

Diseño, implementación y desarrollo de un sistema de lectura de sondas de corriente y ModBus con transmisión inalámbrica.

Fernández Guardiola, Jose

Resumen

El presente proyecto explica cómo se ha llevado a cabo el diseño y creación de un sistema de lectura de sondas analógicas de tensión, sondas analógicas de corriente y sondas ModBus RS-485 y la transmisión inalámbrica de los datos mediante radio LoRa.

ULBIOS TECHSENS es una empresa que se dedica a la monitorización de la calidad del agua y del aire en hospitales, hoteles y edificios residenciales. Su sistema de monitorización se basa en la lectura a tiempo real de múltiples sondas que miden ciertos parámetros que indican la calidad del agua y aire de las instalaciones.

Debido a la problemática a la que se enfrenta la empresa Ulbios en instalaciones complejas donde se debe realizar el cableado de sondas en distancias considerables que suponen un gran coste económico y dificultades, se presenta una solución para evitar grandes tiradas de cable y usar el sistema de transmisión inalámbrica desarrollado en el proyecto, debido a que no existe ningún producto en el mercado que pueda transmitir inalámbricamente las lecturas de sondas analógicas y ModBus en que lo necesita Ulbios.

El proceso seguido para la creación del sistema de lectura de sondas y transmisión inalámbrica de los datos ha sido el siguiente:

Primeramente, se analizan y se exponen los conceptos teóricos más importantes a entender y que servirán de base y fundamentos para la realización del desarrollo.

Seguidamente, se analizan los elementos utilizados en la empresa y los elementos utilizados para desarrollar el proyecto.

Una vez se han llevado el análisis de los elementos, se procede al diseño de los sistemas emisores, un sistema emisor utilizando la placa Arduino Uno R3 y otro sistema emisor utilizando la placa Raspberry Pi Pico. Se desarrolla el diseño de los circuitos, la selección de componentes del sistema, la arquitectura del sistema, la lógica desarrollada y su funcionamiento.

Finalmente se realizan las pruebas, se caracteriza el sistema y se da una posible opción para la creación de un producto. Además, se presentan los desarrollos futuros planeados para la mejora del sistema.

1. Introducción



Durante mis dos años de experiencia en la empresa ULBIOS TECHSENS, donde llevo a cabo la tarea de configuración de sondas, sensores y sistemas de adquisición de datos, supervisión de instalaciones y puestas en marcha, he podido identificar varios puntos de mejora que pueden ser positivos tanto para la empresa como para los empleados, de forma que algunas tareas de instalación puedan ser más rápidas y sencillas y suponiendo un coste menor a la empresa en cuanto a materiales.

Uno de estos puntos de mejora, involucra la modificación de lectura de las sondas del sistema de forma inalámbrica en sustitución a la forma convencional que es mediante cableado.

Ante la propuesta de mejora aceptada por la empresa, se decidió la realización del proyecto para el desarrollo de un sistema de transmisión inalámbrica de las lecturas de las sondas del sistema ULBIOS al no existir ningún elemento en el mercado que nos permita transmitir señales inalámbricas de sondas analógicas y ModBus RS-485 de la forma en la que desea la empresa.

Los objetivos del desarrollo del proyecto han sido:

1. Lectura de sondas de señales analógicas de corriente 4-20 mA y de señales analógicas.
2. Digitalizar la señal de sondas con salida analógica para su lectura por ModBus sobre una conexión RS-485.
3. Lectura de sondas ModBus nativas a través de una conexión RS-485:
4. Desarrollar e implementar la lógica necesaria para las placas Arduino Uno y Raspberry Pi Pico:
5. Integración del sistema radio LoRa para la transmisión inalámbrica de datos mediante LoRa:

2. Fundamentos teóricos

En esta sección se estudian y se exponen los siguientes fundamentos teóricos necesarios para el conocimiento, comprensión y desarrollo del sistema del proyecto:

- Protocolo de comunicación analógico.
- Protocolo de comunicación ModBus.
- Protocolo de comunicación inalámbrica LoRa.
- Conversión y digitalización.
- Consideraciones de diseño y seguridad.
- Implementación en sistemas de control industrial.

La correcta comprensión y entendimiento de los fundamentos teóricos ha sido un factor clave para conocer cómo actúan y se estructuran los diferentes protocolos de comunicación en los que se basará el desarrollo del proyecto. [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]

3. Análisis de elementos utilizados en la empresa y en el proyecto

En esta sección se analizan los elementos de sonorización y adquisición de datos utilizados en la empresa, y los elementos utilizados para el desarrollo del sistema.

