

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS  
EMBEBIDOS



MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

**Dispositivo logger IoT con tecnologías  
de comunicación Sigfox y Lora**

**Autor:**

**Ing. Julian Bustamante Narvaez**

Director:

Ing. Marcelo E. Romeo (UNSAM, UTN-FRBA)

Jurados:

Esp. Ing. Leonardo Carducci (FIUBA)

Esp. Ing. Agustin Bassi (FIUBA)

Esp. Ing. Ramiro Alonso (FIUBA)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, entre agosto  
de 2018 y agosto de 2019.*



## *Resumen*

En esta memoria se presenta el diseño e implementación de un dispositivo de adquisición de datos con múltiples entradas digitales y analógicas para aplicaciones IoT (*internet of things*) en ambientes industriales para la empresa Tecrea S.A.S. El dispositivo tiene una arquitectura modular que le permite incorporar nuevas funcionalidades y puede operar con protocolos inalámbricos como SigFox o Lora.

Este proyecto se enfocó en que los procesos de toma de datos sean menos dependientes de las personas y se puedan auto gestionar con información adquirida en tiempo real. En el presente trabajo se plasman los conocimientos en el desarrollo de firmware en sistemas embebidos, testing de software, diseño electrónico, circuitos impresos y gestión de proyectos.



## *Agradecimientos*

### A . [OPCIONAL]

No olvidarse de agradecer al tutor.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción General</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. IoT ( <i>Internet of Things</i> ) . . . . .	1
1.2.1. Tecnologías de comunicación . . . . .	2
1.3. Objetivos y alcance . . . . .	4
1.3.1. Objetivo . . . . .	4
1.3.2. Alcance . . . . .	4
<b>2. Introducción Específica</b>	<b>7</b>
2.1. Estructura general del sistema . . . . .	7
2.2. Requerimientos . . . . .	8
2.2.1. Sigfox . . . . .	9
2.2.2. LoRa . . . . .	13
<b>3. Diseño e Implementación</b>	<b>17</b>
3.1. Módulos del sistema de hardware . . . . .	17
3.1.1. Hardware . . . . .	17
Microcontrolador: . . . . .	18
Modulo Sigfox . . . . .	18
Modulo Lora . . . . .	18
Entradas analógicas . . . . .	20
Entradas digitales . . . . .	20
3.1.2. Sintonización y verificación de la antena. . . . .	21
3.1.3. Desarrollo de la capa de manejadores de dispositivos( <i>driver</i> ). . . . .	21
3.1.4. Diseño del firmware . . . . .	21
3.1.5. Implementación del firmware y herramientas a usar. . . . .	21
<b>4. Ensayos y Resultados</b>	<b>23</b>
4.1. Pruebas unitarias de manejadores de dispositivos ( <i>driver</i> ) . . . . .	23
4.2. Pruebas funcionales sobre el prototipo. . . . .	23
4.3. Pruebas de integración. . . . .	23
<b>5. Conclusiones</b>	<b>25</b>
5.1. Conclusiones generales dle trabajo realizado. . . . .	25
5.2. Trabajo futuro. . . . .	25





# Índice de figuras

2.1. Diagrama general del sistema. . . . .	7
2.2. Ciclo de vida de un mensaje en Sigfox <sup>1</sup> . . . . .	10
2.3. Disponibilidad geográfica de Sigfox <sup>2</sup> . . . . .	11
2.4. Potencia según clases. . . . .	12
2.5. Diagrama Sigfox <i>back-end</i> <sup>3</sup> . . . . .	13
2.6. LoraWan Stack[ <b>LoRaAlliance2015</b> ]. . . . .	13
2.7. LoRa arquitectura de red[ <b>LoRaAlliance2015</b> ]. . . . .	14
2.8. LoraWan clases[ <b>LoRaAlliance2015</b> ]. . . . .	15
2.9. Clase A [ <b>Ruano2016</b> ]. . . . .	16
2.10. Clase B [ <b>Ruano2016</b> ]. . . . .	16
2.11. Clase C [ <b>Ruano2016</b> ]. . . . .	16
3.1. Jerarquía del hardware. . . . .	17
3.2. Esquemático módulo Sigfox. . . . .	19
3.3. Esquemático módulo LoRa. . . . .	19
3.4. Esquemático entradas analógicas. . . . .	20
3.5. Esquemático entradas analógicas. . . . .	20



# Índice de Tablas

1.1. Redes de comunicación . . . . .	2
1.2. Comparación costos. . . . .	4
2.1. Zonas de frecuencia . . . . .	10
2.2. Sigfox <i>Ready</i> . . . . .	12



***Dedicado a... [OPCIONAL]***



# Capítulo 1

## Introducción General

En este capítulo se menciona la problemática que motivó la realización del presente trabajo, los procedimientos de la toma de datos en la industria actualmente y el enfoque elegido para desarrollar el prototipo que ofrece una solución usando sistemas embebidos.

### 1.1. Motivación

En el transcurso de la próxima década se espera un gran crecimiento en la cantidad de dispositivos IoT (*internet of things*) provenientes de redes LPWAN (*Low-Power Wide Area Network*). Para el 2025, se espera que más de 100 billones de dispositivos se conecten a través de LPWAN[taylor2015world]. Las principales tecnologías, que prometen una vida útil alta de la batería de los dispositivos y un alcance de hasta 15 kilómetros, son Sigfox, Lora y NB-IoT, que actualmente están conectados en todo el mundo con más de 25 millones de dispositivos, brindando servicio y facilitando las experiencias del usuario[iotanalytics].

En los procesos industriales se tiene mucha información de variables físicas y eléctricas por medio de sensores, la cual muchas veces no se aprovecha debido a que no se tiene una óptima trazabilidad de la misma o simplemente se pierde esta información. Cuando los procesos industriales fallan, necesitan una reacción inmediata por parte de una persona y esto genera una dependencia de alguien que no siempre va a estar las 24 horas del día al pendiente, quizá por costos para las mismas empresas.

En vista de lo de anterior se desarrolló un prototipo para ofrecer una solución que permita monitorear inalámbricamente diferentes variables en los procesos industriales de esta manera los usuarios pueden estar informados y garantizan la correcta funcionalidad de sus procesos.

### 1.2. IoT (*Internet of Things*)

El concepto de internet de las cosas se refiere a la interconexión digital de dispositivos y objetos a través de una red, es decir, dispositivos como sensores y/o actuadores, equipados con una interfaz de comunicación, unidades de procesamiento y almacenamiento[centenaro2016long]. Estos dispositivos tienen la capacidad de adquirir, intercambiar y transferir datos a la red mediante alguna tecnología de comunicación inalámbrica.

IoT es una tendencia imparable y puede facilitar mucho la vida diaria. Produce formas baratas y efectivas de resolver grandes problemas sociales, como el acceso

a la energía, el transporte y la vivienda. Otras aplicaciones pueden ser *wearables*, construcciones y demóticas, *smart cities*, *smart manufacturing*[taylor2015world]. IoT puede hacernos sentir más cómodos en nuestros hogares y en nuestras ciudades.

