



FACULTAD DE INGENIERIA

Universidad de Buenos Aires

CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

**Sistema de sensores autónomos para
monitoreo de redes de distribución de
baja tensión mediante LoRaWAN**

Autor:
Ing. Milton Eduardo Sosa

Director:
Ing. Marcelo Romeo (UNSaM)

Jurados:
Ing. Gustavo Mercado (UTN-FRM)
Dr. Ing. Javier Kolodziej (UNaM-FIO)
Ing. Gerardo Sager (UNLP)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad de Munich, Alemania,
entre Junio de 2020 y Abril de 2021.*

Resumen

En la presente memoria se describe el desarrollo e implementación de un sistema cuya función es determinar valores eficaces de corriente alterna en sistemas metropolitanos de distribución de energía eléctrica en baja tensión. Además, es capaz de reportar estados a un centro de operaciones mediante el uso de una red LoRaWAN de acceso público e implementa el uso de tecnologías alternativas de acumulación de energía.

El sistema desarrollado otorga mayor granularidad de información sobre el estado de operación de las redes eléctricas, brindando información valiosa sobre eventos recurrentes, en pro de delinejar acciones correctivas y/o preventivas para mejorar la calidad de servicio.

Agradecimientos

A mi familia, director y colaboradores.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| Resumen | I |
| 1. Introducción general | 1 |
| 1.1. Estaciones transformadoras | 1 |
| 1.2. Medidores de energía | 1 |
| 1.3. Estado del arte y problemática identificada | 2 |
| 1.4. Objetivos y alcance | 5 |
| 1.4.1. Objetivo general | 5 |
| 1.4.2. Objetivos específicos | 5 |
| 1.4.3. Alcances | 5 |
| 2. Introducción específica | 7 |
| 2.1. Diagrama de bloques general del sistema | 7 |
| 2.2. Requerimientos acordados con el cliente | 8 |
| 2.3. Componentes principales del hardware | 10 |
| 2.3.1. Transformador de corriente | 10 |
| 2.3.2. Circuito de selección | 11 |
| 2.3.3. Conversión de energía | 11 |
| 2.3.4. Supercapacitor como acumulador de energía | 11 |
| 2.3.5. Elevación de tensión mediante un conversor DC/DC | 13 |
| 2.3.6. Microcontrolador y firmware | 13 |
| 2.4. Componentes principales del software | 13 |
| 2.4.1. Red LoRaWAN | 13 |
| 2.4.2. Motor de base de datos | 15 |
| 2.4.3. Interfaz gráfica de usuario | 15 |
| 3. Diseño e implementación | 17 |
| 3.1. Diseño del hardware por etapas | 17 |
| 3.1.1. Circuito de selección de modo | 17 |
| 3.1.2. Puente rectificador de onda completa | 18 |
| 3.1.3. Acumulador de energía basado en supercapacitores | 19 |
| 3.1.4. Circuito de detección de cortes | 20 |
| 3.1.5. Circuito de apagado y encendido mediante load switch | 21 |
| 3.1.6. Transformador de Intensidad | 21 |
| 3.1.7. Circuito de medición de valor RMS de corriente y acondicionamiento de señal | 22 |
| 3.1.8. Monitoreo de tensión en bornes del acumulador | 24 |
| 3.1.9. Etapa de conversión analógica digital | 25 |
| 3.2. Firmware implementado | 26 |
| 3.2.1. Lógica de negocios y patrón arquitectónico adoptado | 26 |
| 3.2.2. Inicialización de periféricos | 27 |
