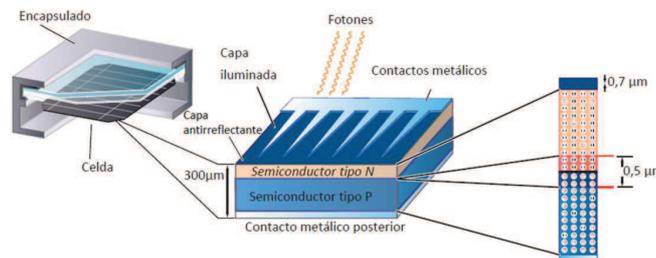


Figura 14 - Estructura de una celda solar fotovoltaica.

El contacto metálico consiste en una capa metálica que se coloca en la parte posterior de la celda.

Los materiales semiconductores provienen de diferentes grupos de la tabla periódica, sin embargo, comparten ciertas similitudes. Las propiedades del material semiconductor están relacionadas con sus características atómicas, y cambian de un grupo a otro.

Al momento de diseñar materiales fotovoltaicos, los investigadores y los diseñadores se aprovechan de estas diferencias para mejorar el diseño y elegir el material óptimo para una aplicación fotovoltaica [12].

### 1.1.8. Módulos fotovoltaicos de uso terrestre

Los módulos fotovoltaicos de uso terrestre están compuestos por celdas solares comúnmente fabricadas en silicio debido a su gran abundancia en la tierra, por contar con una baja tasa de contaminación, presentar una alta durabilidad en el tiempo y contar con sobresalientes propiedades fisicoquímicas.

Las celdas de silicio se pueden clasificar en tres tipos dependiendo su proceso de fabricación: celdas monocristalinas, celdas policristalinas y película delgada [13].

### 1.1.9. Características eléctricas de los módulos

Al analizar la ficha técnica de un panel fotovoltaico, se observan una serie de parámetros que lo definen eléctricamente. Los parámetros característicos de un panel vienen medidos por los fabricantes en condiciones estándar ya mencionadas anteriormente: para una irradiancia de 1.000 W/m<sup>2</sup>, una temperatura de celda de 25 °C y una distribución espectral de AM 1,5 G.

Los paneles solares fotovoltaicos están compuestos por un conjunto de celdas conectadas convenientemente unas a otras, de tal forma que reúnan unas condiciones óptimas para su posterior utilización en sistemas de generación de energía, convirtiendo la luz solar en energía eléctrica. Por ejemplo, los paneles de 12 V se componen de 36 celdas, los paneles de 24 V por 72 celdas y los llamados de “conexión a red” por 60 celdas o 72 celdas. Los paneles del sistema fotovoltaico híbrido instalado en FUNINTEC tienen 60 celdas dispuestas en serie, conformando seis filas de 10 celdas cada una.

El comportamiento de una celda fotovoltaica viene definido por la curva I-V (Corriente-Tensión) representada en la Figura 15:

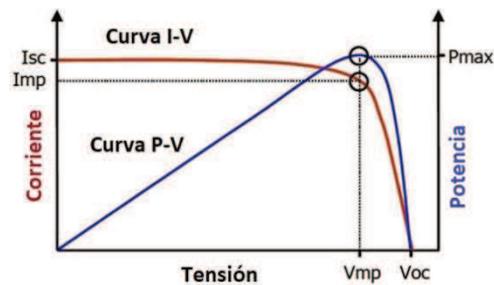


Figura 15 - Curvas: I-V/P-V.

- **Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ):** sus siglas provienen del inglés, *Short Circuit Intensity*. Indica la máxima corriente que se puede extraer del panel. Esta condición se puede obtener cortocircuitando los dos conectores del panel (tensión cero y máxima corriente).
- **Tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ):** sus siglas provienen del inglés, *Open Circuit Voltage*. Indica la máxima tensión que se puede obtener del panel. Esta condición se da midiendo la tensión del panel sin carga, es decir, con los conectores del panel sin conectar (corriente cero y máxima tensión).
- **Potencia máxima ( $P_{Max}$ ):** es la potencia máxima que puede suministrar el panel, es el punto donde el producto entre la corriente y tensión es máximo, bajo condiciones estándar de medida.
- **Corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{mp}$ ):** es la corriente producida cuando la potencia es máxima, bajo condiciones estándar de medida.
- **Tensión en el punto de máxima potencia ( $V_{mp}$ ):** es la tensión producida cuando la potencia es máxima, bajo condiciones estándar de medida [14].
- **Factor de forma ( $FF$ ):** sus siglas provienen del inglés, *Fill Factor* y es la relación entre la potencia máxima (o el producto de la corriente y la tensión en el punto de máxima potencia) y el producto de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ . Su valor es más alto cuanto mejor es la celda.

$$FF = \frac{P_{Max}}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

Ecuación 2 - Factor de forma.

- **Coefficiente de variación de la potencia ( $P_{Max}$ ) con la temperatura (gama):** este parámetro es el más usado en estudios de rendimiento de paneles.

$$\boxed{Gama = alfa + beta + k}$$

Ecuación 3 - Gama, con  $k$  que representa la variación del factor de forma con la temperatura.

- **Coefficiente de variación de la corriente ( $I_{sc}$ ) con temperatura(alfa):** la  $I_{sc}$  de un panel se incrementa cuando hay un aumento de temperatura de funcionamiento. Esto se debe a que la temperatura disminuye la distancia entre las bandas de una celda solar provocando un aumento de absorción de fotones [15].
- **Coefficiente de variación de la tensión ( $V_{oc}$ ) con temperatura (beta):** la  $V_{oc}$  de una celda representa la condición donde el régimen de generación de fotones y recombinación de portadores se igualan. En esta condición la corriente es nula. La generación de fotones depende del espectro incidente y de la absorción de fotones mientras que la recombinación depende fuertemente de la temperatura. Este parámetro representa entre un 80 y 90 % del total de la variación de potencia de un panel debido a la temperatura [15].
- **Temperatura de celda en operación nominal (NOCT):** es la temperatura de funcionamiento de la celda, cuando se encuentran operando a circuito abierto bajo las siguientes condiciones:
  - **Irradiancia:** 800 W/m<sup>2</sup>
  - **Temperatura del aire:** 20 °C
  - **Velocidad del viento:** 1 m/s
  - Parte posterior del panel ventilado

Para obtener una aproximación de la temperatura de funcionamiento de las celdas de un panel se puede utilizar la expresión:

$$\boxed{T_{Cell} = T_{air} + \frac{NOCT - 20}{80} \times S}$$

Ecuación 4 - Temperatura de funcionamiento de las celdas de un panel.

Donde  $S$  es la irradiancia en mW/cm<sup>2</sup> y  $T_{air}$  la temperatura de ambiente.

### 1.1.10. Sistemas fotovoltaicos

Es posible hacer una clasificación en función de que estos sistemas se encuentren o no conectados a la red de energía eléctrica. Cuando se trate de sistemas autónomos, independientes de la red eléctrica, se hablará de sistemas *off-grid*. Cuando los sistemas estén conectados a la red se hablará de sistemas *on-grid*.

- **On-Grid:** estos sistemas pueden o no incluir un subsistema de acumulación para almacenamiento intermedio.

Las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red tienen un objetivo muy diferente respecto a los sistemas autónomos: mientras que estos buscan un abastecimiento continuo y estable, los conectados a red tratan de alcanzar el autoconsumo y pueden lograr un rendimiento económico por la venta de la electricidad en excedente producida. Los criterios de dimensionamiento están orientados en función de alguno o ambos objetivos.

- **Off-Grid:** un sistema fotovoltaico aislado, es un sistema solar automático que produce potencia eléctrica para cargar un banco de baterías durante el día, para su uso en la noche o cuando la energía del sol no está disponible.
- **Híbrido:** un sistema fotovoltaico híbrido tiene conexión con varias fuentes de energía: paneles solares, red eléctrica, batería, grupo electrógeno entre otros. El inversor regula cuando y cuanta energía tomar y de qué fuente. Puede utilizar el excedente para cargar las baterías o inyectar a la red. Algunos modelos de inversores poseen un limitador de inyección de electricidad a la red [16].

La instalación solar fotovoltaica existente en el FUNINTEC pertenece a esta clase, ya que cuenta con un banco de baterías.

### 1.1.11. Regulador o controlador de carga

El regulador es un conversor de potencia que gestiona la energía producida por los módulos fotovoltaicos.

Su función es evitar situaciones de sobrecarga y sobredescarga de las baterías, lo que favorece asimismo la prolongación de su vida útil. Por medio del uso de reguladores se puede:

- Bloquear la corriente inversa
- Asegurar el llenado óptimo de la batería
- Prevenir de sobrecarga a la batería

También asegura el suministro eléctrico diario suficiente y evita la descarga excesiva de las baterías.

De no existir el regulador podrían producirse sobrecargas dado que los módulos fotovoltaicos tienen una tensión nominal mayor que la batería. La tensión nominal de los módulos es mayor porque:

- Atenúa posibles disminuciones de tensión por el aumento de la temperatura
- Asegura la carga correcta de la batería: para ello, la tensión  $V_{OC}$  del módulo deberá ser mayor que la tensión nominal de la batería

Existen distintos tipos de reguladores, se los puede clasificar por ejemplo según:

- **La tecnología del interruptor:** por ejemplo, si se trata de un relé electromecánico, o de estado sólido.
- **Gestión de la energía:** por ejemplo, por modulación ancho de pulsos (PWM), trabajan siempre a la tensión de las baterías; o por seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) trabajan en el punto de máxima potencia de los paneles.
- **Posición del interruptor:** en serie o paralelo.

Los reguladores de carga con tecnología PWM utilizan la modulación de un tren de pulsos para controlar la tensión y corriente que inyectan en las baterías. Para esto sensan la tensión de las baterías todo el tiempo y en función de este valor generan un tren de pulsos. Si el ancho de los pulsos es amplio, el promedio de la tensión de carga será alto y por lo tanto también lo

será la corriente de carga. Si el ancho del pulso es angosto el promedio de la tensión será menor. Mediante esta modulación es posible programar un ciclo adecuado de carga de baterías.

Un regulador solar MPPT contiene un conversor DC-DC y un PWM, ambos controlados mediante una lógica o algoritmo llamado seguidor de punto máximo de potencia (*Maximum Power Point Tracking*), que optimiza el flujo eléctrico entre los paneles fotovoltaicos y el banco de baterías.

Su principal ventaja consiste en extraer de los paneles la máxima energía disponible. Para que esto sea posible, debe mantener trabajando a los paneles, independientemente de la irradiancia disponible, en una zona lo más cercana posible al punto de máxima potencia,  $P_{max}$  (Figura 15).

El regulador MPPT detecta los cambios en la tensión y corriente del arreglo de paneles y ajusta el conversor DC-DC y el *duty cycle* del PWM para cargar las baterías.

La mayoría de los reguladores solares MPPT tienen una eficiencia del 93-97 % en la conversión.

Los reguladores actúan como conversores de potencia, en especial, aquellos que utilizan conversores *Buck* reducen la tensión aumentando la corriente (para cargar una batería de tensión menor a la del módulo fotovoltaico).

Por el contrario, los conversores *Boost* aumentan la tensión disminuyendo la corriente (para cargar una batería de tensión superior a la del módulo fotovoltaico). Esto es posible debido a la relación entre potencia (P), tensión (V) y corriente (I):

$$P = I \times V$$

Ecuación 5 - Potencia.

Al realizar de forma simultánea el aumento de corriente y la disminución tensión y viceversa, nos aseguramos de que se mantenga la misma potencia y por ello se transmite la misma cantidad de energía en ambas situaciones.

Esto significa que toda la energía disponible en el arreglo solar se entregará a las baterías y cargas, se esté trabajando con un conversor *Buck* (reducción de la  $V_{mp}$  de los módulos) o con un conversor *Boost* (incremento de la  $V_{mp}$  de los módulos).

Antes de elegir el regulador de carga adecuado, es importante determinar si la tensión del módulo fotovoltaico a máxima potencia ( $V_{mp}$ ) debe reducirse (*bucked*) o aumentarse (*boosted*) en comparación con la tensión nominal de la batería que se está cargando [17].

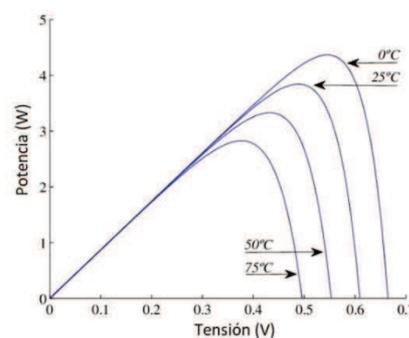


Figura 16 - Curva P-V a diferentes temperaturas en una celda solar fotovoltaica.

La Figura 16 ilustra como el MPP varía de acuerdo con las condiciones ambientales. En este caso se muestran curvas correspondientes a diferentes temperaturas.

### 1.1.12. Inversor – Generalidades

Si se considera un *inverter on grid*, se puede decir que es un dispositivo que transforma e inyecta la potencia de carácter DC generada por los paneles solares hacia la red de distribución en forma de potencia de corriente alterna.

Si se considera un *inverter off grid*, se puede decir que es un dispositivo que convierte la corriente continua que suministran los módulos solares fotovoltaicos o las baterías en corriente alterna. Este tiene la capacidad de ondular una corriente y/o tensión senoidal de 50 Hz y operar en 220/ 380 V. Comúnmente utilizan técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM) para realizar la conversión.

El sistema del inversor está compuesto por:

- **Control principal:** incluye todos los elementos de control general, los sistemas de generación de onda basados en sistemas de modulación de ancho de pulsos (PWM) y parte del sistema de protecciones.
- **Etapa de potencia:** esta etapa puede ser única o modular en función de la potencia deseada. Se opta por la tecnología en baja frecuencia ya que ofrece buenos resultados con una alta fiabilidad y bajo costo. Debe incorporar un filtro de salida para la onda, evitando el rizado en la tensión procedente de los módulos.
- **Control de red:** es la interfaz entre la red y el control principal. Proporciona el correcto funcionamiento del sistema al sincronizar la forma de onda generada a la de la red eléctrica, ajustando tensión, fase, sincronismo, etc.
- **Seguidor del punto de máxima potencia (MPPT):** es uno de los factores más importantes en un inversor. Su función es acoplar la entrada del inversor a los valores de potencia variables que produce el generador fotovoltaico, obteniendo en todo momento la mayor cantidad de energía disponible, la máxima potencia.
- **Protecciones:** los inversores deben estar protegidos ante tensión y frecuencia de red fuera de márgenes, temperatura de trabajo elevada, tensión baja del generador, intensidad del generador fotovoltaico insuficiente, fallo de la red eléctrica y transformador de aislamiento, además de las protecciones pertinentes contra daños a personas y compatibilidad electromagnética.
- **Monitorización de datos:** los inversores disponen de microprocesadores que les faciliten una gran cantidad de datos tanto de los parámetros habituales (tensión, corriente, frecuencia, etc.) como de parámetros externos (radiación, temperatura ambiente, etc.) e internos (temperaturas de trabajo).

El rendimiento depende de la variación de la potencia de la instalación, por lo que debe procurarse trabajar con potencias cercanas o iguales a la nominal, puesto que, si la potencia procedente de los paneles fotovoltaicos a la entrada del inversor varía, el rendimiento disminuye. Los principales parámetros habituales a tener en cuenta en un inversor son:

- **Tensión nominal (V):** tensión que debe aplicarse en bornes de entrada del inversor.

- **Potencia nominal (VA):** potencia que suministra el inversor de forma continuada.
- **Potencia activa (W):** potencia real que suministra el inversor teniendo en cuenta el desfase entre tensión y corriente.
- **Capacidad de sobrecarga:** capacidad del inversor para suministrar una potencia superior a la nominal y tiempo que puede mantener esa situación.
- **Factor de potencia:** cociente entre potencia activa y potencia aparente a la salida del inversor. En el caso ideal, donde no se producen pérdidas por corriente reactiva, su valor máximo es 1.
- **Eficiencia o rendimiento:** relación entre las potencias de salida y entrada del inversor.
- **Autoconsumo:** potencia consumida por el inversor comparada con la potencia nominal de salida.
- **Armónicos:** un armónico ideal es una frecuencia de onda múltiplo de la frecuencia fundamental. Únicamente a frecuencia fundamental, se produce potencia activa.
- **Distorsión armónica:** la distorsión armónica total (THD, *Total Harmonic Distortion*) es el parámetro que indica el porcentaje de contenido armónico de la onda de tensión de salida del inversor [18].

### 1.1.13. Baterías en sistemas fotovoltaicos

#### 1.1.13.1. Función y uso del almacenamiento

El almacenamiento se utiliza en los sistemas fotovoltaicos para aumentar la cantidad de tiempo durante el cual el sistema fotovoltaico puede alimentar una carga. Mediante la utilización de baterías es posible extender en el tiempo el flujo de energía desde los paneles hacia las cargas.

Las baterías son el tipo de almacenamiento más común en un sistema fotovoltaico. Sin embargo, en tipos específicos de sistemas o aplicaciones, también se pueden utilizar otros componentes de almacenamiento.

Por ejemplo, en los sistemas de bombeo de agua, la cantidad de almacenamiento de la batería puede reducirse o eliminarse en gran medida si se bombea y almacena agua adicional en un tanque de agua para usar en períodos nublados.

En los sistemas de generación de electricidad independientes, se necesita alguna forma de almacenamiento a menos que la carga coincida exactamente con el tiempo durante el cual brilla el sol. (Esta coincidencia exacta es rara y se limita a unos pocos tipos de sistemas, por ejemplo, alimentar un ventilador para enfriar o, en algunos casos, bombear agua para riego).

En los sistemas independientes, el almacenamiento es necesario no solo para alimentar cargas durante la noche, sino también para permitir que una carga funcione durante el tiempo nublado. La cantidad de días de almacenamiento necesarios depende del patrón meteorológico en una ubicación en particular, y las ubicaciones más nubladas necesitan más almacenamiento.

En sistemas con una gran cantidad de almacenamiento, la utilidad adicional del sistema de almacenamiento puede amortiguar el sistema durante períodos de baja insolación, como en invierno.

Por ejemplo, en sistemas de telecomunicaciones que requieren alta confiabilidad, un banco de

baterías bien dimensionado puede permitir una alta confiabilidad sin requerir que la matriz fotovoltaica se dimensione para cumplir con las peores condiciones de insolación posibles.

En general, cuanto mayor sea la cantidad de almacenamiento incluida, menos sensible será el sistema a los períodos de baja insolación y más confiable será la disponibilidad de energía.

En los sistemas conectados a la red eléctrica pública, normalmente no se necesita almacenamiento. La energía fotovoltaica se utiliza cuando brilla el sol y, de noche o durante períodos de tiempo nublado, la red proporciona la electricidad. Sin embargo, incluso en sistemas conectados a la red, se puede incluir almacenamiento.

Las baterías se utilizan, no solo para aumentar la confiabilidad de tener energía como en un sistema autónomo, sino para inyectar la energía generada a la red de distribución durante periodos de tiempo donde no hay disponible radiación solar y la tarifa de compra de la energía sea más conveniente.

Es común el uso de bancos de baterías para las instalaciones de tipo *off grid*, mixtas o híbridas.

Los bancos de baterías para sistemas fotovoltaicos o acumuladores son los encargados del almacenamiento de la energía, para poder suministrarla independientemente de la producción eléctrica del generador fotovoltaico en determinado momento, que servirá como reserva según sea el caso.

La mayoría de las baterías utilizadas en instalaciones fotovoltaicas autónomas son del tipo plomo-ácido (Pb-Ac), ya que este material se adapta bien a los ciclos frecuentes de carga-descarga, sin una profundidad excesiva, propios de las instalaciones fotovoltaicas. También se utilizan baterías de litio [5].

El banco de baterías de la instalación ubicada en el predio de FUNINTEC incluye ocho baterías de Pb-Ac con una tensión nominal de 6 V. El inversor híbrido utiliza el banco de baterías de 48 V para alimentar un circuito de carga compuesto por la iluminación de las oficinas. En caso de corte de luz, el inversor utiliza la energía almacenada en las baterías para generar la tensión de alimentación del circuito.

#### 1.1.14. Rendimiento de un sistema fotovoltaico

El ratio o razón de rendimiento de un sistema fotovoltaico es una magnitud independiente del lugar de ubicación y de las condiciones ambientales, por ello, constituye un factor de calidad.

El ratio de rendimiento se indica en porcentaje y expresa la relación entre la producción real y el rendimiento nominal de la instalación fotovoltaica. De esta forma indica qué proporción de la energía está realmente disponible para la alimentación tras haber descontado las pérdidas energéticas (por ejemplo, pérdidas térmicas y pérdidas por cableado) y el consumo propio para la operación.

Cuanto más cercano al 100 % sea el valor del coeficiente de rendimiento calculado para una instalación fotovoltaica, de forma más efectiva trabajará esta instalación fotovoltaica. No obstante, no es posible alcanzar un valor real del 100 % puesto que durante la operación de la instalación fotovoltaica se producen siempre pérdidas inevitables (por ejemplo, pérdidas

térmicas por el calentamiento de los módulos fotovoltaicos). Sin embargo, las instalaciones fotovoltaicas eficientes alcanzan un coeficiente de rendimiento de hasta el 80 %.

El ratio de rendimiento aporta información sobre la eficiencia energética y la fiabilidad de su instalación fotovoltaica.

Por medio del ratio de rendimiento se puede comparar el rendimiento de una instalación fotovoltaica con el rendimiento de otras instalaciones fotovoltaicas, así como controlar el estado de su instalación fotovoltaica durante un período de tiempo prolongado.

En el cálculo regular del ratio de rendimiento, realizado a intervalos prefijados, no se trata de efectuar una comparación absoluta, sino de la posibilidad de llevar a cabo un control de la evolución y del rendimiento: partiendo de un valor inicial del coeficiente de rendimiento del 100 % durante la puesta en servicio de una instalación fotovoltaica y asumiendo que la instalación funciona óptimamente en ese momento. Calculando paulatinamente el resto de valores del ratio de rendimiento es posible detectar desviaciones y tomar medidas correctivas a tiempo.

Por lo tanto, las desviaciones del valor del ratio de rendimiento en forma de valores por debajo del rango estipulado le indican antes de tiempo un posible fallo de su instalación fotovoltaica.

Para poder calcular el ratio de rendimiento de una instalación fotovoltaica, se precisan conocer diferentes magnitudes. Por un lado, es necesario conocer los valores de irradiación solar del lugar de ubicación de la instalación fotovoltaica. Es posible registrar estos valores con una estación de medición que mida la cantidad de energía irradiada para la instalación fotovoltaica.

Por otro lado, es necesario conocer la potencia nominal de los módulos de la instalación fotovoltaica, así como del rendimiento de los módulos fotovoltaicos. El rendimiento de los módulos está indicado en la hoja de datos del módulo fotovoltaico correspondiente.

El período de estudio óptimo para el cálculo del ratio de rendimiento es de 1 año, también se pueden seleccionar intervalos más breves, por ejemplo, en el caso de que desee comparar instalaciones fotovoltaicas entre sí. Sin embargo, se debería seleccionar un período de estudio mínimo de 1 mes con el fin de descartar que condiciones ambientales como una altura de Sol insuficiente, bajas temperaturas o sombras en los módulos fotovoltaicos y/o en la estación de medición puedan influir excesivamente en el cálculo.

El rendimiento de un sistema se calcula mediante el cociente entre la producción del sistema ( $Y_f$ ) en un período dado y su producción de referencia ( $Y_r$ ), e indica el efecto general de las pérdidas debido a la temperatura e ineficiencias o fallas de todos los componentes del sistema (Ecuación 6) [19].

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{\left( \frac{E_{out}}{P_0} \right)}{\left( \frac{H_i}{G_{i,ref}} \right)}$$

Ecuación 6 - Ratio de rendimiento.

- $E_{out}$ : energía entregada por el sistema, medida en kWh.

- $P_0$ : potencia nominal del sistema, medida en kW.
- $H_i$ : irradiación en el plano de los arreglos, medida en kWh/m<sup>2</sup>.
- $G_{i,ref}$ : irradiancia a la que se determinó  $P_0$ , medida en kW/m<sup>2</sup>.

Cuando se quiere evaluar el rendimiento de una instalación fotovoltaica no solo es necesario conocer la radiación solar incidente efectiva en los paneles solares y la producción energética del sistema sino que también deben tenerse en cuenta las variables que afectan el desempeño de cada una de sus partes funcionales. Los efectos de disminución de producción más importantes se deben a la temperatura.

La temperatura afecta desde la producción de los paneles solares hasta la generación de la potencia alterna que se inyecta a la red. Un sistema de monitoreo diseñado para evaluar el rendimiento de una instalación fotovoltaica debe permitir independizarse de la variable temperatura. De esta manera la cifra de rendimiento obtenida puede ser comparada para poder evaluar su desempeño.

## 1.2. Internet de las cosas (IoT)

La Internet de las Cosas suele definirse como un sistema de objetos interrelacionados conectados a *Internet* que pueden adquirir y transferir datos a través de la red sin intervención humana.

Cualquier dispositivo podría ser conectado a *Internet* e interactuar sin necesidad de la intervención humana, el objetivo por lo tanto es una interacción de máquina a máquina, o lo que se conoce como una interacción M2M (*Machine to Machine*) [20].

El término fue empleado por primera vez en 1999 por el pionero británico Kevin Ashton para describir un sistema en el cual los objetos del mundo físico se podían conectar a *Internet* por medio de sensores. Ashton acuñó este término para ilustrar el poder de conectar a *Internet* las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) que se utilizaban en las cadenas de suministro corporativas para contar y realizar un seguimiento de las mercancías sin necesidad de intervención humana.

Recién se popularizó en 2009, por lo que se estima que fue durante ese año cuando la cantidad de dispositivos conectados a *Internet* superó a la población mundial.

Hoy en día, el término Internet de las Cosas se ha popularizado para describir escenarios en los que la conectividad a *Internet* y la capacidad de cómputo se extienden a una variedad de objetos, dispositivos, sensores y artículos de uso diario.

El rápido crecimiento actual de los sistemas IoT está dado por diferentes tendencias tecnológicas y de mercado entre las que se encuentran:

- La disponibilidad de conectividad generalizada, de bajo costo y alta velocidad, principalmente a través de servicios y tecnologías inalámbricas.
- La adopción generalizada de redes basadas en protocolo IP ofrece una plataforma bien definida que se incorpora a una variedad de dispositivos de forma fácil y económica.
- El desarrollo de dispositivos con mayor potencia de cómputo y menor consumo de energía con costos más bajos.

- La fabricación de dispositivos que incorporan cómputo y comunicaciones en tamaño muy reducido.
- El surgimiento de la computación en la nube que permite que dispositivos pequeños y distribuidos interactúen con potentes sistemas de soporte que brindan capacidades analíticas y de control [21].

La adopción de varios casos de uso de Internet de las Cosas va en aumento, según el último informe de 2021 elaborado por *IoT Analytics*, a partir de la información suministrada por más de 200 empresas de diversas industrias entrevistadas. La empresa promedio ha adoptado ocho casos de uso de IoT diferentes hasta la fecha (de un total de 48) [22].

Los casos de uso de IoT relacionados con las operaciones inteligentes de una empresa son los más adoptados, seguidos por los casos de uso de cadena de suministro inteligente y aquellos que involucran productos de IoT conectados.

El informe muestra en qué han estado invirtiendo las empresas o en qué planean invertir, qué industrias y regiones están por delante y qué casos de uso prometen el ROI (*Return on Investment*) más alto. Las empresas de petróleo y gas y las empresas de energía están por delante del resto. Han implementado un promedio de 15 casos de uso.

A partir de la pandemia por COVID 19 y luego de su finalización, los proveedores priorizan aquellos casos de uso que generan un alto retorno de la inversión (ROI) y aquellos que están en la lista de prioridades de inversión en los próximos años.

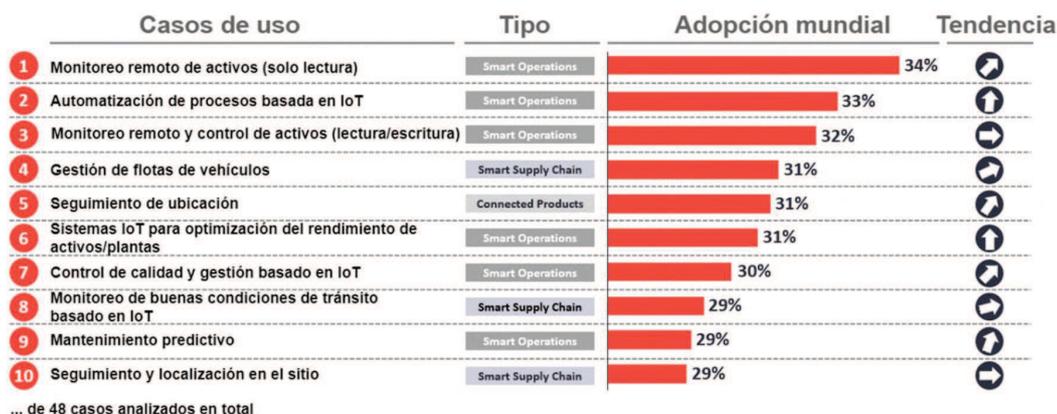


Figura 17 - Top 10 de casos de uso de soluciones basadas en IoT a nivel mundial - octubre 2021.

En la Figura 17 se observa el top 10 de los casos de uso de soluciones basadas en IoT más adoptados a nivel mundial por distintas empresas.

Las ciudades confían cada vez más en la tecnología IoT para volverse "inteligentes". La tecnología IoT ayuda a las ciudades a frenar las ineficiencias, combatir los crecientes niveles de contaminación y mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos. Estos contemplan un incremento de la eficiencia operativa y una mejoría en la toma de decisiones a corto plazo. También se abordan los desafíos (a largo plazo) de sustentabilidad y reducción en la contaminación en ciudades en constante crecimiento.

La Figura 18 representa el top 10 de casos de uso en ciudades inteligentes, dicha evaluación se llevó a cabo en el mes de agosto del 2020 sobre un total de 31 casos de uso. Este análisis contempló la información de 50 ciudades elegidas [23].

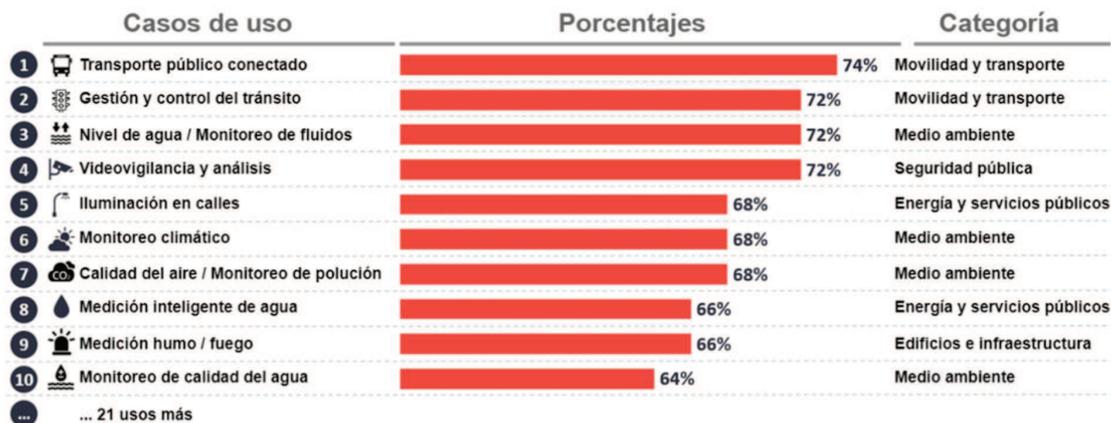


Figura 18 - Top 10 de casos de uso según el concepto de ciudades inteligentes - agosto 2020.

A pesar de la actual pandemia de Covid 19, el mercado de Internet de las cosas sigue creciendo. En el año 2020, por primera vez, hubo más conexiones de IoT (por ejemplo, automóviles conectados, dispositivos domésticos inteligentes, equipos industriales conectados, entre otros) que conexiones que no son de IoT (teléfonos inteligentes, computadoras portátiles y computadoras de escritorio).

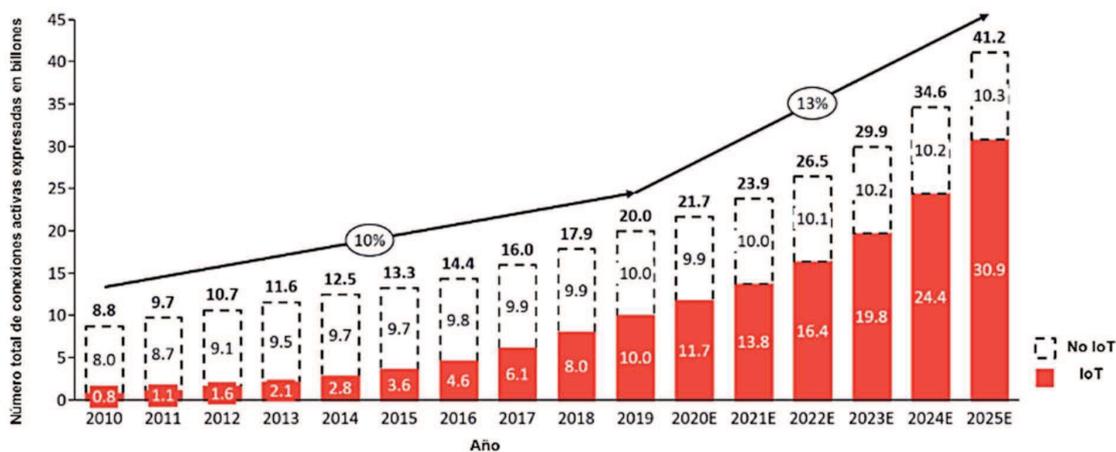


Figura 19 - Número total de conexiones activas de dispositivos IoT y No IoT y su proyección al año 2025.

En la Figura 19 se puede apreciar el crecimiento de conexiones activas de dispositivos IoT y no IoT, así como su proyección de aumento hacia el año 2025. De acuerdo con esa proyección se estima que la cantidad de dispositivos conectados duplique su valor respecto al año 2020 [24].

### 1.3. IoT y su integración con la energía solar fotovoltaica

IoT viene afectando a casi todas las industrias, a medida que los dispositivos comienzan a comunicarse y a tomar decisiones de forma autónoma, sin intervención humana.

IoT conecta dispositivos a través de *Internet*, donde cada dispositivo tiene una dirección IP única, permitiendo el monitoreo y control remoto a través de sistemas de control basados en la nube. El objetivo del IoT es automatizar cada vez más aspectos de nuestras vidas al tiempo que aumenta la eficiencia de los procesos.

En el sector de la energía, IoT desempeña un papel valioso en hacer que los sistemas eléctricos sean más eficientes o “inteligentes”. Se trata de un pilar en la “inteligencia en redes eléctricas”. Las redes eléctricas pueden integrar inteligentemente las acciones de todos los usuarios conectados a ellas: ya sean usuarios generadores, usuarios consumidores y aquellos que hacen ambas cosas, con el objetivo de asegurar el suministro eléctrico, a partir de un aporte sustentable, eficiente y económico.

Las características de las redes inteligentes incluyen un flujo bidireccional controlable de energía eléctrica y un flujo de información automatizado.

Una red inteligente se puede definir como la integración dinámica de los desarrollos en ingeniería eléctrica y en almacenamiento energético, y los avances de las tecnologías de la información y la comunicación. El negocio de la energía eléctrica (generación, transmisión, distribución, almacenamiento y comercialización, incluyendo las energías alternativas), permite que las áreas de coordinación de protecciones, control, instrumentación, medida, calidad y administración de energía, etc., sean concatenadas en un solo sistema de gestión, con el objetivo primordial de realizar un uso eficiente y racional de la energía eléctrica .

Cuando la descentralización del sistema se considera, mediante el despliegue de generación de energía distribuida y almacenamiento de energía en forma de baterías, IoT tiene un potencial significativo para nuevas opciones de gestión y modelo de negocio debido a su capacidad para agregar datos.

El despliegue de recursos energéticos distribuidos cambia un sistema de energía típico de tener cientos de puntos de control a contar potencialmente con millones.

Los futuros sistemas descentralizados requieren de un nivel de monitoreo y control para alcanzar su potencial, al conectar proveedores de energía, consumidores e infraestructura de red, donde la tecnología IoT tiene como objetivo facilitar el funcionamiento de sistemas complejos, de modo que esta tecnología tiene el potencial de aumentar la flexibilidad y capacidad de respuesta de los activos conectados a la red (sistemas fotovoltaicos), así como la visibilidad de los rendimientos de estos para el operador del sistema.

IoT permite la distribución de información a través de toda la infraestructura del sistema eléctrico y permite acceder a datos de parques eólicos remotos, parques solares o estaciones hidroeléctricas en tiempo real.

Los patrones meteorológicos y de generación anteriores, junto con los datos en tiempo real recogidos y comunicados a través de sistemas digitales, pueden ayudar a mejorar la exactitud de los pronósticos de generación renovable. Esto permitiría la participación de las energías renovables en los mercados de la electricidad y ayudaría a operar el sistema [25].

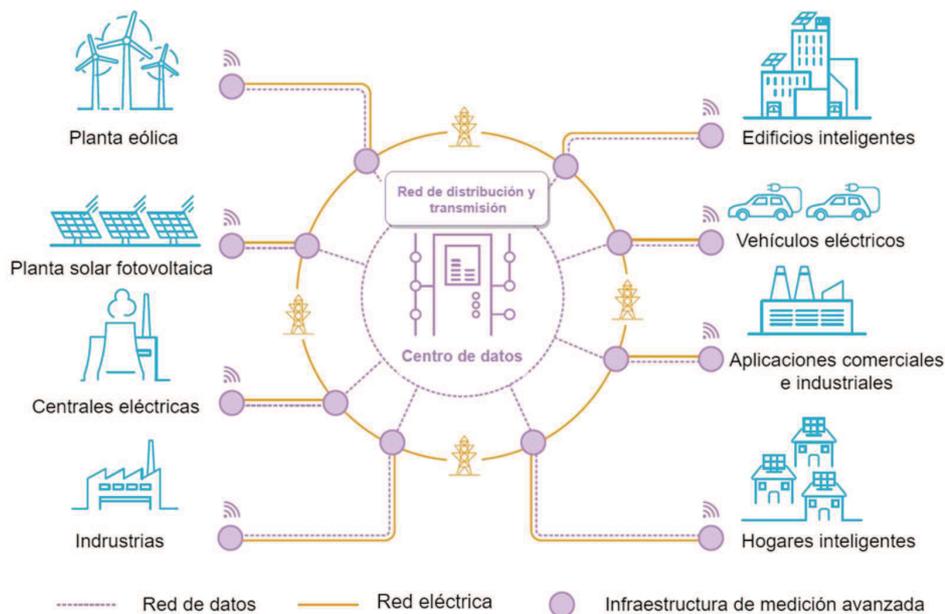


Figura 20 - IoT en contexto - Redes inteligentes que conectan dispositivos inteligentes - Oferta y demanda.

## 1.4. Arquitectura IoT

La arquitectura básica de cualquier solución IoT está dividida en tres secciones o capas:

- **Capa de percepción:** incluye los dispositivos con sensores y actuadores que monitorean o controlan un equipo o proceso físico. Implementan algún tipo de conectividad con el *gateway*, ya sea cableada o inalámbrica.
- **Capa de transporte:** es responsable de la transmisión de datos desde la capa de percepción hasta la capa de procesamiento. Abarca redes cableadas o inalámbricas y *gateways*.
- **Capa de procesamiento:** implementa las funciones de gestión y comunicación con dispositivos, procesamiento y almacenamiento de datos. Normalmente se implementa mediante una plataforma IoT o *middleware* en la nube [26] [27].

Es habitual encontrar también modelos de arquitectura de cuatro o cinco capas donde, por encima de la capa de procesamiento, se incluyen capas que tienen en cuenta las aplicaciones de usuario (capa de aplicación) y la integración con la lógica de negocio (capa de negocio).

- **Capa de aplicación:** es la responsable de dar los servicios de cada tipo de aplicación a los usuarios. Entre los tipos de aplicaciones en las que se puede implementar IoT podemos encontrar hogares, agricultura, ciudades inteligentes, cuidado y monitoreo de salud, entre otros.
- **Capa de negocio:** gestiona todo el sistema IoT, incluyendo aplicaciones, modelos de negocio, ganancias y privacidad de los usuarios. Al gestionarse las actividades, los servicios y los resultados, esta capa ofrece la posibilidad de llevar a cabo optimizaciones y mejoras en el sistema IoT. Por ello la mayoría de los fabricantes hacen uso de la arquitectura que incluye esta capa.

Las tecnologías de computación en la nube actualmente proveen las plataformas IoT que permiten implementar la capa de procesamiento junto con otra serie de servicios para el desarrollo de las capas de aplicación y negocio.

En la Figura 21 se muestran los tipos de arquitecturas utilizados en soluciones IoT, de acuerdo con la cantidad de capas.

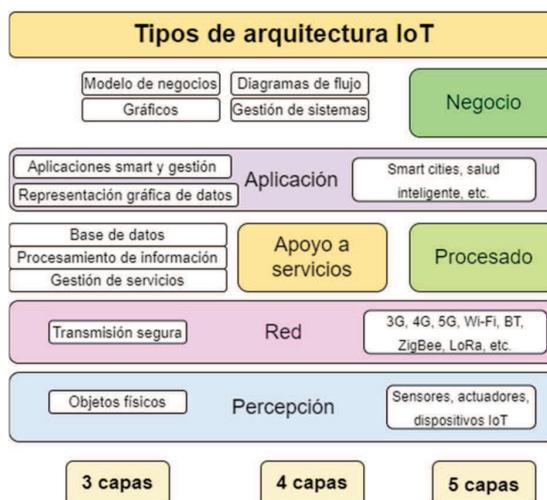


Figura 21 - Arquitectura IoT.

### 1.4.1. Protocolos y tecnologías en IoT

El espectro de protocolos y diferentes soluciones para integrar datos desde dispositivos inteligentes es muy amplio, con lo cual a continuación se describen las principales tecnologías en las que se sustenta el presente proyecto.

#### 1.4.1.1. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

IoT contempla varias tecnologías, una de ellas es LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), la cual tiene una creciente demanda en IoT, por la razón de que es mucho más amigable con respecto al consumo de energía, lo cual indica también que los costos al utilizar tecnología LPWAN disminuyen y su punto más importante, brinda un largo alcance con un consumo menor de energía.

El alcance que se puede obtener utilizando redes LPWAN es de 5 km en áreas densamente pobladas, esto se debe a que el espectro sufre muchas perturbaciones e interferencias, ya sea debido a las estructuras de casas, edificios, otras redes, etc. En áreas rurales la potencia de redes LPWAN puede alcanzar hasta 40 km.

Como toda red, necesita una topología para funcionar y se basa en una red de redes configuradas como estrella, donde cada estrella funciona de forma individual y en caso de ser necesario se comunica con la red siguiente.

La primera estrella en la topología la conforman los dispositivos finales y el *gateway*, la segunda estrella está formada por los *gateways* y un servidor de red central, finalmente la última estrella se forma entre el servidor de red central y los distintos servidores de aplicación que se encargan de administrar los dispositivos por medio de IoT. Esto se ilustra en la Figura 22 [28].

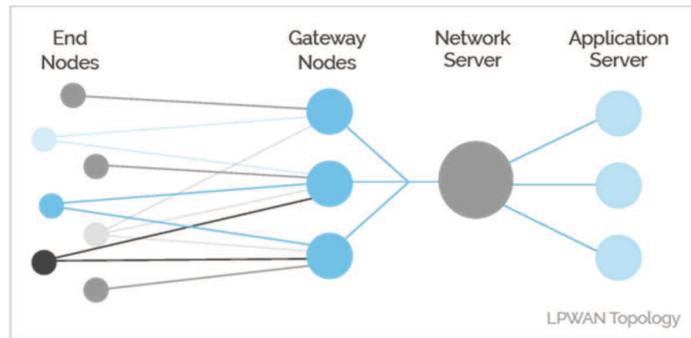


Figura 22 - Topología de una red LPWAN.

A continuación, se describen los elementos físicos que se requieren en una topología para LPWAN:

- **Gateway:** se encarga de ser la puerta de enlace para los dispositivos, de manera que puedan comunicarse y recibir indicaciones desde un servidor.
- **Servidor de red:** responsable de ser el intermediario entre los dispositivos finales y los servidores de aplicación.
- **Servidor de aplicaciones:** distintos servidores, con la facultad de comunicarse con sus propios dispositivos y manejarlos, dar las órdenes del usuario y garantizar el funcionamiento correcto de los dispositivos finales.

LPWAN ha permitido desarrollar un conjunto de tecnologías, las cuales funcionan de la misma manera, pero con cambios sustanciales entre una y otra, algunas de ellas son: Sigfox, LoRa, NB-IoT (*Narrow Band – Internet of Things*), entre otras.

LoRa en particular nace con la necesidad de conseguir que, con una capacidad de transmisión muy baja, se pudieran resolver miles de puntos de medida. La limitación de la capacidad de comunicación supuso un reto y este a su vez generó un proceso de innovación, lo que dio como resultado una nueva familia de equipos de monitorización con gran valor añadido [29].

#### 1.4.1.2. Wi-Fi - generalidades

Se trata de una tecnología de red inalámbrica a través de la cual diferentes sistemas, dispositivos móviles y otros equipos pueden comunicarse. Wi-Fi hace referencia a una marca de la Alianza Wi-Fi, la organización comercial que cumple con los estándares 802.11 relacionados con redes inalámbricas de área local. Actualmente se asocia a este acrónimo a las redes que responden a la familia de estándares IEEE 802.11 [33].

#### 1.4.1.3. Modbus - generalidades

El primer PLC (*Programmable Logic Controller*) aparece aproximadamente a finales de los años 60, se propone un sistema conocido en su momento como **Modular Digital Controller** (cuyo acrónimo es MODICON).

En la década del 70 el MODICON, emergente en el sector industrial, plantea la necesidad de comunicar los equipos, y es entonces cuando nace MODICON Bus (Modbus) el protocolo creado para comunicar los equipos MODICON.

El protocolo Modbus es un protocolo abierto, se trata de una estructura de mensajes desarrollada por MODICON utilizada para comunicaciones entre dispositivos maestro-esclavo/cliente-servidor. MODICON fue posteriormente adquirida por Schneider Electric y los derechos sobre el protocolo fueron liberados por la Organización Modbus.

Muchos equipamientos industriales utilizan Modbus como protocolo de comunicación, por tratarse de un protocolo abierto, por su simplicidad, facilidad y por ser el protocolo más utilizado en la automatización industrial [30].

### 1.4.1. The Things Network (TTN) - generalidades

Es una iniciativa basada en la comunidad para establecer una red de sensores inalámbrica, global y descentralizada de IoT de bajo costo. Se basa en la tecnología LoraWAN. Se puede considerar a TTN como un proveedor de red LoRaWAN.

La iniciativa fue lanzada por Wienke Giezeman en 2015 y actualmente cubre más de 3.000 *gateways* LoRaWAN instalados en más de 150 países. Los voluntarios se encargan de la construcción, el cuidado y el pago de los portales. A partir de esta iniciativa se busca que la red siga la filosofía de la comunidad y por lo tanto sea también “*open source*” en *hardware* y en *software*, gratuita y respaldada por una comunidad mundial activa.

Esta forma de pensar lleva a que la red sea construida a través de colaboraciones de los propios usuarios de comunidad de forma abierta. Así los usuarios crean los *gateways* y se encargan de su cuidado.

Al hacerse miembro de la comunidad se puede participar en la creación de esta red global mediante el registro de nuevos dispositivos o simplemente usar los ya disponibles. La comunidad proporciona una serie de servidores en la nube que gestionan los datos recibidos y los muestran a través de aplicaciones creadas en su portal. Al hacerse miembro se obtiene acceso a una consola desde donde se administran los nodos y *gateways* registrados por el usuario, así como la información que estos transmiten.

Una de las principales ventajas que ofrece TTN es que no es necesario comprar un *gateway* para utilizarla, ya que se pueden usar *gateways* registrados por otros usuarios [56].

### 1.4.1. AllThingsTalk (ATT) - generalidades

*AllThingsTalk* comercializa una plataforma de aplicaciones IoT escalable que se puede utilizar como un entorno ágil de desarrollo de prototipos, así como para la implementación de servicios completos de productos conectados. Permite conectar dispositivos a través de una variedad de redes y administrar dispositivos y usuarios, organizando el acceso y el uso de los datos recopilados [61].

## 2. Introducción específica

En este capítulo se llevará a cabo un análisis detallado de tecnologías y protocolos seleccionados para el desarrollo del proyecto.

Se incluye la descripción detallada de protocolos y tecnologías de comunicaciones, especificaciones técnicas de toda la electrónica requerida para el desarrollo del dispositivo final, así como también las definiciones y teoría específica necesaria para comprender todas las instancias involucradas, desde la adquisición, procesamiento y transmisión de datos, hasta su visualización en un *dashboard* de monitoreo.

### 2.1. Protocolos y tecnologías

#### 2.1.1. Comunicación serie

También denominada comunicación secuencial, se trata del proceso de envío de datos de un bit a la vez, de forma secuencial, sobre un canal de comunicación o un bus.

La electrónica integrada se conforma con circuitos interconectados (procesadores u otros circuitos integrados) para crear un sistema en el que están repartidas las funciones. Para que esos circuitos individuales intercambien su información, deben compartir un protocolo de comunicación común.

Se han definido muchos protocolos de comunicación para lograr este intercambio de datos y, esencialmente, cada uno puede ubicarse en una de dos categorías: serie o paralelo.

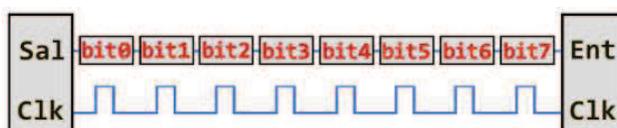


Figura 23 - Ejemplo de una interfaz serie transmitiendo un bit por cada pulso de reloj.

En la comunicación en paralelo todos los bits de cada símbolo se envían al mismo tiempo, y por ello debe haber al menos tantas líneas de comunicación como bits tenga la información a transmitir.

La ventaja de la comunicación serie es que necesita un número menor de líneas de transmisión que una comunicación en paralelo para transmitir la misma información, en la Figura 23 es posible observar que se requiere de 2 cables.

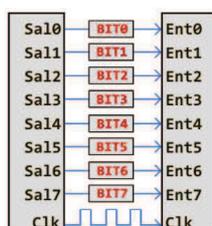


Figura 24 - Ejemplo de un bus de datos de 8 bits, controlado por un reloj que transmite un byte por cada pulso de reloj.

De acuerdo con lo observado en la Figura 24, para una comunicación en paralelo se requiere de 9 líneas mientras que la primera se puede llevar a cabo con una sola línea de transmisión.

Por otra parte, surgen una serie de problemas en la transmisión de un gran número de bits en paralelo, como los problemas de interferencia o desincronización.

A la misma frecuencia de transmisión, la comunicación paralela tiene un mayor rendimiento. La comunicación serie tiene que compensar esta debilidad con una frecuencia más alta.

Ejemplos de este tipo de comunicación: USB (*Universal Serial Bus*), Ethernet, I<sup>2</sup>C (*Inter Integrated Circuits*), SPI (*Serial Peripheral Interface*), PCI Express, RS-232/485, entre otras [31].

### 2.1.1.1. Reglas de comunicación serie

El protocolo serie asincrónico tiene una serie de reglas integradas, que son mecanismos que ayudan a garantizar transferencias de datos sólidas y sin errores. Estos mecanismos, que obtenemos para evitar la señal del reloj externo, son:

- **Velocidad en baudios:** la especificación de velocidad de transmisión indica qué tan rápido se envían los datos a través de una línea serie. Normalmente se expresa en unidades de bits por segundo (bps). Si se invierte la velocidad en baudios, se puede averiguar cuánto tiempo se tarda en transmitir cada bit. Este valor determina durante cuánto tiempo el transmisor mantiene en alto/bajo una línea serie, o a qué velocidad muestrea su línea el dispositivo receptor.

Las velocidades en baudios pueden ser casi cualquier valor dentro de lo que permite el *hardware*. El único requisito es que ambos dispositivos funcionen a la misma velocidad. Una de las velocidades en baudios más comunes, especialmente para cosas simples donde la velocidad no es crítica, es de 9600 bps. Otras velocidades en baudios (estándar) son 1.200, 2.400, 4.800, 19.200, 38.400, 57.600 y 115.200.

Cuanto mayor sea la velocidad en baudios, más rápido se envían/reciben los datos, pero existen límites para la velocidad a la que se pueden transferir los datos. Por lo general, no se encontrarán velocidades superiores a 115.200, lo que es suficientemente rápido para la mayoría de los microcontroladores. Al aumentar demasiado surgirán errores en el extremo receptor, ya que los pulsos de reloj y los períodos de muestreo no pueden mantenerse.

- **Estructura de los datos:** cada bloque de datos (generalmente un byte) que se transmite se envía en realidad en un paquete de bits. Los paquetes se crean agregando bits de sincronización y paridad a nuestros datos.
- **Bloque de datos:** lo importante de cada paquete serie es la información que lleva. Ambiguamente se llama a este bloque de datos un “bloque”, porque su tamaño no está específicamente establecido. En este estándar, la cantidad de datos en cada paquete se puede establecer en valores de 5 a 9 bits. Ciertamente, el tamaño de datos clásico es un byte de 8 bits, pero se usan otros tamaños. Un bloque de datos de 7 bits puede ser más eficiente que 8 si solo está transfiriendo caracteres ASCII de 7 bits.

Luego de acordar la longitud para un carácter, ambos dispositivos serie también tienen que acordar el formato de sus datos. Si no se indica lo contrario, generalmente se puede asumir que los datos se transfieren enviando primero el bit menos significativo.