### 1.2.1. Tecnologías de comunicación

Uno de los principales habilitadores de un proyecto de internet de las cosas son las redes de comunicaciones. Estas permiten conectar dispositivos, máquinas, sensores o “cosas” los cuales generan datos o información desde cualquier punto geográfico del planeta. Las redes de comunicación son un conjunto de medios técnicos que permiten la comunicación entre equipos que se encuentran a distancia.

Las principales características de una red de comunicación IoT son:

- Baja tasa de datos.
- Bajo consumo de energía.
- Largo alcance de comunicación.
- Conexiones bidireccionales.
- Movilidad y servicios de localización.

En la tabla 1.1 se puede observar una comparación de las principales tecnologías de comunicación.

TABLA 1.1: Redes de comunicación más utilizadas para proyectos IoT

Tecnología	Consumo	Alcance	Tasa de Datos
GSM/GPRS	Muy alto	Alto	Alta
SigFox	Bajo	Medio/alto	Muy baja
Lora	Bajo	Medio/alto	Muy baja
WiFi	Alto	Bajo	Muy alta
BLE	Muy bajo	Muy Bajo	Baja
ZigBee	Medio	Bajo	Baja

#### Tecnología GSM/GPRS:

GSM (*Global System for Mobile communications*) o en español sistema global para las comunicaciones móviles y es un tipo de red que se utiliza para la transmisión móvil de voz y datos.

GPRS (*General Packet Radio Service*) o en español servicio general de paquetes vía radio y es una extensión mejorada del GSM. Permite la mensajería instantánea, los servicios de mensajes cortos SMS (*Short Message Service*), multimedia MMS (*Multimedia Messaging Service*) y correo electrónico. Esta proporciona una cobertura inalámbrica completa, tiempos de acceso mas cortos y mayores tasas de datos[bettstetter1999gsm]. Por ejemplo, permite enviar 30 SMS por minuto, mientras que con GSM se puede enviar entre 6 y 10.

#### Tecnología WiFi:



Es una tecnología que permite la interconexión inalámbrica de dispositivos electrónicos por medio de internet. WiFi, el nombre popular para el área local inalámbrica Redes basadas en el estándar IEEE 802.11b, se ha convertido en la Tecnología preferida para redes inalámbricas de área local en entornos comerciales y domésticos[henry2002wifi].

#### **Tecnología BLE:**

Es una tecnología de red de área personal PAN (*Personal Area Network*) inalámbrica, Permite la comunicación entre dispositivos dos o más dispositivos Bluetooth, que opera en 2.4 GHz (una de las bandas ISM), con una tasa de transferencia de 1 Mbps en la capa física. BLE (*Bluetooth Low Energy*) se introdujo por primera vez en 2010 con el objetivo de expandir la aplicación de Bluetooth para su uso en dispositivos con limitaciones de energía, como los inalámbricos. Sensores y controles inalámbricos. Los sensores y controles requieren un bajo consumo de energía, pero la cantidad de transmisión de datos es pequeña y la comunicación ocurre con poca frecuencia[chang2014bluetooth].

#### **Tecnología ZigBee:**

ZigBee es uno de El transceptor estándar más utilizado en sensores inalámbricos. redes ZigBee sobre IEEE 802.15.4 , define especificaciones para baja velocidad de datos WPAN (*wireless personal area network*) para soportar baja potencia en monitorización y control de dispositivos[ramya2011study].

El consumo de energía para ZigBee es muy pequeño. En la mayoría de los casos Utiliza 1mW (o menos potencia). Pero aún así proporciona un alcance hasta 150 metros en exterior que se consigue con la técnica. llamado espectro de propagación de secuencia directa DSSS (*direct sequence spread spectrum*). Funciona en los 868 MHz (Europa), 915 MHz (América del Norte y Australia) y 2.4 GHz (disponible en todo el mundo) banda ISM con hasta 20kbps, 40kbps y velocidad de datos de 250kbps respectivamente[ramya2011study].

#### **Tecnología NB-IoT (Narrowband Internet of Things):**

Tecnología de acceso por radio que proporciona cobertura extendida, alta capacidad y larga duración de la batería. Utiliza la ya existente red móvil para conectar dispositivos de manera masiva.

NB-IoT requiere un ancho de banda mínimo de 180 kHz, que es igual al tamaño del LTE físico más pequeño. Dependiendo de la disponibilidad del espectro, esta tecnología se puede implementar por sí solo en los portadores de guardia de LTE / UMTS existentes[adhikary2016performance].

Permite transmisiones de hasta 1600 bytes sin limitación de cantidad mensajes por día, con un alcance de 1km en zonas urbanas y 10 km en zonas rurales[MEKKI20191].

#### **Tecnología SigFox:**

Es una tecnología de comunicación UNB (*Ultra-Narrow Band*) para conectar sensores y dispositivos. Opera en las bandas 868 MHz y 902-928 MHz, permite la transmisión de datos hasta 12 bytes con limitación de 140 mensajes de subida y 4 mensajes de bajada, esta tecnología tiene un alcance de hasta 10 km en zonas urbanas y 40 km en zonas rurales[MEKKI20191].

#### **Tecnología LoRa:**

Es una tecnología LPWAN de modulación de radio de CCS (*chirp spread spectrum*). Esta permite el envío y recepción de información en las bandas de frecuencia 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz, permite la transmisión de hasta 243 bytes sin limitación de cantidad de mensajes por día y tiene un alcance de 5km en zonas urbanas y 20 km en zonas rurales[MEKKI20191].

En la tabla 1.2 se puede observar las comparaciones de costos de las principales tecnologías LPWAN para el IoT : Sigfox, NB-IoT y LoRaWAN. En ella se muestra una ventaja en relación a costos comparado con NB-IoT[mekki2018overview].

TABLA 1.2: Comparación costos de tecnologías LPWAN para el IoT.

Spectrum cost		Deployment cost	End-device cost
Sigfox	Free	>4000 euro/base station	<2 euros
LoRaWAN	Free	>100 euros/gateway y >1000 euros/base station	3-5 euros
NB-IoT	>500 M euro /MHz	>15000 euro/base station	>20 euros

Las tecnologías seleccionadas fueron Sigfox y LoRaWAN, para la selección de estas tecnologías se tuvo en cuenta algunas características tales como : LPWAN con largo alcance[Samie:2016:ITE:2968456.2974004] y bajo costo[mekki2018overview]. En el capítulo 2 se explicaran en detalle estas tecnologías .

### 1.3. Objetivos y alcance

#### 1.3.1. Objetivo

El objetivo principal es diseñar e implementar un dispositivo de adquisición de datos con múltiples entradas digitales y analógicas para aplicaciones IoT en ambientes industriales, mediante la transmisión inalámbrica de la información por medio de tecnologías de comunicación Sigfox o Lora.

#### 1.3.2. Alcance

En la presente solución se contempla:

- La implementación de un prototipo funcional de hardware.
- 2 entradas analógicas de tensión.
- 1 entrada analógica de corriente.
- 5 entradas digitales.
- La escritura del firmware del dispositivo.
- La transmisión de la información por medio de Sigfox.
- La transmisión de la información por medio de Lora.
- La visualización de la información en una plataforma paga o libre.
- Se incluye partes del código de la biblioteca usada para el modulo Sigfox.

En la presente solución no se contempla:

- El desarrollo de la plataforma web que permite visualizar los datos en linea.

- Caja plástica del dispositivo.