También se explica la forma en la que Ulbios logra la monitorización de la calidad del agua mediante la instalación de sondas en tuberías de PP-R.



Fig. 1. Instalación real de sondas del sistema ULBIOS.

Los elementos utilizados por la empresa analizados han sido:

- Sonda de temperatura
- Sonda de presión
- Sonda de ORP
- Sonda de pH
- Sonda de bioactividad
- Circutor eMod
- Teltonika TRB145

Siendo la sonda de temperatura la utilizada para realizar las pruebas y desarrollo del proyecto:



Fig. 2. Sonda de temperatura PT100 con salida analógica.

Los elementos utilizados para el desarrollo del proyecto analizados han sido:

- Arduino Uno R3
- Raspberry Pi Pico
- Módulo transmisor LoRa: Adafruit RFM9x
- Módulo conversor de señales analógicas a ModBus RS-485: N4AIA04
- Módulo conversor de ModBus RS-485 a ModBus RS-232: Pico-2CH-RS485

En las que se detallan sus características, funcionamiento y utilidades. [11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21]

El desarrollo se ha basado en el uso y programación de los microcontroladores de Arduino Uno R3 y Raspberry Pi Pico.

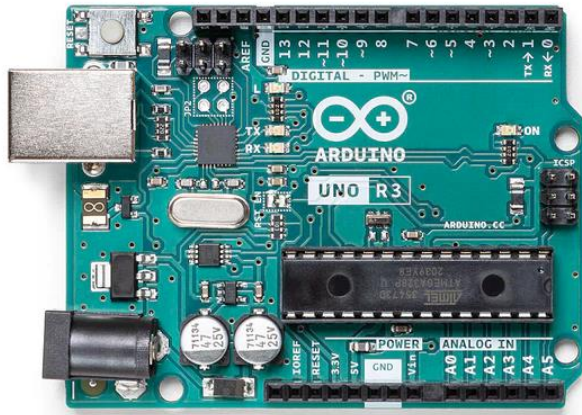


Fig. 3. Arduino Uno R3.

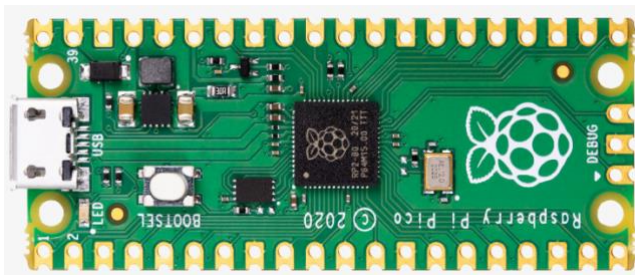


Fig. 4. Raspberry Pi Pico.

4. Diseño del sistema

En esta sección se procede al diseño y creación del sistema de transmisión inalámbrica en la que se explica los siguientes aspectos que se han desarrollado:

- Preparación del ambiente de trabajo
- Arquitectura del sistema
- Selección de componentes
- Configuración del módulo radio LoRa
- Emisor basado en Arduino Uno R3
- Emisor basado en Raspberry Pi Pico
- Receptor
- Implementación en el sistema Ulbios

Se han diseñado dos emisores distintos, uno basado en Arduino y otro basado en Raspberry. Debido a las ventajas que ofrece la placa Raspberry Pi Pico, con mayor potencia, mayor resolución y menor coste, será el elemento en el que se basará el desarrollo del sistema de transmisión inalámbrica para la empresa. Será el sistema emisor Raspberry el que será caracterizado y se dará la primera posibilidad de desarrollo de un producto. Con el Arduino se demostrará como se puede enviar señales radio de señales analógicas, pero no será desarrollado para ser utilizado en la empresa.

A continuación, se presenta la arquitectura general del sistema:

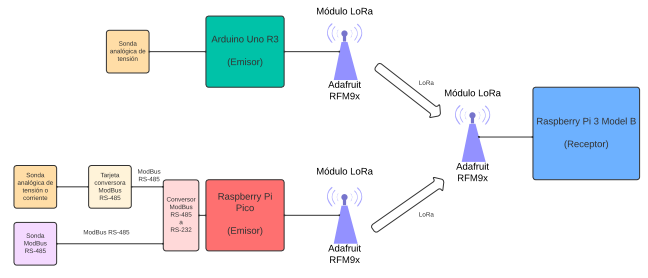


Fig. 5. Arquitectura general del sistema.