- **Bits de sincronización:** son dos o tres bits especiales transferidos con cada porción de datos. Está constituido por el bit de inicio y el/los bit/s de parada. Tal como indica su nombre, estos bits marcan el principio y el final de un paquete. Siempre hay un único bit de inicio, pero la cantidad de bits de parada se puede configurar en uno o dos (aunque normalmente se deja en uno).

El bit de inicio siempre se indica mediante una línea de datos inactiva que pasa de 1 a 0 (ALTO a BAJO). Los bits de parada volverán al estado inactivo manteniendo la línea en 1 (ALTO).

- **Bits de paridad:** la paridad es una forma de comprobación de errores muy simple y de bajo nivel. Se presenta en dos variantes: impar o par. Para generar el bit de paridad, se suman todos los bits del byte de datos (5 a 9), y el resultado de la suma define si el bit es 1 o 0. Por ejemplo, suponiendo que la paridad se establece en par y se agrega a un byte de datos como 0b01011101, que tiene una cantidad impar de unos (5), el bit de paridad quedaría en 1. Por el contrario, si el modo de paridad se configuró en impar, el bit de paridad sería 0.

La paridad es opcional, y no se usa mucho. Puede ser útil para transmitir a través de medios ruidosos, pero también ralentizará un poco la transferencia de datos y requerirá que tanto el transmisor como el receptor implementen el manejo de errores (generalmente, si se detecta error, los datos recibidos con falla deben reenviarse).

Teniendo en cuenta la variedad de estos mecanismos de señalización, es posible observar que no hay una sola manera de enviar datos en serie. El protocolo es altamente configurable. La parte crítica es asegurarse de que ambos dispositivos en una línea serie estén configurados para usar exactamente los mismos protocolos [31].

### 2.1.1.2. Cableado y hardware

Un bus serie consta de solo dos cables, uno para enviar datos y otro para recibir. Por lo tanto, los dispositivos serie deben tener dos pines serie: el receptor, **RX** y el transmisor, **TX**. Es importante tener en cuenta que esas etiquetas **RX** y **TX** son con respecto al dispositivo en sí. Entonces, el **RX** de un dispositivo debe ir al **TX** del otro y viceversa.

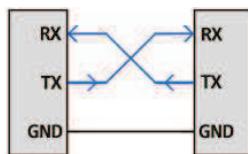


Figura 25 - Cableado en serie.

### 2.1.2. UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

El receptor/transmisor asincrónico universal es un dispositivo clave de un sistema de comunicación serie. Las funciones principales del chip UART son: el manejo de las interrupciones de los dispositivos conectados al puerto serie y la conversión de los datos en

formato paralelo a datos en formato serie, para que puedan ser transmitidos a través de los puertos y viceversa.

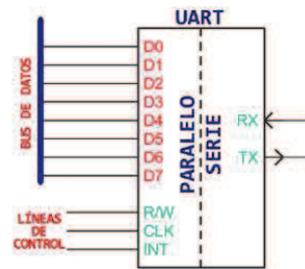


Figura 26 - UART simplificada.

Se trata de un bloque de circuitos responsable de implementar la comunicación en serie. El UART actúa como un intermediario entre las interfaces paralelas y seriales. En un extremo del UART hay un bus de ocho o más líneas de datos (más algunos pines de control), en el otro lado están los dos cables serie: ***RX*** y ***TX***.

Como lo indican las letras R y T en el acrónimo, los UART son responsables de enviar y recibir datos en serie. En el lado de transmisión, un UART debe crear el paquete de datos agregando la sincronización y los bits de paridad y enviar ese paquete por la línea ***TX*** con una sincronización precisa (de acuerdo con la velocidad de transmisión establecida).

En el extremo de recepción, el UART tiene que muestrear la línea de ***RX*** a velocidades acordes con la velocidad de transmisión que se espera, seleccionar los bits de sincronización y entregar como resultado los datos [31] [32].

### 2.1.3. I<sup>2</sup>C

Abreviatura de Inter-IC, es un tipo de bus diseñado por Philips Semiconductors a principios de los años 80, que se utiliza para conectar circuitos integrados. Este bus se utiliza dentro de una misma placa de un dispositivo.

El I<sup>2</sup>C es un bus con múltiples maestros, lo que significa que se pueden conectar varios chips al mismo bus y que todos ellos pueden actuar como maestro, solo con iniciar la transferencia de datos.

El bus I<sup>2</sup>C, es un estándar que facilita la comunicación entre microcontroladores, memorias y otros dispositivos, solo requiere de dos líneas de señal y masa. Permite el intercambio de información entre muchos dispositivos a una velocidad estándar de 100 kbit/s, aunque también soporta el modo *full speed* de 400 kbit/s, *fast mode* de 1 mbit/s y *high speed* de 3,2 Mbit/s.

La metodología de comunicación de datos del bus I<sup>2</sup>C es en serie y sincrónica. Una de las señales del bus marca el tiempo (pulsos de reloj) y la otra se utiliza para intercambiar datos.

Descripción de las señales:

- **SCL** (*system clock*) es la línea de los pulsos de reloj que sincronizan el sistema.
- **SDA** (*system data*) es la línea por la que se mueven los datos entre los dispositivos.
- **GND** (masa) común de la interconexión entre todos los dispositivos conectados al bus.

Las líneas SDA y SCL son del tipo drenaje abierto, es decir, un estado similar al de colector abierto, pero asociadas a un transistor de efecto de campo (o FET). Se deben polarizar en estado alto (conectando a la alimentación por medio de resistores “pull-up”) lo que define una estructura de bus que permite conectar en paralelo múltiples entradas y salidas.

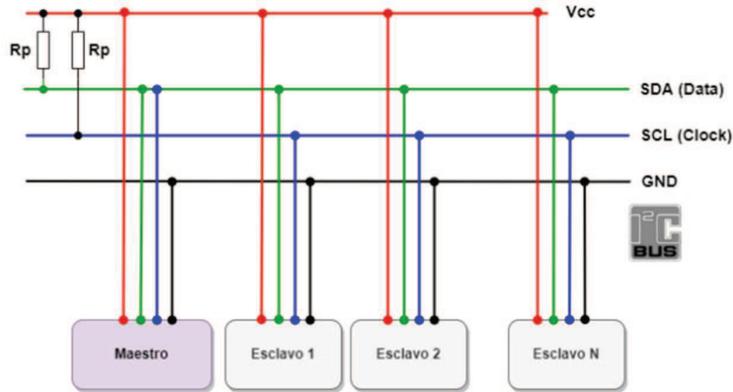


Figura 27 - Estructura de interconexión genérica de dispositivos.

En la Figura 27 es posible observar la interconexión genérica de dispositivos en un bus I<sup>2</sup>C.

Las dos líneas del bus están en un nivel lógico alto cuando están inactivas. En principio, el número de dispositivos que se puede conectar al bus no tiene límites, aunque hay que observar que la capacidad máxima sumada de todos los dispositivos no supere los 400 pF.

El valor de los resistores de polarización no es muy crítico y puede ir desde 1,8 kΩ a 47 kΩ. Un valor menor de resistencia incrementa el consumo de los circuitos integrados, pero disminuye la sensibilidad al ruido y mejora el tiempo de los flancos de subida y bajada de las señales. Los valores más comunes en uso son entre 1,8 kΩ y 10 kΩ.

El protocolo I<sup>2</sup>C funciona con una arquitectura maestro-esclavo (*master-slave*). En esta arquitectura existen dos tipos de dispositivos:

- **Maestro o controlador:** son los que inician y coordinan la comunicación.
- **Esclavos o periféricos:** son los dispositivos que están a la espera de que algún maestro se comunique con ellos. Casos comunes son los sensores y actuadores que soportan este protocolo, aunque también es posible, y en ocasiones necesario, que un microcontrolador se comporte como un esclavo.

Cada pulso en el **pin SCL** le indica al dispositivo receptor que lea el valor del **pin SDA**. De esta forma los bits son puestos en SDA uno por uno. En la Figura 28 se muestra una transferencia del valor 77.

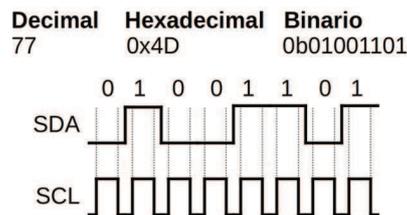


Figura 28 - Transferencia del número 77 (decimal).

Los mensajes están compuestos por varias tramas o secciones. Específicamente un mensaje está compuesto por una trama de dirección (que indica a cuál esclavo va dirigida la información) y una o varias tramas de datos.

En la Figura 29 se muestra la estructura de un mensaje I<sup>2</sup>C.

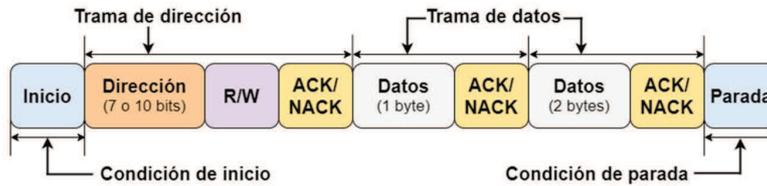


Figura 29 - Estructura de mensaje I<sup>2</sup>C.

**Condición de inicio (start condition):** para enviar un mensaje a un dispositivo controlador coloca el **pin SDA** en estado bajo manteniendo el **pin SCL** en estado alto. Esto hace que el resto de los dispositivos entiendan que un mensaje está a punto de ser enviado.

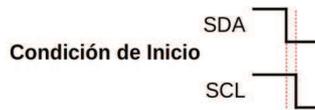


Figura 30 - Condición de inicio.

**Trama de dirección (address frame):** la trama de dirección contiene la dirección del esclavo con el cual se desea comunicar el maestro, seguida por el bit escritura/lectura (*R/W*) y el bit de reconocimiento (*ACK/NACK*).

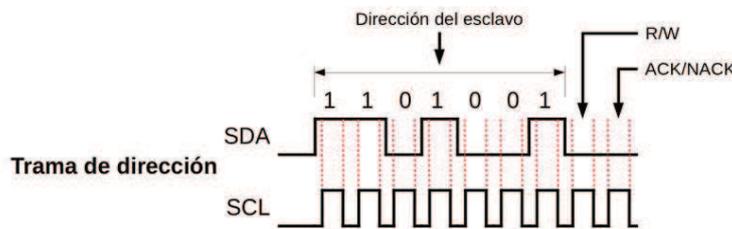


Figura 31 - Trama de dirección.

La dirección del esclavo puede tener 7 o 10 bits y solo puede existir un esclavo con esa dirección en el bus. El bit *R/W* indica el tipo de operación a realizar. Es decir, que indica si el controlador va a enviar ( $R/W = 0$ ) o recibir ( $R/W = 1$ ) información desde el esclavo.

El bit de *ACK/NACK* o de reconocimiento es el último bit de cada trama (tanto de dirección como de datos). Este bit es enviado por el dispositivo que está recibiendo la trama. En el caso particular de la trama de dirección si el bit de reconocimiento es igual a cero indica que en el bus existe un esclavo con la dirección enviada.

**Trama de datos (Data frame):** después de enviada la trama de dirección comienza la transferencia de información entre el maestro y el esclavo anteriormente indicado.

Los datos pueden ser enviados por el esclavo o el maestro, depende del valor del bit *R/W* de la trama de dirección.

Toda trama de datos concluye con un bit de reconocimiento. Este bit tiene que ser puesto a cero por el dispositivo que está recibiendo la información para indicar que se recibió correctamente.

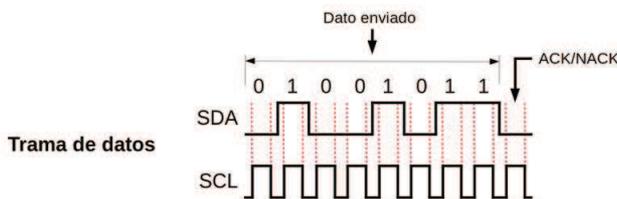


Figura 32 - Trama de datos.

**Condición de parada (stop condition):** una vez se han enviado todas las tramas de datos el dispositivo controlador pone ambos pines en estado alto, primero el pin SCL y después el pin SDA. A esto se le denomina condición de parada y sirve para indicarle al esclavo que la comunicación ha terminado [33].

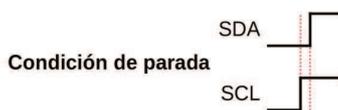


Figura 33 - Condición de parada.

## 2.1.4. Tecnología Wi-Fi

La especificación de IEEE 802.11ac establece las tasas de transferencia hasta 433 Mbit/s por flujo de datos, consiguiendo teóricamente tasas de 1,3 Gbit/s empleando 3 antenas. Opera dentro de la banda de 5 GHz, amplía el ancho de banda hasta 160 MHz - 40 MHz en las redes 802.11n, utiliza hasta 8 flujos MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) e incluye modulación de alta densidad del tipo 256 QAM.

En este tipo de red existe un dispositivo denominando *Access Point* (AP) que se encarga de asegurar el acceso a la red y las comunicaciones entre los dispositivos autorizados. Conforme se requiera expandir la zona de cobertura de la red será necesario incluir mayor cantidad de AP los que conformarán una suerte de malla para asegurar la cobertura deseada.

Cuando la zona de cobertura se torna relativamente amplia el control centralizado de los APs se delega a una entidad llamada *Wireless Lan Controller* (WLC). Esta toma la responsabilidad de controlar el registro, autenticación y gestión del *acceso -roaming* de los distintos dispositivos que se conectan a la red [34].

## 2.1.5. Modbus

Este protocolo de comunicación está situado en los niveles 1, 2 y 7 del Modelo OSI, basado en la arquitectura maestro/esclavo (o cliente/servidor si hablamos de su versión Ethernet). Un fabricante puede habilitar las siguientes posibilidades en su hardware, especialmente para las variaciones que trabajan sobre estándares seriales: el equipo solo puede ser esclavo, el equipo solo puede ser maestro o el equipo puede configurarse como maestro o como esclavo.

Este protocolo permite el control de una red de dispositivos, por ejemplo, un equipo de medición temperatura y humedad puede comunicar los resultados a una PC. Modbus también

se usa para la conexión de una PC de supervisión con una unidad remota (RTU) en sistemas de supervisión de adquisición de datos (SCADA). Existen versiones del protocolo Modbus para puerto serial y Ethernet (Modbus/TCP).

La estación maestra inicia la comunicación solicitando que los esclavos envíen sus datos. Los esclavos, por su parte, reciben el pedido del maestro y devuelven los datos solicitados. Los datos transmitidos pueden ser discretos o números, es decir, es posible enviar un bit para encender o apagar un motor o enviar valores numéricos como temperatura y presión [30].

### 2.1.5.1. Formato de tramas Modbus

El protocolo Modbus define una unidad de datos de protocolo (PDU, *Protocol Data Unit*) muy sencilla y totalmente independiente de las capas de comunicación adyacentes.

El mapeo de protocolo Modbus, en buses o redes específicos, puede introducir algunos campos adicionales en la unidad de datos de la aplicación (ADU, *Application Data Units*).

**PDU:** es la unidad de datos básica en el protocolo Modbus. Consta de dos campos:

- **Código de Función:** codifica el tipo de acción a realizar por parte del servidor. Ocupa un Byte.
- **Campo de Datos:** tiene que ver con el mensaje. Si este ha sido enviado por el cliente hacia el servidor, contendrá información que el servidor necesita para ejecutar la acción indicada por el código de función. Si, por el contrario, el mensaje ha sido enviado por el servidor podrá contener, los datos solicitados por el cliente, o un código de error que indicará que la acción solicitada no se ha podido llevar a cabo y la causa.

**ADU:** es la unidad de datos del protocolo en la práctica. Tiene un campo adicional que depende del tipo de red o bus sobre el que se use el protocolo.

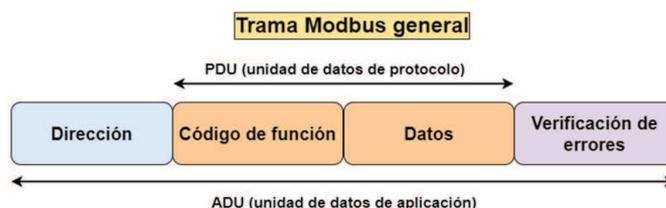


Figura 34 - Trama Modbus general.

### 2.1.5.2. Modbus y el Modelo OSI

Todos los protocolos están desarrollados bajo el marco de referencia conocido como el modelo OSI que tiene 7 niveles o capas. Modbus corresponde a una marca registrada por Gould Inc., cuya designación no corresponde propiamente al estándar de red, incluyendo todos los aspectos desde el nivel físico hasta el de aplicación, sino a un protocolo de enlace (nivel OSI 2).

Se puede implementar con diversos tipos de conexión física y cada fabricante suele suministrar una *software* de aplicación propio, que permite parametrizar sus productos.

El estándar Modbus define una capa de protocolo de mensajes, posicionada en el nivel 7 del modelo OSI que provee comunicaciones cliente/servidor entre dispositivos conectados en

diferentes tipos de buses o redes. También estandariza un protocolo específico en líneas seriales para el intercambio de peticiones Modbus entre un maestro y uno o más esclavos.

En la capa física, Modbus puede usar interfaces físicas diferentes (RS-232, RS-422, RS-485 y sus variantes). Teniendo en cuenta el número de equipos y los perfiles en RS-232 se tienen 2 elementos únicamente, uno será el esclavo y el otro el maestro.

En el caso de RS-422 se pueden tener hasta 32 equipos, pero solo puede existir un maestro, por consiguiente, los 31 restantes son esclavos. En RS-485 se tiene el mismo número de equipos que en RS-422, se podrían tener varios maestros, por ejemplo. En el protocolo Modbus RTU no aplica tener varios maestros en la red.

En la capa de enlace, se definen los ID's de los equipos (números enteros del 1 al 255), los perfiles (maestro/esclavo) y la técnica para detectar la integridad de la información enviada en la trama, entre otros aspectos. La capa de enlace del modelo OSI se llama Modbus maestro/esclavo. Esta capa es la encargada de establecer una comunicación libre de errores entre dos equipos. Forma la trama organizando la información binaria y la pasa a la capa física.

Esta capa tiene dos subniveles:

- **MAC (Media Access Control):** encargada de controlar cuando el canal de transmisión está libre para poder enviar la información.
- **LLC (Logical Link Control):** encargada de controlar y recuperar los errores, también de codificar y decodificar la información a HEXADECIMAL o ASCII.

La capa de aplicación de Modbus trabaja bajo la abstracción cliente/servidor y es la capa más próxima al usuario [35].

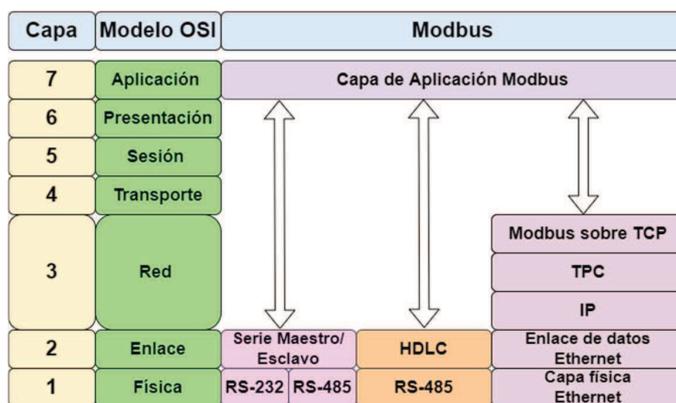


Figura 35 - Posicionamiento de Modbus en el modelo OSI.

La Figura 35 muestra la representación Modbus comparada con las 7 capas del modelo OSI.

### 2.1.5.3. Principios del protocolo Maestro/Esclavo Modbus

Modbus se caracteriza por ser un protocolo de línea serial maestro/esclavo. Solo un maestro es conectado al bus, y uno o varios nodos esclavos son conectados al mismo bus serial. La comunicación Modbus es iniciada siempre por el maestro, de modo que los nodos esclavos nunca podrían transmitir datos sin recibir una petición del nodo maestro, otra característica

es que los nodos esclavos no pueden comunicarse entre sí. Un nodo maestro inicia solo una transacción Modbus a la vez.

El nodo maestro emite una petición Modbus al nodo esclavo en dos modos:

- **Modo único:** el maestro se dirige a un esclavo individual que luego de recibir y procesar la petición, devuelve un mensaje o respuesta al maestro, de acuerdo con el esquema de la Figura 36.

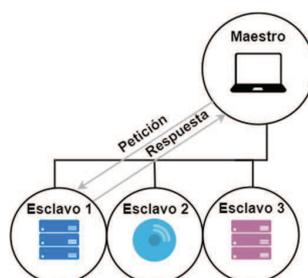


Figura 36 - Modo único – Modbus.

- **Modo Difusión:** el maestro envía una petición a todos los esclavos y estos no responden. Estos mensajes son comandos de escritura y todos los esclavos deben obligatoriamente aceptar la difusión para la función de escritura, de acuerdo con el esquema de la Figura 37 [36].

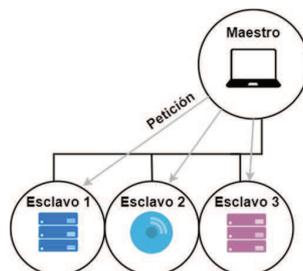


Figura 37 - Modo difusión – Modbus.

#### 2.1.5.4. Reglas de direccionamiento Modbus

El direccionamiento Modbus está conformado por 256 direcciones diferentes:

- **Dirección 0:** se trata de la dirección de difusión.
- **Direcciones entre 1 y 247:** son las direcciones de cada esclavo individual.
- **Direcciones entre 248 y 255:** se trata de direcciones reservadas.

La dirección 0 es una dirección reservada como la dirección de difusión y todos los esclavos tienen que reconocerla. El nodo maestro no tiene una dirección específica, solo los esclavos tienen una dirección, la cual es única en un bus serial Modbus. El número máximo de nodos es de 248 sabiendo que uno de ellos es el maestro.

#### 2.1.5.5. Diagramas de estado Maestro/Esclavo

Los diagramas de estado de un maestro y un esclavo son parte importante del protocolo. En el diagrama de transición de estados, cuando un sistema que estuvo en un **Estado A** y ocurre un evento que genera un cambio de estado a un **Estado B**, este cambio es posible únicamente

si la condición es verdadera, por lo tanto, la **Acción** se lleva a cabo, de acuerdo con lo observado en la Figura 38.

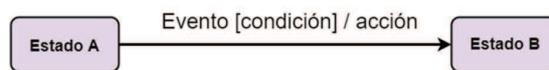


Figura 38 - Ejemplo de diagrama de estado.

Según el esquema de la Figura 39, se definirá cada uno de los estados de un maestro.

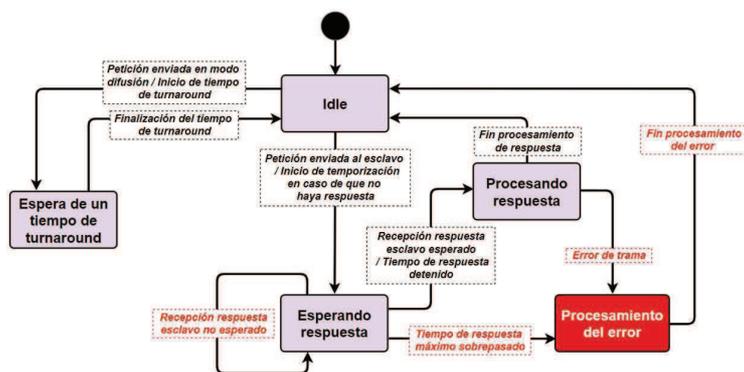


Figura 39 - Diagrama de estado del maestro.

- **Idle:** es un estado donde no hay ninguna petición pendiente. Es el estado que asume después de poner a correr Modbus. Después de enviar una petición el maestro sale de este estado y no puede enviar otra petición hasta volver a él.
- **Esperando respuesta:** es el estado que asume el maestro cuando envía un mensaje a un esclavo único, en este estado se inicia un temporizador que previene que el maestro se encuentre en este estado permanentemente.

En este estado pueden ocurrir tres cosas:

1. Una respuesta de un esclavo no esperado, en cuyo caso el temporizador se mantiene corriendo y se mantiene el estado de espera de respuesta.
  2. Una respuesta del esclavo esperado, que genera una parada del temporizador y posteriormente un cambio de estado al procesamiento de la respuesta.
  3. Finalmente puede finalizar el conteo del temporizador lo que genera un cambio de estado al procesamiento de error.
- **Procesamiento de la respuesta:** es el estado que asume el maestro cuando ha recibido una respuesta del esclavo esperado y pueden ocurrir dos cosas:
    1. Que se termine el procesamiento y llegue al estado Idle, teniendo en cuenta que la operación fue exitosa.
    2. Que haya un error dentro de la trama que generó el esclavo lo cual lleva al maestro al estado de procesamiento del error.
  - **Procesamiento de error:** aquí se genera una respuesta al error que sucedió a la operación no exitosa y luego llega al estado Idle.
  - **Tiempo de Turnaround:** es el que adquiere después de enviar un mensaje tipo difusión y consiste en esperar un tiempo en el cual se garantice que todos los esclavos lo reciban y procesen, por lo general este tiempo es mucho menor al tiempo de respuesta de un esclavo.

Según el diagrama de la Figura 40, se definirán cada uno de los estados de un esclavo:

- **Idle:** es un estado donde no hay ninguna petición pendiente. Es el que asume después de poner a correr Modbus.
- Cuando una petición es recibida, el esclavo la verifica antes de realizar cualquier acción pedida. En este punto pueden ocurrir varios errores, como ser el error de formato en la petición, una acción inválida, etc. En caso de error debe ser enviada una respuesta al maestro.
- Una vez que la acción requerida es completada, se requiere que sea generado un mensaje único y enviado al maestro.
- Si el esclavo detecta un error en la trama, no se envía ninguna respuesta de vuelta al maestro luego entonces el maestro genera un error por *time out* y se tiene que enviar otra vez la petición [37].

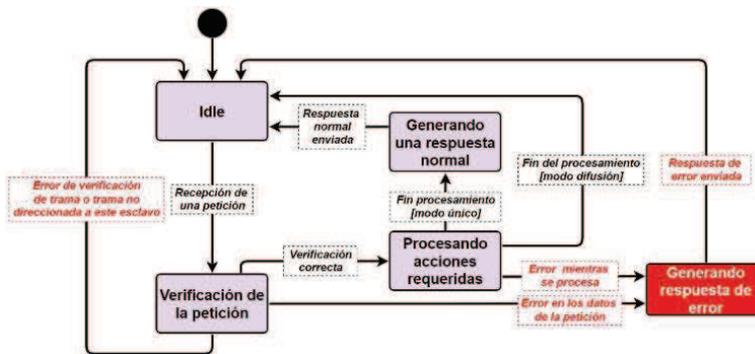


Figura 40 - Diagrama de estado del esclavo.

### 2.1.5.6. Modbus TCP/IP

Modbus TCP/IP es simplemente el protocolo Modbus RTU con una interfaz TCP que se ejecuta en Ethernet.

La estructura de los mensajes de Modbus define las reglas para la organización y la interpretación de los datos independientemente de los datos del medio de transmisión.

TCP/IP se refiere al protocolo de control de transmisión y el protocolo de Internet, que proporciona el medio de transmisión para los mensajes de Modbus TCP/IP.

TCP/IP permite bloques de datos binarios que se van a intercambiar entre computadoras. La función principal de TCP es asegurar que todos los paquetes de datos se reciban correctamente, mientras IP se asegura que los mensajes están correctamente dirigidos y enrutados. La combinación TCP/IP no es más que un protocolo de transporte, y no define el significado de los datos o como son interpretados (ese es el trabajo de Modbus en este caso).

Modbus TCP/IP utiliza TCP/IP y Ethernet para transportar los datos de la estructura de los mensajes de Modbus entre dispositivos compatibles.

Este protocolo combina una red física (Ethernet) con una red de trabajo estándar (TCP/IP), y un método estándar de representación de datos (Modbus como protocolo de aplicación).

El mensaje de Modbus TCP/IP es una comunicación Modbus encapsulada en una conexión Ethernet TCP/IP [38].

### 2.1.5.6.1. Construcción de un paquete de datos Modbus TCP

Modbus TCP incluye una trama de datos Modbus estándar dentro de una trama TCP, sin la comprobación de Modbus, como se muestra en la Figura 41.

Los comandos de Modbus y los datos de usuario son encapsulados en un paquete de datos de una red TCP/IP sin ser modificados de ninguna manera. Sin embargo, el campo de comprobación de errores de Modbus no se utiliza como la capa de enlace estándar de Ethernet TCP/IP por los métodos utilizados para garantía de la integridad de los datos.

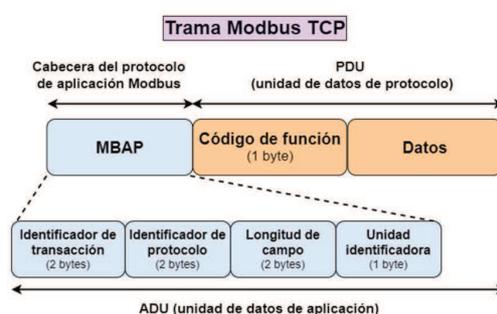


Figura 41 - Formato de tramas Modbus.

Además, el campo de “la dirección de Modbus” es suplantado por la “Unidad identificadora” en Modbus TCP/IP, y se convierte en parte del protocolo de aplicación de cabecera Modbus (MBAP).

En la Figura 41 es posible observar que el código de la función y los datos de los campos son absorbidos en su forma original. Así, una unidad de datos de aplicación Modbus TCP/IP (ADU) adopta la forma de una cabecera de 7 bytes (Identificador de transacción + identificador de protocolo + longitud del campo + unidad identificadora) y la unidad de protocolo de datos (código de la función + datos).

La cabecera MBAP es de 7 bytes de longitud, e incluye los siguientes campos:

- **Transacción/identificador (2 bytes):** este campo de identificación se utiliza para la operación de parejas cuando varios mensajes son enviados a través de la misma conexión TCP por un cliente sin esperar a una previa respuesta.
- **Protocolo de identificación (2 bytes):** este campo es siempre 0 para los servicios Modbus y otros valores están reservados para futuras ampliaciones.
- **Longitud (2 bytes):** este campo es un contador de bytes de los campos restantes e incluye la unidad de identificación de bytes, la función de código byte, y los campos de los datos.
- **Unidad Identificadora (1 byte):** este campo se utiliza para identificar un servidor remoto situado en una red que no es TCP/IP (para un puente serial). En un típico servidor de aplicación de Modbus TCP/IP. La unidad de identificación está establecida

en *00* o *FF*, ignorada por el servidor, y simplemente se hace eco de nuevo en la respuesta.

La unidad de datos de Aplicación de Modbus TCP/IP está incrustada en el campo de datos de una trama estándar TCP y enviada vía TCP por el Puerto 502, que se reserva específicamente para aplicaciones Modbus. Los clientes Modbus TCP/IP y los servidores escuchan y reciben datos de Modbus vía Puerto 502 [38].

### 2.1.5.6.2. Arquitectura general de comunicación Modbus TCP

Un sistema de comunicación de Modbus TCP/IP puede incluir diferentes tipos de dispositivos:

- Un cliente Modbus TCP/IP y dispositivos del servidor conectados a una red TCP/IP.
- La interconexión de dispositivos como puentes, *routers* o *gateways* para la interconexión entre la red TCP/IP y una línea serial de subred, las cuales permiten las conexiones de la línea serial del cliente Modbus y los dispositivos finales del servidor.

El protocolo Modbus define una unidad de protocolo de datos (PDU, *Protocol Data Unit*) independientemente de las capas de comunicación. El protocolo Modbus especifica sobre los buses o redes que pueden introducir algunos campos adicionales en la unidad de aplicación de datos (ADU, *Application Data Units*).

El cliente que inicia una transacción Modbus se basa en la unidad de aplicación de datos Modbus. El código de la función le indica al servidor qué tipo de acción se va a realizar [39].

### 2.1.5.6.3. Códigos fuente en Modbus

El protocolo TCP/IP ofrece todos los recursos para que dos dispositivos puedan comunicarse entre sí a través de una red Ethernet de área local (LAN, *Local Area Network*) o una red de área amplia global (WAN, *Wide Area Network*).

Modbus opera de acuerdo con el modelo común cliente/servidor (maestro/esclavo). Es decir, el cliente (maestro) envía un mensaje de petición (petición de servicio) al servidor (esclavo), y el servidor responde con un mensaje de respuesta.

Si el servidor no puede procesar la solicitud, se devolverá un código de función de error (exceptuando la respuesta) que es el código de función original más 80H (con su bit más importante igualado a 1).

Las funciones Modbus operan en los registros de memoria para configurar, monitorear y controlar dispositivos de I/O. Los dispositivos Modbus suelen incluir un mapa de registros, se debe hacer referencia al mapa de registro de los dispositivos para obtener una mejor comprensión de su funcionamiento.

El modelo de datos de Modbus tiene una estructura simple que solo distingue entre cuatro tipos de datos básicos: entradas discretas, bobinas (salidas), registros de entrada (datos de entrada) y registros de espera (datos de salida).

La petición de servicio (Unidad de datos del protocolo Modbus) está compuesta por un código función, y algunos números de bytes de datos adicionales, dependiendo de la función. En la mayoría de los casos, los datos adicionales son variables de referencia, como la dirección de un registro, ya que la mayoría de las funciones de Modbus operan sobre los registros.

Referencia	Descripción
0xxxx	Leer/Escribir salidas discretas o bobinas: una dirección de referencia '0x' es usada para conducir los datos a un canal de salida digital
1xxxx	Leer entradas discretas: el estado ON/OFF de una dirección de referencia '1x' es controlado por el correspondiente canal de entrada digital
3xxxx	Lectura de registros de entrada: un registro de referencia '3x' contiene un número de 16 bits recibido de una fuente externa, por ejemplo, una señal analógica
4xxxx	Leer/Escribir registros de salida: un registro '4x' es usado para almacenar 16 bits de datos numéricos (binario o decimal) o para enviar los datos de la CPU a un canal de salida

Tabla 2 - Códigos de registros Modbus.

Los registros de Modbus de un dispositivo están organizados en torno a cuatro tipos de referencia de datos básicos señalados con un número de referencia de dirección de acuerdo con la información de la Tabla 2 .

Código	Función	Referencia	Descripción
01 (01H)	Leer el estado de bobina (salida)	0xxxx	Este comando lee el estado del interruptor ON/OFF de las salidas discretas o bobinas (0x direcciones de referencia) en el esclavo/servidor
03 (03H)	Leer registros en espera	4xxxx	Lee el contenido binario de los registros de espera (4x direcciones de referencia) en el dispositivo esclavo. La transmisión emitida no es compatible
04 (04H)	Leer registros de entrada	3xxxx	Este comando va a leer el contenido binario de los registros de entrada (3x direcciones de referencia) en el dispositivo esclavo. La emisión la transmisión no es compatible
05 (05H)	Forzar una bobina simple (salida)	0xxxx	Forzar una sola bobina/salida (0x dirección de referencia) ON/OFF. Con emisiones de transmisión (dirección 0), las fuerzas de la misma bobina conectados en red a todos esclavos (sólo Modbus)
06 (06H)	Preselección de registro único	4xxxx	Este comando preselecciona un único registro de espera (4x dirección de referencia) a un valor específico. La emisión de la transmisión es compatible para este comando y actuará para preseleccionar el mismo registro en todas las redes de esclavos
15 (0FH)	Forzar múltiples bobinas (salidas)	0xxxx	Se fuerzan al mismo tiempo una serie de bobinas (0x dirección de referencia) ya sea en ON o en OFF. La transmisión cuenta con el apoyo de este comando y actuará a forzar al mismo bloque de bobinas de todos los esclavos en la red
16 (10H)	Preselección de registros múltiples	4xxxx	Preselecciona un bloque de registros de espera (4x direcciones de referencia) a determinados valores. La transmisión cuenta con el apoyo de este comando y actuará preestablecido para el mismo bloque de registros en todos los esclavos de la red
17 (11H)	Reportar la dirección del esclavo	Escondido	Este comando devuelve el modelo, serial y el número de la empresa a un dispositivo Esclavo/Servidor, el estado del indicador de ejecutar y cualquier otra información específica al dispositivo. Este comando no ocupa de guardar la dirección en el mapa de registros y la transmisión no es compatible.

Tabla 3 - Funciones estándar de Modbus.

En la Tabla 3 se ponen de manifiesto un subconjunto de las funciones estándar Modbus (el registro de referencia, las direcciones que operan y su función). Las funciones a continuación se utilizan para acceder a los registros e indican en el registro del mapa Modbus para enviar y recibir datos [40].

### 2.1.6. LoRa (Long Range)

Se trata de una técnica de modulación de espectro ensanchado derivada de la tecnología *chirp*

de espectro ensanchado (CSS, *Chirp Spread Spectrum*), que mantiene las mismas características de baja potencia que la modulación FSK, pero aumenta significativamente el rango de comunicación.

El espectro de dispersión chirp se ha utilizado en la comunicación militar y espacial durante décadas debido a las largas distancias de comunicación que pueden alcanzarse y la robustez a la interferencia, pero LoRa es la primera implementación de bajo costo para uso comercial. LoRa de Semtech Corporation es una plataforma inalámbrica de largo alcance y bajo consumo que se ha convertido en la plataforma inalámbrica de facto de Internet de las cosas (IoT).

Características principales de LoRa que lo hacen especial y lo diferencian de otros protocolos y tecnologías inalámbricas:

- **Largo alcance:** LoRa está diseñado para trabajar en ciudades y poder pasar a través de los edificios y obstáculos. Puede llegar en estas condiciones hasta unos 3 km. En zonas abiertas puede llegar hasta unos 20 km.
- **Baja transmisión de datos:** la velocidad no lo es todo. Para LoRa no es importante transmitir gran cantidad de datos. LoRa puede transmitir menos de 1 kbps.
- **Bajo consumo:** es uno de puntos más importantes. Permite tener dispositivos con baterías que no necesiten ningún tipo de intervención durante años. Estos dispositivos son accesibles en cuanto a costos y a mantenimiento.
- **Gran cantidad de dispositivos conectados:** un único *gateway* o estación base puede cubrir ciudades enteras o cientos de kilómetros cuadrados. El rango depende en gran medida del entorno u obstrucciones en un lugar determinado, pero LoRa tiene un *link budget* (sumatoria de todas las ganancias y pérdidas del transmisor, a través del medio al receptor en un sistema de telecomunicaciones) mayor que cualquier otra tecnología de comunicación estandarizada. El *link budget*, dado típicamente en decibelios (dB), es el factor principal en la determinación del rango en un entorno. Con una cantidad mínima de infraestructura, países enteros pueden ser fácilmente cubiertos.

Las características mencionadas más arriba, son las que hacen de LoRa un protocolo perfecto para conectar sensores o actuadores. El protocolo y la red LoRaWAN están diseñados específicamente para conectar estos dispositivos y se prevé que puedan ser millones. Por ello la posibilidad de conectar gran cantidad de equipos y poder gestionarlos de forma sencilla hace que esta tecnología sea una de las que se ha adoptado más rápidamente [41] [42].

### 2.1.6.1. Descripción general de la tecnología LoRa

LoRa está pensado para aplicaciones de baja potencia, de red de área amplia (LPWAN). Tiene un rango de más de 15 kilómetros y una capacidad de hasta 1 millón de nodos. La combinación de baja potencia y largo alcance limita la velocidad de datos máxima a 50 kbps.

Funciona en la banda ISM. La asignación de frecuencias y los requisitos reglamentarios para ISM varían por región (Tabla 4). Dos de las más populares son las frecuencias de 868 MHz utilizada en Europa y 915 MHz utilizada en América del Norte. Otras regiones, especialmente Asia, tienen diferentes requisitos.

La capa física LoRa utiliza modulación de espectro ensanchado (SSM, *Spread Spectrum Modulation*).

Características	Europa	Argentina	América del Norte
Banda de frecuencia	867 - 869 MHz	915 - 928 MHz	902 - 928 MHz
Canales	10		64 + 8 + 8
Canal de banda ascendente	125/250 kHz		125/500 kHz
Canal de banda descendente	125 kHz		500 kHz
TX encendido	+14 dBm	+20 dBm (+30 dBm permitidos)	
TX apagado	+14 dBm		+27 dBm
SF Up	7-12		7-10
Velocidad de datos	250 bps - 50 kbps	976 bps - 12,5 kbps	980 bps - 21,9 kbps
Link Budget Up	155 dB		154 dB
Link Budget Dn	155 dB		157 dB

Tabla 4 - Comparación de las especificaciones LoRa para Europa, Argentina y América del Norte.

La Figura 42 representa un sistema de espectro ensanchado, este multiplica los datos de entrada en una secuencia de código mucho más rápida que propaga la señal de ancho de banda.

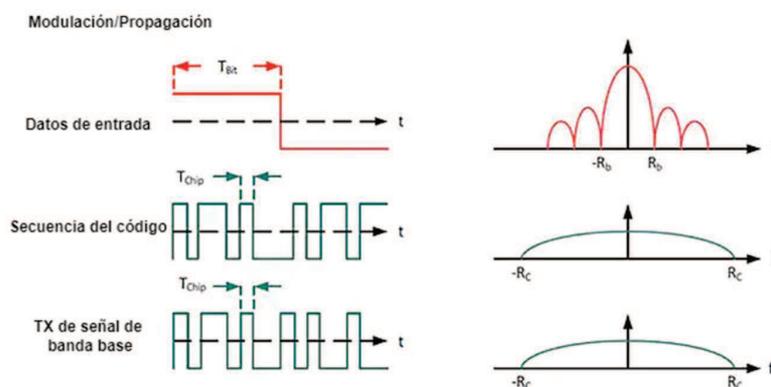


Figura 42 - Sistema de espectro ensanchado.

SSM codifica la señal base con una secuencia de alta frecuencia, que deliberadamente propaga la señal base a través de un mayor ancho de banda, reduce el consumo de energía y aumenta la resistencia a las interferencias electromagnéticas.

El factor de propagación (SF, *Spreading Factor*) de la señal base está directamente relacionado con el alcance, el máximo tamaño de *payload* (datos útiles), la velocidad de transmisión, el tiempo en el aire del mensaje (OTA, *Over The Air*), el consumo eléctrico y la sensibilidad máxima del receptor. Se trata de un factor variable y representa una solución de compromiso. Para un ancho de banda disponible, una mayor difusión factor reduce la tasa de bits, y también reduce la duración de la batería incrementando el tiempo de transmisión. Un determinado SF y el ancho de banda (BW, *Bandwidth*) darán una tasa de bits definidos de acuerdo con la Ecuación 7.

$$\text{Bitrate} = \frac{SF \cdot BW}{2^{SF}}$$

Ecuación 7 - Ecuación para hallar el *bitrate*.

LoRa permite seis factores de propagación (SF7 - SF12) y tres diferentes anchos de banda (125 kHz, 250 kHz, 500 kHz). Los factores de propagación y anchos de banda permitidos están definidos por las agencias reguladoras. América del Norte, por ejemplo, especifica un ancho de

banda de 500 kHz y factores de propagación de 7 a 10.

Según la especificación de parámetros regionales la banda utilizada en Argentina es AU 915-928 (2da sub-banda). Por lo tanto, las frecuencias con las que se trabaja se encuentran dentro de la banda 915 MHz y 928 MHz (esta banda se encuentra libre en Argentina) [43].

Dentro de la banda AU 915-928 los canales están divididos de la siguiente forma:

- **Upstream:** 64 canales, del 0 al 63, comenzando en la frecuencia 915,2 MHz y terminando en 927,8 MHz, aumentando cada 200 kHz y con BW de 125 kHz. Utiliza el *coding rate* 4/5 y data rate 0.
- **Upstream:** 8 canales, del 64 al 71, comenzando en la frecuencia 915,9 MHz y terminando en 927,1 MHz, aumentando cada 1,6 MHz y con BW de 500 kHz. Utiliza *data rate* 6.
- **Downstream:** 8 canales, del 0 al 7, comenzando en la frecuencia 923,3 MHz y terminando en 927,5 MHz, aumentando cada 600 kHz y con BW de 500 kHz.

En LoRaWAN el nodo debe cambiar de canal de forma pseudoaleatoria para cada transmisión lo que hace que el sistema sea más robusto ante interferencias.

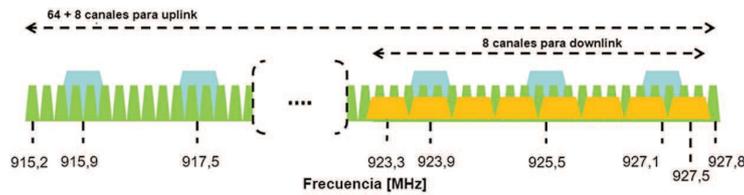


Figura 43 - Canales de frecuencia para banda AU 915-928 MHz.

Las bandas libres en un determinado país se pueden definir como bandas de frecuencias en las que se permite la operación de dispositivos de radiocomunicaciones, sin una autorización individual de cada estación tal que asegure la asignación de una frecuencia o canal para uso exclusivo de la misma. Cada banda se destina íntegramente a tales dispositivos, sin subdivisión de canales, estableciéndose ciertos requerimientos básicos de convivencia, tales como límites de potencia. La coordinación corre por cuenta de los usuarios, pero se apoya principalmente en la inmunidad contra interferencias, propia de la tecnología empleada, y el modo de acceso múltiple a la banda.

En Argentina, la Resolución del Ministerio de Modernización N° 581/18 [44] establece que las bandas de frecuencias radioeléctricas detalladas a continuación se declaran de uso compartido en el ámbito del territorio nacional y no requieren de autorización para su uso, debiendo respetarse las condiciones y parámetros técnicos de emisión establecidos por el Ente Nacional de Comunicaciones en la Resolución N° 4653/19 [45]:

Bandas de frecuencias libres
915 – 928 MHz
2.400 – 2.483,5 MHz
5.150 – 5.250 MHz
5.250 – 5.350 MHz
5.470 – 5.600 MHz
5.650 – 5.725 MHz
5.725 – 5.850 MHz
57.000 – 71.000 MHz

Tabla 5 - Bandas de frecuencias libres en el ámbito del territorio nacional.

La compartición de bandas de frecuencias se traduce en un uso eficiente del espectro radioeléctrico cuando coexisten diferentes tecnologías de adquisición de datos.

De este modo se proporciona una herramienta eficiente de gestión del espectro radioeléctrico, especialmente orientada al desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones de Internet de las Cosas, entre otras.

Estas bandas libres pueden ser utilizadas por usuarios particulares independientes (uso privado, por ejemplo, con teléfonos domiciliarios inalámbricos o enlaces de espectro ensanchado para comunicar dos sucursales de un mismo titular), o bien por un proveedor de determinado servicio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, como podría ser la provisión de acceso a *Internet* [46].

En la Tabla 6 y en la Figura 44 es posible observar: valores de *bitrate*, rango y tiempo en el aire asociado a cada factor de propagación.

Spreading Factor (125 kHz)	Bitrate	Rango*	Tiempo en el aire (ms)**
SF7	5470 bps	2 km	56 ms
SF8	3125 bps	4 km	100 ms
SF9	1760 bps	6 km	200 ms
SF10	980 bps	8 km	370 ms
SF11	440 bps	11 km	740 ms
SF12	290 bps	14 km	1400 ms

Para tasa de codificación CR=4/5 (CR, *Coding Rate*) - BW=125 kHz - PER=1% (PER, *Packet Error Rate*)

\* Valores indicativos, depende de las condiciones de propagación - \*\* Para apps de 10 bytes de carga útil

Tabla 6 – Diferentes factores de propagación y sus valores significativos.

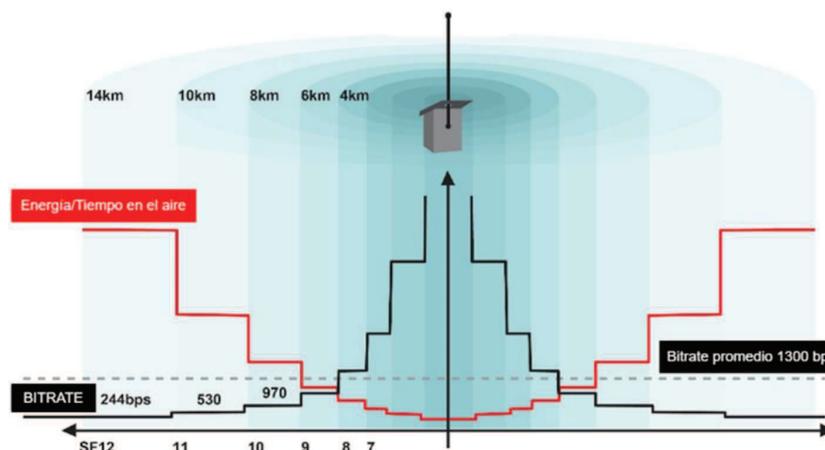


Figura 44 - Factor de propagación en función de la distancia, el bitrate y el tiempo en el aire.

Debido a la tecnología de espectro de propagación, los mensajes con diferentes velocidades de datos son ortogonales y no interfieren unos con otros, creando un conjunto de canales "virtuales", que aumentan la capacidad de la puerta de enlace.

El esquema LoRa se basa en una variante de SSM llamada CSS, se trata de una técnica de espectro ensanchado que utiliza pulsos de *chirp* de frecuencia lineal de banda ancha modulada para codificar información. Un *chirp* es una señal sinusoidal cuya frecuencia aumenta o disminuye con el tiempo.

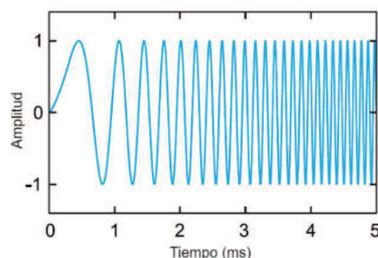


Figura 45 - CSS "upchirp".

Un CSS "*upchirp*" puede derivarse de una expresión polinómica para frecuencia versus tiempo, o exhibir una relación lineal como se muestra en la Figura 45.

CSS es muy adecuado para aplicaciones de velocidad de datos baja (<1 Mb/s) que requieren un bajo consumo de energía. IEEE 802.15.4a, otro estándar de velocidad baja, lo especifica como técnica para su uso en redes de área personal inalámbricas (LR-WPAN). CSS se ha utilizado durante muchos años para proporcionar comunicación sólida de largo alcance en las aplicaciones militares y espaciales, pero LoRa es la primera implementación comercial de bajo costo.

Al igual que en otros métodos de *Spread Spectrum*, el espectro de dispersión de *chirp* usa todo su ancho de banda asignado para difundir una señal, haciéndola robusta al ruido del canal.

Además, debido a que los *chirps* utilizan una banda ancha del espectro, el espectro de dispersión de *chirp* es también resistente al desvanecimiento de trayectoria múltiple incluso cuando funciona a muy baja potencia.

La modulación LoRa presenta ventajas significativas y alguna desventaja:

- La modulación de espectro ensanchado hace que sea más robusto ante interferencias, lo que se traduce en un mayor rango de cobertura, incluso en ambientes con alta interferencia.
- Debido al uso de *spreading factors* ortogonales, permite que se realicen transmisiones de forma concurrente en el mismo canal de frecuencia. Esto permite tener mayor eficiencia y capacidad de la red.
- Este tipo de modulación permite operar incluso por debajo del piso de ruido, con un valor mínimo admisible de SNR de -7,5 dB a -20 dB en función del *spreading factor* que se utilice.
- Esta modulación incluye en su codificación una parte dedicada a la corrección de errores (FEC, *Forward Error Correction*). Esta información adicional permite restaurar la información en el caso en el que se corrompa durante la transmisión. Está determinada por el factor CR, que indica la forma de codificar para corregir errores, es necesario añadir símbolos de control para saber si los datos son correctos o no, e incluso poder determinar los valores correctos.
- La mayor desventaja que tiene esta modulación es que es una técnica de modulación patentada por la empresa Semtech. Actualmente existen acuerdos comerciales entre diferentes fabricantes de semiconductores para manufacturar su tecnología, lo que disminuye el impacto negativo de la privacidad de la modulación [47].

## 2.1.6.2. LoRaWAN y arquitectura de red LoRa

LoRaWAN es una especificación de red de área amplia y baja potencia (LPWAN, *Low Power Wide Area Network*) diseñada para funcionar con dispositivos alimentados con baterías de forma inalámbrica en una red regional, nacional o global. LoRaWAN se centra en los requisitos clave de IoT, tales como la comunicación bidireccional segura, la movilidad y los servicios de localización.

La especificación LoRaWAN proporciona una interoperabilidad entre los dispositivos inteligentes sin necesidad de instalaciones locales complejas y devuelve la libertad al usuario, al desarrollador, a las empresas, lo que permite de esa forma el despliegue de IoT.

LoRa, como se mencionó anteriormente, en sí es una capa física, por sí sola no permite implementar una red. Simplemente permitiría realizar un enlace punto a punto con otro transceptor LoRa. Por lo tanto, se estandarizó el protocolo LoRaWAN, definido por la "LoRa Alliance".

Este protocolo define las capas restantes del protocolo de red y de la arquitectura del sistema. En la Figura 46 se representa la jerarquización del protocolo en capas.

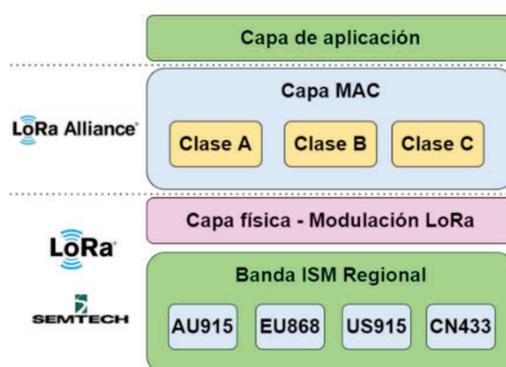


Figura 46 - Estructura jerárquica del protocolo organizada en capas.

