



# POSGRADOS

## MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN, MENCIÓN INFORMÁTICA INDUSTRIAL

RPC-SO-30-NO.507 -2019

OPCIÓN DE TITULACIÓN:  
PROYECTOS DE DESARROLLO

TEMA:  
DESARROLLO DE UN SISTEMA DE  
COMUNICACIÓN INALÁMBRICO  
BASADO EN TECNOLOGÍA LORA  
PARA EL SENSADO REMOTO DE  
VARIABLES ELÉCTRICAS

AUTOR(ES)  
JOSÉ LUIS VARGAS PEREZ

DIRECTOR:  
JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO

CUENCA – ECUADOR  
2022

**Autor:**



**José Luis Vargas Pérez**

Ingeniero Electrónico.

Candidato a Magíster en Electrónica y Automatización,  
Mención en Informática Industrial por la Universidad  
Politécnica Salesiana - Sede Cuenca.

[jvargasp@est.ups.edu.ec](mailto:jvargasp@est.ups.edu.ec)

**Dirigido por:**



**José Manuel Aller Castro**

Ingeniero Electricista.

Doctor Ingeniero Industrial (Programa Sistemas de Energía  
Eléctrica).

[jaller@ups.edu.ec](mailto:jaller@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

JOSÉ LUIS VARGAS PÉREZ

Desarrollo de un sistema de comunicación inalámbrico basado en tecnología LORA para el sensado remoto de variables eléctricas

# Índice general

Índice de Figuras	7
Índice de Tablas	9
Resumen	10
Abstract	10
1. Introducción	1
1.1. Descripción general del problema	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Contribuciones	4
1.4. Organización del manuscrito	4
2. Estado actual de la tecnología	5
2.1. Tecnología LoRa	6
2.1.1. Técnica de modulación spread spectrum	7
2.1.2. Alcances y tasas de transmisión	7
2.1.3. Aplicaciones	8
2.2. Adquisición de variables eléctricas	9
2.2.1. Convertidores A/D	10
2.2.2. Aislamiento galvánico	11
3. Sistema de transmisión propuesto	14
3.1. Módulos del Sistema de Transmisión	15
3.1.1. Módulo SX1272MB2DAS	16
3.1.2. Tarjeta de adquisición	18
3.1.3. Tarjeta Arduino	19
3.2. Tarjeta PCB desarrollada	21

## ÍNDICE GENERAL

6

3.2.1. Tarjeta de sensores y adquisición de Datos . . . . .	22
3.2.2. Tarjeta de Recepción de Datos. . . . .	22
3.2.3. Tarjeta de módulo Lora. . . . .	22
3.2.4. Tarjetas de Sensores . . . . .	23
3.3. Descripción de las pruebas experimentales . . . . .	23
3.3.1. Escenario 1 . . . . .	28
3.3.2. Escenario 2 . . . . .	30
3.3.3. Escenario 3 . . . . .	30
3.3.4. Escenario 4 . . . . .	32
3.3.5. Pruebas de adquisición de Datos . . . . .	33
3.3.6. Pruebas de implementación del sistema . . . . .	34
4. Análisis de resultados y discusión . . . . .	44
4.1. Análisis de pruebas de transmisión. . . . .	45
5. Conclusiones y Recomendaciones . . . . .	49
5.1. Conclusiones . . . . .	49
5.2. Recomendaciones . . . . .	50

# Índice de Figuras

2.1. Proceso de Conversión . . . . .	10
2.2. Transformador de Aislamiento . . . . .	12
2.3. Condensador de Aislamiento . . . . .	12
2.4. Circuito Típico con Opto-acoplador . . . . .	13
3.1. diagrama de sistema de transmisión . . . . .	15
3.2. módulo embebido Lora . . . . .	17
3.3. sensor de voltaje. . . . .	19
3.4. sensor de voltaje. . . . .	19
3.5. bloque de diagrama funcional [1]. . . . .	20
3.6. bloque de diagrama PinOut . . . . .	21
3.7. Diagrama esquemático . . . . .	23
3.8. PCB . . . . .	24
3.9. Diagrama esquemático . . . . .	25
3.10. PCB . . . . .	26
3.11. Diagrama esquemático . . . . .	27
3.12. PCB . . . . .	28
3.13. Diagrama esquemático . . . . .	29
3.14. PCB . . . . .	30
3.15. Comportamiento RSSI . . . . .	31
3.16. Comportamiento SNR . . . . .	32
3.17. Comportamiento Error de Frecuencia . . . . .	33
3.18. Comportamiento RSSI . . . . .	34
3.19. Comportamiento SNR . . . . .	35
3.20. Comportamiento Error de Frecuencia . . . . .	36
3.21. Comportamiento RSSI . . . . .	36
3.22. Comportamiento SNR. . . . .	37
3.23. Comportamiento Error de Frecuencia. . . . .	37
3.24. Datos errados. . . . .	38
3.25. Datos erróneos error de CRC. . . . .	39
3.26. Datos de adquisición AD7606. . . . .	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

8

3.27. PCB de adquisición y transmisión de datos. . . . .	40
3.28. PCB de recepción de datos. . . . .	41
3.29. PCB de base para módulo LoRa. . . . .	41
3.30. pruebas de medición, transmisión y recepción. . . . .	42
3.31. pruebas de medición, transmisión y recepción. . . . .	43
3.32. pruebas de medición, transmisión y recepción. . . . .	43
4.1. Valor de Data Rate en transmisión de Datos. . . . .	47

# Índice de Tablas

3.1. Tabla de conexión de pines de módulo. . . . .	18
4.1. Valores promedio de trabajo del módulo LoRa. . . . .	45
4.2. Valores promedio de trabajo del módulo LoRa. . . . .	46

# Resumen

En este proyecto se implementa un sistema de comunicación inalámbrica, utilizando la tecnología LoRa para sensar de manera remota variables eléctricas.

El sistema está conformado por una tarjeta de adquisición y transmisión de datos y una tarjeta para recibir los datos y visualizarlos.

Al inicio se define algunos conceptos de cada uno de los dispositivos y módulos, la tecnología existente, alguna de las aplicaciones, y el funcionamiento de los transmisores LoRa.

Se detalla los elementos que serán parte de la implementación del sistema de comunicación, voltajes de alimentación que debe garantizar el correcto funcionamiento de cada módulo, voltajes de trabajo de cada dispositivo, para acoplarlo a cada una de las etapas de sensado, adquisición, procesamiento y transmisión. La segunda etapa está compuesta por un módulo receptor y un microcontrolador para procesa los datos para ser visualizados.

Una vez definido los dispositivos y realizado pruebas se proceden a diseñar los diferentes diagramas y circuitos PCB para cada etapa, las pruebas consisten en transmisión de datos y lectura de los dispositivos de adquisición de señales a través de los sensores y el ADC. Luego por medio de un sistema microprocesador y haciendo uso de la interfaz SPI se enlace cada etapa.

Finalmente, se realizan varias pruebas para demostrar la transmisión de los datos, se obtienen varias muestras para el análisis, con todas las etapas trabajando de manera satisfactoria, se realiza una serie de conclusiones y recomendaciones que hacen referencia a futuras aplicaciones de este sistema.

# Abstract

A wireless communication system is implemented in this project, using LoRa technology to remotely sense electrical variables.

The system is made up of a data acquisition and transmission card and a card to receive and display data.

At the beginning, some concepts of each of the devices and modules, the existing technology, some of the applications, and the operation of the LoRa transmitters are defined.

The elements that will be part of the implementation of the communication system are detailed, supply voltages that must guarantee the correct operation of each module, working voltages of each device, to couple it to each of the stages of sensing, acquisition, processing and transmission. The second stage is composed of a receiver module and a microcontroller to process the data to be displayed.

Once the devices have been defined and tests have been carried out, the different diagrams and PCB circuits are designed for each stage. The tests consist of data transmission and reading of the signal acquisition devices through the sensors and the ADC. Then, by means of a microprocessor system and using the SPI interface, each stage is linked.

Finally, several tests are carried out to demonstrate the transmission of the data, several samples are obtained for analysis, with all the stages working satisfactorily, a series of conclusions and recommendations are made that refer to future applications of this system.

# Capítulo 1

## Introducción

El grupo de investigación en energías (GIE) de la Universidad Politécnica Salesiana ha tenido dentro de sus áreas de investigación y desarrollo el diseño de tarjetas de adquisición de corriente y tensión con aislamiento galvánico entre el circuito primario y secundario, lo cual garantiza una operación segura de la etapa de conversión analógica-digital y la posterior etapa de procesamiento de las señales adquiridas. Mientras que en las aplicaciones de control de inversores, las tarjetas de adquisición y de control están muy cercanas entre sí, existen otras aplicaciones donde se requiere enviar a distintas distancias la información adquirida. Ejemplo de esto son paneles solares que se encuentren alejados de las tarjetas de procesamiento y control a distancias en el orden de los cientos de metros. Esta situación puede darse, entre otros casos, dentro del campus de la Universidad, donde los paneles y los equipos de procesamiento se encuentran instalados en edificios distintos. Un caso más extremo es aquel en el que se desea supervisar las variables de corriente y tensión de una instalación que se encuentre dentro de un radio de algunos kilómetros. En trabajos pasados dentro del GIE se ha analizado la tecnología Bluetooth como medio de transmisión de variables adquiridas, la cual por sus características típicas pudo ser operada como máximo para distancias de hasta 100 metros con tasas de transmisión relativamente bajas [2]. Respecto a las técnicas de medición de variables eléctricas en modo aislado existen actualmente tres grandes familias de sensores electrónicos [3].

- Basados en efecto Hall
- Basados en opto-acoplamiento
- Basados en acoplamiento capacitivo

Las tres tecnologías tienen la ventaja de poder medir magnitudes continuas, lo cual no es posible con sensores de tipo transformador con acoplamiento electromagnético, lo que ha hecho que se estén ubicando dentro de las preferidas al momento de nuevos diseños [4]. Otra ventaja de los sensores electrónicos es que pueden tener anchos de banda superiores a los de un transformador de aislamiento, permitiendo capturar con mayor detalle las características de los transitorios de corriente y/o tensión. La amplia variedad de sensores comerciales actualmente existente, obliga a un estudio detallado de características tales como: precisión, rangos de operación, ancho de banda, inmunidad al ruido, dependencia de la temperatura, etc., antes de decidir qué modelo utilizar para un diseño específico.

## 1.1. Descripción general del problema

La tecnología LoRa ha experimentado una rápida aceptación en aplicaciones de comunicación a distancias de algunos pocos kilómetros, debido a su bajo costo respecto a otras opciones, la reducida potencia que consume y su relativa facilidad de operación. En el marco de las actividades del GIE se ha planteado la necesidad de experimentar con este tipo de enlace inalámbrico para dar respuesta a problemáticas de la vida real, tales como la supervisión de arreglos de paneles solares, medición de variables atmosféricas (irradiancia, temperatura, etc.), adquisición de datos en subestaciones de distribución dentro del radio urbano, entre otras.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de medición aislado de corriente y tensión con interfaz inalámbrica basada en la técnica de modulación LoRa que permita transmisión en tiempo real de la información adquirida.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar las tecnologías más apropiadas para la medición aislada de corrientes y tensiones.
- Analizar las distancias de enlace entre los puntos de emisión y recepción y sus tasas de transmisión para distintas distancias y considerando la presencia de obstáculos.
- Analizar los costos de la implementación con diferentes opciones circuitales.
- Diseñar los circuitos de los bloques que componen el sistema de enlace de datos y realizar la prueba general del sistema.

### 1.3. Contribuciones

El presente trabajo aporta una introducción en el estudio novedoso en el mundo IOT de los sistemas LoRa aplicados a la transmisión de datos con bajo consumo de energía, se monitorean sistemas eléctricos que, combinados con otros dispositivos de adquisición de datos, se manejan variables de voltajes y corrientes, por medio de transductores de efecto Hall que proporcionan un aislamiento a las altas tensiones. Este ofrece una comunicación a lugares donde las redes de internet no son accesibles, colocando sensores para recoger variables y transportarlas a una base donde se pueda procesar los valores. Se ha realizado la implementación de este sistema que será un avance para futuras investigaciones.