| 3.2.3. Medición | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.4. Compresión de las mediciones y transmisión a través de LoRa | 27 |
| 3.2.5. Modo ahorro de energía e interrupciones | 28 |
| 3.3. Servicios de Backend | 29 |
| 3.3.1. Integración de la red LoRaWAN | 29 |
| 3.3.2. Base de datos | 30 |
| 3.3.3. Interfaz gráfica basada en Grafana | 31 |
| 4. Ensayos y resultados | 33 |
| 4.1. Circuito impreso desarrollado | 33 |
| 4.2. Medidor de valor RMS | 34 |
| 4.3. Circuito detector de cortes | 35 |
| 4.4. Consumo en deep sleep | 35 |
| 4.5. Autonomía del supercapacitor | 35 |
| 4.6. Ensayo end-to-end | 36 |
| 5. Conclusiones | 37 |
| 5.1. Conclusiones generales | 37 |
| 5.2. Trabajo a futuro | 38 |
| A. Código en PHP encargado de recibir peticiones POST y almacenar en la base de datos | 39 |
| Bibliografía | 41 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 1.2. Medidor de energía digital con complemento para telemedición mediante GSM. Imagen tomada de [2]. | 3 |
| 1.3. Fusible seccionador aéreo tipo NH usualmente utilizado en líneas de distribución de baja tensión. | 3 |
| 1.4. Un árbol caído sobre las líneas de distribución aéreas de baja tensión luego de una breve tormenta en la ciudad de Posadas, Misiones. Imagen tomada de [3]. | 4 |
| | |
| 2.1. Diagrama de bloques del hardware para el nodo a instalar <i>in situ</i> | 7 |
| 2.2. Diagrama de bloques del firmware implementado y su interacción con la red LoRaWAN y los servicios de backend. | 8 |
| 2.3. Circuito de medición indirecta de corriente mediante un transformador de corriente [10]. | 10 |
| 2.4. Pinout del relay HF115F/005-2ZS4A (izquierda) y su encapsulado (derecha). Imágenes tomadas de [11]. | 11 |
| 2.5. Simulación de rectificadores basados en diodos y MOSFET. Imágenes tomadas de [12]. | 12 |
| 2.6. Módulo comercial DC/DC en topología boost utilizado para alimentar la electrónica. | 13 |
| 2.7. Placa de desarrollo LoPy 4 [17]. | 14 |
| 2.8. Arquitectura de una red LoRaWAN y sus posibles integraciones con terceras partes [19]. | 14 |
| 2.9. Topología de una red LoRaWAN y la interacción entre los diferentes miembros [19]. | 15 |
| 2.10. Interfaz gráfica que muestra los datos capturados de cada nodo del sistema. | 16 |
| | |
| 3.1. Circuito selector de modo basado en el relay HF115-005-2ZS4. | 18 |
| 3.2. Pinout y esquemático interno del DMHC3025 [24]. | 18 |
| 3.3. Etapa de rectificación, filtrado y acumulación implementada. | 19 |
| 3.4. Banco de supercapacitores de 500 F x 2,7 V utilizado como acumulador. | 20 |
| 3.5. Circuito detector de cortes basado en el TLV3691 [26]. | 20 |
| 3.6. Circuito de encendido y apagado de las diferentes etapas de hardware mediante un load switch FPF2100 [27]. | 21 |
| 3.7. Transformador de intensidad de tipo núcleo partido y sus dimensiones. Imágenes tomadas de [28]. | 22 |
| 3.8. Circuito medidor de valor RMS implementado con el LTC1966. | 23 |
| 3.9. Circuito amplificador de la señal de salida del LTC1966. | 24 |
| 3.10. Divisor resistivo utilizado para medir la tensión en bornes del supercapacitor. | 25 |
| 3.11. Etapa de conversión analógico-digital basada en el ADS1015. | 25 |