En la presente solución no se incluye:

- Diagramas esquemáticos.
- PCB *layout*.
- Firmware.

Esto debido a que la propiedad intelectual es de Tecrea SAS.



## Capítulo 2

# Introducción Específica

En este capítulo se presenta la idea general del proyecto y se describen las características principales de la solución implementada.

### 2.1. Estructura general del sistema

El diagrama general del sistema se muestra en figura 2.1. El sistema se compone de un microcontrolador ARM(*Advanced RISC Machine*) Cortex®-M4 y dos bus UART(*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). De esta forma el sistema puede tener una arquitectura modular que le permite incorporar nuevas tecnologías de comunicación para transmitir inalámbricamente tales como: SigFox, LoRa, Nb-IOT, Cat-M, WiFi y 3G.

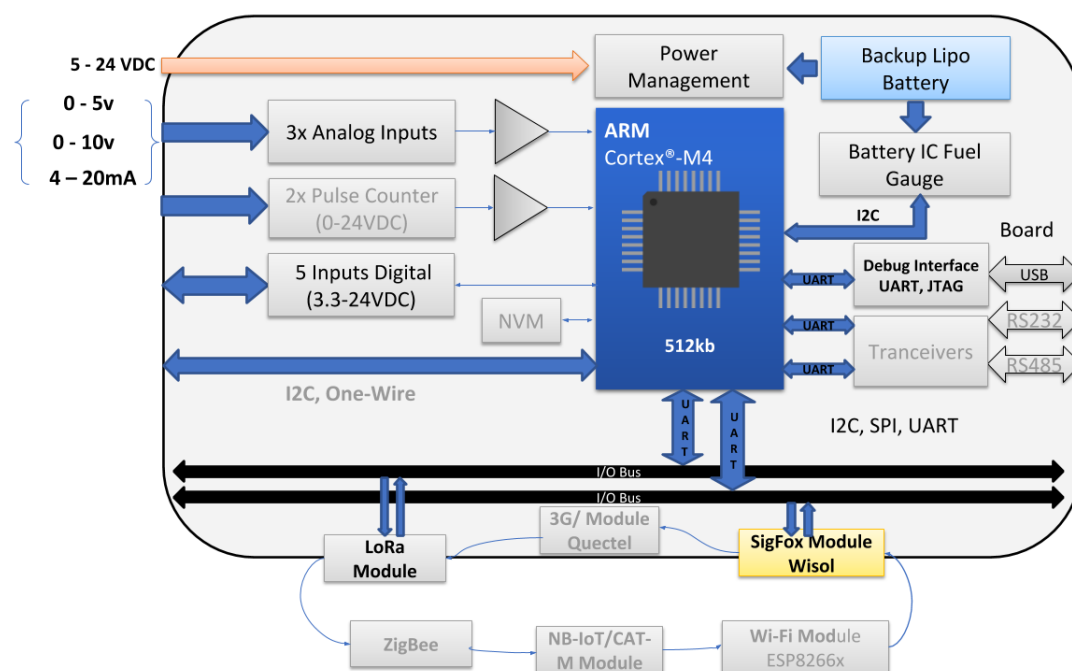


FIGURA 2.1: Diagrama general del sistema.

El sistema consta de un medidor de voltaje para batería de LiPo, dos entradas analógicas de tensión, una de corriente y cinco entradas digitales con el fin de poder adquirir datos de diferentes variables en los procesos industriales. El dispositivo está diseñado para tener diferentes funcionalidades sin embargo debido a la delimitación del alcance del trabajo no se implementaron los subsistemas que se observan en gris en la figura 2.1.

## 2.2. Requerimientos

Los siguientes son los requerimientos del presente trabajo:

### Grupo de requerimientos asociados al hardware:

1. Microcontrolador.
  - Debe tener procesador ARM Cortex M4.
  - Debe tener 3 puertos UART.
  - Debe tener comunicación I2C/SPI.
  - Debe tener memoria flash mayor a 64 kb.
  - Debe tener 3 entradas analógicas.
  - Debe tener 5 entradas digitales.
2. Autonomía de la batería debe ser de 1 día.
3. Módulo Sigfox.
  - Debe tener un módulo *Dual Zone* con comunicación por UART.
  - Debe tener antena externa con centro de banda en 915 MHz.
4. Módulo Lora.
  - Debe tener un módulo con comunicación por UART/I2C.
  - Debe tener antena externa con centro de banda en 915 MHz.
5. El sistema debe tener una (1) entrada analógica de voltaje de 0-5 Vdc.
6. El sistema debe tener una (1) entrada analógica de voltaje de 0-10 Vdc.
7. El sistema debe tener una (1) entradas analógicas de corriente 4-20 mA.
8. El sistema debe tener cuatro (4) entradas digitales 3.3-24 Vdc.

### Grupo de requerimientos asociados al módulo Sigfox:

1. Debe colocarse en modo de bajo consumo mientras no esté en uso.
2. Verificación de cada respuesta de comando AT enviado desde el MCU al módulo SigFox.

### Grupo de requerimientos asociados al módulo Lora:

1. Verificación de cada respuesta de los comandos enviados desde el MCU al módulo Lora.
2. Debe colocarse en modo de bajo consumo mientras no esté en uso.

### Otros requerimientos:

1. En el sistema se podrán configurar umbrales máximos y mínimos de las lecturas analógicas.
2. El sistema deberá verificar las entradas analógicas cada 1 minuto (parámetro configurable).

3. El sistema saldrá del modo de bajo consumo cada vez que ocurra una interrupción por tiempo.

### 2.2.1. Sigfox

Fundada en Francia en 2010 con el fin de construir una red global que se dedicara al Internet de las cosas y operara con un costo muy bajo y un consumo mínimo de energía. La tecnología Sigfox se basa en una comunicación por radio de largo alcance, dedicada por completo a hacer que cualquier objeto se comunique con muy bajo consumo de energía, extrayendo y transportando mensajes muy pequeños.

El protocolo Sigfox se centra en:

- La autonomía: Consumo de energía extremadamente bajo, lo que permite años de duración de la batería.
- Simplicidad: Sin configuración, solicitud de conexión o señalización. ¡El dispositivo está en funcionamiento en minutos!
- Eficiencia de precio: Desde el hardware utilizado en los dispositivos hasta la red, optimiza cada paso para que sea lo más rentable posible.
- Pequeños mensajes: No permiten activos o medios grandes en la red, solo notificaciones pequeñas: hasta 12 bytes ascendentes y 8 bytes descendentes.
- Complementariedad: Gracias al bajo costo y facilidad de configuración, también se puede usar Sigfox como una solución secundaria para cualquier otro tipo de red, como: WiFi, Bluetooth, GPRS, etc.