### 1.4. Organización del manuscrito

En el Capítulo 2 se presentan los principios de la tecnología LoRa, así como el manejo de las variables y los dispositivos de adquisición relaciona con las aplicaciones. En el Capítulo 3 se describen los diferentes componentes utilizados para este proyecto, principales características, los diseños de los circuitos para las placas PCB y se describe las prueba realizadas. En el Capítulo 4 se hace realizan los análisis de los resultados obtenidos en las pruebas, para culminar con el Capitulo 5 donde se redacta las conclusiones y recomendaciones.

## Capítulo 2

# Estado actual de la tecnología

A lo largo de este capítulo se describen los diferentes dispositivos con tecnología LoRa, su avance tecnológico, el tipo de modulación que utilizan, el alcance de estos dispositivos, las tasas de transmisión dependiendo de cada modelo y las distintas aplicaciones en que pueden ser utilizados. También se realiza una revisión del método de adquisición de variables eléctricas, los tipos de convertidores A/D y la medición de variables eléctricas con transductores de aislamiento galvánico.

## 2.1. Tecnología LoRa

A medida que ha evolucionado la tecnología en las comunicaciones y el Internet de las cosas (IoT), se han integrado nuevos dispositivos para transmitir datos que contemplan el bajo consumo y la operación a larga distancia, permitiendo aplicaciones con características y capacidades inteligentes.

Los dispositivos LoRa permiten este tipo de aplicaciones en la comunicación inalámbrica a larga distancia. El interés de la industria por las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) está aumentando gradualmente. Al mismo tiempo, varios proveedores de tecnología de la competencia están impulsando sus productos en los mercados globales [5].

En el corazón del éxito de LoRa se encuentra su tecnología de modulación de chirrido de tasa de datos adaptativa que permite una comunicación flexible de largo alcance con un bajo consumo de energía y un diseño de bajo costo. Esencialmente, esto se logra a través de técnicas de acceso múltiple de espectro ensanchado que acomodan múltiples usuarios en un canal. LoRa Alliance ha definido las capas superiores y la arquitectura de red sobre las capas físicas de LoRa y las ha denominado LoRaWAN [6].

LoRa es un derivado de la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS) con corrección de errores de reenvío (FEC) integrada. LoRa utiliza bandas ISM inferiores a un GHz en Europa y América del Norte y su naturaleza de banda ancha permite que LoRa compense mejor una baja relación señal/ruido (SNR). Esto permite que LoRa demodule las señales incluso cuando están 19,5 dB por debajo del nivel mínimo de ruido. CSS permite un rango de comunicación más largo que la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) sin un aumento en el consumo de energía [7].

### 2.1.1. Técnica de modulación spread spectrum

El espectro ensanchado es la plataforma principal disponible para LoRAWAN. Las investigaciones se están enfocando en esta tecnología porque ha sido incorporada en el estándar IEEE 802.15, CSS se utiliza especialmente en el sistema RADAR. CSS es un dispositivo robusto, tiene un rendimiento alto, con disipación de potencia muy baja, pequeño retraso de respuesta y baja resistencia de ruta [8].

Es utilizado para transmitir señales de radio. El término se refiere a la práctica de difundir la señal transmitida para que ocupe el espectro de frecuencia disponible para la transmisión [9].

Bajo este concepto, se ha definido que “El espectro ensanchado es un medio de transmisión en el que la señal ocupa un ancho de banda superior al mínimo necesario para enviar la información; el ensanchamiento de banda se logra por medio de un código que es independiente de los datos, y se utiliza una recepción sincronizada con el código en el receptor para el des-ensanchamiento y posterior recuperación de datos” [10].

### 2.1.2. Alcances y tasas de transmisión

LoRa utiliza bandas ISM inferiores a 1.0 GHz en Europa y América del Norte. Su naturaleza de banda ancha le permite compensar mejor una baja relación señal/ruido (SNR). Esto permite que LoRa demodule señales incluso cuando están 19,5 dB por debajo del ruido de fondo. CSS permite un rango de comunicación más largo que la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) sin un aumento en el consumo de energía [7].

En el trabajo de investigación [11], se realizan pruebas de alcance para obtener la mejor configuración y los principales parámetros luego de las pruebas de comunicación. Según estas pruebas se observa que mientras menor sea el ancho de banda BW, el tiempo de comunicación será mayor, teniendo en

cuenta que la frecuencia es inversamente proporcional al tiempo. Sin embargo, el alcance es mayor. El factor de alcance o SF determina el rendimiento en la transmisión de datos. Si este valor es mayor, el dispositivo tendrá menos probabilidad de recibir datos corrompidos.

También se define la tasa de codificación de errores CR, que asegura una buena transmisión de los datos. Si el CR es mayor, será más fiable la comunicación. Esto implica una sobrecarga de tiempo. Con una configuración favorable se obtiene un mayor tiempo de transmisión y consumo de energía.

En [5] se estudian mediciones de cobertura y alcance de los módulos, de manera móvil, con características de factor de dispersión máximo, con una potencia fija de 14dbm, teniendo como resultados un 80 % de éxito en la entrega de paquetes a una distancia de 5 km, más de 60 % en una distancia de 5 a 10 km y a más de 10 km los paquetes se perdían en su mayoría.

### 2.1.3. Aplicaciones

Dentro de las aplicaciones la comunicación de datos por medio de los dispositivos LoRa, se han ido enfocando al Internet de las cosas (IOT). Internet of Thing (IoT) se han convertido en el principal objetivo de la implementación de LoRa debido a su especificación de comunicación de largo alcance y baja potencia. Además, el algoritmo de velocidad de datos adaptable de la tecnología LoRa ayuda a maximizar la duración de la batería y la capacidad de la red del nodo. En general, LoRa es beneficioso para el sistema IoT que requiere comunicación a larga distancia en comparación con protocolos de corto alcance como Wi-Fi y Bluetooth, aunque existen algunas desventajas en la velocidad de transmisión y limitación en el tamaño de la carga útil [12].

El uso de los dispositivos LoRa en aplicaciones subterráneas para transmitir mediciones de sensores se está convirtiendo en un área de investigación activa en agro-informática.

Utilizando el espectro ensanchado, para detectar por medio de sensores toxinas que se puede filtrar en el suelo subterráneo agrícolas que vienen desde sectores industriales y agua pluviales.

Los sensores son enterrados a una profundidad no mayor a los 50 cm para no atenuar la señal. Se experimenta con la ayuda de indicadores de la intensidad de la señal (RSSI) y la relación señal-ruido (SNR), bajo diferentes factores de dispersión LoRa, tasas de codificación y profundidades del suelo [13].

Se aplica para sistemas de hogar inteligente, puede supervisar la temperatura ambiente en tiempo real y controlar dispositivos electrónicos en luces, televisores y acondicionadores de aire. Las distancias oscilan entre 63 m para lugares con obstrucción y 183 m en lugares abiertos. Por medio de un dispositivo servidor y varios clientes, con él envió de información en mensajes que llevan las condiciones de cada dispositivo. Los datos enviados y recibidos para cada parámetro se miden e instruyen bajo el código entero y la retroalimentación del código entero enviada. Para probar la relación de comunicación en el servidor y el cliente [14].

## 2.2. Adquisición de variables eléctricas

La medición de las variables eléctricas permite tener una mejor comprensión y control de los diferentes sistemas, Se tiene los convertidores multinivel para aplicaciones de control de potencia reactiva, donde las variables deben ser acopladas para se medidas [15].

Existen sistemas donde los valores de amplitud de las variables son de valores cercanos a los milivoltios, tales como datos de vibración dados por acelerómetros [16].

La adquisición de las variables se utiliza para la supervisión de la eficiencia y la calidad de la energía en generadores de energía fotovoltaica, eólica y en

la red eléctrica. Esto tendrá influencia en la economía y la protección del medio ambiente [17].

### 2.2.1. Convertidores A/D

En la actualidad la información se transmite de manera digital, pero en el medio muchas de esas variables se encuentran de manera analógica, ya sean valores lentos de temperatura, o valores rápidos de sonido. Ahí es donde entran los convertidores Analógico-Digital (ADC) que han sido muy relevantes dentro de las aplicaciones y el procesamiento de señales. La mayoría de dispositivos microcontroladores tienen un conversor ADC. Estos son utilizados para cambiar medida de transductores analógicos a valores de medida digital binario.

El proceso de conversión implica tres etapas, tal como se muestra en la Fig. 2.1.

- Muestreo
- Cuantificación
- Codificación

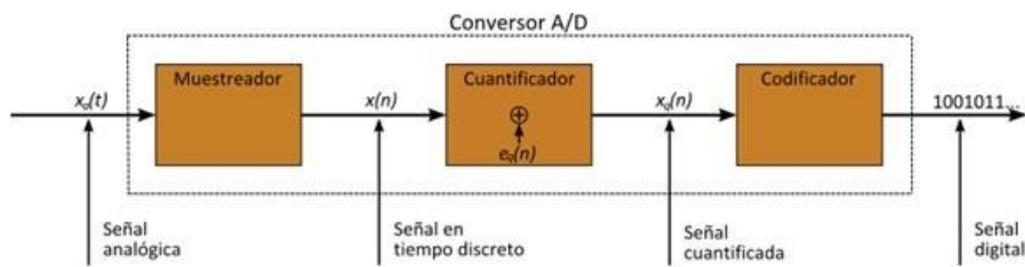


Figura 2.1: Proceso de Conversión

Entre las principales ventajas se tiene:

- No son afectados por la atenuación o contaminación debida al ruido.
- Cuentan con sistemas de detección y corrección de errores.
- Facilidad del procesamiento.

Dependiendo de la resolución, es necesario un número suficiente de niveles de cuantificación para lograr una reproducción fiel y una relación señal a ruido adecuada.

### 2.2.2. Aislamiento galvánico

Tradicionalmente el aislamiento galvánico se obtiene con soluciones de acoplamiento inductivo, capacitivo u óptico.

#### Acoplamiento Inductivo

Este se obtiene por medio de un transformador de aislamiento, tal como el que se ilustra en la Fig. 2.2. La potencia se entrega por medio de campos magnéticos entre devanados separados por aire que proporciona una alta impedancia de aislamiento de modo común [18].

#### Acoplamiento Capacitivo

En la solución basada en acoplamiento capacitivo, un par de capacitores de aislamiento o electrodos planos reemplazan el transformador, entregando la energía de modo diferencial a través de campos eléctricos a una frecuencia de resonancia alta, pero bloqueando efectivamente la corriente de modo común en la frecuencia de línea. Los condensadores que se muestran en la Fig. 2.3, son utilizados como aisladores. Suelen ser de poliéster y son muy grandes en función de su capacidad, pero son muy estables con el tiempo y la temperatura. Permiten obtener aislamientos muy altos. En cuestiones de

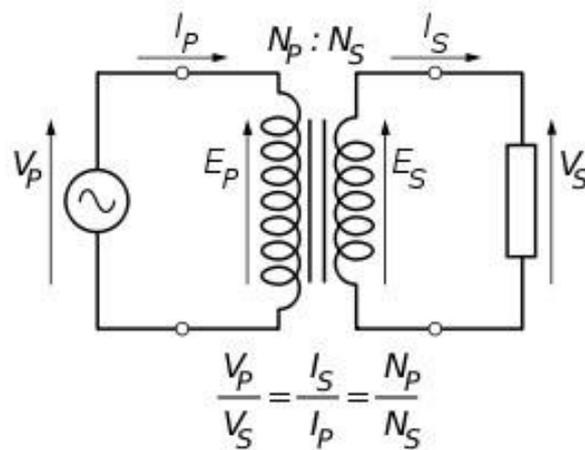


Figura 2.2: Transformador de Aislamiento

audio, se utilizan para separar las etapas de alta y baja, y permiten acoplar impedancias, etc [18].



Figura 2.3: Condensador de Aislamiento

### Acoplamiento Óptico

En la solución basada en óptica, la potencia de modo diferencial se entrega a través de luz sobre fibra óptica, donde se logra una alta impedancia de modo común. Esto se ha aplicado a la transferencia aislada de datos a través de fibra óptica y opto-acopladores como se muestra en la Fig. 2.4. Su aplicación

es habitual para producir fuentes de alimentación aisladas que alimentan controladores de compuerta de dispositivos de alto voltaje.