| | |
|---|----|
| 3.12. Patrón adoptado para la implementación de la lógica de negocios del firmware. | 26 |
| 3.13. Ciclo de transmisión, ahorro de energía e interrupciones generadas por cortes. | 29 |
| 3.14. Tabla de la base de datos utilizada para guardar los datos de los nodos. | 30 |
| 3.15. Gráfico histórico de corrientes de fase. | 31 |
| 3.16. Panel de Worldmap presentando la lectura de corriente RMS por fase y la tensión del acumulador. | 32 |
| 4.1. Placa prototipo desarrollada para validacion de diseño de etapas. | 33 |
| 4.2. Lado TOP del circuito impreso final integrando todas las etapas. | 34 |
| 4.3. Lado BOTTOM del circuito impreso final que alberga todas las etapas. | 34 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| 2.1. Comparativa entre una batería y un supercapacitor para este proyecto. | 12 |
| 3.1. Características eléctricas de los transistores que forman parte del rectificador de onda completa. | 19 |
| 3.2. Características del CTSCM40-200/5 [28]. | 22 |
| 3.3. Tabla comparativa de chips aptos para medición RMS. | 23 |
| 3.4. Pines de la placa LoPy4 utilizados y los periféricos del ESP32 asociados. | 27 |
| 4.1. Consumo máximo registrado en los diferentes modos. | 35 |

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se introduce al lector a los elementos principales del entorno donde reside el sistema. Se expone la problemática identificada por el autor, los objetivos y alcances del proyecto.

1.1. Estaciones transformadoras

Se denomina estación transformadora al conjunto de equipos electromecánicos responsables de convertir la energía eléctrica variando uno o más de sus principales parámetros, que son tensión y corriente. Esta conversión se logra a través del componente más importante del conjunto, el transformador. La finalidad de convertir la energía eléctrica, que puede ser elevando o reduciendo el nivel de tensión, es poder transmitir y distribuir esa energía hacia los receptores que pueden ser consumidores finales tales como residencias familiares o polos industriales.

Por convención se denomina Estación Transformadora (E.T.) cuando en el proceso se ven involucrados valores considerados de alta tensión (mayor a 66 kV) y Subestación Transformadora (S.E.T.) en el caso de tensiones menores a 66 kV [1]. Para la distribución hacia los consumidores finales, se utilizan las denominadas Subestaciones Transformadoras Aéreas (S.E.T.A.) que convierten la tensión disminuyendo su valor de media a baja tensión.

Para poder obtener energía eléctrica a la salida en óptimas condiciones de calidad y disponibilidad, resulta fundamental administrar y controlar los valores intrínsecos que componen la transmisión y recepción de la misma. Esto se logra a través de instrumentos de medición de tensión y corriente, tanto a la entrada (alta tensión) como a la salida (media tensión) de la conversión. Por otro lado, con el fin de mantener y preservar los equipos electromecánicos se consideran de gran importancia otros valores físicos como temperatura y humedad.

1.2. Medidores de energía

Llegado el momento de entregar la energía al usuario final, es indispensable cuantificarla para luego comercializarla. Las distribuidoras del servicio utilizan medidores de energía electromecánicos o electrónicos, que registran en todo momento la energía acumulada que fluye por el mismo.



FIGURA 1.1. Medición indirecta de corriente empleando transformadores de corriente (TI).¹

La medición de corriente puede ser directa, vinculando los conductores de alimentación de la carga directamente al medidor o indirecta. Una medición indirecta consiste en reducir los valores de corriente de carga a través de transformadores de corriente (TI) y vincular sus secundarios al medidor **1.1**. Este último método se emplea en casos donde la corriente calculada supera el valor permitido por el medidor de energía, por lo que es necesario multiplicar el valor de la lectura por un coeficiente correspondiente a la relación de transformación del TI.

En la actualidad algunas prestadoras del servicio eléctrico han adoptado estrategias de medición inteligente similares a la presentada en la figura **1.2**. En este esquema los equipos de medición se reportan a centros de operación a través de una red de comunicaciones móvil, como por ejemplo GSM.

El concepto de telemedición aporta además de lo comercial, valiosa información técnica, ya que los centros de operaciones conocen en todo momento el estado del medidor con la posibilidad de detectar fallas o la interrupción del servicio eléctrico.

