



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

**Carrera de
Electrónica y Telecomunicaciones**

**Diseño e implementación de un registrador de
datos para la adquisición de información
limnigráfica**

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniera en
Electrónica y Telecomunicaciones.*

Autora :

Ana Cristina López Ochoa

C.I. 0105434633

Director :

Ing. Luis Geovany Lupercio Novillo M.Sc.

C.I. 0102361003

Co-Director :

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas Ph.D.

C.I. 0103907036

Cuenca - Ecuador

Abril 2019



Resumen

El Programa para el Manejo de Agua y Suelo ([Programa para el Manejo de Agua y Suelo \(PROMAS\)](#)) controla varios parámetros hidro-meteorológicos, entre ellos el nivel de los ríos, los mismos que son usados con fines de investigación. De modo que, es necesario disponer datos fiables de manera oportuna a través de una estación limnigráfica. Actualmente, este tipo de estaciones no disponen de sistemas de transmisión de largo alcance en tiempo real, por lo que se requiere movilizar personal para coleccionar manualmente los datos. Por esta razón, existe la necesidad de desarrollar una estación prototipo que facilite la recolección de datos y su transmisión en tiempo real para mantener la integridad y disponibilidad de los mismos.

Este trabajo comprende el diseño y desarrollo de una estación limnigráfica prototipo con la capacidad de coleccionar los datos, almacenarlos y transmitirlos con una área de cobertura de al menos 1 Km. El dispositivo consta de un microcontrolador y transceptor de bajo consumo energético y largo alcance ([Long Range \(LoRa\)](#), por sus siglas en inglés), que permite configurarse como una red de área amplia. Además, para el registro de fecha y hora dispone un reloj en tiempo real ([Real Time Clock \(RTC\)](#), por sus siglas en inglés) así como de un sensor de temperatura y humedad para controlar las condiciones de operación del dispositivo.

El prototipo desarrollado es una placa de circuito impreso ([Printed Circuit Board \(PCB\)](#), por sus siglas en inglés) de dos caras con tecnología de montaje superficial. Tiene unas dimensiones de 30x130mm, gracias a este reducido tamaño puede ser implementado en cualquier lugar como, encapsulados, tubos, cajas pequeñas, etc. Para el desarrollo de este tipo de estaciones limnigráficas es necesario aplicar protocolos de comunicación, requerimientos de compatibilidad electromagnética y reglas de ruteo.

Palabras claves : [LoRa](#). Radiofrecuencia. Información limnigráfica. Transceptor. [PCB](#).



Abstract

The Program for Water and Soil Management ([PROMAS](#)) controls several hydro-meteorological parameters, among them the level of rivers, which are used for research purposes. So, it is necessary to provide reliable data in a timely manner through a limnigraphic station. Currently, these types of stations do not have long-range transmission systems in real time, so it is required to mobilize personnel in order to collect information manually. For this reason, there is a need to develop a prototype station that facilitates the data collection and its transmission in real time to maintain their integrity and availability.

This work includes the design and development of a prototype limnigraphic station with the ability to collect data, store it and transmit it with a coverage area of at least 1 Km. The device consists of a microcontroller and transceiver of low power consumption and long range ([LoRa](#)), which allows to configure as a wide area network. In addition, for the registration of date and time, there is a real-time clock ([RTC](#)) as well as a temperature and humidity sensor to control the operating conditions of the device.

The developed prototype is a two-sided printed circuit board ([PCB](#)) with surface mounted technology. It has dimensions of 30x130mm, thanks to its small size it can be implemented in any places like, encapsulations, tubes, small boxes, etc. For the development of this type of limnigraphic station, it is essential to apply communication protocols, electromagnetic compatibility requirements and routing rules.

keywords : [LoRa](#). Radiofrequency. Limnigraphic information. Transceiver. [PCB](#).





Índice general

Resumen	III
Abstract	V
Índice general	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
Dedicatoria	XVII
Agradecimientos	XIX
Abreviaciones y acrónimos	XXI
1. Introducción	1
1.1. Identificación del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Alcance	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos Específicos	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Variables Limnigráficas	5
2.2. Estaciones Limnigráficas automáticas	5
2.3. Sistemas Embebidos	6
2.4. Microcontrolador	6
2.5. Transceptor con tecnología LoRa	7
2.6. Reguladores de Tensión	8
2.7. Sensor de temperatura y humedad	8



2.8. Sensor WL400	9
2.9. Reloj en tiempo real (RTC)	9
2.10. Almacenamiento	9
2.11. Protocolos de comunicación	10
2.12. Redes de Cobertura Amplia y Baja Potencia (LP-WAN)	12
2.13. LoRa	12
2.13.1. Modulación LoRa	12
2.13.2. Espectro Ensanchado	13
2.13.3. Propiedades claves de la modulación LoRa	14
2.13.4. Parámetros de transmisión	15
2.14. Compatibilidad electromagnética	16
2.14.1. Aspectos generales de la EMC	16
2.14.2. Requisitos de EMC para sistemas electrónicos	17
2.14.3. Ventajas del diseño EMC	17
2.15. Criterios de diseño de la tarjeta de circuito impreso (PCB)	18
2.16. Componentes básicos de un sistema de Radiofrecuencia	19
2.17. Jaula de Faraday	20
2.18. Grado de protección	20
3. Diseño y Desarrollo del Dispositivo	23
3.1. Introducción	23
3.2. Análisis de requerimientos	24
3.3. Descripción de los dispositivos utilizados	25
3.3.1. Microcontrolador	25
3.3.2. Transceptor LoRa	27
3.3.3. Sensores	29
3.3.4. Reloj en tiempo real	32
3.3.5. Memoria Externa	32
3.3.6. Fuentes de Alimentación	32
3.3.7. Jaula de Faraday	33
3.4. Comunicación entre dispositivos	33
3.5. Softwares Utilizados	35
3.5.1. IDE Arduino	35
3.5.2. Software de desarrollo de circuitos PBC	36
3.6. Aspecto final del esquemático del dispositivo	36
3.7. Placa de circuito impreso (PCB)	39
3.7.1. Ruido de masa	39
3.7.2. Masa flotante	40
3.7.3. Pistas	40
3.7.4. Vías	40



3.7.5. Cristales	41
3.8. Aspecto final de la placa PBC	41
4. Resultados	43
4.1. Introducción	43
4.2. Pruebas de consumo energético	44
4.3. Pruebas de alcance	46
4.4. Mediciones de RSSI y SNR	49
5. Conclusiones y Recomendaciones	51
5.1. Conclusiones	51
5.2. Recomendaciones	52
5.3. Trabajos Futuros	52
A. Especificaciones Técnicas de dispositivos	57
A.1. Microcontroladores	57
A.1.1. ATmega1284	59
A.2. Transceptores	61
A.2.1. Transceptor LoRa SX1276	62
A.3. Sensor DHT11	64
A.4. RTC DS3231	64
A.5. Memoria externa	65
B. Configuración y programación del dispositivo	67
B.1. Configuración del dispositivo	67
B.2. Configuración a nivel de software	71
C. Recepción de datos	79
C.1. Señales Recibidas por el radio definido por Software	79
C.2. Parámetros de Recepción	83
D. Diseño de la placa PCB	85
D.1. Diseño PCB	85
D.2. Montaje de componentes en PCB	85
Bibliografía	87





Índice de figuras

2.1. Diagrama de bloques general de un microcontrolador	7
2.2. Sensor WL400	9
2.3. Diagrama de SPI síncrono	11
2.4. Diagrama de conexión de múltiples esclavos independientes en un bus SPI	11
2.5. Diagrama de conexión de múltiples esclavos en cascada	11
2.6. Proceso de ensanchamiento	13
2.7. Elementos básicos de un problema de EMC	16
2.8. Componentes de mayor velocidad lejos de los conectores externos.	19
2.9. Funcionamiento de una Jaula de Faraday.	20
3.1. Diagrama de bloques del diseño del prototipo	24
3.2. Diagrama de bloques del funcionamiento del Microcontrolador en el prototipo.	26
3.3. Diagrama de bloques del Transceptor SX1276	29
3.4. Diagrama del sensor WL400 con la resistencia de drenaje y entrada al ADC	30
3.5. Simulación de circuito de acondicionamiento de energía del sensor (Transistor off)	31
3.6. Simulación de circuito de acondicionamiento de energía del sensor (Transistor on)	31
3.7. Diagrama de bloques de la estación limnigráfica	37
3.8. Aspecto final esquemático	38
3.9. Plano a tierra en la cara superior e inferior de la PCB.	39
3.10. Giro de pista.	40
3.11. Diseño PCB en 3D de la cara superior del dispositivo.	41
3.12. Diseño PCB en 3D de la cara inferior del dispositivo.	41
4.1. Esquema propuesto para pruebas de funcionamiento	44
4.2. Ubicación del punto de referencia A, B y origen.	48
4.3. Perfil longitudinal correspondiente a la distancia de 290 m	48
4.4. Perfil longitudinal correspondiente a la distancia de 1.15 Km	49
4.5. Medición de RSSI en pruebas de alcance	49
4.6. Medición de SNR en pruebas de alcance	50



A.1. Diagrama de pines del microcontrolador ATmega1284	60
A.2. Diagrama de bloques general de un transceptor SX1272	61
A.3. Diagrama de bloques general de un transceptor SX1276-78	62
A.4. Diagrama de pines de un transceptor SX1276	63
A.5. Sensor DHT11	64
A.6. Circuito típico de operación	65
A.7. Diagrama de pines	66
B.1. Configuración para Gestor de URLs Adicionales de tarjetas	68
B.2. Instalación de tarjetas de MightyCore.	69
B.3. Interconexión entre master y slave.	69
B.4. Interconexión entre master y slave.	70
B.5. Selección de características para ATmega1284.	70
B.6. Quemado del bootloader completado.	71
B.7. Diagrama de flujo del funcionamiento del software de la estación limnigráfica. . .	72
C.1. Señal capturada por el SDR con SF=7 Y BW=41.7KHz	79
C.2. Señal capturada por el SDR con SF=7 Y BW=125KHz	80
C.3. Señal capturada por el SDR con SF=7 Y BW=250KHz	80
C.4. Señal capturada por el SDR con SF=9 Y BW=125KHz	81
C.5. Señal capturada por el SDR con SF=12 Y BW=125KHz	81
C.6. Señal capturada por el SDR a 300 m, con SF=12 Y BW=125KHz	82
C.7. Señal capturada por el SDR a 1.15 Km, con SF=12 Y BW=125KHz	82
C.8. Recepción de datos - nodo receptor (Sensor Limnigráfico desconectado).	83
C.9. Recepción de datos - nodo receptor.	83
D.1. Aspecto final PCB registrador de datos, vista superior e inferior.	85
D.2. Aspecto final PCB registrador de datos sin soldar componentes, vista superior e inferior.	86
D.3. Aspecto final PCB registrador de datos con componentes de montaje superficial, vista superior e inferior.	86



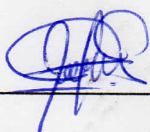
Índice de tablas

2.1. Bandas de frecuencia ISM compatibles con los transceptores LoRa	8
2.2. Especificaciones LoRa para Europa y Estados Unidos	13
3.1. Características principales de microcontroladores seleccionados	26
3.2. Características principales de transceptores seleccionados	28
3.3. Nomenclatura utilizada por el dispositivo SX1276	29
3.4. Niveles de voltaje para distintos circuitos de la estación limnigráfica	33
3.5. Nomenclatura utilizada para la comunicación ATM1284 y SX1276	34
3.6. Nomenclatura utilizada para la comunicación entre ATM1284 y W25Q128JV . .	34
3.7. Nomenclatura utilizada para la comunicación entre ATM1284 y RTC DS3231 . .	34
4.1. Consumo energético del dispositivo diseñado	45
4.2. Recopilación de datos del dispositivo durante la transmisión.	46
4.3. Coordenadas del registrador de datos y puntos de referencia	47
A.1. Características principales del dispositivo SX1276	63
B.1. Parámetros configurables para la Transmisión y Recepción	73

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Ana Cristina López Ochoa autora del trabajo de titulación "Diseño e implementación de un registrador de datos para la adquisición de información limnigráfica", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 23 de abril de 2019



Ana Cristina López Ochoa

C.I: 0105434633

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Ana Cristina López Ochoa, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño e implementación de un registrador de datos para la adquisición de información limnigráfica", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 23 de abril de 2019



Ana Cristina López Ochoa

C.I: 0105434633





Dedicatoria

A Dios.

Por darme la vida, salud y por permitirme concluir mi carrera universitaria.

A mis padres.

Por la formación que me han dado para llegar a ser la persona que soy en la actualidad, por siempre estar a mi lado, por brindarme su amor y su apoyo incondicionalmente. Gracias a ustedes por motivarme siempre para alcanzar todos mis anhelos.

A toda mi familia.

Especialmente a mis hermanos y sobrinos, quienes han confiado en mí y han estado conmigo en todo momento.

A Walter Astudillo.

Por ser un buen amigo y una persona muy especial en mi vida, por ayudarme y apoyarme siempre.

Ana Cristina López Ochoa





Agradecimientos

A mis familiares.

A mis padres, hermanos y sobrinos por estar a mi lado siempre, gracias a ustedes por ser el pilar fundamental en mi vida.

A mis maestros.

Especialmente a los Ingenieros Geovany Lupercio y Fabián Astudillo, por su confianza y apoyo. Quienes con sus conocimientos supieron dirigirme en el desarrollo de este trabajo.

A los Ingenieros.

Sebastián Placencia y Jhonny Guamán por sus valiosos aportes para la consecución de este trabajo.

A la Universidad de Cuenca.

En especial a mis maestros, amigos y compañeros de clase, que gracias a su compañerismo, amistad y apoyo han aportado en mi vida universitaria.

A Walter Astudillo.

Por la ayuda que me brindó a lo largo de éste trabajo y por su apoyo incondicional.

Ana Cristina López Ochoa





Abreviaciones y Acrónimos

ADC Analog to Digital Converter. [6](#), [30](#), [59](#), [60](#)

BW Bandwidth. [14–16](#), [45](#)

CF Carrier Frequency. [15](#), [16](#)

CR Coding Rate. [14](#), [16](#), [45](#)

EMC Electromagnetic Compatibility. [16–18](#), [36](#), [39–41](#)

EMI Electromagnetic Interference. [16](#), [17](#)

FSK Frequency-shift keying. [14](#)

HF High Frequency. [27](#)

I2C Inter Integrated Circuits. [10](#), [32](#), [71](#)

ISM The industrial, scientific and medical. [7](#), [12](#), [27](#), [28](#)

LF Low Frequency. [27](#)

LoRa Long Range. [2](#), [3](#), [5](#), [7](#), [12–16](#), [25–27](#), [29](#), [44](#), [53](#), [59](#), [62](#), [71](#), [73](#)

LPWAN Low Power Wide Area Network. [7](#), [12](#)

MISO Master In Slave Out. [10](#), [11](#), [33](#)

MOSI Master Out Slave In. [10](#), [11](#), [33](#)

PCB Printed Circuit Board. [2](#), [3](#), [5](#), [18](#), [36](#), [37](#), [39](#)

PROMAS Programa para el Manejo de Agua y Suelo. [1](#), [2](#)

RF Radio Frequency. [7](#), [12](#), [19](#), [25](#), [29](#), [33](#), [36](#)

RSSI Received Signal Strength Indicator. [44](#), [49](#), [51](#), [83](#)

RTC Real Time Clock. [9](#), [36](#), [41](#), [71](#)

SCK Serial Clock. [10](#), [34](#)

SF Spreading Factor. [14–16](#), [45](#)



SNR Signal-to-Noise Ratio. [13](#), [15](#), [44](#), [49](#), [51](#), [83](#)

SPI Serial Peripheral Interface. [10](#), [11](#), [28](#), [32–34](#), [59](#), [62](#), [63](#), [67](#), [71](#)

SS Select Slave. [10](#), [34](#)

SSM Spread Spectrum Modulation. [12](#)

TP Tansmission Power. [16](#)



Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se expone el contexto, el problema y la justificación del proyecto de titulación, así como la justificación, el alcance, los objetivos generales, y finalmente, los objetivos específicos a cumplir durante su desarrollo.

1.1. Identificación del problema

En algunas áreas de la investigación científica se requiere de datos hidro-meteorológicos. Estos datos son adquiridos usando varios tipos de sensores. En función del tipo de sensor se adquiere datos de diferentes variables hidro-meteorológicas como: temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, radiación UV, cantidad de lluvia, nivel de los ríos, etc. Los datos son procesados en un centro de datos y pueden ser usados con diferentes objetivos. Con el adecuado procesamiento de los datos adquiridos es posible impulsar el desarrollo de actividades como la agricultura, ganadería, prevención de desastres entre otras. Varias de las áreas requieren que los datos estén disponibles en línea en *quasi*-tiempo real.

El Programa para el Manejo de Agua y Suelo ([PROMAS](#)), realiza investigación y contribuye al manejo sostenible de los recursos de agua y suelo. El [PROMAS](#) cuenta con 130 estaciones que se han desplegado en un área geográficamente extensa en las provincias de Azuay, Cañar y Chimborazo. En la actualidad, la recolección de datos requiere la movilización de personal *in-situ*. El personal visita las estaciones aproximadamente cada 30 días.

Para solventar este problema, se propuso un proyecto de investigación para trabajar en el diseño e implementación de una red inalámbrica para adquirir la información y transmitirla al centro de datos del [PROMAS](#). El proyecto se intitula “Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba” ganador del XV concurso



de la DIUC en el año 2016 [1]. El proyecto se desarrolla como parte del grupo de “procesamiento digital de señales y comunicaciones” dentro del departamento de eléctrica, electrónica y telecomunicaciones (DEET). Este proyecto de investigación tiene como objetivo desarrollar registradores de datos que faciliten la adquisición y la recolección de datos en tiempo real. Como parte del proyecto se han desarrollado varios prototipos para diferentes tipos de estaciones entre ellas una estación limnigráfica [2] [3]. El prototipo de registrador de datos versión 1 está implementado con una tarjeta de desarrollo LoPy4 [2]; esta tarjeta cuenta con interfaces WiFi, *Bluetooth Low Energy* (BLE), Sigfox [4] y LoRa [5]. La alimentación del prototipo se la realiza usando un panel solar y una batería gestionado por un controlador de carga.

1.2. Justificación

El proyecto de investigación “Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba” busca implementar registradores de datos para tener la información en tiempo real en el centro de datos del PROMAS. El primer prototipo de registrador de datos limnigráfico usa la tarjeta de desarrollo LoPy4. Para esta primera aproximación se tomó en cuenta mínimamente la reducción del consumo energético. Para la segunda versión, el consumo energético es un aspecto importante; para reducirlo, se optó por utilizar componentes con bajo consumo energético y un circuito para la activación del sensor limnigráfico. Además, en la segunda versión se busca implementar todos los dispositivos y circuitería en una placa compacta PCB en montaje superficial.

El diseño y la implementación de la segunda versión del registrador de datos debe basarse en un microcontrolador de bajo consumo y un transceptor con tecnología LoRa. Este dispositivo será capaz de adquirir datos, digitalizarlos, almacenarlos y transmitirlos de forma automática. El alcance del dispositivo será de al menos 1 Km.

1.3. Alcance

La contribución de este trabajo se enfoca en el diseño e implementación de un dispositivo registrador de datos usando componentes de montaje superficial, que permita la adquisición de datos limnigráficos mediante el sensor WL400. El prototipo está basado en un microcontrolador de bajo consumo energético y un transceptor LoRa. Adicionalmente, se propone optimizar el consumo energético y que la comunicación tenga un alcance de al menos 1 Km.



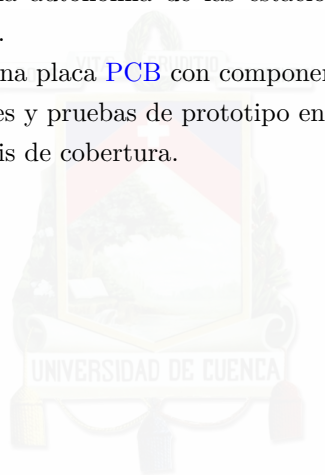
1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un dispositivo registrador de datos compacto en montaje superficial para la adquisición de datos limnigráficos y su transmisión usando el módulo SX1276.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Estudio y selección de módulos transceptores de bajo consumo energético.
2. Diseño e implementación de un registrador de datos compacto optimizando el consumo energético y aumentando la autonomía de las estaciones, con hasta 1 Km de alcance utilizando tecnología [LoRa](#).
3. Diseño y construcción de una placa [PCB](#) con componentes de montaje superficial.
4. Montaje de los componentes y pruebas de prototipo en el laboratorio.
5. Pruebas de campo y análisis de cobertura.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se incluye una revisión teórica de los conceptos relacionados con el desarrollo del trabajo. Se inicia describiendo la variable limnigráfica que se mide con el prototipo y estaciones limnigráficas automáticas. Luego se mencionan los dispositivos utilizados, tales como: microcontrolador, transceptor, reguladores de voltaje, memoria externa, reloj en tiempo real y la comunicación a usarse entre los dispositivos. Además, se exponen los aspectos más relevantes de la modulación [LoRa](#), y la importancia que se le debe dar a la compatibilidad electromagnética antes de construir el diseño de la placa [PCB](#).

2.1. Variables Limnigráficas

Una variable limnigráfica registra continuamente los niveles de agua en el transcurso del tiempo. Estas variables son de tipo mecánico o electrónico [6]. El interés de conocer las variables limnigráficas permite que se den alertas de tempestades o inundaciones, de forma que se pueda actuar a tiempo para reducir su impacto [7].

2.2. Estaciones Limnigráficas automáticas

Una estación limnigráfica automática es un equipo de adquisición de datos en el que los dispositivos internos adquieren, almacenan y transmiten la información limnigráfica de forma automática, sin necesidad de la presencia de personal. Estos equipos son concebidos especialmente para instalación a la intemperie, en áreas remotas desatendidas con posibilidad de constituir sistemas o redes de estaciones compuestas por un número indeterminado de estaciones.

En las estaciones limnigráficas automáticas se recomienda que las mediciones se realicen en tiempo real con el fin de mantener la homogeneidad en el registro de los datos. Cuenta con varios bloques que hacen de ella un dispositivo completo. Estos bloques son representados por sensores, dispositivos periféricos, sistema de fuentes de energía, reloj de tiempo real, dispositivos de conexión, indicadores luminosos entre otros [8].

Los sensores pueden ser analógicos o digitales; los sensores analógicos convierten la información en niveles continuos de potencial eléctrico, en cambio los digitales codifican la información mediante dos niveles 1 o 0 (alto o bajo).

Los dispositivos periféricos son los que se encargan en establecer la comunicación entre el microcontrolador principal y el ordenador para adquisición de datos y el tratamiento para que puedan ser visualizados de forma ordenada en una interfaz [9] [10].

2.3. Sistemas Embebidos

Un sistema embebido es un conjunto de circuitos electrónicos computarizados que están diseñados para cumplir una tarea específica en un producto en tiempo real. El cuál, debe contar con un microprocesador, componentes como: memorias, sensores, actuadores, puertos de entrada/salida (I/O), buses de datos, de direcciones y de control [11].

En el diseño y desarrollo de un sistema embebido es necesario considerar y optimizar las soluciones en hardware y software, así como reducir la memoria, hacer uso eficiente de las baterías y sobre todo que esté asociado con aplicaciones de tiempo real. Utilizar sistemas de comunicación disponibles actualmente y tratar de ofrecer dispositivos autónomos e inteligentes.

2.4. Microcontrolador

El desarrollo de los sistemas embebidos ha surgido gracias al uso del microcontrolador que han marcado avances significativos en el área de la tecnología. La mayoría de las tareas que realiza un microcontrolador las puede realizar un ser humano, la diferencia radica en la velocidad, el trabajo a largo plazo sin descanso y la exactitud con que realizan dicha tarea [12].

Un microcontrolador se define como un dispositivo programable que ejecuta un conjunto de instrucciones grabadas en su memoria, trabaja con datos almacenados temporalmente e interactúa con el exterior usando buses de entrada y salida, véase la Figura 2.1. Además, resulta ser mucho más simple y pequeño tanto físicamente como en consumo energético. Los elementos de un microcontrolador son: oscilador, unidad de procesamiento central (Central Processing Unit (CPU)), memoria de acceso aleatorio (Random Access Memory (RAM)), memoria de sólo lectura (Read-Only Memory (ROM)), puertos o buses de entrada y salida y [Analog to Digital](#)

[Converter \(ADC\)](#). También cuentan con sistemas como el de reset, modo de bajo consumo y protección ante copia.