De cada emisor desarrollado, se explica su funcionamiento, sus componentes, se presenta los planos de los circuitos, se presentan diagramas de flujo de su funcionamiento y se explica la lógica desarrollada y el envío de datos.

Emisor Arduino:

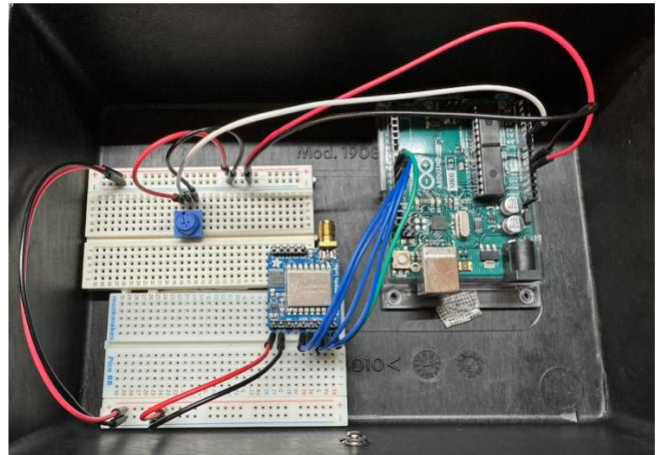


Fig. 6. Emisor Arduino.

El emisor está basado en el uso de la placa Arduino Uno R3 y el módulo LoRa Adafruit RFM9x para la lectura de sondas analógicas de voltaje y su transmisión de datos inalámbrica mediante LoRa.

El sistema se alimenta a 5V mediante un USB a la placa Arduino. El Arduino alimenta a los demás elementos del sistema. Se ha utilizado un potenciómetro de 10 KΩ para simular una sonda analógica de voltaje con rango 0 – 5 V, siendo 5 V la tensión de referencia del Arduino.

Las funciones principales que realiza en emisor Arduino se explican en los siguientes pasos:

1. El Arduino lee la sonda conectada a la entrada analógica A0, la entrada A0 utiliza el puerto ADC0.
2. El Arduino procesa el valor leído de la sonda y lo prepara para poder ser enviado en forma de mensaje LoRa por el módulo LoRa.
3. El módulo LoRa transmite el mensaje de forma inalámbrica con los parámetros de transmisión y frecuencia configurados.

Emisor Raspberry:

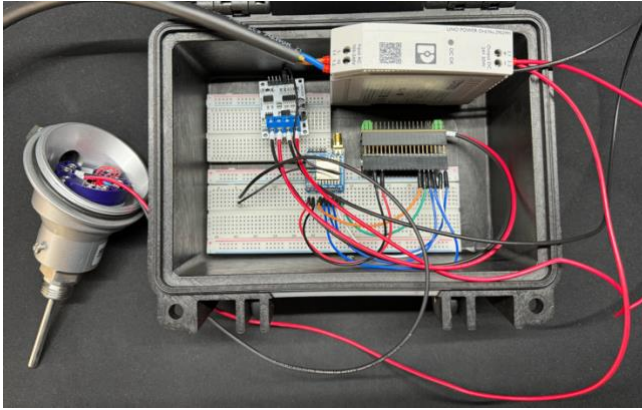


Fig. 6. Emisor Raspberry.

El emisor está basado en el uso de la placa Raspberry Pi Pico, el módulo LoRa Adafruit RFM9x y los módulos conversores N4AIA04 y Pico-2CH-RS484 para la lectura de sondas analógicas y sondas ModBus RS-485 y su transmisión de datos inalámbrica mediante LoRa.

El sistema se alimenta a 5V mediante un USB a la placa Raspberry Pi Pico. La Raspberry Pi Pico alimenta a al módulo radio LoRa Adafruit RFM9x y al módulo conversor Pico-2CH-RS485.

Se ha añadido una fuente de alimentación de 24 V para la alimentación de las sondas y del módulo conversor N4AIA04. Se ha utilizado una sonda de temperatura PT100 con salida analógica de corriente.