La arquitectura de red LoRaWAN se presenta típicamente en una topología de estrella-estrella en la que los *gateways* son un puente transparente que retransmite mensajes entre dispositivos (*end-devices*) y un servidor de red central en el *backend* (*Network Server*). Los *gateways* están conectados a la red a través de conexiones IP estándar mientras que los dispositivos utilizan la comunicación inalámbrica de un solo salto a uno o varios *gateways*.

Todas las comunicaciones de los nodos (*end-points*) son generalmente bidireccionales, pero también son compatibles con la operación, tal como la multidifusión que permite la actualización de software en el aire (OTA, *Over The Air*) u otros mensajes de distribución masiva para reducir el tiempo de comunicación en el aire.

La comunicación entre dispositivos y *gateways* se extiende en diferentes canales de frecuencia y velocidades de datos. La selección de la velocidad de datos es una compensación entre el intervalo de comunicación y la duración del mensaje.

Debido a la tecnología de espectro ensanchado, las comunicaciones con diferentes velocidades de datos no interfieren entre sí y crean un conjunto de canales "virtuales" que aumentan la

capacidad del *gateway*. Las velocidades de datos de LoRaWAN oscilan entre 0,3 kbps y 50 kbps.

Para maximizar tanto la duración de la batería de los dispositivos finales como la capacidad total de la red, el servidor de red LoRaWAN gestiona la velocidad de datos y la salida de RF para cada dispositivo final individualmente mediante un esquema de velocidad de datos adaptativa (ADR, *Adaptative Data Rate*).

Los nodos pueden transmitir en cualquier canal disponible y en cualquier momento. También pueden utilizar cualquier velocidad de datos disponible, siempre que se respeten las siguientes reglas:

- El nodo cambia el canal de forma pseudoaleatoria para cada transmisión. Con esto se logra que la diversidad de frecuencias haga que el sistema sea más robusto a las interferencias.
- El nodo respeta el ciclo de trabajo máximo de transmisión o la duración máxima de transmisión en relación con la sub-banda utilizada y las regulaciones locales [48].

El ciclo de trabajo de transmisión o la duración máxima de transmisión son específicos de cada región y se definen para cada capa física regional.

LoRa tiene cuatro elementos de red, se detallan a continuación:

- Los nodos finales recopilan datos de sensor, lo transmiten *upstream* y *downstream*, y reciben la comunicación desde el servidor de aplicaciones. Los dispositivos de *end-point* usan comunicación inalámbrica *single-hop* con uno o varios *gateways*.
- El Concentrador/Gateway actúa como un puente transparente y retransmite los datos bidireccionales entre los nodos finales y los servidores *upstream*.
- El servidor de red se conecta a varios *gateways* a través de una conexión TCP/IP segura, ya sea por cable o inalámbrica; elimina los mensajes duplicados; decide qué compuerta debe responder a un mensaje de nodo final; y gestiona el nodo final, las velocidades de transmisión de datos con una velocidad de datos adaptable, destinadas a maximizar la capacidad de la red y extender la vida útil de la batería del nodo final.
- El servidor de aplicaciones recopila y analiza los datos de los nodos finales y determina las acciones del nodo final.

Cada uno de ellos es posible identificarlos en la Figura 47 [49].

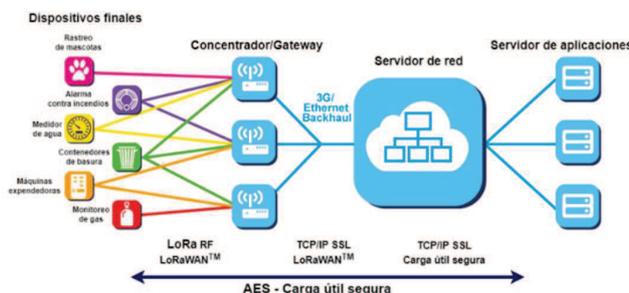


Figura 47 - Arquitectura de red LoraWAN.

### 2.1.6.3. Clases de dispositivos LoRaWAN

Los dispositivos o nodos finales sirven a diferentes dominios de aplicaciones y requieren ciertos requisitos. LoRaWAN emplea diferentes clases de dispositivos para optimizar una variedad de perfiles de aplicación finales. Se definen tres clases de dispositivos:

- **Clase A:** La comunicación de clase A siempre la inicia el dispositivo final. Un dispositivo puede enviar un mensaje de *uplink* (enviar un paquete) en cualquier momento. Una vez que se completa la transmisión del *uplink*, el dispositivo abre dos ventanas breves de recepción (*downlink* o recepción de datos). Hay un retraso entre el final de la transmisión del *uplink* y el inicio de las ventanas de recepción (RX1 y RX2 respectivamente). Si el servidor de red no responde durante estas dos ventanas de recepción, el siguiente *downlink* será posterior a la siguiente transmisión del *uplink*. Todos los dispositivos finales de LoRaWAN deben ser compatibles con la implementación de clase A.

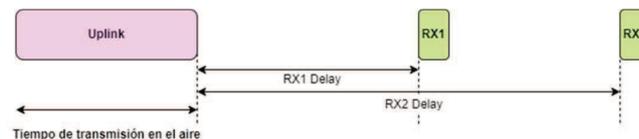


Figura 48 - Ventanas de recepción Clase A.

El servidor puede responder durante la primera ventana de recepción (RX1) o durante la segunda ventana de recepción (RX2), pero no utiliza ambas ventanas. Se pueden considerar tres situaciones para mensajes de *downlink*, estas son representadas en la Figura 49.

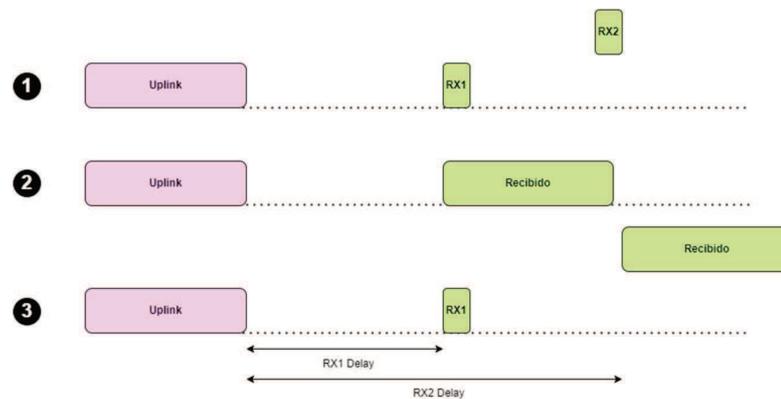


Figura 49 - Comportamiento de las ventanas de recepción de clase A.

**Caso 1:** el dispositivo final abre ambas ventanas de recepción, pero no recibe un mensaje de *downlink* durante ninguna de las ventanas de recepción.

**Caso 2:** el dispositivo final recibe un *downlink* durante la primera ventana de recepción y, por lo tanto, no abre la segunda ventana de recepción.

**Caso 3:** el dispositivo final abre la primera ventana de recepción, pero no recibe un *downlink*. Por lo tanto, abre la segunda ventana de recepción y recibe un *downlink* durante la segunda ventana de recepción.

Entre las características de los dispositivos finales de clase A se puede destacar que: a menudo funcionan con baterías, tienen el menor consumo de energía, pasan la mayor parte del tiempo en modo de suspensión, generalmente mantienen largos intervalos entre *uplinks*, poseen una alta latencia de *downlink* (para recibir *downlink*, el dispositivo final debe enviar un *uplink*).

- **Clase B:** además de las ventanas de recepción iniciadas de clase A, los dispositivos de clase B abren ventanas de recepción programadas para recibir mensajes de *downlink* desde el servidor de red. Mediante el uso de balizas sincronizadas en el tiempo y transmitidas por el *gateway*, los dispositivos abren periódicamente ventanas de recepción. El tiempo entre dos balizas se conoce como período de balizamiento. El dispositivo abre un *ping slot* de *downlink* a horas programadas para recibir mensajes de *downlink* desde el servidor de red. Los dispositivos de clase B también abren ventanas de recepción después de enviar un *uplink*, como se puede ver en la Figura 50.

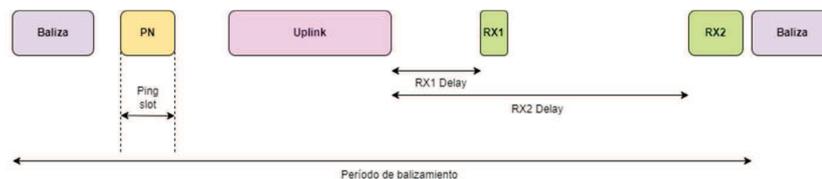


Figura 50 - Ventanas de recepción Clase B.

Los dispositivos finales de Clase B tienen una latencia más baja que los dispositivos finales de Clase A, porque se puede acceder a ellos en momentos preconfigurados y no necesitan enviar un *uplink* para recibir un *downlink*. La duración de la batería es menor en la Clase B que en la Clase A, porque el dispositivo pasa más tiempo en modo activo, durante el período de balizamiento y por el tiempo que insume cada *ping slot*.

- **Clase C:** amplían la Clase A al mantener abiertas las ventanas de recepción a menos que estén transmitiendo, como se muestra en la Figura 51. Esto permite una comunicación de baja latencia, pero consume muchas veces más energía que los dispositivos de Clase A. Este tipo de dispositivos a menudo son alimentados por la red [50] [51] [52].

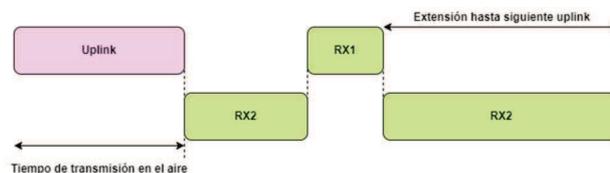


Figura 51 - Ventanas de recepción Clase C.

#### 2.1.6.4. Trama de datos

El protocolo establece dos formatos de organización de la información, como se ve en la Figura 52, teniendo en cuenta si se trata de mensajes de *uplinks* o *downlinks*. En el primer caso llevan un código de corrección de redundancia cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*).

La sincronización de los mensajes entre el transmisor y el receptor del mensaje se inicia con la detección del preámbulo, precedido por dos campos que contienen la información del *Coding Rate* o CR. Posteriormente, se encuentra el mensaje útil o *payload* encriptado como se describe en la sección 2.1.6.6. Finalmente, el mensaje puede estar precedido por un CRC del código de encriptación del *payload*.

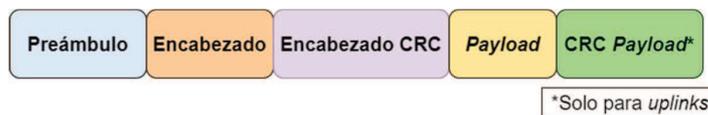


Figura 52 - Estructura de paquetes LoRaWAN.

### 2.1.6.5. Asociación de los dispositivos a la red

Para participar en una red LoRaWAN, cada dispositivo debe ser personalizado y activado. La personalización se lleva a cabo con la generación de un **DevEUI** (*Device Exclusive Unique Identifier*) o identificador único de dispositivo.

Este identificador, asignado por cada fabricante y a su vez delegado por la alianza LoRa, es un número único de 8 bytes. El **DevEUI** podría relacionarse con la dirección MAC de un dispositivo en una red de Internet. Por otro lado, la activación se puede lograr de dos formas:

- A través de OTAA (*Over The Air Activation*).
- A través de ABP (*Activation By Personalization*).

En OTAA, el dispositivo se configura con dos llaves de acceso a la red:

- **AppEUI:** es un valor de 8 bytes, al que se podría relacionar con el nombre de red (o SSID) de una red Wi-Fi.
- **AppKey:** es una llave AES-128, a la que se podría relacionar con la contraseña de acceso a una red Wi-Fi.

Posteriormente, se realiza un procedimiento de *join-request* o solicitud de asociación a la red. Si se obtiene una respuesta exitosa o *join-accept*, las llaves de encriptación vienen codificadas en el *payload* tal como se describe en la sección 2.1.6.6. Este método de asociación es el más difundido y el de mayor utilización en despliegues masivos por su alta escalabilidad.

Por otro lado, en ABP, el dispositivo tiene guardadas las llaves de encriptación de la información directamente en su memoria, lo que evita que se realice un procedimiento de asociación. Tiene como ventaja una posible disminución en el consumo, ya que solamente se transmite información y no una solicitud de asociación.

Por el contrario, OTAA, tiene como desventaja la falta de escalabilidad en despliegues masivos, ya que cada dirección de dispositivo debe ser única y, posteriormente, configurada en cada uno de los dispositivos. Además, hace que la red pueda quedar vulnerable a intrusiones si las llaves son extraídas del *firmware* del dispositivo.

### 2.1.6.6. Seguridad de la información en LoRaWAN

El protocolo LoRaWAN establece que la información debe ser encriptada de punto a punto, como se ve en la Figura 53. Las llaves de asociación que se utilizan en el protocolo son:

- **NwkSKey:** una llave AES-128 que encripta los datos entre el dispositivo y el *Network Server*.
- **AppSKey:** una llave AES-128 que encripta los datos entre el dispositivo y el *Application Server*.

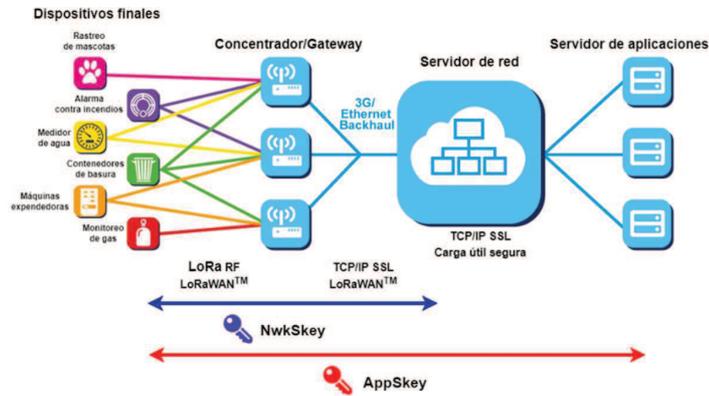


Figura 53 - Estructura de encriptación de una red LoRaWAN.

Cuando se trabaja con asociación OTAA, estas llaves son el resultado de la encriptación AES-128 entre la **AppKey** y un valor pseudoaleatorio generado por el *Network Server* (llamado AppNonce). Como se puede apreciar en la Figura 53, la **NwkSKey** es utilizada entre el *Network Server* y el dispositivo para asegurar la integridad de los datos recibidos. Esto se logra con un MIC (*Message Integrity Code*) o código de integridad del mensaje, que está generado por medio de encriptación AES-128 entre la **NwkSKey** y, el *payload* enmascarado con el **DevAddr** y la longitud del *payload*.

Por otro lado, la **AppSKey** es utilizada entre el dispositivo y la aplicación final para que el contenido “útil” no pueda ser interceptado en el camino. Estos dos procesos de seguridad garantizan que incluso si se llega a interceptar el mensaje, y existe una filtración de alguna de las llaves de acceso a la red, el contenido permanezca difícilmente descifrable.

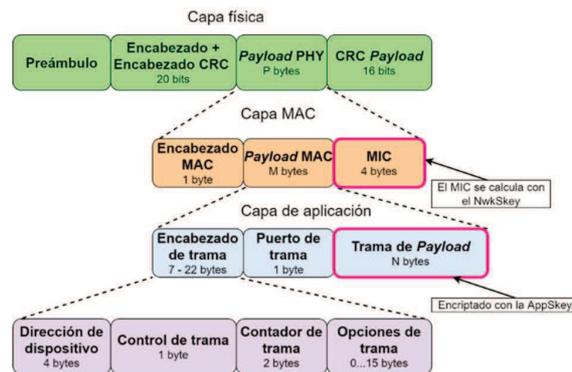


Figura 54 - Descomposición de la trama del stack LoRaWAN.

El esquema de capas de abstracción del *stack* LoRaWAN se puede apreciar en la Figura 54, también se pueden observar los campos de cada trama que son encriptados o calculados con las distintas llaves de seguridad [53].

### 2.1.6.7. Pérdida de trayectoria en el espacio libre

La pérdida de trayectoria en el espacio libre (se trata de una atmósfera homogénea) es la pérdida en la intensidad de la señal a medida que esta viaja a través del espacio libre, por lo que representa la cantidad de energía que pierde una onda de radio determinada a medida que viaja por el aire lejos de su fuente.

Se utiliza para calcular la atenuación de la intensidad de la señal entre el transmisor y el receptor. La pérdida de trayectoria de espacio libre asume que el espacio entre las dos antenas está libre de obstáculos, una trayectoria de línea de visión a través del aire.

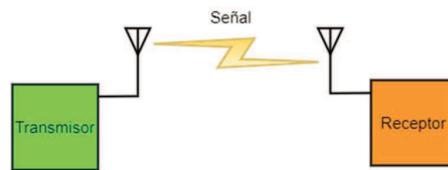


Figura 55 - Representación de trayectoria entre transmisor y receptor.

La pérdida de trayectoria entre un transmisor y un receptor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$FSPL(dB) = 20 \times \log(d) + 20 \times \log(f) - 147,55$$

Ecuación 8 - Cálculo de pérdida de trayectoria entre un transmisor y un receptor, frecuencia en Hz.

Esta pérdida es relativa a 2 componentes principales:  $d$  es la distancia entre el nodo final y el *gateway* en km, y  $f$  es la frecuencia en Hz.

Para aplicaciones de radio típicas, es común encontrar la distancia medida en unidades de MHz y la distancia en km, en cuyo caso la ecuación FSPL (del inglés, *Free-Space Path Loss*) se convierte en:

$$FSPL(dB) = 20 \times \log(D) + 20 \times \log(f) + 32,44$$

Ecuación 9 - Cálculo de pérdida de trayectoria entre un transmisor y un receptor, frecuencia en MHz.

Comprender el valor de FSPL ayuda a comprender hasta dónde puede llegar una señal LoRa. También es ampliamente utilizado por algunas otras ondas, por ejemplo, para predecir la propagación de la señal de Wi-Fi.

Este cálculo se puede utilizar como parte de un análisis de presupuesto de enlace más profundo al planificar el diseño de un sistema de comunicación [54].

### 2.1.6.8. Indicador de fuerza de la señal recibida

El RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) es el indicador de fuerza de la señal recibida, es decir, la potencia de las señales recibidas. Se mide en dBm, y el nivel 0 dBm equivale a 1 mW, lo que sería una señal ideal. El valor mínimo de RSSI en LoRa ronda los -120 dBm.

Esta definición es aplicable también a otras señales, por ejemplo, una señal Wi-Fi. Los valores umbrales son cuantificados por los fabricantes de cada tipo de tecnología.

En el caso de Wi-Fi el valor límite de RSSI puede diferir. Generalmente se identifican los umbrales de acuerdo con lo reportado por cada fabricante, pero en la práctica es donde se puede identificar cuanta señal se pierde.

A partir de la transmisión se comienza a perder potencia gradualmente. Como el RSSI es una medida de la intensidad de la señal recibida, siempre es negativo, lo que indica cuanta intensidad de la señal se ha perdido.

Valor de RSSI	Nivel de señal	Características de la señal
-30dBm	Excelente	Este es el nivel de intensidad de señal más alto que se puede lograr en condiciones reales. 0 dBm se considera ideal, pero en la práctica es casi imposible de conseguir
-60dBm	Muy bueno	Intensidad de señal mínima para aplicaciones que requieran un entrega puntual y muy fiable de paquete de datos.
-70dBm	Bueno	Intensidad de señal mínima para una entrega fiable de paquetes.
-80dBm	Bajo	Intensidad de señal mínima para conectividad básica. La entrega de paquetes puede no ser confiable.
-90dBm	Muy bajo	Con un nivel tan bajo de intensidad de la señal, son frecuentes las caídas de conexión y problemas con paquetes de datos perdidos.
-100dBm	Sin señal	Cuanto más se acerque el RSSI al valor de -100 dBm, más cerca estará de no tener ningún tipo de cobertura.

Figura 56 - Valores de RSSI en dBm y sus características en la señal.

En la Figura 56 se definen las equivalencias de niveles de cobertura de la señal en función de los dBm en aire recibidos, los números son valores representativos. La intensidad de la señal deseada variará según los requisitos de la red y el tipo de señal [55].

### 2.1.7. TTN en Argentina

Si bien LoRaWAN fue pensado y diseñado para operar en toda la banda de frecuencias no licenciada para aplicaciones industriales, científicas y médicas conocida como ISM que comprende el rango de 902 MHz a 928 MHz y es definida por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), en Argentina no se respetó este espectro definido internacionalmente y se destinó un segmento de la banda ISM que va desde los 905 MHz hasta los 915 MHz para el Servicio de Comunicaciones Móviles Avanzadas (SCMA).

A este servicio de comunicaciones móviles avanzadas le fue asignado un segmento de la banda ISM, lo que hizo que en Argentina se tuviera que utilizar la banda de frecuencias conocida como AU915 en lugar de la banda US915 de Estados Unidos que estaba prevista inicialmente.

La banda AU915 definida para Australia es utilizada además en otros países de Latinoamérica y presenta una única desventaja respecto a US915 consistente en que no es posible hacer comunicación *full duplex* y en cambio los transceptores LoRa deben operar en modo *half duplex*, es decir transmitiendo en un instante y recibiendo en otro.

*The Things Network* utiliza la 2da sub-banda y únicamente los canales 8 a 15 y el 65 para AU 915. El tamaño de carga útil (*Payload*) se establece entre 11 a 242 bytes.

En Argentina actualmente hay 15 comunidades de TTN y un total de 27 *gateways* conectados. En la provincia de Buenos Aires actualmente hay 3 *gateways* conectados, de acuerdo con la imagen de la Figura 57 [56].



Figura 57 - Mapa de *gateways* LoRaWAN registrados en TTN en la provincia de Buenos Aires.

TTN hizo la transición a The Things Stack Community Edition en el año 2021. La “*Community Edition*” es administrada por TTN.

## 2.1.8. The Things Stack (TTS)

Se trata de un servidor de red LoRaWAN de nivel empresarial, construido sobre un núcleo de código abierto, disponible para un público global, amplio y distribuido. Este permite construir y administrar redes LoRaWAN en hardware propio o en la nube. Fue desarrollado y es mantenido por The Things Industries.

The Things Industries ofrece varios tipos de implementaciones de TTS, por ejemplo, un servicio en la nube administrado o con características patentadas adicionales.

TTS es un *stack* del servidor de red LoRaWAN. Se encuentra actualmente en la versión 3 de una implementación de servidor de red y, por lo tanto, también se conoce informalmente como V3 [57].

### 2.1.8.1. Ciclo de trabajo

Cuando se envía una señal de un remitente, se tarda un cierto tiempo antes de que un receptor reciba esta señal. Este tiempo se denomina tiempo en el aire (OTA) o tiempo de permanencia.

El ciclo de trabajo indica la fracción de tiempo en que un recurso está ocupado. A modo de ejemplo, cuando un solo dispositivo transmite en un canal durante 2 unidades de tiempo cada 10 unidades de tiempo, este dispositivo tiene un ciclo de trabajo del 20 %.



Figura 58 - Representación de un ciclo de trabajo del 20 %.

Sin embargo, si se consideran también los canales, cuando un dispositivo transmite en 3 canales en lugar de uno, cada canal individual está ocupado durante 2 unidades de tiempo cada 10

unidades de tiempo (es decir, el 20 %). Sin embargo, el dispositivo transmite durante 6 unidades de tiempo cada 10 unidades de tiempo, lo que le otorga un ciclo de trabajo del 60 %.



Figura 59 - Representación del ciclo de trabajo para 3 canales.

En la Argentina existen 2 sub-bandas, por lo que, al considerar el ciclo de trabajo, también se deben considerar estas.

Si los 3 canales utilizados antes están en 2 sub-bandas diferentes, cada canal por separado aún tiene un ciclo de trabajo del 20 %, y el dispositivo aún tiene un ciclo de trabajo del 60 %, pero la banda 1 está en uso durante 2 unidades de tiempo cada 10 unidades de tiempo (20 %), mientras que la banda 2 está en uso durante 4 unidades de tiempo cada 10 unidades de tiempo (40%).

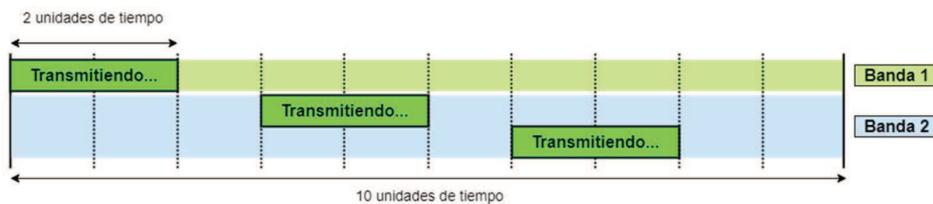


Figura 60 - Representación del ciclo de trabajo en sub-bandas.

El ciclo de trabajo de los dispositivos de radio a menudo está regulado por las organizaciones gubernamentales que reglamentan las comunicaciones. Si este es el caso, el ciclo de trabajo normalmente se establece en 1 %, pero puede variar de acuerdo con las regulaciones de cada país.

Además, la especificación LoRaWAN dicta los ciclos de trabajo para las frecuencias de unión, las frecuencias que utilizan los dispositivos de todas las redes compatibles con LoRaWAN para las activaciones inalámbricas (OTAA, *Over The Air Activation*) de los dispositivos. En la mayoría de las regiones, este ciclo de trabajo se establece en 1 %.

Cada dispositivo de radio debe cumplir con los límites de ciclo de trabajo regulados. Esto se aplica tanto a los nodos como a los *gateways*.

En la práctica, esto significa que se deben programar los nodos de tal manera que se mantengan dentro de los límites. La forma más sencilla de hacer esto es calcular cuánto tiempo de aire consume cada mensaje utilizando una calculadora de tiempo de aire (online) y utilizar esa información para elegir un intervalo de transmisión adecuado.

Limitar el ciclo de trabajo por canal es más fácil de implementar, también se puede dividir el ciclo de trabajo de la sub-banda entre la cantidad de canales en esa sub-banda. Entonces, por ejemplo, en una sub-banda con 8 canales y un ciclo de trabajo del 1 %, cada canal tiene un ciclo de trabajo del 1/8 % (es decir, 0,125 %) [58].

### 2.1.8.2. Política de uso justo

En la red comunitaria pública de TTS se aplica una política de uso justo que limita el tiempo de transmisión del enlace ascendente (*uplink*) a 30 segundos por día (24 horas) por nodo y los mensajes del enlace descendente (*downlink*) a 10 mensajes por día (24 horas) por nodo.

Si se utiliza una red privada, estos límites no se aplican, pero aun así se debe cumplir con los límites gubernamentales y de LoRaWAN [58].

### 2.1.8.3. Webhooks

Son mensajes automatizados enviados mediante un protocolo web, desde una aplicación cuando ocurre un evento.

Se trata de una aplicación, o sitio web de terceros (el proveedor de *webhook*) que envía una señal cuando ocurre un evento específico, y un *listener* (una URL) que recibe los *webhooks* y realiza una acción predefinida. Estas notificaciones ocurren en tiempo real.

Los *webhooks* son llamadas de retorno HTTP que se desencadenan por un evento específico. Si ocurre un evento en tu sitio web, el *webhook* ve el evento, recoge los datos y los envía a la URL que se haya especificado.

El objetivo de los *webhooks* es automatizar procesos sin requerir de una intervención manual. Por ello, es posible utilizar un sistema externo para notificar a un sistema sobre algún evento, o actualización [59].

La función *Webhooks* permite que TTS envíe mensajes relacionados con la aplicación a *endpoints* HTTP(S) específicos.

Los *webhooks* se pueden utilizar para crear integraciones entre TTS y cualquier servicio de terceros. Por ejemplo, TTS puede enviar un *webhook* cada vez que se recibe un *uplink*, que luego se puede visualizar en un *dashboard*.

Los casos típicos de uso son: visualización de datos de *uplink* en otra plataforma y programación de *downlinks* desde un servicio de terceros.

Los *webhooks* acceden a un *endpoint* HTTP(S) y pasan datos relevantes como JSON. El servicio de terceros debe exponer este *endpoint* y “escuchar” los datos, o publicar mensajes en TTS.

Para los *uplinks*, se trata de datos de aplicaciones cifrados o no cifrados, metadatos sobre *gateways*, la intensidad de la señal, marcas de tiempo, etc. Para los *downlinks*, TTS espera un *payload* de la aplicación [60].

### 2.1.9. AllThingsTalk Maker (ATTM)

Se trata de una plataforma de desarrollo de *AllThingsTalk* que permite conectar rápidamente dispositivos y recopilar, visualizar y usar datos en minutos. ATTM admite su propio formato de datos binarios personalizado que puede decodificar mediante el decodificador de *payload* ABCL (*AllThingsTalk Binary Conversion Language*). ATTM es gratuito para fines de creación de prototipos.

Esta plataforma tiene integración con TTS, de modo que para un dispositivo IoT registrado en la red que envía mediciones al servidor en la nube de TTS se puede establecer un vínculo con ATTM para visualizar estos datos en un *dashboard* mediante gráficos de tendencia, estados binarios e incluso generar alertas o condiciones a partir de los estados enviados por el dispositivo [61].

### 2.1.9.1. Envío de datos desde la consola TTS y recepción en ATTM

Por lo general, se utiliza un formato de datos binarios debido al tamaño de *payload* limitado que es inherente a las redes LPWAN como LoRaWAN.

Uno de los formatos de *payload* que entiende ATTM es CBOR (*Concise Binary Object Representation*). El formato de mensaje que utiliza ATTM para CBOR es {"<*asset name*>": <*value*>}

El dispositivo se puede activar con ABCL, que es un lenguaje específico de dominio basado en JSON (*JavaScript Object Notation*), este se utiliza para codificar y decodificar datos desde activos de *AllThingsTalk* hacia y desde cargas binarias. Permite especificar un esquema propio de decodificación a nivel de dispositivo.

Al hablar de activos, podría tratarse, por ejemplo, de información adquirida desde una instalación fotovoltaica, como ser: potencia, irradiancia, temperatura, entre otros, que se pretendan cuantificar y evaluar.

Si el dispositivo envía datos en formato JSON o CBOR, el sistema lo convierte automáticamente en un formato comprensible. Al enviar datos binarios personalizados, se utiliza ABCL para convertirlos [62]. Este es el caso para los datos recibidos desde TTS.

A diferencia de CBOR, que envía **A1 63 4C 45 44 F5** cuando envía un "true" desde una entrada discreta activa en ATTM, con ABCL se puede configurar una conversión que envía solo **FF** para el mismo comando. Esto da como resultado que se utilicen muchos menos datos para lograr el mismo objetivo.

## 2.2. Instrumentos, sensores y módulos

### 2.1.1. Radiómetro fotovoltaico

El sensor elegido para realizar la medición de radiación incidente en el arreglo de paneles en este proyecto es un radiómetro diseñado y fabricado por el DES (Departamento Energía Solar) de la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica) que utiliza como elemento sensor celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino fabricadas en el CAC (Centro Atómico Constituyentes).

Los radiómetros del DES son elaborados difundiendo obleas de silicio tipo *p* para obtener una estructura *n+pp+*. Para la deposición de los contactos metálicos se utiliza una multicapa de Ti-Pd-Ag. [63]

Estos sensores son caracterizados a través de sus curvas de corriente-tensión (IV), representadas en la Figura 61 y su respuesta espectral, representada en la Figura 62. [64]

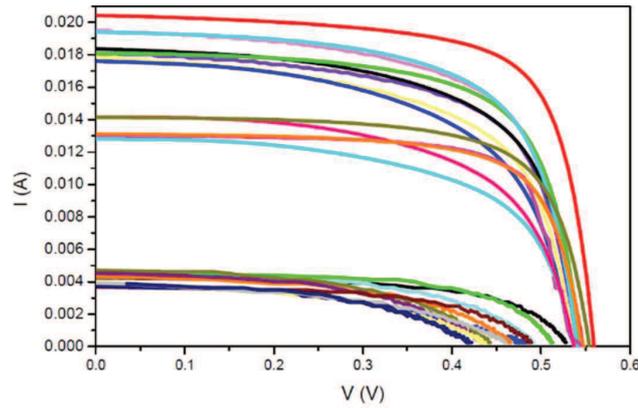


Figura 61 - Caracterización curva I-V radiómetro del DES.

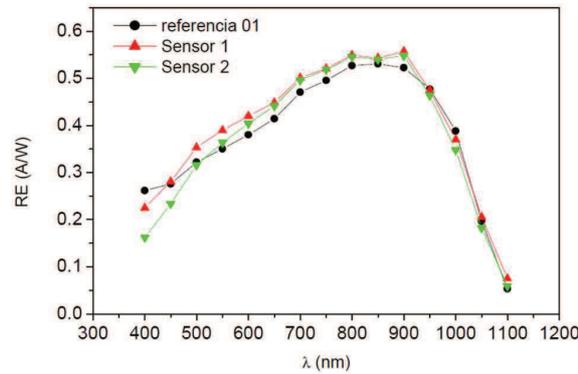


Figura 62 - Respuesta espectral de dos sensores del DES.

Estos dispositivos constan de una base de aluminio, de acuerdo con la Figura 63, sobre la cual se monta el elemento sensor, protegido por una cubierta de vidrio difusor sellado. La cubierta de vidrio protege al sensor fotovoltaico de las condiciones ambientales y mejora la respuesta angular debido al esmerilado superficial del mismo.



Figura 63 - Radiómetro desarrollado en el CAC.

La respuesta del radiómetro es proporcional a la irradiancia, tiene una salida de tensión o corriente y está provisto de un cable de 7 metros de longitud con dos cables en su interior (uno positivo y uno negativo).

Para obtener el valor de la radiación solar, se mide con un multímetro la tensión de salida del radiómetro ( $M$ ), y luego se divide este valor por la constante de calibración ( $Cte$ ) del radiómetro teniendo en cuenta las unidades:

$$\text{Radiación} = \frac{M}{Cte}$$

Ecuación 10 - Radiación.

Por ejemplo, para efectuar el cálculo, si la constante del radiómetro es de  $0,010 \text{ mV/Wm}^{-2}$  y

la medición  $M$  es de 8,5 mV, el valor de irradiancia obtenido es:

$$\text{Radiación} [\text{Wm}^{-2}] = \frac{8,5 \text{ mV}}{0,010 \text{ mV/Wm}^{-2}} = 850 \text{ Wm}^{-2}$$

Ecuación 11 - Valor de la radiación según constante  $M$ .

La corriente de salida de los dispositivos del DES se encuentra en el orden de los mA. En su versión polarizada a través de una resistencia calibrada, su salida está dada en tensión cuyo valor ronda las decenas de mV. La salida tanto en tensión como en corriente es lineal con la radiación solar incidente en su área activa.

La respuesta de cualquier sensor fotovoltaico depende de la longitud de onda de la radiación incidente. Esta respuesta no es plana, debido al material utilizado en su fabricación (silicio), por lo cual son más aptos para la determinación de valores diarios de la irradiancia global una vez que se ha comparado estadísticamente su comportamiento con el de un piranómetro termoelectrico y determinado su constante media.

Sin embargo, su bajo costo y su respuesta casi instantánea los hace particularmente útiles, por ejemplo, para integrar una red de bajo costo como radiómetros secundarios para interpolar estaciones termoelectricas o para la detección de pequeñas fluctuaciones rápidas [65].

## 2.1.2. Amplificador operacional LMP7721

Este amplificador operacional se emplea para la medición de la corriente de salida del radiómetro y su conversión en una señal útil de tensión, como se explica en la sección 3.1.4.

Se trata de un amplificador operacional de precisión, cuya corriente de polarización de entrada es del orden de los 3 fA. Esta tecnología también mantiene la corriente de polarización de entrada ultra baja para todo el rango de tensión de modo común de entrada del amplificador.

Otras funciones destacadas son el bajo ruido de tensión, baja desviación de tensión CC y baja desviación de coeficiente de temperatura, estas características mejoran la sensibilidad y precisión del sistema en aplicaciones de alta precisión [66].

Categoría	Descripción
Corriente de alimentación	1,3 mA
Corriente de polarización de entrada	±20 fA a 25 °C y 900 fA a 85 °C
Velocidad de respuesta	12,76 V/μs
Ganancia de lazo abierto CC	120 dB
Ancho de banda de ganancia (GBW)	17 MHz
Rango temperatura soportada	- 40 °C a 125°C
Desviación de tensión	±26 μV
Rango de tensión de alimentación	1,8 V a 5,5 V
Baja desviación de tensión CC	máximo de ±150 μV a 25 °C
Baja desviación de coeficiente de temperatura	-1,5 μV/°C
CMRR CC	100 dB
Bajo ruido de tensión	6,5 nV/√Hz
Encapsulado del Amplificador	SOIC
Cantidad de pines	8

Tabla 7 - Especificaciones técnicas LMP7721.

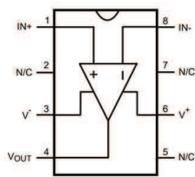


Figura 64 - Pinout LMP7721.

### 2.1.3. Termorresistencia PT1000

Para el registro de la temperatura de los paneles solares de la instalación bajo ensayo se emplean dos sensores RTD PT1000, como se explica más adelante en la sección 3.1.3.

Un RTD (*Resistance Temperature Detector*) es un dispositivo popular de medición de temperatura debido a su confiabilidad, precisión, versatilidad, repetibilidad y por su fácil instalación.

La RTD PT1000 es una resistencia de platino con un coeficiente positivo de temperatura de  $1.000 \Omega$  a  $0^\circ\text{C}$ . Se caracteriza por ser un sensor con una alta precisión, esto como consecuencia del amplio rango de resistencia para la discretización de la señal, otras características importantes por mencionar se detallan en la siguiente tabla:

Características	Valor
Tipo de sensor	PT1000 platino
Medidas del sensor	5 mm x 3 mm
Mín. temp. detect./ Máx temp. detect.	$-50^\circ\text{C}$ a $500^\circ\text{C}$
Conexión del proceso	Chip
Número de cables	2
Precisión	Clase B
Tiempo de respuesta	0,1 s
Medición de corriente	0,5 mA

Tabla 8 - Características PT1000.

Para la aplicación se emplea una extensión conexión de 3 hilos, como se muestra en la Figura 65, para compensar el efecto de la resistencia del conductor.

La longitud máxima del cable de conexión depende de las opciones de compensación del módulo de evaluación (transmisor, indicación, regulador o sistema de control de proceso). Su aplicación es apta para cables de hasta 30 metros de longitud [67].

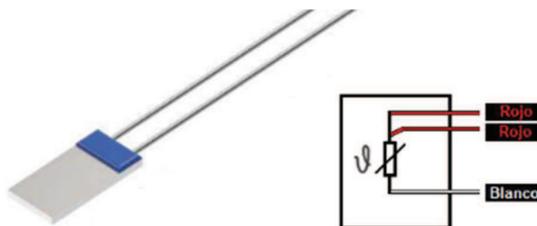


Figura 65 - Termorresistencia PT1000 - Conexión de 3 hilos.

En el marco del presente proyecto se realizó la construcción del sensor utilizando cable de instrumentación de cobre niquelado (AWG 26) con longitud de 1,5 m para cada sensor.

La unión del RTD al cable se efectuó mediante empalmes mecánicos ya que no se dispone de soldador de arco que generalmente se utiliza para este tipo de aplicaciones y una soldadura de estaño no es óptima en términos de conductividad.

Los empalmes realizados se protegen con tubo termo-contraíble. Para la conexión del cable a la bornera del instrumento y de manera de darle robustez se emplearon punteras tubulares.

El resultado de la construcción se muestra en la Figura 66.

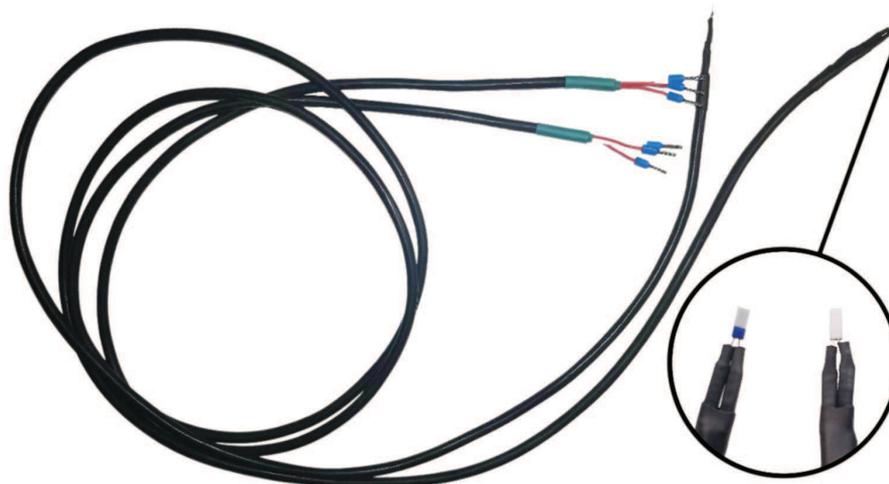


Figura 66 - Sensores PT1000 armados para la aplicación.

#### 2.1.4. Amplificador operacional OPA2365

Este amplificador operacional se emplea para acondicionar la medición de temperatura de las termorresistencias PT1000, como se explica más adelante en la sección 3.1.3.

Se trata de un amplificador operacional CMOS de cruce cero, de riel a riel y alto rendimiento, optimizado para aplicaciones de fuente única de muy baja tensión. Entre alguna de sus características se destacan: la entrada o salida de riel a riel, su bajo nivel de ruido, y operación de alta velocidad.

Son ideales para el accionamiento de conversores analógico/digital (ADC) de muestreo. Se utilizan para el acondicionamiento de señales, adquisición de datos, control de procesos, como filtros activos y para la amplificación de sensores. Sus especificaciones técnicas se describen en la Tabla 9.

Las características especiales incluyen una excelente tasa de rechazo de modo común (CMRR), sin distorsión de cruce de etapa de entrada, impedancia de entrada alta, y oscilación de entrada y salida de riel a riel. La escala del modo común de entrada incluye las fuentes positivas y negativas [68].

Categoría	Descripción
Funcionamiento	2,2 V a 5,5 V
Precisión	Baja compensación: 100 $\mu$ V Baja corriente de polarización de entrada: 0,2 pA
Velocidad de respuesta	25 V/ $\mu$ s
Ancho de banda de ganancia (GBW)	50 MHz
Rango temperatura soportada	- 40 °C a 125°C
Configuración rápida	0,3 $\mu$ s a 0,01 %
Bajo ruido	4,5 nV/ $\sqrt$ Hz a 100 kHz
Topología de distorsión de cruce cero	CMRR: 100 dB (mín) Excelente THD + N= 0,0004 % Entrada y salida riel a riel: 100 mV

Tabla 9 - Especificaciones técnicas OPA 2365.

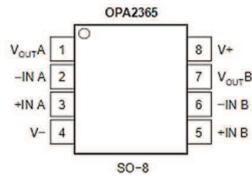


Figura 67 - Pinout OPA2365.

### 2.1.5. Sensor de temperatura DHT11

Este sensor se emplea para el registro de temperatura de operación de la electrónica dentro del gabinete del dispositivo.

Es un sensor digital de temperatura y humedad relativa. Utiliza un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no posee salida analógica). Este sensor únicamente puede obtener nuevos datos una vez cada 2 segundos.

El sensor DHT11 se caracteriza por tener la señal digital calibrada, asegurando alta estabilidad y fiabilidad a lo largo del tiempo. El sensor integra sensores resistivos para temperatura (termistor) y otro para humedad. Puede medir la humedad en un rango desde 20 % hasta 90 % y temperatura en el rango de 0 °C a 50 °C.

Cada sensor DHT11 está estrictamente calibrado en laboratorio, presentando una extrema precisión en la calibración. Los coeficientes de calibración se almacenan como programas en la memoria OTP (*One-Time-Programmable*), que son empleados por el proceso de detección de señal interna del sensor.

El protocolo de comunicación emplea un único hilo o cable.

Requiere el agregado de una resistor de 4,7 kΩ en modo *pull-up*, entre el pin de datos y VCC [69].

Categoría	Descripción
Tensión de operación	3 - 5 V CC
Rango de medición de temperatura	0 - 50 °C
Precisión de medición de temperatura	±2,0 °C
Resolución Temperatura	0,1 °C
Rango de medición de humedad	20 % a 90 % RH
Precisión de medición de humedad	4 % RH
Resolución Humedad	1 % RH
Pines	1 - alimentación (+5 V VCC)
	2 - Datos / 3 - No utilizado
	4 - Tierra (GND)
Tiempo de sensado	2 segundos
Interfaz	Digital serial

Tabla 10 - Especificaciones técnicas sensor DHT11.



Figura 68 - Sensor de temperatura DHT11.

## 2.1.6. Wemos mini D1

Esta placa de desarrollo posee un módulo ESP-WROOM-32 que integra Wi-Fi y Bluetooth BLE, ideal para el desarrollo de productos de IoT.

En la Tabla 11 se encuentran sus especificaciones técnicas, y en la Figura 69 se encuentra la disposición de los pines del módulo.

Categoría	Descripción
Tensión de funcionamiento	5 V CC (4,5 ~ 6 V)
Tensión lógica (entradas/salidas)	3,3 V
Corriente de operación	~80 mA (fuente superior a 500 mA)
Conexión	Wi-Fi y Bluetooth BLE
SoC	ESP32-D0WDQ6
CPU	Dual Core Tensilica LX6 (32 bits)
Conector	micro USB
Frecuencia de reloj	240 MHz
SRAM/Memoria Flash Externa	520 kB/4 MB
Pines digitales GPIO	34 (incluyendo todos los periféricos)
Interfaces	UART: 2 SPI: 3 I <sup>2</sup> C: 2 SD
Timers	3 (16 bits)
PWM Led	16 canales independientes (16-bits)
ADC: 18CH (12 bits) - DAC: 2 (8 bits)	
Wi-Fi	Protocolo 802.11 b/g/n/e/i Modo Station/SoftAP SoftAP+Station/P2P
Rango de frecuencias	2,4 ~ 2.5 GHz
Protocolos de red:	IPv4, IPv6, SSL, TCP/UDP/HTTP FTP/MQTT
Stack de Protocolo	TCP/IP integrado
Temperatura de funcionamiento	-40 °C a +125 °C

Tabla 11 – Especificaciones técnicas del módulo Wemos mini D1.

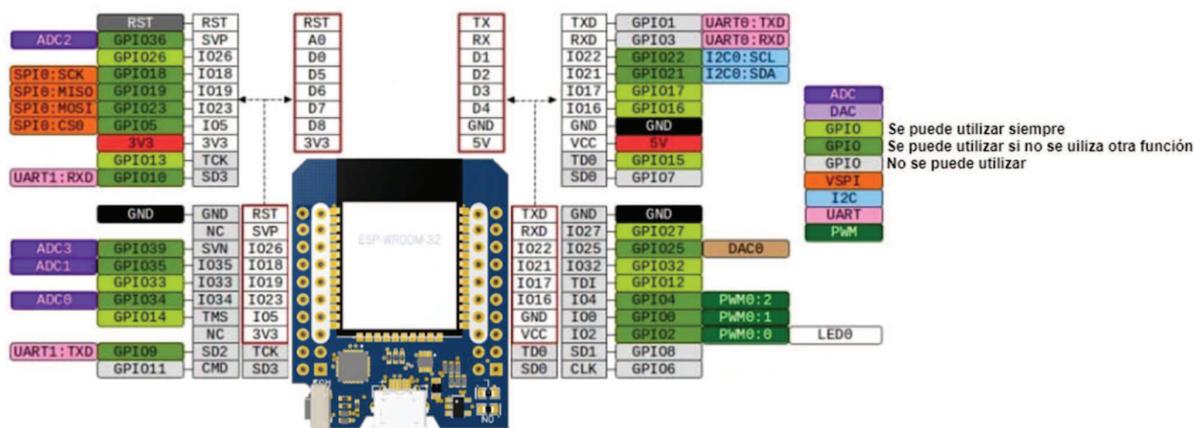


Figura 69 - Pinout del módulo Wemos mini D1.

La integración de Bluetooth, Bluetooth LE y Wi-Fi permite una amplia gama de aplicaciones, el uso de Wi-Fi permite una comunicación de mediano alcance y conectarse a una red LAN y la conexión a internet a través de un *router*, mientras que el Bluetooth permite una conexión directamente a otro dispositivo.

La corriente de reposo del chip ESP32 es inferior a 5  $\mu\text{A}$ , por lo que es adecuado para aplicaciones de electrónica portátiles con batería.

En el núcleo de este módulo está el chip ESP32-D0WDQ6. El chip integrado está diseñado para ser escalable y adaptado. Hay dos núcleos de CPU que se pueden controlar individualmente, y la frecuencia del reloj es ajustable de 80 MHz a 240 MHz.

Este módulo se caracteriza por su bajo consumo de energía [70] [71].

### 2.1.7. Conversor analógico/digital ADS1115

Se trata de un conversor analógico digital (ADC) externo que se conecta a un microprocesador para medir señales analógicas. Este ADC cuenta con 4 canales de 16 bits (15 para la medición y uno para el signo), de los cuales actualmente se utilizan 3 canales y solamente los valores positivos de 0 a 32.767.

Los datos digitales son leídos mediante bus I<sup>2</sup>C y puede alcanzar hasta 860 muestras por segundo [72]. Dispone de 4 direcciones de bus, que se eligen mediante la conexión del pin **ADDR**, permitiendo que se puedan conectar hasta 4 conversores a un mismo bus I<sup>2</sup>C.

Se utiliza para obtener mediciones de precisión, como en la lectura de sensores, o cuando la señal pueda tomar valores negativos, como en los sensores de corriente o tensión, además de liberar de esta carga al microprocesador.

Posee dos modos de medición, *single ended* y diferencial. En el modo *single ended* se dispone de cuatro canales de 15 bits. En el modo diferencial se utilizan dos canales para cada medición, por lo que el número de canales se reduce a 2, pero es posible medir tensiones negativas y mejora la inmunidad al ruido.

También dispone de un modo comparador en el que genera una alerta por el pin **ALERT** cuando cualquiera de los canales supera un valor de umbral fijado por código.

Dispone de un PGA (*Ping Grid Array*) que permite ajustar la ganancia desde 6,144 V a 0,256 V. Esto permite obtener precisiones superiores al medir tensiones inferiores a 5 V.

PGA	Referencia (V)	Factor de escala
2/3	6,144 V	0,1875 mV
1	4,096 V	0,1250 mV
2	2,048 V	0,0625 mV
4	1,024 V	0,0312 mV
8	0,512 V	0,0156 mV
16	0,256 V	0,0078 mV

Tabla 12 - Valores posibles del PGA del módulo.

Independientemente del PGA elegido, la máxima tensión posible de medir será siempre la tensión de alimentación. Es decir, aunque el PGA sea 6,144 V, no se podrán medir tensiones superiores a 5 V.

El módulo empleado fue diseñado a partir de los esquemáticos disponibles para ADC comerciales y posteriormente implementado en una placa de circuito impreso con el método de fotolitografía y grabado químico. Para la colocación de los componentes, en primer lugar se implementó una máscara antisoldante y luego se utilizó estaño en pasta y soldadura de aire caliente. El resultado se muestra en la Figura 71.

Categoría	Descripción
Tensión de alimentación	2 - 5 V CC
Corriente de alimentación	200 $\mu$ A (lectura completa) - 5 $\mu$ A (modo auto apagado)
Protocolo	I <sup>2</sup> C
Muestras por segundo	8 - 860
Tensión de referencia	Estabilizado interno
Canales	4 - modo individual 2 - modo comparador
Rango de ganancia programable	1 - 128

Tabla 13 - Especificaciones técnicas del módulo ADS1115.

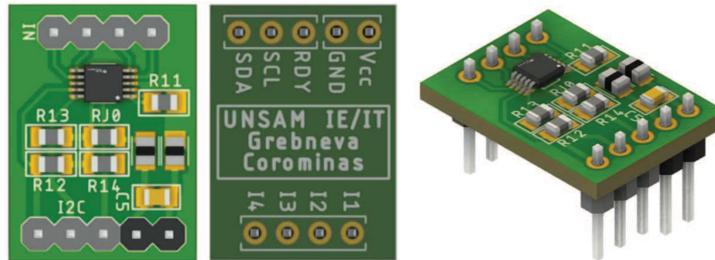


Figura 70 - Módulo conversor analógico digital ADS1115.

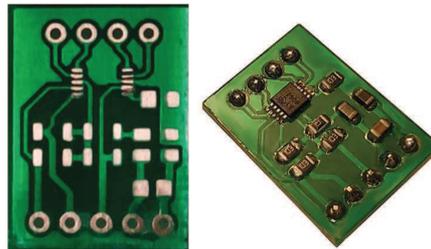


Figura 71 - Placa del ADC implementada.

### 2.1.7.1. Conversión ADC

El conversor analógico digital ADS1115 puede funcionar en dos modos de conversión:

- **Disparo único:** en este modo el conversor analógico digital realiza una conversión de la señal de entrada a demanda y almacena el resultado en un registro interno. Al enviar una señal al ADS1115 es posible indicar cuando hacer la conversión, luego el ADS1115 entra en modo ahorro de energía.

Este modo de funcionamiento es el predeterminado y se utiliza para ahorrar energía en sistemas que funcionan con baterías, o que solo requieran de conversiones periódicas o para largos periodos de inactividad entre conversiones, ya que el dispositivo se activa, realiza una medición y luego vuelve al modo *sleep*. Mientras está dormido, el chip solo consume una corriente típica de 0,5  $\mu$ A, aunque la interfaz de comando permanece activa y se pueden leer los datos del chip.

- **Conversión continua:** en este modo el conversor analógico digital automáticamente comienza a convertir la señal de entrada tan pronto como la conversión previa se ha completado. Es decir, convierte un valor de analógico a digital y cuando termina, toma otra muestra. La tasa de conversión es programable.

Los datos pueden ser leídos en cualquier momento y siempre reflejan la conversión más reciente.