1.3. Estado del arte y problemática identificada

En Sudamérica, gran parte de las empresas distibuidoras de energía eléctrica y sus tercerizadas, basan parte de sus operaciones en el contacto directo con los usuarios finales mediante reclamos para informarse acerca de interrupciones en el servicio de distribución de energía eléctrica. Una vez recibido un reclamo, la prestadora de servicios envía al grupo de operaciones especializado a recorrer el área circundante al cliente y tratar de determinar el motivo de la interrupción del

¹Imagen tomada por el autor



FIGURA 1.2. Medidor de energía digital con complemento para telemetría mediante GSM. Imagen tomada de [2].

servicio.

Un hecho común en el nordeste Argentino y particularmente en la provincia de Misiones es la destrucción de fusibles aéreos como el presentado en la figura 1.3. Estos fusibles conectados inmediatamente a la salida de baja tensión y en serie con las líneas de distribución, cumplen la función de protección por sobrecorriente debido a picos de consumo o cortocircuitos causados por desastres naturales como el de la figura 1.4.



FIGURA 1.3. Fusible seccionador aéreo tipo NH usualmente utilizado en líneas de distribución de baja tensión.

Los fusibles involucrados poseen un elemento conductor en su interior por el cual circula la corriente de servicio. Dicho componente se funde al ser sometido a corrientes de falla o sobrecorrientes, interrumpiendo así el suministro.

Este esquema presentado, resulta aún precario y no efectivo en cuanto a la rapidez para determinar la localización geográfica donde se ha generado una falla, lo que resulta en una inferior calidad de servicio prestado al cliente.

Cabe mencionar que la mayoría de las redes de distribución de baja tensión en



FIGURA 1.4. Un árbol caído sobre las líneas de distribución aéreas de baja tensión luego de una breve tormenta en la ciudad de Posadas, Misiones. Imagen tomada de [3].

380/220V no poseen la capacidad de brindar algún otro servicio agregado. Como una manera de previsión a la necesidad de montar servicios adicionales, algunas redes de transmisión de media y alta tensión (33 kV y 132 kV) adicionan una infraestructura de fibra óptica por medio de un cable de guarda aéreo compuesto de acuerdo a estándares de IEEE (OPGW - Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire-). Ésta instalación combina las funciones de conexión a tierra y de comunicaciones, estableciendo una estructura tubular de varios pares de fibras ópticas en el mismo, rodeadas por capas de hilos de aluminio y acero. La parte conductora del cable sirve para unir las puestas a tierra de las estructuras adyacentes, protegiendo a estas de las descargas atmosféricas.

Las fibras ópticas dentro del cable se utilizan para la transmisión de datos a alta velocidad, ya sea para uso propio del sistema eléctrico de protección y control de la línea de transmisión, para la comunicación de voz y datos, o pueden ser alquilados o vendidos a terceros para servir como una interconexión de fibra de alta velocidad entre diferentes ciudades. En ciertas ocasiones, frente a condiciones climáticas extremas éstas instalaciones muestran cierta vulnerabilidad, lo que conlleva a un elevado costo de mantenimiento [4].

Lu, Liang, Li y Guo [4] y Sosa y Sosa [5], comparten la aplicación de un modelo de arquitectura de 3 capas para los sistemas smart grid compuesto por las capas física, red y aplicación. Dependiendo de donde residirá la aplicación y su objetivo final, surgen diferentes estrategias de control a ser implementadas. De la misma manera, la selección de sensores de diferente tipo (meteorológicos, estructurales, operacionales, etc.) está supeditada a la topología de red a implementar y modos de comunicación.

Las tecnologías emergentes propias de IoT tales como las redes de comunicación de baja potencia y largo alcance LPWAN [6], y las redes tipo malla se consideran como tecnologías disponibles y viables para proveer una infraestructura de comunicaciones a las redes de distribución metropolitanas [7]. Otros autores presentan sistemas de medición de temperatura autónomos utilizando transductores termoeléctricos y electromagnéticos para la conversión de energía térmica o electromagnética en energía eléctrica utilizada para alimentar la electrónica involucrada y acumuladores [8], [9].