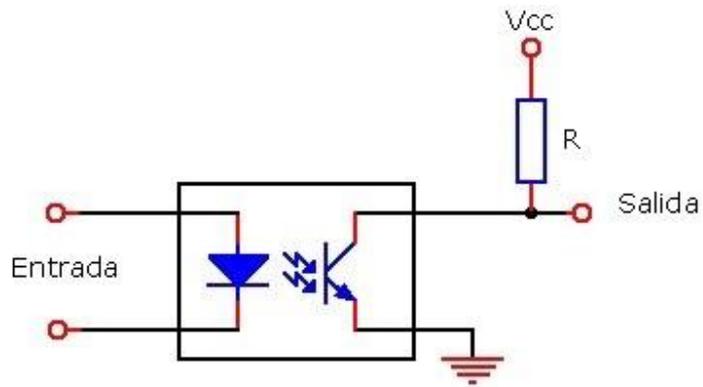


Figura 2.4: Circuito Típico con Opto-acoplador

## Capítulo 3

# Sistema de transmisión propuesto

En este capítulo se describen las características de los módulos que se utilizan para el desarrollo de la adquisición, procesamiento y transmisión de las variables eléctricas.

Se emplean módulos LoRa para la transmisión y recepción de los datos a larga distancia. Los datos son adquiridos a través de un chip ADC AD7606 y una tarjeta Arduino, que se encarga de realizar la interfaz entre el ADC y los módulos de comunicación.

### 3.1. Módulos del Sistema de Transmisión

En la Fig. 3.1 se muestra el diagrama de los bloques que componen el sistema de transmisión, conformado por el transmisor y el receptor. El transmisor se encuentra compuesto por el módulo ADC que adquiere las variables eléctricas, el módulo LoRa que se encarga del envío de los datos y el microcontrolador que procesa los datos del ADC para ser enviados hacia el receptor por medio del módulo de comunicación. Este último se comunica por medio del protocolo SPI.

El receptor cuenta con un módulo LoRa que recibe los datos, el microcontrolador que realiza su procesamiento, la tarjeta de comunicación y un sistema de visualización para observar las variables recibidas. Cada una de los sistemas cuenta con una alimentación de energía que puede ser generada por baterías o fuentes de voltaje.

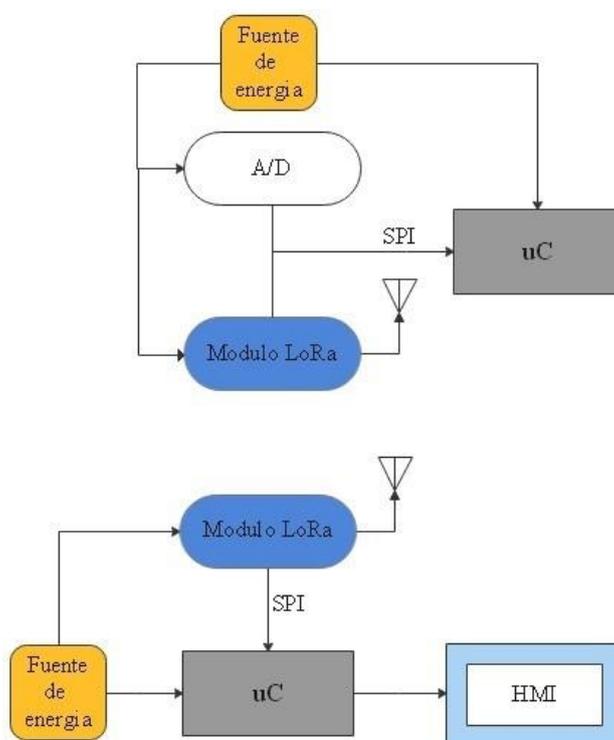


Figura 3.1: diagrama de sistema de transmisión

### 3.1.1. Módulo SX1272MB2DAS

Es un módulo transceptor de desarrollo embebido, que viene integrado en un chip LoRa SX1272, tal como se muestra en la Fig. 3.2. Proporciona una comunicación spread spectrum (Espectro ensanchado), que ofrece un largo alcance, alta inmunidad a las interferencias y de bajo consumo de corriente. Utiliza la técnica de modulación LoRa patentada por Semtech. Puede lograr una sensibilidad de más de 137 dB con un amplificador. También ofrece ventajas significativas tanto en bloqueo como en la selectividad sobre las técnicas de modulación convencionales, resolviendo el compromiso de diseño tradicional entre rango, inmunidad a interferencias y consumo de energía de potencia integrado de +20 dbm, con materiales de bajo costo [19].

El módulo se controla por medio del BUS de comunicación SPI a una velocidad máxima de 10 mbps. Este módulo está construido para ser adaptado a varias tarjetas de control y cuenta con puertos opcionales para la conexión de otros sensores.

Este módulo tiene las siguientes características:

- Fuente de alimentación: 3.3 V
- Rango de frecuencia: 860 - 1020 MHz
- Factor de Propagación: 6-12
- Ancho de Banda: 125 - 500 kHz
- Tasa de bits efectiva: 0.24 - 37.5 kbps
- Sensibilidad: -117 a -137 dBm

En la Tabla 3.1 se presenta la designación de los pines del módulo para la conexión hacia la tarjeta de control.

En [20] se describen las características que ofrece el SX1272, estas son:

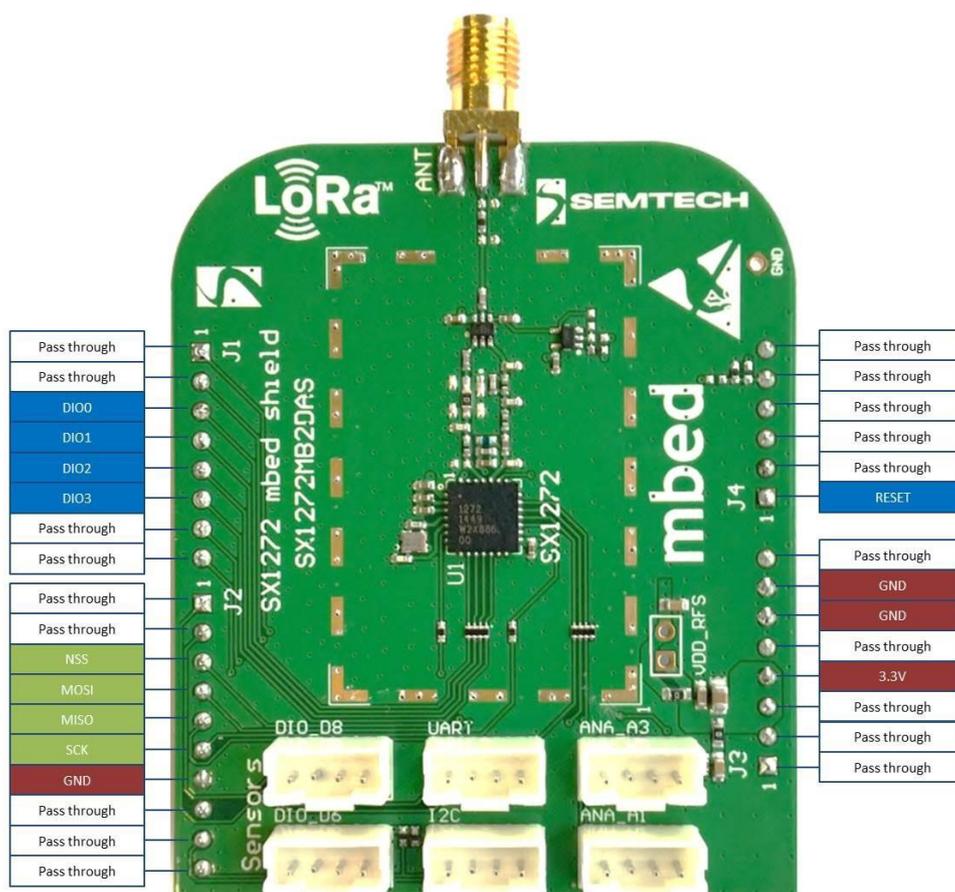


Figura 3.2: módulo embebido Lora

- +20 dBm a 100 mW de salida de RF constante.
- Tasa de bits programable hasta 300 kbps.
- Baja corriente RX de 10 mA.
- Retención de registro de 100 nA.
- Modulación FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM y OOK, RSSI de rango dinámico de 127 dB.
- Motor de paquetes de hasta 256 bytes con CRC.
- Sensor de temperatura incorporado e indicador de batería baja.

SX1272MB2xAS	MBED Pin
SCK	D13
MOSI	D11
MISO	D12
NSS	D10
DIO0	D2
DIO1	D3
DIO2	D4
DIO3	D5
NRESET	A0

Tabla 3.1: Tabla de conexión de pines de módulo.

### 3.1.2. Tarjeta de adquisición

La adquisición de datos consiste en recopilar la información proporcionada por los sensores o transductores que transforman las variables eléctricas en magnitudes que pueden ser procesadas por el sistema de control.

Para adquirir estas variables se utilizan transductores de efecto Hall que permiten obtener valores escalados de las variables medidas, proporcionando al mismo tiempo aislamiento galvánico inductivo entre las zonas de alta y baja tensión de la plataforma.

El transductor utilizado para medir voltaje es el LEM LV 20-P que se muestra en la Fig. 3.3. Tiene una configuración para medir voltajes hasta los 500 V pico.

El transductor utilizado para medir corrientes es el LEM LA 55-P que se muestra en la Fig. 3.4 Este transductor es capaz de medir corrientes hasta 50 A pico.

Los valores de las variables, aislados por los transductores, son enviados al convertidor análogo digital AD7606, que dispone de 8 canales de entrada bipolar con 200 kSPS en todos los canales y una resolución de 16 bits. Este convertidor posee comunicaciones seriales y en paralelo [1].



Figura 3.3: sensor de voltaje.

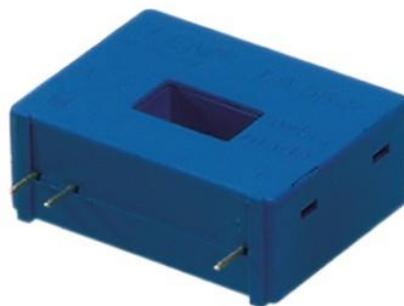


Figura 3.4: sensor de voltaje.

En la Fig. 3.5 se presenta el diagrama funcional de su estructura interna.

### 3.1.3. Tarjeta Arduino

En los sistemas electrónicos una de las tarjetas más utilizadas es la placa embebida de Arduino. En este caso se empleó la tarjeta de Arduino Nano Every.

Este módulo tiene las siguientes características:

- Operating Voltage 5 V

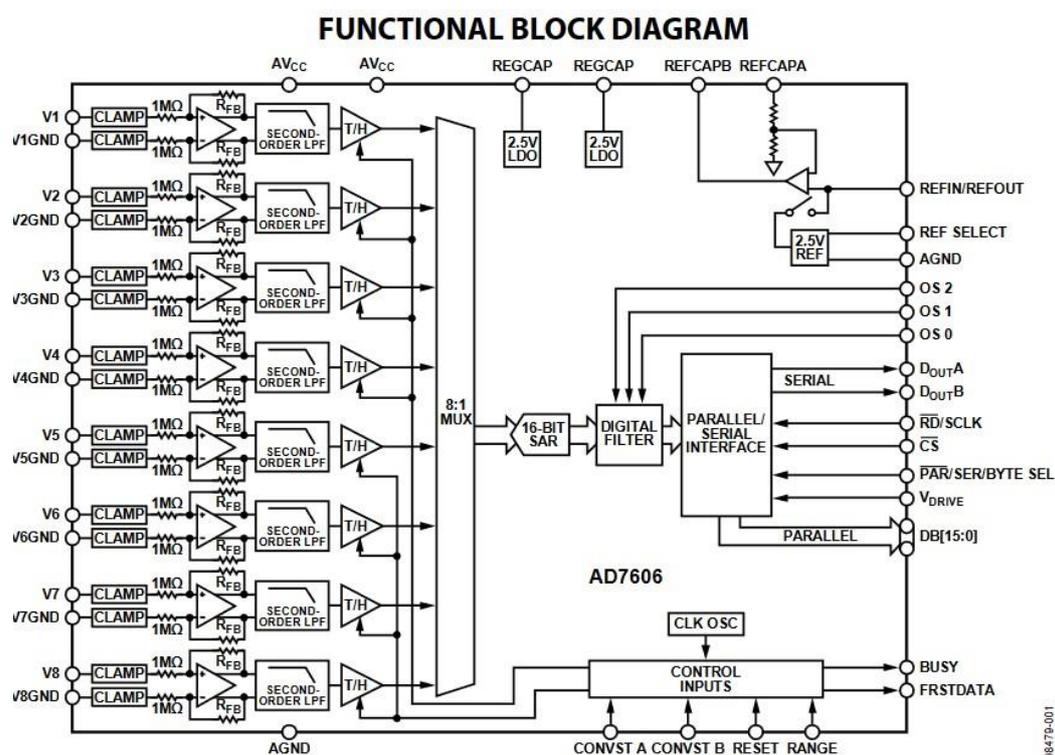


Figura 3.5: bloque de diagrama funcional [1]

- VIN min-MAX 7-21 V
- DC Current per I/O Pin 20 mA
- DC Current for 3.3 V Pin 50 mA
- Clock Speed 20 MHz
- CPU Flash Memory 48KB (ATMega4809)
- SRAM 6 KB (ATMega4809)
- EEPROM 256 bytes (ATMega4809)
- PWM Pins 5 (D3, D5, D6, D9, D10)
- UART 1
- SPI 1

- I2C 1
- Analog Input Pins 8 (ADC 10 bit)
- Analog Output Pins Only through PWM (no DAC)
- External Interrupts all digital pins
- LED BUILTIN 13

En la Fig. 3.6 se observa la disposición de los pines de entradas y salida, los pines de comunicación y de alimentación.