El modo utilizado en el marco del proyecto es el de disparo único.

### 2.1.7.2. Detalle de pines del ADC

En la Figura 70, se pueden identificar los pines, **VDD** y **GND** son pines de alimentación, los pines **SCL** y **SDA** son los pines de reloj y datos del bus I<sup>2</sup>C, los pines **A0**, **A1**, **A2** y **A3** son los 4 pines de entradas analógicas, mientras que los pines **ADDR** y **ALERT/READY** son especiales y se detallarán a continuación:

- **Pin ADDR:** el conversor analógico digital ADS1115 puede ser configurado con 4 direcciones I<sup>2</sup>C. Esto permitiría conectar hasta 4 ADS1115 en un mismo bus I<sup>2</sup>C. Para seleccionar una dirección entre las 4 posibles el pin se debe conectar a través de una resistencia a los pines que se indican en la Tabla 14:

Conexión ADDR	Dirección
GND	0x48
5V	0x49
SDA	0x4A
SCL	0x4B

Tabla 14 - Posibles conexiones con sus direcciones correspondientes.

- **Pin ALERT/READY:** requiere del agregado de una resistencia de *pull-up* y se puede configurar para emitir una señal ya sea para detección de umbral cuando la señal de entrada supera cierto rango, o bien para indicar el fin de la conversión.

Otra forma de detectar si la conversión se ha completado es leer un valor del registro, que es la que se emplea en el presente proyecto.

### 2.1.7.3. Multiplexor de entrada del ADC

En la Figura 72 se observa el diagrama en bloques del módulo ADC ADS1115.

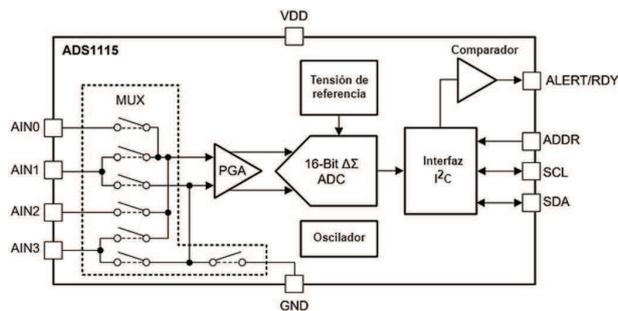


Figura 72 - Diagrama de bloques ADS1115.

Se seleccionan entre 4 entradas referenciadas a tierra:

- AIN0(+) ~ GND(-), esta entrada corresponde al radiómetro fotovoltaico
- AIN1(+) ~ GND(-), esta entrada corresponde a la temperatura del panel superior
- AIN2(+) ~ GND(-), esta entrada corresponde a la temperatura del panel inferior
- AIN3(+) ~ GND(-), esta entrada no se utiliza, por lo tanto no se selecciona.

## 2.2.1. Conversor lógico BSS138

Se trata de un módulo conversor lógico de niveles de tensión bidireccional que permite convertir niveles de 3,3 V a 5 V y viceversa, aunque también trabaja con dispositivos de 2,8 V y 1,8 V.

La propiedad descrita anteriormente se denomina cambio de nivel lógico y permite adaptar señales SPI, I<sup>2</sup>C o cualquier señal digital, para ello, la placa necesita ser alimentada por las dos tensiones a convertir y únicamente funciona con señales digitales (niveles altos y bajos). No funciona con señales analógicas.

El módulo posee un circuito de cambio de nivel (Figura 73) que se repite cuatro veces para crear cuatro canales. El circuito utiliza un solo MOSFET de canal N y dos resistencias de *pull-up* para realizar un cambio de nivel bidireccional. Este circuito puede cambiar una señal de baja tensión a alta y/o cambiar una señal de alta tensión a una tensión baja. Una señal de 0 V en un extremo sigue siendo una señal de 0 V en el otro.

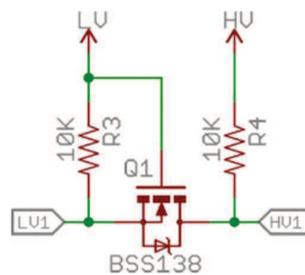


Figura 73 - Circuito bidireccional de cambio de nivel utilizado en los cuatro canales.

El conversor posee 12 pines en total, de acuerdo con la Figura 74, una fila contiene todas las entradas y salidas de mayor tensión (por ejemplo, 5 V), y la otra fila contiene las de menor tensión (por ejemplo, 3,3 V).

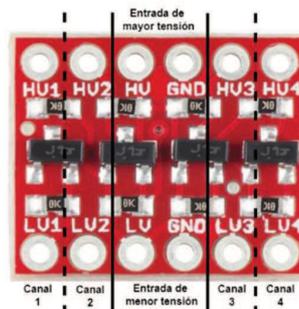


Figura 74 - Pinout del módulo BSS138.

Hay cuatro canales de datos separados en el conversor, cada uno capaz de cambiar datos hacia y desde tensiones mayores y menores. Estos pines están etiquetados como **HV1**, **LV1**, **HV2**, **LV2**, **HV3**, **LV3**, **HV4** y **LV4**. El número al final de cada etiqueta designa el canal del pin, y el prefijo **HV** o **LV** determina si está en el lado alto o bajo del canal.

Una señal de menor tensión enviada a **LV1**, por ejemplo, se cambiará a una tensión más alta y se enviará a **HV1**. Algo enviado a **HV3** se desplazará hacia abajo y se enviará fuera de LV3.

Es posible utilizar tantos de estos canales como requiera el proyecto. No es necesario utilizar todos y cada uno. Estos cambiadores de nivel son puramente digitales [73].

### 2.2.2. Panel solar

Su principal función es brindar una fuente de alimentación de energía renovable y alternativa.

La captación, transformación, almacenamiento y posterior uso de la energía solar permiten mantener al sistema operando continuamente, lo que es ideal en los sistemas desatendidos.

Se trata de un panel solar fotovoltaico de silicio policristalino cuyas características técnicas se describen en la Tabla 15 [74]. Se utilizaron dos paneles idénticos conectados en paralelo, en la próxima sección se explicará con mayor detalle.

Categoría	Descripción
Tensión típica	5,5 V
Potencia	0,5 W
Corriente máxima	100 mA
Tensión de circuito abierto	8,2 V
Tensión máxima de carga	6,4 V
Dimensiones	61 mm x 110 mm x 3 mm

Tabla 15 - Especificaciones técnicas panel solar 5,5 V.



Figura 75 - Panel solar de 5,5 V.

### 2.2.3. Batería recargable

Los tipos de baterías más comunes para aplicaciones similares son las basadas en litio, especialmente las de iones de litio (li-ion), que poseen gran capacidad de almacenamiento, alto rendimiento, elevada densidad de energía y baja tasa de autodescarga.

Parámetros más importantes que se tuvieron en cuenta al optar por este tipo de tecnología, fueron: su costo, capacidad de almacenamiento, el tiempo de vida útil, la resistencia a la descarga y el tamaño.

Como desventajas se tiene que disminuyen su eficiencia en temperaturas bajo cero, necesitan circuitos para controlar los procesos de carga y descarga ya que pueden ser susceptibles a explosiones y en algunos casos suelen ser más costosas que baterías con otras tecnologías.

En este caso se optó por baterías recargables cuyas especificaciones técnicas se describen en la Tabla 16 [75] [76].

Categoría	Descripción
Tensión nominal/máx/mín	3,7 V/4,2 V/2,75 V
Corriente de carga/descarga	Standard 2,5 A - Máx 5 A
Temperatura de carga	0 °C a 45 °C
Temperatura de operación	-20 °C a 60 °C
Capacidad nominal	5.000 mAh
Potencia máxima	18,5 Wh
Dimensiones	53 mm x 64 mm x 9 mm

Tabla 16 - Especificaciones técnicas batería li-ion.



Figura 76 - Batería li-ion.

## 2.2.4. Módulo de protección de baterías

Se trata de un módulo de protección BMS (*Battery Management System*), y se utiliza para la protección de baterías de iones de litio.

Este módulo se encarga de controlar la descarga de la batería o conjunto de celdas, cortando la tensión de salida y cuando se ha cargado suficientemente, cortando la tensión excesiva de entrada. También controla las fases de carga y goteo, así como también permite que circule tensión de la batería hacia la carga. Si la tensión disminuye a valores peligrosos para la vida de las celdas (tensiones del orden de 2,75 V), el PCM (*Protection Circuit Module*) impide la descarga y corta la alimentación.

En el momento de la carga funciona al revés, cuando la celda de 3,7 V ha alcanzado la tensión de 4,22 V, el circuito corta la entrada de corriente y goteo, permitiendo la descarga, pero no la carga.

El chip de control del circuito es el integrado DW01K y, además, consta de 6 transistores MOS (8205A) para habilitar o cortar la tensión de la batería.

Como se muestra en la Figura 77,  $B+$  y  $B-$ , son los los puntos de conexión para los polos positivo y negativo de la batería, respectivamente;  $P+$  y  $P-$ , son la salida de la placa de protección, positiva y negativa, respectivamente. [77]

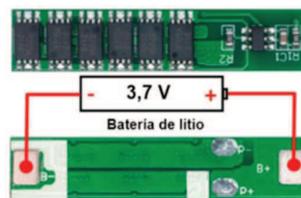


Figura 77 - Módulo BMS.

En la Tabla 17 se detallan las especificaciones técnicas del módulo [78].

Categoría	Descripción
Tensión de detección de sobrecarga	4,25 + 0,05 V
Tensión de desconexión por sobrecarga	4,23 + 0,05 V
Tensión de detección de sobredescarga	2,54 + 0,1 V
Corriente continua máxima	2 A
Corriente de detección de sobrecorriente	3 A
Tensión de carga	4,2 V
Dimensiones	35 mm x 7,6 mm x 92 mm

Tabla 17 - Especificaciones técnicas del módulo BMS.

El módulo de protección funciona en los siguientes estados:

**Funcionamiento normal:** cuando la tensión de la celda se encuentra entre 2,5 V y 4,3 V, el integrado DW01K comanda los transistores de manera que queden en estado abierto y permitan que el terminal **B-** esté en continuidad con el terminal **p-** de la placa.

**Control de protección de sobredescarga:** cuando la celda se descarga a través de una carga externa, el integrado DW01K monitorea esa tensión a través de la resistencia **R1**, de modo que cuando esta cae por debajo de 2,75 V cierra los interruptores 8205A y desconecta la salida de tensión evitando que la celda se siga descargando.

Cuando se detecta una tensión mayor a la de sobredescarga en los terminales **p+** y **p-** se reestablece el modo de funcionamiento normal.

**Control de protección de sobrecarga:** cuando la tensión de la celda aumenta a 4,4 V, el DW01K comandará la desconexión de los transistores, de modo que los terminales **B-** de la celda de la batería y la **p-** de la placa de protección estén en un estado desconectado. Es decir, el circuito de carga de la celda de la batería se corta y la celda de la batería dejará de cargarse.

Cuando la tensión de la batería cae por debajo de 4,3 V se reestablece el modo de funcionamiento normal.

**Protección contra sobrecorriente/cortocircuito:** el integrado DW01K monitorea la caída de tensión de los transistores a través de la resistencia R2, de modo que cuando esta tensión sube por encima del umbral de 0,15 V se envía un comando de desconexión a los MOS 8205A y se desconecta la salida de tensión de la placa.

## 2.2.5. Cargador de batería para panel solar - CN3065

El CN3065 es un cargador lineal de corriente constante/tensión constante para baterías recargables de iones de litio y polímeros de litio. El dispositivo contiene un MOSFET de potencia en el integrado y elimina la necesidad de la resistencia de detección externa y de un diodo de bloqueo.

Un ADC de 8 bits integrado en el chip puede ajustar la corriente de carga automáticamente en función de la capacidad de salida de la fuente de alimentación de entrada, por lo que este módulo es ideal para sistemas alimentados por energía solar fotovoltaica.

Además, el CN3065 está diseñado específicamente para trabajar dentro de las especificaciones de alimentación del USB.

La retroalimentación térmica regula la corriente de carga para limitar la temperatura durante el funcionamiento a alta potencia o a alta temperatura ambiente. La tensión de regulación se fija internamente en 4,2 V con una precisión del 1 %, también puede ajustarse con una resistencia externa.

La corriente de carga se puede programar externamente con una sola resistencia.

Cuando se retira la alimentación de entrada, el CN3065 entra automáticamente en un modo *stand by* de bajo consumo y se reduce la corriente de drenaje de la batería a menos de 3  $\mu$ A.

Otras características son el bloqueo por subtensión, la recarga automática, la detección de la temperatura de la batería y el indicador de carga/descarga [79].

Las especificaciones técnicas del módulo se encuentran en la Tabla 18 [80].

Categoría	Descripción
Tensión de entrada del panel solar	4,4 V a 6 V
Corriente de carga máxima/continua	500 mA - hasta 500 mA
Interfaces	Conectores JST de 2 pines - micro USB
Pines	Micro USB - entrada de tensión SOLAR: conexión por JST con el panel BATT IN: para conexión a la batería Sys OUT: salida de tensión a la carga
Dimensiones	40 mm x 20 mm x 7 mm

Tabla 18 - Especificaciones técnicas del módulo CN3065.

La carga se debe conectar en paralelo con la batería. Por defecto, la carga se ajusta a una corriente de carga máxima de 1000 mA con una entrada máxima recomendada de 6 V (mínimo de 4,4 V). Se recomienda que las baterías no se carguen con una capacidad superior a la de su capacidad.



Figura 78 - Módulo cargador de baterías CN3065.

## 2.2.6. Módulo MAX17043

Se trata de un indicador de carga para baterías recargables, que por medio de un algoritmo de seguimiento en tiempo real de estado de carga relativo (SOC, *State of Charge*) permite la medición de tensión de una batería, de modo que es posible saber cuánta carga le queda a esta.

El indicador se comunica mediante la interfaz I<sup>2</sup>C a distintos microcontroladores. En la Tabla 19 es posible apreciar las especificaciones técnicas del módulo.

Categoría	Descripción
Tensión de funcionamiento	5 V CC
Tensión de entrada	3,3 ~ 6 V CC
Tipo de batería	Ión/polímero de litio de 3,7 V
Corriente de funcionamiento	50 $\mu$ A
Precisión	$\pm 12,5$ mV hasta 5 V
Protocolo	I <sup>2</sup> C
Temperatura de trabajo	-40 °C a 125 °C
Humedad de trabajo	0% a 95% RH
Tamaño	24 mm x 10 mm x 7 mm

Tabla 19 - Especificaciones técnicas del módulo MAX17043.

El módulo también cuenta con una función de interrupción de alerta de batería baja. Cuando la energía de la batería cae por debajo de un umbral específico, el pin ALR genera un pulso descendente para activar la interrupción externa del controlador, útil para estimar la duración de una batería en función del consumo de energía del sistema [81] [82].

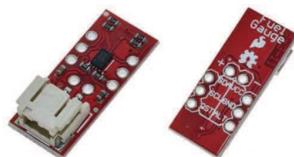


Figura 79 - Módulo indicador de carga MAX17043.

## 2.2.7. Conversor DC/DC *Boost* MT3608

El conversor DC-DC MT3608 es un regulador de tipo conmutado elevador (*Step-Up* o *Boost* – Sección 1.1.11) con una alta eficiencia de conversión, excelente regulación de línea y baja tensión de rizado.

Soporta corrientes de salida de hasta 2 A, tensión de entrada entre 2 V y 24 V y tensión de salida entre 2 V y 28 V. La tensión de salida se selecciona mediante un potenciómetro multivuelta. En la Tabla 20 se detallan las especificaciones técnicas del módulo.

Categoría	Descripción
Tensión de entrada	2 V a 24 V CC
Tensión de salida	5 V a 28 V CC
Tensión de salida ajustable	Regulable por trimmer
Corriente de salida	Máx 2 A (usar disipador para corrientes mayores a 1,5 A)
Potencia de salida	6 W
Eficiencia de conversión	93 % máx
Frecuencia de trabajo	1,2 MHz
Protección de sobre temperatura	Sí (apaga la salida)
Protección de cortocircuito	No
Protección limitadora de corriente	Sí (4 A)
Protección inversión de polaridad	No
Dimensiones	36 mm x 17 mm x 7 mm

Tabla 20 - Especificaciones técnicas del conversor DC/DC *Boost* MT3608.

Los convertidores DC/DC son circuitos capaces de transformar un nivel de tensión a otro de mayor o menor nivel. Existen dos tipos de convertidores o reguladores DC/DC: lineales y conmutados (*switching*).

Los convertidores conmutados como el MT3608 convierten la tensión mediante el almacenamiento periódico de energía de entrada y la posterior liberación de esa energía en la salida, de forma que el nivel de tensión final es el deseado. Los convertidores DC/DC conmutados con el objetivo de convertir la energía eléctrica con la máxima eficiencia poseen únicamente componentes que no presentan pérdidas, es decir, que no absorben energía.

Los componentes son de 2 tipos: conmutadores y almacenadores. Los conmutadores son interruptores del paso de corriente, que idealmente no presentan pérdidas por conmutación, normalmente son transistores MOSFET. Los componentes almacenadores son los inductores y capacitores que almacenan la energía temporalmente para luego devolverla al circuito.

El módulo reduce al mínimo el uso de componentes externos para simplificar el diseño de fuentes de alimentación. Permite obtener una tensión regulada a partir de una fuente con una tensión inferior, por ejemplo: obtener 5 V o 12 V a partir de una batería de litio de 3,7 V. Es capaz de manejar una carga de hasta 2 A o 6 W máximo [83] [84].



Figura 80 - Conversor DC/DC *Boost* MT3608.

## 2.2.8. Multitech xDot

Se trata de un módulo desarrollado por la empresa Multitech. Es un dispositivo compacto, de bajo consumo de energía, y de montaje superficial que integra un transmisor LoRa y un procesador ARM Cortex-M3 STM32L151CCU6 compatible con software diseñado especialmente para IoT.

El xDot es un módulo de RF programable de baja potencia, que proporciona conectividad de datos M2M de largo alcance y baja tasa de bits a sensores, equipos industriales y dispositivos remotos.

Este módulo es compatible con LoRaWAN1.0.2, lo que proporciona comunicación de datos bidireccionales hasta 15 km con línea de visión y 2 km dentro de edificios.

La Tabla 21 muestra las principales características del módulo [85].

Categoría	Descripción
Compatibilidad de red	LoRaWAN
Interfaces	19 E/S digitales - 10 analógicas 2 salidas DAC - I2C - SPI UART - PWM - JTAG
CPU	32 MHz
Flash/EEPROM/SRAM	256 kB/ 8 kB/ 32kB
Conector RF	UFL
Tensión de operación	2,4 a 3,57 V
Corriente	<15 mA en modo activo <2 $\mu$ A en modo <i>sleep</i>
Bandas ISM	902 MHz a 928 MHz
Potencia máx Tx	19 dBm
Sensibilidad máx Rx	-130 dBm

Tabla 21 - Especificaciones técnicas xDot.



Figura 81 - Módulo MTMDK - xDot.

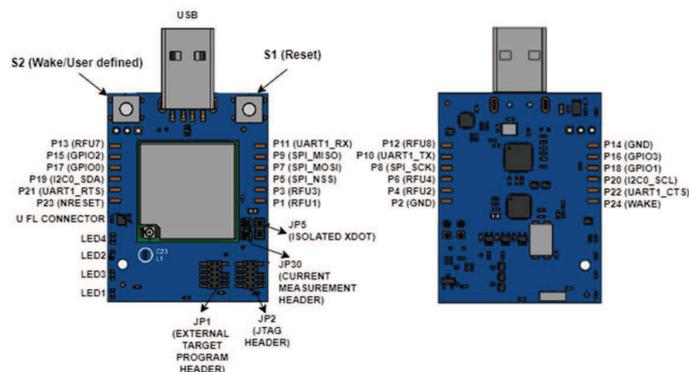


Figura 82 – Pinout del xDot.

## 2.2.9. Gateway RAK7243 WisGate Developer D3

El *gateway* RAK7243 forma parte de la familia de *gateways* LPWAN WisGate Developer de la firma RAKwireless Technology Limited, diseñados para proyectos de pequeña escala y desarrollo, siendo una opción ideal para el presente proyecto [86].

El RAK7243 se basa en un ordenador de placa simple (SBC) Raspberry Pi 3 B+ e incluye el Pi HAT (*Hardware Attached on TOP*) RAK2245 que contiene los módulos de comunicación LoRa y GPS con disipador de calor para mejorar el rendimiento, también incluye carcasa de aluminio y las correspondientes antenas LoRa y GPS.

En la Tabla 22 se muestran las especificaciones del *gateway* y en la Figura 83 se muestra el diagrama en bloques completo del Pi HAT RAK2245 [87].

Categoría	Descripción
Alimentación	5 V/2,5 A
Módulo GPS	Ublox MAX-7Q
Potencia Tx	hasta 27 dBm
Sensibilidad Rx	-139 dBm @SF12
Ancho de banda (BW)	125 kHz
Rango temperatura soportada	- 40 °C a 85 °C
Rango de alcance	>15 km (línea recta) - < 2 km en áreas urbanas densas
Conectores para antenas	SMA para GPS/GNSS y RP-SMA para 915 MHz
Dimensiones	68,3 mm x 92 mm x 53,5 mm
Compatibilidad de frecuencias	EU433, CN470, EU868, US915, AS923, AU915, KR920, IN865 y AS920
Procesador RB Pi 3 B+	Broadcom BCM2837B0 – Cortex A53 ARMv8 – 64 bit SoC
Frecuencia de reloj	1,4 GHz
Memoria	1 GB LPDDR2 SDRAM
Conectividad inalámbrica	2,4 GHz/5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac Bluetooth 4.2 - BLE
Conectividad de red	Gigabit Ethernet over USB 2.0
Puertos	GPIO 40 pines - HDMI - 4 USBs 2.0 CSI (cámara Raspberry Pi) DSI (pantalla tácil) - Toma auriculares/vídeo compuesto microSD - micro USB (alimentación) Power-over-Ethernet (PoE)

Tabla 22 - Especificaciones técnicas del *gateway* RAK7243 WisGate Developer D3.

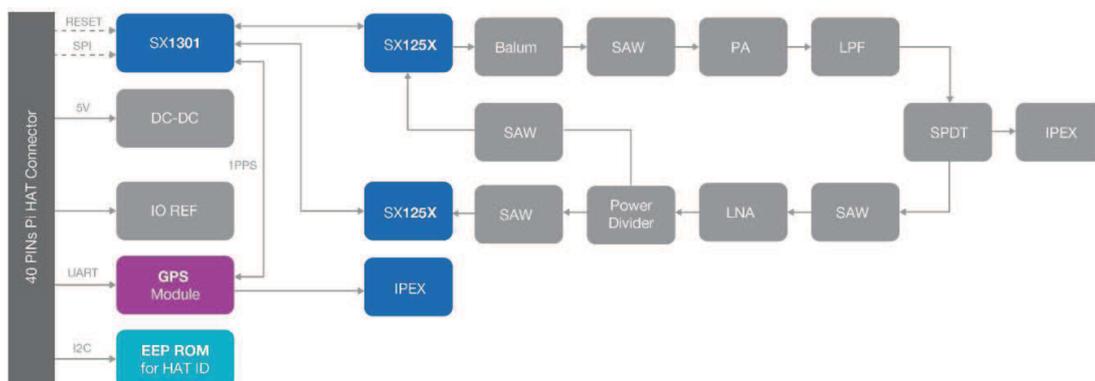


Figura 83 - Diagrama en bloques del Pi HAT RAK2245.



Figura 84 - Gateway RAK7243 WisGate Developer D3.

Para la gestión de la comunicación LoRa el RAK2245 utiliza el chip SX1301 como procesador de banda base y dos chips SX125X para la interfaz RF - I/Q. Ambos son provistos por la empresa Semtech.

Este *gateway* puede emular 49 demoduladores LoRa, 10 rutas de demodulación paralelas programables, soporta 8 canales de subida y 1 canal de bajada de enlace descendente y puede recibir hasta 8 paquetes LoRa simultáneamente enviados con diferentes factores de propagación en diferentes canales.

El fabricante ofrece una imagen del sistema operativo LoRaWAN Gateway (basado en el sistema operativo Raspbian) con todos los componentes necesarios preinstalados, listo para grabar en una tarjeta de memoria.

Dentro de las configuraciones se tienen dos opciones de Servidor LoRa: *Chirpstack*, que permite correr todos los componentes del servidor LoRa localmente en el mismo *gateway* y *The Things Stack* que permite que el Gateway funcione como *packet forwarder* y se conecte al servidor de TTS a través de internet.

En el marco del presente proyecto se emplea la segunda opción, que se detalla en la sección 2.1.7.

## 2.2.10. Herramientas de desarrollo

### 2.2.10.1. Mbed

Mbed OS es un sistema operativo de tiempo real (RTOS) de código abierto para dispositivos IoT basados en procesadores Cortex-M, que proporciona una capa de abstracción para los dispositivos sobre los que se ejecuta, de manera que los desarrolladores puedan crear aplicaciones en lenguaje C/C++ para cualquier placa habilitada para Mbed [88].

El dispositivo que se emplea con este sistema operativo es el Multitech xDot y el desarrollo de la aplicación se explica en mayor detalle en la sección 3.3.3.

En el marco del presente proyecto se emplea *mbed-os 6* y bibliotecas para el manejo del *stack* LoRaWAN desarrolladas por la firma Multitech.

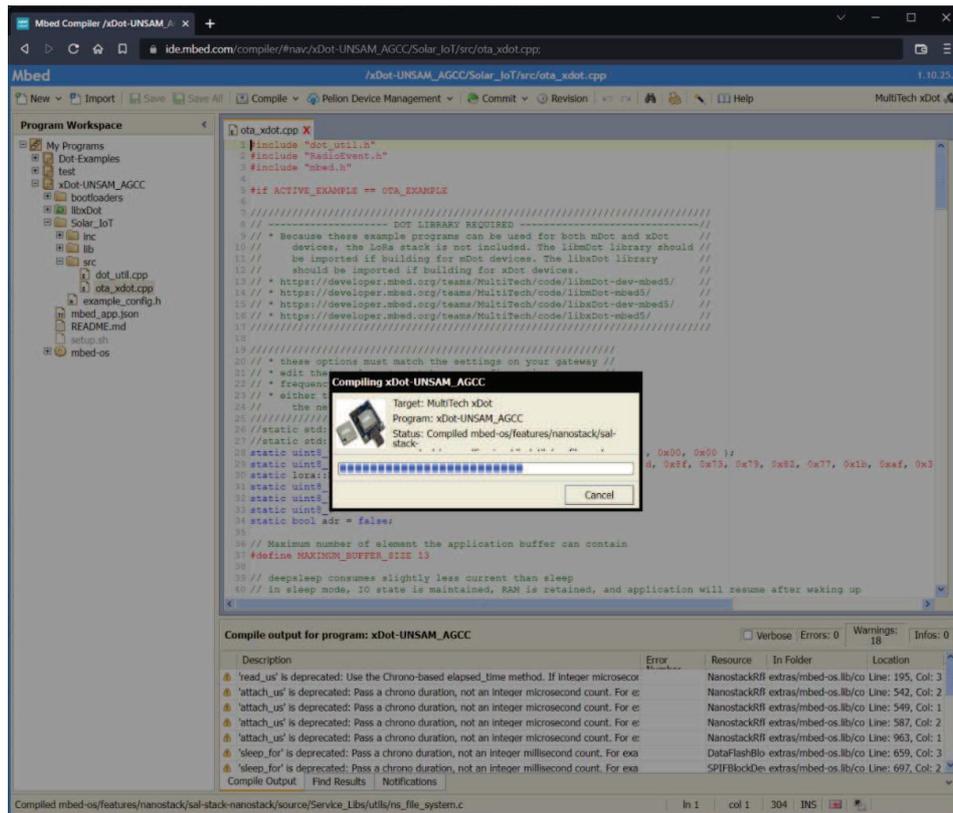


Figura 85 - Entorno de desarrollo Mbed Compiler.

Para el desarrollo de aplicaciones con *mbed-os* existen varias herramientas y en el presente proyecto se emplea el Mbed Compiler (Figura 85) que se trata de un IDE (*Integrated Development Environment*) basado en navegador web, y funciona íntegramente en la nube, lo cual facilita el desarrollo y la continuación de un proyecto desde cualquier dispositivo que tenga conexión a internet y navegador [89].

Este IDE cuenta con control de cambios y un editor de código C/C++, permite reutilizar bibliotecas y proyectos publicados por otros usuarios y compilar el proyecto en la nube para descargarlo luego al dispositivo en forma de archivo binario que se instala y se ejecuta automáticamente. Además, permite exportar los proyectos en formato apropiado para las herramientas de escritorio.

## 2.2.10.2. PlatformIO

Se trata de un IDE de código abierto, de desarrollo especialmente pensado para aplicaciones IoT. Internamente está escrito en Python, que será la única dependencia requerida, y brinda una plataforma de desarrollo única independientemente del hardware que se utilice.

Además, se encarga de manejar todos los requerimientos a nivel de bibliotecas de forma centralizada posibilitando la migración entre plataformas y permite compartir código entre diferentes personas dentro de un equipo.

Se utiliza en conjunto con editores como: Atom, Eclipse, Emacs, NetBeans, Sublime Text, VIM, Visual Studio Code, entre otros).

En el marco del presente proyecto se utilizó en conjunto con el entorno Visual Studio Code (VSC) para desarrollar la aplicación del dispositivo Wemos D1 Mini ESP32.

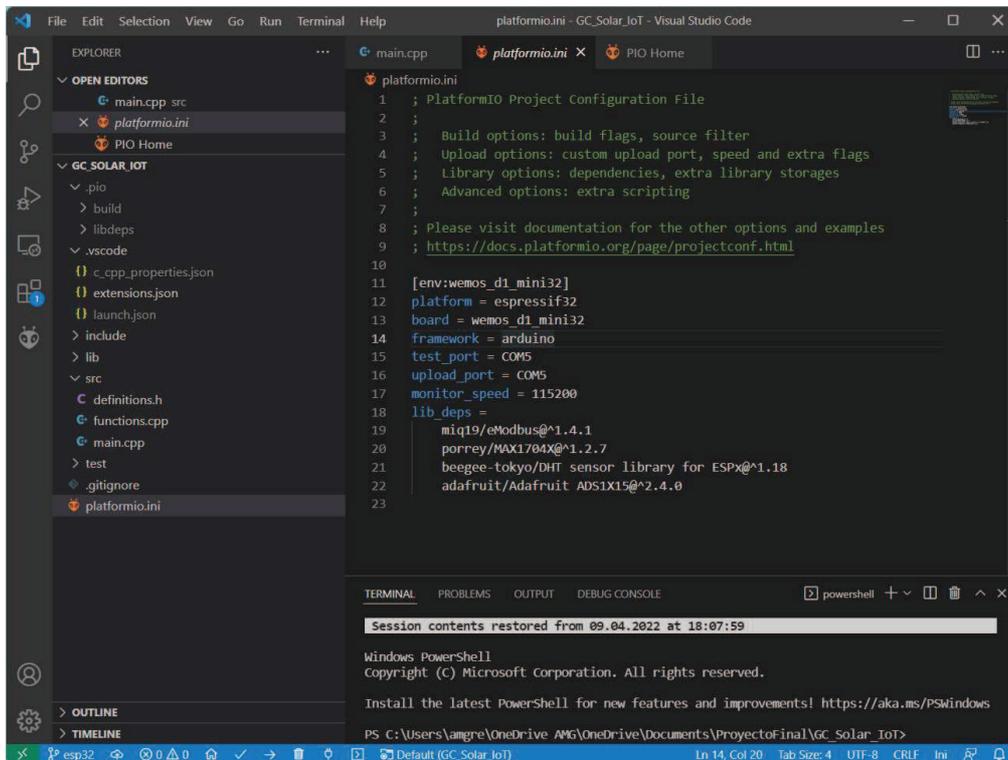


Figura 86 - Entorno de desarrollo PlatformIO sobre VSCode.

A continuación, se brindan algunos detalles sobre su utilización:

- La plataforma de desarrollo, así como la placa física empleada son configuraciones del proyecto y como tal van en el fichero *platformio.ini*.
- En dicho fichero pueden existir diferentes configuraciones para diferentes entornos, todos ellas comparten el mismo código fuente.
- El código fuente es independiente de la plataforma de desarrollo empleada y va localizado bajo la carpeta *src*.
- Basándose en el fichero *platformio.ini*, el sistema se encarga de descargar e instalar todos los requerimientos necesarios.
- La carpeta *lib* almacena las diferentes bibliotecas requeridas por la aplicación que se desarrolle.
- El usuario a partir de una única herramienta y con una API sencilla, dispone de toda la funcionalidad que se requiere para crear, compilar y subir código.

A medida que los proyectos crecen, este entorno resulta más útil. Su utilización permite desarrollar sin tener que elegir la plataforma final donde irá el programa, lo que otorga flexibilidad para adaptarse a las necesidades de un proyecto en función del crecimiento de este.

Permite, además, trabajar con proyectos aprovechando las ventajas que brinda el Software de Control de Versiones (SCM) como Git [90].

### 2.2.10.3. EAGLE

EAGLE (*Easily Applicable Graphical Layout Editor*) es un software de automatización de diseño electrónico distribuido por la firma Autodesk Inc, popular en los proyectos del ámbito DIY (*Do It Yourself*, o Hágalo Usted Mismo) que se utiliza para el desarrollo de placas de circuito impreso (PCB, *Printed Circuit Board*) y permite generar

Si bien es un *software* que se comercializa bajo licencia de suscripción, también tiene una versión gratuita para uso no comercial (utilizada en el marco del presente proyecto) que permite trabajar con hasta dos esquemáticos activos por proyecto, y con PCB doble faz de hasta 80 cm<sup>2</sup>. Además, permite acceso personal a la solución de diseño 3D Fusion 360 en la nube para sincronizar los proyectos desarrollados y generar modelos 3D de las placas.

EAGLE contiene, por un lado un editor de esquemáticos para el diseño de diagramas de circuito (Figura 87), por otra parte un editor de placas de circuito impreso con autoenrutador (Figura 88). Ambos se sincronizan entre sí de manera que cualquier cambio de componentes o de conexión realizado en uno, automáticamente se ve reflejado en el otro.

Además de las funciones de desarrollo de placas de circuito impreso, EAGLE incluye bibliotecas de componentes de diferentes fabricantes que distribuyen de forma gratuita, así como bibliotecas genéricas para muchos componentes estandarizados. También contiene una herramienta para editar componentes existentes o desarrollar componentes personalizados (Figura 89).

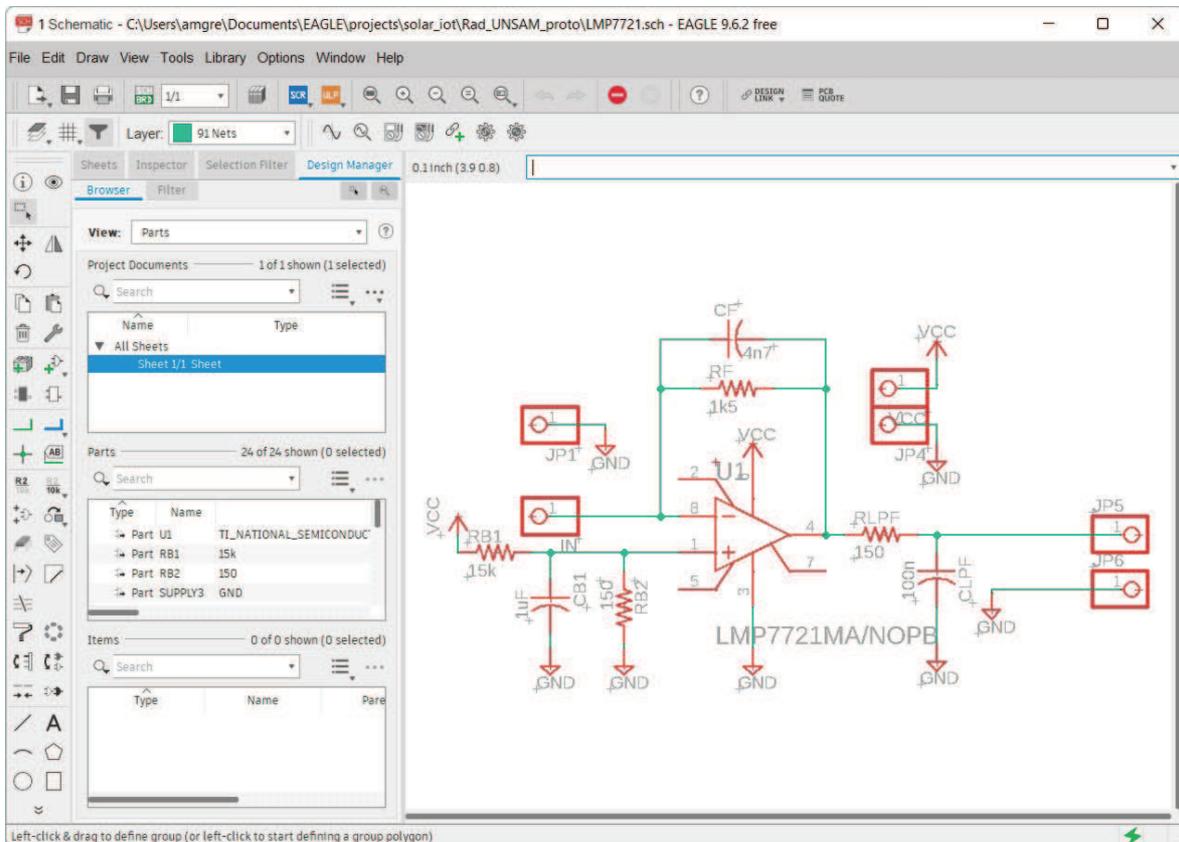


Figura 87 - Editor de esquemáticos.

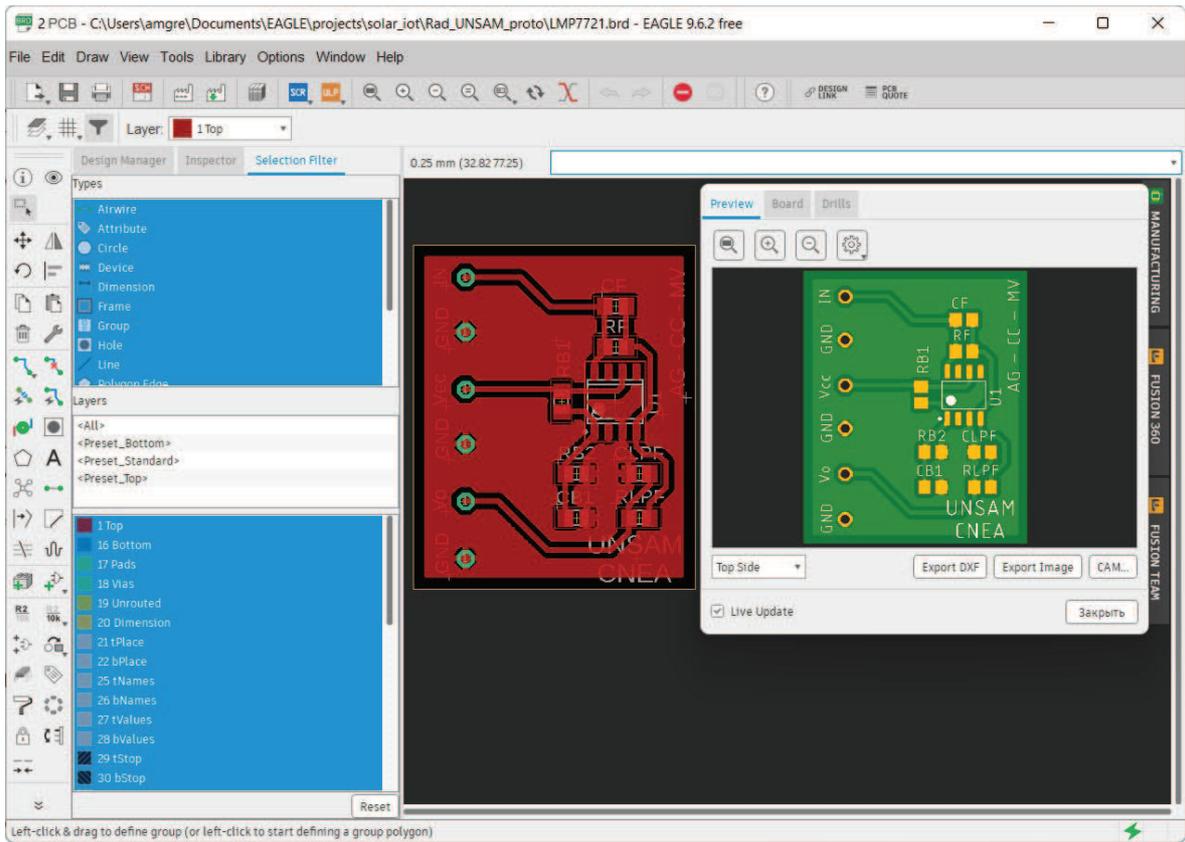


Figura 88 - Editor de PCB.

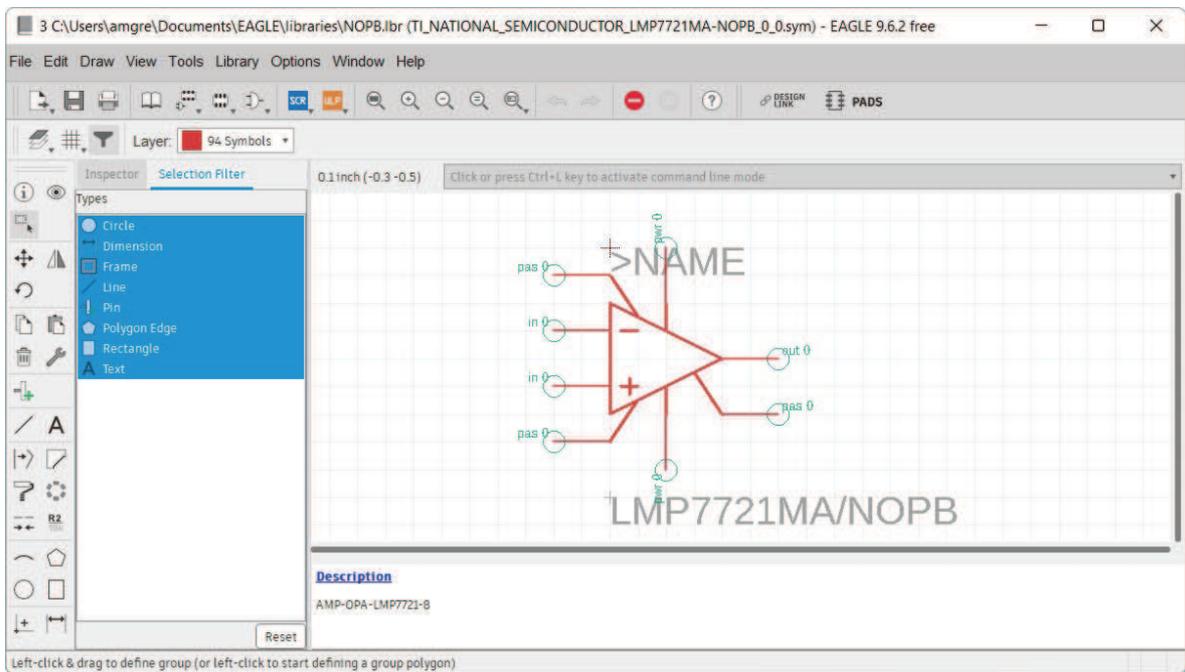


Figura 89 - Editor de componentes.

### 3. Diseño e implementación

En este capítulo se presentará el desarrollo del prototipo empleando las tecnologías, soluciones, herramientas de programación y desarrollo electrónico presentados en el capítulo anterior.

El objetivo del trabajo consiste en el diseño de un sistema de telemetría IoT para monitorear una instalación fotovoltaica. Las variables que el sistema debe monitorear son: la radiación solar incidente en el arreglo de paneles solares, la temperatura de dos celdas testigo de paneles y la potencia DC generada por el arreglo. Los sensores para medir la radiación incidente en los paneles al igual que la temperatura de las celdas testigo se ubican en la estructura del arreglo.

El arreglo de paneles del sistema fotovoltaico de FUNINTEC se encuentra ubicado en una zona donde no hay sombras cercanas que puedan afectar su producción (Figura 90). Mientras, que el inversor está ubicado dentro de una de las oficinas del edificio (Figura 91).

La distancia entre el inversor y el arreglo de paneles es de aproximadamente 15 m. Esta configuración es la habitual en sistemas fotovoltaicos urbanos de generación distribuida.

Generalmente, los inversores se encuentran a una distancia superior a 10 o 20 metros del arreglo de paneles. La posición del inversor está siempre definida por el acceso a los tableros de conexión a la red de electricidad.

Por esas condiciones de funcionamiento, el sistema de telemetría debe poder tomar y transmitir datos desde dos localizaciones bien definidas empleando tecnologías de comunicación inalámbricas, además de resolver el servicio de monitoreo remoto.



Figura 90 - Instalación fotovoltaica en FUNINTEC y acceso a las oficinas.



Figura 91 - Ubicación del *inverter* en las oficinas de FUNINTEC.

### 3.1. Diseño del sistema

Para cumplir con el objetivo general, el proyecto contempla los siguientes objetivos específicos:

- Elaboración de un diseño basado en el bajo consumo.
- Diseño de un sistema modular y escalable.
- Utilización de herramientas abiertas y de libre acceso para el desarrollo.

En el capítulo anterior se introdujeron dos tecnologías de comunicación inalámbrica: Wi-Fi (sección 2.1.4) y LoRa (sección 2.1.6). Se utilizó la tecnología Wi-Fi en combinación con el protocolo industrial Modbus/TCP (sección 2.1.5.6) para la lectura de la potencia fotovoltaica del arreglo y el estado del inverter.

Para garantizar bajo consumo y transmisión de datos de larga distancia se empleó la tecnología LoRa junto con el estándar LoRaWAN (sección 2.1.6.2) que es el empleado por el servicio público *The Things Network* y *The Things Stack* (introducido en la sección 2.1.8).

La Figura 92 muestra la arquitectura conceptual del sistema implementado donde se observan las principales partes constitutivas y la disposición de red sobre la que funciona el dispositivo diseñado.

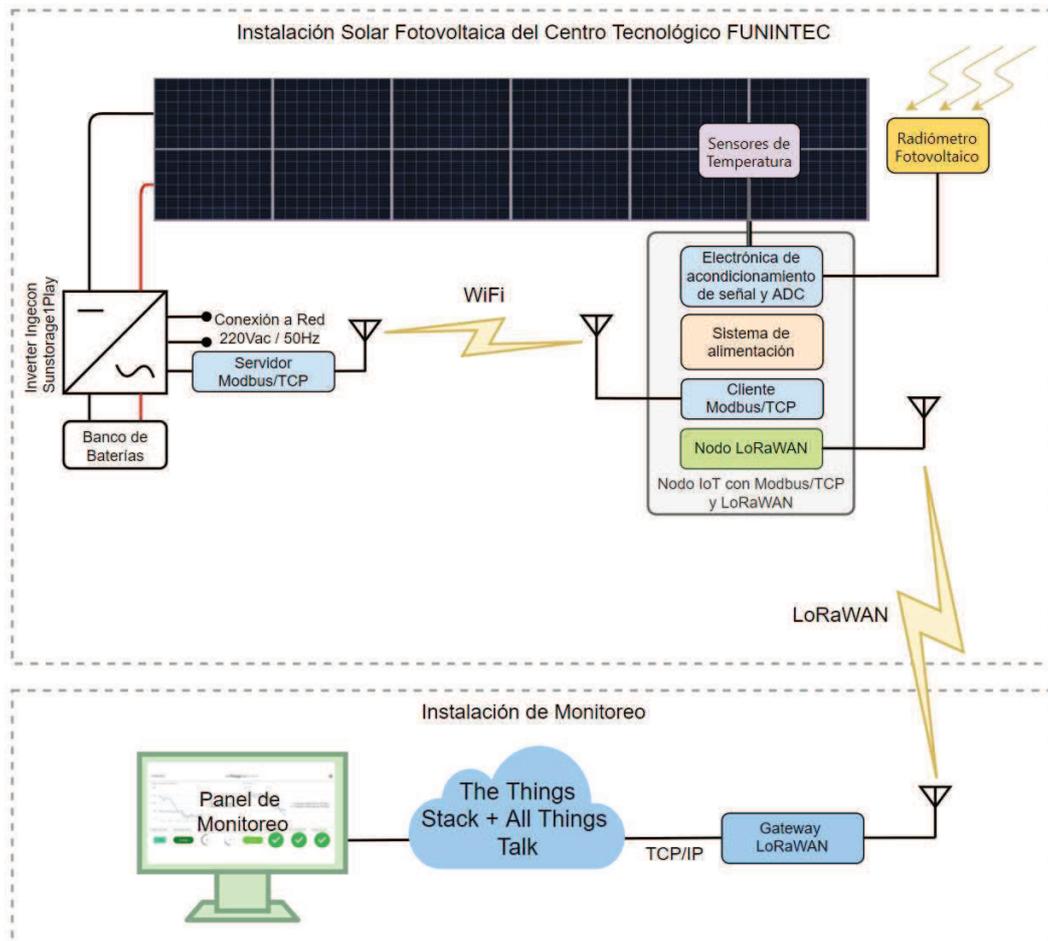


Figura 92 - Arquitectura del sistema de telemetría diseñado e implementado.

El elemento central es el nodo IoT encargado de la colección de mediciones de variables relevantes para la aplicación: radiación solar, temperatura de celda y potencia generada, también se encarga de la transmisión de datos hacia la red LoRaWAN.

En la Figura 93 se muestra la representación en bloques del nodo y los módulos periféricos que componen cada una de las etapas del sistema de monitoreo.

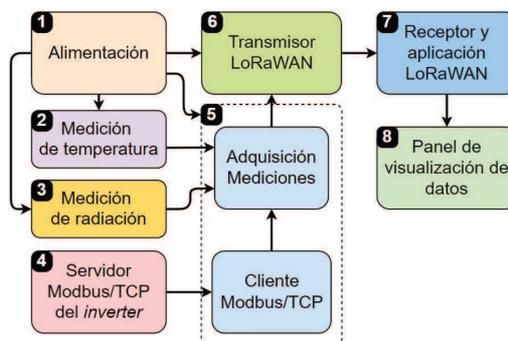


Figura 93 - Representación modular del sistema de telemetría.

Para el prototipo se optó por un diseño modular, de manera que si uno de los módulos presenta un malfuncionamiento o falla se pueda reemplazar fácilmente sin interferir con los demás componentes.

El módulo de alimentación está encargado de proporcionar la energía necesaria para el funcionamiento del sistema. Integran este módulo el circuito de recarga de baterías, regulación de tensión y un arreglo de paneles solares.

Los módulos de medición de temperatura y radiación proporcionan las mediciones de las variables ambientales y el conjunto servidor/cliente Modbus/TCP se emplea para obtener datos del *inverter* y de funcionamiento del sistema fotovoltaico.

El nodo de IoT construido tiene la capacidad de comunicarse con un *gateway* LoRa sobre una red LoRaWAN para el envío y recepción de datos a través de Internet. Los datos transmitidos se pueden visualizar en una aplicación de usuario accesible a través de un navegador web.

A continuación, se explican en detalle cada uno de los elementos y bloques del sistema.

### 3.1.1. Placa base

La placa base es el componente central que interconecta todos los módulos del nodo IoT. Para su elaboración se utilizó el *software* de diseño de diagramas y circuitos impresos EAGLE (descrito en la sección 2.2.10.3). En la Figura 94 se muestra el resultado del diseño.

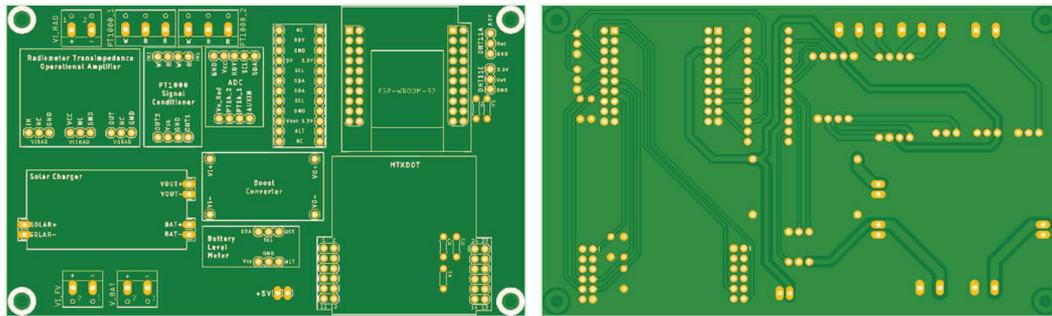


Figura 94 - Diseño de la placa base generado en EAGLE.

A partir del diseño se realizó la PCB por medio de la técnica de fotolitografía y grabado químico. Para proteger las pistas de cobre se elaboró una máscara antisoldante, luego se soldaron tiras de pines para los diferentes módulos, resistencias de *pull-down* para las E/S digitales y borneras para los componentes externos como alimentación y sensores, para esto se empleó estaño en rollo y cautín.

En la Figura 95 se muestra el resultado de la placa construida.

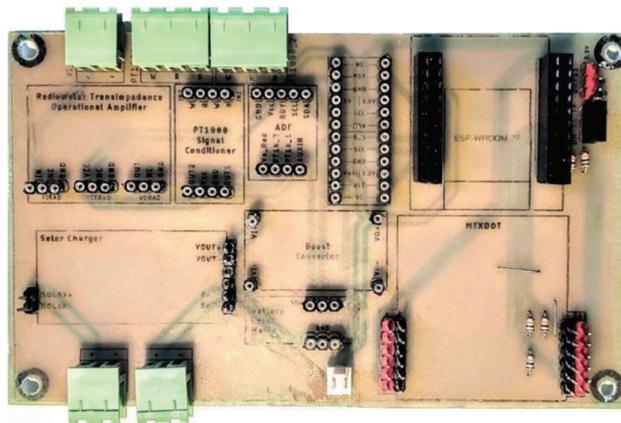


Figura 95 - Placa base construida.