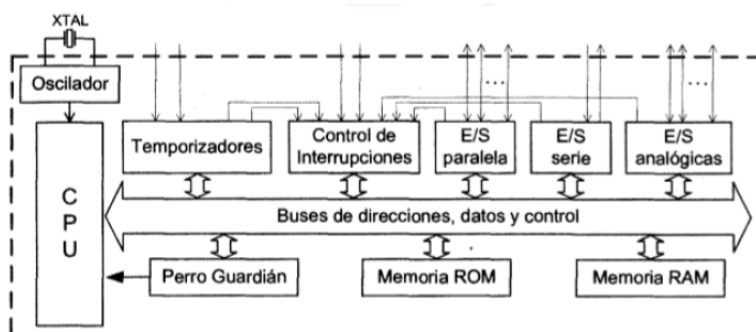


Figura 2.1: Diagrama de bloques general de un microcontrolador

Fuente:[13]

2.5. Transceptor con tecnología LoRa

Un transceptor es un dispositivo capaz de procesar información en modo de transmisión y recepción al mismo tiempo. Proporciona comunicación de espectro ensanchado y alta tolerancia a interferencias mientras minimiza el consumo de corriente. Los transceptores [LoRa](#) operan en las bandas de radio ISM ([The industrial, scientific and medical \(ISM\)](#), por sus siglas en inglés), (véase la Tabla 2.1). Son ideales para aplicaciones inalámbricas de radiofrecuencia ([Radio Frequency \(RF\)](#)), de largo alcance, por lo que tienen la capacidad de comunicarse con la topología M2M (Máquina a máquina). Estos transceptores soportan modulación [LoRa](#) en proyectos de red de baja potencia y amplia área ([Low Power Wide Area Network \(LPWAN\)](#), por sus siglas en inglés). Son de bajo consumo energético, dado que solo realizan la emisión y recepción de datos durante un tiempo determinado, lo que hace que aumente el ciclo de vida de las baterías de los sistemas embebidos utilizados.

La técnica de modulación de espectro ensanchado permite que los transceptores alcancen altas sensibilidades y una alta potencia. Lo que hace que estos transceptores sean óptimos para cualquier aplicación que requiera alto rango.

La Tabla 2.1 presenta las principales frecuencias ISM compatibles con los dispositivos [LoRa](#).

Banda ISM	Frecuencia mínima	Frecuencia máxima	Ancho de Banda	Usos por continente
433 MHz	433.050 MHz	434.790 MHz	1.84 MHz	Europa, África y parte del norte de Asia.
869 MHz	868 MHz	870 MHz	2 MHz	Europa, África, Asia y Oceanía
900 MHz	902 MHz	928 MHz	26 MHz	Continente americano

Tabla 2.1: Bandas de frecuencia ISM compatibles con los transceptores LoRa

Fuente: [14]

2.6. Reguladores de Tensión

Un regulador de voltaje básicamente es un dispositivo que se alimenta de una tensión V_{in} (Fuente de alimentación de entrada) que puede ser variable y es capaz de entregar una tensión V_{out} (Voltaje de salida) que es casi constante; en donde V_{in} superior a V_{out} . Este dispositivo es utilizado para garantizar tensiones constantes sin importar los cambios en los niveles de tensión a su entrada protegiendo a los circuitos electrónicos de posibles daños. Además, debe ser capaz de proporcionar corrientes de salida desde unas cuantas decenas de miliamperios en el caso de reguladores pequeños

- **Reguladores lineales**

Controlan la tensión de salida ajustando continuamente la tensión en un transistor de potencia conectado en serie entre la entrada no regulada y la carga. Son muy simples de usar y se encuentran disponibles para distintos valores de voltaje, tanto positivos como negativos. Tienen protección interna contra corriente, no requiere circuitos adicionales para el ajuste.

- **Reguladores de conmutación**

El *Step-down* es un tipo de configuración para los reguladores de conmutación, permite obtener una tensión de salida fija de +5V o una tensión positiva ajustable mediante un divisor de tensión externo. Tiene mayor complejidad de circuito y un mayor ruido de rizado en comparación de los reguladores de tensión lineales. Los reguladores de conmutación se utilizan especialmente en sistemas digitales, donde a menudo es mucho más importante una alta eficiencia y un peso bajo que un rizado de salida pequeño.

2.7. Sensor de temperatura y humedad

Los sensores de las series DHT11 y DHT22 son sensores digitales de Temperatura y Humedad. Utilizan un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir aire circundante y solo se necesita de un pin para la lectura de los datos [15].

2.8. Sensor WL400

El sensor de nivel de agua WL400 (Figura 2.2) es un transductor de presión sumergible que tiene un sistema dinámico de compensación de temperatura, que permite mediciones de alta precisión en un amplio rango de temperatura. El sensor de nivel de agua se adapta fácilmente a todos los registradores de datos y suministra la información mediante una corriente variable lineal, proporcional a la profundidad medida. El rango de medición se encuentra entre 0 y 15 pies, siendo el rango de corriente de 4mA a 20mA respectivamente.



Figura 2.2: Sensor WL400

Fuente: [16].

2.9. Reloj en tiempo real (RTC)

Un reloj de tiempo real (RTC) es un dispositivo electrónico que permite obtener mediciones de tiempo en las unidades temporales que empleamos de forma cotidiana. Los RTC normalmente están formados por un resonador de cristal integrado con la electrónica necesaria para contabilizar de forma correcta el paso del tiempo.

2.10. Almacenamiento

Se requiere que el sistema pueda respaldar la información adquirida, para ello se usa memoria serial flash. La memoria flash es un tipo de dispositivo no volátil (no es necesario que esté conectado a la corriente para que siga almacenando la información). Es una evolución de las memorias EEPROM, pero con una gran mejora tanto en el aspecto económico como en el físico,

ya que son más pequeñas y por lo tanto fáciles de transportar. Además la velocidad es mucho mayor con respecto a las otras memorias existentes debido a su capacidad de borrar y escribir en una misma operación.

2.11. Protocolos de comunicación

Existen diferentes formas para la comunicación entre dispositivos que ayudan a simplificar e incorporar nuevos módulos o tarjetas integradas. Los protocolos de comunicación más comunes en estos tipos de módulos se detallan a continuación:

- **Comunicación (Inter Integrated Circuits (I2C))**. Es un protocolo síncrono de comunicación serial, en la que se diferencian dos elementos básicos, un maestro y un esclavo. El protocolo I2C utiliza sólo dos vías de comunicación. El *SDA-Serial Data*, que es la vía de comunicación entre el maestro y esclavo para enviarse información. Y el *SCL-Serial Clock*, que corresponde a la vía por donde viaja la señal de reloj.
- **Comunicación serial**. Es uno de los más utilizados por su simplicidad, confiabilidad y gran acogida por parte de fabricantes para la adaptación de sus dispositivos y módulos con microprocesadores y computadores. Los pines de comunicación son (Transmitted Data) Datos Transmitidos (TXD) y Received Data, Datos Recibidos (RXD). Para este protocolo es necesario especificar la velocidad de transferencia de datos en baudios, por ejemplo, en 9600 bps [17].
- **Comunicación Serial Peripheral Interface (SPI)**. Al igual que la comunicación I2C, previo al uso de este protocolo de comunicación se debe habilitar la opción SPI. Para utilizar el protocolo de comunicación SPI se ocupa los pines nombrados Master Out Slave In (MOSI), Master In Slave Out (MISO), Serial Clock (SCK) y Select Slave (SS). El microcontrolador permite conectar varios módulos o circuitos integrados.

El protocolo de comunicación SPI tiene una arquitectura de tipo maestro-esclavo. El dispositivo maestro (*master*) puede iniciar la comunicación con uno o varios dispositivos esclavos (*slave*), y enviar o recibir datos de ellos. Los dispositivos esclavos no pueden iniciar la comunicación, ni intercambiar datos entre ellos directamente [18].

La comunicación SPI de tipo maestro-esclavo tiene tres configuraciones que son:

- **SPI bus síncrono**: El dispositivo maestro proporciona una señal de reloj, que mantiene a todos los dispositivos sincronizados. Esto reduce la complejidad del sistema frente a los sistemas asíncronos.
- **Conexión de múltiples esclavos independientes en un bus SPI**: En el cual se necesita de hardware adicional o salidas digitales dedicadas y controladas por el dispositivo maestro para seleccionar el dispositivo esclavo conectado al bus.



Figura 2.3: Diagrama de SPI síncrono

Fuente: [18]

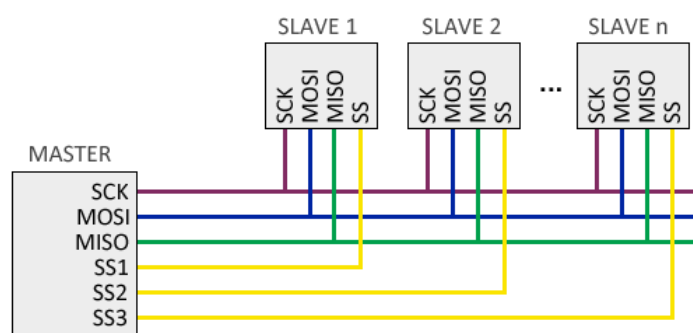


Figura 2.4: Diagrama de conexión de múltiples esclavos independientes en un bus SPI

Fuente: [18]

- **SPI conexión en cascada:** En la cual el maestro genera una señal que habilita a todos los dispositivos a la vez y las salidas de datos de los esclavos (**MISO**) se conecta en cascada con la entrada de datos (**MOSI**) del siguiente esclavo, así el maestro enviará los datos sólo al primer esclavo y recibirá respuesta del último esclavo [18].

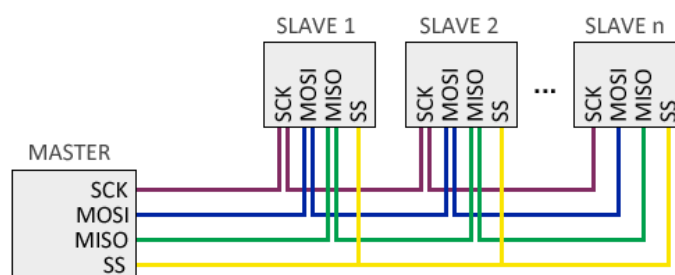


Figura 2.5: Diagrama de conexión de múltiples esclavos en cascada

Fuente: [18]

2.12. Redes de Cobertura Amplia y Baja Potencia (LP-WAN)

Las redes de cobertura amplia y baja potencia ([LPWAN](#)), son redes inalámbricas que cubren aplicaciones de largo alcance y está diseñadas para comunicaciones con bajas tasas de datos con el objetivo de mantener un bajo consumo de energía y prolongar la vida útil de las baterías de los dispositivos [19]. A continuación se detallan las principales características y requerimientos para el diseño de una red [LPWAN](#).

- Trabajan en la banda [ISM](#) sin necesidad de licencia.
- Para limitar el consumo energético, el dispositivo se deberá activar solo cuando sea necesario la transmisión o recepción de información. Debido a esto, es preferible usar una red tipo estrella y no una tipo malla.
- Para evitar el cambio de baterías, el funcionamiento debe ser de bajo consumo energético.
- Los dispositivos deben ser de bajo costo, fácil instalación y su hardware y software deben ser limitados.
- La infraestructura de la red debe ser de fácil implementación a nivel nacional, y la posibilidad de moverse a través de los países. Además, debe ser una tarea fácil y simple agregar un nuevo dispositivo a la red.
- La transferencia de información entre el dispositivo y el usuario final debe ser segura. El enlace de [RF](#) debe ser robusto contra interferencias.
- La modulación debe ser robusta a algún posible desvanecimiento.

2.13. LoRa

[LoRa](#) es el tipo de modulación en radiofrecuencia patentado por Semtech, que funciona dentro de la banda [ISM](#). La asignación de frecuencias y los requisitos reglamentarios para [ISM](#) varían por región, véase la Tabla 2.2, dos de las frecuencias más populares son de 868 MHz utilizada en Europa y 915 MHz utilizada en América del Norte [20].

[LoRa](#) tiene alta tolerancia a las interferencias y una alta sensibilidad para recibir datos. Es de bajo consumo energético y de largo alcance, y su transferencia de datos es baja (hasta 255 bytes).

2.13.1. Modulación LoRa

Es una modulación de espectro ensanchado ([Spread Spectrum Modulation \(SSM\)](#), por sus siglas en inglés) que utiliza la técnica chirp que consiste en modular el mensaje por medio de una señal que varía continuamente en frecuencia. El espectro ensanchado (SSM) codifica la señal

Especificaciones	Europa	América del Norte
Banda de frecuencia	867-869 MHz	902-928 MHz
Canales	10	64 + 8 + 8
Canal banda ancha ascendente	125/250 kHz	125/500 kHz
Canal banda ancha descendente	125 kHz	500 kHz
TX encendido	+14 dBm	+20 dBm típ (+30dBm permitidos)
TX desconectar	+14 dBm	+27 dBm
SF Up	7-12	7-10
Velocidad de datos	250 bps - 50 kbps	980 bps - 21.9 kbps
Link Budget Up	155 dB	154 dB
Link Budget Dn	155 dB	157 dB

Tabla 2.2: Especificaciones LoRa para Europa y Estados Unidos

Fuente: LoRa Alliance

base con un mayor ancho de banda, reduce el consumo de energía y aumenta la resistencia a las interferencias electromagnéticas [20].

2.13.2. Espectro Ensanchado

Al aumentar el ancho de banda de la señal, puede disminuir la relación señal a ruido (Signal-to-Noise Ratio (SNR), por sus siglas en inglés) de un canal de radio. En los sistemas de espectro de propagación de secuencia directa (DSSS, por sus siglas en inglés), la fase de portadora del transmisor cambia de acuerdo con una secuencia de códigos. Este proceso se logra al multiplicar la señal de datos deseada por un código de expansión, conocido como secuencia de chips.

La secuencia de chips se produce a una velocidad mucho más rápida que la señal de datos y, por lo tanto, distribuye el ancho de banda de la señal más allá del ancho de banda original ocupado por la señal original. Véase en la Figura 2.6 [21].

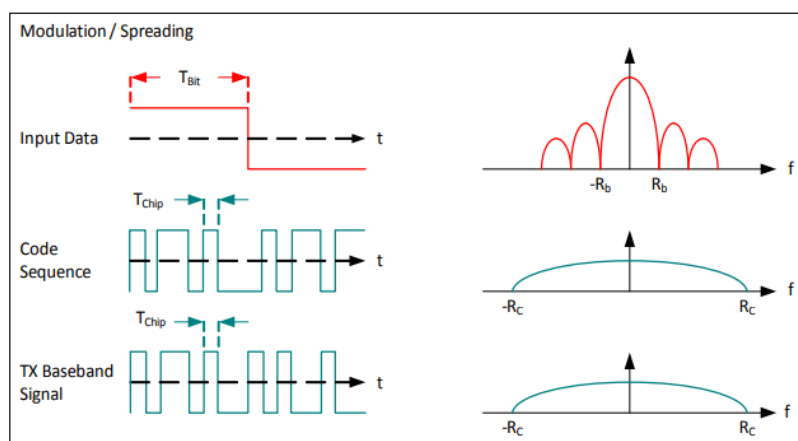


Figura 2.6: Proceso de ensanchamiento

Fuente: [21].

La modulación LoRa aborda todos los problemas asociados con los sistemas DSSS para proporcionar una alternativa de bajo costo y bajo consumo de energía.

En la modulación LoRa, la propagación del espectro se logra generando una señal de chirp que varía continuamente en la frecuencia. Una ventaja de este método es que las compensaciones de tiempo y frecuencia entre el transmisor y el receptor son equivalentes, lo que reduce en gran medida la complejidad del diseño del receptor. El ancho de banda de frecuencia de este chirp es equivalente al ancho de banda espectral de la señal. La señal de datos deseada se fragmenta a una velocidad de datos más alta y se modula en la señal de chirp. La relación entre la tasa de bits de datos deseada, la tasa de símbolos y la tasa de chips para la modulación LoRa se puede expresar de la siguiente manera [20] [21]:

Se define la tasa de bits de modulación, R_b , como:

$$R_b = SF * \frac{\text{CodigoTasa}}{\frac{2^{SF}}{BW}} \text{bits/s}$$

Donde:

- $\text{CodigoTasa} = \frac{4}{4+CR}$
- **Spreading Factor (SF)**= Factor de ensanchamiento, varía entre 7 y 12
- **Coding Rate (CR)**= Tasa de codificación, varía entre 1 y 4
- **Bandwidth (BW)**= Ancho de Banda (Hz)

2.13.3. Propiedades claves de la modulación LoRa

Para la modulación LoRa hay que tener en cuenta que el ancho de banda sea escalable, ya que puede usarse tanto para aplicaciones de salto de frecuencia de banda estrecha como de secuencia directa de banda ancha. LoRa se puede adaptar fácilmente para cualquiera de los modos de operación con solo unos pocos cambios de registro de configuración simples. Debido a la ganancia de procesamiento asociada con LoRa, la potencia de salida del transmisor se puede reducir en comparación con un enlace **Frequency-shift keying (FSK)** convencional mientras se mantiene el mismo o mejor presupuesto de enlace.

Debido a su naturaleza asíncrona, una señal LoRa es muy resistente a los mecanismos de interferencia dentro y fuera de la banda, de este motivo existe alta robustez. Para una potencia de salida y rendimiento fijos, el presupuesto de enlace de LoRa excede al de FSK convencional. Cuando se toma en conjunto con la probada robustez de los mecanismos de interferencia y desvanecimiento, esta mejora en el presupuesto del enlace puede traducirse fácilmente a una mayor capacidad de largo alcance.

Una característica principal de LoRa es que el pulso del chirp es relativamente de banda ancha y, por lo tanto, LoRa ofrece inmunidad a múltiples rutas y desvanecimiento, lo que lo hace ideal para su uso en entornos urbanos y suburbanos, donde ambos mecanismos dominan. Por otra parte, el cambio Doppler causa un pequeño cambio de frecuencia en el pulso LoRa, que introduce un cambio insignificante en el eje de tiempo de la señal de banda base. LoRa es ideal para los enlaces de comunicaciones de datos móviles y sistemas inalámbricos de monitoreo.

En adición, la modulación LoRa emplea factores de dispersión ortogonales que permiten que se transmitan múltiples señales de difusión al mismo tiempo y en el mismo canal sin una degradación mínima de la sensibilidad de RX. Las señales moduladas a diferentes factores de propagación aparecen como ruido en el receptor de destino y pueden tratarse como tales [21].

2.13.4. Parámetros de transmisión

Un dispositivo LoRa, puede ser configurado para usar diferente Ancho de Banda, Factor de ensanchamiento, Frecuencia de Portadora, Potencia de Transmisión y Tasa de Codificación para así obtener una eficiencia de conexión y bajo consumo energético. Posteriormente se hace una breve descripción de estos parámetros:

Frecuencia de portadora (Carrier Frequency (CF)): Es la frecuencia central utilizada para la banda de transmisión. Para el SX1276 permite el ajuste de 137 MHz a 1020 MHz.

Factor de propagación (SF): Es la relación entre la tasa de símbolos y la tasa de chips. Un factor de dispersión más alto aumenta la relación señal a ruido (SNR), y por lo tanto la sensibilidad y el rango, pero también aumenta el tiempo de aire del paquete. El número de fichas por símbolo se calcula como 2^{SF} . Por ejemplo, con un SF de 12 (SF12) se utilizan 4096 chips / símbolo. Cada aumento en SF reduce a la mitad la velocidad de transmisión y, por lo tanto, duplica la duración de la transmisión y, en última instancia, el consumo de energía. El factor de dispersión se puede seleccionar de 6 a 12. SF6, con la transmisión de mayor velocidad, es un caso especial y requiere operaciones especiales. Por ejemplo, se requieren encabezados implícitos. Las comunicaciones de radio con diferentes SF son ortogonales entre sí y es posible la separación de la red utilizando diferentes SF.

Ancho de banda (BW): Es el rango de frecuencias en la banda de transmisión. Un BW más alto proporciona una velocidad de datos más alta (por lo tanto, tiempo más corto en el aire), pero una sensibilidad más baja (debido a la integración de ruido adicional). Un BW más bajo proporciona una sensibilidad más alta, pero una velocidad de datos más baja. BW inferior también requiere cristales más precisos (menos ppm). Los datos se envían a una velocidad de chip igual al ancho de banda. Por lo tanto, un ancho de banda de 125 kHz corresponde a una velocidad de chip de 125 kcps. El SX1276 tiene tres configuraciones de ancho de banda

programables: 500 kHz, 250 kHz y 125 kHz.

Potencia de Transmisión (Transmission Power (TP)): Puede ser variado entre -4 dBm y 20 dBm, pero debido a límites de implementación, se puede ajustar 2 dBm a 20 dBm. Con potencias mayores a 17 dBm sólo se puede usar el 1 % del ciclo de trabajo.

Tasa de Codificación (CR): Es la tasa de FEC utilizada por el módem LoRa y ofrece protección contra ráfagas de interferencias. Un CR más alto ofrece más protección, pero aumenta el tiempo en el aire. Las radios con diferente CR (y el mismo CF / SF / BW), todavía pueden comunicarse entre sí [22].

2.14. Compatibilidad electromagnética

La compatibilidad electromagnética (Electromagnetic Compatibility (EMC), por sus siglas en inglés) hace referencia a la habilidad de un sistema, equipo o producto de funcionar correctamente, sin causar interferencias electromagnéticas a otros equipos, al mismo tiempo, ser inmune a las emisiones que puedan causarle otros sistemas. Se puede definir a la interferencia electromagnética (Electromagnetic Interference (EMI), por sus siglas en inglés) como la emisión de energía electromagnética que degrada o perjudica la calidad de una señal o el funcionamiento de un sistema [23].

2.14.1. Aspectos generales de la EMC

Un sistema se considera electromagnéticamente compatible con su medio si cumple las siguientes normas: (1). Si no causa interferencia con otros sistemas; (2). Si no es susceptible a las emisiones de otros sistemas; (3). Si no provoca interferencia consigo mismo.

En la Figura 2.7 se presenta un esquema básico de los elementos que intervienen en un problema de EMC. Hay que remarcar que solo se habla de interferencia siempre y cuando se provoque un mal funcionamiento en el receptor EMC.

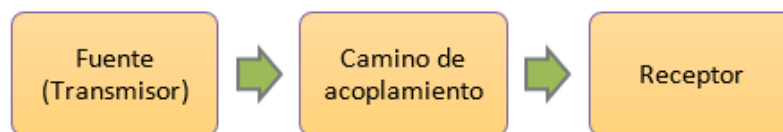


Figura 2.7: Elementos básicos de un problema de EMC

Fuente:[39]

Las interferencias ocurren si la energía recibida provoca en el receptor un comportamiento



indeseado. Una transferencia de energía no intencionada causa interferencia solo si la magnitud de esa energía es lo suficientemente grande, o su contenido espectral en la entrada del receptor hace que éste funcione de un modo indeseado.

Para prevenir interferencias se sugiere que se suprima la emisión de su fuente, hacer el camino de acoplamiento tan eficiente como sea posible, y hacer el receptor menos susceptible a la emisión. Las principales causas por las que la compatibilidad electromagnética cada vez cobra más interés son las siguientes:

- Aumento de los equipos electrónicos tanto en la industria como en el hogar (Fuentes de EMI).
- Equipos más grandes y más complejos.
- Aumento de sistemas de telecomunicación (radio, móviles, etc.).
- Disminución del margen de ruido de los sistemas digitales (disminución de la tensión de trabajo).
- Aumento de la frecuencia de trabajo de los equipos.

2.14.2. Requisitos de EMC para sistemas electrónicos

Básicamente existen dos requisitos de EMC impuestos en los sistemas electrónicos: primero los impuestos por las agencias gubernamentales y segundo, los impuestos por el fabricante del producto.

Los requisitos impuestos por las agencias gubernamentales son requisitos legales y, por lo general, no se pueden excluir. Estos requisitos se imponen para minimizar la interferencia producida por el producto. Sin embargo, el cumplimiento de estos requisitos de EMC no garantiza que el producto no cause interferencias.

Los requisitos de EMC que los fabricantes imponen voluntariamente a sus productos están destinados a dar como resultado la satisfacción del cliente. Se imponen con el fin de garantizar un producto confiable y de calidad.

2.14.3. Ventajas del diseño EMC

Las principales ventajas de un diseño adecuado de EMC son: (1). Minimizar el costo del producto; (2). Minimizar los retrasos en el programa de desarrollo; (3). Garantizar que el producto funcione satisfactoriamente en presencia de fuentes externas de ruido en su ubicación de instalación.

Una vez que el diseño ha pasado al desarrollo de prototipos es más difícil y costoso realizar cambios físicos, debido a que también se deben cambiar muchos otros aspectos del diseño. La

atención temprana y constante a la EMC minimiza los costos y reduce los retrasos, y reduce el riesgo de no cumplir con los requisitos reglamentarios.

En el diseño inicial, los orificios de los condensadores se pueden dejar vacíos y los orificios de las resistencias en serie se pueden “cablear” con una resistencia de 0 V. Si se producen problemas con las emisiones del reloj durante la prueba, se puede insertar un condensador y / o se puede insertar una resistencia en serie y solo se deben cambiar las ilustraciones de la PCB y la lista de piezas del producto. La atención temprana y continua al efecto de EMC le dará al producto un buen funcionamiento y evitará retrasos de todo tipo [23].