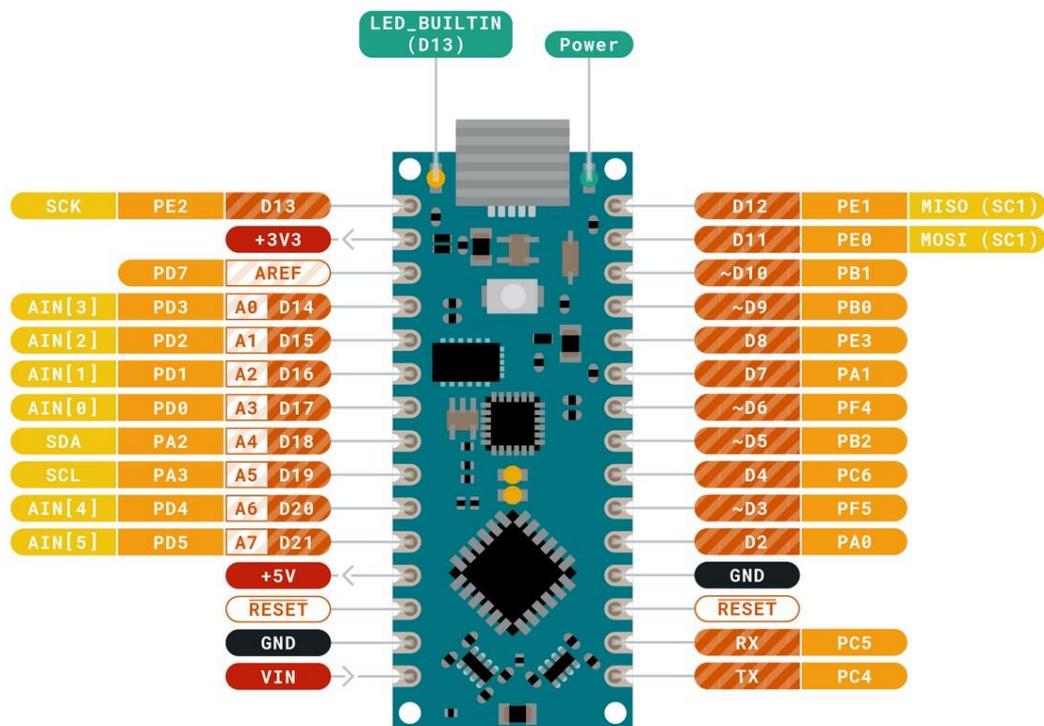


Figura 3.6: bloque de diagrama PinOut

## 3.2. Tarjeta PCB desarrollada

Para el diseño de las tarjetas se tuvieron en cuenta trabajos anteriores, como el PCB de los sensores de voltaje y corriente, la medida de la tarjeta

principal de adquisición. Con estas bases se adaptó el nuevo sistema de procesamiento y comunicación de los datos.

### 3.2.1. Tarjeta de sensores y adquisición de Datos

Esta tarjeta se diseña de manera que se pueda colocar los sensores por efecto Hall para la lectura de corriente y voltaje. Estas señales se envían al módulo AD7606 que se encarga del procesamiento y por medio de comunicación SPI, enviarlas mediante el bus de datos hacia el módulo de comunicación LoRa. También tiene un módulo conversor de nivel lógico para acoplar las señales de ADC y el módulo de comunicación que opera a 3.3 V y a 5 V, respectivamente.

Adicionalmente, en esta tarjeta se colocaron las fuentes de alimentación para cada etapa, dependiendo del suministro de voltaje requerido en AC o en DC.

En la Fig. 3.7 se puede muestra el diagrama esquemático. En la Fig. 3.8 se presenta el diseño en PCB.

### 3.2.2. Tarjeta de Recepción de Datos.

En esta tarjeta se agregaron tanto el módulo LoRa que se comunica por medio del conversor de nivel lógico al Arduino, como los respectivos reguladores de voltaje para alimentar cada etapa. La alimentación de esta tarjeta puede ser por medio una batería o mediante una fuente de 9 V, como se observa en las Figs. 3.9 y 3.10.

### 3.2.3. Tarjeta de módulo Lora.

Se realizó una tarjeta para acoplar el módulo LoRa para que se pueda transportar si es necesario. Se comunica a las otras tarjetas a través de un

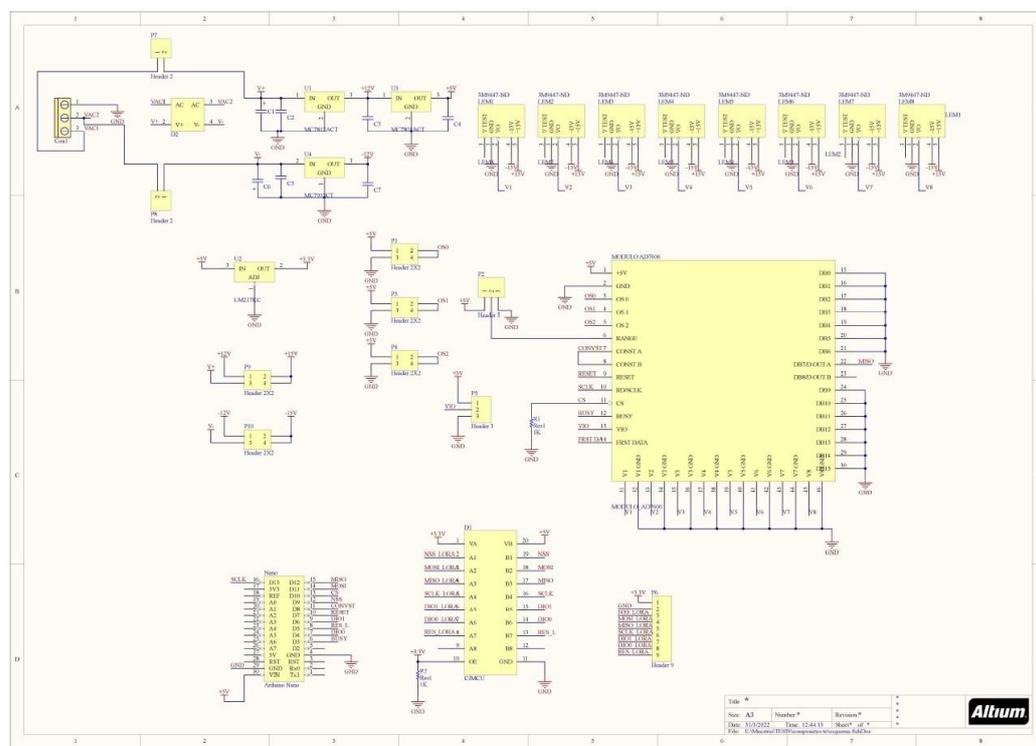


Figura 3.7: Diagrama esquemático

bus de datos, como se observa en las Figs. 3.11 y 3.12

### 3.2.4. Tarjetas de Sensores

Se diseñó una tarjeta de tamaño pequeño para colocar los sensores y acoplar a la etapa de adquisición de los datos, tal como se observa en las Figs. 3.13 y 3.14.

## 3.3. Descripción de las pruebas experimentales

Las primeras pruebas que se realizaron fueron las de comunicación de los módulos LoRa. Se debe realizar la configuración para transmitir y recibir los datos de prueba. Con la respectiva descripción de funcionamiento de

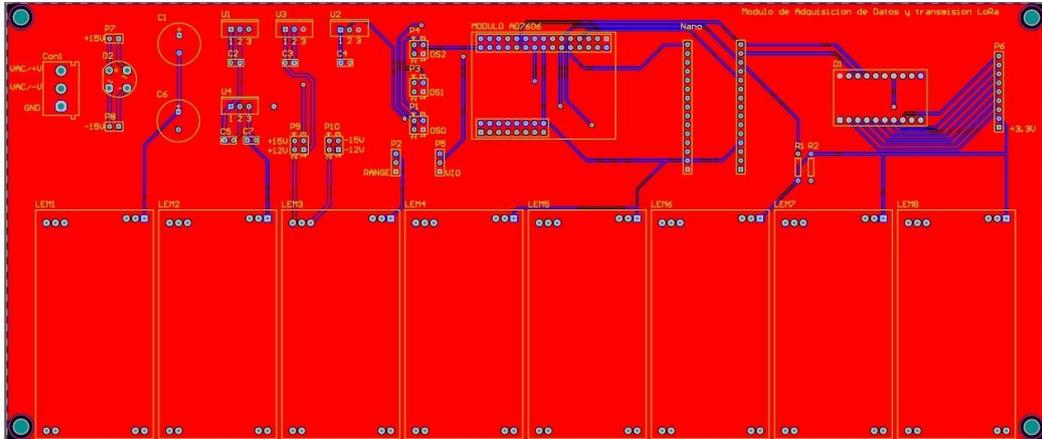


Figura 3.8: PCB

cada elemento, se realizar la programación en el microcontrolador Arduino, utilizando las librerías desarrolladas para el uso de los módulos LoRa.

Se realiza un programa donde se emplea un emisor y un receptor para él envié de un dato de un módulo hacia otro, descartando aquellas librerías que no satisfacen las necesidades del prototipo y obteniendo una que ofrezcan el mejor funcionamiento.

La librería seleccionada **falta decir el nombre de la librería** ofrece algunas configuraciones para los módulos LoRa, estos se describen a continuación:

- Frecuencia portadora en MHz. Los valores permitidos oscilan entre 860,0 MHz y 1020,0 MHz.
- Ancho de banda del enlace LoRa en kHz. Los valores permitidos son 125, 250 y 500 kHz.
- Factor de dispersión del enlace LoRa. Los valores permitidos oscilan entre 6 y 12.
- Denominador de tasa de codificación de enlace LoRa. Los valores permitidos oscilan entre 5 y 8.

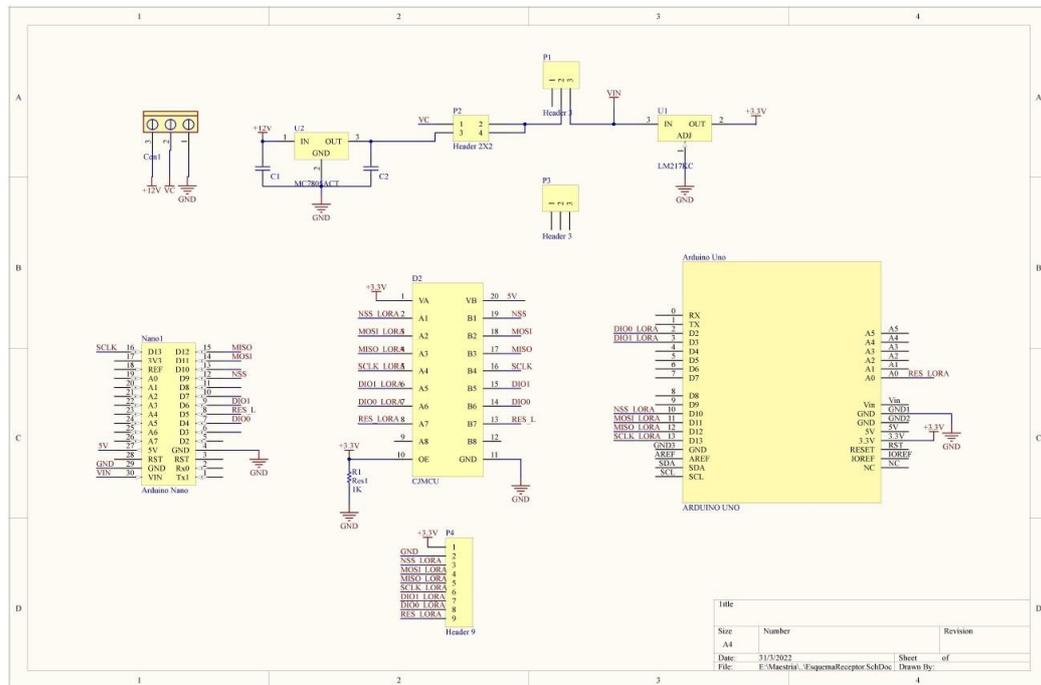


Figura 3.9: Diagrama esquemático

- Palabra de sincronización LoRa. Se puede utilizar para distinguir diferentes redes. Tenga en cuenta que el valor 0x34 está reservado para redes LoRaWAN.
- Potencia de salida de transmisión en dBm. Los valores permitidos oscilan entre 2 y 20 dBm.
- Longitud del preámbulo de transmisión de LoRa en símbolos. La longitud real del preámbulo es 4,25 símbolos más larga que el número establecido. Los valores permitidos oscilan entre 6 y 65535.
- Ganancia del receptor LNA (amplificador de bajo ruido). Se puede establecer en cualquier número entero en el rango de 1 a 6, donde 1 es la ganancia más alta. Establézcalo en 0 para habilitar el control de ganancia automático (recomendado).