### 3.1.2. Alimentación - Gestión y control de energía

En este ítem se presentan los criterios de selección que se utilizaron para los elementos que brindan autonomía y estabilidad de energía al nodo de telemetría. La Figura 96 representa el módulo de alimentación y cada uno de sus componentes.

Al inicio del proyecto se disponía de algunos componentes del sistema de alimentación (paneles solares y baterías), de modo que el consumo del nodo se evaluó con esos componentes y posteriormente se efectuó el cálculo para corroborar si el dimensionamiento era el adecuado.



Figura 96 - Diagrama en bloques del módulo de alimentación del sistema.

**Batería:** tiene la función de ser la principal fuente de energía del nodo IoT.

Con el objetivo de que el sistema opere continuamente se decidió incluir la conexión de un arreglo de paneles solares. En consecuencia, es esencial que el consumo de energía no exceda la generación de energía obtenida del arreglo en un período determinado ya que el módulo de batería actúa como un buffer entre el flujo de generación y el consumo de energía.

Por lo tanto, considerando un día como período de trabajo, se tiene que:

$$P_{gen}(t) - P_{con}(t) = \frac{dE_{bat}(t)}{dt}$$

Ecuación 12 - Diferencia entre potencia generada y consumida.

$$\int_0^T (P_{gen}(t) - P_{con}(t)) dt = E_{bat}(T)$$

Ecuación 13 - Integral de la diferencia entre diferencia de la potencia generada y la consumida.

$$\int_{T-24}^T (P_{gen}(t) - P_{con}(t)) dt = E_{bat}(T) \geq 0$$

Ecuación 14 - Energía almacenada por la batería.

Donde  $P_{gen}$  es la energía generada,  $P_{con}$  es la energía consumida y  $E_{bat}$  es la energía almacenada por la batería. Considerando un período de tiempo de 24 horas y trabajando con valores medios de los valores de energía en lugar de valores instantáneos, la integral se reduce a:

$$24 \times (P_{genmed} - P_{conmed}) = E_{bat}(T) \geq 0$$

Ecuación 15 - Energía almacenada por la batería utilizando valores medios de potencia.

Donde  $P_{genmed}$  y  $P_{conmed}$  corresponden a los valores medios de las energías de generación y consumo respectivamente.

Bajo estas condiciones, el tamaño de la batería debe ser capaz de almacenar el valor correspondiente a “ $24horas \times P_{genmed}$ ” watts por hora (Wh).

Así, para dimensionar la capacidad de la batería fue necesario hacer una aproximación del consumo del nodo considerando siempre la peor condición de diseño.

La Tabla 23 muestra el consumo del nodo de telemetría contemplando los distintos modos activos y el modo inactivo. Además, el porcentaje de tiempo por modo, el promedio de consumo, el consumo máximo, la potencia promedio, y también, la potencia máxima:

Modo de funcionamiento	% en modo	Consumo Promedio [mA]	Consumo Máximo [mA]	Potencia Promedio [W]	Potencia Máxima [W]
Wake Up	1,4	249	279	1,05	1,17
Wi-Fi activo	2,1	144	210	0,6	0,88
LoRa activo	2	53	53	0,22	0,22
Sleep	94,5	46	46	0,19	0,19

Tabla 23 - Detalle de consumo de energía del nodo de telemetría por hora.

Para establecer un consumo aproximado del nodo de telemetría se consideró el porcentaje de tiempo que el nodo se halla en cada modo, multiplicado por la potencia consumida por cada modo. Este nodo se encuentra la mayor parte del tiempo en modo *sleep*.

Por lo tanto, se estableció la siguiente aproximación:

$$P_{Nodo} = 0,014 \times P_{Wake\ Up} + 0,021 \times P_{Wi-Fi\ activo} + 0,02 \times P_{LoRa\ activo} + 0,945 \times P_{Sleep}$$

Ecuación 16 - Ecuación del consumo aproximado del nodo por hora.

De acuerdo con la Ecuación 16, se obtuvo el siguiente consumo aproximado:

$$P_{Nodo} = 0,014 \times 1,17\ W + 0,021 \times 0,88\ W + 0,02 \times 0,22\ W + 0,945 \times 0,19\ W = 0,2188\ W$$

Ecuación 17 - Consumo aproximado del nodo por hora.

Sobre la base del resultado obtenido se realizó una estimación de consumo en 24 horas:

$$P_{Nodo \times día} = 24 \times P_{Nodo}$$

Ecuación 18 - Ecuación de consumo total estimado.

$$P_{Nodo \times día} = 24 \times 0,2188\ W = 5,2512\ \frac{Wh}{día}$$

Ecuación 19 - Consumo diario esperado del nodo.

Donde  $P_{Nodo \times día}$  es el consumo de energía diario esperado del nodo. Por otro lado, con el objetivo de maximizar la vida útil de la batería, se seleccionó un factor mínimo de descarga DoD (*Depth of Discharge*) menor al 10% y un factor de estado de carga SoC (*State of Charge*) mayor al 90 %, los cuales deben ser evitados.

Finalmente, la elección de la batería dependerá de la Ecuación 20:

$$E_{bat} = \frac{100\%}{SoC - DoD} \times P_{Nodo \times día}$$

Ecuación 20 - Demanda de energía de la batería.

$$E_{bat} = \frac{100\%}{90\% - 10\%} \times 5,2512 \frac{Wh}{día} = 6,564 \frac{Wh}{día}$$

Ecuación 21 - Demanda de energía en Wh/día.

El cálculo de la autonomía del sistema se efectuó a partir del resultado del consumo de energía diario calculado por la Ecuación 21, y se tuvo en cuenta también la capacidad de las baterías y la tensión nominal de estas.

$$Autonomía [días] = \frac{V_{bat} \times Ah}{E_{bat}} = \frac{3,7 V \times 10.000 mAh}{6,564 Wh} = 5,637$$

Ecuación 22 - Cálculo de autonomía de las baterías, en días.

Según la Ecuación 22, la autonomía del sistema es del orden de 5,6 días. En la sección 4.2 se llevará a cabo un análisis de la autonomía real del sistema.

Sobre la base del resultado de la Ecuación 21 y para cubrir la demanda de energía, se seleccionó la batería que se muestra en la Figura 76, cuyas principales características se describieron en la sección 2.2.3.

Se utilizaron 2 baterías, la conexión se efectuó en paralelo, con el objetivo de aumentar la capacidad de Amperes-hora (Ah). Sin embargo, la tensión del conjunto de baterías conectado en paralelo seguirá siendo el mismo, mientras que la capacidad aumentará a 10.000 mAh, manteniéndose constante la tensión.

Para llevar a cabo esta conexión, el terminal negativo de una batería se conectó al terminal negativo de la otra batería, de igual modo se procedió con los terminales positivos, es decir, se conectó el terminal positivo de una batería al terminal positivo de la otra batería.

La configuración de baterías en paralelo ayuda a aumentar el tiempo que las baterías podrán respaldar un equipo, pero debido a la mayor capacidad de Amperes-hora resultante, el tiempo de carga también será mayor [91].

**Panel solar:** para dimensionar el arreglo de paneles necesario y abastecer la alimentación del nodo se consideró el promedio anual de HSP sobre la ciudad de Buenos Aires (sección 1.1.5).

En función a la información obtenida de los mapas de irradiación global sobre plano horizontal (Figura 97), y a partir del promedio anual de irradiación global sobre plano horizontal (GHI), se llegó a un valor promedio de  $GHI_{Prom}=4,17 \text{ kW/m}^2$  por día (promedio de los 12 meses del año), correspondiente a  $HSP_{Prom}=4,17 \text{ h}$  (considerando una irradiancia de  $1 \text{ kW/m}^2$ ). [92]

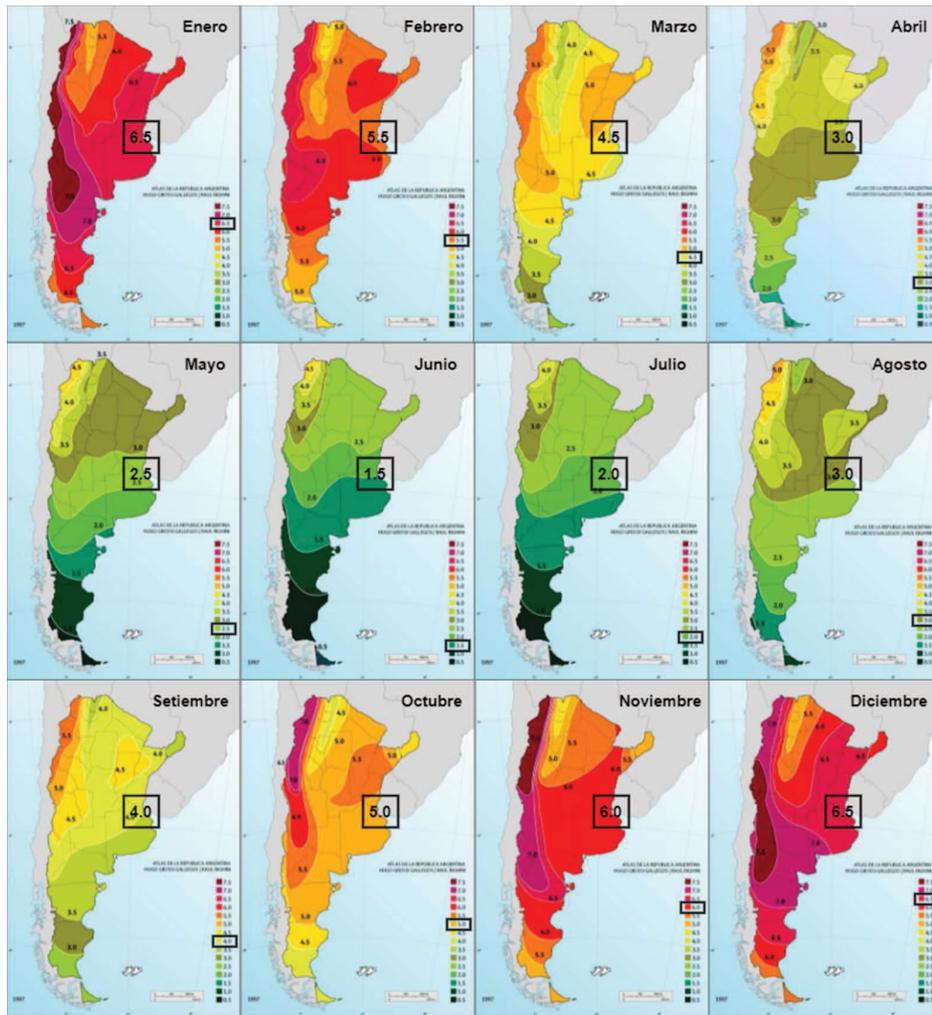


Figura 97 - Mapas de irradiación global sobre plano horizontal.

De acuerdo con la información provista por el Atlas Solar Mundial [93] en su versión online, se puede observar que para el día 26 de marzo de 2022 se obtuvieron los siguientes valores de referencia que contemplan: una  $GHI=4,814 \text{ kWh/m}^2$  por día y un valor para la irradiación inclinada global en ángulo óptimo  $GTI_{opta}=5,437 \text{ kWh/m}^2$  por día.

Datos del mapa		Por día ▾
<input checked="" type="checkbox"/>	Salida de potencia fotovoltaica específica	PVOUT específico <b>4.415</b> kWh/kWp por día ▾
	Irradiación normal directa	DNI <b>5.376</b> kWh/m <sup>2</sup> por día ▾
	Irradiación horizontal global	GHI <b>4.814</b> kWh/m <sup>2</sup> por día ▾
	Irradiación horizontal difusa	DIF <b>1.576</b> kWh/m <sup>2</sup> por día ▾
	Irradiación inclinada global en ángulo óptimo	GTI opta <b>5.437</b> kWh/m <sup>2</sup> por día ▾
	Inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos	OPTA <b>31/ 0</b> °
	Temperatura del aire	TEMPERATURA <b>17.0</b> °C ▾
	Elevación del terreno	ELE <b>23</b> metro ▾

Figura 98 - Datos del mapa Atlas Solar Mundial - Instalación solar FUNINTEC.

Si se establece un *ratio* entre ambos valores:

$$\text{Ratio}_{GHI-GTI_{opta}} = \frac{GHI}{GTI_{opta}}$$

Ecuación 23 - Ratio entre GHI y  $GTI_{opta}$ .

Se obtiene el valor de una constante:

$$\text{Ratio}_{GHI-GTI_{opta}} = \frac{4,814 \text{ kWh/m}^2 \times \text{día}}{5,437 \text{ kWh/m}^2 \times \text{día}} = 0,885$$

Ecuación 24 - Ratio entre GHI y  $GTI_{opta}$ .

Se eligió como condición el mes de julio (segundo en orden de peores condiciones), cuyo valor de irradiación horizontal global es  $GHI=2 \text{ Wh/m}^2 \times \text{día}$ . A partir del ratio obtenido en la Ecuación 24, cuyo valor es una constante igual a 0,885, se calculó el valor de la irradiación inclinada global en ángulo óptimo,  $GTI_{opta}=2,2599 \text{ Wh/m}^2 \times \text{día}$ , y este cálculo se puede observar en la Ecuación 25.

$$GTI_{opta} = \frac{GHI}{\text{Ratio}_{GHI-GTI_{opta}}} = \frac{2 \text{ kWh/m}^2 \times \text{día}}{0,885} = 2,2599 \text{ kWh/m}^2 \times \text{día}$$

Ecuación 25 – Valor de la irradiación inclinada global en ángulo óptimo estimado para el mes de julio.

Se tomó como referencia el valor de  $GTI_{opta}$  obtenido en la Ecuación 25, y considerando que una hora solar pico o HSP es equivalente a 1 kWh/m<sup>2</sup> (de acuerdo con lo descrito en la sección 1.1.5), quedó como valor elegido  $HSP_{Elegido}=2,25 \text{ h}$ .

Asimismo, se consideró la eficiencia de conversión del regulador DC/DC, cuyas especificaciones técnicas se describieron en la sección 2.2.7, que es del orden del 93 %.

Con esta consideración, el pico de potencia  $W_p$  entregado por el arreglo de paneles solares está dado por:

$$W_p = \frac{P_{\text{Nodo} \times \text{día}}}{HSP_{\text{Elegido}} \times Ef \cdot \text{Conversión-regulador}}$$

Ecuación 26 - Ecuación de potencia pico entregada por el arreglo de paneles solares.

$$W_p = \frac{5,2512 \text{ Wh}}{2,25 \text{ h} \times 0,93} = 2,51 \text{ W}$$

Ecuación 27 - Potencia pico entregada por el arreglo de paneles solares.

Donde  $P_{\text{Nodo} \times \text{día}}$  es el consumo de energía diario estimado por el nodo de telemetría y fue calculado en la Ecuación 18.

Sobre la base del resultado de la Ecuación 27, se determinó que la potencia pico deber ser igual o superior a 2,5 W, de modo que, si bien el arreglo de paneles utilizado genera menor potencia

que la requerida diariamente, la alimentación del nodo de telemetría no se vio afectada por ello.

Al inicio del proyecto se efectuó la compra de un panel solar que cubría los requerimientos de potencia necesarios para alimentar al nodo, al poco tiempo de instalado comenzó con fallas eléctricas y tuvo que descartarse. Ante la eventualidad mencionada, se decidió reemplazarlo con un arreglo de paneles que ya se disponía con anterioridad, como se mencionó al comienzo de esta sección. Sus principales características se describieron en la sección 2.2.2.

Para el diseño final deberá considerarse la utilización de un panel que contemple la potencia pico hallada de acuerdo con la Ecuación 27.

Ambos paneles se conectaron en paralelo, el terminal positivo de un panel se conectó al terminal positivo del otro panel y los terminales negativos de los dos paneles se conectaron juntos. Los cables positivos se conectaron a un conector positivo, y los cables negativos se conectaron al conector negativo.

El cableado de los paneles solares en paralelo permite que el amperaje aumente, pero la tensión se mantiene en 5,5 V y como cada panel posee un amperaje nominal de 100 mA, el valor se duplica hasta un valor de 200 mA, por el tipo de conexión.

**Módulo de protección de baterías:** se utiliza con el objetivo de cubrir los bloques de carga y protección de baterías necesarios para el diseño. Se utilizó un dispositivo comercial que se muestra en la Figura 77, cuyas principales especificaciones y características de funcionamiento, se describieron en la sección 2.2.4.

**Cargador de baterías:** se utiliza con el objetivo de mantener la carga en el conjunto de baterías y así poder alimentar al nodo de telemetría. Se utilizó un módulo comercial que se muestra en la Figura 78, cuyas principales especificaciones y características de funcionamiento, se describieron en la sección 2.2.5.

**Indicador de carga de baterías:** se utiliza con el objetivo de cuantificar el porcentaje de carga. A partir de la medición de tensión del conjunto de baterías, es posible saber cuánta carga le queda disponible. Para ello, se utilizó un módulo comercial que se muestra en la Figura 79, cuyas principales especificaciones y características de funcionamiento, se describieron en la sección 2.2.6.

**Convertor DC/DC step-up:** se utiliza con el fin de entregar una tensión de salida constante superior a la tensión de entrada frente a variaciones de la tensión de entrada o de carga. Para poder llevar a cabo esa regulación de tensión, se utilizó una fuente *Boost* como la que se muestra en la Figura 80, cuyas principales especificaciones y características de funcionamiento, se describieron en la sección 2.2.7.

### 3.1.3. Medición de temperatura de gabinete y paneles

Esta etapa tiene como objetivo, en primer lugar, el registro de la temperatura a la que se encuentra funcionando la electrónica del nodo y en segundo lugar el registro de una muestra de la temperatura a la que se encuentran sometidos los paneles fotovoltaicos de la instalación, como se muestra en la Figura 99.

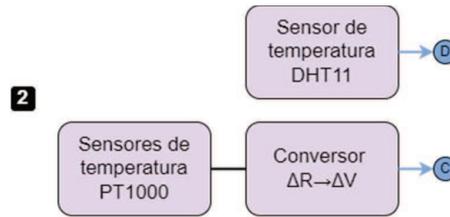


Figura 99 - Módulo de medición de temperatura.

En la sección 2.1.5 se explicaron las características del sensor de temperatura y humedad DHT11, que se emplea para el registro de la temperatura en el interior del gabinete con fines de diagnóstico.

La temperatura de un módulo solar fotovoltaico tiene un efecto directo sobre su capacidad para generar electricidad. Este impacto se refleja a través de los coeficientes de variación de  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  y  $P_{max}$  con la temperatura (sección 1.1.9), expresado como la disminución porcentual en la producción por cada aumento de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  en temperatura, a partir de los  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Los módulos solares fotovoltaicos se prueban para determinar su eficiencia a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que es la temperatura de la celda en condiciones de ensayo normalizadas (CEN). Con cualquier aumento de temperatura por encima de los  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  se deben considerar pérdidas de potencia.

El correcto funcionamiento de un módulo solar fotovoltaico está relacionado con el factor temperatura. Temperaturas mayores que las normalizadas pueden significar pérdidas en la potencia de salida máxima, de modo que cuantificar el valor de temperatura de los módulos permite analizar el *stress* térmico al que se ve sometida una instalación solar fotovoltaica.

Para monitorear la temperatura de los módulos se utilizaron 2 sensores de temperatura PT1000 cuyas especificaciones técnicas se detallaron en la sección 2.1.3.

El acondicionamiento de la señal se llevó a cabo mediante el agregado de un amplificador operacional OPA 2365, cuyas especificaciones técnicas se detallaron en la sección 2.1.4. Se trata de un amplificador de tipo dual, ya que dispone de 2 amplificadores operacionales. Cada uno de ellos se asoció a un sensor de temperatura PT1000.

Para el acondicionamiento de las señales se utilizaron 2 puentes de Wheatstone. Cada uno de ellos conforma un circuito eléctrico formado por 2 ramas de resistores donde se mide el diferencial de tensión en el medio de cada una de las ellas. En una de las ramas se colocaron resistores fijos de  $10\text{ k}\Omega$  ( $R1$ ) y de  $820\ \Omega$  ( $R3$ ), y en la otra se colocó un resistor fijo de  $10\text{ k}\Omega$  ( $R2$ ) y el sensor PT1000.

Cuando una PT1000 se instala a cierta distancia del transmisor, debido a la longitud de los cables de conexión, la resistencia de estos cambia a medida que fluctúa la temperatura ambiente. Las variaciones en la resistencia del cable introducirían un error en el transmisor. Para eliminar este problema, se utiliza una conexión de tres hilos.

Los cables de conexión ( $R_{cable1}$ ,  $R_{cable2}$ ,  $R_{cable3}$ ) tienen la misma longitud y, por lo tanto, la misma resistencia. La fuente de alimentación está conectada a un extremo de la PT1000 y a la parte superior del puente de Wheatstone. Se puede observar en la Figura 100, que la resistencia de la rama izquierda del puente de Wheatstone es  $R1 + R3 + R_{cable2}$ . La resistencia

de la rama derecha del puente es  $R2 + R_{cable3} + PT1000$ . Al ser iguales,  $R_{cable1} = R_{cable2}$ , las resistencias de los cables se cancelan y, por lo tanto, se elimina el efecto de los cables de conexión.

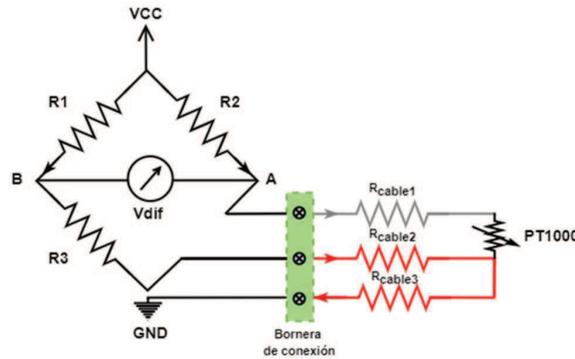


Figura 100 – Puente de Wheatstone y conexión a 3 hilos de la termorresistencia PT1000.

El valor del resistor de 820  $\Omega$  se eligió en función del rango de temperatura de medición. Se consideró un rango de temperatura que contempla valores negativos, ya que en los módulos solares fotovoltaicos se podrían llegar a medir temperaturas bajo cero.

El rango de valores de resistencias que se eligió para el diseño contempla valores desde los 820  $\Omega$  a 1,4 k $\Omega$ , en función del rango de operación del módulo solar fotovoltaico.

Para temperaturas negativas, se tomó como extremo inferior un valor de -45,5  $^{\circ}\text{C}$ , cuyo valor está asociado a un resistor comercial de 820  $\Omega$ , si bien se podría haber elegido un valor más cercano a temperaturas negativas en el rango de -10  $^{\circ}\text{C}$  y -1  $^{\circ}\text{C}$ , los valores de resistores comerciales no alcanzan a contemplar ese rango independientemente de la tolerancia de estos.

Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-70	723.30	719.30	715.30	711.30	707.30	703.30	699.30	695.30	691.30	687.30
-60	763.30	759.30	755.30	751.30	747.30	743.30	739.30	735.30	731.30	727.30
-50	803.10	799.10	795.10	791.10	787.20	783.20	779.20	775.20	771.20	767.30
-40	842.70	838.70	834.80	830.80	826.90	822.90	818.90	815.00	811.00	807.00
-30	882.20	878.30	874.30	870.40	866.40	862.50	858.50	854.60	850.60	846.70
-20	921.60	917.70	913.70	909.80	905.90	901.90	898.00	894.00	890.10	886.20
-10	960.90	956.90	953.00	949.10	945.20	941.20	937.30	933.40	929.50	925.50
0	1000.00	996.10	992.20	988.30	984.40	980.40	976.50	972.60	968.70	964.80
0	1000.00	1003.90	1007.80	1011.70	1015.60	1019.50	1023.40	1027.30	1031.20	1035.10
10	1039.00	1042.90	1046.80	1050.70	1054.60	1058.50	1062.40	1066.30	1070.20	1074.00
20	1077.90	1081.80	1085.70	1089.60	1093.50	1097.30	1101.20	1105.10	1109.00	1112.90
30	1116.70	1120.60	1124.50	1128.30	1132.20	1136.10	1140.00	1143.80	1147.70	1151.50
40	1155.40	1159.30	1163.10	1167.00	1170.80	1174.70	1178.60	1182.40	1186.30	1190.10
50	1194.00	1197.80	1201.70	1205.50	1209.40	1213.20	1217.10	1220.90	1224.70	1228.60
60	1232.40	1236.30	1240.10	1243.90	1247.80	1251.60	1255.40	1259.30	1263.10	1266.90
70	1270.80	1274.60	1278.40	1282.20	1286.10	1289.90	1293.70	1297.50	1301.30	1305.20
80	1309.00	1312.80	1316.60	1320.40	1324.20	1328.00	1331.80	1335.70	1339.50	1343.30
90	1347.10	1350.90	1354.70	1358.50	1362.30	1366.10	1369.90	1373.70	1377.50	1381.30
100	1385.10	1388.80	1392.60	1396.40	1400.20	1404.00	1407.80	1411.60	1415.40	1419.10

Figura 101 - Tabulación de resistencia vs temperatura para un sensor PT1000 y extremos seleccionados.

La Figura 101 se utilizó como herramienta de referencia para encontrar la relación entre un rango de temperatura y la resistencia de los sensores PT1000. De acuerdo con la figura mencionada, a cada valor de temperatura se lo puede relacionar con un valor de resistencia asociado. [94]

En el centro de cada puente de Wheatstone se colocaron 2 resistores, estos van acoplados a los 2 pines diferenciales del amplificador operacional y finalmente, a la salida se obtiene una tensión proporcional a 0 V para la resistencia de 820  $\Omega$  y a 5 V cuando la resistencia asciende

a 1,365 kΩ. Esta etapa es la de conversión de la señal, donde un valor de ΔR está asociado a un ΔV.

El valor de la tensión diferencial máxima es  $V_{dif}=162,24$  mV para el valor de 1,365 kΩ. Este valor amplificado a la salida es el que devuelve un valor de tensión máxima de 5 V.

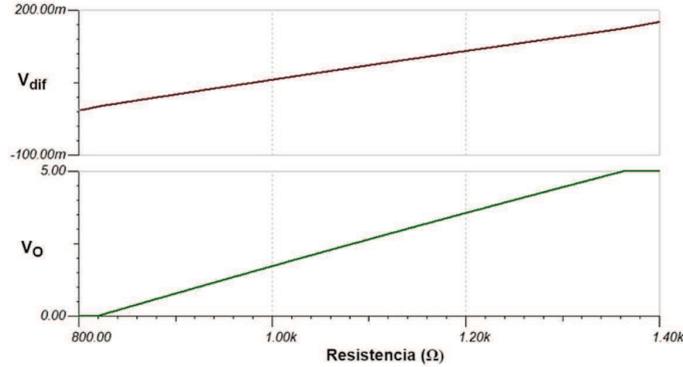


Figura 102 -  $V_o$  y  $V_{dif}$  en función de la resistencia.

Para el extremo superior de temperatura se tomó el valor de 94,5 °C, asociado al valor de resistencia de 1,365 kΩ.

Este mismo *setup* se llevó a cabo para cada uno de los sensores PT1000, por ello se utilizan 2 puentes de Wheatstone en una misma placa.

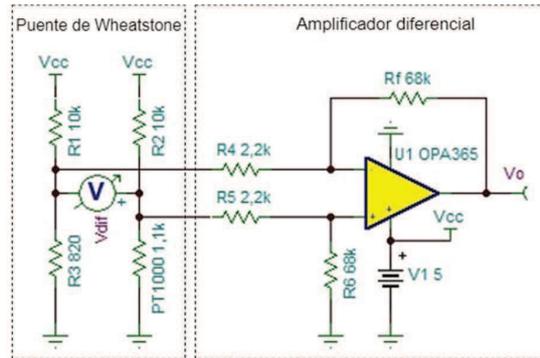


Figura 103 - Esquemático circuito de acondicionamiento de sensor PT1000.

A continuación, se detallan los pasos de diseño del circuito del amplificador diferencial:

1. Para hallar el valor de  $V_{O(Total)}$  se utilizó la siguiente ecuación para un amplificador diferencial:

$$V_{O(Total)} = V_{dif} \times \frac{R_2}{R_1}$$

Ecuación 28 -  $V_{O(Total)}$  a partir del teorema de superposición.

2. Para hallar el valor de la ganancia se utilizó la siguiente ecuación:

$$G = \frac{R_2}{R_1}$$

Ecuación 29 - Ganancia del circuito amplificador.

3. En función de los valores de  $V_o=5\text{ V}$  y  $V_{dif}=162,24\text{ mV}$ , se pudo definir un *ratio* de valores de resistencias que devuelven el valor de la ganancia.

$$G = \frac{V_o}{V_{dif}} = \frac{R_6}{R_4} = \frac{5\text{ V}}{162,24\text{ mV}} = 30,8185$$

Ecuación 30 - Valor de ganancia hallado para el circuito amplificador.

4. De acuerdo con el valor de  $G$  hallado y en función de valores comerciales de resistencias, se seleccionaron los siguientes valores:  $R_f=R_5=2,2\text{ k}\Omega$  y  $R_f=R_6=68\text{ k}\Omega$ .

Una vez concretado el diseño esquemático del módulo, se realizó el diseño de la placa de circuito impreso en EAGLE, cuyo resultado se muestra en la Figura 104.

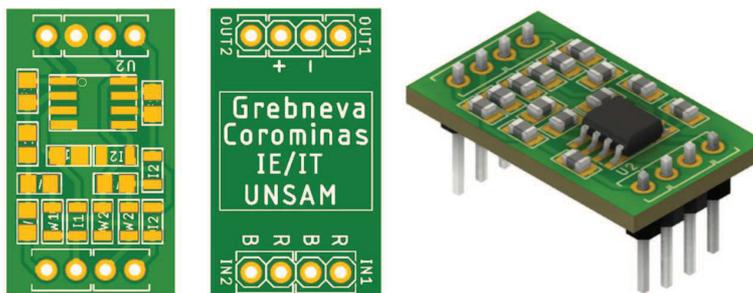


Figura 104 - Diseño de la placa generado en EAGLE.

Luego se realizó la placa de circuito impreso de la misma forma que la placa del ADC, como los componentes utilizados son de formato SMD la cara superior de la placa es la que lleva las pistas y la máscara antisoldante y en lugar de estaño en rollo y cautín se empleó pasta de estaño y soldadura de aire caliente. El resultado se muestra en la Figura 105.

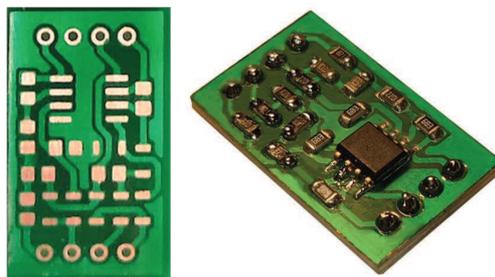


Figura 105 - Placa de acondicionamiento construida.

### 3.1.4. Amplificador de transresistencia para el radiómetro fotovoltaico

La radiación solar incidente en el plano del arreglo de paneles (POA) es uno de los principales parámetros a medir para analizar el desempeño de un sistema fotovoltaico. Para este proyecto se propuso implementar la medición de POA utilizando un sensor fotovoltaico fabricado por el DES por las características explicadas en el Capítulo 2 sección 2.1.1.

En lugar de utilizar el dispositivo en su versión original se diseñó un circuito de polarización activa para incluir una optimización en su desempeño.

El radiómetro del DES en su versión original se encuentra autopolarizado mediante una resistencia de  $3 \Omega$ . Esto permite que la celda fotovoltaica funcione en una zona muy cercana a la corriente de cortocircuito. En la Figura 106 es posible apreciar una curva IV característica de una celda fotovoltaica para diferentes niveles de irradiancia.

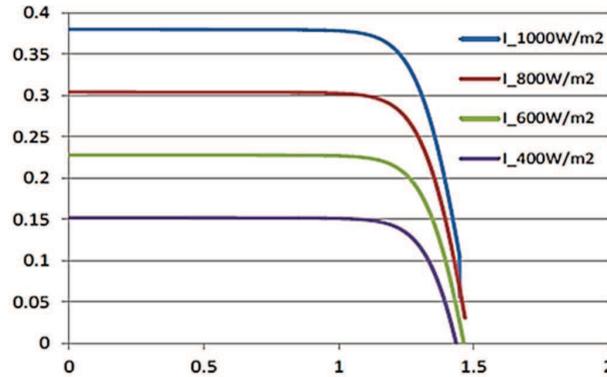


Figura 106 - Curva IV característica de una celda fotovoltaica con diferentes niveles de radiación incidente en su área activa.

Para implementar la mejora se utilizó un sensor encapsulado especialmente sin resistencia de polarización. El sensor en estas condiciones puede representarse con el circuito equivalente de la Figura 13 de la sección 1.1.7.

Para la celda fabricada en el DES los valores de  $R_p$  y  $R_s$  son conocidos ya que se pueden estimar mediante la pendiente de la curva IV del sensor en sus dos zonas características. [95]

En la Figura 107 podemos observar las pendientes en la zona 1 y la zona 2 cuyos valores representan las inversas de las resistencias  $R_s$  y  $R_p$ , respectivamente. Estas curvas de caracterización permiten desprestigiar ambos valores en el circuito equivalente debido a que la pendiente en la zona 2 ( $R_p$ ) tiende a un valor muy bajo y la pendiente en la zona 1 ( $R_s$ ), tiende a valores altos.

En cambio, para la capacidad  $C_p$ , se puede aproximar este valor con el valor típico de la capacidad de difusión de una juntura de Si cuyo valor es de  $4 \text{ pF}$ .

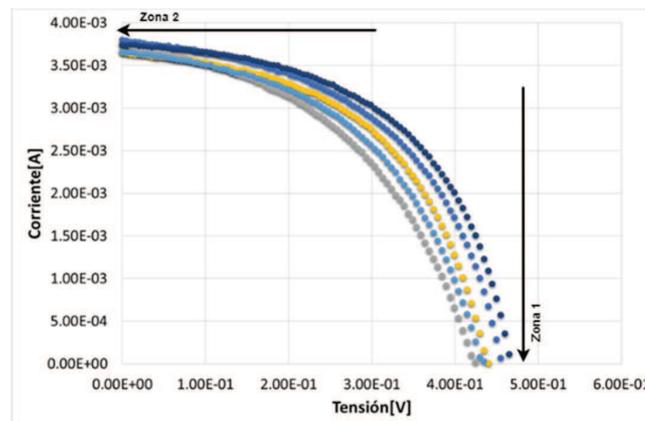


Figura 107 - Curvas IV de un conjunto de celdas solares fabricadas en el DES. Las mediciones fueron realizadas con una fuente AM1.5 (Capítulo 1, sección 1.1.3)

Luego de analizar el comportamiento de las celdas es posible diseñar un amplificador de transresistencia basado en un amplificador operacional, cuya impedancia de entrada tiende a cero debido a la tierra virtual en la entrada inversora del dispositivo. Esta configuración es deseable para que la celda funcione en la zona más cercana posible al cortocircuito.

Los amplificadores de transresistencia son dispositivos que permiten tomar una señal de corriente y transformarla en una señal de tensión, preservando la integridad de sus propiedades.

Estos amplificadores o conversores I-V constituyen un bloque fundamental en cualquier sistema de medición de luz. En el amplificador de transresistencia se transforma la corriente generada por una celda solar fotovoltaica, cuando sobre él incide la luz, en una tensión proporcional a esta [88].

Otra de las ventajas de los amplificadores de transresistencia, es la posibilidad de configurar la amplitud de la señal de salida mediante la selección de una  $R_f$  tal que su máxima excursión no exceda los límites de la siguiente etapa de digitalización (conversión ADC).

A partir de estas consideraciones se procedió a seleccionar un amplificador teniendo en cuenta los parámetros de corriente de polarización ( $I_{BIAS}$ ), corriente de alimentación ( $I_s$ ) y variación con la temperatura ( $TC_{vos}$ ).

Luego de una búsqueda local para evitar la importación de componentes con su consecuente demora en los tiempos de desarrollo se consiguieron dos modelos de amplificador. A continuación, se muestra una tabla comparativa de ambos.

Modelo	Máx $I_s$ [mA]	Typ $I_{BIAS}$ / Máx $I_{BIAS}$	GBW [MHz]	Máx $TC_{vos}$ [ $\mu V/^\circ C$ ]
OPA381	1,1	3,5 [pA] / $\pm 50$ [pA]	18	20
LMP7721	1,5	20 [fA]	15	-4

Tabla 24 - Tabla comparativa de los amplificadores disponibles que satisfacían los requisitos para el circuito de transresistencia.

Ambos dispositivos soportaban alimentación a través de una fuente simple en el rango de 1,8 V y 5,5 V. La principal diferencia fue la  $I_{BIAS}$ . El amplificador LMP7721 incluye tecnología de cancelación de  $I_{BIAS}$  lo cual mejora notablemente su desempeño en comparación con el OPA381.

Además, el encapsulado disponible para el OPA381 era del tipo DFN-8 que dificultaba notablemente la etapa de soldadura manual en comparación con el encapsulado SOIC-8 del LMP7721.

Para diseñar este circuito amplificador de transresistencia, se utilizó el amplificador operacional LMP7721, cuyas especificaciones técnicas se detallaron en la sección 2.1.2.

Adicionalmente, se empleó un filtro pasa bajos de 10 kHz a la salida del circuito amplificador para limitar el ruido de alta frecuencia que pudiera venir adicionado a la señal de corriente de entrada [96].

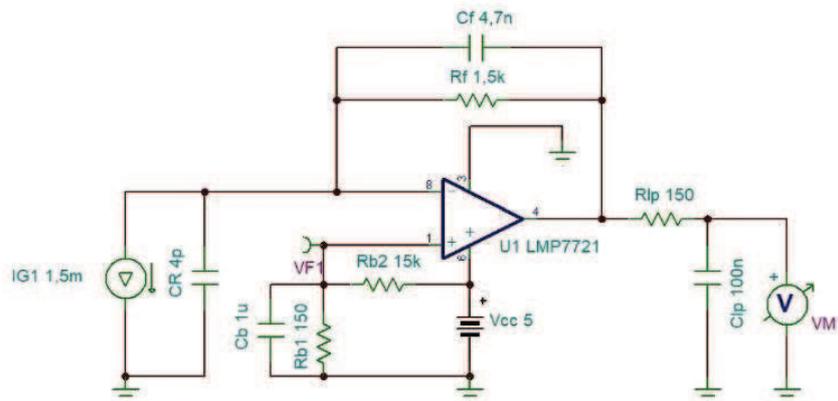


Figura 108 - Esquemático del amplificador de transresistencia.

A continuación, se detallan los pasos de diseño del circuito:

1. Para la elección del valor de resistencia teórica del resistor  $R_f$ , se utilizaron los siguientes valores de tensión y corriente:
  - $V_{CC}=5$  V (tensión de alimentación)
  - $V_p=0,05$  V (tensión de polarización del amplificador operacional)
  - $I_{rsc}=3$  mA (corriente de corto circuito del radiómetro)

$$R_f = \frac{V_{CC} - V_p}{I_{rsc}} = \frac{5 \text{ V} - 0,05 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 1,650 \text{ k}\Omega$$

Ecuación 31 - Valor teórico para  $R_f$ .

El valor comercial obtenido más próximo al hallado teóricamente corresponde a  $R_f=1,5$  k $\Omega$ .

2. Para hallar el valor de  $C_f$ , se utilizó una frecuencia  $f_p=10$  kHz y un valor de  $R_f=1,5$  k $\Omega$ .

$$C_f \leq \frac{1}{2\pi \times R_f \times f_p} = \frac{1}{2\pi \times 1,5 \text{ k}\Omega \times 10 \text{ kHz}} \leq 10,61 \text{ nF}$$

Ecuación 32 - Valor teórico para  $C_f$ .

El valor comercial más próximo al hallado teóricamente que fue posible conseguir en comercios de electrónica, corresponde a  $C_f=4,7$  nF.

3. Para la elección de los valores teóricos de  $R_{b2}$  y  $R_{b3}$ , se utilizaron los siguientes valores de tensión y corriente:
  - $V_{CC}=5$  V (tensión de alimentación)
  - $V_{ref}=0,05$  V (tensión de polarización del amplificador operacional)
  - $R_{b3}$  (de valor proporcional a  $R_{b2}$ )

$$R_{b2} = \frac{V_{CC} - V_p}{V_p} = \frac{5 \text{ V} - 0,05 \text{ V}}{0,05 \text{ V}} \times R_{b3} = 99 \times R_{b3}$$

Ecuación 33 - Valor teórico para  $R_{b2}$ .

Los valores comerciales obtenidos más próximos (que cumplieran la relación) a los hallados teóricamente corresponden a valores de resistencias:  $R_{b2}=15\text{ k}\Omega$  y  $R_{b3}=150\text{ k}\Omega$ .

4. Se seleccionó  $C_b=1\text{ }\mu\text{F}$  para filtrar la tensión  $V_{ref}$ . La frecuencia de corte resultante es:

$$f_p = \frac{1}{2\pi \times (R_{b2} \parallel R_{b3}) \times C_b} = \frac{1}{2\pi \times 13,636\text{ k}\Omega \times 1\text{ }\mu\text{F}} = 11,67\text{ Hz}$$

Ecuación 34 - Valor de frecuencia de corte para filtrar  $V_{ref}$ .

5. El valor del filtro pasa bajos se seleccionó para llegar a un valor de frecuencia de corte del orden de 10 kHz, para ello se optó por un resistor cuyo valor de resistencia es  $R_{lp}=150\text{ }\Omega$  y un capacitor cuyo valor de capacitancia es  $C_{lp}=100\text{ nF}$ .

$$f_{lp} = \frac{1}{2\pi \times R_{lp} \times C_{lp}} = \frac{1}{2\pi \times 150\text{ }\Omega \times 100\text{ nF}} = 10,610\text{ kHz}$$

Ecuación 35 - Frecuencia de corte del filtro pasa bajos.

6. El valor  $C_R=4\text{ pF}$  propia de la celda (capacidad de difusión de una juntura de Si) e  $I_R=3\text{ mA}$  es la corriente de cortocircuito máxima de la celda solar.

Los resultados de la simulación del circuito se presentan en la Figura 109. Se observa la respuesta lineal en el rango de los 0 a 3,5 mA en donde el circuito comienza a saturar.

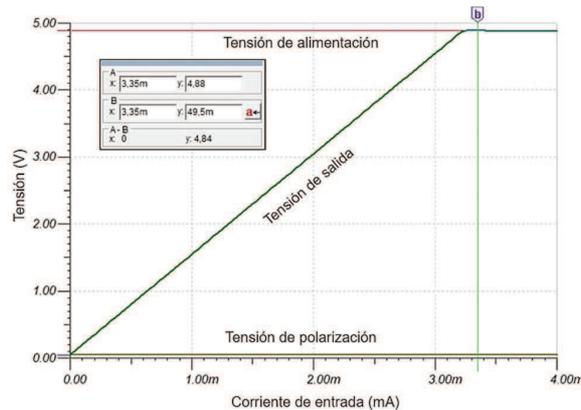


Figura 109 - Características de transferencia en corriente continua del amplificador de transresistencia.

Finalmente, la entrada del amplificador puede variar entre los 0 y 3,5 mA cuya salida corresponde a 0,05 y 5 V en donde se mantiene su linealidad.

En la Figura 110 se representa el módulo de medición conformado por el radiómetro fotovoltaico, junto con el circuito amplificador de transresistencia descrito anteriormente.

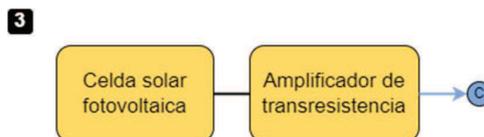


Figura 110 - Módulo de medición de irradiancia.

A partir del esquemático diseñado para el amplificador, se realizó el diseño de la placa de circuito impreso en el software EAGLE, cuyo resultado se muestra en la Figura 111.

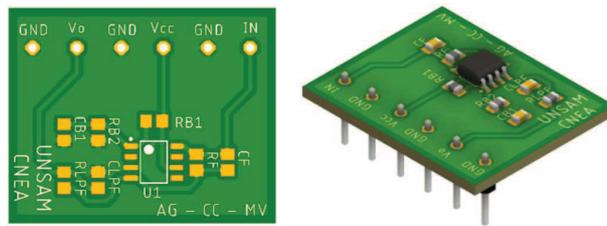


Figura 111 - Diseño de la placa generado en EAGLE.

Luego se realizó la placa de circuito impreso de la misma forma que la placa del ADC y del acondicionador de la señal de las termorresistencias PT1000. El resultado se muestra en la Figura 112.

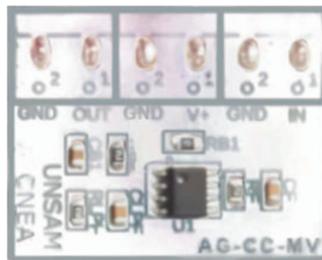


Figura 112 - Placa del amplificador de transresistencia terminada.

La particularidad de esta placa es que fue la primera realizada en toda la serie. Con ella se puso en práctica el método de fotolitografía, máscara antisoldante con curado por luz UV y soldadura de componentes SMD con pasta de estaño, ya que no se tenía experiencia en el desarrollo de placas de circuito impreso con estos métodos anteriormente.

En la Figura 113 se muestran las etapas sucesivas, desde el grabado de la película fotosensible con luz UV, luego el grabado químico con percloruro férrico y finalmente la máscara antisoldante y la serigrafía con pintura sensible a la luz UV.

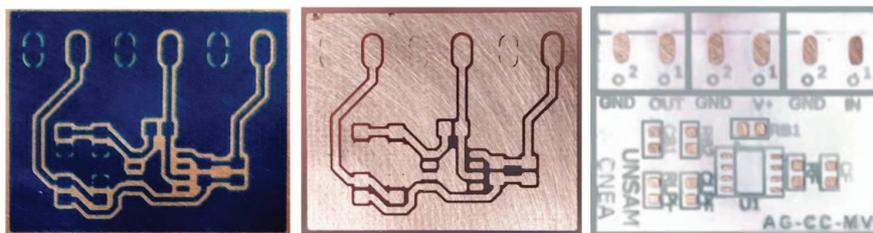


Figura 113 - Etapas de fabricación de la PCB del amplificador de transresistencia.

Además, esta placa se diseñó inicialmente con borneras en lugar de pines (Figura 114) para permitir la calibración contra un piranómetro (como se explica en el anexo 3 – sección 1.1), luego para el montaje en la placa base se desoldaron las borneras y se colocaron tiras de pines.



Figura 114 - Placa del amplificador de transresistencia con borneras para la calibración.

### 3.1.5. Comunicación Modbus/TCP

En la sección 2.1.5 se explicó el funcionamiento general del protocolo Modbus. Para este proyecto se optó por utilizar la variante Modbus/TCP. En la Figura 115 se puede observar la representación simplificada del módulo.

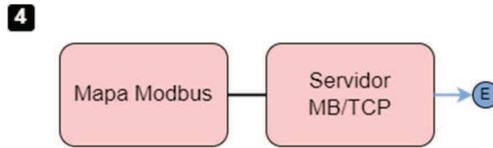


Figura 115 - Módulo Modbus/TCP.

A continuación, se explican en detalle las consideraciones tomadas para la elección del protocolo, así como las interfaces de comunicaciones y los datos considerados relevantes para la aplicación.

#### 3.1.5.1. Comunicación con el *inverter*

El *inverter* Sun Storage 1Play del sistema fotovoltaico de FUNINTEC lleva instalada una placa de comunicaciones INGECON SUN® EMS Board [97] que posee varias interfaces de comunicación y, entre otras funciones, actúa como *Access Point* Wi-Fi.

Como se puede observar en la Figura 116, la placa está equipada con tres interfaces de comunicaciones compatibles con el protocolo Modbus en sus variantes. La primera interfaz es el puerto Ethernet (F), la segunda es la placa de comunicaciones Wi-Fi (A), ambas compatibles con Modbus/TCP, y la tercera es el puerto serie RS485 (B), compatible con Modbus RTU [98].

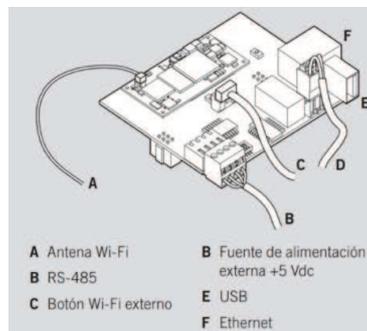


Figura 116 - Placa de comunicaciones INGECON SUN® EMS Board.

Luego de inspeccionar el *inverter* Sun Storage 1Play instalado en el Centro Tecnológico FUNINTEC durante la fase de planificación, se descartó la posibilidad de uso del puerto Ethernet ya que estaba siendo utilizado por personal de la UNSAM y la CNEA para su propia aplicación para el monitoreo remoto de la instalación eléctrica, gestionada por el fabricante del *inverter*, Ingeteam, que incluye la solución en la nube *Ingecon Sun Monitor* (Figura 117) y el software *Ingecon Sun Manager* (Figura 118).

El *Ingecon Sun Monitor* comprende un panel de monitoreo web con un formato preestablecido en donde la potencia fotovoltaica de la instalación se muestra como un dato instantáneo pero no se incluye en el gráfico de tendencia.



Figura 117 - Panel de monitoreo web *Ingecon Sun Monitor*.

El software *Ingecon Sun Manager* permite conectarse con el servidor Modbus RTU del *inverter* ya sea en la red local o a través de internet y configurar parámetros de una flota de inversores o extraer los datos almacenados de los últimos 7 días para todas las variables con un período de 5 minutos entre muestras, aunque no es una herramienta de monitoreo en tiempo real a diferencia del nodo IoT implementado en el marco del proyecto.

Se efectuaron pruebas de comunicación a través de la interfaz RS-485, aunque también se descartaron porque la comunicación directa con la interfaz Modbus RTU interfiere con la comunicación que se realiza a través del Servidor Modbus/TCP, esto producía pérdida de datos en la mayoría de los casos y además, era necesario tener un dispositivo adicional en la cercanía del *inverter* para poder leer las mediciones y transmitir las al nodo IoT.

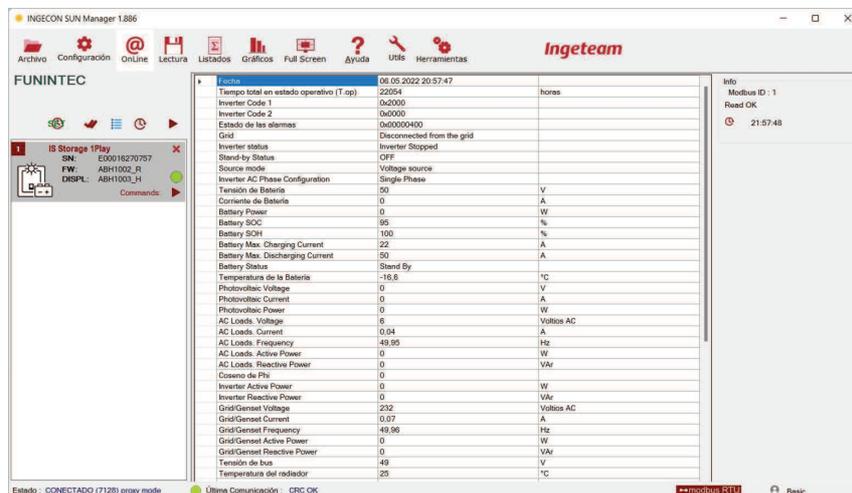


Figura 118 - Interfaz del software *Ingecon Sun Manager*.

Luego se comprobó que la red Wi-Fi que genera la placa de comunicaciones del *inverter* permitía el acceso al servidor Modbus embebido y se decidió aprovechar esta capacidad y realizar una comunicación inalámbrica entre el nodo IoT y el *inverter* para obtener el estado y el dato de la potencia fotovoltaica generada por la instalación.

Por la distancia entre la ubicación del *inverter* y el nodo de telemetría (mayor a 10 metros en línea de visión), fue necesario agregar una antena Wi-Fi [99] a la placa de comunicación EMS a fin de obtener una mejor propagación de la señal entre ambas ubicaciones.

Para esto se utilizó una antena Wi-Fi flexible de 100 mm de 2,4 GHz con conector uFL, con una ganancia de 4 dBi, una impedancia de  $50 \Omega$ , ideal para el uso en receptores/transmisores de 2,4 GHz - 2,5 GHz como lo es la antena integrada del módulo Wi-Fi (ESP32) que forma parte del nodo de telemetría y cuyas especificaciones técnicas se detallaron en la sección 2.1.6.

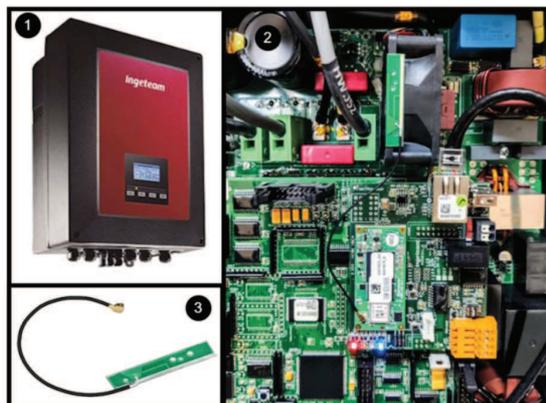


Figura 119 - Placa de comunicación EMS del *inverter* con la antena Wi-Fi agregada.

La Figura 119 muestra el *inverter* Sun Storage 1 Play (1), el interior del *inverter* donde es posible observar la placa de comunicaciones junto con la antena Wi-Fi (2) agregada y la antena Wi-Fi con su *pig tail* (3).