Como se puede observar en la figura 2.2 El ciclo de vida de un mensaje de Sigfox es siguiente:

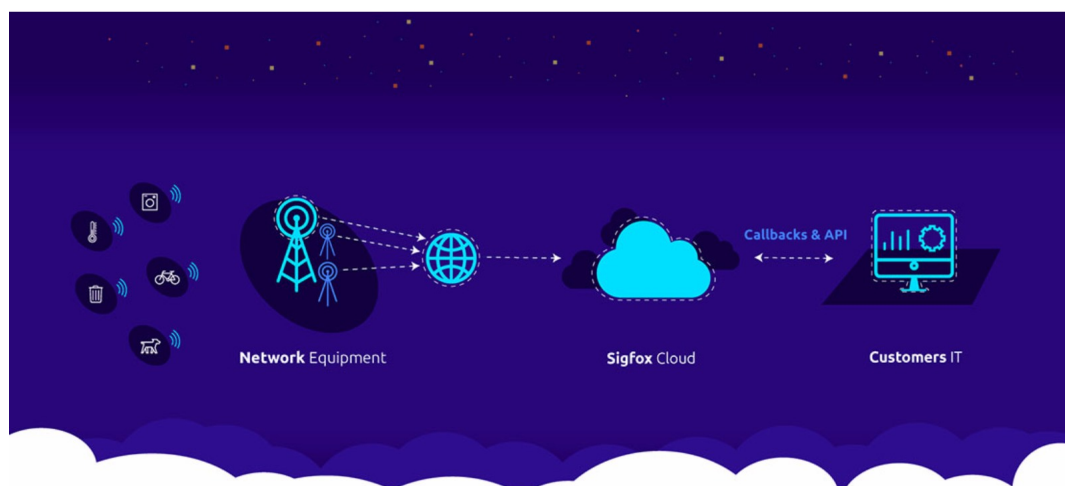
1. Un dispositivo se despierta y emite un mensaje usando su antena de radio,
2. Múltiples estaciones base de Sigfox en el área reciben el mensaje,
3. Las estaciones base envían el mensaje a la nube de Sigfox,
4. La nube de Sigfox envía el mensaje a la plataforma de el cliente.

Sigfox utiliza la tecnología de radio UNB y opera en las bandas sin licencia ISM (*industrial, scientific and medical*) para intercambiar mensajes de radio a través del aire en las frecuencias 868 MHz y 902-928 MHz. En cada país, las bandas ISM están bajo el control de las regulaciones locales, que definen restricciones técnicas para el uso del espectro, Sigfox tiene definidas configuraciones de radio que cumplan con las regulaciones locales.

Sigfox combina UNB con modulación DBPSK (*differential binary phase shift keying*), este un método de transmisión de radio estándar que toma fragmentos de espectro muy estrechos y cambia la fase de la onda de radio portadora para codificar los datos. Esto permite que el receptor solo escuche en una pequeña porción de espectro, lo que mitiga el efecto del ruido. cada mensaje tiene un ancho de 100 Hz y se transfiere a una velocidad de 100 o 600 bits por segundos, dependiendo de la región [RSpec].

---

<sup>1</sup><https://build.sigfox.com/sigfox>

FIGURA 2.2: Ciclo de vida de un mensaje en Sigfox<sup>1</sup>.

Tiene una funcionalidad bidireccional, pero la capacidad para ir desde la estación base hasta el dispositivo final está restringida, y tendrá menos presupuesto de enlaces que hacia abajo. Esto se debe a que la sensibilidad del receptor en el dispositivo final no es tan buena como en la estación base.

Sigfox tiene una red de cobertura global, que opera en la banda ISM en todo el mundo, las operaciones globales se dividen actualmente en seis zonas geográficas, cada zona tiene un conjunto diferente de parámetros que acotan claramente la implementación del hardware del dispositivo, principalmente rango de frecuencia y potencia máxima irradiada. En la tabla 2.2 se puede observar algunos de estos parámetros [RConfig].

TABLA 2.1: Frecuencias según zonas

	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6
Frecuencia central <i>uplink</i> ( MHz)	868.130	902.200	923.200	920.800	923.300	865.200
Frecuencia central <i>downlink</i> ( MHz)	869.525	905.200	922.200	922.300	922.300	866.300
Velocidad de datos <i>uplink</i> ( bits/s)	100	600	100	600	100	100
Velocidad de datos <i>downlink</i> ( bits/s)	600	600	600	600	600	600
EIRP (dBm)	16	24	16	24	14	16

Las 6 zonas actuales con la configuración de radio de Sigfox son:

- RC1:
  - Europa: Bélgica, Croacia, República Checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Hungría, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Malta, Países Bajos, Noruega, Polonia, Portugal, Eslovaquia, España, Suecia, Suiza, Reino Unido.
  - Francia de ultramar: Guayana Francesa, Polinesia Francesa, Guadalupe, Martinica, Mauricio, Mayotte, Nueva Caledonia, Reunión.



- Oriente Medio y África: Irán, Kenia, Omán, Sudáfrica, Túnez, Emiratos Árabes Unidos.
- RC2: Brasil, Canadá, México, Puerto Rico, Estados Unidos.
- RC3: Japón
- RC4:
  - América Latina: Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Panamá, Perú, Uruguay.
  - Asia Pacífico: Australia, Hong Kong, Malasia, Nueva Zelanda, Singapur, Taiwán, Tailandia.
- RC5: Corea del Sur
- RC6: India

En la figura 2.3 se puede observar el mapa de cobertura de Sigfox.

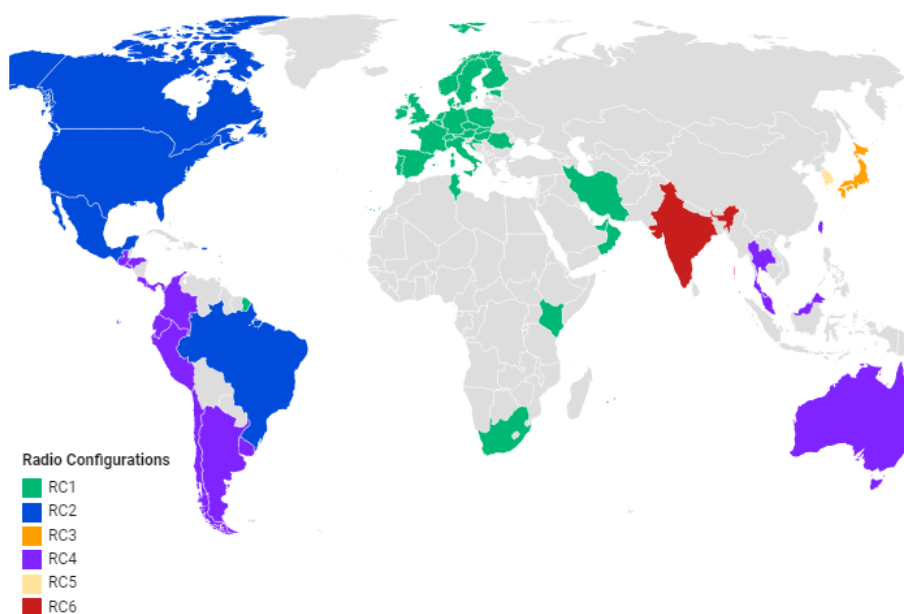


FIGURA 2.3: Disponibilidad geográfica de Sigfox<sup>2</sup>.

La Certificación Sigfox es el reconocimiento de la conformidad de un dispositivo con las especificaciones de certificación Sigfox para garantizar la compatibilidad con los servicios Sigfox y el rendimiento nominal en la red. La certificación Sigfox *Ready* es obligatoria para que cualquier dispositivo esté conectado a la red Sigfox, con la excepción de las soluciones de desarrollo ( prototipos).