Las funciones principales que realiza en emisor Raspberry se explican en los siguientes pasos:

1. Lectura de sondas analógicas mediante el módulo N4AIA04.
2. Conversión de señales analógicas a ModBus RS-485 mediante el módulo N4AIA04.
3. Lectura de señales ModBus RS-485 de la Raspberry Pi Pico mediante el módulo Pico-2CH-RS485. En el caso de leer una sonda de protocolo ModBus RS-485, se leería directamente en este paso, sin necesidad de pasar por el módulo N4AIA04.
4. Procesamiento de datos y preparación del mensaje radio.
5. Envío del mensaje radio LoRa a través del módulo Adafruit RFM9x.

[11,22,23]

5. Evaluación. Pruebas y resultados

Se han realizado varias pruebas para validar el sistema:

- Emisión y recepción correcta de mensajes:

Se han realizado varias pruebas que han consistido en hacer variar los valores del potenciómetro en el caso de Arduino y hacer variar la temperatura de la sonda de temperatura conectada al emisor Raspberry.

En ambos casos, el resultado ha sido positivo. En el caso de la sonda de temperatura, además de mostrar correctamente su variación de temperatura, ha sido contrarrestada con las

mediciones de un termómetro laser de la vaina de la sonda y logrando a mostrar una precisión de $\pm 0,1$ °C.

- Distancia máxima de emisión en campo abierto

Se han realizado varias pruebas que han consistido en poner a funcionar los emisores y se ha ido alejando en línea recta el receptor alimentado junto a un ordenador portátil para visualizar los mensajes recibidos. Todo esto en “condiciones ideales” en campo abierto.

Los resultados obtenidos son:

- Emisor Arduino: aproximadamente 1,25 km de distancia en línea recta en campo abierto entre el receptor.
- Emisor Raspberry: aproximadamente 1,3 km de distancia en línea recta en campo abierto entre el receptor.

Observaciones: para considerar que la distancia de emisión entra dentro del rango efectivo de los emisores, se esperaba a recibir 10 mensajes seguidos correctamente.

- Distancia máxima de emisión en entorno cerrado

Se han realizado varias pruebas que han consistido en poner a funcionar los emisores ubicados en diferentes puntos de la nave de la empresa, con distancias aproximadas de 400 metros entre los emisores y el receptor.

Los resultados han sido positivos logrando a recibir la totalidad de los mensajes durante pruebas de funcionamiento de 10 minutos en cada posición probada. Esta prueba indica su potencial funcionamiento teniendo en cuenta que la nave contiene paredes y muros que se asemejan al de las instalaciones reales, por lo que supera los 400 metros de transmisión en un “entorno real”.

- Funcionamiento continuo

Se ha realizado una prueba de funcionamiento continuo de 6 horas al día durante 5 días seguidos. Se aprovechaba la jornada laboral para poner a funcionar el sistema al inicio de la jornada y parar el sistema al final de la jornada, en la que se iba monitorizando los mensajes recibidos por el receptor cada 30 minutos.

Los emisores cada día estaban en una posición y distancia al receptor, desde una distancia de 0,5 metros hasta 400 metros de distancia.

Los resultados fueron positivos y no se encontró ninguna anomalía en el sistema.

Observaciones: el receptor mostraba un breve calentamiento al final de cada prueba.

6. Caracterización del sistema

En esta sección se lleva a cabo la caracterización del sistema:

- Características:

Frecuencia de muestreo: ajustable, para función en sistema Ulbios será de 1 muestra cada 15 minutos.

Frecuencia máxima de muestreo: 0,167 Hz (1 muestra cada 6 segundos)

Distancia máxima de transmisión: 1,3 km (en condiciones ideales)

Lectura de sondas y rangos de medida:

Sondas analógicas de tensión (0-5 V, 0-10 V)

Sondas analógicas de corriente (0-20 mA, 4-20 mA)

Sondas ModBus RS-485 (rangos propios de cada sonda)

Resolución:

Sonda analógica de tensión: 0,01 V (precisión $\pm 1\%$)

Sonda analógica de corriente: 0,1 mA (precisión $\pm 1\%$)

Sonda ModBus RS-485: resolución propia de la sonda (precisión propia de la sonda)

- Parámetros de comunicación:

ModBus mediante UART:

Baud Rate: 9600 bps

Data Bits: 8

Stop Bits: 1

Parity: none

Tamaño del buffer: 10 bytes

Tiempo espera respuesta (timeout): 5 segundos

LoRa:

Frecuencia de transmisión: 868 MHz

Tasa de codificación: 4/5

Factor de programación: 7

Ancho de banda: 125 kHz

Potencia de transmisión: 13 dBm (19,95 mW)