2.15. Criterios de diseño de la tarjeta de circuito impreso (PCB)

La disposición de componentes y el diseño correcto de la PCB son el factor más importante en la capacidad de un producto electrónico para cumplir con la normativa sobre emisiones radiadas y conducidas, así como la inmunidad del sistema a las fuentes externas.

Los componentes electrónicos en una placa PCB deben ser clasificados de acuerdo a su “velocidad” y “procesamiento”. Una manera conveniente y significativa de clasificar los componentes para lograr una compatibilidad electromagnética es hacerlo por su velocidad de señal, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Velocidad\ de\ la\ señal = \frac{f_o I_o}{\tau_r} \quad (2.1)$$

Donde:

- f_o , es la frecuencia fundamental de su señal.
- I_o , es la magnitud de su corriente de excitación.
- τ_r , es el tiempo de subida o bajada.

Esta velocidad de la señal es un indicador del contenido espectral de alta frecuencia de las señales del componente. En un sistema digital el componente clave de una señal que dicta su contenido espectral de alta frecuencia es su tiempo de subida o bajada. Es decir, una señal digital tiene un “ancho de banda” que es inversamente proporcional a su tiempo de subida, $BW = 1/\tau_r$. Por lo tanto, un reloj con un tiempo de subida o bajada de $500ps$ tiene un contenido espectral significativo de hasta 2 GHz.

Numerosos programas de diseño automatizado proporcionan un “autorouting” para que el esquema propuesto se distribuya y las partes se conecten de manera automática. Esto usualmente no es óptimo, ya que podría crear problemas de EMC. Por lo que, es mejor colocar los componentes de la velocidad más alta y enrutar manualmente sus tierras de conexión, teniendo

en cuenta los criterios anteriores. Los componentes de mayor velocidad, y las tierras a las que se conectan deben colocarse en la PCB lejos de los conectores externos y las tierras, como se observa en la Figura 2.8 [23].

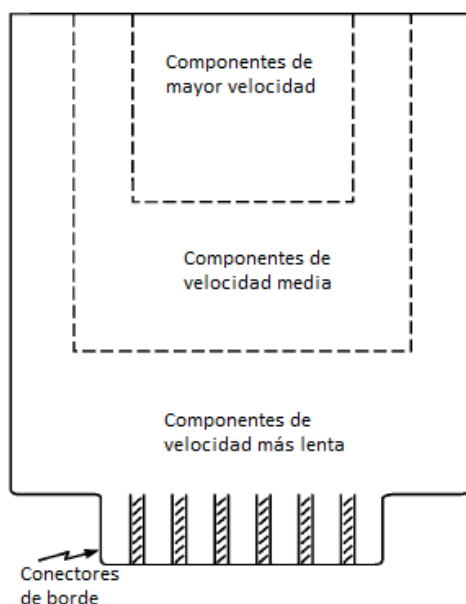


Figura 2.8: Componentes de mayor velocidad lejos de los conectores externos.

Fuente:[23].

2.16. Componentes básicos de un sistema de Radiofrecuencia

Un sistema de radiofrecuencia está compuesto por los transceptores y el canal de comunicación. Existen transmisores de todo tipo y una gama alta de aplicaciones, como es la transmisión de datos, voz, radio, etc. Las características del transmisor y receptor deben ajustarse a las características del canal.

Cada sistema debe cumplir con ciertos requisitos, como impedancia, nivel de señal, ganancia, respuesta a frecuencias, niveles de atenuación, etc. El transceptor es el encargado de generar o recibir la comunicación deseada a través del medio de transmisión [24].

La antena es la encargada de propagar la energía de RF u ondas de radio al espacio libre. Ésta deberá ser de la mejor calidad posible y se selecciona en base a las necesidades de la aplicación, frecuencia de operación, impedancia, ganancia, patrón de radiación, tamaño, costo y debe adaptarse a las condiciones climatológicas del sitio. Los conectores sirven para conectar

el transceptor y la antena; existen conectores de varios tipos, como UHF, N, SMA, TNC, BNC, etc, Todos estos con sus variantes en macho y hembra, de igual manera que la antena se recomienda seleccionar de la mejor calidad posible, ya que si el conector está defectuoso se presentarán problemas al momento de que el sistema esté operando [24].

Las resistencias, inductores y capacitores, son piezas que componen una radiofrecuencia del circuito. Cuando estos componentes están diseñados en circuitos con frecuencias variables, existen cambios en los elementos, es decir los capacitores en ciertas frecuencias llegan a comportarse como inductores, así como los inductores pueden llegar a parecerse a los condensadores, resistencias y pueden tender a ser un poco de ambos [25].

2.17. Jaula de Faraday

Es una caja o rejilla metálica cuya finalidad es el proteger los campos eléctricos estáticos, ya que en su interior el campo eléctrico es nulo y se utiliza en la protección de descargas eléctricas. En la Figura 2.9, se muestra el funcionamiento de una jaula de Faraday.

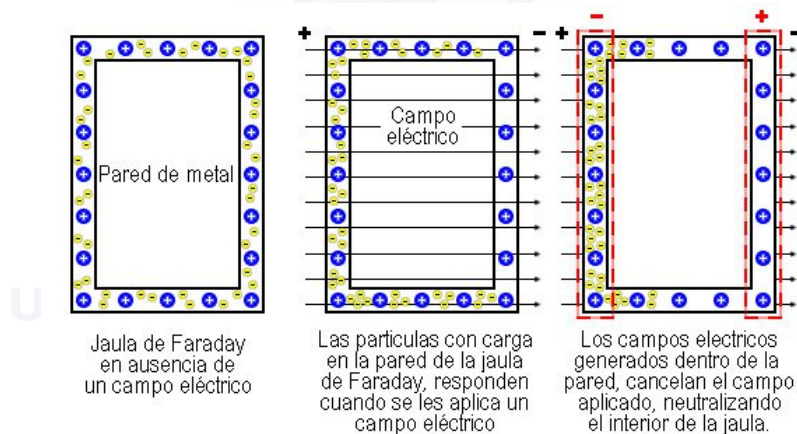


Figura 2.9: Funcionamiento de una Jaula de Faraday.

2.18. Grado de protección

Los grados de protección IP hacen referencia al estándar internacional IEC 60529 (Degrees of Protection) [26], que indica el nivel de protección de los equipos eléctricos o electrónicos frente a la entrada de agentes externos: polvo o agua. Las letras "IP" identifican al estándar (del inglés: International Protection, Protección Internacional). Este código está formado por dos números de una cifra cada uno, situados inmediatamente después de las letras "IP" e independientes el



uno del otro. El primer dígito numérico describe el nivel de protección ante polvo, éste valor puede oscilar entre 0 y 6. El segundo dígito numérico describe el nivel de protección frente a líquidos, y puede oscilar entre los valores 0 y 8 [27].

Luego de la breve descripción de la protección IP se ha determinado que la carcasa de la estación limnigráfica debe contar mínimo con la norma IP55 para garantizar su integridad en un ambiente expuesto a polvo y agua.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Capítulo 3

Diseño y Desarrollo del Dispositivo

En este capítulo se da a conocer las generalidades y metodologías de los dispositivos a utilizar, se indica sus principales características, modo de trabajo, medios de comunicación y paquetes de software utilizados. Además, se describen los con criterios considerados para el diseño y el desarrollo del circuito electrónico que permite el acondicionamiento y adquisición de la señal del sensor limnigráfico. Se indica los parámetros requeridos para el diseño del circuito impreso final.

3.1. Introducción

El avance tecnológico y el desarrollo de las nuevas tecnologías programables facilitan el diseño y desarrollo de sistemas embebidos convirtiéndolos en fiables, robustos, compactos y de bajo consumo energético.

La recopilación de información en sistemas de comunicación, tanto en la adquisición de datos y transmisión han facilitado el procesamiento, la automatización de procesos, almacenamiento, menor costo, transmisión de datos a largas distancias, entre otros. La mayoría de las aplicaciones son posibles gracias a la gran disponibilidad y facilidad de los sensores que convierten las magnitudes físicas en señales eléctricas para su procesamiento [28].

3.2. Análisis de requerimientos

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques en base al cual ha sido diseñado e implementado el prototipo.

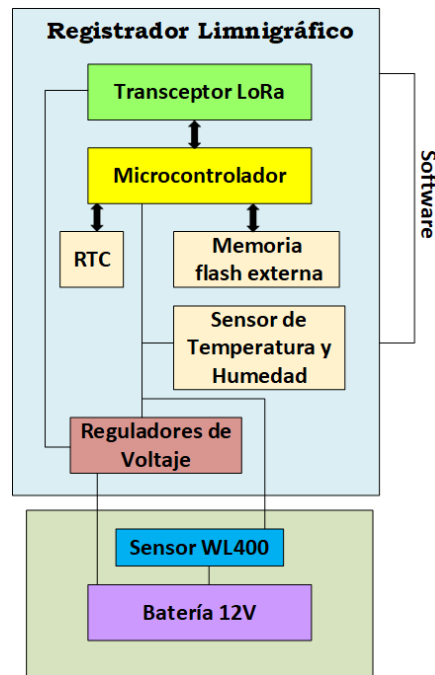


Figura 3.1: Diagrama de bloques del diseño del prototipo

Fuente:[29]

Entre los principales requerimientos funcionales del sistema, el prototipo debe ser de bajo consumo energético, tener un alcance al menos de 1 Km, ser compacto, realizar el acondicionamiento de la señal del sensor de agua, su adquisición, almacenamiento y transmisión en tiempo real. Además, por seguridad del dispositivo se deberá sensar parámetros de temperatura y humedad.

Por consiguiente, para diseñar el prototipo primero se analizaron los dispositivos a utilizar. El registrador de datos debe contar con un microcontrolador y transceptor de bajo consumo energético, por lo que se realizó una breve comparación entre varios dispositivos, eligiendo el más óptimo. Además, se explica el porque de la utilización de todas las tecnologías y de las herramientas propuestas en la Sección 2.

3.3. Descripción de los dispositivos utilizados

El registrador de datos limnigráficos está destinado a medir, registrar y transmitir de manera regular diversas variables en determinados tiempos. Se planteó el uso de dispositivos transceptores con la tecnología [LoRa](#). Para la lógica de programación del transceptor se necesita de un sistema embebido. Por lo tanto, para controlar el dispositivo [LoRa](#) se optó por utilizar un microcontrolador de bajo consumo. Además del transceptor y del microcontrolador, una estación limnigráfica contiene diferentes circuitos como: fuentes de alimentación de corriente continua, sensores, activación de transistores, señales de entrada, circuitos [RF](#), salida para LEDs indicadores de estados, entre otros.

3.3.1. Microcontrolador

El consumo de energía es un tema importante en los sistemas embebidos y muchas veces depende de los componentes que el prototipo contenga. En la actualidad, existe una necesidad cada vez mayor de diseñar dispositivos electrónicos que alimentados con baterías, tengan una gran autonomía. Cuyo coste de mantenimiento puede llegar a ser significativo en función de la frecuencia con la que haya que sustituir las baterías [\[30\]](#). En consecuencia, se necesita conocer las características técnicas y principales sobre el consumo energético de algunos microcontroladores, previo a la selección para el diseño de la estación limnigráfica. Para ello se ha seleccionado algunos de los microcontroladores más populares con el perfil que se necesita en este prototipo, se enlistan a continuación y sus características principales se detallan en la Sección [A.1](#):

- STM32L053R8
- ATmega328
- ATmega1284
- MSP-EXP432P401R
- PIC32MX340F512H

Todos los microcontroladores enlistados son dispositivos semiconductores contruidos con bloques internos de lógica que con su conexión puede ser programada mediante lenguajes dedicados. Además, tiene la facilidad de cargar algoritmos de programación de bajo hasta alto nivel, todo queda a criterio del programador. En la Tabla [3.1](#) se presenta un resumen de las características más relevantes de los microcontroladores presentados.

MCU	Voltaje de operación	Temperatura	Modo activo	Modo ahorro de energía
STM32L053R8	1.65 V a 3.6 V	-40 a 125°C	88 μ A	0.8 μ A
ATmega 328	1.8 V a 5.5 V	-40 a 85°C	0.3 mA	0.8 μ A
Atmega 1284	1.8 V a 5.5 V	-40 a 85°C	0.3 mA	0.6 μ A
MSP-EXP432P401R	3.3 V a 5V	-40 a 85°C	80 μ A	660nA
PIC32MX340F512H	7V a 15 V	-40 a 125°C	75 mA	0.9 mA

Tabla 3.1: Características principales de microcontroladores seleccionados

Para el diseño del prototipo de la estación limnográfica, se consideró como aspecto importante del microcontrolador el uso de memoria programable, la facilidad de programación, compatibilidad con los dispositivos [LoRa](#), el bajo costo y la fácil adquisición.

Tras el análisis de las características técnicas de los microcontroladores, la facilidad de programación y familiarización, en primera instancia se consideró el uso del microcontrolador STM32L053R8 por su bajo consumo energético y su compatibilidad con las librerías [LoRa](#), pero al realizar pruebas no fue eficiente, ya que el dispositivo al no tener actividad se reseteaba constantemente eliminando así el programa. En consecuencia, para el desarrollo del registrador de datos, se hizo uso del microcontrolador ATmega1284 por su familiarización, facilidad de implementación con el transceptor [LoRa](#), compatibilidad con los sensores y demás dispositivos utilizados.

El microcontrolador ATmega1284, es el responsable de tomar las lecturas de los sensores y también es el encargado de activar y desactivar el actuador convenientemente para realizar la lectura del sensor del nivel de agua. La Figura 3.2, muestra el diagrama de bloque donde se especifica la funcionalidad del microcontrolador en el dispositivo.

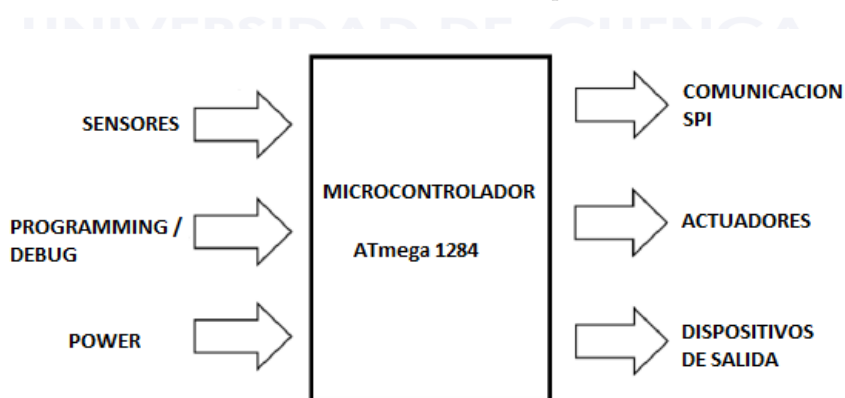


Figura 3.2: Diagrama de bloques del funcionamiento del Microcontrolador en el prototipo.

La Figura 3.8, muestra el esquema eléctrico del microcontrolador junto con las salidas para las conexiones con el resto de componentes. Las conexiones de cada pin del microcontrolador se establecieron a lo largo del desarrollo del presente trabajo siendo una selección adecuada

para las comunicaciones correctas entre componentes de entrada como de salida. Como es de conocimiento el microcontrolador contiene un oscilador interno, pero necesita de un oscilador externo que determina su frecuencia y velocidad de operación; el fabricante recomienda el uso de un oscilador de 16MHz para brindar un mejor funcionamiento de sus componentes internos.

3.3.2. Transceptor LoRa

Para realizar la transmisión se propuso el uso de transceptores **LoRa**, los cuáles cuentan con frecuencias de beneficio libre que son conocidas como Bandas **ISM** (Tabla 2.1). Para elegir un transceptor óptimo para la estación, se dará a conocer una pequeña comparación realizada entre los 3 transceptores más utilizados. Las características técnicas de estos transceptores, se incluyen en la Sección A.2.

- **Transceptor de largo alcance SX1272**

Este transceptor cuenta con el módem de largo alcance **LoRa** que proporciona comunicación de espectro ensanchado de largo alcance y alta inmunidad a interferencias mientras minimiza el consumo de corriente. Puede lograr una sensibilidad de más de -137 dBm. Tiene un amplificador de potencia integrado de +20dBm lo que produce un buen presupuesto de enlace. Este transceptor opera en un rango de frecuencia de 860-1000MHz [29].

- **Transceptor de largo alcance SX1276**

Este transceptor puede lograr una sensibilidad de más de -148 dBm y su rango de operación es de 137MHz a 1020MHz. Consta de un amplificador de potencia integrado de +20 dBm. Este transceptor tiene opciones configurables de ancho de banda que van desde 7.8 kHz hasta 500 kHz con factores de ensanchamiento que van desde 6 hasta 12, y que cubren todas las bandas de frecuencia disponibles [29].

- **Transceptor de largo alcance SX1278**

El transceptor SX1278 opera en un rango de frecuencias de 137-525MHz, ofrece opciones de ancho de banda y factor de ensanchamiento similar al SX1276, pero solo cubre las bandas de UHF o inferiores. Su sensibilidad es más de -148dBm y un amplificador de potencia integrado de + 20dBm.

De acuerdo a las Figuras A.2 y A.3 (Sección A.2) en los diagramas de bloque, la versión del SX1276/78 presenta mejoras a nivel de arquitectura respecto al SX1272. La principal mejora es la incorporación de multiplexores y demultiplexores para el manejo de bajas y altas frecuencias. Para los chips radio SX1276 Y SX1278, las bajas frecuencias (**Low Frequency (LF)**) corresponden a frecuencias por debajo de 525 MHz y las altas frecuencias (**High Frequency (HF)**) se encuentran por encima de 779 MHz [31] [29].

La Tabla 3.2 presenta las características principales de los transceptores de radio seleccionados.

Transceptor	Sensibilidad	Rango de Frecuencia	SF	Ancho de Banda
SX1272	-137 dBm	860 - 1000 MHz	6 - 12	125 - 500 kHz
SX1276	-148 dBm	137 - 1020 MHz	6 - 12	7.8 - 500 kHz
SX1278	-148 dBm	137 - 525 MHz	6 - 12	7.8 - 500 kHz

Tabla 3.2: Características principales de transceptores seleccionados

Los tres transceptores descritos anteriormente, tienen un voltaje de alimentación de 1.8 a 3.7 V. Su corriente en modo transmisión puede ser configurado desde 10 mA a 240 mA, siendo 100 mA la corriente sugerida por el fabricante. La corriente en modo recepción, para el módulo SX1272 es de 10 mA, y para los módulos SX1278 y SX1276 es de 9.9 mA [31][29].

En la Tabla 3.2, se puede ver que estos tres transceptores tienen características similares y que con cualquiera de estos se pudiera llegar a una buena aplicación de comunicación, pero el tema de la frecuencia es un factor importante y el transceptor SX1276 opera en todas las frecuencias principales ISM. Con este transceptor se pudiera realizar aplicaciones para altas frecuencias como 915 MHz, con lo que el transceptor SX1278 no pudiera realizar. Además se puede apreciar que en temas de sensibilidad y potencia el transceptor SX1276 supera por completo al transceptor SX1272.

La sensibilidad del receptor identifica el valor mínimo de potencia que necesita un receptor para poder decodificar o extraer datos para alcanzar una determinada tasa de bits o de velocidad. Comúnmente se expresan en dBm e indican que entre menor sea su valor, el receptor tendrá mejor sensibilidad; por lo que se concluye que los dispositivos SX1276 y SX1278 tienen como ventaja el tener mejor sensibilidad de recibir datos.

Otra importante diferencia a favor del transceptor SX1276, es que cuenta con canales más reducidos de hasta 7.8 kHz como valor mínimo. Aunque, esto implica transmisión y recepción de datos con tasas efectivas de datos significativamente bajas que podrían dar lugar a pérdidas de datos o tiempos excesivos de transmisión o recepción de datos.

En consecuencia de lo analizado, para este trabajo se propuso el uso del transceptor SX1276 por su bajo consumo, frecuencia y corriente configurable. Y de acuerdo con la Tabla 2.1, la frecuencia de trabajo a utilizar es de 915 MHz, teniendo en cuenta que el desarrollo de las pruebas se realizará en espacio americano.

La Figura 3.3, muestra el diagrama de bloque general donde se especifica la funcionalidad del transceptor en este prototipo, que es el encargado de transmitir los parámetros de que le envía el ATmega1284 tales como las lecturas de los sensores.

Para realizar la transmisión es necesario de tres entradas: (1). Comunicación SPI; (2). Pin de entrada (*RESET*) utilizado al inicio o al arrancar el transceptor; y (3). Pines de entrada/salida, configurables por software (*DIO 0-5*).

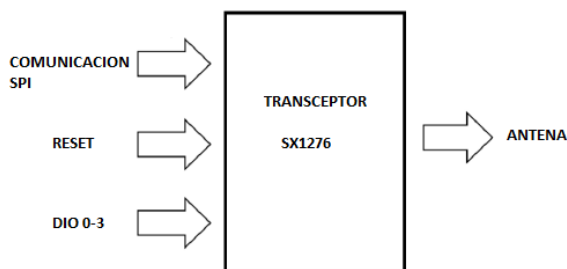


Figura 3.3: Diagrama de bloques del Transceptor SX1276

El transceptor SX1276 cuenta con un esquema completo como recomienda el fabricante para realizar la comunicación LoRa, dicho esquema se divide en: sección de RF y comunicación SPI. La sección RF contiene en su mayoría componentes resistivos, inductivos y capacitivos que según arreglos se componen filtros para minimizar el ruido generado. Para la sección de la comunicación SPI se hizo caso a la recomendación del fabricante y se realizó por medio de los pines MISO, MOSI, SCK y NSS entre ambos integrados ATM1284 y Sx1276, lo cuál se muestra en la Tabla 3.5.

Chip radio	Marca	DIO0-DIO5	RXTX	SPI	RESET
SX1276	Semtech	Pines de entrada /salida, configurables por software.	Pin de salida. Cuando el dispositivo está transmitiendo datos se coloca en "1".	Comunicación NSS MISO MOSI SCLK	Pin de entrada. Utilizado al iniciar el dispositivo.

Tabla 3.3: Nomenclatura utilizada por el dispositivo SX1276

3.3.3. Sensores

El principal objetivo de los sensores en esta estación es permitir la adquisición de datos de una forma segura y precisa mediante niveles eléctricos. Los sensores para la adquisición de datos son básicamente módulos digitales que brindan mediciones de alta precisión, y se conecta con un microcontrolador de alto rendimiento para el caso del sensor de temperatura y humedad.

• Sensor de temperatura y humedad

Para la recolección de datos de temperatura y humedad se eligió el módulo DHT11 sobre el DHT22, ya que la única diferencia técnica entre estos sensores es solo el rango de medición de temperatura. El sensor DHT11 es de bajo costo y es bastante simple de usar tanto en hardware como software, ya que el protocolo de comunicación emplea un único hilo o cable, por lo tanto, hace que la integración de este sensor en nuestro proyecto sea rápida y sencilla.

El sensor DHT11 se caracteriza por tener la señal digital calibrada, asegurando alta estabilidad

y fiabilidad a lo largo del tiempo. El sensor puede medir la humedad en un rango desde 20 % hasta 90 % y temperatura en el rango de 0°C a 50°C.

- **Sensor WL400**

El sensor de nivel de agua tiene un cable impermeable moldeado y una salida de alto nivel de 4-20 mA de dos cables para la conexión a un dispositivo de monitoreo [44]. Si se requiere una señal en voltaje para trabajar con un ADC se utiliza una resistencia de drenaje R_{shut} (Figura 3.4) y mediante la ley de Ohm se calcula el rango de salida [16]. Siendo así el sensor proporciona una señal analógica de salida V_{out} por medio de una resistencia que debe ser calculada en función del valor máximo de entrada al ADC. Esto se debe tomar en cuenta, ya que la entrada del ADC del microcontrolador es de un valor máximo de 5V.

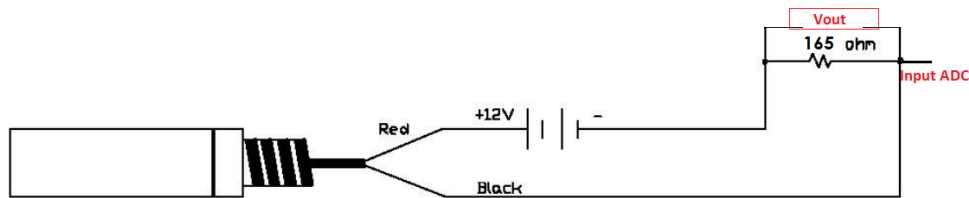


Figura 3.4: Diagrama del sensor WL400 con la resistencia de drenaje y entrada al ADC

Fuente: [32].

Donde el V_{out} varía en función de la profundidad a la que el sensor está sumergido en el agua. Si se requiere que la estación tenga un mínimo consumo energético, lo más óptimo para la adquisición de datos de este sensor es que exista un actuador, de forma que solamente se active cuando realiza el sensado, y se apague cuando acabe el mismo.