### 3.1.5.2. Servidor Modbus/TCP

Esta etapa está implementada en el *inverter*. Las interfaces Modbus implementadas en la tarjeta de comunicación del *inverter* Sun Storage 1Play cumplen con las siguientes tareas:

- Consulta remota de los valores de medición
- Especificación de valores de consigna para el control

Las interfaces Modbus se diferencian por su función en:

- Servidor de Modbus
- Cliente de Modbus

La función del servidor de Modbus está disponible a través de la interfaz Ethernet y Wi-Fi (Modbus TCP) del *inverter*. El servidor de Modbus puede utilizarse para el acceso externo a los datos (por ejemplo, mediante sistemas SCADA o el módulo de adquisición y Wi-Fi ESP32).

La función del cliente de Modbus está disponible a través de la interfaz Ethernet (Modbus TCP) y la interfaz RS485 (Modbus RTU). El cliente de Modbus puede utilizarse para la comunicación con equipos Modbus conectados (por ejemplo, otros inversores, contadores de energía o sistemas de E/S externas).

El servidor Modbus/TCP espera la solicitud de información y posteriormente, devuelve esa información solicitada, como se vio en la sección 2.1.5.

Esto se ve de manera más detallada en la Figura 120: la tarjeta de comunicación del *inverter* escucha las solicitudes generadas por el módulo Wi-Fi (ESP32) en el puerto 502 (puerto estándar Modbus TCP). Cada solicitud (1) se convierte a Modbus RTU y se envía a través de

la interfaz serie (2). Después, la respuesta del equipo (3) es convertida de Modbus RTU a Modbus TCP, y finalmente es enviada al cliente ESP32 (4).

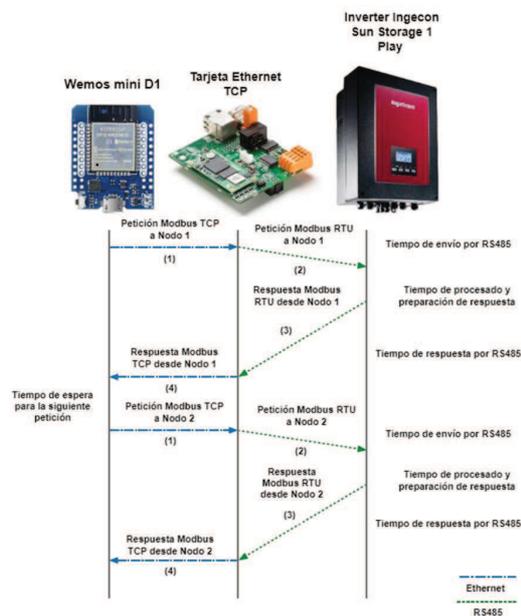


Figura 120 - Comunicación estándar en una petición Modbus TCP desde un módulo Wemos mini D1.

Toda la información de diagnóstico, mediciones eléctricas, número de serie del equipo y otros parámetros del *inverter* Sun Storage 1Play [100], se mapean en los registros de entrada (3xxxx) y el acceso a los mismos se realiza con la función 0x04 (*read input registers*) según se detalla en la Tabla 2 de la sección 2.1.5.6.3.

El módulo de adquisición de datos y comunicación Wi-Fi (ESP32) se conecta a la red Wi-Fi del *inverter*. Una vez conectado a esa red le envía comandos de lectura de *input registers* y apunta al registro donde están mapeados los datos de interés.

En la Figura 121 se muestra un extracto del mapa Modbus del *inverter*, donde se resaltan los datos que lee el nodo IoT para mostrar en el panel de monitoreo [100].

Modbus Register	Description	Type	Since FW Ver.
30001	Current Date. Year	UINT16	_A
30002	Current Date. Month	UINT16	_A
30003	Current Date. Day	UINT16	_A
30004	Current Date. Hour	UINT16	_A
30005	Current Date. Minute	UINT16	_A
30006	Current Date. Second	UINT16	_A
30007	Total operation time [h]	UINT32	_A
30008			
30009	Inverter Code 1 [Hex]	UINT16	_A
30010	Inverter Code 2 [Hex]	UINT16	_A
30011	Inverter Alarms [Hex]	UINT32	_A
30012			
30013	Inverter Status <sup>(1)</sup>	UINT16	_W
30014	Inverter AC Phase Configuration <sup>(2)</sup>	UINT16	_A
30025	PV. Current [A x100]	UINT16	_A
30026	PV. Power [W]	UINT16	_A
30027	AC Loads. Voltage [V]	UINT16	_A
30028	AC Loads. Current [A x100]	UINT16	_A
30029	AC Loads. Frequency [Hz x100]	UINT16	_A
30030	AC Loads. Active Power [W]	INT16	_A
30031	AC Loads. Reactive Power <sup>(6)</sup> [VAR]	INT16	_A
30032	Inverter. Phi Cosine <sup>(9)</sup> [x1000]	INT16	_A
30033	Inverter. Active Power [W]	INT16	_A

Figura 121 - Extracto del mapa de registros del *inverter*.

En primer lugar, se lee el registro de estado del *inverter* y a partir de los estados que se muestran en la tabla de la Figura 122 se crea una tabla resumida que luego se exhibe en el panel de visualización para poder identificar fácilmente cuándo la instalación está funcionando.

0: Internal Bypass Opened 1: Internal Bypass Closed	0: Not emergency charge 1: Emergency charge	0: Not waiting to connect to the grid 1: Waiting to connect to the grid	0: Voltage source 1: Current source	0: Stand-by Off 1: Stand-by On	0: Inverter Stopped 1: Inverter Running	0: Disconnected from the grid 1: Connected to the grid	(*) Inverter Status
Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	
0	0	0	0	0	0	0	Stopped
1	0	0	0	0	0	0	Internal Bypass Closed
0	1	0	0	0	0	0	Emergency Charge from PV input
0	0	0	0	0	1	0	Off-grid
0	0	1	0	0	1	0	Waiting to connect
0	0	0	1	0	1	1	On-grid
0	0	0	1	1	1	1	On-grid (standby)
0	1	0	1	0	1	1	Emergency Charge from AC input

Figura 122 - Detalle del registro de estados del *inverter*.

Luego se lee el registro de la potencia fotovoltaica (potencia generada por los paneles) y se muestra en el panel de visualización en un gráfico de tendencia para poder contrastar de forma visual cuánta potencia se está generando a partir de la irradiancia.

No se consideró tomar otros datos por la limitación con la que se cuenta para enviar ciertas cantidades de datos hacia TTS a través de la red LoRa, de acuerdo con la política de uso justo como se explicó en la sección 2.1.8.2.

### 3.1.6. Módulo de adquisición/mediciones

La etapa de adquisición tiene como fin la lectura de las mediciones con el dispositivo ESP32 (que a su vez actúa como módulo de comunicación Wi-Fi) de los sensores de temperatura de los paneles y el radiómetro a través del módulo ADC ADS1115 que se detalló en la sección 2.1.7 y el medidor de carga de la batería MAX 17043, cuyas especificaciones técnicas se detallaron en la sección 2.2.6. Esto se hace a través del protocolo I<sup>2</sup>C y el correspondiente bus, como se observa en la Figura 123.

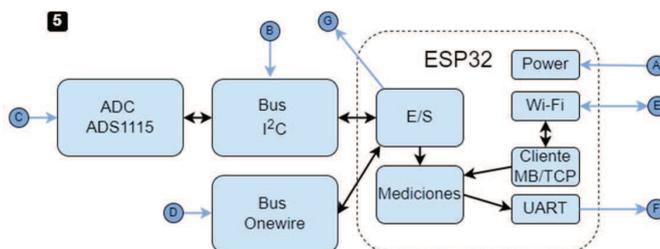


Figura 123 - Módulo de adquisición y mediciones.

El módulo ADS1115 (esclavo) funciona con alimentación de 5 V y los pines del puerto I<sup>2</sup>C también funcionan entre los niveles lógicos establecidos entre 0 y 5 V, por lo tanto, se deben conectar a la misma tensión mediante las respectivas resistencias de *pull-up*.

Sin embargo, el módulo ESP32, que actúa como maestro, y todos sus pines de E/S funcionan con alimentación de 3,3 V que no es suficiente para excitar correctamente los pines del puerto I<sup>2</sup>C del ADC. Además, conectar los pines del puerto I<sup>2</sup>C del ESP32 a la tensión de funcionamiento bus del ADC podría dañar el puerto de E/S del procesador, por eso se requiere un convertor de niveles de tensión de modo que ambos puedan comunicarse correctamente utilizando diferentes tensiones de bus.

De mismo modo, el módulo MAX 17043 (esclavo) funciona con el nivel de tensión proporcionado por la batería (en función de su carga) que puede variar entre 3,7 y 4,2 V, por lo tanto, requiere un convertor de tensión adicional para poder comunicarse correctamente con el ESP32.

Las especificaciones técnicas del módulo convertor lógico bidireccional BSS138 utilizado en ambos casos se detallaron en la sección 2.2.1.

En la Figura 124 se muestra con mayor detalle cómo se interconectan los tres dispositivos en el bus I<sup>2</sup>C.

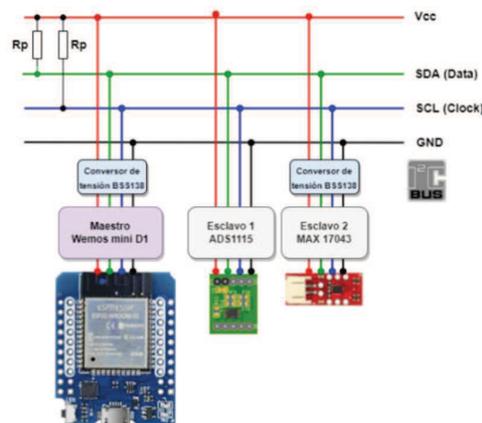


Figura 124 - Interconexión bus I<sup>2</sup>C.

### 3.1.7. Módulo transmisor LoRaWAN

En la *Figura 125* se muestra la representación del módulo, que se basa en el dispositivo Multitech xDot, el cual recibe los datos de las mediciones (irradiancia, temperatura, potencia, etc) del módulo de adquisición y comunicación Wi-Fi (ESP32) y los retransmite hacia la red LoRaWAN.

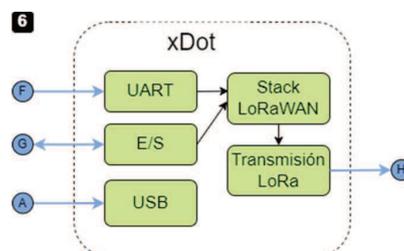


Figura 125 - Transmisor LoRaWAN - xDot.

Para desarrollar el firmware de este módulo se utilizó el compilador online Mbed (que se explica en la sección 2.2.10.1) con las bibliotecas y ejemplos provistos por la firma Multitech.

El programa se desarrolló a partir del ejemplo que utiliza OTAA (*Over The Air Activation*) para el inicio de sesión (también denominado *join*) en la red LoRaWAN de *The Things Network*, e incluye preconfigurada toda la capa de abstracción para el manejo del *stack* LoRaWAN. En la sección 3.3.3 se explica en mayor detalle el desarrollo del firmware para este módulo.

Para el *join* se requieren dos llaves de acceso a la red, *DevEUI* (identificador único del dispositivo, definido por el fabricante) y *NetworkKey* (o clave única de red, también especificada como *NwksKey* en TTN) ambas claves deben coincidir tanto en el módulo LoRa (xDot) como en TTN para la correcta vinculación.

Cuando el módulo LoRa (xDot) se inicia por primera vez, intenta hacer un *join* (o inicio de sesión) en la red LoRaWAN, una vez efectuado el *join* toma las mediciones desde el módulo de adquisición (ESP32) y efectúa el envío del paquete de datos (también llamado *payload*) al servidor de aplicación dentro de TTN.

Al finalizar el envío el dispositivo guarda los datos de la sesión en memoria para evitar hacer el *join* nuevamente y entra en modo de bajo consumo por 3 minutos, luego pasa a modo activo, vuelve a tomar datos y los envía y vuelve al modo de bajo consumo por otros 3 minutos, efectuando este proceso de manera cíclica.

### 3.1.8. Vinculación Gateway - The Things Stack

El envío de datos desde el módulo módulo LoRa (xDot) al servidor de aplicación de TTS se hace mediante un *gateway*, cuyas especificaciones técnicas se describieron en la Tabla 22.

El *gateway* tiene un *firmware* predefinido para el hardware utilizado en este proyecto (Raspberry Pi y módulo RAK2245) que se puede descargar desde la página web del proveedor y grabar en una tarjeta microSD que luego se instala en la placa Raspberry Pi.

Esta imagen trae por defecto varias opciones de configuración que permiten implementar un *gateway* totalmente autónomo, o bien para efectuar la vinculación del mismo con el servidor de aplicación de *The Things Stack*.

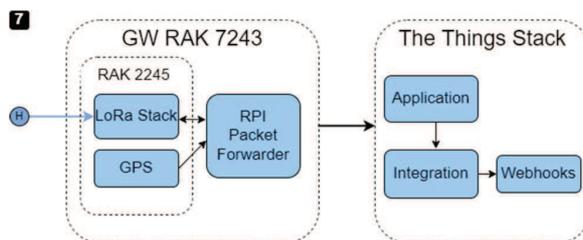


Figura 126 - Gateway + TTS.

Para la configuración de *gateway* se emplea un *Access Point* por defecto que se activa en el módulo RAK2245 una vez que se hace la inicialización del mismo. Una vez finalizada la configuración se puede elegir conectar el dispositivo a otra red Wi-Fi, en este caso a la red Wi-Fi del Centro Tecnológico FUNINTEC para la vinculación con TTS.

Una vez elegida la nueva red Wi-Fi, se configuró el *packet forwarder*, que es un programa que se ejecuta en el *gateway* para que pueda interactuar con el chip LoRa para recibir y transmitir

paquetes LoRa, y así permitir la interacción con la red para transmitir estos paquetes a las aplicaciones.

En la Figura 127 se muestra, a partir de bloques, el funcionamiento del *packet forwarder* en una aplicación LoRa para la integración de datos en la nube de TTN.

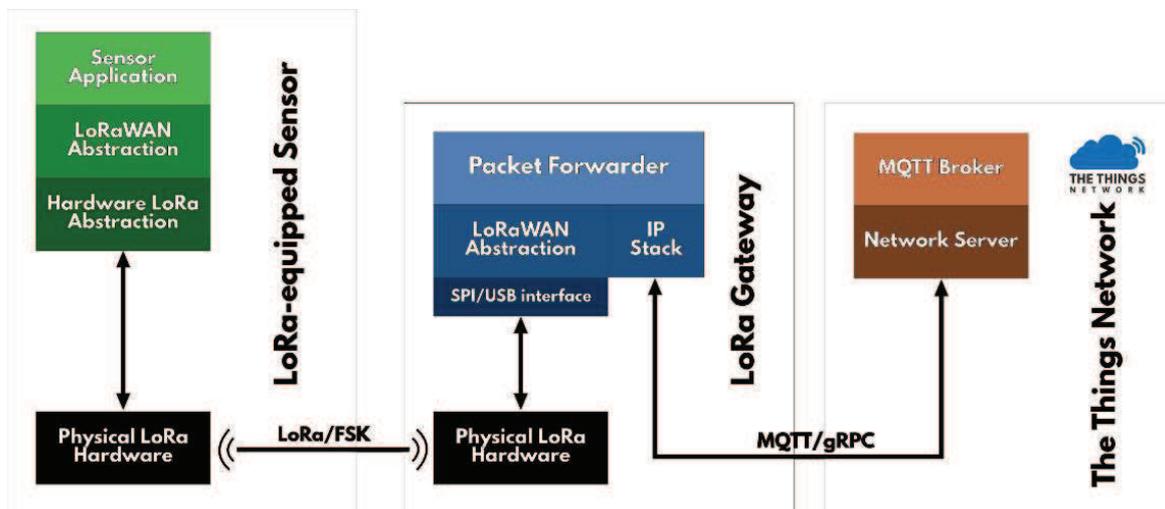


Figura 127 - Funcionamiento del *packet forwarder*.

El *packet forwarder* es un programa que corre en el *gateway*, este interactúa con el chip LoRa para recibir y transmitir paquetes desde y hacia el nodo IoT y además, interactúa con el servidor TTN a través de una conexión de internet.

Una vez que se realizan las configuraciones básicas, se genera el archivo *global\_conf.json*, donde se pueden establecer parámetros adicionales como por ejemplo los puertos y la dirección del servidor de aplicación, o el puerto físico del módulo GPS conectado al puerto I<sup>2</sup>C del *gateway*, para que la geolocalización del mismo se envíe automáticamente a TTS, como se muestra en la Figura 57 de la sección 2.1.7.

### 3.1.9. Interconexión eléctrica de módulos

En la Figura 128 se puede observar el montaje sobre la placa base de los módulos que componen el nodo IoT. De acuerdo con el esquema de la Figura 93 presentado en la sección 3.1, son los siguientes:

1. Alimentación
2. Medición de temperatura
3. Medición de irradiancia
4. Servidor Modbus TCP del *Inverter* (explicado en la sección 3.1.5.2)
5. Adquisición de mediciones y módulo Wi-Fi (ESP32)
6. Módulo LoRa (xDot)

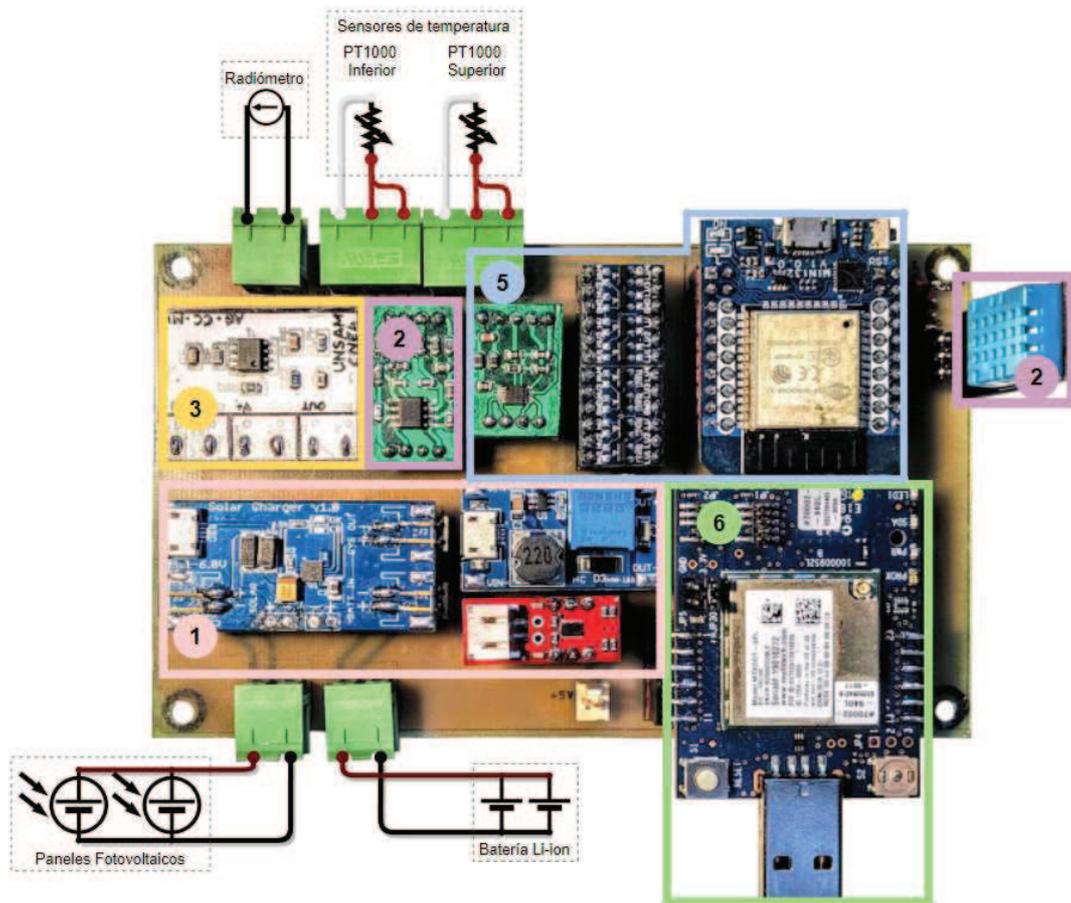


Figura 128 - Prototipo ensamblado.

A continuación, se muestra en mayor detalle la interconexión de los componentes de diferentes módulos. En la Figura 129 se muestra el diagrama de conexión eléctrica del módulo de alimentación compuesto por el cargador de baterías, el medidor de carga y el elevador de tensión.

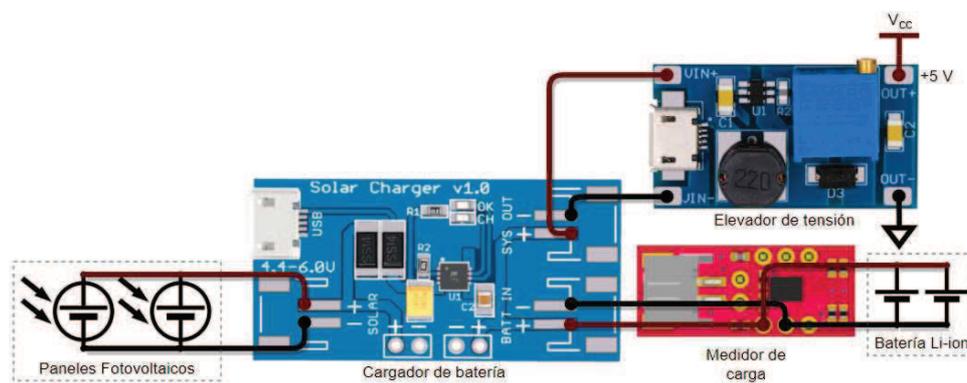


Figura 129 - Esquema de conexión de la alimentación (1) del nodo.

En la Figura 130 se muestra la conexión de las dos placas de acondicionamiento de señal para el radiómetro y para los sensores de temperatura RTD PT1000 al convertor analógico-digital.

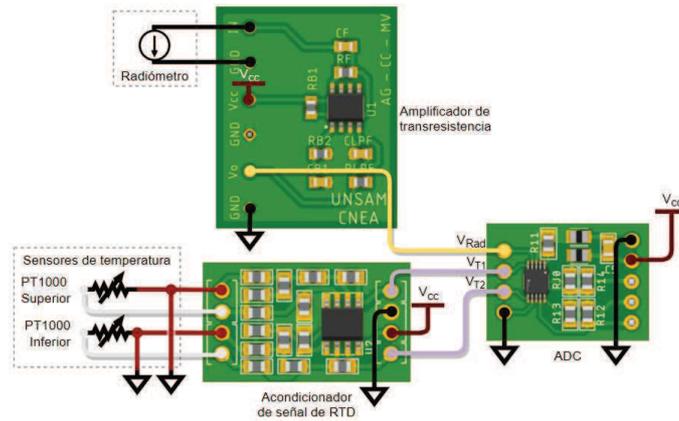


Figura 130 - Esquema de conexión los módulos de medición de radiación (2) y temperatura (3) al ADC.

En la Figura 131 se muestra el detalle de conexión del bus I2C entre el ADC y medidor de carga y el módulo Wi-Fi (ESP32), con los correspondientes conversores de nivel de tensión.

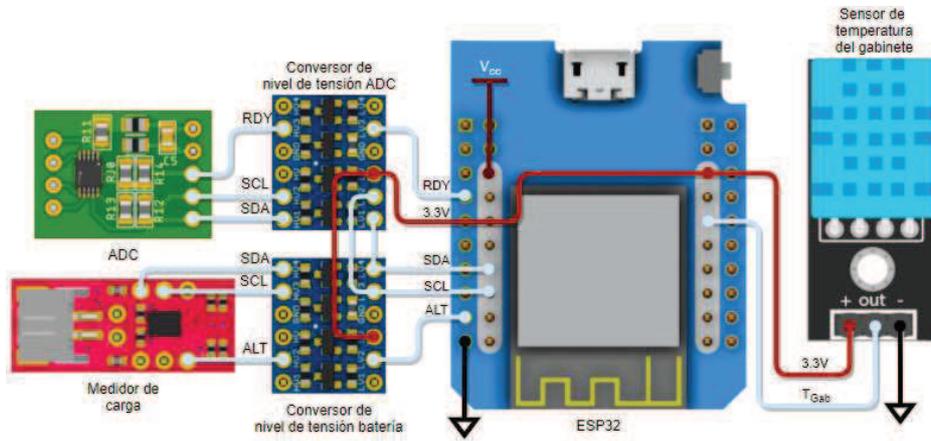


Figura 131 - Esquema de conexión del bus I<sup>2</sup>C y *one wire* para la adquisición de mediciones (5).

En la Figura 132 se muestra la conexión de los puertos serie y señalización auxiliar entre los procesadores Wi-Fi (ESP32) y LoRa (xDot).

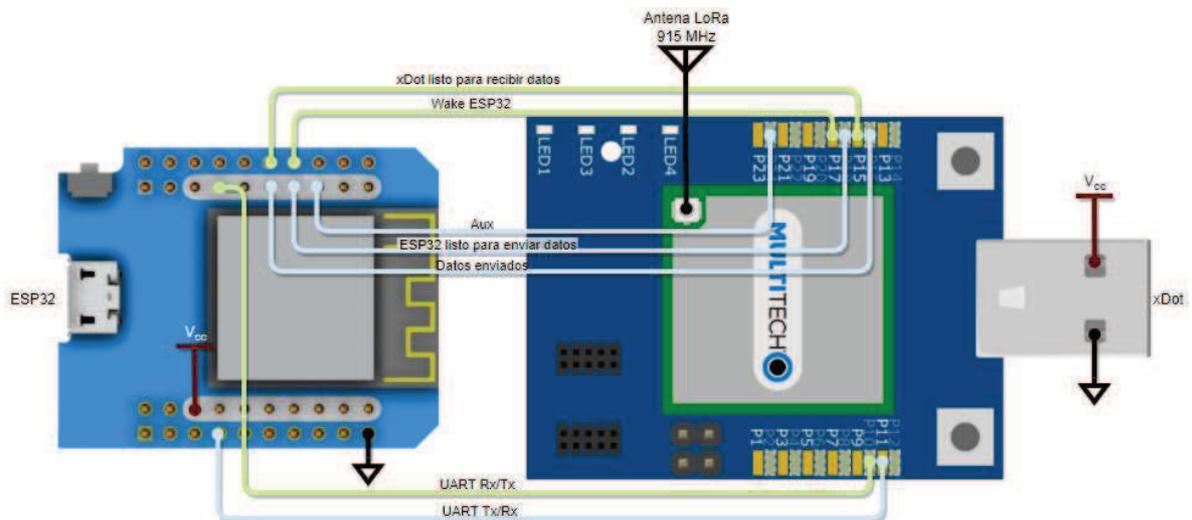


Figura 132 - Esquema de conexión de los módulos Wi-Fi (ESP32) y LoRa (xDot) (6).

## 3.2. Diseño de gabinetes y estructuras

### 3.2.1. Gabinete del prototipo

Para el gabinete que contiene toda la electrónica que conforma el nodo de telemetría se optó por una caja estanca de polipropileno con burlete de caucho, cuyas medidas son: 15 cm x 15 cm x 10 cm.

Entre sus características principales se destaca la alta resistencia del material (a impactos), la protección UV para evitar el deterioro a la intemperie, ya que el gabinete se ubicó en el exterior (protegido bajo la instalación fotovoltaica).

La protección de la caja es IP65, el número 6 describe el nivel de protección contra polvo y el número 5 describe el nivel de protección contra líquidos.

Para pasar los cables que provienen del interior de la caja se utilizaron 4 prensa cables de 5/8 pulgadas, de modo que la caja tuvo que ser perforada con una mecha escalonada. Se perforó también para acoplar la antena del módulo LoRa (xDot) y para adicionar el sensor de temperatura exterior.

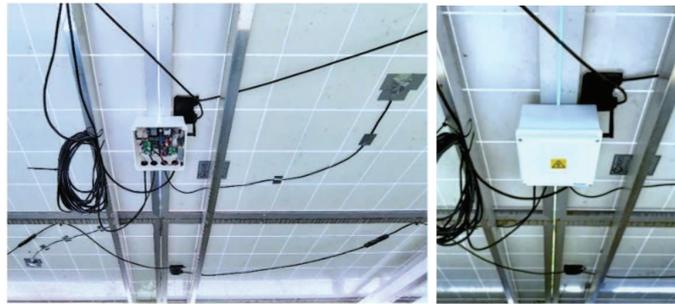


Figura 133 - Montaje de gabinete en la parte posterior del arreglo fotovoltaico.

El gabinete se sujetó en la parte posterior de la instalación fotovoltaica, en el centro de esta de acuerdo con la Figura 133, se atornilló al marco de los paneles fotovoltaicos, mediante tornillos autoperforantes.

En la Figura 134 se muestra en detalle el nodo de telemetría y todos sus componentes organizados dentro del gabinete, estos fueron detallados modularmente en secciones anteriores.

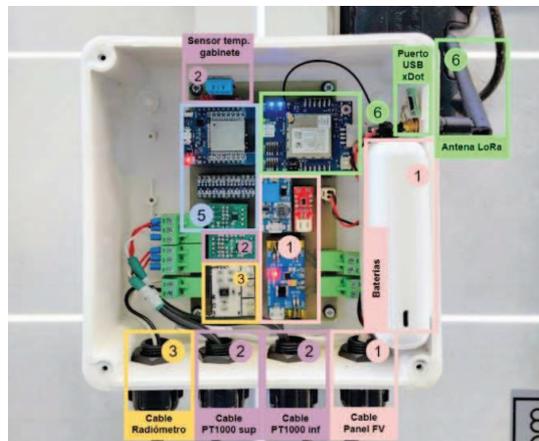


Figura 134 – Interior del gabinete del nodo.

La placa base que contiene todos los módulos se atornilló al interior de la caja para garantizar una sujeción adecuada.

### 3.2.2. Marco para paneles solares

Como soporte para los paneles solares (que forman parte del circuito de alimentación del nodo de telemetría, cuyas características se detallaron en la sección 2.2.2), se diseñó un marco a medida. Para materializar el diseño del soporte se empleó una impresora 3D Matik (clon de la serie Prusa i3) con filamento de ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) por sus características de resistencia térmica.

Teniendo en cuenta las dimensiones y el perfil de unos pocos milímetros (3 mm) de ambos, el arreglo requería de un marco que pudiese montarse y quedar fijo, evitando así las consecuencias que un día ventoso pudiera provocar.

La Figura 135 muestra el diseño del marco que posteriormente se imprimió en 3D (1), la sujeción del marco con el perfil de la estructura se realizó con precintos a través de las muescas de este (2) y la vista frontal del marco (3).

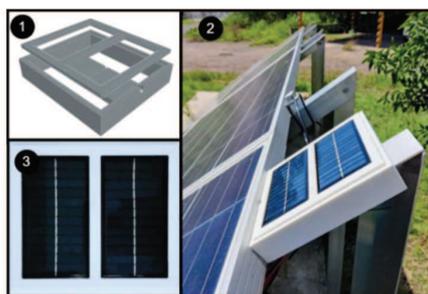


Figura 135 - Marco para paneles solares.

### 3.2.3. Montaje del radiómetro y el arreglo de paneles solares de alimentación

El radiómetro y el arreglo de paneles solares (que forman parte del circuito de alimentación del sistema de telemetría) se montaron con precintos sobre los perfiles de la estructura de aluminio (posteriores) que conforman el soporte del arreglo fotovoltaico.



Figura 136 - Montaje del radiómetro y arreglo de paneles solares de la alimentación del nodo.

El montaje de ambos se realizó coplanar con la instalación del arreglo fotovoltaico, de acuerdo con la Figura 136.

### 3.2.4. Soporte para sensores PT1000

El soporte para los sensores también se hizo a medida y se fabricó con impresora 3D y filamento de PLA (ácido poliláctico).

Fue necesaria la adición de un soporte a los sensores, principalmente por sus dimensiones milimétricas y para una mejor sujeción a la parte posterior de los paneles fotovoltaicos.

La Figura 137 muestra el diseño del soporte que posteriormente se imprimió en 3D (1), el ensamblado del soporte con el sensor y la adición de una cinta de tipo bifaz para facilitar su adhesión (2), y la sujeción a la parte posterior de los paneles fotovoltaicos (3).

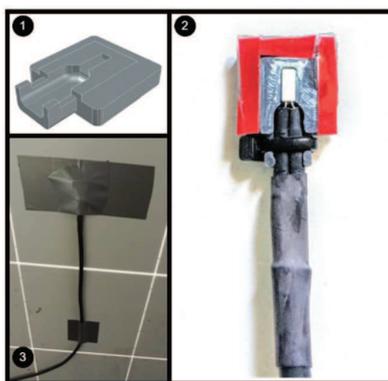


Figura 137 - Soporte para sensores PT1000 y sujeción.

La Figura 138 muestra la sujeción de los sensores PT1000 a la cara posterior de los paneles fotovoltaicos.

El sensor PT1000 número 1 se ubicó en el tercer panel de la fila superior contando de derecha a izquierda (celda ubicada en la fila 4 columna 5, de izquierda a derecha, de abajo arriba), mientras que el sensor PT1000 número 2 se ubicó en el cuarto panel de la fila inferior contando de derecha a izquierda (celda ubicada en la fila 3 columna 5, de derecha a izquierda, de arriba abajo).

No se consideró una ubicación simétrica de los sensores, para poder observar el comportamiento de la temperatura en diferente locación de celdas fotovoltaicas.



Figura 138 - Adhesión de los sensores PT1000 a la parte posterior de los paneles fotovoltaicos.

### 3.3. Desarrollo de firmware

En las secciones 2.1.6 y 2.2.8 se explicaron las características técnicas y funcionales de los módulos Wemos D1 Mini ESP32 (adquisición de mediciones y comunicación Wi-Fi) y Multitech xDot (comunicación LoRa), respectivamente. Al ser procesadores programables independientes y de distintos fabricantes se utilizaron diferentes plataformas para el desarrollo e implementación del firmware de cada dispositivo.

A continuación, se explica en detalle el abordaje utilizado para cada plataforma y la forma en la que los dispositivos interactúan entre sí y con otros periféricos.

#### 3.3.1. Comunicación entre microprocesadores

La comunicación entre el módulo Wi-Fi (ESP32) y el módulo LoRa (xDot) para transmitir los datos de irradiancia, temperatura, porcentaje de carga de la batería y potencia fotovoltaica de un módulo al otro se utiliza el puerto UART (que se detalló en la sección 2.1.2), empleando comunicación serie con un protocolo diseñado especialmente para esa comunicación.

En la Figura 139 se muestra el diagrama de flujo de la lógica del protocolo empleado para el envío de datos desde el ESP32 al xDot en condiciones normales.

La configuración del puerto serie de cada dispositivo es 9.800 baud/s, 8 bits de datos, sin paridad y 1 bit de parada.

Se emplearon entradas digitales adicionales para señalar diferentes instancias de la ejecución de lógica debido a que cada procesador ejecuta funciones de inicialización, comunicación y mediciones y es necesario que se coordinen hacia el final de la ejecución para que la transmisión de los datos útiles o *payload* se ejecute correctamente. Estas señales se indicaron en la Figura 132 (sección 3.1.9).



Figura 139 - Lógica de intercambio de datos entre los dispositivos.

En las secciones subsiguientes se explica en mayor detalle la lógica implementada en cada uno de los procesadores considerando condiciones anormales que impidan el correcto flujo de datos desde el dispositivo hacia la red.

### 3.3.2. Firmware del Wemos D1 Mini ESP32 (Wi-Fi)

Para llevar a cabo la programación del módulo Wemos D1 Mini ESP32 se utilizó el entorno PlatformIO sobre Visual Studio Code, que se explicó en mayor detalle en la sección 2.2.10.2. Este entorno permite utilizar el *framework* y las bibliotecas de Arduino para dispositivos de la familia ESP32 y programar el microprocesador desde un mismo entorno y además cuenta con herramientas que facilitan la programación.

La carga del programa y el monitoreo del estado del dispositivo se efectuó mediante el puerto USB del módulo, que actúa como un puerto serie virtual. Debido a que el dispositivo no cuenta con una interfaz de *debug* dedicada, para la depuración del programa se emplearon funciones de impresión de caracteres localizadas en distintas partes del código para efectuar el seguimiento de la ejecución.

En la Figura 140 se muestra el diagrama de flujo general del programa implementado en el módulo ESP32, donde se definen las rutinas para tomar las mediciones de temperatura y radiación, el porcentaje de carga de la batería y la potencia generada por la instalación.

Una vez que se obtienen dichas mediciones, estas se envían al módulo xDot para su transmisión por la red LoRa, ya que el módulo ESP32 solamente puede comunicarse por Wi-Fi o Bluetooth (este último no fue utilizado en el marco del presente proyecto).

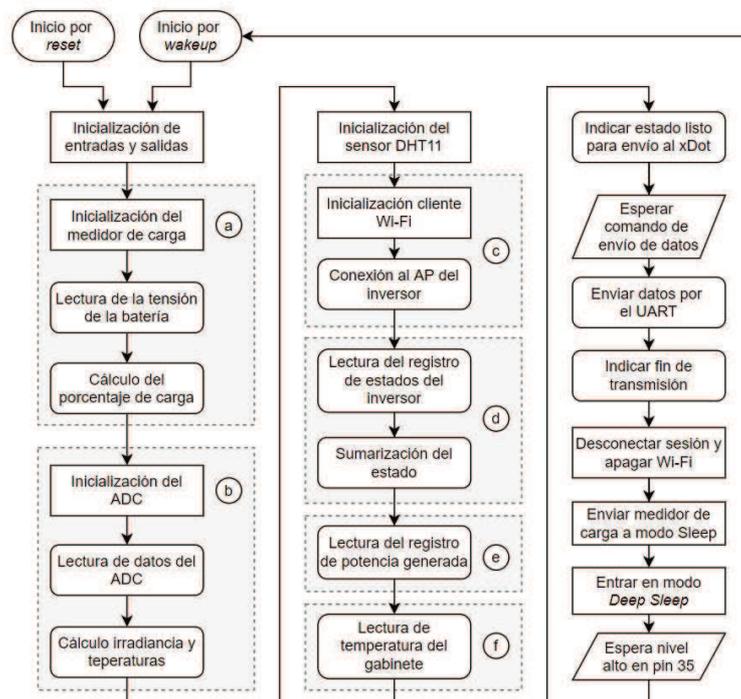


Figura 140 - Diagrama de flujo del programa del módulo Wi-Fi (ESP32).

Se utilizaron bibliotecas preexistentes que se pueden descargar y asociar al proyecto desde el entorno PlatformIO, tanto para el manejo de la comunicación I<sup>2</sup>C con el módulo MAX17043 (medidor del nivel de carga de la batería) y con el ADC ADS1115, como para la lectura de datos del sensor de temperatura DHT11 y para el manejo del *stack* Modbus/TCP para la comunicación con el *inverter* de la instalación FV.

Para este dispositivo se eligió el uso del modo de ahorro de energía *deep sleep* [101] que se activa al final de la rutina normal del programa y permite que el módulo funcione en modo de bajo consumo durante la mayor parte del tiempo, como se vio en el capítulo 3.1.2, para ahorrar carga de la batería.

En este modo se inhabilitan el procesador principal y todos los periféricos, quedando activos el coprocesador ULP (*Ultra Low Power*) y la memoria del RTC (*Real Time Clock*) que permite almacenar datos y estados (Figura 141).

En la presente aplicación se emplea la memoria RTC para almacenar los datos de las últimas mediciones realizadas para diagnóstico, pero también puede ser empleada para mejorar las funcionalidades del dispositivo a futuro.

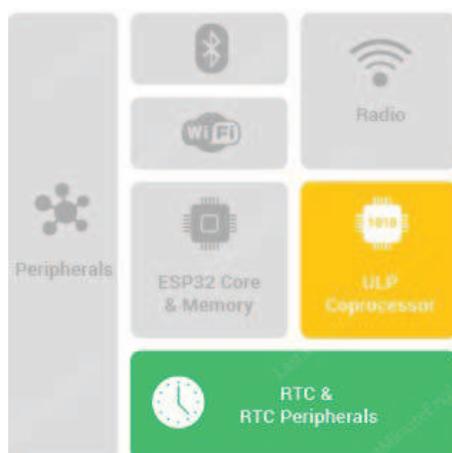


Figura 141 - Módulos activos durante el modo *Deep Sleep* del módulo Wi-Fi (ESP32) [101].

Para salir del modo *deep sleep* se configuró la entrada digital 35 (que pertenece a los periféricos soportados por el RTC) como entrada de *wakeup* externo, que se comanda periódicamente por el módulo LoRa xDot.

Una vez que el dispositivo se despierta, la ejecución del programa comienza desde el inicio, es decir que se inicializan nuevamente todos los periféricos y dispositivos externos, así como la conexión al servidor Modbus/TCP del *inverter*.

A continuación, se describe la lógica para cada una de las partes principales del programa.

### 3.3.2.1. Medición del nivel de carga de la batería

En la sección 2.2.6 se describieron las características técnicas del módulo MAX17043. Para la gestión de la comunicación con este módulo se utilizó la biblioteca “*MAX1704X*” [102].

En la Figura 142 se muestra el diagrama de flujo de la lógica para la inicialización del módulo MAX17043 y la lectura de datos para determinar el porcentaje de carga de la batería que alimenta el sistema.

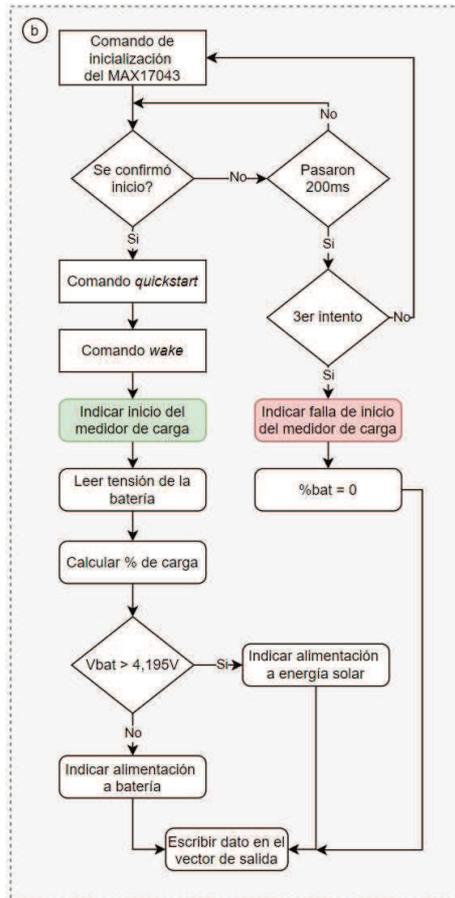


Figura 142 - Rutina de lectura del nivel de carga de la batería.

Se inicializa el puerto I<sup>2</sup>C del módulo Wi-Fi (ESP32) y se busca si hay disponible un dispositivo con la dirección 0x36 (por defecto) conectado al bus.

De no confirmarse la detección del dispositivo por 200 ms, se reintenta el inicio dos veces adicionales y se indica la conexión o la falla en el correspondiente bit del registro de estado (Tabla 25), esto se refleja en el panel de visualización web como se indica en la Figura 143.

Ante la falla de detección del módulo se inicializa la medición del porcentaje de carga de la batería en cero en el correspondiente registro del *payload*.

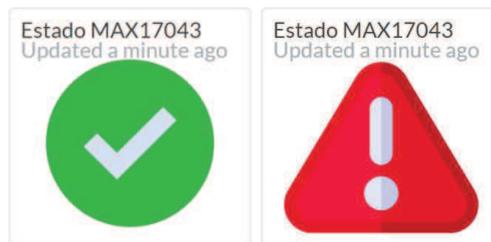


Figura 143 - Visualización del estado conectado / falla del módulo MAX17043.

Si se detecta el MAX17043 en el bus I<sup>2</sup>C, se le envía el comando de inicio rápido y el comando *wake*, luego se lee la tensión de la batería y se calcula el porcentaje de carga con la siguiente ecuación:

$$\%_{bat} = V_{bat} \times 0,2 - 740$$

Ecuación 36 - Cálculo del porcentaje de carga de la batería.

Si bien en la biblioteca empleada existe una función que permite leer el porcentaje de carga desde la memoria del módulo, se optó por hacer el cálculo de forma manual porque la función existente considera como límite inferior (0 %) cuando la tensión de la batería es de 3,2 V.

Sin embargo, para incrementar la vida útil de la batería en esta aplicación se considera como límite inferior una tensión de 3,7 V, por ello se realiza el cálculo a partir de la tensión medida con la fórmula antes mencionada y los límites establecidos de 3,7 a 4,2 V.

El dato obtenido se redondea para eliminar los decimales, se convierte a un entero de 8 bits (1 byte) y se guarda en el correspondiente byte del *payload*, de acuerdo con la Tabla 25.

En la Figura 144 se muestra el símbolo con el que se visualiza el porcentaje de carga de la batería en el panel de visualización web.

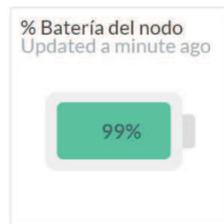


Figura 144 - Visualización del porcentaje de carga de la batería

Si la tensión de la batería se encuentra por encima de 4,195 V se considera que el nodo se encuentra íntegramente alimentado por el panel fotovoltaico auxiliar y se indica en el correspondiente bit del registro de estado (Tabla 25), lo cual se refleja en el panel de visualización web como se indica en la Figura 145.



Figura 145 - Visualización del estado de alimentación a energía solar / a batería del nodo a energía solar.

### 3.3.2.2. Medición de temperatura e irradiancia

En la sección 2.1 se detallaron las características del sensor de temperatura DHT11 y de los sensores de temperatura PT1000. En la sección 3.1 se explican las consideraciones de uso y diseño de la electrónica de los sensores de temperatura y del módulo ADC y en la Figura 130 de la sección 3.1.9 se muestra la conexión eléctrica de los correspondientes módulos.

Para la lectura de datos desde el sensor DHT11 se utilizó la biblioteca “*DHTesp*” [103], que contiene todas las funciones necesarias para inicializar la comunicación y leer los datos desde el sensor y separar la lectura de temperatura de la de humedad relativa. En la Figura 146 se muestra la lógica de adquisición de temperatura desde el sensor DHT11.

En el marco del presente proyecto solamente se lee la temperatura descartando el dato de la humedad relativa ya que no es relevante.

Además, para la medición de temperatura se eliminan las cifras decimales para que el dato se pueda enviar como un entero de 8 bits (1 byte), debido a las restricciones del tamaño del *payload* de LoRa de acuerdo con la política de uso justo explicada en la sección 2.1.8.2.

Esto hace que la precisión de la medición quede reducida a  $\pm 1$  °C y el correspondiente gráfico de tendencia en el panel de visualización se vea “escalonado”.

Además, en caso de que la función de lectura devuelva un valor de 0xFFFF, se considera que el sensor se desconectó y la lectura fue errónea, por lo tanto el dato de la temperatura del gabinete se inicializa en 0. Como no se trata de un dato esencial, sino un dato de diagnóstico, no se indica el estado de este sensor en el registro de estados.

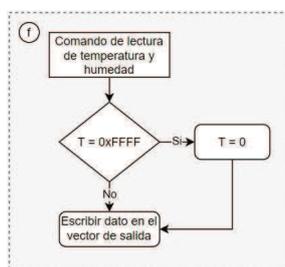


Figura 146 - Lectura de temperatura desde el sensor DHT11.

Para la comunicación con el ADS1115 se utilizó la biblioteca “*Adafruit ADS1X15*” [104].

En la Figura 147 se muestra el diagrama de flujo de la lógica para la inicialización del módulo ADS1115 y la lectura de datos para determinar la irradiancia y las temperaturas de los paneles.

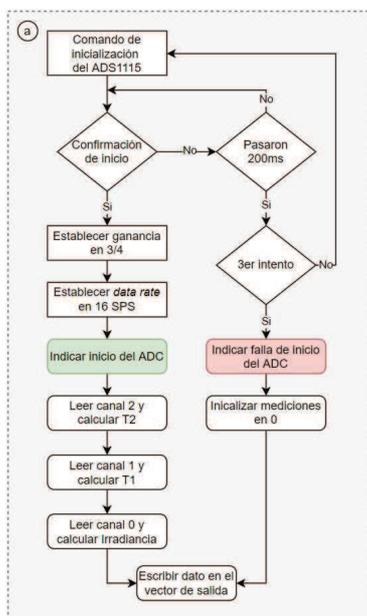


Figura 147 - Rutina de obtención de datos del ADC ADS1115.

En primer lugar, se inicializa el puerto I<sup>2</sup>C y se busca si hay un dispositivo con la dirección 0x48 (pin ADDR conectado a GND) conectado al bus.

De no confirmarse la detección del dispositivo por 200 ms, se reintenta el inicio dos veces adicionales y se indica la conexión o la falla en el correspondiente bit del registro de estado (Tabla 25), que se refleja en el panel de visualización web como se indica en la Figura 148.

Ante la falla de detección del módulo, todas las mediciones se inicializan en cero en los correspondientes registros del *payload*.

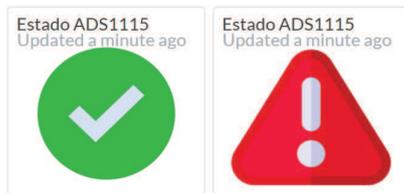


Figura 148 - Visualización del estado conectado / falla del módulo ADS1115.

Si se detecta el ADC en el bus I<sup>2</sup>C se establece la configuración de ganancia en  $\frac{3}{4}$  (tensión de entrada entre 0 y 6,144 V) y el *data rate* de 16 muestras por segundo y se indica el estado conectado en el correspondiente bit del registro de estado (Tabla 25).

Luego se procede con la lectura de los valores muestreados en cada canal activo y al cálculo de las variables ambientales.

En esta aplicación se emplea el modo de conversión de disparo único, explicado en detalle en la sección 2.1.7.1, que consiste en tomar lecturas a demanda e inicia la conversión de un canal específico, espera la indicación de fin de conversión a través del pin RDY o del correspondiente bit indicador en la memoria del ADC y luego lee el valor de la conversión y almacena el resultado en el vector ADC.

Primero se realiza la lectura del canal 2 que corresponde al dato de la temperatura del panel inferior y se calcula la temperatura del panel inferior con la siguiente ecuación:

$$T_2 = \frac{(ADC[2] - 9821)}{1,886}$$

Ecuación 37 - Cálculo de temperatura del panel inferior.

Luego se repite para el canal 1 y se calcula la temperatura del panel superior como:

$$T_1 = \frac{(ADC[1] - 9771)}{1,886}$$

Ecuación 38 - Cálculo de temperatura del panel superior.

En la Ecuación 37 y en la Ecuación 38 el primer factor corresponde a los valores de conversión del ADC cuando la resistencia de los sensores PT1000 es de 1 k $\Omega$  (0 °C) donde la diferencia se debe principalmente a factores constructivos de todo el circuito (resistencia de los cables, tolerancia de los componentes utilizados, variación de la tensión de alimentación, etc).

Estos valores junto con el factor divisor salen de la curva de calibración de los sensores que se explica en detalle en el anexo 3 – sección 1.2, y el resultado se expresa en °C x 100 de manera que el dato se pueda enviar en formato entero de 16 bits (2 bytes) pero conserve dos puntos decimales sin requerir el uso del formato de coma flotante que ocupa 32 bits.

Con este formato se pueden enviar valores desde 0 a +/-32.767, lo que permite emplear el rango de temperatura establecido por diseño que va desde -5.180 (51,81 °C) a 12.193 (121,93 °C) para el sensor superior y -5.175 (51,75 °C) a 12.199 (121,99 °C) para el sensor inferior.

Finalmente se lee el canal 0 que corresponde al dato de la irradiancia y se hace el correspondiente cálculo:

$$I = \frac{(ADC[0] - 340)}{1,93871}$$

Ecuación 39 - Cálculo de irradiancia.

En este caso se comprobó que la salida del amplificador de transresistencia con la entrada a circuito abierto produce una lectura de 340 en el ADC que se toma como 0 W/m<sup>2</sup>. El factor de división es la inversa de la constante de calibración multiplicado por 10. El resultado se expresa en W/m<sup>2</sup> x 10 de manera que el dato se pueda enviar en formato entero de 16 bits (2 bytes) pero conserve un punto decimal a diferencia de la temperatura, ya que la irradiancia solamente puede tener valores positivos y el rango establecido por diseño va de 0 a 16.726 (1.672,6 W/m<sup>2</sup>) no permitiendo emplear dos puntos decimales ya que incluso excedería el rango de 0 a 65.535 que permite el formato entero de 16 bits sin signo.

Finalmente, los valores calculados se almacenan en los correspondientes registros del *payload* de acuerdo con la Tabla 25.

### 3.3.2.3. Datos del inverter

Para obtener los datos del estado y potencia generada desde el servidor Modbus del *inverter*, como se explicó en la sección 3.1.5, el módulo Wi-Fi (ESP32) debe establecer una conexión inalámbrica en modo estación con el *Access Point* del *inverter*, utilizando el SSID "*Ingeteam\_0BM192510A85\_5801*" y la contraseña configurada por defecto "*ingeconsun*".

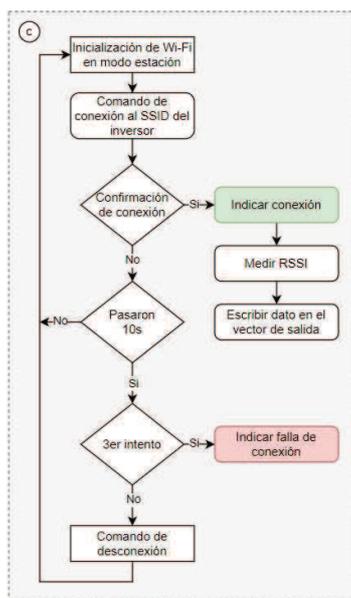


Figura 149 - Rutina de conexión al *access point* del *inverter*.