- Alimentación y consumo:

Raspberry Pi Pico:

Alimentación: 3,3 – 5 V

Consumo: 0,099 W (con alimentación de operación 3,3 V)

Adafruit RFM9x:

Alimentación: 3,3 – 5 V

Consumo: 0,396 W (con alimentación de operación 3,3 V)

Pico-2CH-RS485:

Alimentación: 3,3 – 5 V

Consumo: 0,099 W (con alimentación de operación 3,3 V)

N4AIA04:

Alimentación: 8 – 25 V

Consumo: 0,288 W (con alimentación de operación 3,3 V)

Consumo total: 0,882 W

7. Creación del producto

En esta sección, se presenta una posible opción para el desarrollo y creación del emisor Raspberry como producto mediante la creación de una PCB (Printed Circuit Board) para alojar todos los elementos necesarios que componen el sistema.

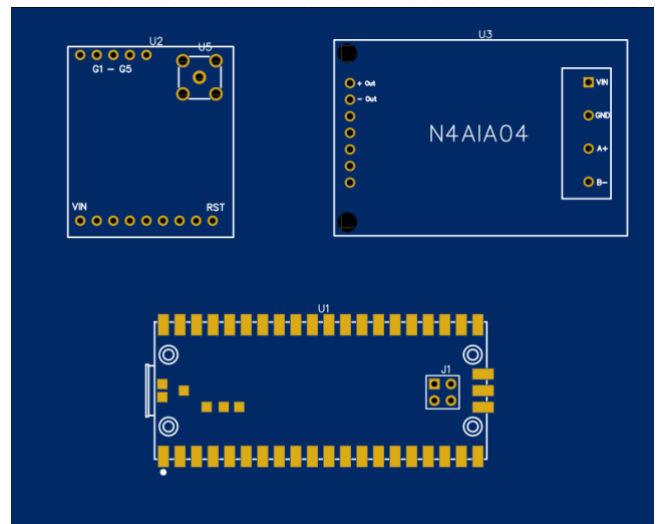


Fig. y. Placa PCB sistema emisor Raspberry.

8. Desarrollo futuro

A pesar de la finalización del proyecto a nivel académico, tanto por parte personal como por parte de la empresa existe un deseo de seguir con el desarrollo del sistema debido a los buenos resultados que ha presentado durante el desarrollo el proyecto.

Los próximos pasos y desarrollos futuros que se proponen son:

- Prueba piloto en una instalación real durante 30 días.
- Desarrollo del sistema receptor Raspberry
- Mejora del sistema emisor Raspberry
- Desarrollo de detección e identificación de fallos.
- Desarrollo del producto emisor Raspberry si muestra resultados positivos en la prueba piloto.
- Desarrollo del producto receptor Raspberry si el producto emisor muestra resultados positivos en futuras pruebas.
- Implementación de exposición de datos en ModBus TCP/IP.
- Posible desarrollo de un sistema propio basado en un microcontrolador a seleccionar.
- Posible creación de un producto emisor/receptor para lanzamiento a venta pública.

Conclusiones

Una vez se han analizado los resultados y el correcto funcionamiento del sistema, se puede determinar que el desarrollo del proyecto ha sido exitoso y ha aportado una solución positiva y viable para la problemática que se presenta en las instalaciones del sistema ULBIOS que lleva a cabo la empresa.

No solo se ha podido demostrar la efectividad del sistema, si no que se propone la creación de un posible producto, que considero que con el continuo de desarrollo del sistema y del producto, podrá brindar grandes resultados y beneficios económicos para la empresa.

La prueba piloto podrá proporcionar mucha información para mejorar el sistema, ya que estará funcionando las 24 horas del día durante 30 días.

En cuanto a los objetivos, considero que se han cumplido todos.

Personalmente, considero que es un sistema con gran potencial tanto para el uso interno de la empresa como para el desarrollo de un producto de venta al público, debido que actualmente no existe ningún producto en el mercado con las características del sistema desarrollado, que sea capaz de leer sondas analógicas y sondas ModBus RS-485 y poder transmitir la señal inalámbricamente gracias al protocolo radio LoRa, al fin y al cabo, en el proyecto se ha desarrollado una especie de “puzle” de conversión de protocolos que ha permitido la creación del sistema, que con un correcto desarrollo futuro y mejoras continuas, puede dar grandes resultados.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia y a mi pareja por ofrecerme siempre su apoyo, su ayuda y por estar siempre en los momentos más difíciles a mi lado y motivarme cuando más lo necesito.