Por lo tanto, para un ahorro de consumo energético se propuso la activación del sensor cada cierto tiempo, la activación se realiza mediante un circuito electrónico de control, el cual cuenta con un transistor NPN conectado en la configuración colector abierto. El transistor es un elemento de interfaz entre el sistema de control y la activación del sensor, actúa como un interruptor y funciona del siguiente modo: cuando por la resistencia ($RS1$) la señal de control que proviene del microcontrolador es un bajo lógico (0V) no circulará corriente entre el colector y emisor, y cuando la señal de control es un alto lógico (5V) la corriente entre el colector y emisor comenzará a circular alimentando de 12 V en CC al sensor y empezará a sensar el nivel del agua, tal como se muestra en las simulaciones de las Figuras 3.5 y 3.6 .

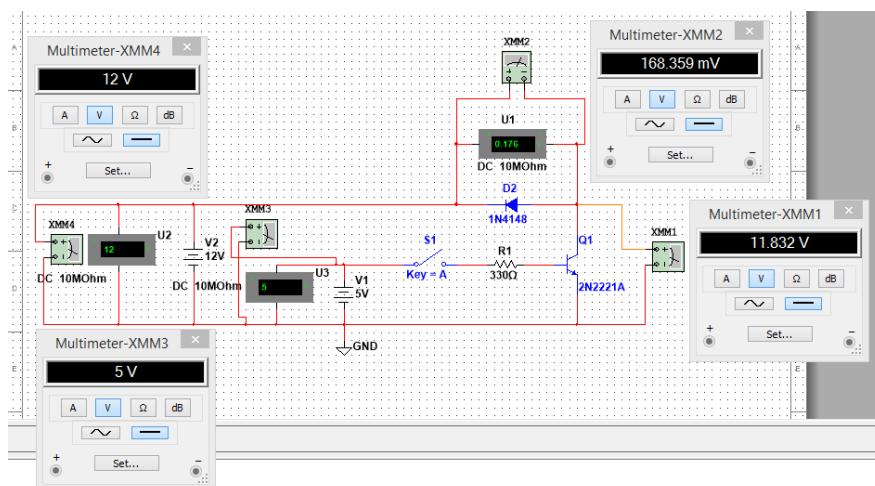


Figura 3.5: Simulación de circuito de acondicionamiento de energía del sensor (Transistor off)

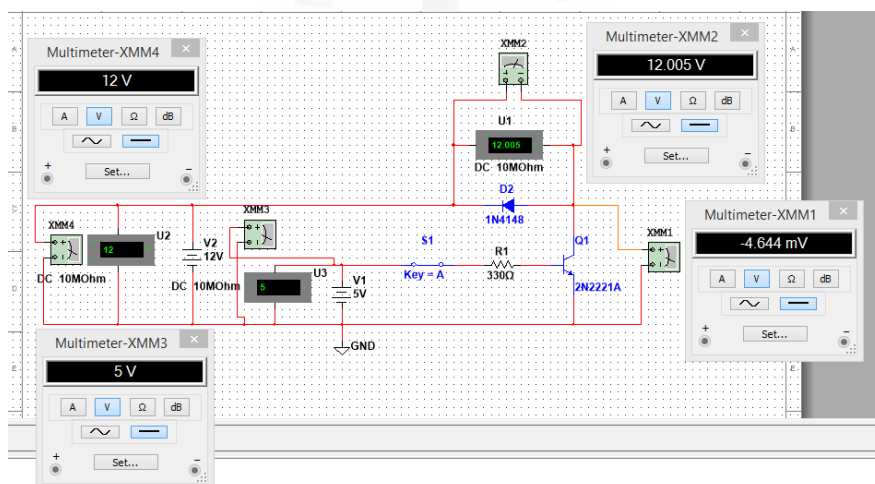


Figura 3.6: Simulación de circuito de acondicionamiento de energía del sensor (Transistor on)

3.3.4. Reloj en tiempo real

Existen dos RTC habituales el DS1307 y el DS3231, ambos fabricados por Maxim (anteriormente Dallas Semiconductor). En el modelo DS1307 las variaciones de temperatura se traducen en errores en un desfase acumulado. Esto hace que el DS1307 sufra de un desfase temporal, que puede llegar a ser 1 o 2 minutos al día. El DS3231 tiene una precisión muy superior y puede considerarse sustituto del DS1307.

La comunicación en ambos modelos se realiza a través del bus [I2C](#), por lo que es sencillo obtener los datos medidos. La tensión de alimentación es 4.5 a 5.5 para el DS1307, y 2.3 a 5.5V para el DS3231. En consecuencia, del consumo energético y precisión se decidió usar el integrado DS3231, que es de bajo costo con un oscilador de cristal con compensación de temperatura integrado [\[33\]](#).

Para evitar problemas como mantener la hora y fecha cuando se retira la alimentación, se usa una batería CR2032 de 3V no recargable. Una vez que se retira la alimentación por V_{cc} , entra en funcionamiento inmediatamente la batería, haciendo que no haya necesidad de configurar la hora y la fecha nuevamente.

3.3.5. Memoria Externa

La memoria flash a utilizar es la W25Q128JV (128M-bit), da una solución de almacenamiento para sistemas con espacio, pines y potencia limitados. Se eligió este tipo de memoria, ya que éste dispositivo funciona con una única fuente de alimentación de 2.7V a 3.6V con un bajo consumo de corriente como 1μA para el apagado. El W25Q128JV es compatible con la Interfaz Periférica Serial ([SPI](#)) estándar. En la [Tabla 3.6](#) se muestra la interconexión entre el microcontrolador y la memoria externa.

3.3.6. Fuentes de Alimentación

La estación limnigráfica cuenta con una fuente de alimentación eléctrica externa que brinda un voltaje de 12 V en CC. La mayor parte de los circuitos internos de la estación trabajan a diferentes niveles de voltaje, es por ello por lo que se necesita reguladores de voltaje.

En este registrador de información limnigráfica, se optó por usar reguladores de tensión lineales, por su factibilidad y simple uso. Además, que el ruido de rizado es mínimo en comparación de los reguladores de conmutación.

Los niveles de voltaje que necesita la estación limnigráfica se muestra en la [Tabla 3.4](#).

Circuito	Nivel de voltaje
Microcontrolador	5V
Sensor DHT11	5V
Transceptor	3.3V
RTC	3.3V
Memoria externa	3.3V
Sensor limnigráfico	12V

Tabla 3.4: Niveles de voltaje para distintos circuitos de la estación limnigráfica

Para los niveles de voltajes de 5V y 3.3V se han utilizado 2 reguladores de voltaje. La implementación y las conexiones de los reguladores de voltaje, se pueden apreciar en la Figura 3.8. En estos reguladores se utilizan 3 pines básicamente. Para el regulador de 5V se toma como voltaje de entrada, la alimentación del sistema, que en este caso corresponde a la batería de 12V. La salida de este regulador, posteriormente va a la entrada del regulador lineal de 3.3V. Con el objetivo de ofrecer una escalabilidad para trabajos futuros, se ha dispuesto puertos seriales para comunicar el microcontrolador con un regulador de carga, el cual sería el encargado de controlar constantemente el estado de carga de las baterías así como de regular la intensidad de carga con el fin de alargar la vida útil de las baterías.

3.3.7. Jaula de Faraday

Para la protección de los componentes de altas frecuencias y para evitar interferencias y ruido, se utilizó una jaula de Faraday. Dicha jaula solo cubre los componentes de RF, siendo estos lo más susceptibles a daños.

Para su diseño se utilizó una rejilla rectangular de un material conductor, el cual está conectado al plano de tierra. Con esto se consigue que la concentración de campos electrostáticos no produzca cargas eléctricas, sirviendo de protección, y generando que las cargas negativas se queden únicamente en un lado y no se combinen con las cargas positivas.

3.4. Comunicación entre dispositivos

Para realizar la comunicación entre el ATmega1284, el SX1276 y la memoria externa W25Q128JV se utilizó el protocolo de comunicación SPI de múltiples esclavos independientes que brinda una comunicación serial sincrónico full dúplex, es decir, permite transmitir y recibir información al mismo tiempo. Existen cuatro líneas lógicas encargadas de realizar todo el proceso [34]:

- **MOSI**: Línea utilizada para transferir los datos del maestro hacia el esclavo.
- **MISO**: Línea utilizada para transferir los datos del esclavo hacia el maestro.

- **SCK**: Línea encargada de enviar la señal de reloj para sincronizar los dispositivos.
- **SS**: Línea generada por el maestro y permite seleccionar el dispositivo esclavo para iniciar la comunicación. Además, es posible hacer uso de varios dispositivos esclavos utilizando las mismas líneas de comunicación.

Para usar este protocolo se requiere configurar un dispositivo como maestro y los demás como esclavos, véase la Figura 2.4. El dispositivo ATmega1284 actuaría como el maestro mientras que SX1276 y la memoria W25Q128JV actuarían como los esclavos. Los pines de comunicación SPI entre el microcontrolador, el transceptor y la memoria externa se muestran en la Figura 3.8, a su vez se muestra la interconexión de pines entre maestro y esclavos en las Tablas 3.5 y 3.6.

Descripción	SX1276	ATmega 1284
COMUNICACIÓN SPI	SCK	7
COMUNICACIÓN SPI	MISO	6
COMUNICACIÓN SPI	MOSI	5
COMUNICACIÓN SPI	NSS	4
CONTROL	NRESET	1
CONTROL	DIO0	13
CONTROL	DIO3	22
ALIMENTACIÓN	GND	GND

Tabla 3.5: Nomenclatura utilizada para la comunicación ATM1284 y SX1276

Descripción	W25Q128JV	ATmega 1284
COMUNICACIÓN SPI	SCK (CLK)	7
COMUNICACIÓN SPI	MISO (IO1)	6
COMUNICACIÓN SPI	MOSI (IO0)	5
COMUNICACIÓN SPI	NSS (CS)	12
ALIMENTACIÓN	GND	GND

Tabla 3.6: Nomenclatura utilizada para la comunicación entre ATM1284 y W25Q128JV

Para utilizar el reloj a tiempo real sincronizado con el dispositivo microcontrolador se utiliza el protocolo de comunicación I2C; con los pines denominados SDA y SCL respectivamente, esto se puede apreciar en la Tabla 3.7 y en la figura 3.8.

Descripción	RTC DS3231	ATmega 1284
COMUNICACIÓN I2C	SCL	16
COMUNICACIÓN I2C	SDA	17
ALIMENTACIÓN	GND	GND

Tabla 3.7: Nomenclatura utilizada para la comunicación entre ATM1284 y RTC DS3231

3.5. Softwares Utilizados

Para la configuración y actualización del registrador de datos en ámbitos programables se optó por usar un software libre. El software libre es un calificativo de un software que respeta la libertad de todos los usuarios que adquirieron el producto y, por tanto, una vez obtenido el mismo puede ser usado, copiado, estudiado, modificado, y redistribuido libremente de varias formas. Algunas características del software libre en relación con el ámbito del desarrollo son las siguientes:

- **Autonomía tecnológica:** Adoptando el uso de software libre y con las posibilidades que éste ofrece de acceder al código fuente, muchos usuarios pasarán de ser consumidores a ser desarrolladores de software. Esto significa que se podrán adaptar el código o programas a necesidades específicas, y todas las modificaciones deberán realizarse siguiendo los requisitos exigidos por el modelo de software libre.
- **Estandarización e integración:** El software libre es producido utilizando especificaciones y estándares tecnológicos libres y públicos, también denominados “estándares abiertos”. Esto beneficia la integración de sistemas y el intercambio de información de forma que se garantiza la accesibilidad sin restricciones para los usuarios.
- **Seguridad:** El hacer público los códigos de los programas o aplicaciones favorece la seguridad de los mismos. Utilizando software libre es posible conocer y analizar lo que está siendo ejecutado realmente por el programa, el tipo de información manejada y como es la manipulada. Una buena seguridad debe basarse en la transparencia [35].

Se utilizó el software IDE Arduino para programar el microcontrolador ATmega1284, ya que son compatibles con el lenguaje de programación.

3.5.1. IDE Arduino

IDE – entorno de desarrollo integrado, llamado IDE (sigla en inglés de integrated development environment), es un programa informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación. Puede dedicarse en exclusiva a un solo lenguaje de programación o bien puede utilizarse para varios.

Un IDE es un entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación; es decir, que consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). El IDE es compatible con los sistemas operativos Windows, Mac OS X y Linux. El entorno de desarrollo está escrito en JAVA.

Los programas están compuestos por un solo fichero con extensión “.ino”, aunque es posible organizarlo en varios ficheros. El fichero principal siempre debe estar en una carpeta con el mismo nombre que el fichero [36].

Los objetivos de este trabajo se centran en el diseño del hardware, sin embargo la programación es una parte fundamental, ya que en base a ella se pueden configurar y manipular los dispositivos principales para brindar un buen funcionamiento. Las configuraciones como la frecuencia, ancho de banda, factor de ensanchamiento y la potencia se realizan mediante registros, lo cual se deja al criterio del programador y a la necesidad de la aplicación. Además, mediante un buen programa se puede reducir el consumo energético, por ejemplo configurando la activación del sensor limnigráfico cada cierto tiempo y configurándole al microcontrolador y al transceptor en modo *sleep* o *standby* se puede reducir notoriamente la corriente del dispositivo.

3.5.2. Software de desarrollo de circuitos PBC

Para el diseño del circuito impreso se realizó con el uso del software Altium Designer 18. Dentro del mismo se elaboró el diagrama esquemático donde se realizaron las respectivas conexiones entre los componentes. Además, se generó una extensión **PCB** donde se elaboró el circuito impreso que conlleva las reglas de ruteo para los elementos de montaje superficial. El diseño del circuito impreso se desarrolló considerando la naturaleza de las señales a procesar, colocando los componentes de una forma específica y ordenada para evitar interferencias entre pistas [37].

En la sección de alta frecuencia se considero la Compatibilidad Electromagnética **EMC**, por sus siglas en inglés. La **EMC** indica las normas de como debe funcionar un aparato o sistema satisfactoriamente en su entorno electromagnético, sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo aquello que se encuentre en dicho entorno [23]. Teniendo en cuenta con lo mencionado de ha tomado mucha cautela con las señales analógicas ya que pueden ser muy sensibles al ruido generado por señales digitales y radiación electromagnética provenientes de dispositivos de radiofrecuencia. Con el objetivo de reducir éstas interferencias y tener compatibilidad electromagnética en el circuito se han seguido varias técnicas que se detallan en el la Sección 2.15.

3.6. Aspecto final del esquemático del dispositivo

En la Figura 3.7, se muestra un diagrama de bloques de cómo está conformada la estación limnigráfica. Este diagrama sencillo contiene únicamente los bloques que se consideran como obligatorios para su correcto funcionamiento. De izquierda a derecha de la Figura se observa en primer lugar, la antena **RF** por la cual la señal de 915MHz se propagará. Luego se encuentra el transceptor SX1276, este es el que comandará la transmisión hacia la antena por medio de los pines *RFi*, *RF0* y *Pa Boost*, estos pines sirven para limitar la potencia de salida. El siguiente bloque representa al microcontrolador ATmega1284, que es el encargado de llevar la programación y el control de comunicación con los diferentes dispositivos como los sensores, el **RTC** y la memoria externa. Para mejoras posteriores, se agregaron pines de control tanto

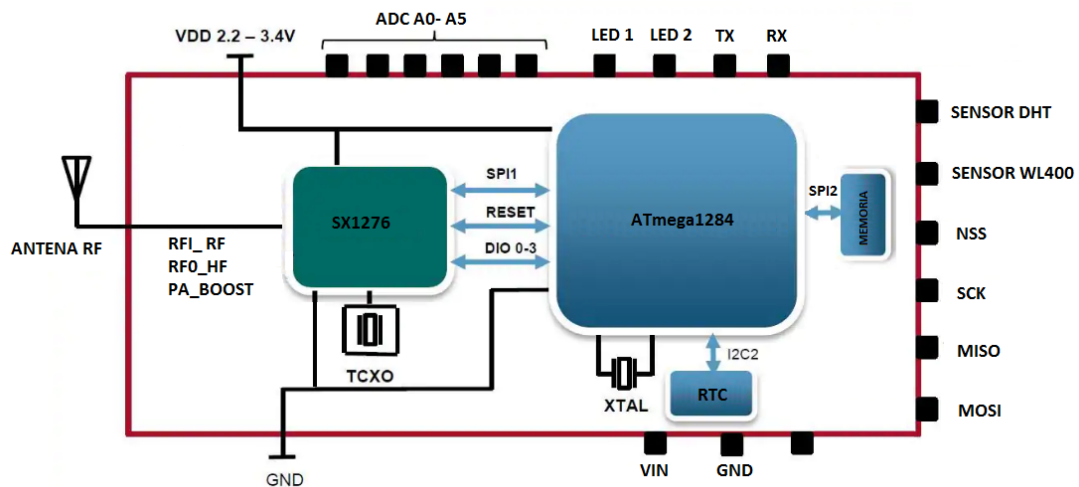


Figura 3.7: Diagrama de bloques de la estación limnigráfica

analógicas como digitales, que facilitarán la implementación de sensores. Para verificar que el dispositivo se encuentre en funcionamiento, se añadieron dos diodos led, los cuales indicarán cada vez que la alimentación esté conectada y cada que se realice una transmisión.

Para el desarrollo de la placa PCB de la estación se hizo uso del software Altium Designer, este software permite el desarrollo y la construcción de circuitos electrónicos. El software genera dos subprogramas, el esquemático y el circuito impreso. La Figura 3.8 muestra el esquemático con todos los componentes conectados entre sí respectivamente.

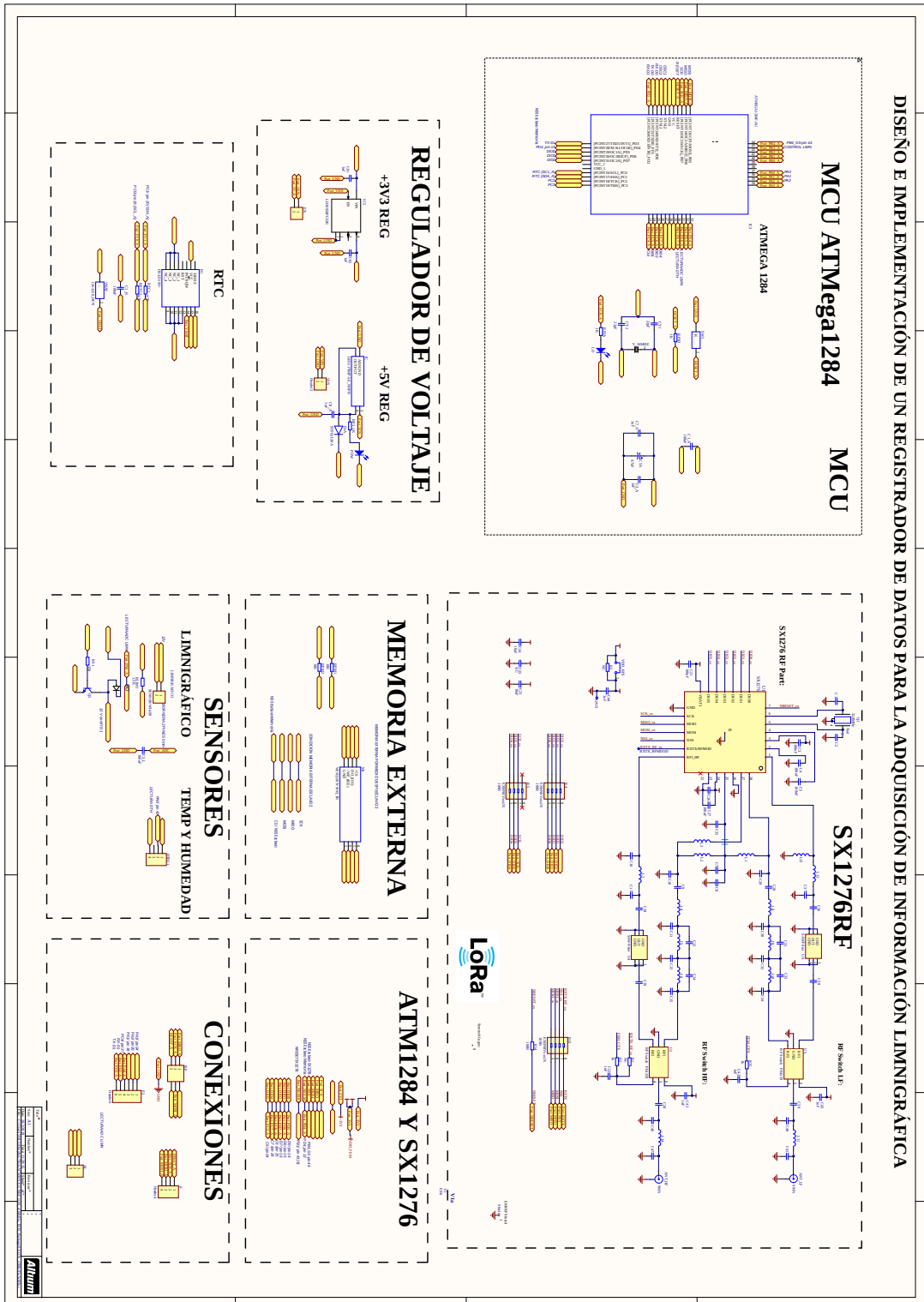


Figura 3.8: Aspecto final esquemático

3.7. Placa de circuito impreso (PCB)

El diseño de la placa **PCB**, se realizó tras el estudio de los esquemas considerando la naturaleza de las señales, el contenedor de la placa y la Compatibilidad Electromagnética (**EMC**). Se ha diseñado la placa en dos partes, la primera contiene todo el circuito electrónico de ATmega1284 y la segunda todos los componentes del transceptor SX1276 ambas partes contienen conectores de entrada y salida que se ubican a los bordes de la placa **PCB**. Las señales analógicas pueden ser muy sensibles al ruido generado por señales digitales y radiación electromagnética, provenientes de dispositivos de radiofrecuencia. Con el objetivo de disminuir estas interferencias y tener compatibilidad electromagnética en el circuito se han seguido varias técnicas que se detallan a continuación.

3.7.1. Ruido de masa

Los planos de tierra o masa poseen reactancias parásitas que generan ruido en todo el sistema del circuito. Además, el ruido generado puede propagarse entre los diferentes componentes de la placa mediante la tierra, véase la Figura 3.9, por lo que se debe evitar mezclar circuitos sensibles al ruido. Para evitar este tipo de problemas se consideró lo siguiente:

1. Las corrientes retornarán a la fuente de alimentación de forma local lo más compacta posible.
2. El circuito impreso solo tiene un solo plano de referencia, caso contrario con la existencia de dos o más se crea una antena dipolo.

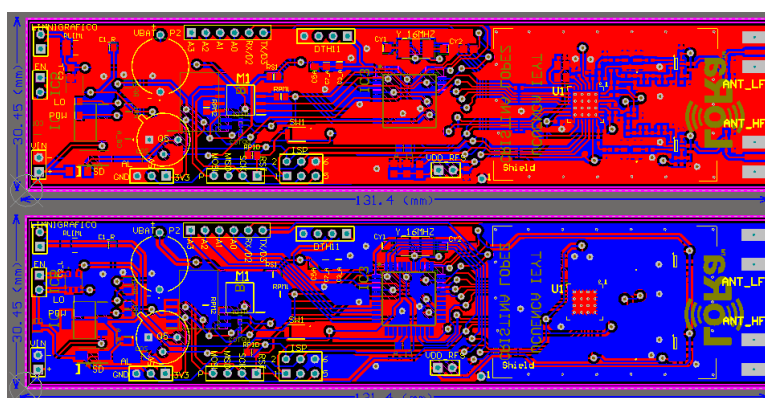


Figura 3.9: Plano a tierra en la cara superior e inferior de la PCB.

3.7.2. Masa flotante

La masa flotante hace referencia a islas de cobre en la placa que no están conectadas a ningún plano de masa. Estas porciones de cobre se producen al crear planos de masa en el diseño. En estas regiones de masa flotante el ruido puede ser acoplado capacitivamente y el efecto *crosstalk* entre las pistas cercanas a la región de cobre empeoraría. Por este motivo, estas islas de cobre deben ser eliminadas o conectadas mediante vías al plano de masa [38].

3.7.3. Pistas

Las pistas en un circuito impreso tienen características resistivas e inductivas, mismas que dependen del largo, ancho y grosor de la pista. La cercanía de las pistas puede generar un acople indeseado (*crosstalk*). Para evitar el *crosstalk*, el grosor de pista debe ser de 0.254 mm con un *clearance* de 0.28 mm. Los componentes se agrupan según las señales a procesar esto se hace para reducir la distancia de las pistas y los efectos parásitos resistivos e inductivos [38].

Se recomienda evitar conexiones con ángulos de 90 grados suavizando el ángulo a 45 grados como se muestra en la Figura 3.10, lo cual ayuda a reducir bucles de corriente y mejorar la EMC [39].

