

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. Objetivos y alcance . . . . .	1
1.2.1. Objetivo . . . . .	1
1.2.2. Alcance . . . . .	2
1.3. IoT ( <i>internet of things</i> ) . . . . .	2
1.4. Tecnologías de comunicación . . . . .	2
<b>2. Introducción Específica</b>	<b>5</b>
2.1. Estructura general del sistema . . . . .	5
2.2. Requerimientos . . . . .	6
2.2.1. Sigfox . . . . .	7
2.2.2. Lora . . . . .	7
2.2.3. Figuras . . . . .	7
2.2.4. Ecuaciones . . . . .	8
<b>3. Diseño e Implementación</b>	<b>9</b>
3.1. Módulos del sistema de hardware . . . . .	9
3.1.1. Selección de tecnologías a usar. . . . .	10
3.1.2. Sintonización y verificación de la antena. . . . .	10
3.1.3. Desarrollo de la capa de manejadores de dispositivos( <i>driver</i> ). . . . .	10
3.1.4. Diseño del firmware . . . . .	10
3.1.5. Implementación del firmware y herramientas a usar. . . . .	10
<b>4. Ensayos y Resultados</b>	<b>11</b>
4.1. Pruebas unitarias de manejadores de dispositivos ( <i>driver</i> ) . . . . .	11
4.2. Pruebas funcionales sobre el prototipo. . . . .	11
4.3. Pruebas de integración. . . . .	11
<b>5. Conclusiones</b>	<b>13</b>
5.1. Conclusiones generales dle trabajo realizado. . . . .	13
5.2. Trabajo futuro. . . . .	13





# Índice de figuras

2.1. Diagrama general del sistema. . . . .	5
2.2. Imagen tomada de la página oficial del procesador <sup>1</sup> . . . . .	7
2.3. El lector no sabe por qué de pronto aparece esta figura. . . . .	7



# Índice de Tablas

1.1. Redes de comunicación . . . . .	3
--------------------------------------	---



*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.

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 optima trazabilidad de la misma o simplemente se pierde esta información. Cuando los procesos críticos fallan, necesitan una reacción inmediata por parte de una persona y esto nos 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 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. Objetivos y alcance

#### 1.2.1. 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.

### 1.2.2. 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.

## 1.3. 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. IoT hace que estas conexiones sean posibles. 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 domóticas, *smart cities*, *smart manufacturing*[taylor2015world]. IoT puede hacernos sentir más cómodos en nuestros hogares y en nuestras ciudades.

## 1.4. 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:**

Introducción corta de que es ...

#### **Tecnología Wifi:**

Introducción corta de que es ...

#### **Tecnología BLE:**

Introducción corta de que es ...

#### **Tecnología ZigBee:**

Introducción corta de que es ...



## Capítulo 2

# Introducción Específica

En este capítulo se muestra 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*) para que el sistema pueda 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.

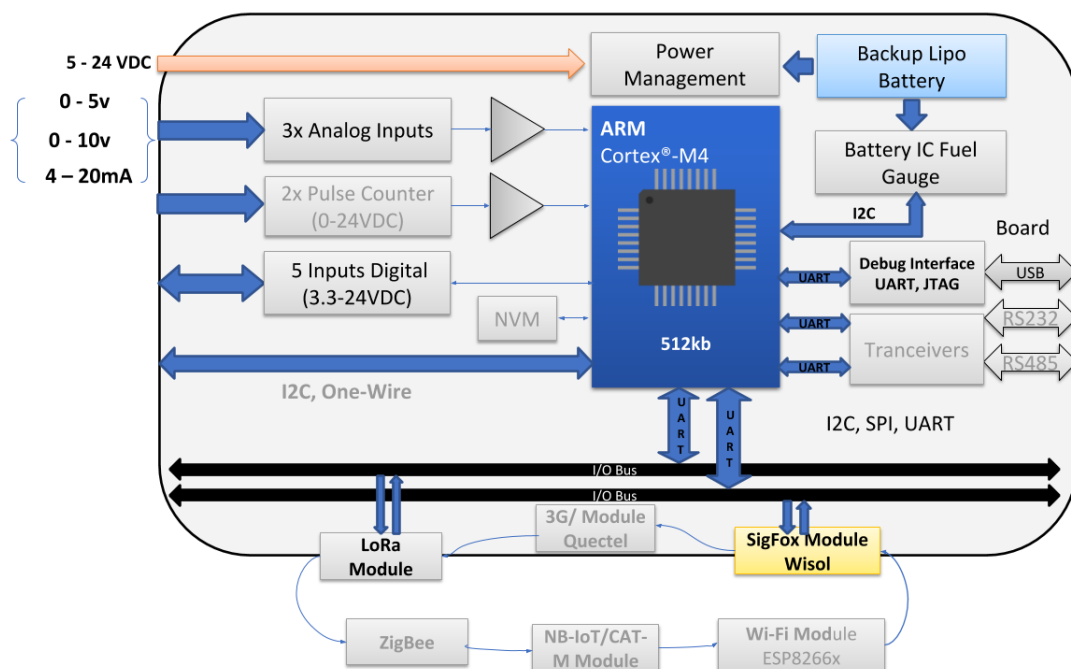


FIGURA 2.1: Diagrama general del sistema.