En la Figura 149 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento de conexión del módulo Wi-Fi (ESP32) con el *inverter*.

Ya que existen elementos que deterioran la comunicación (como la distancia entre los equipos, temperatura del gabinete, interferencia de otros equipos u otros factores ambientales), si la conexión no se confirma por más de 10 segundos en el primer intento, se vuelve a intentar nuevamente dos veces adicionales y se indica la conexión o la falla en el correspondiente bit del registro de estado (Tabla 25). Esto se refleja en el panel de visualización web como se indica en la Figura 148.

Ante la falla de la conexión los datos del estado y potencia generada se inicializan en cero en los correspondientes registros del *payload*.

Cuando se establece la conexión con éxito se mide el RSSI de la señal Wi-Fi y se almacena en el correspondiente registro del *payload*, luego se visualiza en el panel de monitoreo sobre un gráfico de tendencia.

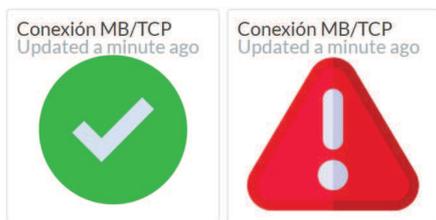


Figura 150 - Visualización del estado conectado / falla de la conexión Modbus/TCP.

Para el manejo del *stack* Modbus/TCP se utilizó la biblioteca “*eModbus*” [105], y se configuró al módulo ESP32 como cliente sobre el puerto TCP 502. Se estableció un tiempo de espera de 8 segundos.

En la Figura 151 se muestra la rutina para leer el estado del *inverter*.

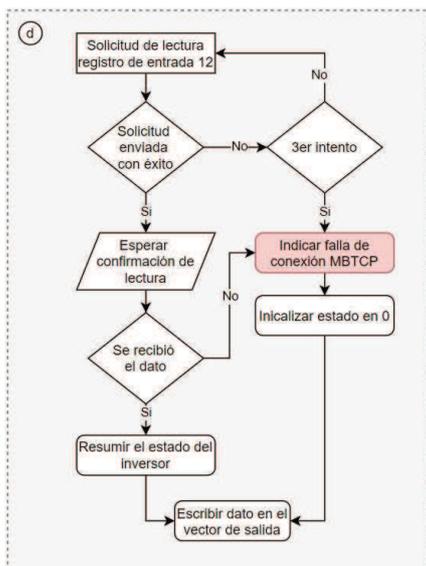


Figura 151 - Rutina de lectura del estado del *inverter*.

En la Figura 152 se muestra la rutina para leer la potencia fotovoltaica.

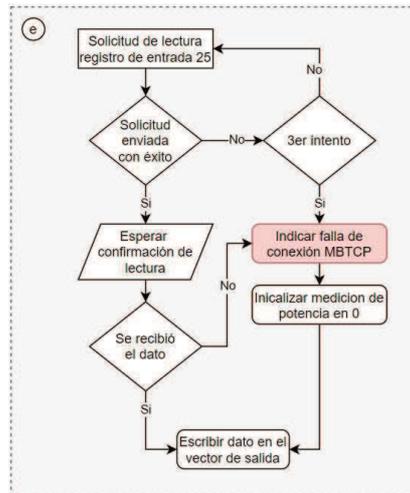


Figura 152 - Rutina de lectura de la potencia generada por los paneles fotovoltaicos.

En ambos casos se genera la solicitud de lectura de los registros de entrada (*input registers*) 12 y 25, respectivamente.

Si el procesamiento de la solicitud del lado del cliente genera algún tipo de error, por ejemplo, por una mala calidad de la conexión, se reintenta dos veces adicionales antes de asumir un error de la comunicación Modbus e indicarlo en el registro de estado del nodo.

Si el dato del estado se recibe con éxito, los 7 posibles estados que se muestran en la Figura 122 (sección 3.1.5.2) se resumen en 4 para poder representarlos mediante dos bits dentro del registro de estados del *payload* (Tabla 25).

El dato de la potencia recibido se copia en el correspondiente registro del *payload* sin ningún tipo de tratamiento.

Una vez obtenidas las mediciones el *payload* se envía al xDot y el módulo Wi-Fi (ESP32) ejecuta la rutina de inicio del modo *deep sleep* hasta el ciclo siguiente.

### 3.3.3. Firmware del módulo xDot (LoRa)

Para desarrollar la aplicación del módulo Multitech xDot se empleó el entorno de desarrollo Mbed Compiler en la nube, como se explicó en la sección 2.2.10.1, y se obtiene como resultado un archivo binario con el firmware.

Cuando el módulo xDot se conecta al puerto USB del ordenador la memoria *flash* de este se monta como una unidad de disco, lo que permite copiar y pegar el archivo binario generado por el compilador en la memoria del dispositivo por medio de un explorador de archivos. Durante el próximo inicio del dispositivo comienza la ejecución del programa cargado.

Para el desarrollo de la aplicación se utilizó como base el proyecto de ejemplo “*Dot-Examples*” provisto por la firma Multitech, que incluye las rutinas y configuraciones necesarias para que un dispositivo mDot o xDot se pueda conectar a una red LoRaWAN.

Dentro del IDE Mbed se hizo una copia del proyecto eliminando todas aquellas rutinas que no son necesarias, dejando solamente del ejemplo “*ota\_example.c*” ya que en el marco del proyecto

se utilizó la modalidad OTAA para la autenticación del dispositivo según se explica en la sección 2.1.6.5.

El código utilizado incluye las configuraciones del puerto serie a través de USB para *debug* por consola que se empleó para validar el correcto funcionamiento del dispositivo, configuraciones de banda y sub-banda, configuraciones de inicio de sesión (*join*) y la posibilidad de guardar dichas configuraciones en memoria de manera que si el dispositivo pierde alimentación, pueda reconectarse a la misma sesión.

El procesador del xDot cuenta con un modo *deep sleep* que en el presente trabajo se emplea para ahorro de energía. Este modo utiliza el modo *stop* con RTC del procesador STM, en el que se apagan el procesador principal, todos los periféricos y los relojes de alta frecuencia, pero la memoria RAM y los registros se mantienen activos, de modo que los periféricos se mantienen inicializados al momento del *wakeup*.

El procesador puede salir de este modo mediante la interrupción de un *ticker* de bajo consumo (utilizado en el presente proyecto), una interrupción del RTC, una interrupción de un pin o el temporizador de *watchdog*.

En la Figura 153 se muestra el diagrama de flujo general del programa implementado en el módulo xDot, donde se definen las rutinas para la recepción de los datos de mediciones y estados del módulo Wi-Fi (ESP32), la conexión a la red LoRaWAN y el envío de datos a TTS.

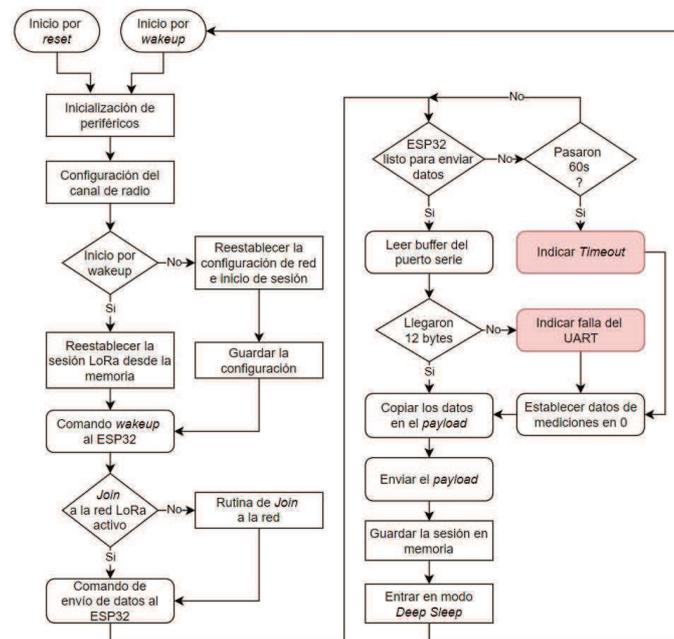


Figura 153 - Diagrama de flujo del programa del módulo Multitech xDot.

Cuando el procesador se inicia tras el encendido o la carga del programa, se inicializan los dos puertos serie, las E/S para la interacción con el módulo Wi-Fi (ESP32), luego se configura el plan de canales AU915 en la sub-banda 2, se establece el modo de autenticación OTA, se establece el *data rate* DR5 (que representa un factor de dispersión de 7 con un ancho de banda de 125 kHz) y se reestablece la sesión de la red LoRaWAN.

Esta información se imprime por el puerto serie de *debug* y se puede visualizar en la consola, como se muestra en la Figura 154, donde además se puede ver que la clase de dispositivo por defecto es A y el *device EUI* se encuentra predefinido por el fabricante, entre otros parámetros.

En caso de que el dispositivo se inicie por *wakeup*, los periféricos ya se encuentran inicializados y se reestablecen los estados de los puertos desde la memoria.

```
[INFO] MultiTech Bootloader 1.1-rc1
[INFO] Initialize radio...
[INFO] Initialize channels...
[INFO] Initialize datarates...
[INFO] Set radio to Private Mode
[INFO] Set radio to Public Mode
[INFO] xDot Ready
[INFO] mbed-os library version: 6.1.0
[INFO] defaulting Dot configuration
[INFO] Initialize channels...
[INFO] Initialize datarates...
[INFO] changing network KEY from "00000000000000000000000000000000" to "XXXXX"
[INFO] saving configuration
[INFO] =====
[INFO] general configuration
[INFO] =====
[INFO] version ----- 4.0.1-mbed60100
[INFO] device ID/EUI ----- 00X00000X000XX
[INFO] default channel plan ---- US915
[INFO] current channel plan ---- AU915
[INFO] frequency sub band ----- 2
[INFO] public network ----- Public LoRaWAN
[INFO] =====
[INFO] credentials configuration
[INFO] =====
[INFO] device class ----- A
[INFO] network join mode ----- OTA
[INFO] network name -----
[INFO] network phrase -----
[INFO] network EUI ----- 0000000000000000
[INFO] network KEY ----- XXXXX
[INFO] =====
[INFO] communication parameters
[INFO] =====
[INFO] acks ----- off, 0 attempts
[INFO] TX datarate ----- DR5
[INFO] TX power ----- 30 dBm
[INFO] antenna gain ----- 3 dBm
[INFO] LBT ----- off
```

Figura 154 – Visualización de las configuraciones del xDot por consola.

Luego de la configuración de radio y periféricos se envía la señal de *wakeup* al módulo Wi-Fi (ESP32) y se procede con el inicio de sesión o *join* a la red LoRaWAN (Figura 155). Si el xDot se inicia por *wakeup* la sesión se reestablece desde la memoria y el dispositivo no realiza el inicio de sesión a la red.

```
[INFO] attempt 1 to join network
[WARNING] Link: ResetState
[INFO] Send join request RxDelay: 5 Rx1Offset: 0 Rx2Freq: 923300000 Rx2Dr: 8
[INFO] Configure radio for TX
[INFO] Rx Window 1
[INFO] RxDone 17 bytes RSSI: -39 dB SNR: 77 cB
[INFO] Network joined
```

Figura 155 - *Join* a la red LoRa.

Habiendo iniciado sesión en la red LoRaWAN, el xDot le indica al módulo ESP32 que está listo para recibir datos y queda esperando durante un tiempo máximo de 60 s la señal del ESP32 que indica que envió los datos. Si el ESP32 confirma el envío, el xDot lee el buffer del correspondiente puerto serie, verifica que hayan llegado 12 bytes y los copia en el buffer del *payload* LoRa.

Cuando se reciben menos de 12 bytes de datos no es posible garantizar la integridad parcial de los datos, por lo tanto, se descarta la información estableciendo los valores de las mediciones en cero y se activa el bit que indica el error del UART en el registro de estado.

En ambos casos se envía el *payload* con los datos por la red LoRaWAN, luego se almacenan los datos de la sesión de red en la memoria y se inicia la rutina de *deep sleep*.

```

[INFO] Preparing frame
[INFO] Configure radio for TX
[INFO] Rx Window 1
[INFO] RxDone 16 bytes RSSI: -52 dB SNR: 77 cB
[INFO] Packet for 260c6385
[INFO] Packet Received : Port: 1 FCnt: 10844 Size: 12 ACK: 0 DUP: 0
[INFO] Rx 12 bytes
[INFO] Packet RSSI: -52 dB SNR: 77 cB
[INFO] successfully sent data to gateway
[INFO] sleeping 170s or until interrupt on WAKE pin
[INFO] application will resume after waking up
[INFO] calling enterStopMode 170000 2
[INFO] entering sleep (stop) mode 00000013

```

Figura 156 - Envío del *payload*.

En el presente proyecto se emplea el modo *deep sleep* configurado con una interrupción del RTC. En funcionamiento normal se configura el *wakeup* luego de 170 s, que sumados a los aproximadamente 10 segundos que toma la rutina completa del ESP32, da como resultado el período de 3 minutos (180 s) de envío de datos.

En caso de falla de comunicación serie entre el ESP32 y el xDot se contemplan los 60 s de espera, y se configura el *wakeup* luego de 120 s, de manera que el dispositivo vuelva a activarse en 3 minutos.

En la siguiente sección se explica en detalle cómo está estructurado el *payload* con los datos de las mediciones y estados que se envía a TTS.

### 3.3.3.1. Payload LoRa

En la Figura 157 se puede observar en detalle la estructura de la carga útil (*payload*) enviada por la red LoRa creada para monitorear los parámetros involucrados en la instalación mediante el nodo de telemetría.

La codificación de los datos y la adición de las cabeceras al mensaje enviado se realiza automáticamente por las APIs predefinidas dentro de la biblioteca de Multitech cuando se invoca la rutina de transmisión.

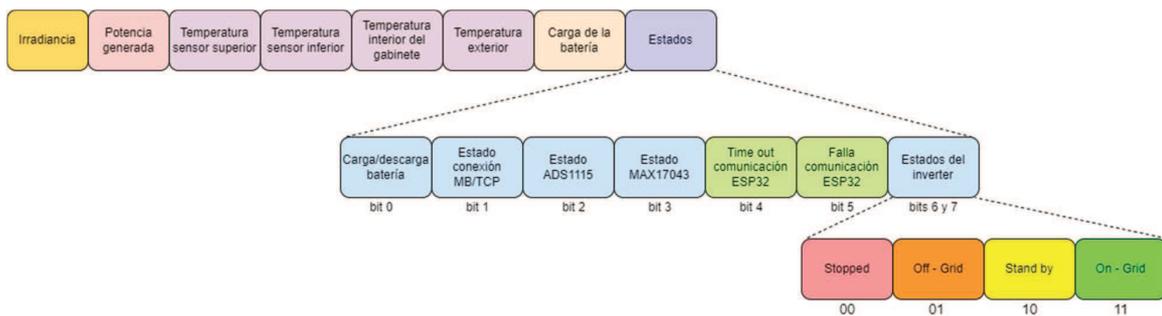


Figura 157 - Estructura del *payload* enviado por la red LoRa.

La cantidad de bytes del *payload*, así como el período de envío se eligió en función de las limitaciones establecidas en TTS y están detalladas en la sección 2.1.8.

Con el *payload* de 12 bytes de la aplicación cada mensaje enviado ocupa 0,061696 s de tiempo de aire, según la información provista por la consola de TTS.

Teniendo en cuenta que el tiempo de aire máximo por día y por dispositivo es de 30 segundos, la cantidad máxima de mensajes que se permite recibir en 24 horas es de 486, esto se traduce

en un período de 177 s, que se ajustó a 180 segundos o 3 minutos definidos en la programación del módulo LoRa (xDot).

En cuanto al formato y longitud de los datos, dada la cantidad limitada de bytes que se pueden enviar, se eligió mayor precisión para datos ambientales y de la generación fotovoltaica, empleando 2 bytes para cada uno, mientras que los datos de diagnóstico del nodo, así como los bits de estados ocupan solamente un byte cada uno.

Tanto las temperaturas como el valor de RSSI contemplan valores negativos, por ello se utiliza la notación complemento a dos para representarlos.

En esta notación la primera mitad de los valores representan los valores positivos (por ejemplo, para el RSSI desde 0 hasta 127) y la segunda mitad de los valores representan los valores negativos. Por ejemplo, para el RSSI o para la temperatura del gabinete, el rango va desde 0 hasta 127 y luego desde -128 hasta -1, como indica la Figura 158.

El valor ...	0	1	2	3	4	5	...	126	127	128	129	...	253	254	255
... representa el entero ...	0	1	2	3	4	5	...	126	127	-128	-127	...	-3	-2	-1

Figura 158 - Representación de valores positivos y negativos utilizando la notación complemento a dos.

En la Tabla 25 se pueden observar en detalle los 12 bytes de información transmitidos con sus respectivos límites, así como también el desglose del registro de estados definido en el byte 11 con los respectivos estados.

	Payload LoRa	Límites y estados
Byte 0/1	Irradiancia [W/m <sup>2</sup> *10]	0 – 16726
Byte 2/3	Potencia generada [W]	0 – 65535
Byte 4/5	Temperatura panel superior [°C*100]	-5181 – 12193
Byte 6/7	Temperatura panel inferior [°C*100]	-5175 – 12199
Byte 8	Temperatura interior del gabinete [°C]	-127 – 127
Byte 9	RSSI de la conexión Wi-Fi con el <i>inverter</i> [dBm]	-127 – 0
Byte 10	Porcentaje de caga de la batería [%]	0 – 100
Byte 11 ↓	<b>Estados</b>	
bit 0	Fuente de alimentación del nodo	(1 → E solar / 0 → Batería)
bit 1	Estado de conexión MB TCP con el <i>inverter</i>	(1 → OK / 0 → Falla)
bit 2	Estado de conexión del ADC ADS1115	(1 → OK / 0 → Falla)
bit 3	Estado de medidor de carga de la batería MAX17043	(1 → OK / 0 → Falla)
bit 4	<i>Timeout</i> comunicación con el módulo Wi-Fi (ESP32)	(0 → OK / 1 → Falla)
bit 5	Falla de la UART del módulo LoRa (xDot)	(0 → OK / 1 → Falla)
		00 → Detenido
		01 → Off - grid
bit 6/7	Estado del <i>inverter</i>	10 → Standby
		11 → On - grid

Tabla 25 - Detalle del *payload* enviado por la red LoRa Gateway.

En la siguiente sección se explica en detalle cómo se reciben los datos en TTS por la red LoRa y se muestran finalmente en el panel de visualización en *AllThingsTalk*.

### 3.4. Configuración de la red LoRaWAN

Para poder mostrar los datos transmitidos por el nodo IoT en un panel de visualización se requiere la implementación de la arquitectura de la red LoRaWAN descrita en la sección 2.1.6.2, que comprende el *gateway* LoRa y el servicio *The Things Stack*. En esta sección se

describe la puesta en servicio del Gateway RAK7243 y el registro de este y del módulo LoRa (xDot) en la red pública del servicio en la nube TTS.

### 3.4.1. Configuración del Gateway

Las características técnicas del Gateway RAK7243 se describieron en detalle en la sección 2.2.9. Al basarse en un dispositivo Raspberry Pi 3, funciona con el sistema operativo Raspbian, que a su vez se basa en la distribución de Linux Debian y permite ejecutar la configuración del dispositivo por consola a través de SSH (*Secure Shell*), esto es una característica común de los dispositivos que funcionan con sistema operativo Linux. El procedimiento de configuración se encuentra en el sitio del fabricante [106].

Los puntos principales de la configuración son:

1. Conexión Wi-Fi a la red disponible en FUNINTEC
2. Configuración del concentrador LoRa apuntando al servidor TTS
3. Plan de frecuencia AU915

A partir de estas configuraciones se genera automáticamente el archivo *global\_conf.json* al que se hizo referencia en el capítulo 3.1.8. En este caso, el *gateway* funciona en modo *packet forwarder*, que solamente cumple la función de aceptar las peticiones y retransmitir los *uplinks* del nodo hacia TTS a través de internet.

Adicionalmente, se realizó la instalación y configuración de un entorno de escritorio, ya que la distribución provista por el fabricante no lo incluye por defecto.

Esto fue necesario para poder acceder al *gateway* de forma remota a través del software RealVNC (Figura 159) en caso de que fuera necesario modificar la configuración o reiniciarlo por una eventual falla sin tener que viajar hasta el FUNINTEC, ya que a diferencia del nodo de telemetría se trata de un dispositivo *indoor* y está instalado de manera provisoria en una oficina del FUNINTEC, donde el acceso solamente es posible los días de semana cuando hay personal.

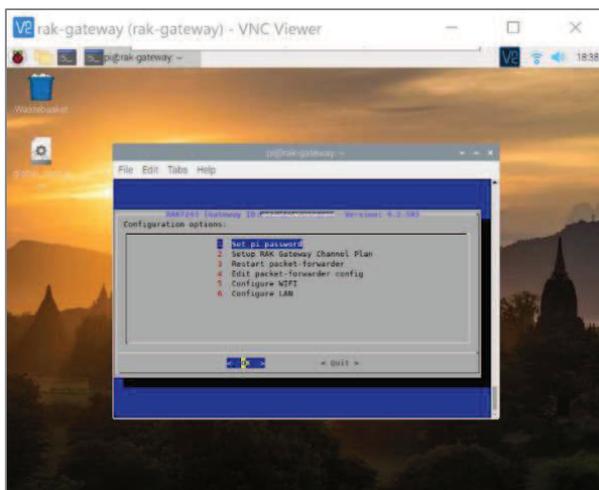


Figura 159 - Acceso remoto al entorno de escritorio del *gateway* RAK7243.

### 3.4.2. Registro del Gateway en TTS

Para que el *gateway* pueda retransmitir los datos del nodo IoT hacia el servidor TTS, es necesario registrarlo en la consola de TTS. Este procedimiento se explica de manera detallada en la sección 1.1 del anexo 2.

Como puntos principales, se debe registrar el *gateway* con el correspondiente EUI provisto por el fabricante, configurar el plan de frecuencias y la dirección de red del servidor, como se ve en la Figura 160.

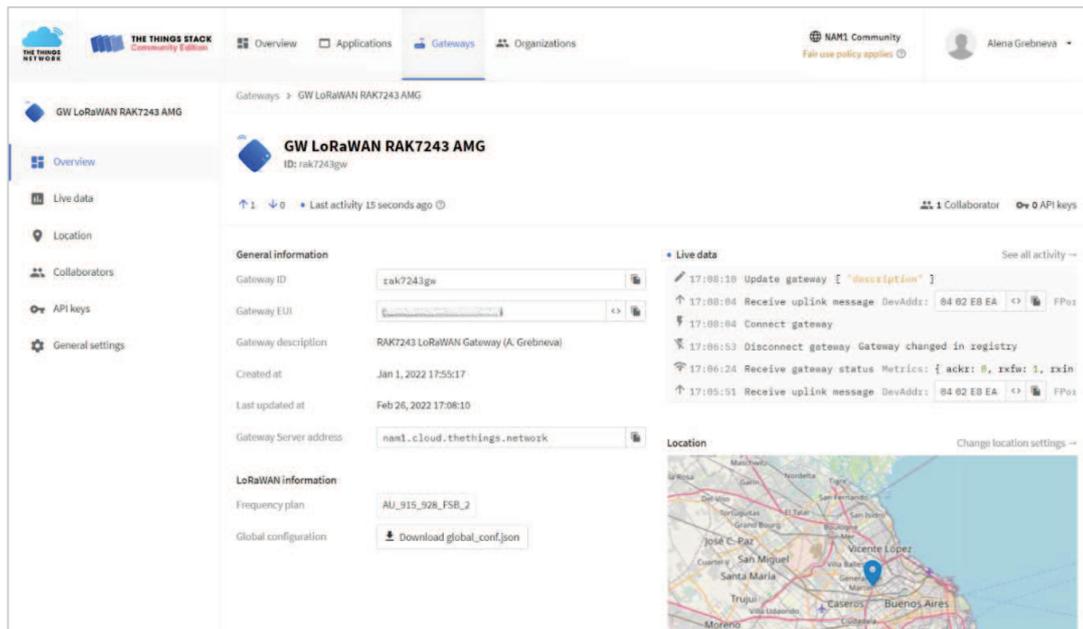


Figura 160 - Registro del *gateway* en TTS.

En el sitio se puede descargar el archivo de configuración *global\_conf.json*, que se debe combinar con el archivo *global\_conf.json* generado inicialmente por la configuración del *gateway* (explicada en la sección 3.4.1), para establecer los parámetros del controlador de banda base SX1301 (Figura 161), de los controladores del enlace de radio SX1257 (Figura 162) y del enlace a través de internet con el servidor de TTS (Figura 163).

```
"SX1301_conf": {
  "lorawan_public": true,
  "clksrc": 1,
  "clksrc_desc":
  "antenna_gain": 0,
  "antenna_gain_desc": "antenna gain, in dBi",
}
```

Figura 161 – Configuración del SX1301.

```
"radio_0": {
  "enable": true,
  "type": "SX1257",
  "freq": 917200000,
  "rssi_offset": -166.0,
  "tx_enable": true,
  "tx_freq_min": 915000000,
  "tx_freq_max": 928000000
},
```

Figura 162 - Configuración del SX1257.

```
"gateway_conf": {
  "gateway_ID": "XXXXXXXXXXXXXXXXXX",
  "server_address": "nam1.cloud.thethings.network",
  "serv_port_up": 1700,
  "serv_port_down": 1700,
  "keepalive_interval": 600,
```

Figura 163 – Configuración del enlace con el servidor TTS.

### 3.4.3. Registro de una aplicación en TTS

Una vez que se registra el *gateway* en TTS, se debe crear una aplicación que represente un proyecto o caso de uso en particular.

Esto permite agrupar nodos (*end devices*) de una manera lógica y definir un formato de datos para todos los nodos, así como diferentes opciones de integración, grupos de trabajo y configuraciones globales.

En el marco del presente proyecto se creó la aplicación “**Monitoreo instalación fotovoltaica FUNINTEC**” con un único nodo. El procedimiento de configuración de la aplicación se explica de manera detallada en la sección 1.2 de anexo 2. En la Figura 164 se muestra el resultado de la configuración.

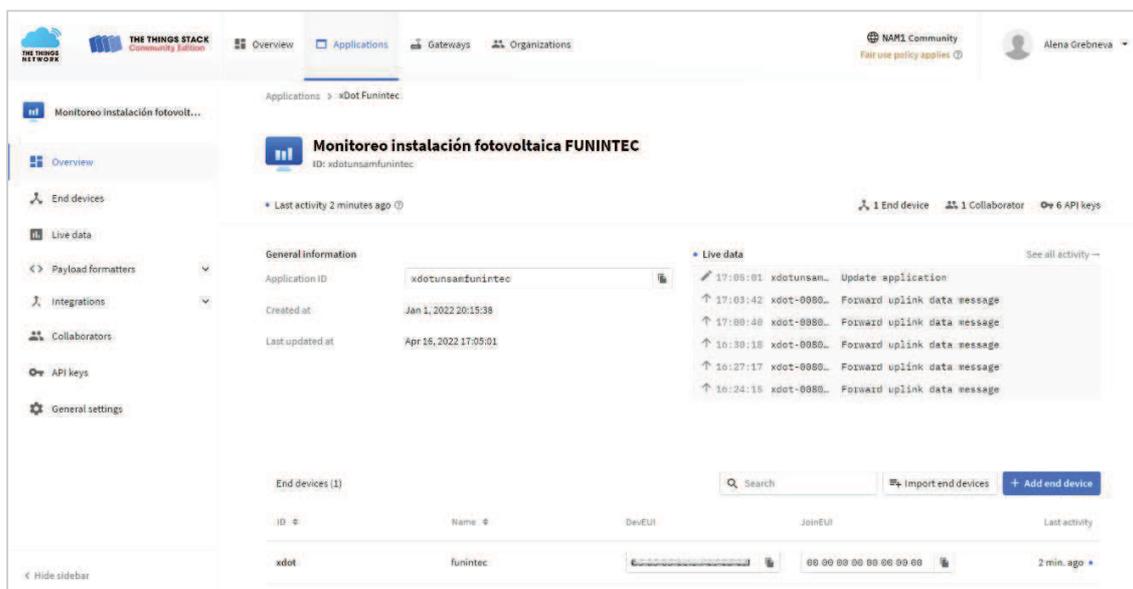


Figura 164 - Vista de la aplicación creada en TTS.

### 3.4.4. Registro del módulo LoRa (xDot) en TTS

Para que el servidor de TTS pueda autorizar la autenticación y recibir los *uplinks* del nodo IoT, este también debe estar dado de alta y asociado a una aplicación.

En la sección 1.3 del anexo 2 se describe detalladamente el procedimiento de registro de un dispositivo en la consola de TTS.

Como puntos principales, se debe registrar el dispositivo (en este caso es el xDot) con el correspondiente EUI provisto por el fabricante, como se ve en la Figura 165.

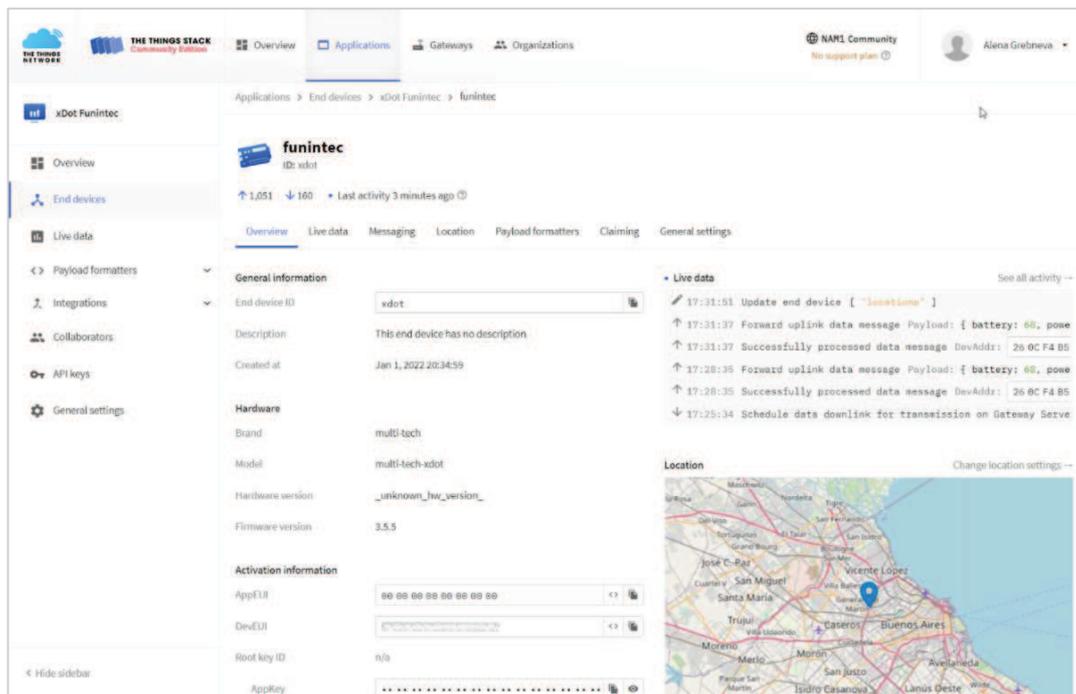


Figura 165 - Vista del dispositivo configurado en TTS.

Asimismo, como se puede ver en la Figura 166, se debe configurar el plan de frecuencias de manera que coincida con el del *gateway* y la forma de activación OTA junto con la correspondiente clave de red *NwkSKey*, de manera que coincida con la programación del dispositivo xDot.

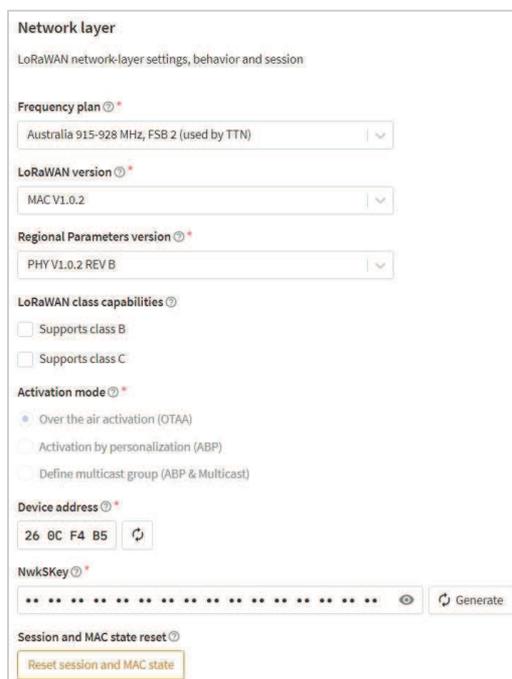


Figura 166 - Configuración de red del nodo.

Para procesar los datos que se trafican en los dispositivos finales, ya sea para el envío hacia servicios externos a TTS, para convertir el *payload* binario en valores legibles para humanos, o

para realizar cualquier otro tipo de conversión de datos tanto para *uplink* como para *downlink*, en algunos casos se requiere utilizar una función de decodificación o formateador de *payload*.

En la Figura 167 se muestra el código *javascript* personalizado para decodificar el *uplink* con la información del *payload* del xDot.

```
function decodeUplink(input, port) {  
  var data = {};  
  var rad = (input.bytes[0] << 8) + input.bytes[1];  
  data.radiation = rad;  
  var pow = (input.bytes[2] << 8) + input.bytes[3];  
  data.power = pow;  
  var t1 = (input.bytes[4] << 8) + input.bytes[5];  
  data.temp1 = t1;  
  var t2 = (input.bytes[6] << 8) + input.bytes[7];  
  data.temp2 = t2;  
  var tc = input.bytes[8];  
  data.tempcab = tc;  
  var rssi = input.bytes[9];  
  data.rssi = rssi;  
  var bat = input.bytes[10];  
  data.battery = bat;  
  var st = input.bytes[11];  
  data.states = st;  
  
  return {  
    field1: rad,  
    field2: pow,  
    field3: t1,  
    field4: t2,  
    field5: tc,  
    field6: rssi,  
    field7: bat,  
    field8: st,  
    data: data,  
  };  
}
```

Figura 167 - Función que decodifica el *uplink* con los datos del *payload*.

Una vez decodificado todo el *payload*, se reciben las tramas de datos desde el nodo en el *network server* de TTS, y se reenvían hacia los servicios conectados a través de las opciones de integración, como se muestra en la Figura 168.

The screenshot shows the 'funintec' dashboard for device 'ID: xdot'. It displays a table of messages with columns for Time, Type, and Data preview. The messages include 'Forward uplink data mess...' and 'Successfully processed d...'. The data preview for the uplink messages shows a JSON object with fields: battery, power, radiation, rssi, states, temp1, temp2, and tempcab. For example, one message at 17:01:45 shows: { battery: 86, power: 80, radiation: 1145, rssi: 178, states: 206, temp1: 2698, temp2: 2469, tempcab: 25 }.

Figura 168 - Datos recibidos desde el nodo y transmitidos al *Network Server* de *The Things Stack*.

### 3.4.5. Integración de datos con AllThingsTalk

Si bien la visualización de los datos en contexto no es parte del alcance del proyecto, para realizar las pruebas y el monitoreo del correcto funcionamiento del nodo IoT se requirió de la construcción de un panel de visualización y se optó por el uso de la plataforma en la nube *AllThingsTalk*, que se describió en la sección 2.1.9. Se empleó la versión gratuita que permite

definir hasta 10 dispositivos y almacenar hasta 3 meses de datos en la nube con resolución de hasta 1 minuto, lo cual es suficiente para las pruebas del dispositivo implementado.

La integración se implementa mediante *webhooks* desde la consola de TTS, donde se tiene una plantilla predefinida para *AllThingsTalk*. En la sección 1.4 del anexo 2 se explican de manera detallada los pasos para configurar la integración entre ambos servicios.

Esta integración garantiza que cada vez que los datos del xDot lleguen a TTS, se reenvíen inmediatamente a *AllThingsTalk*, se enruten hacia el correspondiente nodo y estén listos para ser utilizados en la plataforma de visualización. La Figura 169 muestra la configuración del *webhook* de ATT, en la consola de TTS.

The screenshot shows the configuration page for a webhook in the AllThingsTalk Maker interface. The page is divided into several sections:

- Template information:** Shows the logo for AllThingsTalk Maker and the tagline "Your accessible IoT Platform for rapid development".
- General settings:** Includes a "Webhook ID" field with the value "atm" and a "Webhook format" dropdown menu set to "JSON".
- Endpoint settings:** Includes a "Base URL" field with the value "https://api.allthingstalk.io/proxy/network/thingsnetwork3", a "Downlink API key" field with a masked key, and a note stating "The API key will be provided to the endpoint using the 'X-Downlink-Apikkey' header".
- Additional headers:** Includes an "Authorization" field with the value "Bearer maker:4Shz0EcF0hcRHULY3Cq7lXMc0VDD" and a red error icon.
- Enabled messages:** Includes a note: "For each enabled message type, an optional path can be defined which will be appended to the base URL".
- Uplink message:** Includes a checkbox labeled "Enabled" which is checked, and a text field with the value "/path/to/webhook".

Figura 169 - Configuración del *Webhook* para *AllThingsTalk*.

Para recibir los datos desde TTS, en la plataforma ATT se creó un *ground*, que es el equivalente a una aplicación en TTS y se registró el dispositivo xDot con el mismo *Dev EUI* provisto por el fabricante, de modo que coincide con la configuración en TTS.

The screenshot shows the AllThingsTalk Maker dashboard. The header includes the logo "FUNINTEC" and "AllThingsTalkMaker" with an "UPGRADE" button. Below the header is a search bar and a "FILTERS" button. The main content area displays a table of devices:

DEVICE	DEVICE ID	OWNER	LPWAN	WATCHDOG	ORIGIN	LAST UPDATED
xDot type: custom lora	s1btQYASrBkDmjz1P...	You	The Things Networ...	Set to 30m	Native	a minute ago

Figura 170 - Definición del dispositivo en el panel de configuración de *AllThingsTalk*.

Asimismo, se definió la conversión del *payload* por medio de ABCL o *AllThingsTalk Binary Conversion Language* (detallado en la sección 2.1.9.1), para convertir datos binarios del *uplink* enviado desde TTS en un formato inteligible por ATT y para crear estructuras de datos conocidas como *assets* o activos en ATT.

El código correspondiente se basa en una estructura JSON y el resultado se observa en la Figura 171.

```
{
  "sense": [
    {
      "asset": "radiation",
      "value": {"byte": 0, "bytelength": 2, "type": "integer", "calculation": "val/10"}
    },
    {
      "asset": "power",
      "value": {"byte": 2, "bytelength": 2, "type": "integer", "calculation": "val"}
    },
    {
      "asset": "temp_hi",
      "value": {"byte": 4, "bytelength": 2, "type": "integer", "calculation": "val/100"}
    },
    {
      "asset": "temp_lo",
      "value": {"byte": 6, "bytelength": 2, "type": "integer", "calculation": "(val)/100"}
    },
    {
      "asset": "tempc",
      "value": {"byte": 8, "signed": false}
    },
    {
      "asset": "rssi_wifi",
      "value": {"byte": 9}
    },
    {
      "asset": "battery",
      "value": {"byte": 10}
    },
    {
      "asset": "bat_charging",
      "value": {"byte": 11, "bit": 7, "type": "boolean"}
    },
    {
      "asset": "st_mbtcp",
      "value": {"byte": 11, "bit": 6, "type": "boolean"}
    },
    {
      "asset": "st_ads1115",
      "value": {"byte": 11, "bit": 5, "type": "boolean"}
    },
    {
      "asset": "st_max17043",
      "value": {"byte": 11, "bit": 4, "type": "boolean"}
    },
    {
      "asset": "ESP32_tout",
      "value": {"byte": 11, "bit": 3, "type": "boolean"}
    },
    {
      "asset": "UART_err",
      "value": {"byte": 11, "bit": 2, "type": "boolean"}
    },
    {
      "asset": "st_inverter",
      "value": {"byte": 11, "bit": 0, "bitlength": 2}
    }
  ]
}
```

Figura 171 – Código completo para cada activo con el formato del *payload* en *AllThingsTalk*.

Para este proyecto, se emplean los activos físicos que representan las variables de las mediciones o estados generados por el nodo IoT y además se define un activo virtual para *watchdog* que monitorea el estado del dispositivo y genera alertas cuando no se reciben datos de este por más de 30 minutos.

El uso de ABCL permite realizar operaciones matemáticas básicas sobre el valor de cierto activo como, por ejemplo, convertir las unidades de la irradiancia o la temperatura de los paneles que, como se detalló en la sección 3.3.2.2, se envían multiplicados por 10 y por 100 respectivamente, de manera que los activos contengan el valor final en las unidades deseadas inmediatamente luego de la llegada del dato desde TTS.

Además, permite extraer bits individuales o rangos de bits desde el byte de estados para poder mostrarlos como indicadores en el panel de visualización. El resultado se muestra en la Figura 172.

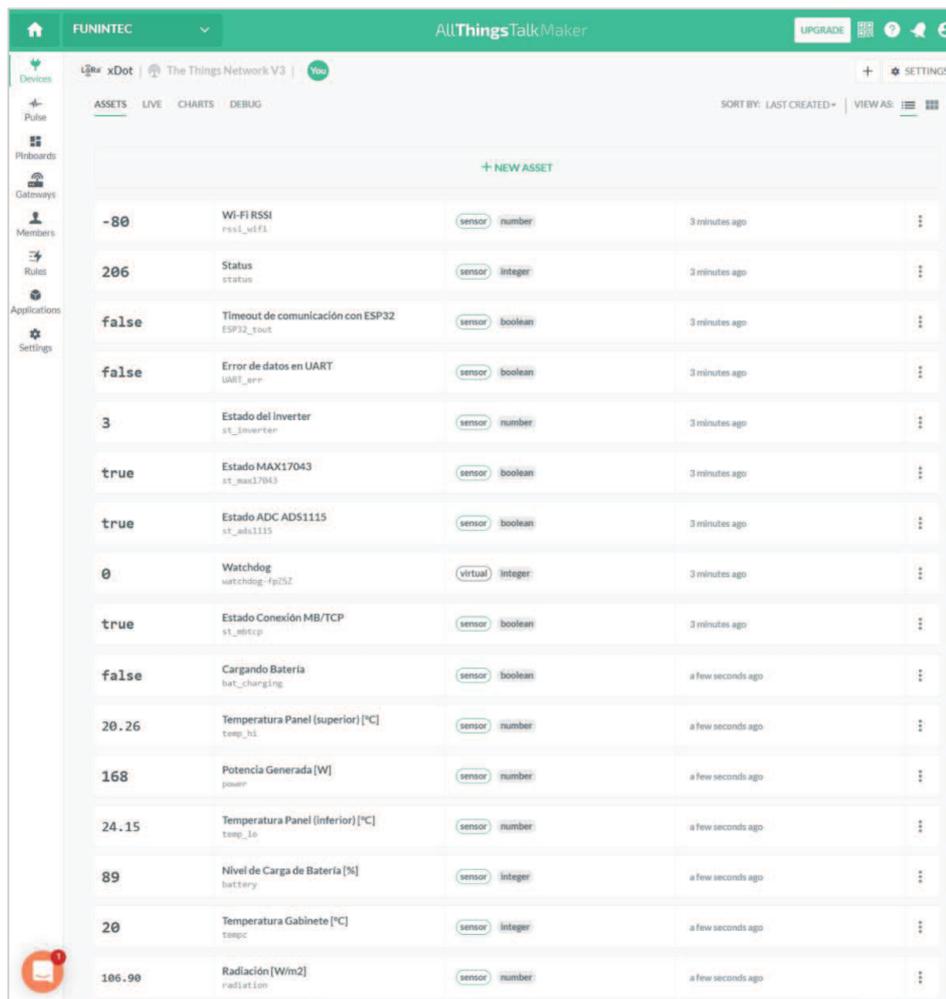


Figura 172 - Definición de variables contenidas en el *payload* como *assets*.

Desde el panel de configuración de ATT es posible monitorear los datos de los activos y también crear un panel de visualización que se puede compartir con otros usuarios o crear un enlace público accesible para cualquier persona que no se encuentre registrada en ATT.

En el presente proyecto se creó un panel de visualización que muestra en un gráfico de tendencia los datos de irradiancia y potencia generada durante la última hora, en otro gráfico de tendencia se muestra la comparación de la temperatura de los paneles superior e inferior en la última hora, y el estado de la conexión del *inverter* a la red.

También se visualizan datos de funcionamiento del nodo como porcentaje de carga de la batería interna, la temperatura en el interior del gabinete, la pérdida de la señal de la conexión Wi-Fi con el *inverter*, el estado de la comunicación Modbus/TCP y el estado de los módulos de adquisición de datos (ADC y medidor de carga de la batería).

Además, se incluyen gráficos de tendencia individuales de las últimas 24 horas para cada una de las variables medidas, de manera que se tenga información inmediata y una comparación diaria de las variaciones.

En la Figura 173 se muestra el panel diseñado para el seguimiento del funcionamiento del nodo IoT durante la fase de implementación y pruebas, que además se puede utilizar en producción.

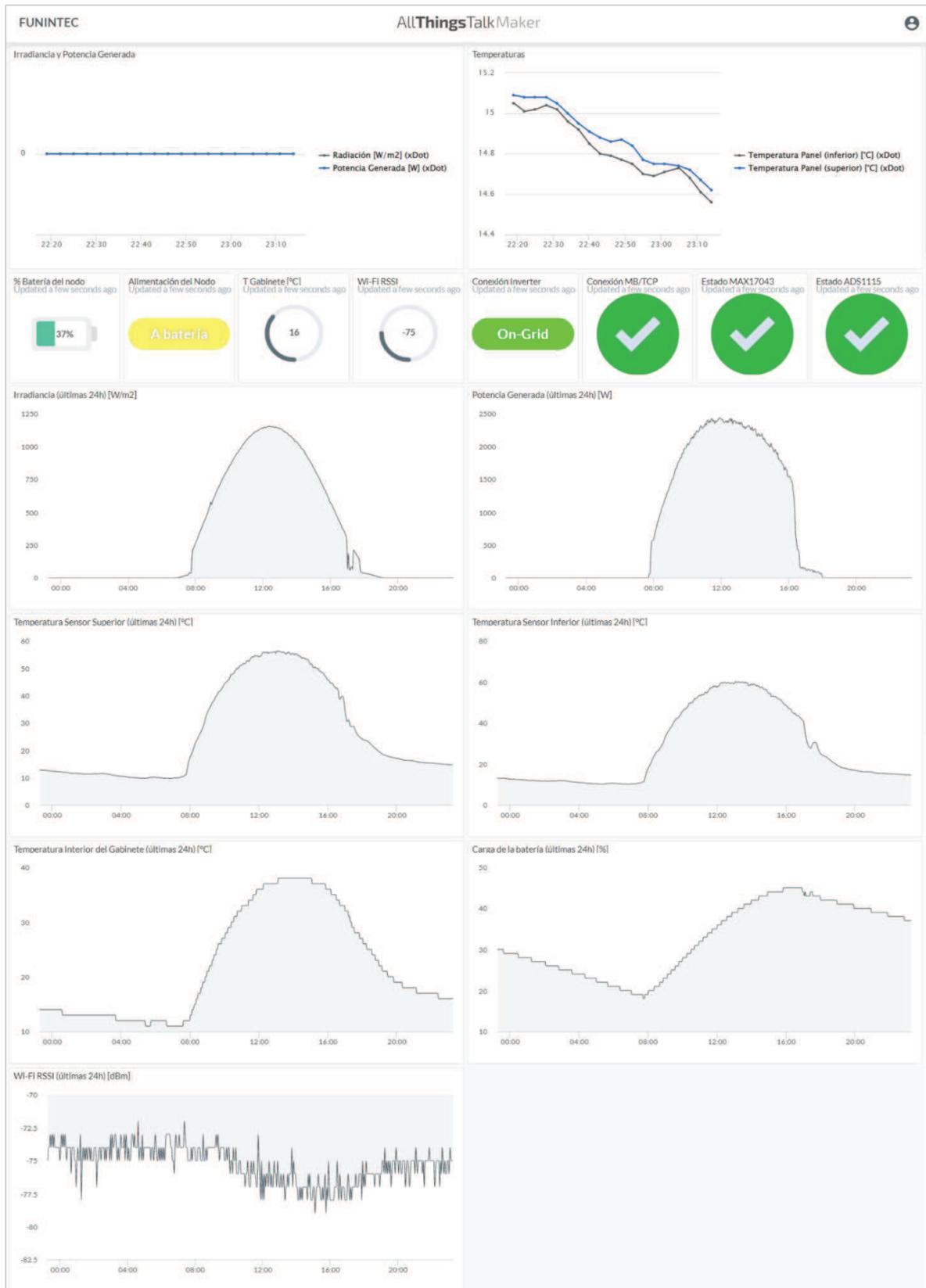


Figura 173 - Panel de visualización público de la plataforma *AllThingsTalk*.

## 4. Ensayos y resultados

En esta sección se profundizará en todas aquellas pruebas realizadas durante la implementación del nodo IoT en la instalación solar fotovoltaica del centro tecnológico FUNINTEC, la solución de los problemas que surgieron y los resultados obtenidos.

Los datos mostrados a continuación no llevan carácter analítico sobre el rendimiento de la instalación fotovoltaica y se emplean con fines de diagnóstico de funcionamiento del nodo IoT desarrollado en el marco del proyecto. Esta información permanece almacenada en la plataforma ATT por un período de tres meses y se puede descargar para revisión o utilización en análisis más avanzados.

### 4.1. Comunicación nodo IoT – *gateway* – TTS

Una vez que el *gateway* se registra en la red de TTS, siempre que tenga conexión a internet y la red tenga abierto el puerto TCP 1700, comienza a enviar mensajes de estado para indicar que se encuentra activo (Figura 174, recuadro rojo) y cualquier dispositivo que soporte LoRaWAN dentro del radio de cobertura de la antena puede iniciar una comunicación con TTS a través de este, siempre que las configuraciones se hayan hecho de manera apropiada.

En la Figura 174 se indica con un recuadro de color verde el *uplink* correspondiente a los datos enviados por el nodo IoT (módulo LoRa xDot) donde se indican métricas de la conexión como el SNR y el RSSI, a partir de las cuales se puede estimar la calidad de la señal.

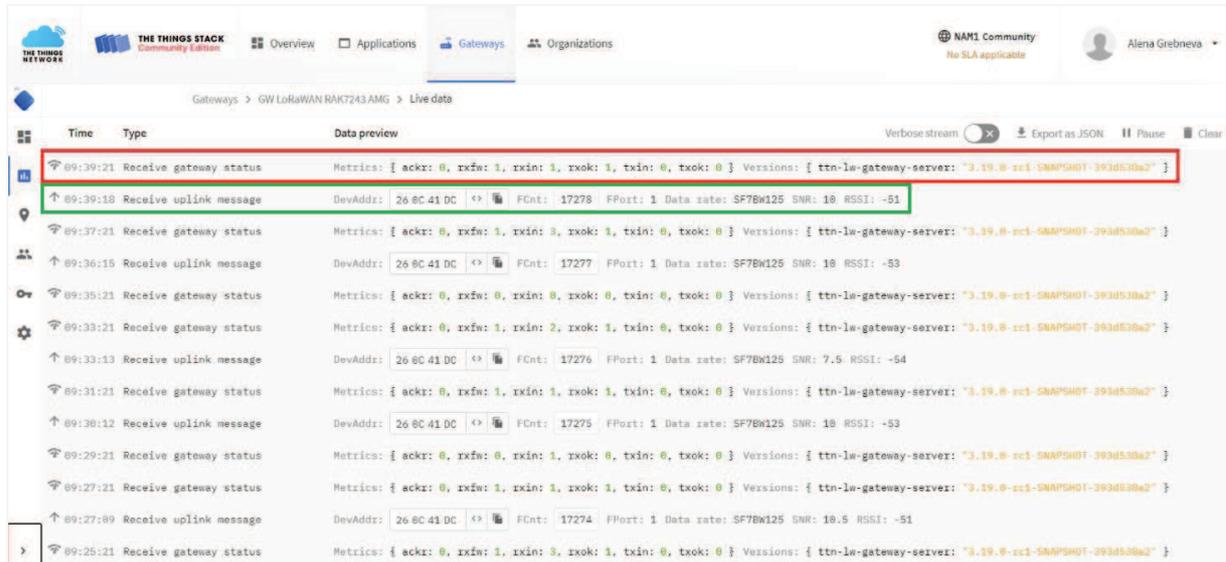


Figura 174 - Consola de TTS con estados del *gateway* RAK7245.

#### 4.1.1. Cálculo de atenuación del espacio libre

La distancia que separa el nodo de IoT y el *gateway* es  $D_{\text{Cat}}=0,003$  km en línea de visión, mientras que la distancia que separa el nodo de telemetría del *inverter* es  $D_{\text{Inv}}=0,0075$  km en línea de visión. Como se mencionó en la sección 2.1.7, la banda utilizada en Argentina es AU 915-928 (2da sub-banda).

De acuerdo con la Figura 175 que muestra el detalle de eventos de los *payloads* que recibe el *gateway* en la plataforma TTS, es posible observar que en determinado instante utiliza la frecuencia  $f=918$  MHz. Esta frecuencia no es fija y cambia dinámicamente dentro de los 8 canales que forman la segunda sub-banda.