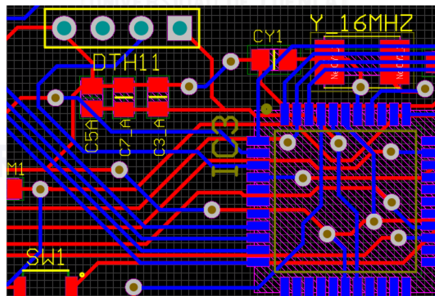


Figura 3.10: Giro de pista.

3.7.4. Vías

Las vías son perforaciones en la placa que permite la conexión eléctrica entre pistas de diferentes capas. Las vías pueden tomar el comportamiento de condensadores como inductores cuando tienen una perforación menor a lo establecido [38]. Estos efectos son más críticos en circuitos digitales de alta frecuencia (MHz), ya que las capacitancias parásitas cambian la impedancia de la señal y generan reflexiones.

3.7.5. Cristales

El uso de los cristales de cuarzo en los circuitos impreso pueden ser una fuente de ruido para el resto de componentes, es por eso que se recomienda ubicar al oscilador lo más cerca posible del componente que lo utiliza. Para evitar posibles ruidos con las pistas cercanas, es recomendable cortar el plano de masa alrededor del oscilador como de los capacitores [38].

3.8. Aspecto final de la placa PBC

La placa del prototipo desarrollado tiene una dimensión de 30x130 mm, y consta de dos caras con tecnología de montaje superficial. En las Figuras 3.11 y 3.12 se muestra el aspecto final del dispositivo en 3D. Como se puede observar en estas figuras en la cara inferior se optó por colocar todos los elementos de control y el RTC. En la cara superior se colocó el transceptor SX1276, los componentes de radiofrecuencia, y la jaula de Faraday haciendo caso a las recomendaciones de [23]. Además por facilidades de ruteo en la parte inferior de esta cara se colocó la memoria externa, la batería del módulo RTC y el circuito de activación para el sensor WL400. En la parte posterior a los componentes de alta frecuencia, no se colocó ningún componente, por temas de EMC e interferencias. Las 2 caras cuentan con un plano a tierra de esa forma si llegara a introducirse un armónico, el mismo se induciría en este plano.

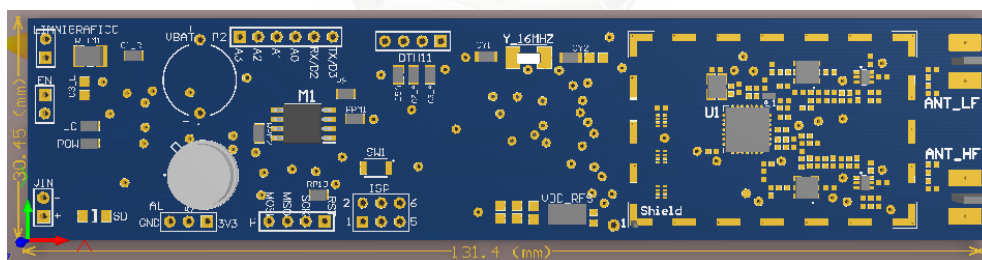


Figura 3.11: Diseño PCB en 3D de la cara superior del dispositivo.

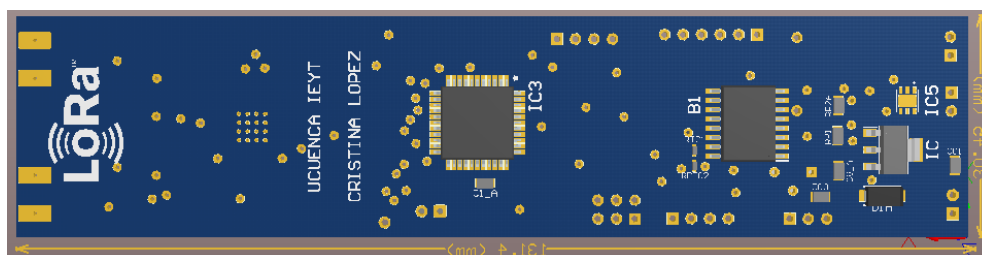


Figura 3.12: Diseño PCB en 3D de la cara inferior del dispositivo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo describe los resultados obtenidos durante el diseño, construcción y prueba del prototipo. Se trata del funcionamiento final y los resultados obtenidos en varias pruebas en cuanto a adquisición de datos y transmisión. Además, se presentan datos del consumo energético del sistema de la estación. En este capítulo se cumple los dos últimos objetivos planteados en este trabajo, que son:

- Montaje de los componentes y pruebas de prototipo en el laboratorio.
- Pruebas de campo y análisis de cobertura.

4.1. Introducción

Para realizar las pruebas de funcionamiento de acuerdo a lo establecido a lo largo del presente trabajo por medio de un sistema embebido, se hace uso de sistemas independientes de un transmisor y un receptor. El transmisor se encarga de realizar la propagación de la señal que conlleva la información de los datos adquiridos por medio de los sensores. El receptor tiene la función de recibir la información propagada por el transmisor. El esquema empleado para las pruebas de funcionamiento se muestra en la Figura 4.1. Este esquema básicamente muestra como se realizaron las pruebas de funcionamiento del prototipo en un ambiente abierto.

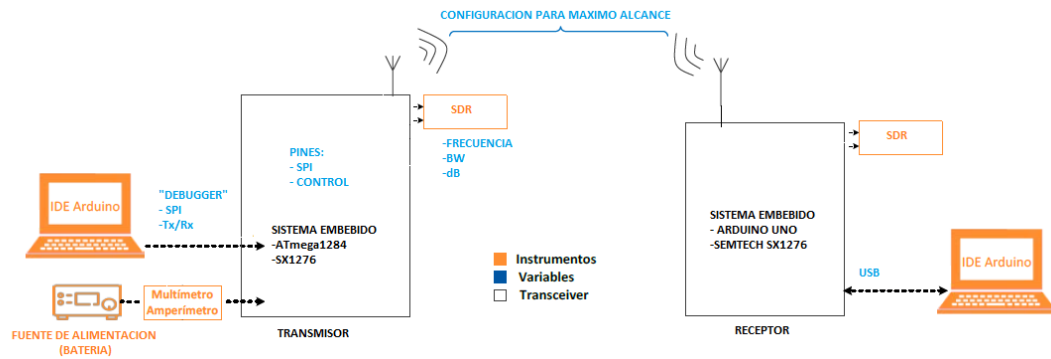


Figura 4.1: Esquema propuesto para pruebas de funcionamiento

La Figura 4.1, muestra el esquema de pruebas de máximo alcance para un escenario en campo abierto. Este esquema contiene un transmisor que vendría a ser el registrador de datos limnigráfico, el cual está compuesto de un sistema embebido con los dispositivos (ATmega1284, SX1276) y alimentado por una batería de 12V. Para analizar la señal propagada por el transmisor se hizo uso de *radio definida por software* (SDR, por sus siglas en inglés). Es un sistema de comunicación por radio en el que analiza frecuencias y anchos de banda según la frecuencia de corte que se le defina, además se puede analizar la ganancia en dB. Este software cuenta con una interfaz amigable para el usuario y hardware simple de usar.

Para la confirmación de datos transmitidos por el registrador de datos, se usó receptor conformado por un Arduino uno y un módulo LoRa de la serie SX1276. Dicho receptor se situó a varias distancias del transmisor, y mediante el monitor serial del Arduino IDE se pudo apreciar la llegada de la información, tales como: el nivel de agua, la temperatura y humedad del *data-logger*, la fecha y hora completa. En adición, se puede observar parámetros de recepción como es el SNR, *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) y error de frecuencia. Cabe recalcar que para que el registrador de datos y el receptor de información funcionen adecuadamente, deben tener la misma configuración de variables, caso contrario en el monitor serial se podrá observar varios errores.

4.2. Pruebas de consumo energético

Este prototipo de estación limnigráfica tiene como objetivo generar una reducción de consumo de energía, ya que se colocará en lugares geográficos distantes donde no hay accesos de redes convencionales de energía eléctrica. Para ello se hace uso de baterías y dispositivos de bajo consumo que es fundamental en este tipo de sistema. Por lo tanto, conocer este parámetro permite

dimensionar de forma adecuada la fuente de energía. Con el fin de realizar una aproximación del consumo de energía se usó una “batería” como fuente alimentación en corriente continua de 12 Voltios, una tensión de alimentación comúnmente usada en este tipo de trabajos. En la Tabla 4.1 se puede ver la potencia y la corriente requeridas por el dispositivo con todos sus elementos conectados y también con solo algunos de ellos. Además, se especifica si el sensor limnigráfico está activo o no.

Transmisión	Sensores		Corriente(mA)	Voltaje (V)
	WL400	DHT11		
NO	NO	NO	25.7	12
SI	NO	NO	49.8	12
SI	SI	NO	60.4	12
SI	NO	SI	56.6	12
SI	SI	SI	70.3	12

Tabla 4.1: Consumo energético del dispositivo diseñado

En la Tabla 4.2 se presenta una recopilación de las pruebas de consumo energético, que se realizó con diferentes configuraciones (combinación de los parámetros SF, BW y CR) para el dispositivo final. Dichas configuraciones son programables dando facilidad al campo de pruebas. El consumo de corriente en el transmisor fue medido con un amperímetro conectado en serie entre el pin positivo de la batería y el pin de entrada (Vin) del registrador de datos. El tiempo de transmisión fue determinado utilizando un osciloscopio. Por último, el consumo energético fue calculado a partir del consumo de corriente y del tiempo.

La ecuación matemática para encontrar la potencia necesaria para transmitir la información, está dada por:

$$P_E = V_{CC} * I_{CC} \quad (4.1)$$

Donde, P_E es la potencia eléctrica necesaria en vatios para transmitir o recibir datos. V_{CC} hace referencia al voltaje nominal de alimentación. Y la corriente consumida cuando el dispositivo está en funcionamiento está representada por I_{CC} . Por otra parte, la potencia se puede definir también como la razón de cambio de energía por unidad de tiempo, como se observa en la siguiente expresión:

$$P_E = \frac{W}{t} \quad (4.2)$$

Donde, W corresponde a la energía y t al tiempo en segundos. Por lo tanto la energía se puede definir como:

$$W = P_E * t \quad (4.3)$$

#	Parámetros configurables por software			Consumo de corriente mA	Tiempo segundos	Consumo energético mili-vatios	Estado de transmisión
	SF	BW	CR				
1	7	125	4/5	90	0.5	540	Estable
2	7	250	4/5	70.3	0.3	253.08	Estable
3	12	125	4/5	95.6	1.32	1514.304	Estable
4	12	250	4/5	94.1	0.89	1004.908	Estable

Tabla 4.2: Recopilación de datos del dispositivo durante la transmisión.

Se concluye que la energía está dada como la potencia por unidad de tiempo. En la Tabla 4.2 se detalla el consumo energético obtenido en la transmisión.

Cabe recalcar, que con una buena programación se podría optimizar mucho más el consumo energético, ya que cuando el microcontrolador se encuentra en modo *sleep*, la placa consume 9 mA. Además, para medir el consumo energético se utilizó la máxima potencia, estos valores pudieran reducir si se realizara las mediciones con una potencia más baja. (Se utilizó esta potencia para su máximo alcance)

4.3. Pruebas de alcance

Para realizar las pruebas de alcance, se eligió un punto de origen de referencia (TX) y varios puntos situados a diferentes distancias (RX). Dicho esto, la configuración que brindó mayor alcance y estabilidad a partir de varias pruebas fue la siguiente:

- Frecuencia: 915 MHz
- Ancho de banda (BW): 125 kHz
- Factor de Ensanchamiento (SF): 12
- Tasa de codificación (CR): 4/5

Para el Ancho de banda (BW), entre menor sea este valor, mayor será el alcance de transmisión. Sin embargo, el tiempo de la comunicación será mayor, ya que el tiempo es inversamente proporcional a la frecuencia.

Para el factor de ensanchamiento se tomó el valor de 12, esto se debe a que, entre mayor sea este valor, se aumentará el radio de cobertura y menor será la probabilidad de que se reciba datos errados.

La tasa de codificación asegura la fiabilidad de los datos, por lo tanto este valor entre mayor sea, mejor será su fiabilidad.

La configuración mencionada anteriormente se realizó a varias distancias y así se verificó su alcance y fiabilidad de transmisión, se describe el procedimiento a dos distancia diferentes.

Para el punto de origen se situó el registrador de datos, el cuál transmite la información al receptor. Este punto estuvo situado en las coordenadas que se indica en la Tabla 4.3.

Para la primera prueba se seleccionó en un punto de referencia A, en el cual se situó el receptor y el radio definido por software, que son encargados de recibir la información y la señal emitida por el registrador de datos. Este punto de referencia A se situó en las coordenadas que se indica en la Tabla 4.3.

Para la segunda prueba se seleccionó un punto de referencia B, que de igual manera que en el punto A se situó el receptor y el radio definido por software. Este punto de referencia B se situó en las coordenadas que se indica en la tabla 4.3.

Coordenadas	Registrador de datos	Punto A (RX)	Punto B (RX)
Latitud	2°55'9" S	2°55'7" S	2°54'32" S
Longitud	79°3'53" O	79°4'2" O	79°3'56" O

Tabla 4.3: Coordenadas del registrador de datos y puntos de referencia

Una vez que se seleccionó los puntos tanto de origen como de referencia, se procedió a calcular las distancias entre el punto de origen y de referencia ya sea A o B.

$$D = 6378 \times \cos^{-1} \times [\sin(X_t) \sin(X_r) \cos(X_t) \cos(X_r) \cos(Y_r - Y_t)] \quad (4.4)$$

- Distancia Origen - Punto A = 0.29 Km
- Distancia Origen - Punto B = 1.15 Km

En la figura 4.2 se puede observar la ubicación del registrador de datos y los dos puntos de referencia en las que se situó el receptor con su distancia correspondientemente.

Para analizar si existe alguna interferencia entre los 2 puntos de pruebas, se procedió a verificar su línea de vista, y esto se hizo graficando el perfil longitudinal de cada enlace en el software *airLink*. Los enlaces se muestran en las figuras 4.3 y 4.4.

En los dos escenarios se pudo verificar la adquisición y transmisión correcta de los datos, además se pudo observar la señal recibida por el radio definido por software las cuales se muestran en la Sección C.1. Además, para analizar la transmisión, se definieron los registros de obtención de RSSI y SNR en el receptor.

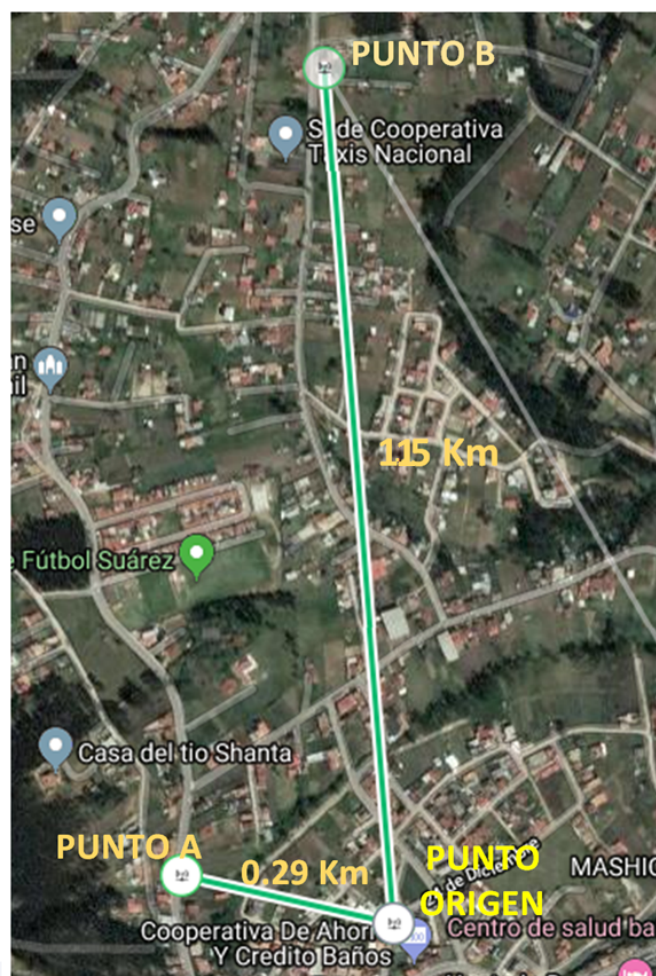


Figura 4.2: Ubicación del punto de referencia A, B y origen.

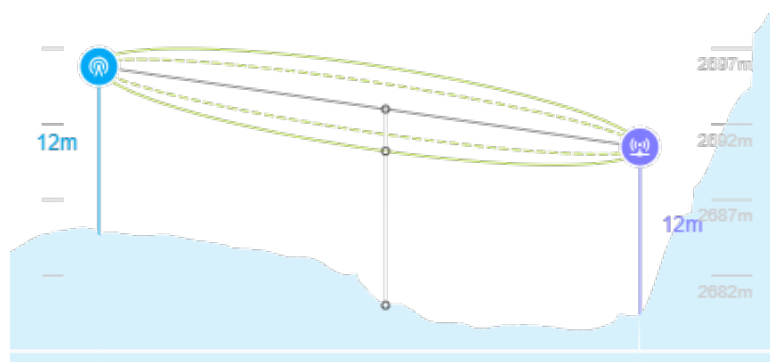


Figura 4.3: Perfil longitudinal correspondiente a la distancia de 290 m

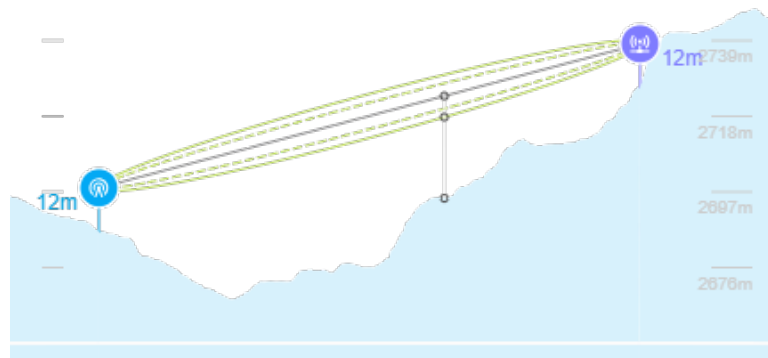


Figura 4.4: Perfil longitudinal correspondiente a la distancia de 1.15 Km

4.4. Mediciones de RSSI y SNR

El indicador de fuerza de la señal recibida (**RSSI**, por las siglas del inglés) representa la calidad relativa de una señal recibida en el receptor. Indica el nivel de potencia que se recibe después de cualquier posible pérdida en el nivel de antena. Cuanto mayor sea el valor **RSSI**, más fuerte será la señal. La recopilación de los valores **RSSI**, se muestra en un resumen en la Figura 4.5. La cual se puede interpretar fácilmente, y se puede decir que mientras la distancia sea más corta, mayor será el valor de **RSSI**.

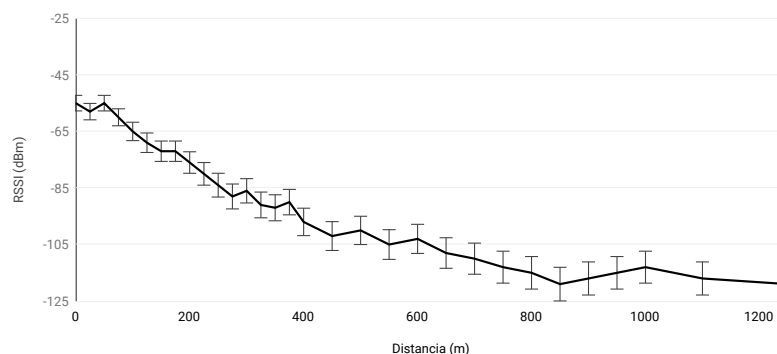


Figura 4.5: Medición de RSSI en pruebas de alcance

La relación señal a ruido (**SNR**, por sus siglas en inglés) representa la diferencia entre el nivel de señal y el ruido. Mientras el valor de **SNR** sea más alto, la señal será más clara. Además, una mayor relación de señal a ruido permite que la transmisión sea de mayor alcance. En la Figura 4.6, se presenta un resumen de las mediciones realizadas a diferentes distancias.

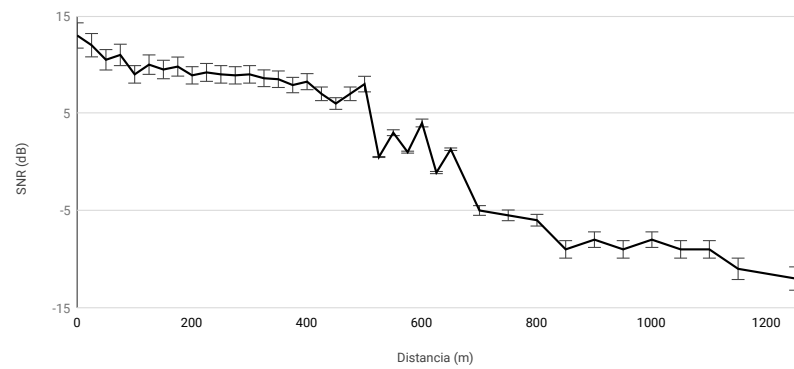


Figura 4.6: Medición de SNR en pruebas de alcance



Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se incluye las conclusiones finales del trabajo, las recomendaciones que se deben aplicar para el uso del registrador de datos, y para el desarrollo de trabajos similares o trabajos futuros.

5.1. Conclusiones

En las pruebas de alcance de la Sección 4.3, se pudo observar la superioridad del uso de dispositivos con tecnología LoRa con respecto a las demás tecnologías (hasta 5 veces mayor alcance que Wi-Fi o Zigbee).

El prototipo inicial se probó con componentes de inserción para la parte del microcontrolador y los circuitos del RTC y memoria externa, para la parte de radiofrecuencia se hizo uso del transceptor SX1276RF1JAS. Luego de probar y validar el funcionamiento se procedió a enviar el diseño final para que se pueda construir y soldar con componentes de montaje superficial. Posterior a esto se logró que el dispositivo sea de reducido tamaño y compacto.

Para la parte que funciona a alta frecuencia, se diseñó una “Jaula de Faraday”, que permite que la concentración de campos eléctricos externos sea nula. Lo que significa que no se puede pasar carga eléctrica hacia el interior de la jaula. Y de esa manera se protege los componentes.

En cuanto a los parámetros de recepción y a las mediciones de RSSI y SNR, es evidente que tienden a decaer cuando la distancia incrementa. Lo que disminuye a la llegada fiable de los datos.

De acuerdo a los objetivos planteados, el registrador de datos utiliza un microcontrolador y un transceptor de bajo consumo, además es compacto en montaje superficial, y con las pruebas realizadas se confirma que tiene al menos 1Km de alcance. Además, en este trabajo los objetivos

se centran en el diseño de hardware, en la parte del software se implementó un programa básico y sencillo para comprobar el funcionamiento de cada dispositivo adoptado en el prototipo final.

El dispositivo se diseñó siguiendo las recomendaciones de los estándares CISPR 22:1997 y NOM-125-SCT1-2001, para que sea electromagnéticamente compatible. En las pruebas realizadas no se observó ningún tipo de interferencia con otros sistemas, no fue susceptible a las emisiones de otros equipos, y no provocó interferencia consigo mismo.

5.2. Recomendaciones

- Para disminuir el consumo energético, se podría usar sensores que requieran la alimentación de 5V o 3.3V. Siendo así, el registrador de datos funcionaría con una alimentación de menor voltaje y por lo tanto disminuiría la potencia.
- Se debe tener un amplio conocimiento de radio frecuencia y su acoplamiento al momento de realizar una placa impresa de este tipo, ya que un mal diseño o una mala ubicación de los componentes podría alterar o afectar el desempeño a la frecuencia que se desea trabajar. Además, se recomienda que los componentes que trabajan a altas frecuencias estén aislados de la parte de control y los otros componentes, se sugiere seguir las recomendaciones de compatibilidad electromagnética.
- Al momento de realizar pruebas a grandes distancias, se recomienda tener en cuenta el escenario, ya que se necesita al menos el 90% de línea de vista entre el transmisor y el receptor para considerar que la señal recibida sea aceptable y la comunicación sea estable.
- Para realizar un mayor número de pruebas, se recomienda realizar el soldado de los componentes en la sección *Low Frequency* que se encuentra en la parte izquierda de la placa (Figura D.3). Con estas pruebas se podría obtener resultados de transmisión y alcance a frecuencias más bajas.

5.3. Trabajos Futuros

En esta sección, se explica cómo podría ser mejorado el registrador de información limnográfica o ampliado con futuros análisis.

- Para las pruebas de funcionamiento del dispositivo realizado, la potencia de transmisión fue un factor clave para el análisis de la cobertura. Para todos los análisis se optó por utilizar una potencia de +20 dBm. Como trabajo futuro se recomienda el análisis de cobertura con diferentes valores de potencia. Ya que en consecuencia de usar continuamente el dispositivo con una potencia elevada, puede amenorar la vida útil del mismo.
- El registrador de datos, cuenta con pines analógicos y digitales extras, por lo cuál la adición de sensores podría ser implementada y probada.