Para la prueba general de comunicación se realiza una secuencia de pruebas, que consiste en enviar un dato, recibirlo y replicarlo de nuevo hacia

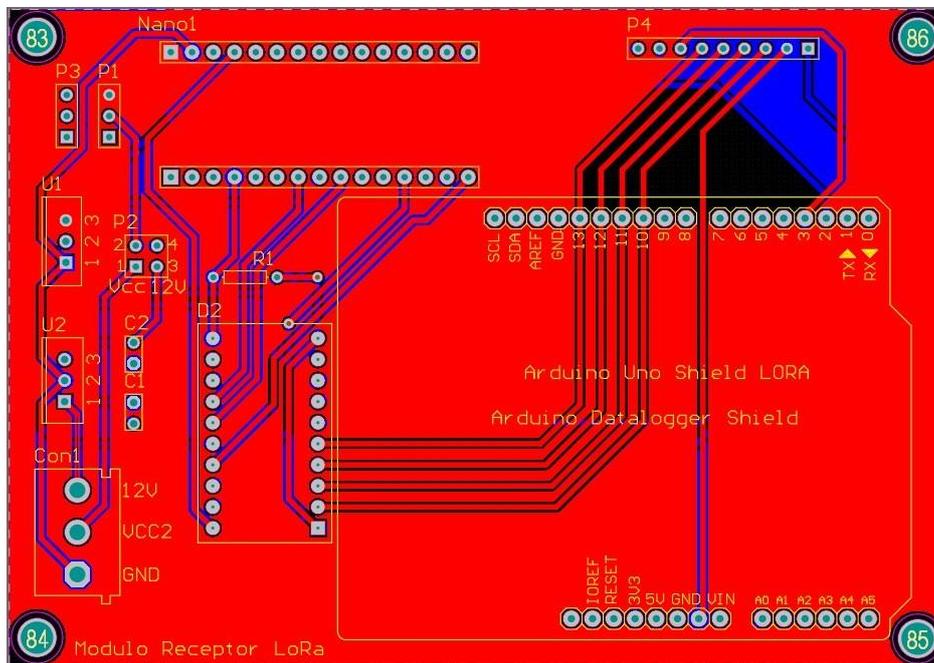


Figura 3.10: PCB

el módulo de origen. Luego de obtener el mensaje de nuevo, se muestra y se imprime algunas características de recepción.

Entre las características de envío de datos se tiene:

- RSSI que es el indicador de intensidad de señal recibida. Es el nombre para la intensidad de la señal de un entorno de red inalámbrica. El RSS se mide en dBm y es un valor negativo. Cuanto más cerca del valor cero, mejor es la señal. Los valores típicos de LoRa RSSI son:

RSSI mínimo = -120 dBm.

Si RSSI >-30dBm: la señal es fuerte.

Si RSSI <-120dBm: la señal es débil.

- SNR es la relación señal-ruido en dB.

El ruido de fondo es un problema de todas las fuentes de señales de interferencia no deseadas que pueden corromper la señal transmitida y, por lo tanto, se producirán retransmisiones.

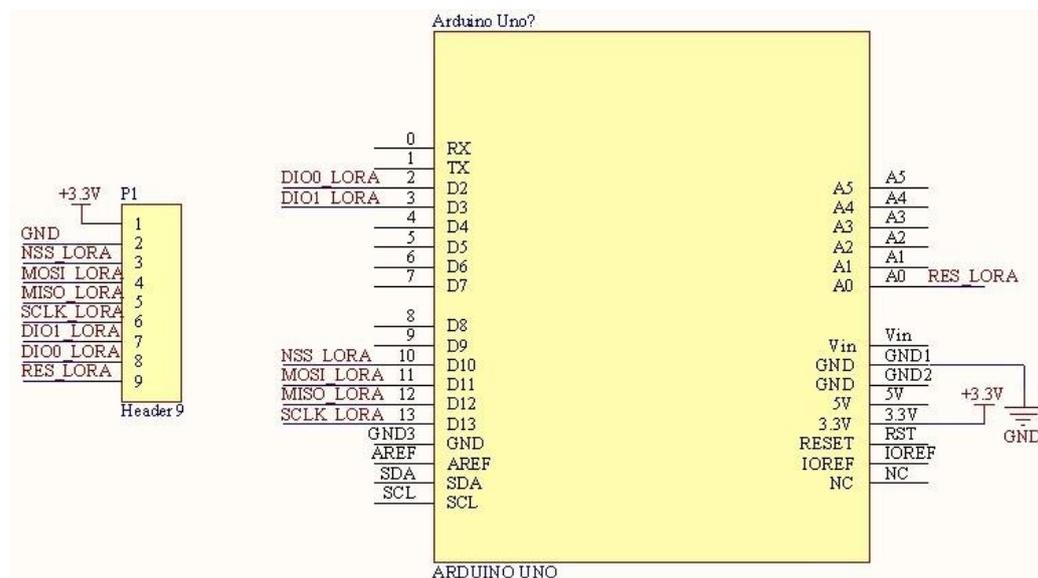


Figura 3.11: Diagrama esquemático

Si  $SRN > 0$ , la señal recibida opera por encima del ruido de fondo.

Si  $SRN < 0$ , la señal recibida opera por debajo del nivel mínimo de ruido.

Normalmente, el piso de ruido es el límite físico de sensibilidad. Sin embargo, LoRa funciona por debajo del nivel de ruido.

Los valores típicos de LoRa SNR están entre:  $-20\text{dB}$  y  $+10\text{dB}$

Un valor cercano a  $+10\text{dB}$  significa que la señal recibida está menos corrupta.

LoRa puede demodular señales que están entre  $-7,5\text{ dB}$  y  $-20\text{ dB}$  por debajo del nivel de ruido

- Error de Frecuencia: El SX1272 puede medir el desplazamiento de frecuencia entre la frecuencia central del receptor y la de una señal LoRa entrante, originado por factores en el medio ambiente, que provocan una reducción de la sensibilidad o la pérdida de paquetes de datos [19].

Dichas pruebas se hacen con distintas distancias. Se colocan los módulos

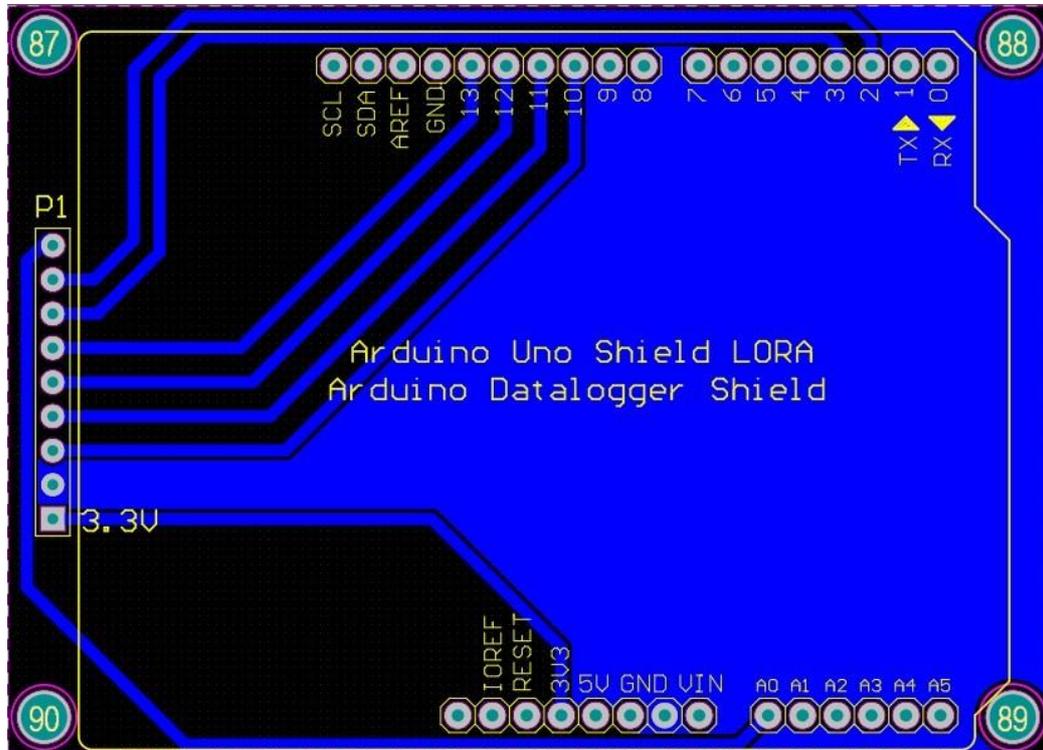


Figura 3.12: PCB

con un punto de vista y se comienza a transmitir los datos con un retardo de 5 s entre cada envío y recepción del mensaje de prueba.

### 3.3.1. Escenario 1

Para esta prueba de comunicación se colocan los módulos uno cerca de otro y se configuran con las siguientes características:

- Frecuencia 915 MHz
- Ancho de banda 125 kHz
- Factor de dispersión 9
- Denominador de tasa de codificación 7

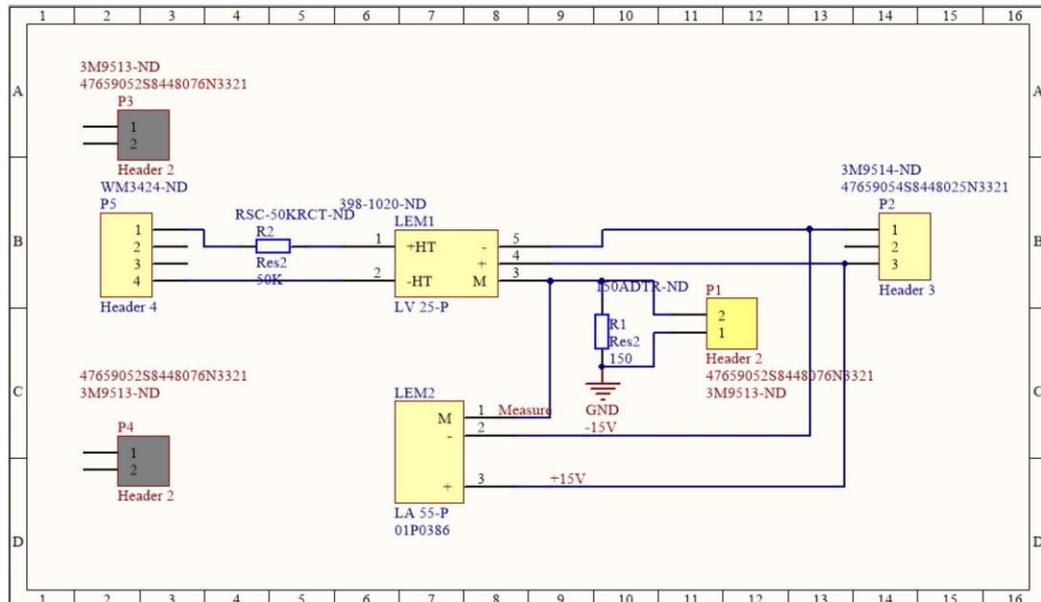


Figura 3.13: Diagrama esquemático

- Sincronizar palabra 0x34
- Potencia de salida 20
- Longitud del preámbulo 8
- Ganancia 0

Después de adquirir varias muestras, se obtienen los resultados.