Sigfox requiere la certificación para los dispositivos que desean comunicarse en la red Sigfox. Esto es para garantizar la interoperabilidad y la prestación de servicios a un nivel de rendimiento nominal. Al finalizar el proceso de certificación, Sigfox otorga un certificado al cliente. Este certificado es necesario para registrar cualquier dispositivo del mismo modelo en la red Sigfox.

La certificación Sigfox *Ready* se clasifica en clases, en la siguiente tabla 1.1 se observan las características[CertificationSigfox].

<sup>2</sup><https://build.sigfox.com/sigfox-radio-configurations-rc>

TABLA 2.2: Características de certificación (Sigfox Device Class)

Device Class	Device EIRP		
	RC1, RC3	RC2, RC4	RC5
0u	$\geq 12$ dBm	$\geq 20$ dBm	$\geq 10$ dBm
1u	$\geq 7$ and $<12$ dBm	$\geq 15$ and $<20$ dBm	$\geq 5$ and $<10$ dBm
2u	$\geq 2$ and $<7$ dBm	$\geq 10$ and $<15$ dBm	$\geq 0$ and $<5$ dBm
3u	$<2$ dBm	$<10$ dBm	$<0$ dBm

La figura 2.4 muestra la prioridad de las clases, siendo clase 0u la de mayor potencia de transmisión[CertificationSigfox].

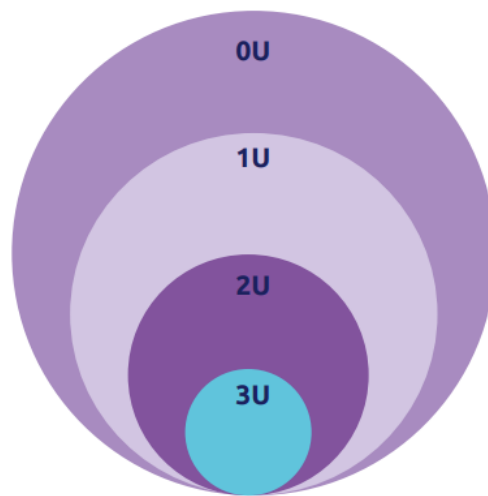


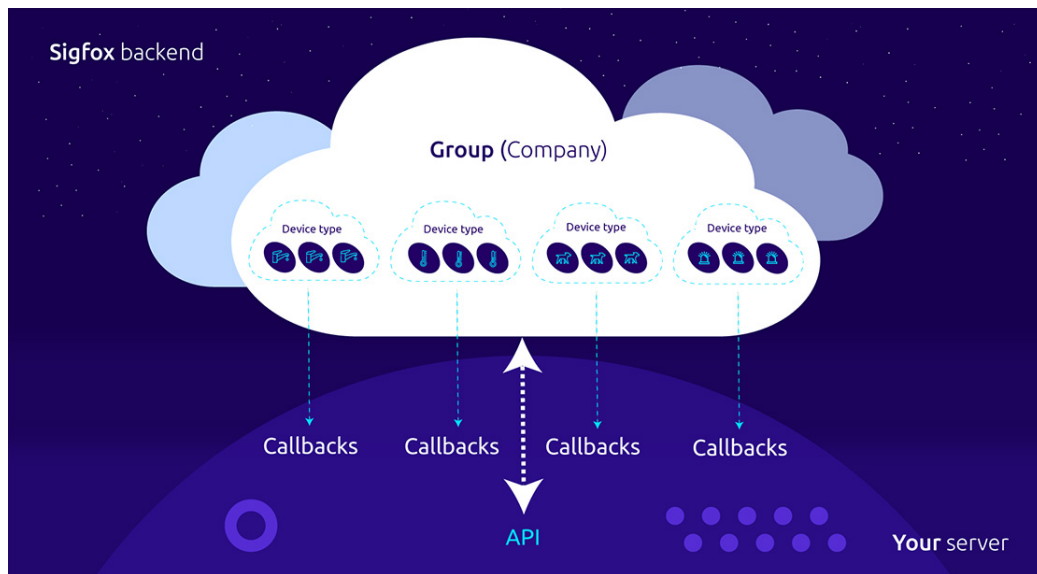
FIGURA 2.4: Potencia según clases.

Sigfox se basa en una infraestructura privada de antenas y servidores, la red es desplegada por un operador local, En América es la empresa WND group (Wireless Network Development) , la cual se encuentra en Colombia, Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Mexico, Panamá y United Kingdom. También existen los canales que son los encargados de consumir y ofrecer el servicio que brinda WND [SigfoxCoverage].

La información se maneja en un servidor Sigfox *back-end* donde el usuario tiene la posibilidad darle un tratamiento a la información a través de una interfaz API (Application Programming Interface). En la plataforma de Sigfox, una empresa suele estar representada por un "Grupo", que contiene "Tipo de dispositivo". Cada tipo de dispositivo puede atribuirse a una "familia" de dispositivos como se observa en la figura 2.5. Todas las unidades del mismo producto se agruparán como un tipo de dispositivo para permitir que todas se comporten exactamente de la misma manera cuando la red Sigfox recibe un mensaje.

Sigfox basa su modelo de negocio en conectividad, ofrece servicios de comunicación seguros, bidireccionales y listos para usar, para conectar los dispositivos a la nube. Existen planes de conectividad anuales que difieren en la cantidad de

<sup>3</sup><https://build.sigfox.com/backend-callbacks-and-api>

FIGURA 2.5: Diagrama Sigfox *back-end* <sup>3</sup>

mensajes que pueden transmitir al día, máximo 140 mensajes *uplink* y 4 mensajes *downlink*. Los mensajes de bajada (*downlink*) siempre están precedidos por un mensaje ascendente, en cualquier otro momento que el servidor quiera enviar un mensaje descendente debe esperar hasta la siguiente transmisión de un mensaje ascendente (*uplink*).

### 2.2.2. LoRa

LoRa, el cual es el acrónimo de "Long Range", es un sistema de comunicaciones inalámbricas de largo alcance, originalmente fue desarrollada por Semtech y actualmente es promovida por LoRa Alliance.

LoRa esta basada en dos capas distintas, como se puede observar en la figura 2.6:

1. Capa física que utiliza la técnica de modulación de radio CSS (*Chirp Spread Spectrum*)[CSS].
2. LoRaWAN un protocolo de capa MAC (*Medium Acces Control*).

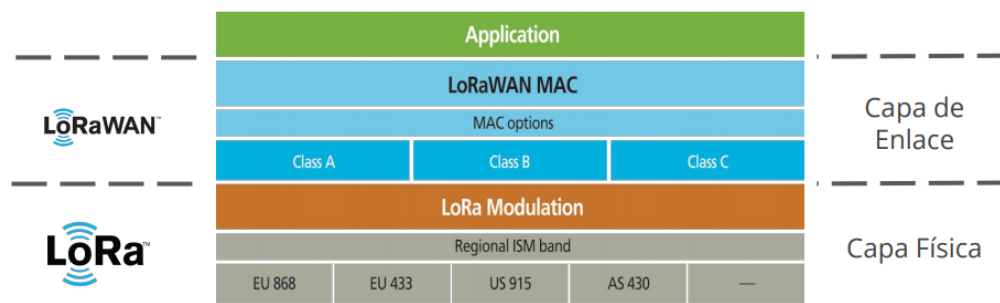


FIGURA 2.6: LoraWan Stack[LoRaAlliance2015].