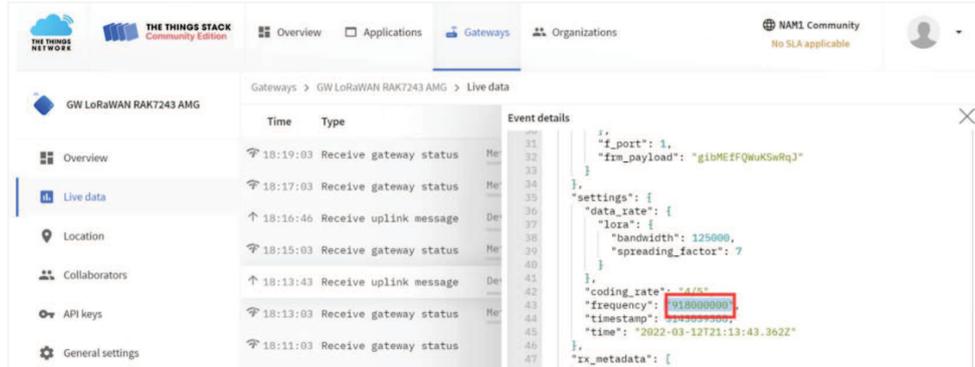


Figura 175 - Frecuencia de 918 MHz en detalle de eventos del *gateway* en TTS.

Tomando  $f = 918$  MHz y  $D_{Gal} = 0,003$  km, la atenuación del espacio libre para la señal LoRa, será:

$$FSPL = 20 \times \log(0,003) + 20 \times \log(918) + 32,44 = 41,24 \text{ dB}$$

Ecuación 40 - Valor en dB de la atenuación de la señal LoRa entre el nodo de telemetría y el *gateway*.

Este cálculo no contempla interferencia de ningún tipo entre el nodo y el *gateway* lo que explica que el valor obtenido sea menor que el que se observa en la práctica (entre -51 y -54 dBm, como se observa en la Figura 175, ya que existen estructuras edilicias entre ambos equipos.

En caso de modificarse la distancia entre el nodo y *gateway*, este valor también se verá afectado a medida que se incremente la separación.

## 4.2. Medición de nivel de batería

La Figura 176 muestra una gráfica semanal de la carga y descarga del arreglo de baterías del nodo IoT (en %) durante la semana del 28/03/2022 al 03/04/2022, generada en el panel de administrador de *AllThingsTalk Maker*.



Figura 176 - Currva de medición de nivel de batería del nodo.

A partir de un análisis de los datos diarios y en función de las estadísticas de la semana elegida, el sistema tiene una descarga del orden del 18 % diario entre las 16:30 horas y las 7:40 horas del día siguiente (aproximadamente en una ventana de 15 horas).

Asimismo, la carga en un día soleado es de alrededor de un 23 %, por ello se observa una tendencia creciente en la carga a lo largo de la semana.

Si se contempla el peor escenario donde el arreglo de paneles que conforma el sistema de alimentación tenga algún tipo de falla y deje de alimentar al arreglo de las baterías, la descarga en 24 horas rondaría en el orden del 28,8 %, de modo que la autonomía será cercana a 3,5 días, que resulta menor que la calculada en la sección 3.1.2.

Este resultado indica que la autonomía nominal de la batería es menor a la especificada por el fabricante. Sin embargo, con el comportamiento observado el nodo se mantuvo funcionando sin inconvenientes incluso durante los días nublados, cuando la potencia generada por el arreglo solar era suficiente para alimentar la electrónica y cargar la batería, aunque en menor proporción.

Por otra parte también se observa que los paneles fotovoltaicos generan menos potencia de la requerida para mantener la carga de la batería al 100% durante el día y sustentar el consumo diario solamente con energía solar fotovoltaica.

### 4.3. Medición de irradiancia

La Figura 177 muestra el pronóstico del clima entre los días 28 de marzo y 3 de abril de 2022 en Villa Lynch (locación del FUNINTEC y de la instalación solar fotovoltaica), obtenido del sitio web *The Weather Channel* [107].



Figura 177 - Pronóstico del 28 de marzo al 3 abril de 2022.

La Figura 178 muestra una gráfica semanal que se obtuvo desde el panel de configuración de *AllThingsTalk*, que contempla la semana del 28 de marzo al 3 de abril de 2022, donde se observa la medición de la irradiancia (en kW/m<sup>2</sup>) realizada con el nodo IoT.



Figura 178 – Curva de medición de irradiancia.

A partir de la información climática se pueden analizar los gráficos de cada día de la semana elegida, los días inestables, nublados y de lluvia son los que muestran picos irregulares en su gráfica mientras que los días soleados muestran una curva más regular sin variaciones bruscas.

Similarmente, se puede apreciar ese mismo efecto en las curvas de los días soleados, nublados y de lluvia en los distintos parámetros monitoreados por el nodo: medición de temperatura en los paneles fotovoltaicos, así como la temperatura del gabinete y en la potencia generada por la instalación fotovoltaica.

Tomando, por ejemplo, la medición de irradiancia para el día 28 de marzo la medición refleja valores mayores a cero entre aproximadamente las 6:50 y las 19:10 horas, como se observa en la Figura 179.

Por otra parte, entre las 17:00 y las 17:30 horas se observa una caída brusca y aparentemente anormal de la irradiancia que luego continúa con la tendencia y que se repite en las mediciones de los días posteriores y se debe a la sombra producida sobre la instalación por la estructura metálica existente en el predio del FUNINTEC, ya que el ocaso se da justamente en la dirección de esta.



Figura 179 - Curva de Irradiancia para el día lunes 28/03/2022.

#### 4.4. Medición de potencia

La Figura 180 muestra la gráfica semanal enviada desde el nodo IoT de la medición de potencia generada (en kW) por la instalación solar fotovoltaica durante la semana del del 28/03/2022 al 03/04/2022. Contrastando la curva de potencia contra la curva de irradiancia se observa que la primera sigue un patrón similar a la segunda indicando que existe una correlación entre ambas variables.

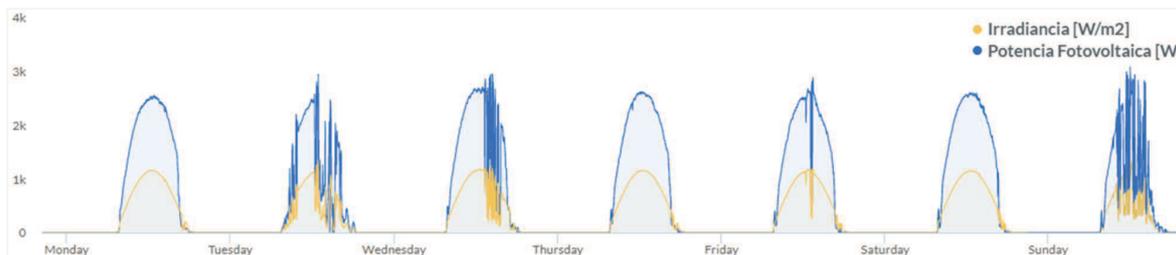


Figura 180 - Curva de medición de potencia fotovoltaica e irradiancia.

Como se mencionó en la sección 3.1.5.1, el puerto Ethernet del *inverter* se utiliza para el monitoreo remoto de la instalación con una solución propietaria del fabricante, por lo tanto, se empleó esta funcionalidad para obtener datos de la potencia generada con la herramienta *Ingecon Sun Manager* para la semana del 28 de marzo al 3 de abril de 2022.

En la Figura 181 se puede ver que la forma de los gráficos es casi idéntica a la mostrada en la Figura 180 (correspondiente al panel de monitoreo de *AllThingsTalk*). Si se observan diferencias esto se debe a que el período de las muestras difiere entre ambas aplicaciones, siendo de 3 minutos para el nodo IoT y 5 minutos para la aplicación *Ingecon Sun Manager*, aunque los datos salen de la misma fuente.

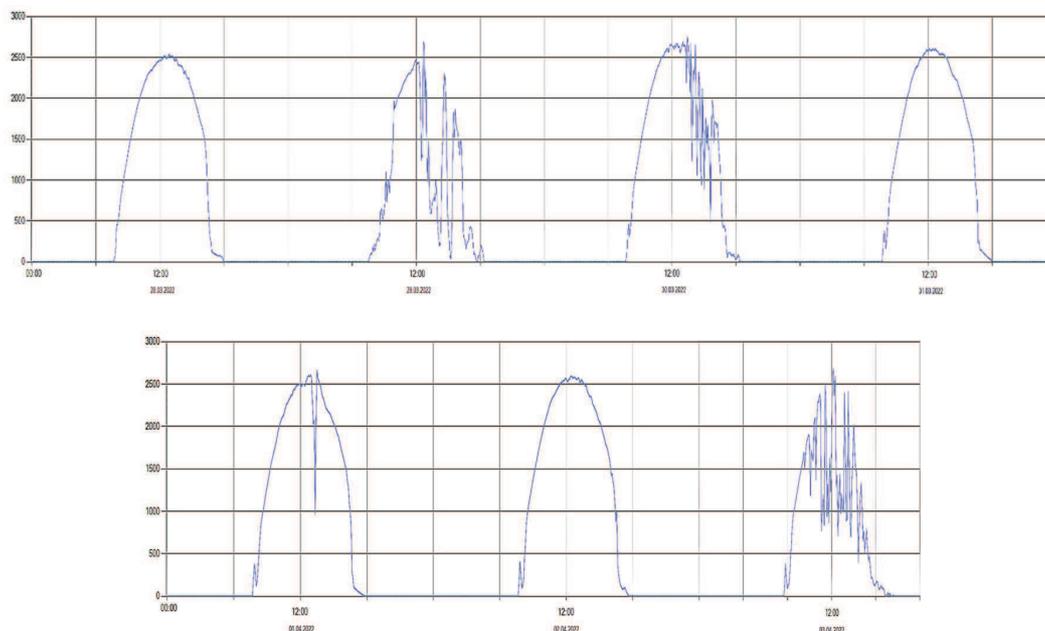


Figura 181 – Mediciones de potencia extraídos desde software *Ingecon Sun Manager*.

## 4.5. Medición de temperatura

### 4.5.1. Sensores PT1000 de paneles

La Figura 182 muestra una gráfica semanal que se obtuvo desde el panel de configuración de *AllThingsTalk*, donde se puede observar la fluctuación de la temperatura medida (en °C) por los sensores PT1000 colocados en dos paneles fotovoltaicos, uno en la fila superior y uno en la fila inferior de la instalación. Los datos mostrados corresponden a un registro semanal del 27 de marzo al 3 de abril de 2022. La ubicación de estos sensores se encuentra detallada en la sección 3.2.4.

En ambos casos se puede observar que la forma de las curvas de temperatura sigue una tendencia similar a las curvas de irradiancia y potencia fotovoltaica en los horarios donde hay incidencia solar, mientras que en horario nocturno la variación de temperatura sigue a la temperatura ambiente.



Figura 182 – Curva de medición de temperatura en el paneles fotovoltaicos.

Por ejemplo, para el día 2 de abril como se muestra en la Figura 183, se observa que ambas curvas siguen el mismo patrón de variación, aunque durante el día la temperatura del panel inferior es levemente superior, llegando a un pico de 3 °C de diferencia, que puede variar según las condiciones climáticas, siendo notablemente menor en los días lluviosos.

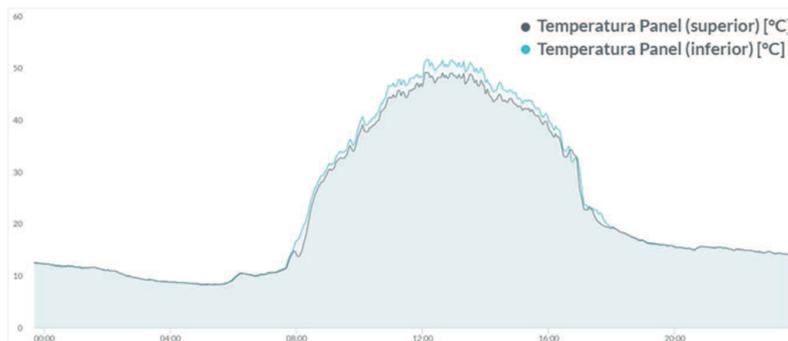


Figura 183 – Curva de temperatura temperatura de ambos paneles para el día sábado 02/04/2022.

#### 4.5.2. Sensor DHT11 del gabinete

La Figura 184 muestra la gráfica semanal de la temperatura medida (en °C) por el sensor DHT11 colocado en el gabinete que contiene el nodo de telemetría.

La ubicación de este sensor se puede observar en la sección 3.1.9, que describe el montaje general de todos los componentes del nodo.

El monitoreo de esta variable es relevante para el diagnóstico del correcto funcionamiento, integridad de la electrónica del nodo y de las comunicaciones involucradas en el sistema ya que, de acuerdo con la información detallada en la sección 3.2.1, este se encuentra instalado debajo de los paneles fotovoltaicos y se observa que la temperatura del gabinete tiene un patrón de variación similar que la temperatura de los paneles, ya que el gabinete se encuentra ubicado detrás de los paneles fotovoltaicos.

Los valores medidos semanalmente se encuentran dentro de los rangos de temperatura adecuados de acuerdo con las especificaciones técnicas de los fabricantes de cada componente, cuyas características se detallaron en la sección 2.1.



Figura 184 – Curva de temperatura gabinete del nodo - Semana del 27/03/2022 al 03/04/2022.

### 4.6. Comunicación nodo IoT – *inverter*

La distancia que separa el nodo de IoT del *inverter* es  $D_{Inv}=0,0075$  km en línea de visión. Tomando  $f= 2,4$  GHz (frecuencia asociada a una señal Wi-Fi) y  $D_{Inv}=0,0075$  km, la atenuación del espacio libre para la señal Wi-Fi, será:

$$FSPL = 20 \times \log(0,0075) + 20 \times \log(2400) + 32,44 = 57,54 \text{ dB}$$

Ecuación 41 - Valor en dB de la atenuación de la señal Wi-Fi entre el nodo y el *inverter*.

Este dato se calcula sobre la premisa de que no existe ninguna interferencia espacial entre el nodo y el *inverter*, aunque en la práctica existen estructuras edilicias y otros equipos en la banda de frecuencia que también pueden introducir atenuación adicional.

Durante el inicio de la fase de pruebas en línea se observaron fallas de recepción de datos, que resultaron en discontinuidades en los gráficos de tendencia de todos los datos recibidos, como se observa en la Figura 185 para los datos de irradiancia y potencia generada.

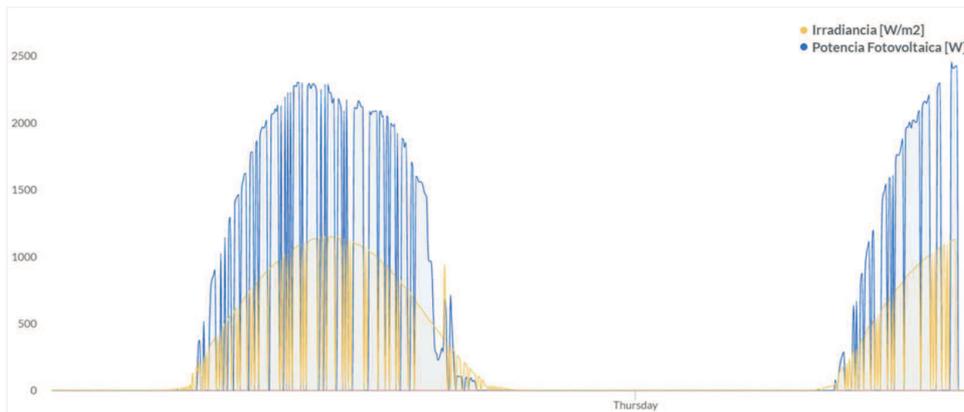


Figura 185 - Intermitencia observada en la recepción de datos para los días 2 y 3 de marzo de 2022.

Este problema surgió debido a que en la programación del módulo LoRa (xDot) el tiempo de espera por los datos del módulo Wi-Fi (ESP32) en un inicio se definió en 20 s. En determinados instantes de medición, cuando el ESP32 tardaba más de 20 s en comunicarse con el *inverter*, el xDot asumía la falla de comunicación e inicializaba todos los bytes correspondientes a las mediciones del *payload* en cero. El problema se solucionó parcialmente extendiendo el tiempo de espera a 40 s y luego a 60 s.

Sin embargo, la comunicación entre el ESP32 con el *inverter* seguía fallando con frecuencia y se perdían datos de medición de potencia, mientras que las mediciones de los sensores se mostraban con continuidad.

En la Figura 186 se observa que la medición de irradiancia (línea amarilla) es continua, mientras que la medición de potencia tiene discontinuidades.



Figura 186 – Intermitencia observada en los datos de potencia generada para el día 16/03/2022.

Como los datos de diagnóstico generados por el nodo no eran suficientes para diagnosticar el problema, se agregó la medición del RSSI (explicado en la sección 2.1.6.8) de la señal recibida por el ESP32 desde el AP del *inverter* y se observó que variaba entre -80 y -90 dBm (Figura 187), valores muy por debajo de la atenuación calculada en la Ecuación 41 y de acuerdo con los niveles mostrados en la Figura 56 de la sección 2.1.6.8, es un nivel de señal bajo a muy bajo que implica pérdida de datos.

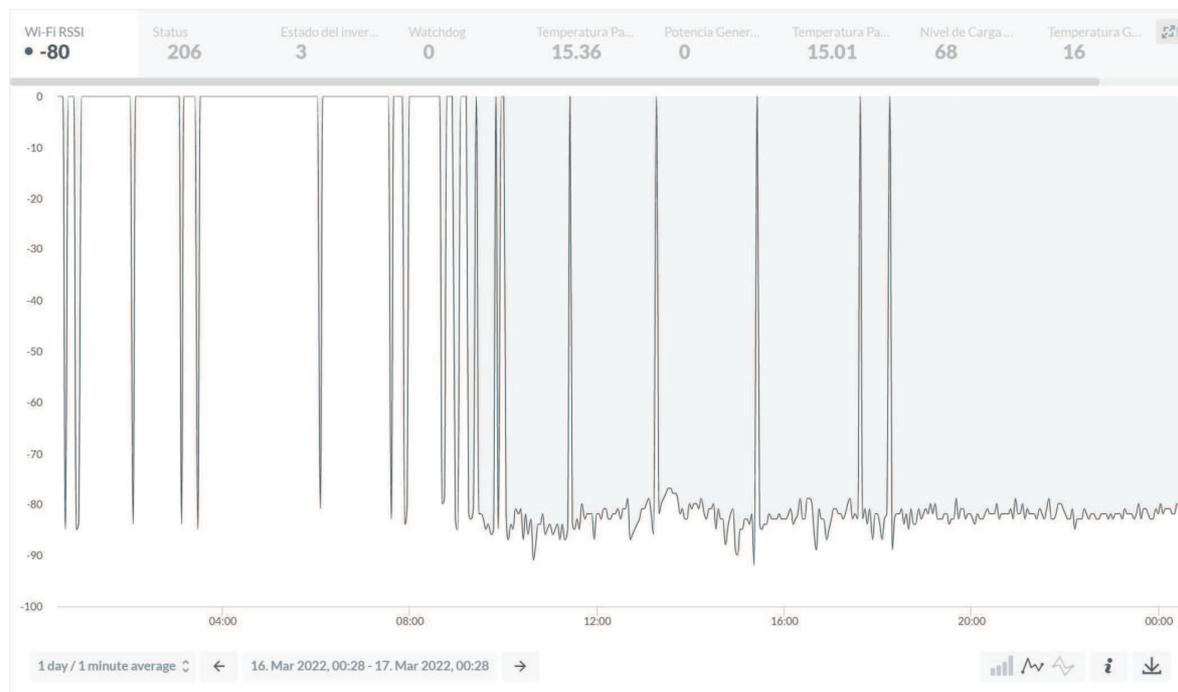


Figura 187 - Medición de RSSI (Wi-Fi) para el día 16 de marzo de 2022.

Por otra parte, se observó que el RSSI tiende a empeorar conforme aumenta la temperatura del interior del gabinete en horarios cercanos al mediodía, especialmente durante días soleados.

Esto se debe a que, a diferencia de la antena LoRa que es direccionable y se encuentra fuera del gabinete, la antena Wi-Fi se encuentra sobre la PCB del módulo Wi-Fi (ESP32) y en el interior del gabinete, con lo cual las variaciones de temperatura también afectan su ganancia y no es posible controlar su orientación.

Adicionalmente, pueden haber factores de interferencia externos como dispositivos transmitiendo en la misma banda y canal esporádicamente, esto explica las variaciones como la pérdida brusca de señal que se observó en el día 19 de marzo en la Figura 188.

El problema se resolvió parcialmente desde el extremo del *inverter* variando la orientación de la antena Wi-Fi instalada en la placa de comunicación y aunque el nivel de señal tuvo una mejora y quedó en valores entre -75 y -85 dBm. Se trata de un nivel bajo para garantizar la una transmisión de datos óptima, por lo que eventualmente se siguen dando algunas fallas de comunicación ante factores que debilitan el nivel de señal de manera abrupta, aunque con menos frecuencia e impacto en el resultado final, como se observa en la Figura 188 para el día 18 de marzo y en adelante.

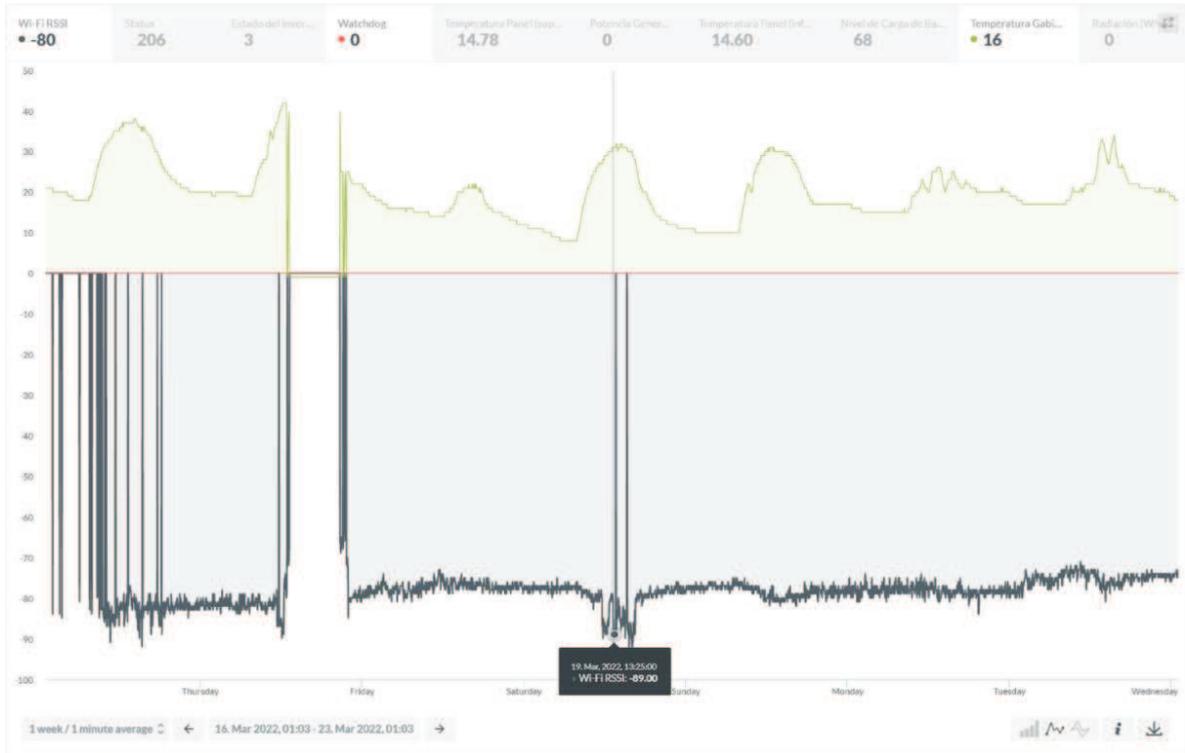


Figura 188 - Gráfico de temperatura del interior del gabinete y del RSSI para la semana del 16/03/2022 al 22/03/2022.

## 5. Conclusiones

En esta sección se expondrán las conclusiones de acuerdo con los resultados obtenidos y se abordarán próximos pasos a seguir en el futuro.

### 5.1. Desafíos durante el desarrollo y pruebas

Las restricciones sanitarias debido a la pandemia COVID-19 introdujeron algunas dificultades para los aspectos constructivos del dispositivo, porque no se tenía el acceso a las instalaciones de la UNSAM para fabricar placas y los tiempos y costos de servicio de terceros no se encasillaban en los previstos para el proyecto, de modo que se tuvo que llevar a cabo la construcción de las placas en condiciones caseras y por ello con resultados menos profesionales aunque satisfactorias para el resultado final.

El diseño modular permitió la construcción progresiva del dispositivo en distintas etapas, pudiendo probar cada una de ellas de manera independiente, uniendo luego todos los módulos en una misma placa para el prototipo.

Si bien esta modalidad simplificó el trabajo, a su vez aumentó el tamaño de la placa y por el uso de tiras de pines para el montaje de los módulos implicó falso contacto en algunas conexiones de los módulos que afectaron el funcionamiento.

Por otra parte, el uso de dos microprocesadores de diferentes fabricantes, uno para la comunicación con el *inverter* y procesamiento de mediciones y otro para el envío de datos, implicó desafíos para el desarrollo del firmware porque se tuvieron que utilizar dos entornos de desarrollo diferentes y programar la interacción entre ambos dispositivos.

Como el funcionamiento del dispositivo se debió evaluar sobre la instalación fotovoltaica del FUNINTEC, esto implicó que para la resolución de fallas como las mencionadas en la sección 4.6 se debió hacer el traslado y la correspondiente gestión de permiso y seguro para el acceso a la instalación.

### 5.2. Objetivos alcanzados

#### 5.2.1. Mínimo producto viable

Una de las mejores formas de validar la idea de este proyecto fue a través de la construcción de un MVP (*Minimum Viable Product*), que por definición se lo podría pensar como la versión del producto que permite dar la vuelta entera al circuito de crear-medir-aprender, con un mínimo esfuerzo y en un tiempo razonable [108].

Este MVP es un dispositivo básico que cuenta con funcionalidades esenciales y permite garantizar los requerimientos del nodo de IoT desarrollado.

A partir de su puesta en marcha y testeo, será posible reconstruir y mejorar el producto, para poder lanzar una nueva versión que contemple todas aquellas mejoras o modificaciones que requiera el MVP original, incluyendo o excluyendo características en caso de que fuera necesario.

El MVP es una primera versión del producto. Es la versión que permitirá recoger el máximo de información posible, validando todas sus características con el mínimo esfuerzo de tiempo y recursos.

En el marco del proyecto, el MVP contempla las funcionalidades básicas que se requieren para recopilar las mediciones necesarias en la evaluación del rendimiento de un sistema fotovoltaico, tales como medición de irradiancia, temperatura de las celdas y potencia fotovoltaica y el almacenamiento de dichas variables en un repositorio de donde se pueden descargar posteriormente para efectuar analíticas avanzadas, lo cual se cumplió con éxito en el prototipo funcional construido.

### 5.2.2. Resultados de las mediciones

Para la medición de irradiancia, el conjunto radiómetro y placa de polarización diseñada en este trabajo se calibró utilizando los métodos estandarizados, como se explica en la sección 4.3 y en el anexo 3. Esto implica que hasta el punto de conexión con el ADC las mediciones fueron validadas. A partir de la constante hallada se hizo el cálculo de conversión para el valor digital. Teniendo en cuenta que el empaquetamiento de datos y su posterior transmisión no afectan la calidad de las mediciones se puede concluir que no se encontraron diferencias en cuanto a magnitudes.

Para realizar la comparación directa de la exactitud y precisión de las mediciones generadas por el nodo IoT, en cuanto a la medición de la radiación, se debería tener instalado otro instrumento calibrado (del que no se disponía al momento de la ejecución del presente trabajo) en la misma inclinación que el radiómetro utilizado para las pruebas en la instalación fotovoltaica del FUNINTEC, por lo que se asume que a partir de la calibración y en contraste con los datos obtenidos de potencia mostrados en la sección 4.4, los resultados mostrados en la sección 4.3 son válidos.

Como se explica en el Anexo 3 (sección 1.1), se llevó a cabo la calibración de los sensores de temperatura PT1000 y se determinaron los coeficientes para cada uno de los sensores individualmente, teniendo un desfase entre ambos. Con estos coeficientes se determina la temperatura en un panel fotovoltaico de la fila inferior y uno en la fila superior.

A partir de los resultados mostrados en la sección 4.5 se observa que la medición de temperatura tiene exactitud entre ambos sensores, para evaluar la precisión en el momento de la ejecución del proyecto no se disponía de un instrumento calibrado en la instalación, por lo que se asume que las mediciones son válidas.

Actualmente, en el predio se encuentra instalada una estación de monitoreo comercial con un sensor de irradiancia y sensores de temperatura de celdas fotovoltaicas comerciales. Con las mediciones de la misma se evaluará a futuro la calidad de la solución diseñada en este proyecto a fines de comparar las ventajas y desventajas entre las diferentes plataformas.

La medición de potencia fotovoltaica se genera y se acondiciona internamente por la electrónica del *inverter*, con lo cual el nodo simplemente lee el valor final y lo transmite hacia la aplicación de monitoreo, mediante la aplicación *Ingecon Sun Manager* fue posible validar los datos obtenidos.

### 5.2.3. Comunicaciones

De acuerdo con los resultados expuestos en la sección 4.1 la comunicación mediante la red LoRaWAN hacia los servicios en la nube *The Thing Stack* y *AllThingsTalk* se realizó de manera satisfactoria sin mayores inconvenientes.

Sin embargo, como se explicó en la sección 4.6, surgieron algunos inconvenientes técnicos en la comunicación mediante Wi-Fi con el *inverter*, que derivaron en pérdida de datos y malfuncionamiento del nodo en general. Aunque se encontró una solución parcial que permite que la falla de comunicación Modbus/TCP no afecte el funcionamiento global del nodo IoT, no se logró resolver el problema en su totalidad, por lo que se deberá evaluar una solución a futuro para evitar pérdida de los datos de potencia generada.

#### 5.2.1. Autonomía

Como se expuso en la sección 4.6 el dispositivo tiene autonomía suficiente para funcionar de manera continua aún en condiciones climáticas que impliquen baja irradiancia solar, aunque se pueden mejorar aspectos como consumo y potencia de alimentación a partir de los cálculos realizados en la sección 3.1.2.

### 5.3. Próximos pasos

A continuación, se enumeran una serie de sugerencias para mejorar el prototipo implementado en el marco del proyecto, a partir de los resultados y desafíos antes expuestos:

- Contrastar las mediciones generadas por el nodo IoT contra instrumentos calibrados para determinar la precisión
- Unificar las comunicaciones Wi-Fi y LoRa en un solo dispositivo para evitar el desarrollo con dos microprocesadores diferentes y disminuir el consumo de energía
- Instalar una antena Wi-Fi externa tanto en el inverter como en el nodo para mejorar el RSSI de la comunicación
- Diseñar una fuente de alimentación unificada con entrada para fuente externa, energía solar fotovoltaica y salida para carga de batería y electrónica en reemplazo de los módulos prediseñados que se utilizan actualmente para mejorar la eficiencia de consumo de energía
- Adquirir e instalar un panel solar de alimentación de mayor potencia de modo que la batería cargue al 100% durante el día
- Unificar todos los módulos diseñados (electrónica de acondicionamiento de señal, ADC, procesamiento, alimentación y comunicaciones) en una sola PCB para disminuir el tamaño de la placa y hacer más eficiente la compatibilidad electromagnética
- Agregar monitoreo de la tensión de alimentación del circuito para compensar eventuales variaciones
- Implementar una franja horaria durante el funcionamiento de la instalación en la que el nodo envíe datos con mayor frecuencia y disminuir la actividad del nodo en horario nocturno

- Implementar una opción de actualización de firmware mediante la función *over-the-air*, de manera que la corrección de fallas o mejoras en el funcionamiento del nodo se pueda gestionar a distancia sin tener que trasladarse físicamente a la instalación del FUNINTEC
- Reubicar el gabinete del instrumento, de manera que no quede debajo de los paneles y el funcionamiento de la electrónica no se vea afectado por la variación de temperatura de estos.

# Bibliografía

- [1] U. Government, «COP26 - The Glasgow Climate Pact.,» 2021. [En línea]. Available: <https://ukcop26.org/>.
- [2] BP, «BP,» [En línea]. Available: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/primary-energy.html>.
- [3] I. -. I. R. E. Agency, «IRENA,» [En línea]. Available: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Highlights\\_2021.pdf?la=en&hash=1E133689564BC40C2392E85026F71A0D7A9C0B91](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2021.pdf?la=en&hash=1E133689564BC40C2392E85026F71A0D7A9C0B91).
- [4] I. -. I. R. E. Agency, «IRENA,» [En línea]. Available: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA\\_Power\\_Generation\\_Costs\\_2020\\_highlights\\_ES.pdf?la=en&hash=7167169864B1530F3947D1F6E5BB32260A93B4FB](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_highlights_ES.pdf?la=en&hash=7167169864B1530F3947D1F6E5BB32260A93B4FB).
- [5] C. Honsberg y S. Bowden, «<https://www.pveducation.org/>,» [En línea]. Available: <https://www.pveducation.org>.
- [6] Seslab. [En línea]. Available: [http://seslab.org/fotovoltaico/32\\_masa\\_de\\_aire\\_entre\\_la\\_atmosfera\\_y\\_la\\_superficie\\_terrestre.html](http://seslab.org/fotovoltaico/32_masa_de_aire_entre_la_atmosfera_y_la_superficie_terrestre.html).
- [7] IDEAM. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>.
- [8] SUNFIELDS, «Sunfields Europa,» [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/>.
- [9] C. energéticos, «Certificados energéticos,» [En línea]. Available: <https://www.certificadosenergeticos.com/energia-solar-beneficios-que-efecto-fotovoltaico>.
- [10] S. Gil, «¿Son imprescindibles las importaciones de gas en Argentina?,» 2014. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/261286033\\_Son\\_imprescindibles\\_las\\_importaciones\\_de\\_gas\\_en\\_Argentina](https://www.researchgate.net/publication/261286033_Son_imprescindibles_las_importaciones_de_gas_en_Argentina).
- [11] P. A. Cotfas, D. T. Cotfas, P. N. Borza, D. Sera y R. Teodorescu, «Solar Cell Capacitance Determination Based on an RLC Resonant Circuit,» de *Energies* 11 N°3: 672 - , 2018.
- [12] T. Díaz Corcobado y G. Carmona Rubio, *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Mc Graw Hill, 2018.
- [13] P. Chacón Santana, «ER Solar,» 2019. [En línea]. Available: <https://solar.eyr.mx/diferencia-entre-los-paneles-solares-monocristalinos-policristalinos-y-de-película-delgada/>.
- [14] Tecnosolab, «Tecnología Solar e Hidráulica S.L.,» [En línea]. Available: <https://tecnosolab.com/noticias/caracteristicas-electricas-de-los-paneles-solares/>.
- [15] M. A. Green, *General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling*, Wiley, 2003.
- [16] Cing, «Ingeniería Eléctrica Aplicada,» [En línea]. Available: <https://cing.com.ar/>.
- [17] Qksol, «QKSOL - Energy solutions,» [En línea]. Available: <https://qksol.com/reguladores-de-carga-genasun-buck-y-boost-la-solucion-a-todas-las-situaciones-posibles/#>.
- [18] G. d. S. Fe, «Reguladores, inversores y baterías,» [En línea]. Available: <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/12/M%C3%B3dulo-4-Inversores-reguladores-bater%C3%ADas.pdf>.
- [19] I. Standard, IEC 61724 - 1, 2017.
- [20] D. Evans, *The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet Is changing everything*, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011.
- [21] L. C. Karen y Rose Scott Eldridge, *La internet de las cosas - Una breve reseña*, Internet Society - ISOC, 2015.
- [22] I. Analytics, «IoT Analytics - Markets insights for the internet of things,» [En línea]. Available: <https://iot-analytics.com/>.
- [23] I. Analytics, «IoT Analytics - Market insights for the internet of things,» [En línea]. Available: <https://iot-analytics.com/top-10-smart-city-use-cases-prioritized-now/?fbclid=IwAR0hEunc8eVnQWEnkLLDREILaHqbDf7gVYVh5AfpBupj-wmi-EKgaqWEEY>.
- [24] I. Analytics, «IoT Analytics - Market insights for the internet of things,» [En línea]. Available: <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>.
- [25] I. -. I. R. E. Agency, «Internet of Things - Innovation landscape brief,» 2019.

- [26] S. K. Karampudi, «Internet of Things – Architecture,» [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/internet-things-architecture-sai-kiran-karampudi/>.
- [27] M. Jabraeil Jamal, B. Bahrami, P. Allahverdizadeh y F. Norouzi, IoT Architecture. In: Towards the Internet of Things, Springer , 2020.
- [28] L. IoT, «Which Wireless Network Should You Choose?,» [En línea]. Available: <http://www.lprsiot.com/networks/>. [Último acceso: 25 05 2022].
- [29] J. P. Bardyn, Melly, T. y Sormin, N, «IEEE - The era of LPWAN is starting now.,» *In European Solid-State Circuits Conference, ESSCIRC Conference 2016*, pp. 25-30, 2016.
- [30] Modbus.org, «Modbus,» [En línea]. Available: <https://modbus.org/>.
- [31] C. Eduardo, «Robótica, Automatización, control industrial, microcontroladores, electrónica digital,» [En línea]. Available: <http://robots-argentina.com.ar/didactica/que-es-la-comunicacion-serie/>.
- [32] W. Machine, «Internet archive - Wayback Machine,» [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20080414065440/http://todohard.awardspace.com/tutrs232/1.htm>.
- [33] E. Carletti, «Robótica, Automatización, control industrial, microcontroladores, electrónica digital,» [En línea]. Available: <http://robots-argentina.com.ar/didactica/descripcion-y-funcionamiento-del-bus-i2c/>.
- [34] IEEE, «IEEE 802.11ac Specification.,» 2021. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8457463>.
- [35] D. Vinci, «Domótica para todos,» [En línea]. Available: <http://domoticaparatodos.com/2016/11/introduccion-al-protocolo-modbus/>.
- [36] J. M. H. Torres, Introducción a las Redes de Comunicación Industrial, 2015.
- [37] M. Jiménez Buendía, Comunicaciones Industriales, Cartagena: Universidad Nacional de Cartagena.
- [38] M. Cerezuola Martínez, «Repositorio Univesidad Politécnica de Cartagena,» 2014. [En línea]. Available: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4338/pfc5902.pdf;jsessionid=FB53AB8E538D69002724D320FA08F681?sequence=1>.
- [39] M. org, «Modbus.org,» [En línea]. Available: [https://modbus.org/docs/Modbus\\_Messaging\\_Implementation\\_Guide\\_V1\\_0a.pdf](https://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0a.pdf).
- [40] Modbus.org, «<http://www.modbus.org>,» [En línea].
- [41] SEMAK, «SEMAK SA - Distribuidor de Componentes Electronicos,» [En línea]. Available: <https://www.semak.com.ar/tienda/lorawan-que-es>.
- [42] Semtech, «Semtech: Analog and Mixed-Signal Semiconductors,» [En línea]. Available: <https://www.semtech.com>.
- [43] L. Alliance, «Heltec Automation.,» 2017. [En línea]. Available: [https://resource.heltec.cn/download/LoRaWANRegionalParametersv1.0.2\\_final\\_1944\\_1.pdf](https://resource.heltec.cn/download/LoRaWANRegionalParametersv1.0.2_final_1944_1.pdf).
- [44] E. N. d. Comunicaciones, «ENACOM,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.enacom.gob.ar/multimedia/normativas/2018/res581MM.pdf>.
- [45] E. N. d. Comunicaciones, «ENACOM,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.enacom.gob.ar/multimedia/normativas/2019/res4653.pdf>.
- [46] E. N. d. Comunicaciones, «ENACOM,» [En línea]. Available: [https://www.enacom.gob.ar/bandas-de-uso-compartido-sin-autorizacion\\_p680](https://www.enacom.gob.ar/bandas-de-uso-compartido-sin-autorizacion_p680).
- [47] Digikey, «Digi-Key Electrónicos - Distribuidor autorizado,» [En línea]. Available: <https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>.
- [48] ENACOM, «Ente Nacional de Comunicaciones,» [En línea]. Available: <https://www.enacom.gob.ar/multimedia/normativas/2018/res581MM.pdf>.
- [49] O. Ubierna Yubero, «Blod de tecnología Wireless,» [En línea]. Available: <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/wireless/que-es-lora-y-lorawan/>.
- [50] T. T. Network, «The Things Network,» [En línea]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>.
- [51] L. Alliance, «LoRa Alliance,» [En línea]. Available: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/what-is-lorawan/](https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/).
- [52] AlfaIoT, «AlfaIoT,» [En línea]. Available: <https://alfaiot.com/tecnologias-iot/lorawan/>.
- [53] Techplayon, «LoRa- (Long Range) Network and Protocol Architecture with Its Frame,» [En línea]. Available: <https://www.techplayon.com/lora-long-range-network-architecture-protocol-architecture-and-frame-formats/>.
- [54] H. Lehpamer, Microwave transmission networks: planning, design, and deployment, New York: McGraw-Hill, 2010.

- [55] «Net Spot,» [En línea]. Available: [https://www.netspotapp.com/wifi-signal-strength/what-is-rssi-level.html#Why\\_Does\\_RSSI\\_Matter](https://www.netspotapp.com/wifi-signal-strength/what-is-rssi-level.html#Why_Does_RSSI_Matter).
- [56] Thethingsnetwork, «The Things Network - TTN,» [En línea]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/country/argentina/>.
- [57] T. T. Stack, «The Things Stack,» [En línea]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/what-is-tts/>.
- [58] T. T. Network, «The Things Network,» [En línea]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/>.
- [59] C. Simoes, «ITDO,» ITDO, 2019. [En línea]. Available: <https://www.itdo.com/blog/webhooks-que-son-y-por-que-no-debes-ignorarlos/>.
- [60] T. T. Stack, «The Things Stack,» [En línea]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/webhooks/>.
- [61] ALSO, «All The Things Talk,» [En línea]. Available: <https://www.allthingstalk.com/faq/collect-visualise-your-data>.
- [62] A. t. Talk, «All Things Talk Binary Conversion Language 1.0,» 2017.
- [63] T. M. J. L., «Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización. Tesis para optar al título de Doctor en Ciencia y Tecnología - Mención Física - Universidad Nacional de General San Martín. República Argentina,» 2003.
- [64] C. G. Bolzi, M. J. L. Tamasi y C. Cadena, «CONSTRUCCIÓN DEL PRIMER PROTOTIPO DE RADIÓMETRO FOTOVOLTAICO SUMERGIBLE DE BAJO COSTO,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 20, pp 04.43-04.5*, vol. 20, n<sup>o</sup> ISSN 2314-1433 , 2016.
- [65] M. Martínez Bogado y M. Tamasi, «Radiómetro Fotovoltaico CNEA».
- [66] T. Instrument, «Texas Instrument,» [En línea]. Available: <https://www.ti.com/product/LMP7721#description>.
- [67] Wika, «Wika,» [En línea]. Available: <https://www.omega.com/en-us/resources/rtd-pt100-vs-pt1000#:~:text=The%20RTD%20PT100%2C%20which%20is,O%20at%200%C2%B0C..>
- [68] A. D. Sheet, «All Data Sheet,» [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/442513/TI1/OPA2365.html>.
- [69] TodoMicro, «TodoMicro,» [En línea]. Available: <https://www.todomicro.com.ar/insumos/224-sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11-arduino.html>.
- [70] SSDIELECT, «SSDIELECT - Electrónica digital,» [En línea]. Available: <https://ssdielect.com/en/bluetooth-2/821-d1-mini-esp32-v1-0.html>.
- [71] E. source, «Electronics source,» [En línea]. Available: <http://www.es.co.th/Schematic/PDF/ESP32.PDF>.
- [72] L. Llamas, «Luis Llamas - Ingeniería, informática y diseño,» [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/entrada-analogica-adc-de-16-bits-con-arduino-y-ads1115/>.
- [73] Sparkfun, «Sparkfun - Start Something,» [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/12009>.
- [74] IT&T, «<https://tienda.ityt.com.ar/>,» [En línea]. Available: [https://tienda.ityt.com.ar/panel-y-celda-solar/8256-panel-solar-5v-500ma-25w-cnc130x150-5-13x15cm-con-cable-1-metro-itytarg.html?search\\_query=panel+solar+5v&results=754](https://tienda.ityt.com.ar/panel-y-celda-solar/8256-panel-solar-5v-500ma-25w-cnc130x150-5-13x15cm-con-cable-1-metro-itytarg.html?search_query=panel+solar+5v&results=754).
- [75] Wikipedia, «<https://es.wikipedia.org/>,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa\\_de\\_ion\\_de\\_litio](https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_ion_de_litio).
- [76] Amazon, «<https://www.amazon.com/>,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/AKZYTUE-5000mAh-Recargable-Pol%C3%ADmero-conector/dp/B07TWHGCB3>.
- [77] «Aliexpress,» <https://es.aliexpress.com/>, [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/i/32809067663.html>.
- [78] L. -. P. d. b. d. i. d. l. personalizados, «<https://es.large.net/>,» [En línea]. Available: <https://es.large.net/news/90u43m1.html>.
- [79] Alldatasheet, «<https://pdf1.alldatasheet.com/>,» [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1133212/CONSONANCE/CN3065.html>.
- [80] M. electrónica, «Monarca electrónica,» [En línea]. Available: <https://www.monarcaelectronica.com.ar/productos/cargador-bateria-lipo-uso-panel-solar-cn3065-arduino-mona/?variant=105526924>.
- [81] «MAXIM,» Maxim Integrated. [En línea]. Available: <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Prototyping/MAX17043-MAX17044.pdf>.

- [82] H. t. Electronics, «How to! - Electronics,» [En línea]. Available: <https://how2electronics.com/interfacing-max17043-lipo-fuel-gauge-ic-with-arduino/>.
- [83] N. Mechatronics. [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/119-convertidor-voltaje-dc-dc-step-up-2a-mt3608.html>.
- [84] Olimex, «Olimex,» [En línea]. Available: <https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf>.
- [85] Multitech, «Multi-Tech Systems, Inc.,» [En línea]. Available: <https://www.multitech.com/brands/multiconnect-xdot..>
- [86] R. T. Limited, «RAK7243 WisGate Developer D3,» 10 01 2022. [En línea]. Available: <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7243/Overview/#product-background>. [Último acceso: 15 04 2022].
- [87] R. T. Limited, «RAK2245 Pi HAT WisLink LPWAN Concentrator Datasheet,» 10 01 2022. [En línea]. Available: <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisLink/RAK2245-Pi-HAT/Datasheet/#overview-2>. [Último acceso: 15 04 2022].
- [88] «An introduction to Arm Mbed OS 6,» Arm Limited, [En línea]. Available: <https://os.mbed.com/docs/mbed-os/v6.15/introduction/index.html>. [Último acceso: 09 04 2022].
- [89] «mbed Compiler,» Arm Limited, [En línea]. Available: <https://os.mbed.com/handbook/mbed-Compiler>. [Último acceso: 09 04 2022].
- [90] PlatformIO, «PlatformIO,» [En línea]. Available: <https://docs.platformio.org/en/stable/what-is-platformio.html>.
- [91] Tesselaar, Brasser y Offerhaus, «Desing of an Autonomous Wireless Weather. Delft University of Technology,» 2017.
- [92] S. d. E. -. S. d. E. R. y. E. Energética, «<https://www.argentina.gob.ar/>,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia\\_del\\_recurso\\_solar\\_anexos\\_final.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_del_recurso_solar_anexos_final.pdf).
- [93] A. S. Mundial, «Atlas Solar Mundial - Energydata.info,» 2021. [En línea]. Available: <https://globalsolaratlas.info/>.
- [94] S. Sensors, «Sterling Sensors - Temperature sensing technology,» [En línea]. Available: <https://www.sterlingsensors.co.uk/pt1000-resistance-table>.
- [95] J. L. Gray y A. L. S. H. Hegedus, The Physics of the Solar Cell, in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley and Sons, 2011.
- [96] A. Driesse, J. Stein, D. Riley y C. Carmignani, «Sampling and Filtering in Photovoltaic System Performance Monitoring - SANDIA REPORT.,» 2014.
- [97] Ingecon, «AAX2023IQM02 - Accesorios para la comunicación local y remota,» Ingeteam, 04 02 2022. [En línea]. Available: [https://www.ingeras.es/archive/manuals/AAX2023/AAX2023IQM02\\_G.pdf](https://www.ingeras.es/archive/manuals/AAX2023/AAX2023IQM02_G.pdf). [Último acceso: 26 03 2022].
- [98] Ingeteam, «Ficha Ingecon SUN EMS Board,» Ingeteam, [En línea]. Available: <https://www.ingeteam.com/Download/3894/attachment/ingecon-sun-ems-board.pdf.aspx>. [Último acceso: 26 03 2022].
- [99] Gizmojo, «Gizmojo - Electrónica y Robótica,» [En línea]. Available: <https://www.gizmojo.com.ar/products/2-4ghz-mini-flexible-wifi-antenna-with-ufi-connector-100mm>.
- [100] Ingeteam, «ABH2010IMB02 - INGECON SUN STORAGE 1PLAY INPUT REGISTERS,» Ingeteam, 02 2021. [En línea]. Available: [https://www.ingeras.es/archive/manuals/ABH2010/IMB02/ABH2010IMB02\\_K.pdf](https://www.ingeras.es/archive/manuals/ABH2010/IMB02/ABH2010IMB02_K.pdf). [Último acceso: 26 03 2022].
- [101] «Insight Into ESP32 Sleep Modes & Their Power Consumption,» Last Minutes Engineers, [En línea]. Available: <https://lastminuteengineers.com/esp32-sleep-modes-power-consumption/#:~:text=What%20is%20ESP32%20sleep%20mode,it%20to%20retain%20its%20data..> [Último acceso: 01 04 2022].
- [102] D. Porrey, «GitHub,» 2021. [En línea]. Available: [https://github.com/porrey/MAX1704X?utm\\_source=platformio&utm\\_medium=piohome](https://github.com/porrey/MAX1704X?utm_source=platformio&utm_medium=piohome).
- [103] M. Ruys, «GitHub,» 2017-2021. [En línea]. Available: [https://github.com/beegeetokyo/DHTesp?utm\\_source=platformio&utm\\_medium=piohome](https://github.com/beegeetokyo/DHTesp?utm_source=platformio&utm_medium=piohome).
- [104] R. Tillaart, «GitHub,» 2021-2022. [En línea]. Available: [https://github.com/RobTillaart/ADS1X15?utm\\_source=platformio&utm\\_medium=piohome](https://github.com/RobTillaart/ADS1X15?utm_source=platformio&utm_medium=piohome).
- [105] eModbus, «GitHub,» 2021-2022. [En línea]. Available: <https://github.com/eModbus/eModbus>.

- [106] R. T. Limited, «RAK7243 Quick Start Guide,» 10 01 2022. [En línea]. Available: <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7243/Quickstart/#configure-the-gateway>. [Último acceso: 15 04 2022].
- [107] T. W. Channel, «The Wheater Channel,» 27 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://weather.com/es-AR/tiempo/mensual/1/9f7f64b63fb41885e1a09f7bb845c7dbdb00876aaa54a2fe53b2535ea149a000>.
- [108] D. A. Hernández, «<https://muyagile.com/r>,» 19 Enero 2021. [En línea]. Available: <https://muyagile.com/realmente-conoces-lo-que-es-un-minimo-producto-viable-mvp/>.
- [109] SMA, «SMA Solar Technology AG,» [En línea]. Available: <https://files.sma.de/downloads/Perfratio-TI-es-11.pdf>.
- [110] H. Mathew, Fotovoltaica - Manual de diseño e instalación, Solar Energy International Imprecolor Industrial, 2015.
- [111] Fundeen, «The crowdfunding of renewable energies in Spain,» [En línea]. Available: <https://ochocontres.com/energias-renovables/>.
- [112] M. Integrated, «Extremely Accurate I2C-Integrated - RTC/TCXO/Crystal,» [En línea]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>.
- [113] HiveMQ, «Introducing the MQTT Protocol,» [En línea]. Available: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-1-introducing-mqtt/>.
- [114] H. MQ, «TLS/SSL - MQTT Security Fundamentals,» [En línea]. Available: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-security-fundamentals-tls-ssl/>.
- [115] Steve, «Understanding the MQTT Protocol Packet Structure,» [En línea]. Available: <http://www.steves-internet-guide.com/mqtt-protocol-messages-overview/>.
- [116] H. MQ, «MQTT Publish, Subscribe and Unsubscribe.,» [En línea]. Available: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-4-mqtt-publish-subscribe-unsubscribe/>.
- [117] MQTT, «The Standard for IoT Messaging,» [En línea]. Available: <https://mqtt.org/>.
- [118] Thethingsnetwork, «The Things Network,» [En línea]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/country/argentina/>.
- [119] W. Spark, «Weather Spark,» [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/28981/Clima-promedio-en-Buenos-Aires-Argentina-durante-todo-el-a%C3%B1o>.
- [120] T. Instruments, «Texas instruments,» [En línea]. Available: [https://www.ti.com/lit/an/sboa220a/sboa220a.pdf?ts=1644074267899&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLMP7721%253FkeyMatch%253DLMP7721%2526tisearch%253Dsearch-everything%2526usecase%253DGPN](https://www.ti.com/lit/an/sboa220a/sboa220a.pdf?ts=1644074267899&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLMP7721%253FkeyMatch%253DLMP7721%2526tisearch%253Dsearch-everything%2526usecase%253DGPN).
- [121] R. Lucas, Veiras Francisco, Garea Teresa y Pérez Liliana, «Diseño e implementación de un amplificador de transimpedancia para aplicación en interferometría dinámica.,» 2015.
- [122] C. E. Reviews, «Most Efficient Solar Panels 2022,» [En línea]. Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>.
- [123] ISO, ISO-9847:1992 - Solar energy — Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer, 1992.
- [124] a. MBed, «arm MBed,» [En línea]. Available: <https://os.mbed.com/>.
- [125] S. S. Goplani, «Análisis, caracterización y calibración de sensores de bajo costo para Arduino,» 2018. [En línea]. Available: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/10280/Analisis,caracterizacionycalibraciondesensoresdebajocosteparArduino.pdf?sequence=1>.