En la Fig. 3.15 se puede observar la curva de comportamiento del RSSI, teniendo un valor promedio de -91.82 dBm. Este valor está comprendido dentro del rango de normal de comportamiento.

En la Fig. 3.16 se observa la curva de comportamiento del SNR, con un valor promedio de 11,4 dB, que se encuentra cercano al valor de trabajo.

En la Fig. 3.17 se observa el comportamiento del error de la frecuencia, que se encuentra en un valor promedio de 78.37 Hz, que no representa un valor muy alto.

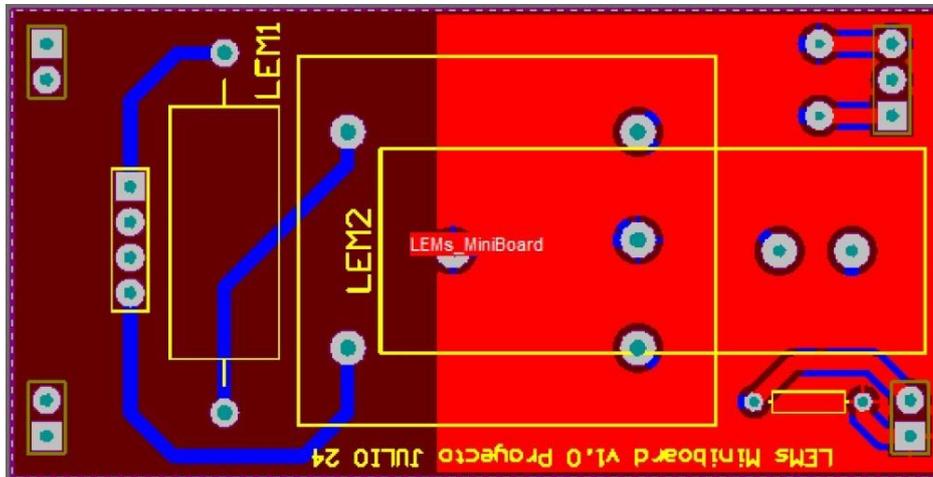


Figura 3.14: PCB

### 3.3.2. Escenario 2

Para esta prueba de comunicación se colocan los módulos a una distancia de 100m, se mantiene la misma configuración.

El comportamiento del RSSI en un valor promedio de -120.6, donde la señal se va atenuando. En la Fig.3.18 se observa el comportamiento.

El SNR se está trabajando por debajo de la señal de ruido y esta dentro del margen de transmisión, como se observa en la Fig. 3.19.

El error de frecuencia tiende a un valor cercano a cero y se mantiene, tal como se observa en la Fig.3.20.

### 3.3.3. Escenario 3

Para esta prueba de comunicación se colocan los módulos a 150 m y se configuraron con las siguientes características:

- Frecuencia 915 MHz
- Ancho de banda 125 kHz



Figura 3.15: Comportamiento RSSI

- Factor de dispersión 12
- Denominador de tasa de codificación 8
- Sincronizar palabra 0x34
- Potencia de salida 20
- Longitud del preámbulo 8
- Ganancia 0

En la figura 3.21 se aprecia el comportamiento del RSSI. Se mantiene trabajando con una señal al mínimo en un promedio de 121.38 dBm.

En la Fig. 3.22 se puede observar que la señal está operando por debajo del mínimo de la señal. LoRa se encuentra en el rango de trabajo con un promedio de -17.38 dB.

En la Fig. 3.23 que muestra el comportamiento del error de frecuencia, donde se observan cambios en cada una de las muestras. A medida que la



Figura 3.16: Comportamiento SNR

distancia aumenta, el error disminuye. Esto es hasta lograr la estabilidad de manera automática que depende del movimiento de los transductores LoRa.

#### 3.3.4. Escenario 4

En este escenario se aumentó la distancia a 200 m. Los resultados fueron pérdida de comunicación y de paquetes de datos, obteniendo los siguientes valores para el análisis:

En la Fig. 3.24 se muestra como el mensaje se distorsionó y no devolvió el mismo mensaje, a pesar de eso el mensaje pudo ser recibido. También se produjo pérdida de comunicación, desapareciendo todo tipo de respuesta.

Cuando un mensaje es enviado, pero se pierde la mayor parte del paquete y no puede ser reconstruido, se obtiene un mensaje de error CRC (Código de Redundancia Cíclica), tal como se muestra en la Fig. 3.25.



Figura 3.17: Comportamiento Error de Frecuencia

### 3.3.5. Pruebas de adquisición de Datos

Para verificar el funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos, el ADC y los sensores de voltaje y corriente, se procede a validar la señal en los ingresos, realizando lecturas de los valores, se procede a calibrar la ganancia. La calibración se realiza con una primera adquisición de datos que se compara con la medición de un multímetro. En el algoritmo de programación se implementan los valores calculados.

En primera instancia, antes de probar el sistema con los sensores y las señales eléctricas externas, se probaron los canales del módulo ADC directamente con voltajes de 0 a 5 V y de 0 a 10 V, según como se configure el módulo. Estas medidas se reciben por medio de comunicación SPI y son procesadas por el microcontrolador que se encarga de separar y procesar los ocho canales de 16 bits cada uno. Esto debido a que todos los canales son enviados en una trama de datos de 128 bits, tal como se muestra en la Fig. 3.26.

Al terminar las pruebas y los diseños de las tarjetas PCB's se procedió a



Figura 3.18: Comportamiento RSSI

colocar los sensores que han sido adaptados como lo indica su hoja de datos. Considerando que la salida que se obtiene es un valor de corriente en mA y los ingresos del ADC son de voltaje, se realiza un acople con una resistencia en paralelo, obteniendo a la salida valores de voltaje que corresponden a los equivalentes en corriente de cada sensor, según su ingreso.

### 3.3.6. Pruebas de implementación del sistema

Para estas pruebas, se arma el sistema de adquisición y transmisión, que consta de un sistema de lectura para ocho señales eléctricas, que estas divididas en cuatro canales de voltaje y cuatro de corriente. En la Fig. 3.27 se muestra la distribución y el armado del sistema transmisor. Para realizar las pruebas se colocó un sensor de cada tipo y se ajustó en la programación para recibir cada señal.

En la Fig. 3.28 se observa el sistema receptor que está compuesto por un microcontrolador que se encarga de recibir los datos del módulo LoRa. Este



Figura 3.19: Comportamiento SNR

procesa y muestra cada una de los valores de voltaje y corriente, este sistema de recepción es alimentado por una batería.

El módulo LoRa se colocó una mini placa como se observa en la Fig. 3.29 para que se pueda manipular en las pruebas. Es utilizado por el transmisor y receptor.

Para la prueba se procedió a colocar una carga resistiva, con una fuente de voltaje variables, se adquirieron algunos valores para comprobar el funcionamiento de los datos a transmitir. En la Fig. 3.30 se observan los valores en la visualización del receptor con la medida con el multímetro.

Se realizó una prueba variando el valor de resistencia y se obtuvieron las siguientes medidas que se observan en la Fig. 3.31.

Una prueba más se realizó con el máximo valor de voltaje y corriente que la fuente proporciona y se obtuvieron resultados favorables en el transmisor y el receptor de los datos como se observa en la Fig. 3.32.



Figura 3.20: Comportamiento Error de Frecuencia



Figura 3.21: Comportamiento RSSI



Figura 3.22: Comportamiento SNR.



Figura 3.23: Comportamiento Error de Frecuencia.

```
Rx done
[SX1272] Received packet!
[SX1272] Data:          _nxt Message!
[SX1272] RSSI:         -126.50 dBm
[SX1272] SNR:          -21.50 dB
[SX1278] Frequency error:      17.96 Hz
switch to transmit
Tx done
switch to receive
couldn't receive a packet within 20 seg
switch to transmit
Tx done
switch to receive
Rx done
[SX1272] Received packet!
[SX1272] Data:          PING
[SX1272] RSSI:         -127.00 dBm
[SX1272] SNR:          -19.00 dB
[SX1278] Frequency error:      7.08 Hz
switch to transmit
Tx done
switch to receive
Rx done
[SX1272] Received packet!
[SX1272] Data:          Test Messhgl(
[SX1272] RSSI:         -127.75 dBm
[SX1272] SNR:          -21.75 dB
[SX1278] Frequency error:      -1.97 Hz
switch to transmit
Tx done
```

Línea 1, columna 1

Figura 3.24: Datos errados.

```
Rx done
[SX1272] Received packet!
[SX1272] Data:          PING
[SX1272] RSSI:         -129.00 dBm
[SX1272] SNR:          -19.00 dB
[SX1278] Frequency error:      -36.96 Hz
switch to transmit
Tx done
switch to receive
Rx done
[SX1272] CRC error!
switch to transmit
Tx done
switch to receive
Rx done
[SX1272] Received packet!
[SX1272] Data:          Test Message!
[SX1272] RSSI:         -121.75 dBm
[SX1272] SNR:          -16.75 dB
[SX1278] Frequency error:      -22.94 Hz
switch to transmit
```

Figura 3.25: Datos erróneos error de CRC.

```
COM3
0.0006,0.0000,-0.0005,-0.0003,3.0544,0.0002,0.0000,0.0000,
0.0005,0.0003,-0.0005,-0.0003,3.0551,0.0002,-0.0003,0.0000,
0.0005,0.0000,-0.0005,-0.0005,3.0551,0.0000,-0.0003,-0.0003,
0.0005,0.0002,-0.0006,-0.0005,3.0547,0.0000,-0.0005,-0.0003,
0.0005,0.0002,-0.0006,-0.0005,3.0553,0.0000,-0.0002,0.0000,
0.0005,0.0002,-0.0005,-0.0003,3.0551,0.0000,-0.0003,0.0000,
0.0008,0.0003,-0.0005,-0.0003,3.0551,0.0002,-0.0002,0.0000,
0.0006,0.0002,-0.0005,-0.0005,3.0542,-0.0002,-0.0002,-0.0003,
0.0006,0.0000,-0.0006,-0.0005,3.0548,0.0002,-0.0003,-0.0002,
0.0003,0.0000,-0.0005,-0.0003,3.0548,0.0002,-0.0003,-0.0002,
0.0003,0.0000,-0.0006,-0.0003,3.0545,0.0000,-0.0002,0.0000,
0.0006,0.0002,-0.0006,-0.0006,3.0550,0.0000,-0.0002,-0.0002,
0.0006,0.0003,-0.0003,-0.0003,3.0550,0.0002,-0.0002,0.0000,
```

Figura 3.26: Datos de adquisición AD7606.

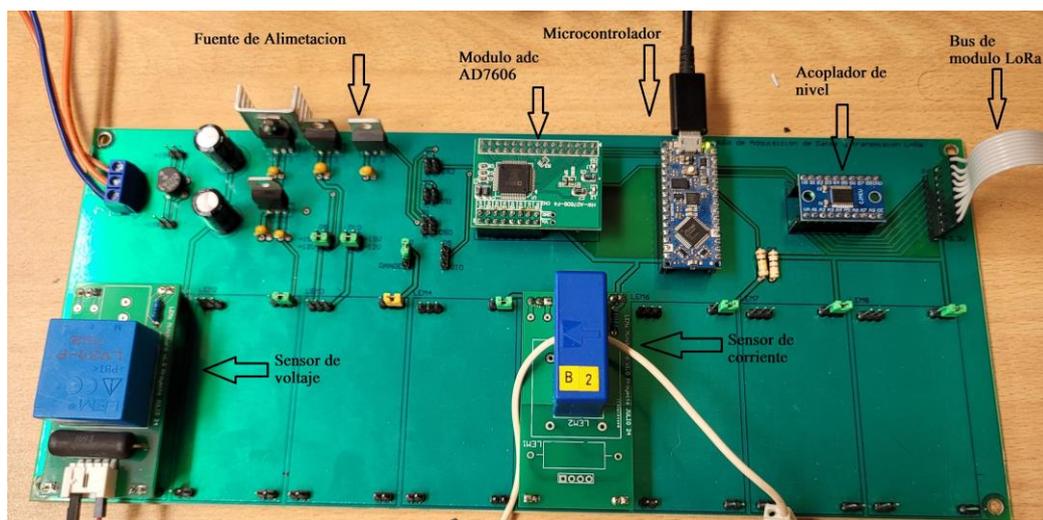


Figura 3.27: PCB de adquisición y transmisión de datos.