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 tubo en cuenta 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 M0+ o 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 días.
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 cinco (5) 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. Transmisiones Uplink al backend de sigfox máximo 50 mensajes por día.
3. 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 externa.

### 2.2.1. Sigfox

Contexto y explicación completo de que es Sigfox... Contexto y explicación completo de que es Sigfox... Contexto y explicación completo de que es Sigfox...

### 2.2.2. Lora

Contexto y explicación completo de que es Lora...

Si se desea indicar alguna página web utilizar el siguiente formato de referencias bibliográficas, dónde las referencias se detallan en la sección de bibliografía de la memoria, utilizado el formato establecido por IEEE en [IEEE:citation]. Por ejemplo, “el presente trabajo se basa en la plataforma EDU-CIAA-NXP, la cual se describe en detalle en [CIAA]”.

### 2.2.3. Figuras

La forma correcta de utilizar una figura es la siguiente: “Se eligió utilizar un cuadrado azul para el logo, el cual se ilustra en la figura 2.1”.

El texto de las figuras debe estar siempre en español, excepto que se decida reproducir una figura original tomada de alguna referencia. En ese caso la referencia de la cual se tomó la figura debe ser indicada en el epígrafe de la figura e incluida como una nota al pie, como se ilustra en la figura 2.2.



FIGURA 2.2: Imagen tomada de la página oficial del procesador<sup>1</sup>.

La figura y el epígrafe deben conformar una unidad cuyo significado principal pueda ser comprendido por el lector sin necesidad de leer el cuerpo central de la memoria. Para eso es necesario que el epígrafe sea todo lo detallado que corresponda y si en la figura se utilizan abreviaturas entonces aclarar su significado en el epígrafe o en la misma figura.



FIGURA 2.3: El lector no sabe por qué de pronto aparece esta figura.

<sup>1</sup><https://goo.gl/images/i7C70w>

Nunca colocar una figura en el documento antes de hacer la primera referencia a ella, como se ilustra con la figura 2.3, porque sino el lector no comprenderá por qué de pronto aparece la figura en el documento, lo que distraerá su atención.

#### 2.2.4. Ecuaciones

Al insertar ecuaciones en la memoria estas se deben numerar de la siguiente forma:

$$ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1 - k\sigma^2} + \sigma^2 [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2] \right) \quad (2.1)$$

Es importante tener presente que en el caso de las ecuaciones estas pueden ser referidas por su número, como por ejemplo “tal como describe la ecuación 2.1”, pero también es correcto utilizar los dos puntos, como por ejemplo “la expresión matemática que describe este comportamiento es la siguiente:”

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\mathbf{r})\Psi = -i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2.2)$$

Para las ecuaciones se debe utilizar un tamaño de letra equivalente al utilizado para el texto del trabajo, en tipografía cursiva y preferentemente del tipo Times New Roman o similar. El espaciado antes y después de cada ecuación es de aproximadamente el doble que entre párrafos consecutivos del cuerpo principal del texto. Por suerte la plantilla se encarga de esto por nosotros.

Para generar la ecuación 2.1 se utilizó el siguiente código:

```
\begin{equation}
\label{eq:metric}
ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1-k\sigma^2} +
\sigma^2 \left[ d\theta^2 +
\sin^2 \theta d\phi^2 \right] \right)
\end{equation}
```

Y para la ecuación 2.2:

```
\begin{equation}
\label{eq:schrodinger}
\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\mathbf{r})\Psi =
-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}
\end{equation}
```

## Capítulo 3

# Diseño e Implementación

### 3.1. Módulos del sistema de hardware

La idea de esta sección es resaltar los problemas encontrados, los criterios utilizados y la justificación de las decisiones que se hayan tomado.

Se puede agregar código o pseudocódigo dentro de un entorno `lstlisting` con el siguiente código:

```
\begin{lstlisting}[caption= "un epígrafe descriptivo"]
```

las líneas de código irían aquí...

```
\end{lstlisting}
```

A modo de ejemplo:

```

1  #define MAX_SENSOR_NUMBER 3
2  #define MAX_ALARM_NUMBER 6
3  #define MAX_ACTUATOR_NUMBER 6
4
5  uint32_t sensorValue[MAX_SENSOR_NUMBER];
6  FunctionalState alarmControl[MAX_ALARM_NUMBER]; //ENABLE or DISABLE
7  state_t alarmState[MAX_ALARM_NUMBER]; //ON or OFF
8  state_t actuatorState[MAX_ACTUATOR_NUMBER]; //ON or OFF
9
10 void vControl() {
11
12     initGlobalVariables();
13
14     period = 500 ms;
15
16     while(1) {
17
18         ticks = xTaskGetTickCount();
19
20         updateSensors();
21
22         updateAlarms();
23
24         controlActuators();
25
26         vTaskDelayUntil(&ticks, period);
27     }
28 }
```

ALGORITMO 3.1: Pseudocódigo del lazo principal de control.

- 3.1.1. Selección de tecnologías a usar.**
- 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.