La capa física LoRa, permite aplicaciones de largo alcance, baja potencia y comunicaciones de bajo rendimiento. Opera en las bandas ISM de 433 MHz, 868 MHz o 915 MHz, esto depende de la región en la que se despliegue la red. La carga útil de

cada transmisión puede oscilar entre 2 y 255 octetos, la velocidad de datos puede alcanzar hasta 50 Kbps cuando se emplea la adición de canales. Esta técnica de modulación es una tecnología patentada por Semtech[FEHRI20181096].

LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red mientras que la capa física LoRa permite el enlace de comunicación de largo alcance. El protocolo y la arquitectura de red tienen la mayor influencia para determinar la duración de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad, y la variedad de aplicaciones servidas por la red.

La arquitectura red es una topología estrella de largo alcance (*star-of-stars*) en la que las puertas de enlace (*gateways*) retransmiten los mensajes de los dispositivos finales. Es decir los nodos no están asociados con una puerta de enlace específica. En lugar, los datos transmitidos por un nodo normalmente son recibidos por múltiples puertas de enlace. Cada puerta de enlace reenviará el paquete recibido desde el nodo final al servidor de red a través de una interfaz de red de retorno (*backhaul*) (ya sea 3G, Ethernet, satélite o WiFi). Ver figura 2.7.

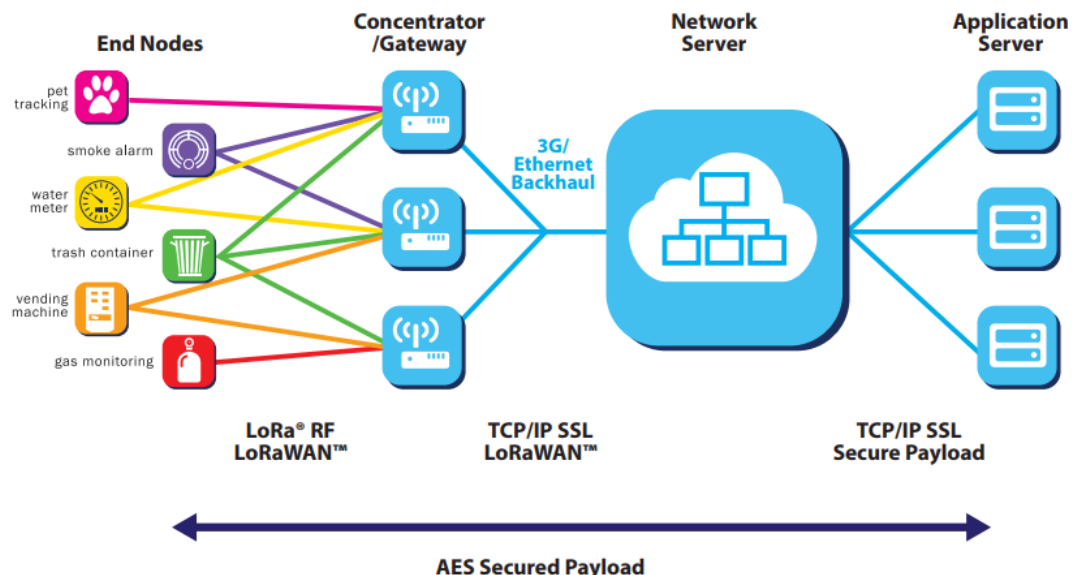


FIGURA 2.7: LoRa arquitectura de red[LoRaAlliance2015].

La comunicación entre los nodos generalmente es bidireccional, la puerta de enlace se distribuye en diferentes frecuencias, canales y tarifas de datos. Las tasas de datos de LoRa varían de 0.3 Kbps a 50Kbps, Para maximizar la duración de batería de los dispositivos finales como la capacidad general de la red, la red LoRa gestiona la velocidad de datos y la salida de RF para cada dispositivo final individualmente[Specification2015].

Los dispositivos finales pueden transmitir en cualquier canal disponible en cualquier momento, siempre y cuando se respeten las siguientes reglas:

- El dispositivo final cambia el canal de forma pseudoaleatoria para cada transmisión. La diversidad de frecuencia resultante hace que el sistema sea más robusto para interferencias.
- El dispositivo final respeta el ciclo de trabajo de transmisión máximo en relación con los reglamentos de la sub-banda usados y locales.

- El dispositivo final respeta la duración máxima de transmisión (o tiempo de permanencia) en relación con la sub-banda utilizada y las normativas locales.

LoRAWAN Clases :

La red LoRa distingue entre tres clases bidireccionales: clase A, clase B, clase C. estas tres clases se usan para diferentes aplicaciones y tienen una variedad de requisitos para optimizar una variedad de aplicaciones finales. Las clases intercambian la latencia de comunicación del enlace descendente frente a la duración de la batería. ver figura 2.8.

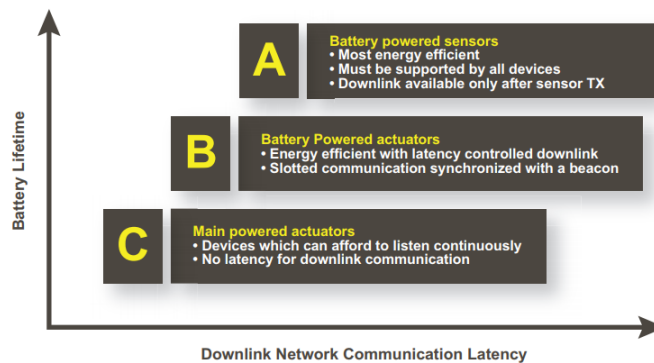


FIGURA 2.8: LoraWan clases[LoRaAlliance2015].

- Clase A, bidireccional: los dispositivos finales de Clase A pueden programar una transmisión de enlace ascendente en función de las necesidades propias con una pequeña variación basada en una base de tiempo aleatorio (ALOHA -type of protocol)., esta clase de dispositivos permite comunicaciones bidireccionales, por lo que a cada transmisión de enlace ascendente le siguen dos ventanas cortas de recepción. La transmisión del enlace descendente desde el servidor en cualquier otro momento tiene que esperar hasta que ocurra la siguiente transmisión de enlace ascendente. Los dispositivos de clase A tienen el menor consumo de energía, pero también ofrecen menos flexibilidad en las transmisiones de enlace descendente. Ver figura 2.9.
- Clase B, bidireccional con ranuras de recepción programadas: Los dispositivos finales de Clase B tienen ventanas extras de recepción abiertas a unas horas programadas. Por lo tanto, se requiere una baliza sincronizada desde el servidor, de modo que El servidor pueda saber cuándo está escuchando el dispositivo final. Ver figura 2.10.
- Clase C, bidireccional con ranuras de recepción máximas: los dispositivos finales de Clase C tienen casi todo el tiempo ventanas de recepción continuas, de esta forma tienen el máximo consumo de energía. Ver figura 2.11.