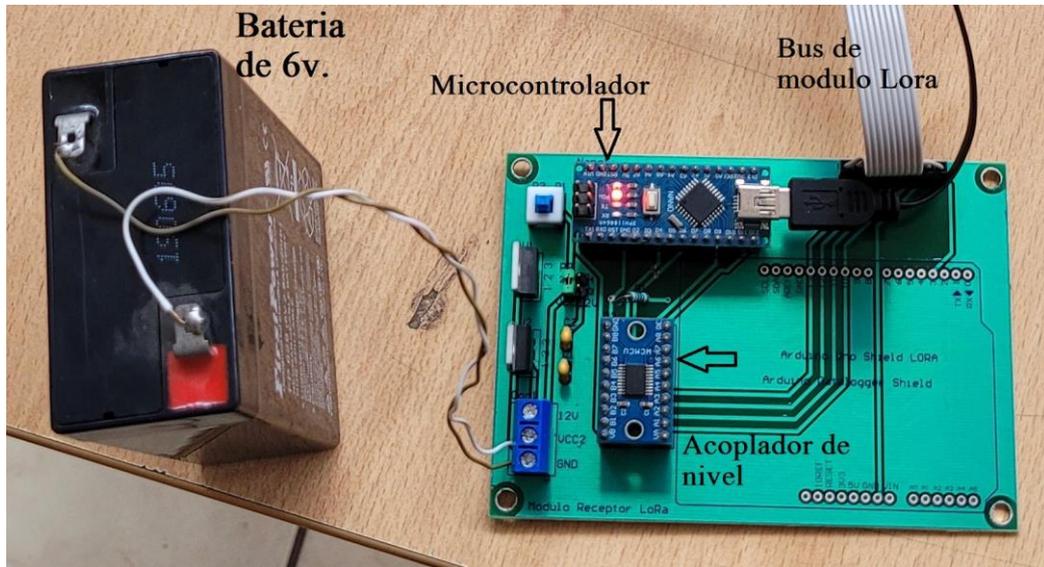


Figura 3.28: PCB de recepción de datos.

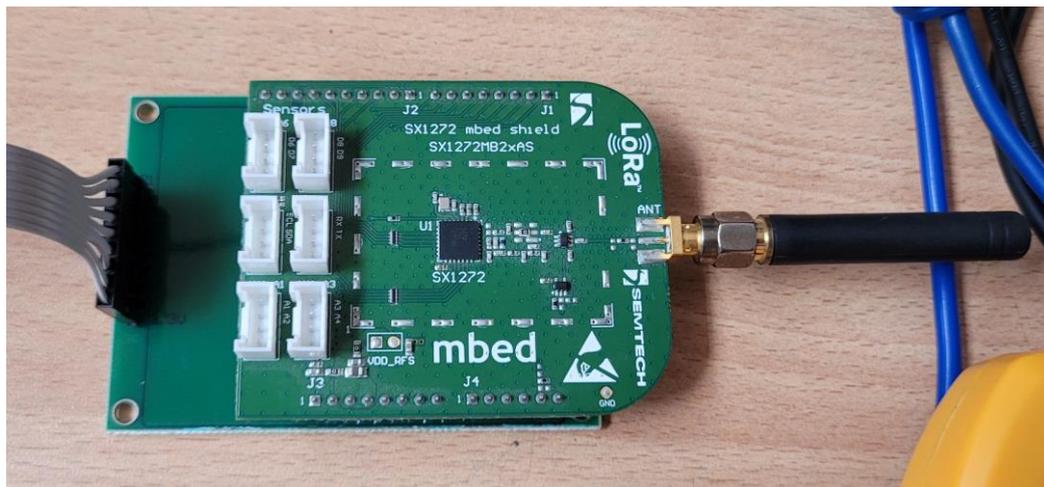


Figura 3.29: PCB de base para módulo LoRa.

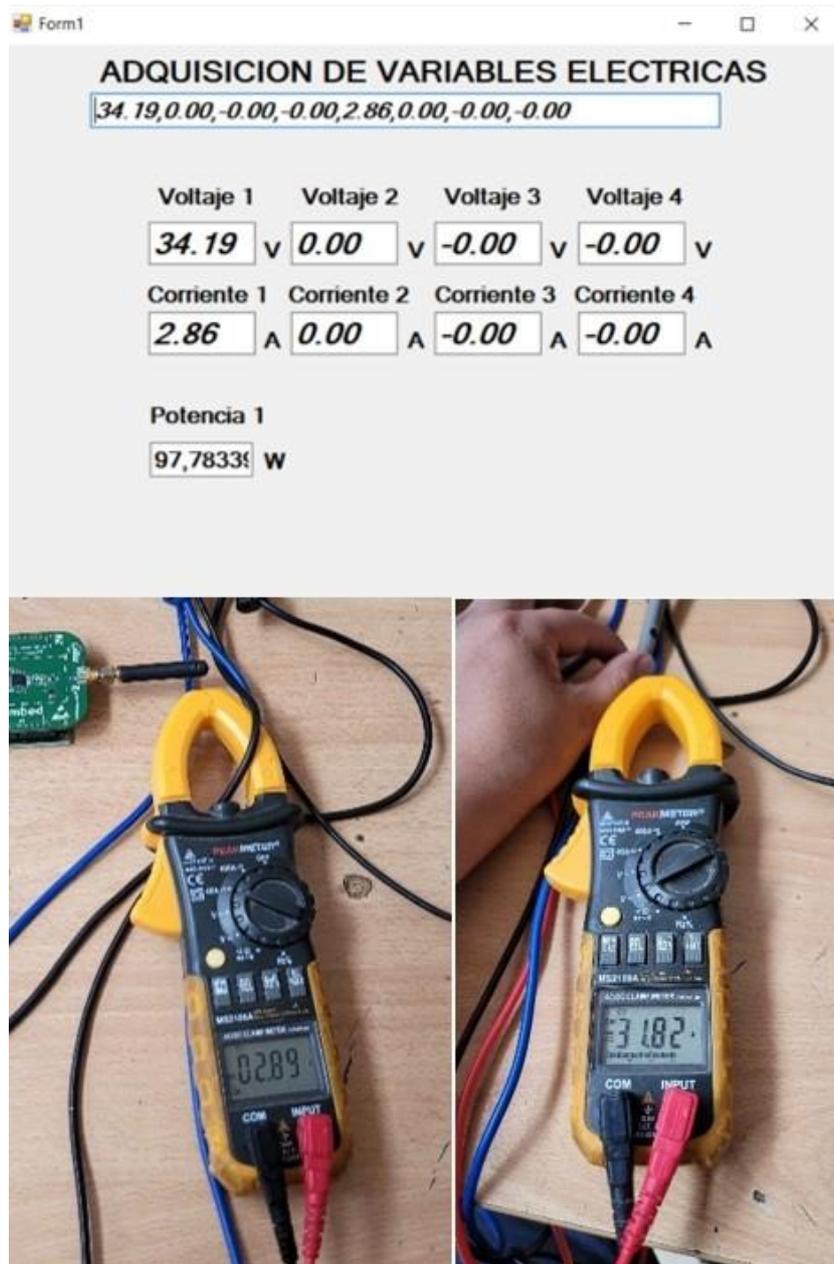


Figura 3.30: pruebas de medición, transmisión y recepción.

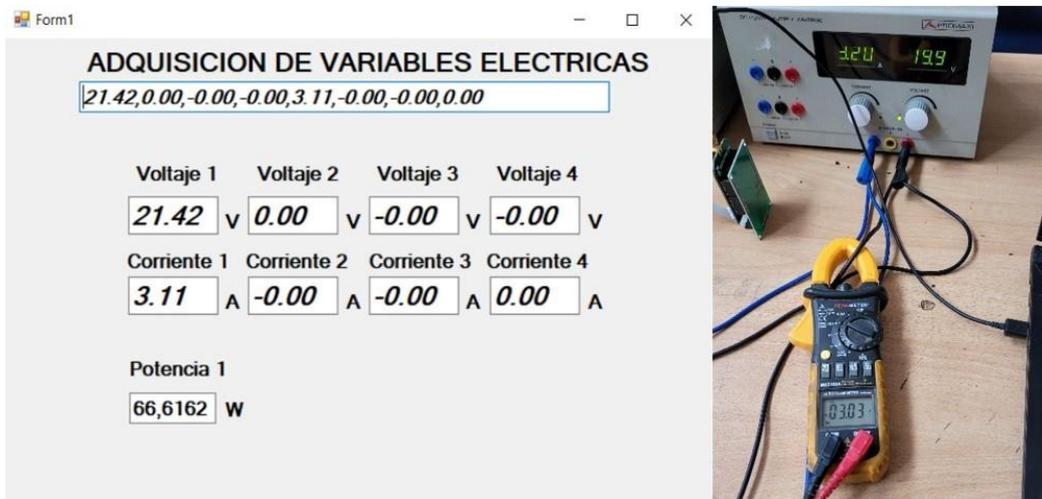


Figura 3.31: pruebas de medición, transmisión y recepción.

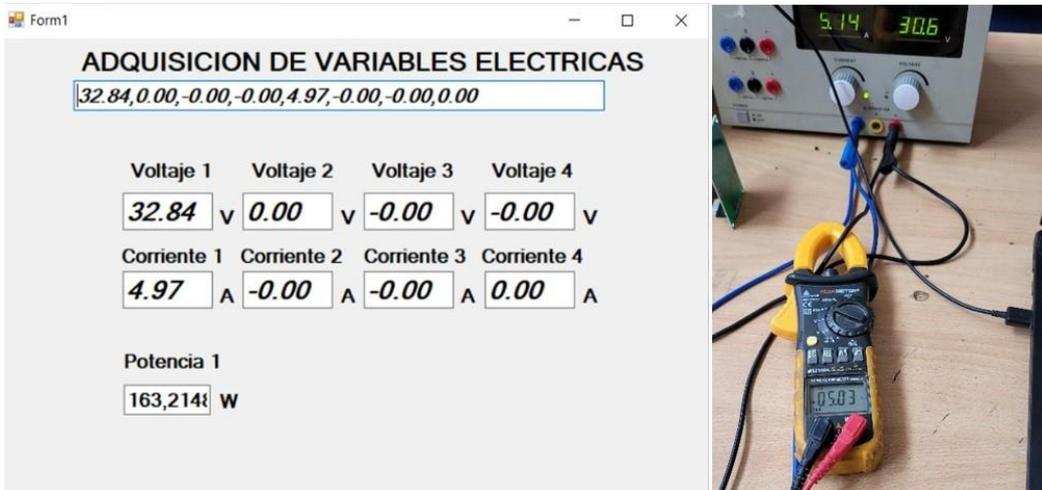


Figura 3.32: pruebas de medición, transmisión y recepción.

## Capítulo 4

# Análisis de resultados y discusión

En este capítulo se realiza un análisis de las diferentes etapas que componen el sistema de transmisión, las pruebas de funcionamiento del ADC, el acople de los dispositivos de transmisión de datos, el proceso y los datos de implementación obtenidos. La puesta en marcha del sistema conjunto y algunos de los problemas que se tuvieron que resolver al realizar las pruebas con las mediciones de voltaje y corriente.

Se verificó el bajo consumo de energía al momento de realizar la comunicación.

## 4.1. Análisis de pruebas de transmisión.

Desde que se empezó a investigar el funcionamiento y la configuración de los módulos y como acoplarlos al microcontrolador, se utilizó una librería que se adapta a los módulos embebidos LoRa. Al ser un dispositivo nuevo y de aplicación para la IoT, se generan muchas aplicaciones y una de ellas es la transmisión de datos de variables eléctricas, que permiten la supervisión desde lugares remotos.

En las pruebas de enlace se obtuvieron varios datos que fueron representados en las gráficas del capítulo 3. Se han extraído los valores promedios para poder apreciarlos mejor. La Tabla 4.1 muestra los resultados que se dieron al configurar los módulos con las características dadas en el escenario 1.

Distancia	RSSI (dBm)	SNR(dB)	Error de Frecuencia (Hz)
D. corta	-91.82	11.4	78.37
100 m.	-120.6	-6.98	3.89
130 m.	-108.83	-5.39	390

Tabla 4.1: Valores promedio de trabajo del módulo LoRa.