Me gustaría agradecer a mi tutor del proyecto, Joaquín del Río por ayudarme a encaminar el proyecto de la mejor manera, por estar siempre disponible para realizar reuniones y seguimientos y por sus ideas y conocimientos que han permitido la mejora de la calidad del proyecto.

Quiero expresar las gracias a Laura Sánchez, CEO de la empresa ULBIOS por confiar en mí y dar soporte al proyecto de forma positiva y con intención de continuar el desarrollo del sistema.

Por último, pero no menos importante, quiero dar las gracias a Pablo Collado, mi tutor del TFG por estar siempre presente, por la formación que me ha brindado sobre el lenguaje de programación utilizado en el proyecto y por la ayuda prestada.

Referencias

- [1] MOHANAN, V. What is RS-485 & How to Use MAX485 with Arduino for Reliable Long-Distance Serial Communication, 2023: <https://www.circuitstate.com/tutorials/what-is-rs-485-how-to-use-max485-with-arduino-for-reliable-long-distance-serial-communication/>
- [2] SEAMETRICS. Technical Bulletin.Understanding and Troubleshooting 4-20mA Current Loops: <https://www.seametrics.com/wp-content/uploads/LT-65650312-062011UnderstandingCurrentLoops.pdf>

- [3] PAONESSA, S. MCDUFFEE, B. PRECISION DIGITAL. Back to Basics: The Fundamentals of 4-20 mA Current Loops: <https://www.predig.com/indicatortpage/back-basics-fundamentals-4-20-ma-current-loops>
- [4] MAXIM INTEGRATED, Guidelines for Proper Wiring of an RS-485 (TIA/EIA-485-A) Network, 2001.
- [5] ANDHURTA. Protocolo ModBus, 2024: <https://eeymuc.co/31-protocolo-modbus/>
- [6] ORUS EFICIENCIA. Protocolo ModBus: Fundamentos y aplicaciones: <https://oruseficiencia.es/modbus>
- [7] HERNANDEZ, R. ¿Qué es la tecnología LoRa y por qué es importante para IoT?, 2019: <https://www.thethingsnetwork.org/community/santa-rosa/post/que-es-la-tecnologia-lora-y-por-que-es-importante-para-iot>
- [8] VENCO. Qué es LoRa, cómo funciona y características principales, 2022: <https://www.vencoel.com/que-es-lora-como-funciona-y-caracteristicas-principales/>
- [9] WIKIPEDIA. ModBus: <https://es.wikipedia.org/wiki/Modbus>
- [10] COLLADO, P. GALLARDO, F. THE ULBIOS WATER MONITORING SYSTEM, 2023.
- [11] DOCUMENTACIÓN INTERNA DE LA EMPRESA.
- [12] DOCUMENTACIÓN ARDUINO: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>
- [13] DOCUMENTACIÓN RASPBERRY: <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/raspberry-pi-pico.html#resetting-flash-memory>
- [14] NEGI, A. The Full Raspberry Pi Pico Pinout, Specs, Board Layout Guide: https://www.etechnophiles.com/raspberry-pi-pico-pinout-specifications-datasheet-in-detail/?utm_content=cmp-true
- [15] eMOD PickData: <https://www.pickdata.net/es/emod-oem-iot-modular-device>
- [16] Teltonika TRB145: <https://teltonika-networks.com/es/products/gateways/trb145>
- [17] Adafruit RFM9x: <https://learn.adafruit.com/adafruit-rfm69hcx-and-rfm96-rfm95-rfm98-lora-packet-radio-breakouts/overview>
- [18] N4AIA04: <https://cdtecnologia.net/placas-electronicas/3412-modulo-convertidor-analogo-420-a-digital-rs485-n4aia04-8-25vdc-0003412.html>
- [19] Pico-2CH-RS485: <https://www.waveshare.com/wiki/Pico-2CH-RS485>
- [20] megaAVR Data Sheet: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>
- [21] Semtech sx1276: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFfvaF_Fkpgp5kzjiNviAbqcpqh9qSjE
- [22] CURSO REALIZADO LENGUAJE GO: <https://www.codecademy.com/learn/learn-go>
- [23] DIGITAL OCEAN. Importing Packages in GO: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/importing-packages-in-go#step-3-importing-identically-named-packages>