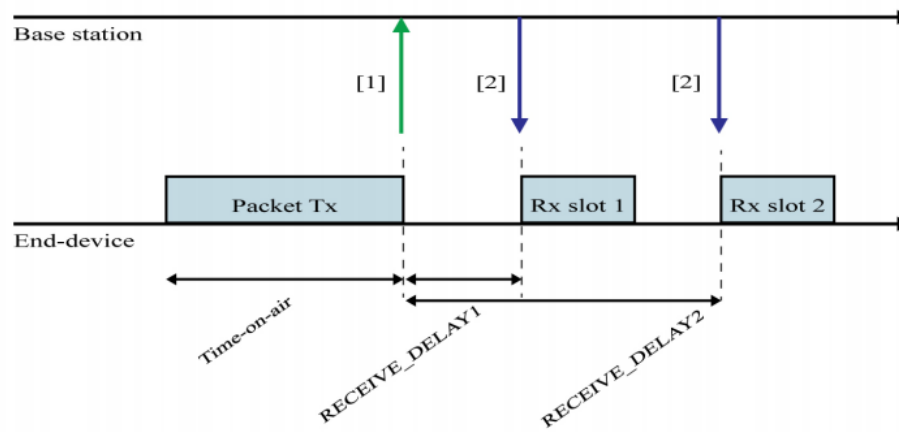


FIGURA 2.9: Clase A [Ruano2016].

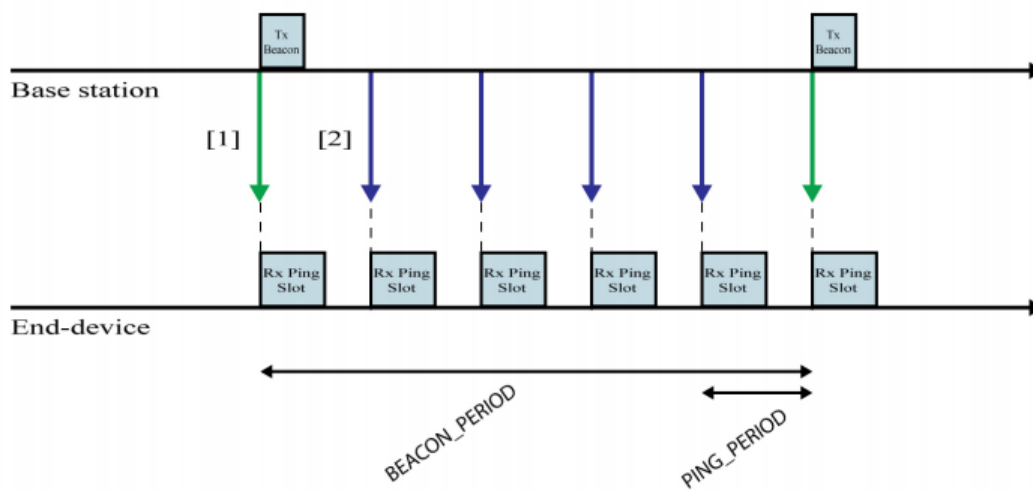


FIGURA 2.10: Clase B [Ruano2016].

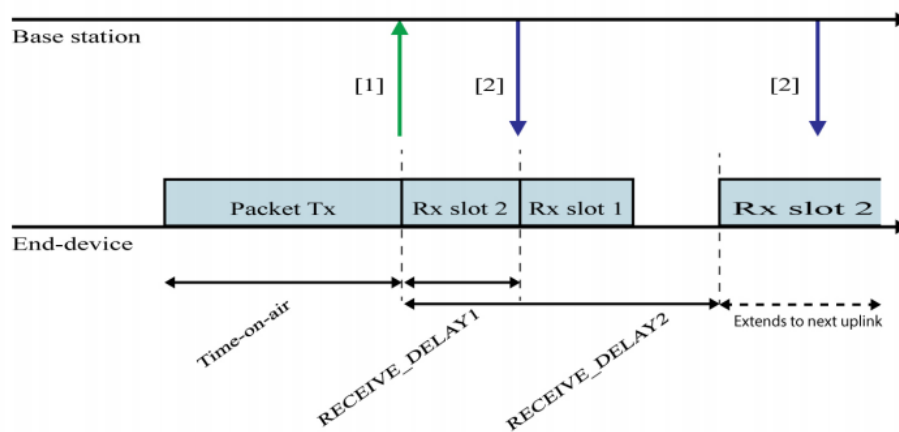


FIGURA 2.11: Clase C [Ruano2016].

## Capítulo 3

# Diseño e Implementación

### 3.1. Módulos del sistema de hardware

En el presente capítulo se realiza una explicación detallada de los módulos del hardware, tecnologías usadas, y el diseño e implementación del firmware.

#### 3.1.1. Hardware

En esta sección se explican todos los módulos de hardware que componen el prototipo del proyecto.

En la figura 3.1 se puede observar la jerarquía del diagrama esquemático de todo el hardware.

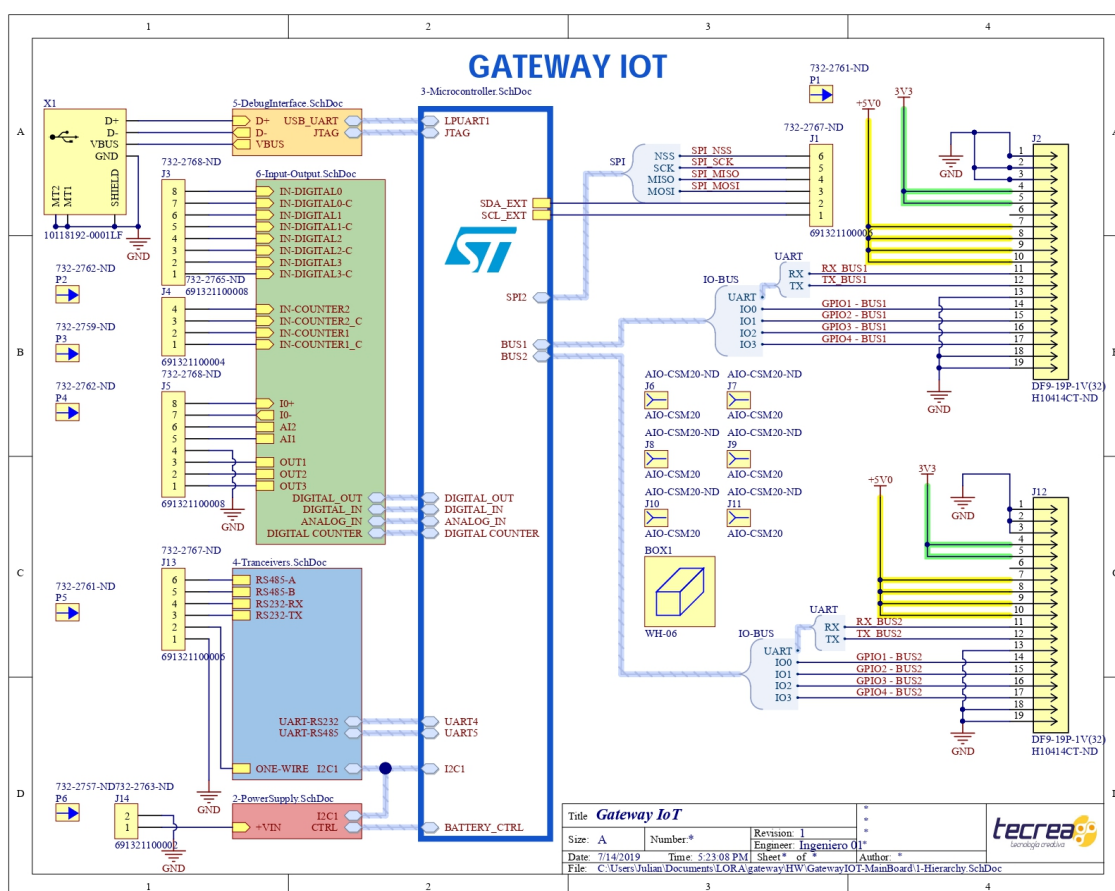


FIGURA 3.1: Jerarquía del hardware.