Con esta configuración se observa que todos los valores a las distintas distancias se mantienen dentro del rango de trabajo. El RSSI se reduce a medida que la distancia aumenta, a pesar de tener una baja intensidad aun trabaja de manera correcta. La señal de SNR muestra que el prototipo es capaz de demodular por debajo de la señal de ruido, manteniéndose en un rango favorable del valor deseado. El error de frecuencia es bastante variable y esto se da por el medio y el ambiente de transmisión. Esa diferencia debería tender a cero, pero se observa que la señal en algunas ocasiones se desplaza de la frecuencia central.

Para las siguientes pruebas de transmisión se cambian algunos datos de la configuración de los módulos, tal como se describe en el escenario 3. Se recogen varios datos y se representan gráficamente para observar su

comportamiento. En la Tabla 4.2 se presentan los resultados en promedio para un mejor análisis.

Distancia	RSSI (dBm)	SNR(dB)	Error de Frecuencia (Hz)
D. corta	-102	+1	-219.9
150 m.	-121.37	-17.37	-25.3
200 m.	-121.75	-16.25	-22.94

Tabla 4.2: Valores promedio de trabajo del módulo LoRa.

Con la configuración utilizada, se aprecia un cambio en los resultados con respecto a los anteriores. Los valores de RSSI se encuentran trabajando al margen, esto representó tener que subir el valor del factor de dispersión, el cual aumenta la distancia, lo que implica incrementar el tiempo de transmisión en el aire. En estos casos no afecta porque se está transmitiendo cada cinco segundos. El valor de SNR también se vio afectado, pero de todos modos aun está trabajando en el rango deseado por debajo de la señal de ruido. En este caso el error de frecuencia se mantuvo variante, pero según aumentaba la distancia esta iba disminuyendo.

Una vez que se finalizaron las pruebas de enlace y comunicación de los módulos LoRa, se procedió a las pruebas de adquisición de las señales. Como se comentó en el Capítulo 3, se trabajó solo con el módulo ADC. Este módulo se enlazó al microcontrolador por medio de SPI y con base a varias pruebas y ajustes en la programación, se obtuvieron los datos precisos.

Se obtienen los valores de los ocho canales. Estos valores son acondicionados para que al recibir la señal de los sensores de efecto Hall se traduzca al valor de voltaje y corriente aproximados.

La velocidad de adquisición es tan alta que se podría trabajar con datos en tiempo real, en AC o DC. Si el valor es en AC se tendría que calcular en el microcontrolador el valor eficaz y este dato debería ser transmitido. Para señales en DC no se tendría mayores inconvenientes y es por esto que se optó trabajar y probar con esos valores, que demostrarían el objetivo principal.

Al recoger los datos del ADC y transmitirlos, también se pudo obtener un dato adicional que es el Data Rate, o tasa de datos enviados, que también se ve afectado dependiendo de los valores configurados en los módulos. Este puede ser mayor o menor. Si es menor su consumo en la batería será mayor, pero esto implica un mayor rango de alcance. En estas pruebas el Data Rate se mantenía en un valor aproximado a los 118 bps como se observa en la Fig. 4.1.

```

34.24,0.00,-0.00,-0.00,2.87,-0.00,-0.00,-0.00
[SX1272] Transmitting packet ... success!
[SX1272] Datarate:      118.92 bps
0.23
-0.00
-0.00
-0.00
0.29
-0.00
-0.00
-0.00
34.29,-0.00,-0.00,-0.00,2.87,-0.00,-0.00,-0.00
[SX1272] Transmitting packet ... success!
[SX1272] Datarate:      121.55 bps
0.23
0.00
-0.00
-0.00
0.29
-0.00
-0.00
-0.00
34.26,0.00,-0.00,-0.00,2.87,-0.00,-0.00,-0.00
[SX1272] Transmitting packet ... success!
[SX1272] Datarate:      118.92 bps

```

Figura 4.1: Valor de Data Rate en transmisión de Datos.

Por ultimo, se observó el consumo de corriente de que ofrece un aproximado para calcular su potencia y comprobar el bajo consumo. Uno de los módulos se alimentó con una batería de 6 V y se observó el comportamiento en cada estado. Durante el momento de mantenerse en espera para recibir datos, el consumo es de aproximadamente 24 mA, dando una potencia de 144 mW.

Durante el tiempo de transmisión de los datos, el consumo se elevaba a un aproximado de 35 mA, que en potencia se convierte en 210 mW.

Cada una de estas etapas y pruebas permite alcanzar el resultado final que es la implementación de un sistema de transmisión de variables eléctricas, considerando cada uno de los parámetros que se observaron, se demuestra que puede ser útil a nivel de aplicaciones IoT, supervisar los datos con un sustentable ahorro de energía.

# Capítulo 5

## Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

Se logró la implementación satisfactoria de una aplicación que puede ser a futuro un pilar fundamental para incursionar en los sistemas IoT. Esta propuesta es a su vez una solución de bajo costo debido a que se ha implementado utilizando únicamente software de código abierto.

El proyecto realizado cumplió con los objetivos propuestos, los cuales requirieron investigación detallada de cada uno de los dispositivos utilizados para implementar la nueva propuesta consistente en la transmisión de medidas mediante los dispositivos LoRa.

De las pruebas realizadas al dispositivo implementado se pudo determinar su comportamiento, dando como resultado que los transmisores ofrecen una buena rentabilidad. Al ser de bajo consumo, puede facilitar las comunicaciones en lugares de poco acceso por medio de la red Internet.

El suministro de energía se puede obtener por medio de baterías de litio, debido a que los componentes consumen bajos niveles de energía.

Se supervisaron los sistemas de potencia utilizando sensores de efecto Hall

de voltaje y corriente, los cuales proporcionan un aislamiento hacia las etapas de adquisición y transmisión de los datos. Algo que se debe procurar es la mejor vista posible punto a punto y una altura considerable para una mejor transmisión de los datos. Esto se puede conseguir por medio de la extensión de la antena.

El sistema trabaja con sistemas continuos, porque es más fácil manejar estos valores sin la necesidad de calcular un valor eficaz, pero en trabajos futuros se puede implementar una medición AC, que implicaría trabajar en la programación de los microcontroladores y así poder operar con sistemas de electrónica de potencia.

Algo que se observa en el prototipo desarrollado es que cómo los dispositivos utilizan un protocolo de interfaz SPI, la distancia de separación entre el emisor y el receptor no es muy larga y por este motivo es necesario que el sistema microcontrolador este cerca de los módulos AD7606 y al LoRa, debido a que a más de 10 cm, la interfaz pierde comunicación.

## 5.2. Recomendaciones

Como recomendaciones se debe tomar en cuenta para futuros trabajos a realizar extensiones de antena que ayudara a obtener mejor cobertura para que la señal no se vea interrumpida por factores externos, existen variedad de módulos LoRa que pueden ser utilizados y aprovechados para diferentes pruebas, así como módulos Gateway para centralizar la información de varios dispositivos a la vez.

Como se describió en un capítulo anterior al implantarse el sistema se probó el funcionamiento con voltajes DC, pero se podría adecuar por medio de programación para sistemas AC, con el ADC es posible, de esta manera recoger datos y ser enviados a través del transmisor.

Los sensores de efecto Hall se los recomienda conectarlos con los voltajes y

resistencias de valores precisos, esto nos ayudara a obtener valores de salida mas cercanos a los reales.

Así como se realizó en la implementación se recomienda colocar conversores de nivel lógico porque los transmisores LoRa son incompatibles con los voltajes del microcontrolador Arduino, los módulos tiene resistencias de protección, pero esto a un nivel de funcionamiento prolongado puede traer inconvenientes sobre todo con la comunicación SPI.

A pesar que en pruebas se puede utilizar los voltajes de 3.3 v que suministran las tarjetas de Arduino, pero lo más recomendable es utilizar una propia fuente o un regulador externo para alimentar de 3.3v para que el consumo no impida realizar sistemas complejos donde se pueda explotar todo el rendimiento de los módulos LoRa.

Al implementar los sistemas con dispositivos microcontroladores de Arduino, tienen la ventaja de ser hardware y software libres, mucha de la documentación se la puede encontrar en el internet, además cuenta con un costo de adquisición accesible y razonable para los desarrollos y la investigación en el uso en la monitorización y el control por medio de sensores.

# Bibliografía

- [1] A. Device, “Ad7606 datasheet,” in Analog Devices, Inc. All rights reserved, 2010–2020, pp. 1–3.
- [2] T. V. S. Villa and M. A. I. Torres, “Diseño y montaje de enlace inalámbrico para transmisión de datos utilizando tecnología Bluetooth,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica Salesiana, 2013. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4785>
- [3] X. Zhang, H. Li, C. Yao, and J. Wang, “Semiconductor-based galvanic isolation,” in 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2015, pp. 268–274.
- [4] J. Viola, J. Restrepo, and R. Harley, Fault Diagnosis for Robust Inverter Power Drives, ser. Energy Engineering. Institution of Engineering and Technology, 2018, ch. 4. Embedded fault diagnosis and prognosis, pp. 103–139, doi: 10.1049/PBPO120E\_ch4.
- [5] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, “On the coverage of lpwans: range evaluation and channel attenuation model for lora technology,” in 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), 2015, pp. 55–59.
- [6] O. Georgiou and U. Raza, “Low power wide area network analysis: Can lora scale?” IEEE Wireless Communications Letters, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, 2017.
- [7] J. M. Marais, R. Malekian, and A. M. Abu-Mahfouz, “Lora and lorawan testbeds: A review,” in 2017 IEEE AFRICON, 2017, pp. 1496–1501.
- [8] A. S. Rawat, J. Rajendran, H. Ramiah, and A. Rana, “Lora (long range) and lorawan technology for iot applications in covid-19 pandemic,” in 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication Materials (ICACCM), 2020, pp. 419–422.

- [9] R. Gamoudi, D. Elhak Chariag, and L. Sbita, "A review of spread-spectrum-based pwm techniques—a novel fast digital implementation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, pp. 10 292–10 307, 2018.
- [10] R. Pickholtz, D. Schilling, and L. Milstein, "Theory of spread-spectrum communications - a tutorial," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 30, no. 5, pp. 855–884, 1982.
- [11] J. D. R. Munca, "Dispositivo lora de comunicación a largo alcance y bajo consumo energético para aplicaciones del ámbito del desarrollo," Enero 2017, generación Distribuida Renovable y Control Inteligente GEDIRCI. [Online]. Available: <http://oa.upm.es/44890/>
- [12] A. Zourmand, A. L. Kun Hing, C. Wai Hung, and M. AbdulRehman, "Internet of things (iot) using lora technology," in 2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), 2019, pp. 324–330.
- [13] A. Gehani, S. Harsha Shatagopam, R. Raghav, M. Sarkar, and C. Paolini, "Application of 915 mhz band lora for agro-informatics," in 2021 Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2021, pp. 1–4.
- [14] S. Opipah, H. Qodim, D. Miharja, Sarbini, E. A. Z. Hamidi, and T. Juhana, "Prototype design of smart home system base on lora," in 2020 6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), 2020, pp. 1–5.
- [15] J. Viola and F. Quizhpi, "Desarrollo de un convertidor electrónico multinivel para aplicaciones de compensación de potencia reactiva," *Revista Técnica de energía*, vol. 9, no. 1, pp. 96–103 pp., ene. 2013. [Online]. Available: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/138>
- [16] H. Guo, H. Yu, C. Sun, Z. Zhang, and E. Zheng, "Continuous and real-time vibration data acquisition and analysis system based on s3c6410 and linux," in 2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2013, pp. 389–392.
- [17] G. Yang, M. Wu, Y. Wang, and Z. Huang, "Power quality monitoring and energy efficiency management of microgrid based on wind-PV-ES hybrid system," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 192, p. 012036, nov 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/192/1/012036>

- [18] C. Yao, X. Zhang, Y. Zhang, P. Yang, H. Li, and J. Wang, “Semiconductor-based galvanic isolation: Touch current suppression,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 1, pp. 48–58, 2020.
- [19] S. Corporation, “Sx1272mb2das hardware description,” in Revision 1.0 – May 2016, 2016, pp. 1–4.
- [20] —, “Sx1272/73 datasheet,” in Rev. 3.1 - March 2017, 2017, pp. 1–4.