- Como un futuro a la estación limnigráfica, se podría analizar los paquetes perdidos con diferentes configuraciones de [LoRa](#). Además, se puede realizar un análisis de retardos de mensajes que serían enviados desde el registrador de datos hasta la estación base (RX).
- Este registrador de datos no solo funcionaría para obtener información limnigráfica, realizando cambios en la programación y conectando otro tipo de sensores, se estima que el funcionamiento debería ser satisfactorio.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867



Anexos

UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

Apéndice A

Especificaciones Técnicas de dispositivos

A.1. Microcontroladores

STM32L053R8

Los microcontroladores de la familia STM32L053XX proporcionan una alta eficiencia de potencia para una amplia gama de rendimiento. Estos microcontroladores funcionan a 32 bits que operan a una frecuencia de 32 MHz, una unidad de protección de memoria (MPU), memorias integradas de alta velocidad. Posteriormente se detalla las características claves del microcontrolador [40].

- Rango de Voltaje de Operación (V): 1,65 V a 3,6 V
- Rango de temperatura (°C): -40 a 125
- Modo de espera: 0,27 μ A
- Modo de parada: 0.4 μ A
- Hasta 0.8 μ A Modo de parada + RTC + 8 KB de retención de RAM
- Hasta 88 μ A / MHz en modo Run
- Tiempo de activación de 3,5 μ s (desde RAM)
- Tiempo de activación de 5 μ s (desde la memoria Flash)
- 8KB RAM
- 2 KB de datos EEPROM

ATmega328

El microcontrolador ATmega328 es el más común e utilizado en Arduino. Está basado en

AVR RISC de 8 bits de Microchip de alto rendimiento con memoria flash ISP de 32KB con capacidades de lectura y escritura. A continuación, se detallan las características claves del microcontrolador [41]:

- Rango de Voltaje de Operación (V): 1.8-5.5
- Rango de temperatura (°C): -40 a 85
- Consumo de energía a 1MHz, 1.8V, 25 ° C
- Modo activo: 0.3 mA
- Modo de apagado: 0.1 μ A
- Modo de ahorro de energía: 0,8 μ A (incluido RTC a 32 kHz)
- 1KB en EEPROM
- 2KB en SRAM
- Memoria programable: 32KB

ATmega1284

El microcontrolador ATmega1284 está basado en AVR RISC de 8 bits de Microchip de alto rendimiento combina memoria flash ISP de 128KB con capacidades de lectura y escritura. A continuación, se detallan las características claves del microcontrolador [42]:

- Rango de Voltaje de Operación (V): 1.8-5.5
- Rango de temperatura (°C): -40 a 85
- Consumo de energía a 1MHz, 1.8V, 25 ° C
- Modo activo: 0.3mA
- Modo de apagado: 0.1 μ A
- Modo de ahorro de energía: 0,6 μ A (incluido 32kHz RTC)
- 4KB en EEPROM
- 16KB en SRAM
- Memoria programable: 128KB

Nota: Los AVR son una familia de microcontroladores RISC del fabricante estadounidense Atmel, compañía adquirida por Microchip Technology en 2016.

MSP-EXP432P401R

El microcontrolador MSP432P401R brinda la facilidad de crear aplicaciones de alto rendimiento que se benefician de la operación de bajo consumo, con una memoria programable, además funciona a 32 bits. Posteriormente se detallan las características claves del microcontrolador [43].

- Rango de Voltaje de Operación (V): 3.3 V a 5 V
- Rango de temperatura (°C): -40 a 85

- Modo activo: $80\mu\text{A}$
- Modo de ahorro de energía: 660nA incluido RTC en espera.
- Memoria programable: 256KB
- 64KB en RAM
- 32KB en ROM
- Incompatible con librerías [LoRa](#)

PIC32MX340F512H

El microcontrolador PIC32MX340F512H es un dispositivo fabricado por Microchip, contiene una memoria programable. A continuación, se detalla las características claves del microcontrolador [44].

- Rango de Voltaje de Operación (V): 7V a 15V
- Rango de temperatura ($^{\circ}\text{C}$): -40 a 125
- 80 MHz 32-bit
- Memoria programable: 512KB
- 32KB SRAM
- Voltaje de operación 3.3V
- Modo activo: 75mA , 18mA por pin

A.1.1. ATmega1284

El ATmega1284 es un microcontrolador de baja potencia basado en la arquitectura RISC mejorada de AVR. Al ejecutar instrucciones potentes en un solo ciclo de reloj, el ATmega1284 logra rendimientos cercanos a 1 MIPS por MHz. Esto permite al diseñador del sistema optimizar el dispositivo para el consumo de energía en comparación con la velocidad de procesamiento. El ATmega1284 ofrece las siguientes características:

- 128Kbytes de flash programable en el sistema con capacidades de lectura mientras se escribe.
- EEPROM de 4Kbytes .
- SRAM de 16Kbytes .
- 32 registros de trabajo de propósito general, contador de tiempo real (RTC),
- Tres Temporizador / Contadores flexibles con modos de comparación
- PWM
- [ADC](#) de 8 bits y 8 canales.

En el modo de ahorro de energía se detiene la CPU y permite que el SRAM, el temporizador / contadores, el puerto [SPI](#) y el sistema de interrupción sigan funcionando. El modo de apagado guarda el contenido del registro, pero congela el oscilador, deshabilitando todas las demás funciones del chip hasta la próxima interrupción o reinicio del hardware. En el modo de ahorro

de energía, el temporizador asíncrono continúa ejecutándose, lo que permite al usuario mantener una base de temporizador.

Mientras el resto del dispositivo está durmiendo. El modo de reducción de ruido de **ADC** detiene la CPU y todos los módulos de I/O, excepto el temporizador asíncrono y el **ADC** para minimizar el ruido de conmutación durante las conversiones de **ADC**. En el modo de espera, el oscilador de cristal / resonador está funcionando mientras el resto del dispositivo está durmiendo. Esto permite una puesta en marcha muy rápida combinada con un bajo consumo de energía. En el modo *Standby* extendido, tanto el oscilador principal como el temporizador asíncrono continúan ejecutándose.

El programa de arranque puede usar cualquier interfaz para descargar el programa de aplicación en la memoria flash de la aplicación. El software en la sección *Boot Flash* continuará ejecutándose mientras se actualiza la sección *Application Flash*, proporcionando una verdadera operación de lectura mientras se escribe. Al combinar una CPU RISC de 8 bits con un flash autoprogramable en el sistema en un chip monolítico, el Atmel ATmega1284 es un potente microcontrolador que proporciona una solución altamente flexible y rentable para muchas aplicaciones de control integrado [42]. En la Figura A.1 se muestra el diagrama de pines de este microcontrolador.

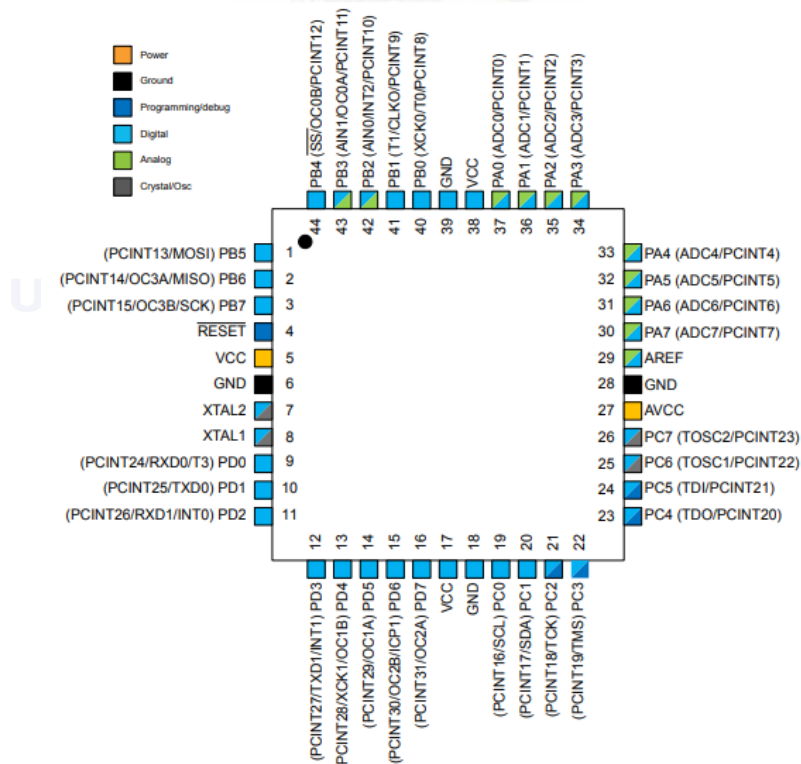


Figura A.1: Diagrama de pines del microcontrolador ATmega1284
Fuente:[45]

A.2. Transceptores

SX1272

- LoRa Modem
- Presupuesto máximo de enlace de 157dB
- potencia + 20dBm
- + 14dBm alta eficiencia PA
- Velocidad de bits programable hasta 300kbps
- Alta sensibilidad: hasta -137dBm
- Excelente inmunidad de bloqueo.
- Baja corriente de RX de 10mA, retención de registro de 100nA
- Sintetizador totalmente integrado con una resolución de 61Hz.
- FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa y modulación OOK
- Sincronizador de bits incorporado para la recuperación del reloj
- Detección de preámbulos
- Rango dinámico 127dB RSSI
- Motor de paquetes de hasta 256 bytes con CRC.
- Sensor de temperatura incorporado e indicador de batería baja

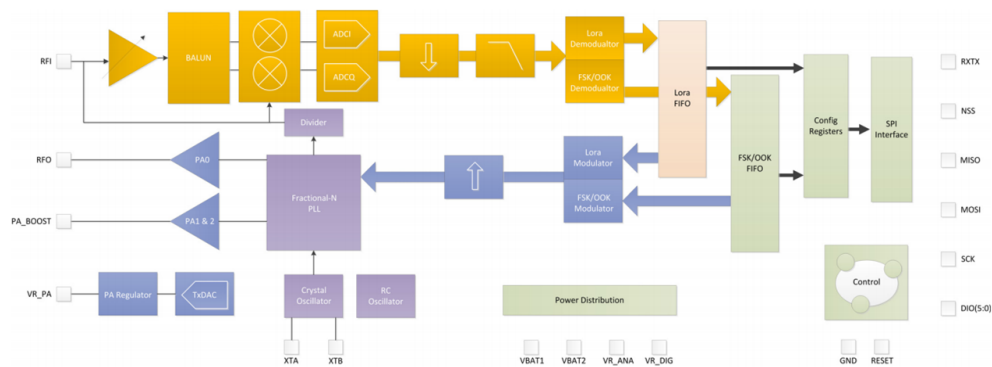


Figura A.2: Diagrama de bloques general de un transceptor SX1272

Fuente:[29]

SX1276/SX1278

- LoRa Modem
- Presupuesto máximo de enlace de 168dB
- potencia + 20dBm
- + 14dBm alta eficiencia PA
- Velocidad de bits programable hasta 300kbps
- Alta sensibilidad: hasta -148dBm

- Excelente inmunidad de bloqueo.
- Baja corriente de RX de 9.9mA, retención de registro de 200nA
- Sintetizador totalmente integrado con una resolución de 61Hz.
- FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa y modulación OOK
- Sincronizador de bits incorporado para la recuperación del reloj
- Detección de preámbulos
- Rango dinámico 127dB RSSI
- Motor de paquetes de hasta 256 bytes con CRC.
- Sensor de temperatura incorporado e indicador de batería baja

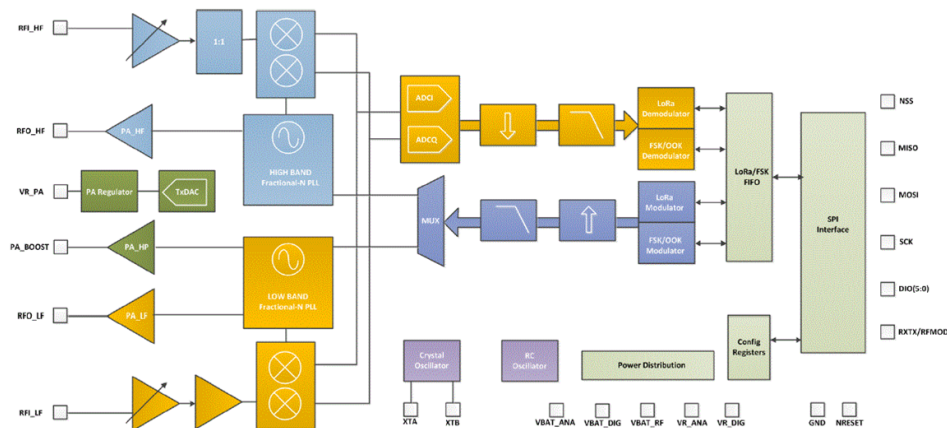


Figura A.3: Diagrama de bloques general de un transceptor SX1276-78

Fuente:[31]

A.2.1. Transceptor LoRa SX1276

De acuerdo con los objetivos planteados en el presente trabajo el consumo energético de los dispositivos seleccionados debe ser mínimo. El dispositivo SX1276 son amplificadores de potencia que están protegidos, esto conlleva al beneficio de proteger la vida útil de su fuente de energía respaldando la química de las baterías con picos limitados de corriente y minimizando el peor caso de consumo de energía. En su operación estos amplificadores tienen una corriente igual a 0 cuando se encuentra en modo sleep y tiene un mínimo consumo cuando se encuentra en modo recepción llegando hasta 9.9 mA. Cuando el dispositivo SX1276 se encuentra en transmisión, existen parámetros eléctricos configurables como la máxima corriente. Estos parámetros se configuran mediante registros internos que son editables en la programación del transceptor, es decir, mediante el protocolo de comunicación síncrono SPI.

Los transceptores LoRa 1276 operan a una frecuencia mínima de 100 MHz y a una frecuencia máxima de 1020 MHz [46]. En la Tabla A.1 se muestra las principales características del

dispositivo SX1276 y en la Figura A.4 se muestra el diagrama de pines del dispositivo.

Radio SX	Frecuencia seleccionada	Factor de alcance SF	Ancho de banda	Tasa efectiva de bits	Sensibilidad
1276	915 MHZ	6 a 12	125 a 500 KHz	0.24 a 37.5 Kbps	-117 a -137 dBm

Tabla A.1: Características principales del dispositivo SX1276

Fuente: [46]

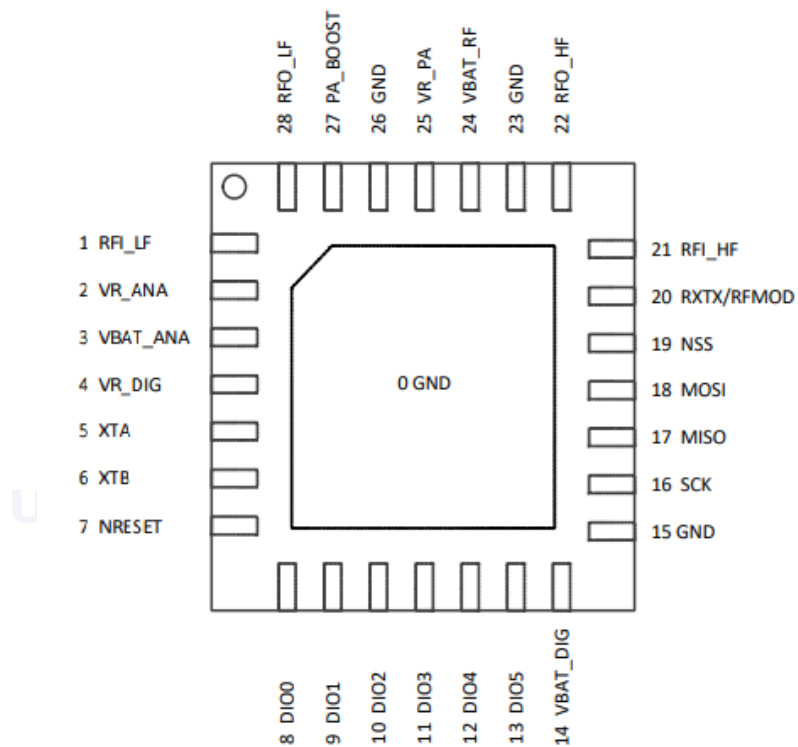


Figura A.4: Diagrama de pines de un transceptor SX1276

Fuente:[31]

Cuando el dispositivo SX1276 se encuentra en transmisión, existen parámetros eléctricos configurables como la máxima corriente. Estos parámetros se configuran mediante registros internos que son editables en la programación del transceptor, es decir, mediante el protocolo de comunicación síncrono [SPI](#).

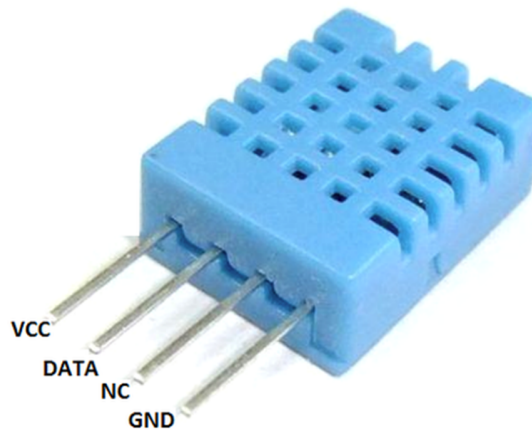


Figura A.5: Sensor DHT11

Fuente: [15].

A.3. Sensor DHT11

El DHT11 es un sensor de temperatura y humedad digital de bajo costo. Muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos. Es bastante simple de usar, pero requiere sincronización cuidadosa para tomar datos. Las características principales que cuenta el sensor se detalla a continuación:

- Alimentación: 3V a 5V
- Rango de medición de temperatura: 0 a 50°C
- Precisión de medición de temperatura: $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$
- 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
- Tiempo de sensado: 2 seg.

A.4. RTC DS3231

- El RTC de alta precisión administra completamente todas las funciones de hora normal.
- El reloj de tiempo real cuenta los segundos, los minutos, las horas, la fecha del mes, el mes, el día de la semana y el año, con una compensación de año bisiesto válida hasta 2100
- Precisión ± 2 ppm de 0°C a $+40^{\circ}\text{C}$
- Precisión ± 3.5 ppm de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$
- Salida del sensor de temperatura digital: precisión de $\pm 3^{\circ}\text{C}$

- RST Output
- Dos alarmas de hora del día
- Señal de salida de onda cuadrada programable
- La interfaz serial simple se conecta a la mayoría de Microcontroladores
- Interfaz I2C rápida (400kHz)
- Entrada de batería de respaldo para el cronometraje continuo
- La operación de bajo consumo de energía prolonga el tiempo de ejecución de la batería de respaldo
- Operación 3.3V
- Rangos de temperatura de funcionamiento: comercial (0 ° C a + 70 ° C) e industrial (-40 ° C a + 85 ° C)

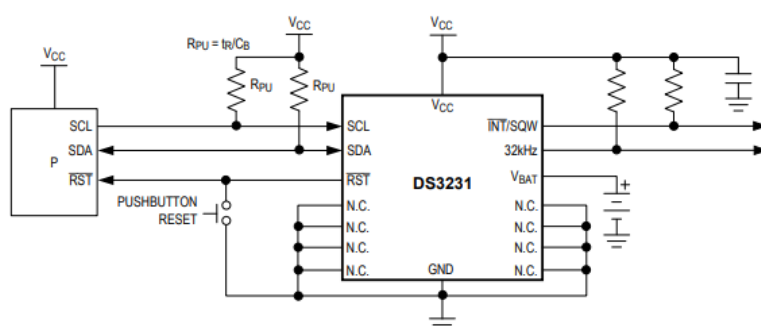


Figura A.6: Circuito típico de operación

Fuente: [15]

A.5. Memoria externa

- W25Q128JV: 128M-bit / 16M-byte
- SPI estándar: CLK, / CS, DI, DO
- SPI dual: CLK, / CS, IO0, IO1
- Quad SPI: CLK, / CS, IO0, IO1, IO2, IO3
- Restablecimiento de Software y Hardware (1)
- Flash Serial de Alto Rendimiento
- Velocidad de transferencia de datos continua de 66MB / S
- Retención de datos de más de 20 años.
- "Lectura continua. eficiente
- Baja potencia, amplio rango de temperatura
- Suministro individual de 2.7 a 3.6V.
- -40 ° C a + 85 ° C rango de operación
- Arquitectura flexible con sectores de 4KB.

- Funciones de seguridad avanzadas
- Software y hardware de protección contra escritura
- Bloqueo de la fuente de alimentación
- Registros de seguridad de 3X256 bytes con bloqueos OTP
- Bits de registro de estado volátiles y no volátiles

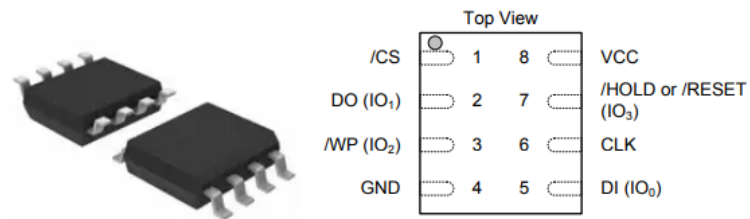


Figura A.7: Diagrama de pines

Fuente: [47]

Apéndice B

Configuración y programación del dispositivo

En este apéndice, se presenta un breve resumen de como el registrador de datos debe ser configurado y programado.

B.1. Configuración del dispositivo

Como primera instancia para poder utilizar el registrador de datos, se necesita que el microcontrolador cuente con un gestor de arranque (*bootloader*), que es un software alojado en la memoria del MCU que nos permite programar la placa a través del puerto serie. El bootloader de Arduino es lo que reside a la sencillez y durante el arranque del MCU el bootloader comprueba si se está intentando programar. Si es así, se graba el programa en la memoria, caso contrario el bootloader ejecuta el último programa grabado. En muchos casos los fabricantes envían sus placas sin el bootloader precargado, o en alguna circunstancia el bootloader puede corromperse.

En estos casos se puede grabar el bootloader haciendo uso cualquier placa de Arduino, al Arduino que actúa como programador, se lo llamará *master*, y al registrador de datos que vamos a programar será el *slave*. Estos dos se comunicarán a través de [SPI](#), y la comunicación entre PC y *master* se realiza a través de puerto serie.

En primer lugar se prepara el Arduino master, para ello simplemente se carga el *Sketch “ArduinoISP”* de la librería de ejemplos de Arduino, y es así como el *master* será ahora un programador ISP.

Segundo, para que el IDE Arduino reconozca el MCU ATmega 1284 se deberá realizar lo siguiente:

Ir a Archivo, Preferencias; y escribir en el gestor de URLs Adicionales de tarjetas “https://mcudude.github.io/MightyCore/package_MCUdude_MightyCore_index.json”, tal como se muestra en la Figura B.1.

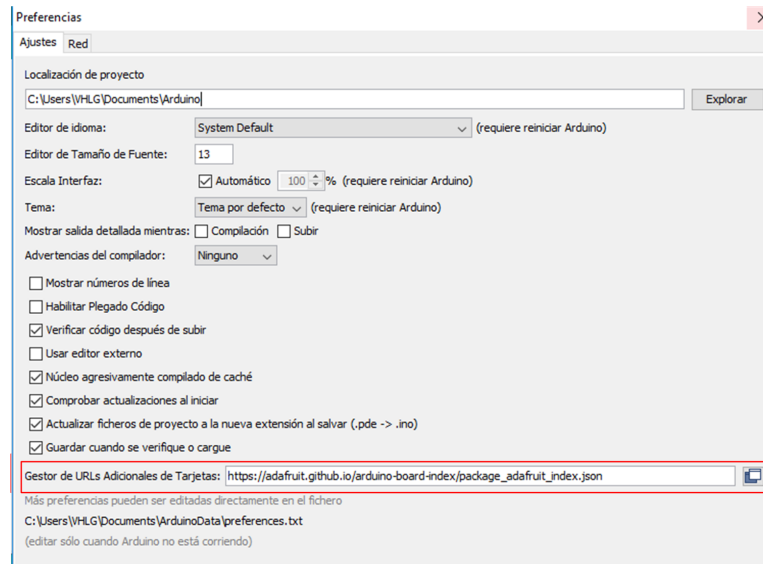


Figura B.1: Configuración para Gestor de URLs Adicionales de tarjetas

Dirigirse a Herramientas, Placa, Gestor de tarjetas. Buscar el paquete de MightyCore e instalarlo, como se muestra en la Figura B.2. Este paquete contiene la tarjeta ATmega1284/P.

Se desconecta el *master* del ordenador, y se conecta el *master* y *slave*. Se conectan los pines del bus SPI, el VCC y el GND entre ambas placas, como se indica en las Figuras B.3 y B.4.

Una vez que se haya conectado correctamente, se selecciona la placa “ATmega1284”, clock “16 MHz external”, programador “Arduino as ISP (MightyCore)” y las demás características se las deja por defecto. Así como se muestra en la Figura B.5.