**Microcontrolador:**

- *Ultra low power ARM Cortex®-M4 CPU with FPU*
- SRAM 256 KB
- Flash 1M
- 30 nA *Shutdown mode (5 wakeup pins)*
- 120 nA *Standby mode (5 wakeup pins)*
- 420 nA *Standby mode with RTC*
- 3x I2C FM+(1 Mbit/s), SMBus/PMBus
- 6x USARTs
- 3x SPIs
- 14-channel DMA controller
- 16 x *timers: 2 x 16-bit advanced motor-control, 2 x 32-bit and 5 x 16-bit general purpose, 2x 16-bit basic, 2x low-power 16-bit timers (available in Stop mode), 2x watchdogs, SysTick timer*
- *Up to 114 fast I/Os, most 5 V-tolerant, up to 14 I/Os with independent supply down to 1.08 V*

**Modulo Sigfox**

El módulo para la comunicación Sigfox desarrollado por la empresa WISOL, opera en 2 zonas con frecuencia distinta, la cual puede ser configurable por software.

- WISOL WSSFM11R2D <sup>1</sup>
- *RF Frequency RC2 transmisión 902.2 MHz.*
- *RF Frequency RC2 recepción 905.2 MHz.*
- *RF Frequency RC4 transmisión 920.8 MHz.*
- *RF Frequency RC4 recepción 922.3 MHz.*
- potencia de Transmisión 22.5 dBm.
- 2.5 uA en modo *sleep*.

En la figura 3.2 se observa el diagrama esquemático del hardware asociado al modulo Sigfox.

**Modulo Lora**

El módulo para la comunicación LoRa, es fabricado por la empresa Microchip Technology.

- RN2903 <sup>2</sup>clase A.
- Opera en la banda de frecuencia de 915 MHz
- modulación FSK, GFSK.

---

<sup>1</sup><https://usermanual.wiki/WISOL/SFM11R2D>





### Entradas analógicas

En la figura 3.4 se puede observar el diagrama esquemático de las entradas analógicas, los valores de las resistencias se escogieron de acuerdo a los niveles de tensión y de corriente de las entradas (0-5VDC, 0-10VDC, 4-20mA) y el máximo voltaje permitido por el microcontrolador 3.3V. Todas las entradas analógicas tienen amplificadores en modo seguidor para acoplar impedancias y diodos TVS a la salida para garantizar los niveles de tensión máximo (3.3VDC).

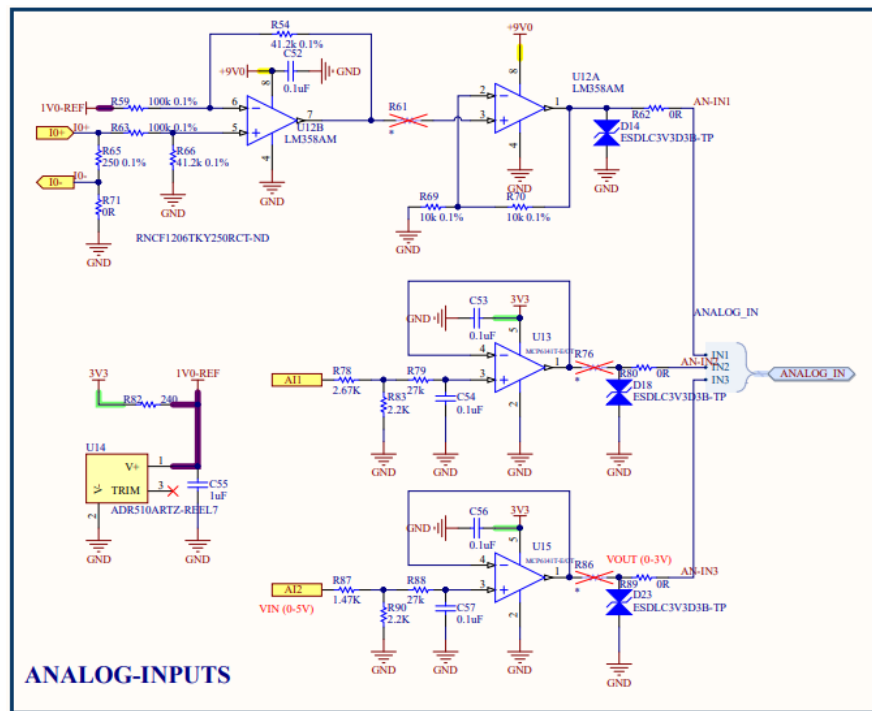


FIGURA 3.4: Esquemático entradas analógicas.

### Entradas digitales

En la figura 3.5 se puede observar el diagrama esquemático de las entradas digitales, estas se encuentran opto-aisladas y funcionan con niveles de voltaje entre 3.3VDC a 24VDC.

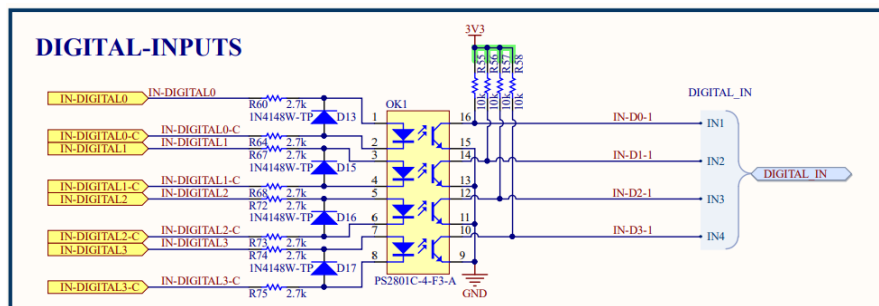


FIGURA 3.5: Esquemático entradas analógicas.

Antena :

- 3.1.2. Sintonización y verificación de la antena.**
- 3.1.3. Desarrollo de la capa de manejadores de dispositivos(*driver*).**
- 3.1.4. Diseño del firmware**
- 3.1.5. Implementación del firmware y herramientas a usar.**



## Capítulo 4

# Ensayos y Resultados

### 4.1. Pruebas unitarias de manejadores de dispositivos (*driver*)

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.

### 4.2. Pruebas funcionales sobre el prototipo.

### 4.3. Pruebas de integración.



## Capítulo 5

# Conclusiones

### **5.1. Conclusiones generales dle trabajo realizado.**

La idea de esta sección es resaltar cuáles son los principales aportes del trabajo realizado y cómo se podría continuar. Debe ser especialmente breve y concisa. Es buena idea usar un listado para enumerar los logros obtenidos.

### **5.2. Trabajo futuro.**

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.