Considerando que se han cumplido con todos los requisitos, seleccionamos la opción “Quemar Bootloader”, si todo está conectado correctamente se nos indicará un mensaje diciendo que el quemado del bootloader fue completado como se indica en la Figura B.6. Después de este proceso, el registrador de datos está listo para ser programado y utilizado.

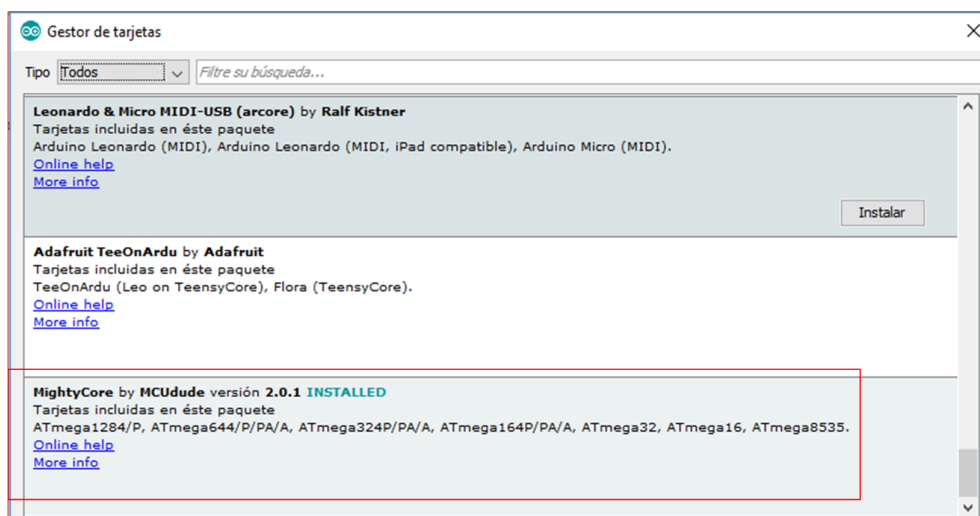


Figura B.2: Instalación de tarjetas de MightyCore.

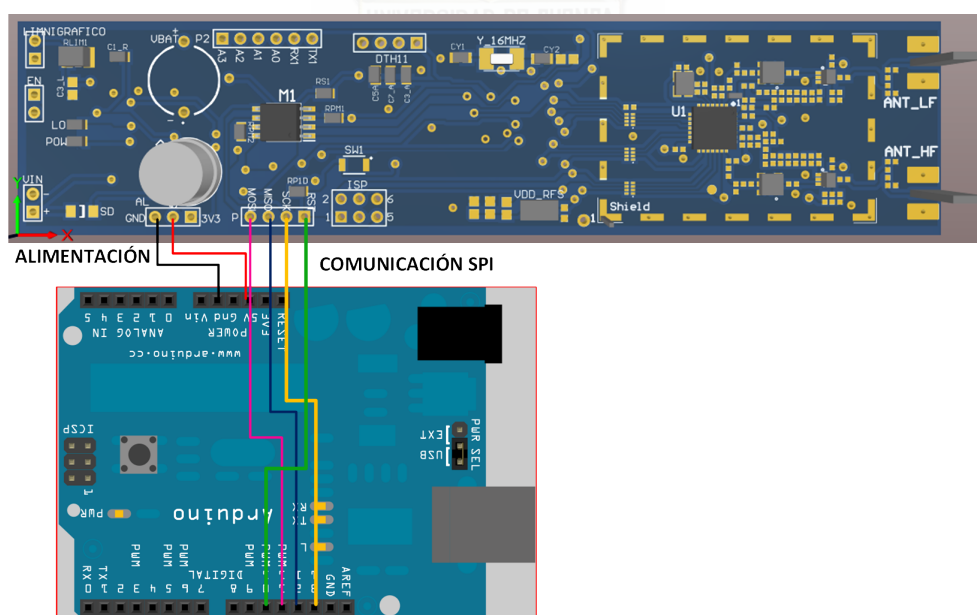


Figura B.3: Interconexión entre master y slave.

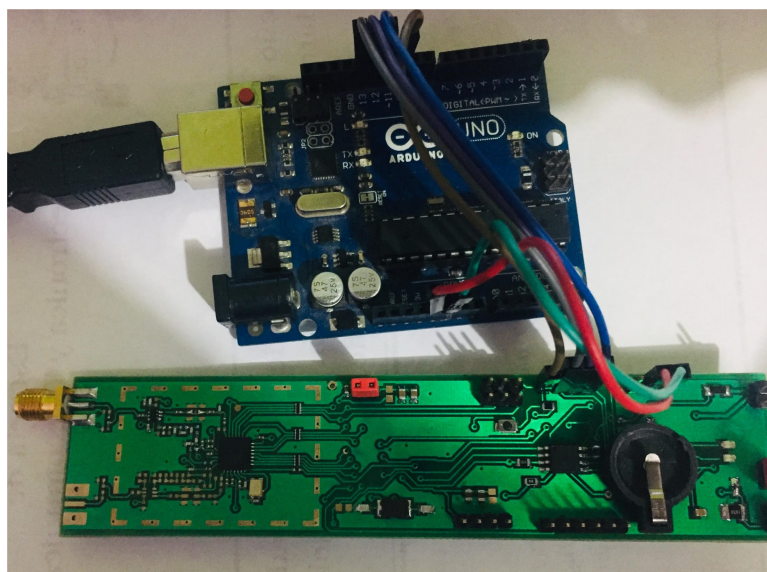


Figura B.4: Interconexión entre master y slave.

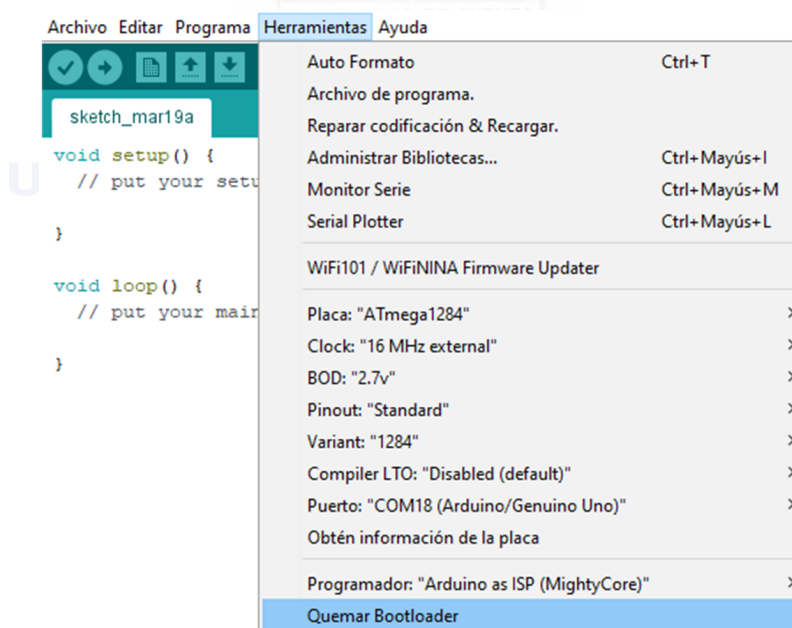


Figura B.5: Selección de características para ATmega1284.

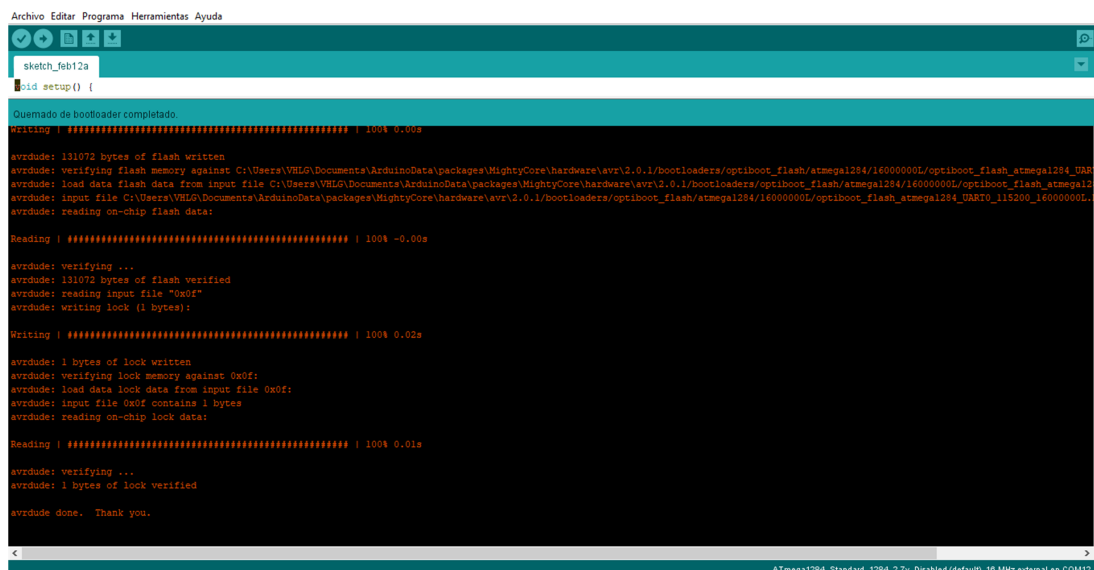


Figura B.6: Quemado del bootloader completado.

B.2. Configuración a nivel de software

La figura B.7, muestra de cómo está estructurado el código programado en el microcontrolador el cual define las acciones que este debe ejecutar. El diagrama de flujo muestra las distintas actividades que está realiza. El diagrama de flujo consta de los siguientes estados:

- 1 Inicia el programa verificando todas las librerías a utilizar de los diferentes componentes, tales como: Sensor de temperatura y humedad, Modulo **RTC**, memoria externa, comunicación **SPI** y la librería del módulo **LoRa**.
- 2 Establece la comunicación **I2C** y **SPI** estableciendo los pines digitales como I/O para cada caso, además como subproceso escribe los registros para el transceptor SX1276, sincroniza la fecha y hora en el modulo **RTC** y establece los pines de comunicación de **SPI**, **I2C** y pines de control para la comunicación y transmisión (**DIO0**).
- 3 Establece los tiempos de muestreo y tiempos de activación de los sensores, simultáneamente como subproceso recopila los datos de los sensores y los prepara para ser transmitidos y almacenarlos en la memoria externa.
- 4 El microcontrolador prepara los datos adquiridos y los envía al transceptor SX1276 para ser transmitidos.

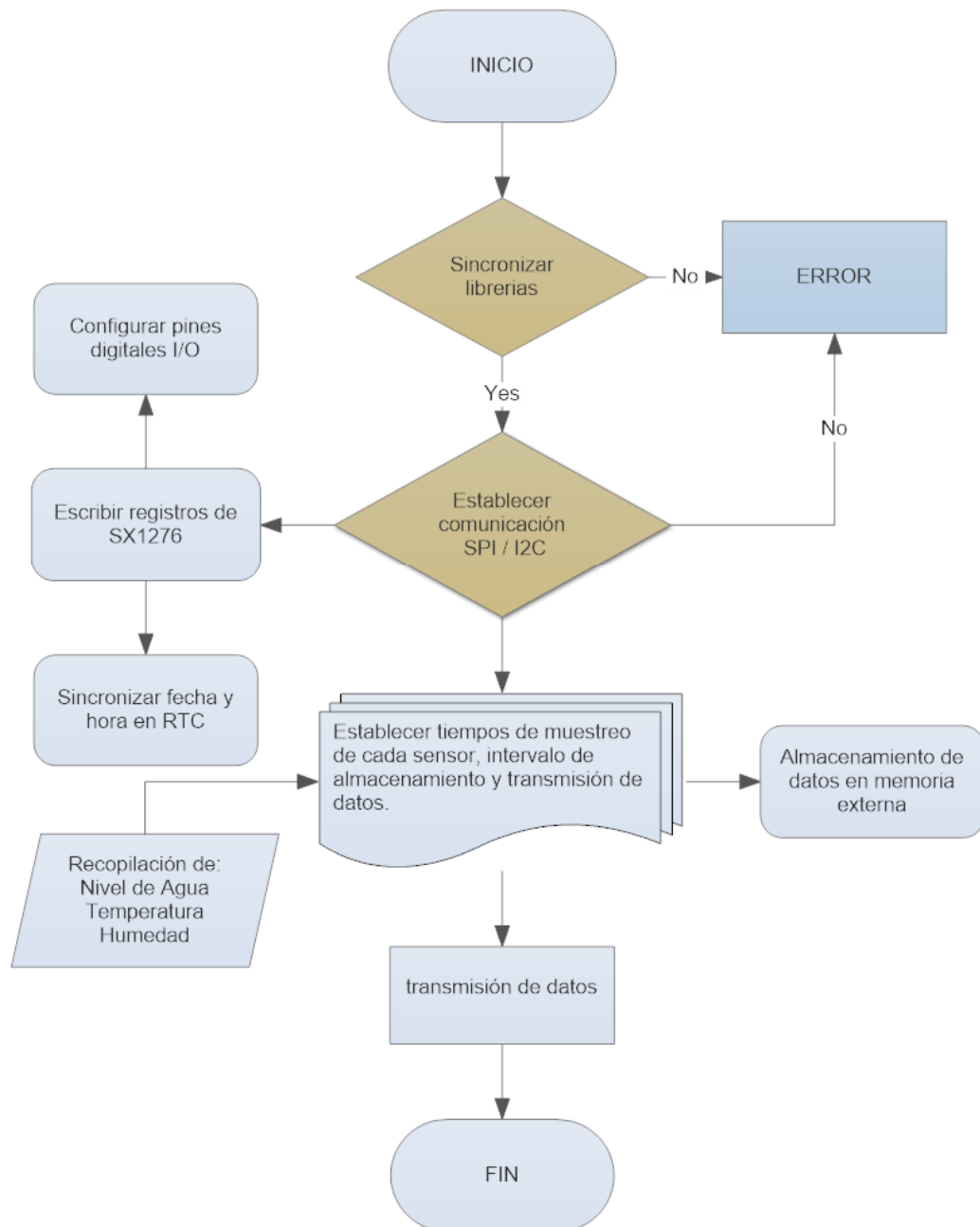


Figura B.7: Diagrama de flujo del funcionamiento del software de la estación limnográfica.

- Configuración de parámetros

Los parámetros a configurar quedan a criterio y a la necesidad del programador. Estos parámetros se encuentran configurados dentro de la librería [LoRa](#) y en la Tabla [B.1](#) se muestran los más relevantes.

Parámetro	Registro	Dirección	Valores
Ancho de Banda	MODEMCONFIG1	0x1D	7.81 KHz – 0x00 10.41 KHz – 0x10 15.62 KHz – 0x20 20.83 KHz – 0x30 31.25 KHz – 0x40 41.66 KHz – 0x50 62.50 KHz – 0x60 125 KHz – 0x70 250 KHz – 0x80 500 KHz – 0x90
Factor de ensanchamiento	MODEMCONFIG2	0x1E	6 – 0x60 7 – 0x70 8 – 0x80 9 – 0x90 10 – 0xA0 11 – 0xB0 12 – 0xC0
Tasa de codificación	MODEMCONFIG1	0x1D	4/5 – 0x02 4/6 – 0x04 4/7 – 0x06 4/8 – 0x08
Frecuencia	FRFMSB FRFMID FRFLSB	0x06 0x07 0x08	915 MHz: 0xE4 0xC0 0x00
Modos	RX_MODE_CONTINUOS MODE_TX MODE_SLEEP MODE_STANDBY	0x85 0x83 0x80 0x81	0x05 0x03 0x00 0x01

Tabla B.1: Parámetros configurables para la Transmisión y Recepción

A continuación se detalla cómo está constituido el código fuente que se programó en el micro-controlador para la estación limnigráfica, cabe recalcar que es un código simple que nos permite verificar el funcionamiento del dispositivo.



```
1 //Incluir las librerias
2 #include <SPI.h>
3 #include <LoRa.h>
4 #include <DHT.h> // dht
5 #include "DHT.h"
6 #include <DS3231.h> // rtc
7 #include <Wire.h> // ds3231
8 #include <Time.h>
9 #include <TimeLib.h>
10 #include <SPIMemory.h> // memoria
11 #include <SPIFlash.h> // memoria
12
13 //Definir los pines de control del microcontrolador
14 //con respecto al transceptor SX1276, memoria externa
15 //y sensores
16
17 #define SCK      7 // 7
18 #define MISO     6 // 6
19 #define MOSI     5 // 5
20 #define SS       4 // 4 esclavo transceptor SX1276
21 #define NRESET   1 // 1
22 #define DI0      13 // 13
23 #define BAND     915E6 // 915E6
24 #define PABOOST   true
25 #define CS 12 // esclavo memoria SLAVESELECT
26 #define DHTPIN 2 // Definimos el pin digital donde se conecta el sensor
    DHT11 (PB2)
27 #define DHTTYPE DHT11 //Tipo de sensor
28 int WIRANS = 3; // Definimos el pin que ACTIVA el TRANSISTOR PB3(D3)
29
30 DHT dht(DHTPIN,DHTTYPE); // Inicializamos el sensor DHT11
31 // DS3231 rtc(SDA,SCL);
32 DS3231 rtc; // declaramos el RTC DS3231
33
34 int contador;
35 // time_t fecha; // declaramos la variable del tipo time_t
36 int counter = 0;
37 //time_t fecha;
38 int hora; //variable de RTC
39 int minuto; //variable de RTC
40 int segundo; //variable de RTC
41 int dia; //variable de RTC
42 int mes; //variable de RTC
43 int anio; //variable de RTC
44
45 String payload[16]; //Declaramos el Numero de celdas
46
47 //Ejecutar programa
48 void setup() {
```

```
49 Serial1.begin(9600);
50 SPI.begin(); // inicializo el SPI
51 dht.begin(); // inicializo DHT
52 // setTime(hora,minutos,segundos,dia,mes,año)
53 setTime(21, 40, 00, 3, 4, 2019); //seteamos la hora para el RTC
54
55 //Inicializamos el modulo LoRa para la Transmision
56 while (!Serial1);
57 Serial1.println("LoRa Sender");
58 LoRa.setPins(SS,NRESET,DIO);
59 if (!LoRa.begin(BAND,PABOOST)) {
60     Serial1.println("Starting LoRa failed!");
61     while (1);
62 }
63 }
64
65 //Programa para ejecutar ciclicamente.
66 void loop() {
67     muestreo(); //funcion de muestreo de datos
68     tiempo(); //funcion de hora y fecha
69     Serial1.print("\n ***** ");
70     Serial1.print("\n ESTACION LIMNIGRAFICA... ");
71     Serial1.print("\n ***** ");
72     LoRa.beginPacket(); //inicio de transmision de paquete
73     LoRa.print("\n Fecha: "+ payload[0] + "/" + payload[2] + "/" + payload[4] + "\n
        Hora: " + payload[6] + ":" + payload[8] + ":" + payload[9] + "\n Temperatura
        ( C ): " + payload[10] + "\n Humedad(%): " + payload[12] + "\n Nivel(V)
        : " + payload[14]); // + "\n Estado Agua: "+ payload[15]); //payload a
        enviar
74     LoRa.endPacket(); //finalizacion de transmision
75     delay(5000); //espero 5 segundos para nueva transmision
76 }
77
78 //Funcion de muestreo de datos
79 void muestreo(){
80     tiempo();
81     digitalWrite(WTRANS, LOW); // ACTIVO TRANSISTOR DEL SENSOR LIMNIGRAFICO
82     float temp = dht.readTemperature();
83     float hum = dht.readHumidity();
84     int A=analogRead(A6); // lee el valor del pin analogico del sensor
        LIMNIGRAFICO
85     float B= float(A)*5/1023; //calculo de la tension de entrada del pin
        analogico del sensor LIMNIGRAFICO
86
87     //Cargo las variables a las 16 celdas
88     payload[0] = dia; //
89     payload[1] = '/' ;
90     payload[2] = mes; //
91     payload[3] = '/' ;
92     payload[4] = anio; //
```

```
93     payload[5] = ':' ;
94     payload[6] = hora; //
95     payload[7] = ':' ;
96     payload[8] = minuto;
97     payload[9] = segundo;
98     payload[10] = temp; //
99     payload[11] = 'C' ;
100    payload[12] = hum; //
101    payload[13] = '%';
102    payload[14] = B; //
103    payload[15] = '%'; // nivel bajo-medio-alto
104
105    // Estado del nivel de agua
106    if (B==0){
107        payload[15] = "Desconectado";
108    }
109    else if (B >= 0.6 & B <= 1.3) {
110        payload[15] = "Bajo";
111    }
112    else if (B >= 1.3 & B <= 2.5) {
113        payload[15] = "Medio";
114    }
115    else {
116        payload[15] = "Alto";
117    }
118    //Serial1.print("PAYLOAD CARGADO ES : \n ");
119    Serial1.println( "\n Fecha: "+ payload[0] + "/" + payload[2] + "/" + payload[4]
120                    + "\n Hora: " + payload[6] + ":" + payload[8] + ":" + payload[9] + "\n
121                    Temperatura( C ): " + payload[10] + "\n Humedad(%): " + payload[12] + "
122                    \n Nivel(V): " + payload[14] + "\n Estado: " + payload[15]);
120    Serial1.println("\n _____ ");
121    digitalWrite(WTRANS, HIGH); // DESACTIVO TRANSISTOR DEL SENSOR
122    LIMNIGRAFICO
123
124    //Funcion de fecha y hora
125    void tiempo(){
126        hora=hour();
127        minuto=minute();
128        segundo=second();
129        dia=day();
130        mes=month();
131        anio=year();
132    }
```

Listado B.1: Código de funcionamiento del Registrador de información limnigráfica

Para verificar la correcta transmisión de datos, se implementó un nodo receptor constituido de un Arduino uno y un módulo transceptor 1276. A continuación se detalla el código. Los

parámetros de recepción se muestran en la Sección C.2.

```
1 //Incluyo librerias
2 #include <SPI.h>
3 #include <LoRa.h>
4
5 //Definir los pines de control del Arduino Uno
6 //con respecto al transceptor SX1276
7 #define SCK      13
8 #define MISO     12
9 #define MOSI     11
10 #define SS       10
11 #define NRESET   A0
12 #define DIO       2
13 #define BAND     915E6 // 915E6
14 #define PABOOST  true
15
16
17 //Ejecutar programa
18 void setup() {
19     Serial.begin(9600);
20     //Inicializamos el modulo LoRa para la recepcion
21     while (!Serial);
22     Serial.println("LoRa Receiver");
23     LoRa.setPins(SS,NRESET,DIO);
24     if (!LoRa.begin(BAND,PABOOST )) {
25         Serial.println("Starting LoRa failed!");
26         while (1);
27     }
28 }
29
30 //Programa para ejecutar ciclicamente.
31 void loop() {
32     // try to parse packet
33     int packetSize = LoRa.parsePacket(); //tamaño del paquete (defino en
        libreria LoRa)
34
35     //Recepcion de datos
36     if (packetSize) {
37         // received a packet
38         Serial.print("\n\n Recibiendo... ");
39         Serial.println("\n*--Datos Estacion limnigrafica--*");
40         // read packet
41         while (LoRa.available()) {
42             Serial.print((char)LoRa.read());
43         }
44
45         //Recepcion de Rssi y Snr
46         Serial.print("\n");
47         Serial.print("*--Caracter sticas de Recepcion--*");
```



```
48 Serial.print("\n*****");
49 Serial.print("\n RSSI:\t");
50 Serial.print(LoRa.packetRssi());
51 Serial.println(" dBm");
52 Serial.print("\n SNR:\t");
53 Serial.print(LoRa.packetSnr());
54 Serial.println(" dB");
55 Serial.print("\n_____");
56 }
57 }
```

Listado B.2: Código del nodo receptor



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

Apéndice C

Recepción de datos

C.1. Señales Recibidas por el radio definido por Software



Figura C.1: Señal capturada por el SDR con SF=7 Y BW=41.7KHz

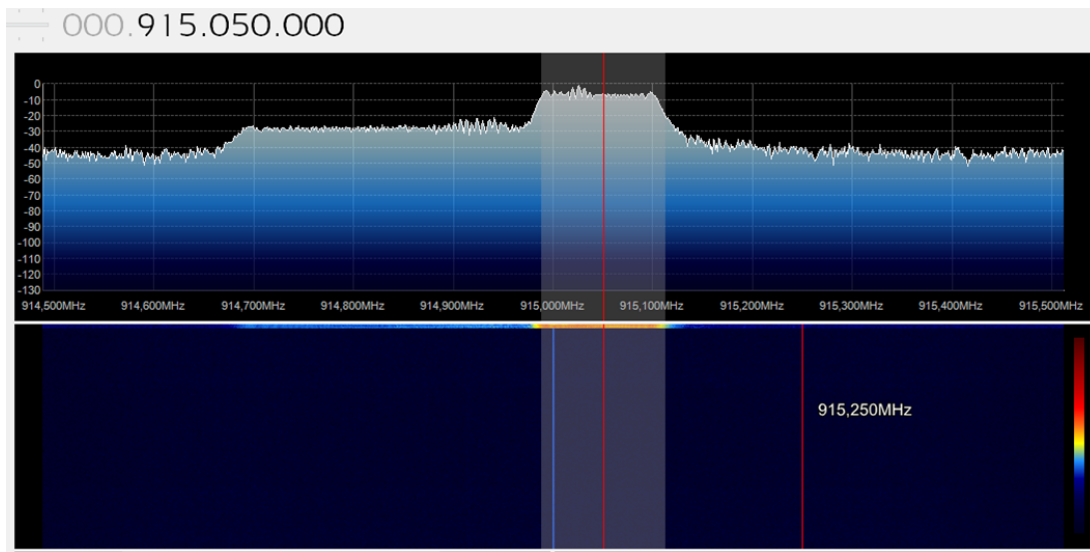


Figura C.2: Señal capturada por el SDR con SF=7 Y BW=125KHz

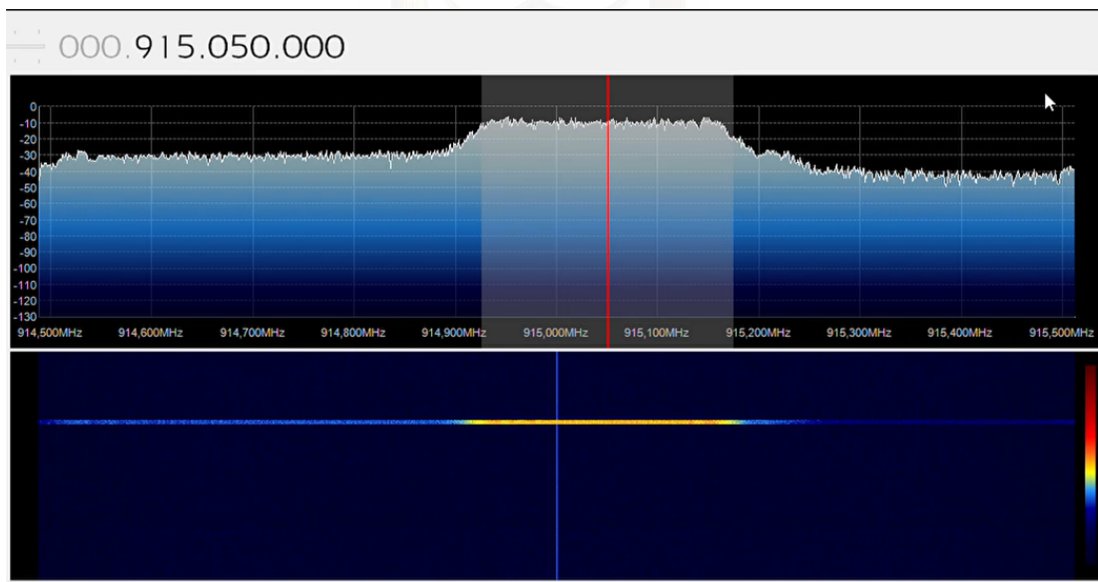


Figura C.3: Señal capturada por el SDR con SF=7 Y BW=250KHz

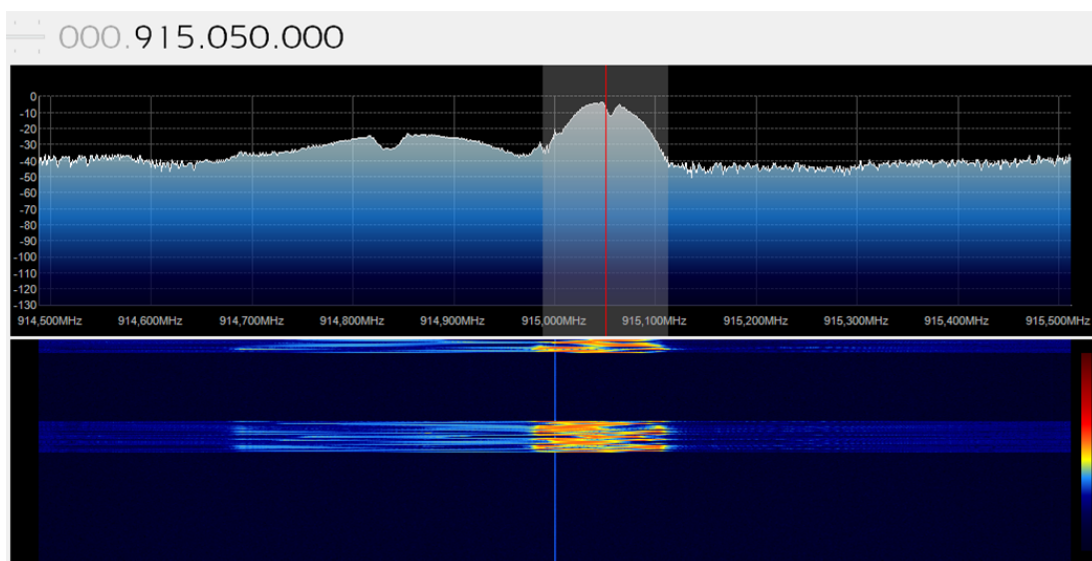


Figura C.4: Señal capturada por el SDR con SF=9 Y BW=125KHz

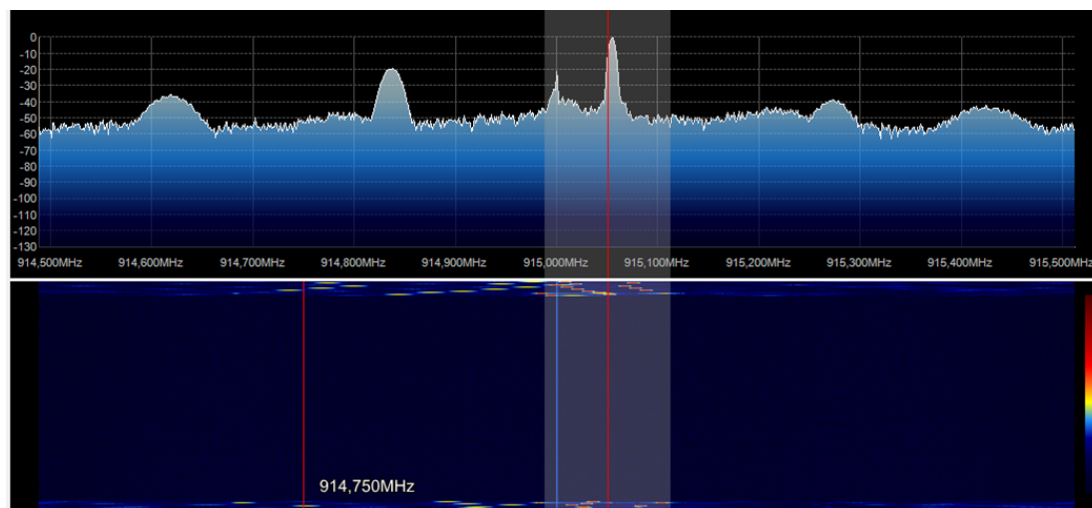


Figura C.5: Señal capturada por el SDR con SF=12 Y BW=125KHz

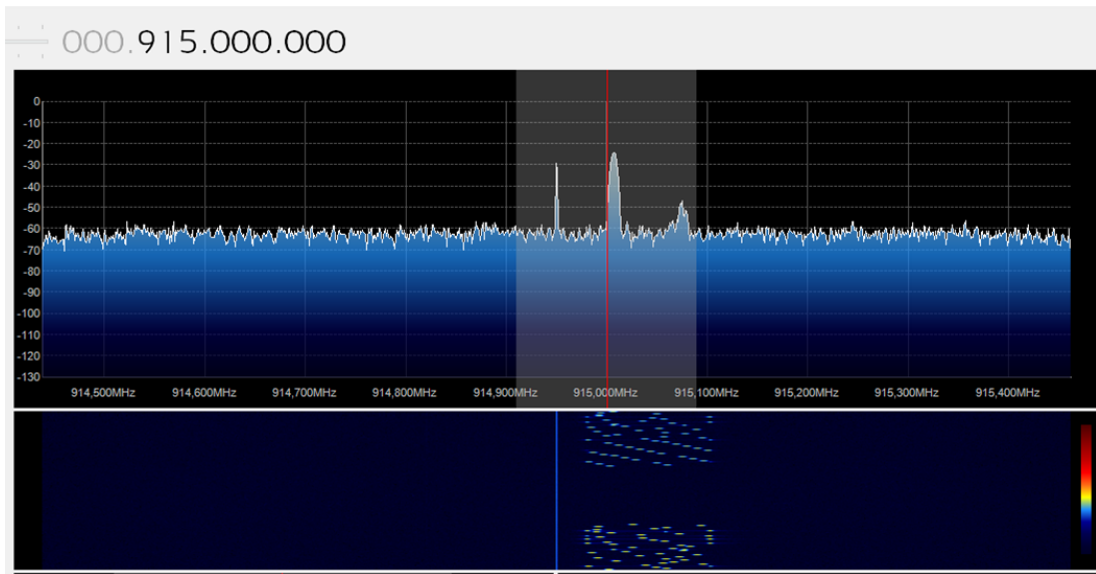


Figura C.6: Señal capturada por el SDR a 300 m, con SF=12 Y BW=125KHz

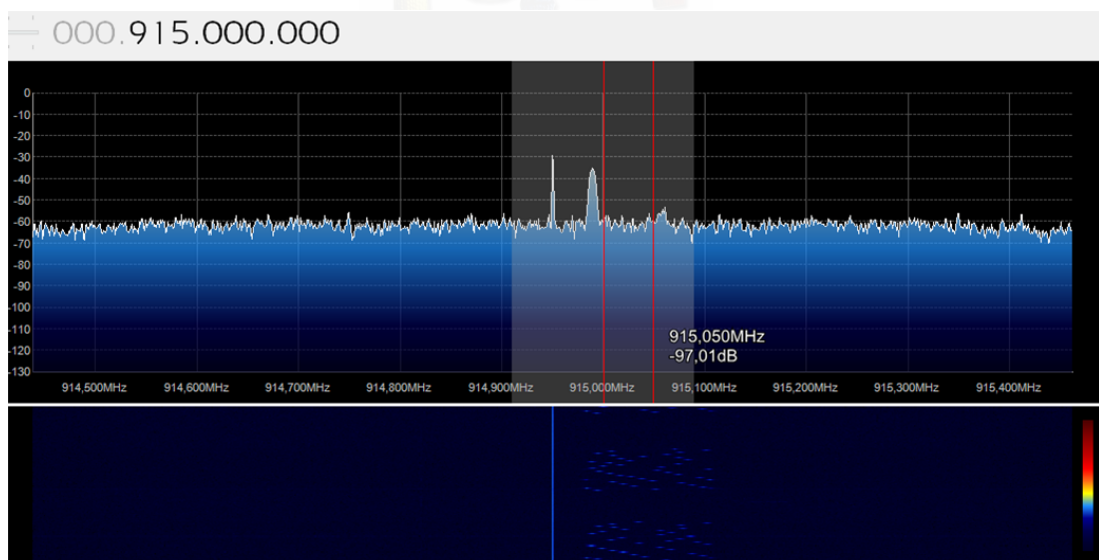


Figura C.7: Señal capturada por el SDR a 1.15 Km, con SF=12 Y BW=125KHz

C.2. Parámetros de Recepción

Cuando la estación limnigráfica está en funcionamiento y existe una comunicación estable, en el receptor se nos indicará el RSSI, SNR y el error de frecuencia con la que llega la información. Además se nos mostrará los datos adquiridos por el registrador de datos como el nivel de agua y su estado, la temperatura y humedad, y la fecha y hora completa en la que se adquirió la información. En las Figuras C.8 y C.9 se muestra dicha información.

```
****PARÁMETROS DE RECEPCIÓN****

RSSI:   -93
dBm
SNR:    8.50 dB
Error de frecuencia:  -410.39 Hz

RECIBIR OK!

DATOS ESTACIÓN LIMNIMÉTRICA:

Fecha: 17/3/2019
Hora: 17:0:44
Temperatura(°C):  20.60
Humedad(%):  49.50
Nivel(V):  0.00
Estado Agua: Bajo
```

Figura C.8: Recepción de datos - nodo receptor (Sensor Limnigráfico desconectado).

```
****PARÁMETROS DE RECEPCIÓN****

RSSI:   -97
dBm
SNR:    8.25 dB
Error de frecuencia:  -542.77 Hz

RECIBIR OK!

DATOS ESTACIÓN LIMNIMÉTRICA:

Fecha: 17/3/2019
Hora: 17:0:19
Temperatura(°C):  20.60
Humedad(%):  49.30
Nivel(V):  0.80
Estado Agua: Medio
```

Figura C.9: Recepción de datos - nodo receptor.



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

Apéndice D

Diseño de la placa PCB

D.1. Diseño PCB

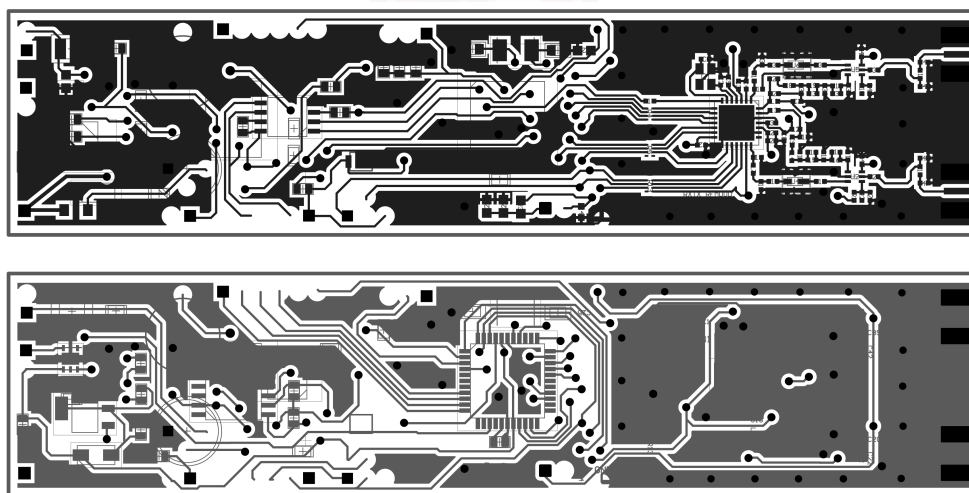


Figura D.1: Aspecto final PCB registrador de datos, vista superior e inferior.

D.2. Montaje de componentes en PCB

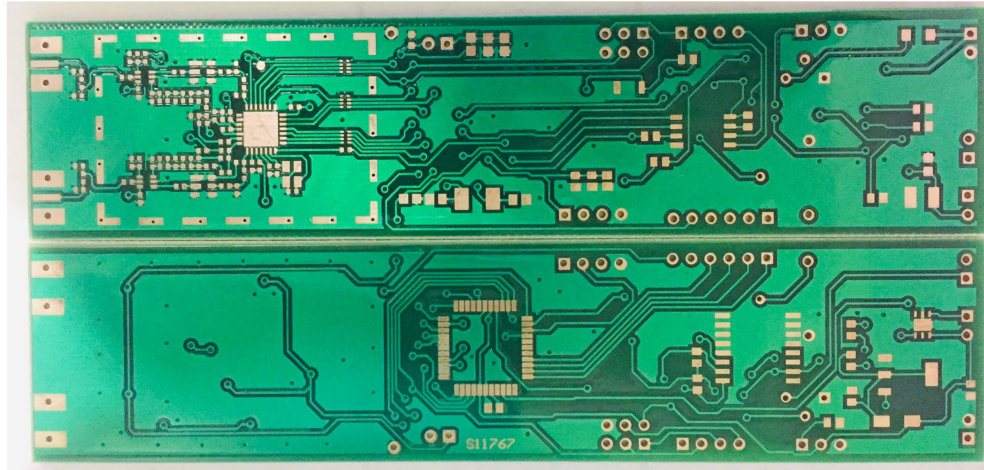


Figura D.2: Aspecto final PCB registrador de datos sin soldar componentes, vista superior e inferior.

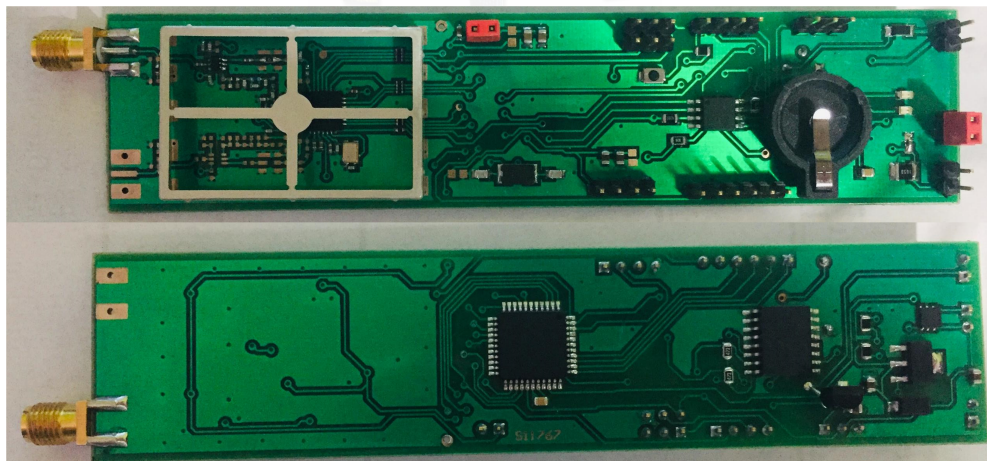


Figura D.3: Aspecto final PCB registrador de datos con componentes de montaje superficial, vista superior e inferior.



Bibliografía

- [1] Dirección de investigación DIUC, “Aplicación de Tecnologías Inalámbricas al Monitoreo Climatológico en la Cuenca del Río Paute,” Tech. Rep.
- [2] Guaman, Jhonny; Astudillo, Fabian; Vazquez, Andres; Minchala, Luis I. and Placencia, Sebastian, “Water Level Monitoring System Based on LoPy4 Microcontroller with LoRa technology,” 2018.
- [3] M. P. Gutama Morocho y J. J. Vázquez Patiño, “Prototipo de un dispositivo de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos meteorológicos usando los transductores de la estación DAVIS 6162 Wireless Vantage Pro2 Plus,” 2017.
- [4] Sigfox, “Sigfox.” [En línea]. Disponible: <https://www.sigfox.com/en>
- [5] LoRa, “LoRa Alliance.” [En línea]. Disponible: <https://lora-alliance.org/>
- [6] S. Urrego y M. Mallen, “Establecer la asociación existente entre las variables meteorológicas temperatura, velocidad del viento y precipitación y la concentración de PM10 registradas en la red de calidad del aire de Bogotá DC,” 2006.
- [7] O. M. Mundial, “Predicción meteorológica | WMO for Youth.”
- [8] Isaac Maldonado I & René Aravena, “Redes de Estaciones Meteorológicas Automáticas y sus aplicaciones productivas.” [En línea]. Disponible: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR34381.pdf>
- [9] J. O. A. Isaac Maldonado I, “Estaciones Meteorológicas Automáticas,” 2010.
- [10] EMAS, “Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS).” [En línea]. Disponible: <https://smn.cna.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- [11] Jonathan Valvano, “Sistemas Embebidos (ES), Controladores industriales de diseño de alto nivel.” [En línea]. Disponible: http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE5_3_1.pdf



- [12] Contexto2Lili, “Sistemas embebidos basados en microcontroladores,” 2016. [En línea]. Disponible: <http://contexto2lili.blogspot.es/1464560551/sistemas-embebidos-basados-en-microcontroladores-fecha-08-03-2016/>
- [13] F. E. Valdés Pérez y R. Pallás Areny, *Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC*.
- [14] Techopedia, “Banda de Radio Industrial, Científica y Médica (Banda ISM).” [En línea]. Disponible: <https://www.techopedia.com/definition/27785/industrial-scientific-and-medical-radio-band-ism-band>
- [15] D-Robotics UK, “DHT11 Humidity & Temperature Sensor,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <https://www.micro4you.com/files/sensor/DHT11.pdf>
- [16] Global Water, “Sensor de nivel de agua WL400.” [En línea]. Disponible: <http://www.globalw.com/products/levelsensor.html>
- [17] Danilo Mejía, “Diseño e implementación de un dispositivo para la adquisición de datos meteorológicos y conectividad IP que se integre con la red de datos de SENAGUA en la cuenca del río Santa Bárbara,” Ph.D. dissertation, 2016.
- [18] Luis Llamas, “El Bus SPI en Arduino.” [En línea]. Disponible: <https://www.luisllamas.es/arduino-spi/>
- [19] J.-P. Bardyn, T. Melly, O. Seller, y N. Sorni, “IoT : The Era of LPWAN is starting now,” *European Solid-State*, 2016. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/{%}0A7598235/>
- [20] Paul Pickering, “LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance.” [En línea]. Disponible: <https://www.digikey.es/es/articles/techzone/2017/jun/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>
- [21] Semtech, “LoRa™ Modulation Basics.” [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
- [22] J. V. & U. R. Martin Bor, “LoRa for the Internet of Things,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: http://eprints.lancs.ac.uk/77615/1/MadCom2016_LoRa_MAC.pdf
- [23] P. C. R, *Introduction to Electromagnetic compatibility. Second Edition*.
- [24] Y. J. Ko, J. Y. Park y J. U. Bu, “Integrated 3-bit RF MEMS phase shifter with constant phase shift for active phased array antennas in satellite broadcasting systems,” 2003.
- [25] Gustavo Ariel Merletti, “Circuitos para aplicaciones en Radiofrecuencia y Microondas,” 2016.



- [26] National Electrical Manufacturers Association, “Degrees of Protection Provided by Enclosures (ANSI/IEC 60529),” Tech. Rep., 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.nema.org/Standards/ComplimentaryDocuments/ANSI-IEC-60529.pdf>
- [27] E.& Omerdic®, “Development and integration of a novel IP66 Force Feedback Joystick for offshore operations. In Control and Automation (MED), 2014 22nd Mediterranean Conference of(pp. 664-669). IEEE.”
- [28] O. M. Mundial, “Los organismos especializados.” [En línea]. Disponible: <http://www.un.org/es/aboutun/uninbrief/institutions.shtml>
- [29] Semtech, “SEMTECH LoRa SX1272/73. (Datasheet),” Tech. Rep., 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/uploads/documents/SX1272{ }DS{ }V4.pdf>
- [30] Edison Tintín Durán, “Diseño y elaboración de un prototipo de monitos de signos vitales aplicando métodos no invasivos con comunicación de datos a dispositivos móviles.” [En línea]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7982/1/UPS-CT004847.pdf>
- [31] Semtech, “SEMTECH LoRa SX1276/77/78/79. (Datasheet),” Tech. Rep., 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/uploads/documents/DS{ }SX1276-7-8-9{ }W{ }APP{ }V6.pdf>
- [32] J. G. Darwin Astudillo, “Diseño del datalogger para la estación limnimétrica. Reporte Técnico Núm. DEET-PWSN-2017-12,” Tech. Rep.
- [33] Maxim Integrated, “Real time clock DS3231 datasheet,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>
- [34] Yonier Nañez, “Ingeniería en Microcontroladores, Protocolo SPI (Interfaz Periférica Serial).” [En línea]. Disponible: https://www.academia.edu/5249761/INGENIERIA_EN_ICROCONTROLADORES_Protocolo_SPI_Serial_Peripheral_Interface_
- [35] Andrea Granada Orozco, “Software libre,” 2014. [En línea]. Disponible: <https://es.slideshare.net/AndreaGranada/importancia-del-software-libre>
- [36] Arduino, “IDE de Arduino.” [En línea]. Disponible: <https://www.arduino.cc/en/main/software>
- [37] H. W. Ott, “Partitioning and Layout of a Mixed-Signal PCB,” 2001. [En línea]. Disponible: http://www.hottconsultants.com/pdf_files/june2001pcd_mixedsignal.pdf
- [38] J. M García, “Fabricación de circuitos impresos.”
- [39] Texas Instruments, “System design guidelines for the tm4c129x family of tiva™ c series microcontrollers.” [En línea]. Disponible: <http://www.ti.com/lit/an/spma056/spma056.pdf>



- [40] STMicroelectronics, “MCU de potencia ultra baja STM32L053R8.” [En línea]. Disponible: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32l053r8.html>
- [41] ATMEL, “ATmega328.” [En línea]. Disponible: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328>
- [42] Microchip, “ATmega1284,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega1284>
- [43] Texas Instruments, “Kit de desarrollo ADP LaunchPad™ de alta precisión SimpleLink™ MSP432P401R,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <http://www.ti.com/tool/MSP-EXP432P401R>
- [44] Microchip, “PIC32MX340F512H,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC32MX340F512H{#}additional-features>
- [45] ATMEL, “Datasheet, ATmega48/88/168/328,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/ATMega328.pdf>
- [46] Semtech, “Semtech SX1276, 100 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver.” [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/SX1276>
- [47] Winbond, “W25Q128JV serial flash memory,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <https://www.winbond.com/resource-files/w25q128jvspirevc11162016.pdf>