1.4. Objetivos y alcance

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema capaz de determinar valores eficaces de corriente alterna en sistemas metropolitanos de distribución de energía eléctrica en baja tensión y reportar estados a un centro de operaciones a través de una red LoRaWAN de acceso público.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar el uso de un supercapacitor como reemplazo de una batería convencional.
- Desarrollar una electrónica de ultra bajo consumo para maximizar la autonomía de operación del supercapacitor.

1.4.3. Alcances

En el presente proyecto se desarrollan los siguientes temas:

- Circuito de conversión de energía basado en rectificadores de alta eficiencia.
- Acumulador de energía basado en supercapacitores.
- Patrón de firmware implementado en el microcontrolador para optimizar el uso de energía del acumulador.
- Medición de valor RMS de corriente mediante transformador de corriente.
- Tecnología LoRaWAN.
- Recuperación, almacenamiento y presentación de datos generados por los nodos finales.

Si bien el proyecto es parte de un plan de creación de una PyME del autor, no es parte del alcance ni se cubren en este documento las etapas de lanzamiento de producto ni creación de la empresa.

Capítulo 2

Introducción específica

En este capítulo se presentan los requerimientos acordados con el cliente y los recursos de hardware y software utilizados para el desarrollo del trabajo. Se describen en las partes implementadas del hardware, los servicios integrados de backend y solamente algunos aspectos relevantes del firmware que interactúa con el hardware.

2.1. Diagrama de bloques general del sistema

El diagrama de bloques del hardware a instalar *in situ* es presentado en la figura 2.1 y consta de cuatro bloques:

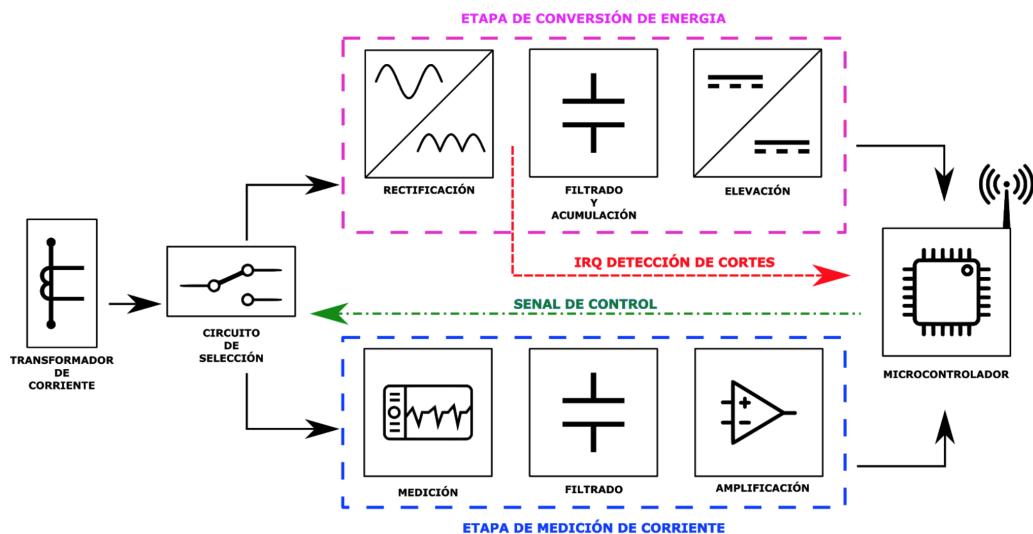


FIGURA 2.1. Diagrama de bloques del hardware para el nodo a instalar *in situ*.

1. Circuito de selección de modo: un relay y su circuito de mando controlarán a que etapa del nodo se conectarán los terminales del transformador de corriente.
2. Etapa de rectificación, acumulación de energía y elevación de tensión: compuesta por rectificador de onda completa, una etapa de filtrado y acumulación, y un circuito elevador de tensión.

3. Etapa de medición de valor RMS de corriente: un chip dedicado toma la señal de tensión generada en bornes del resistor shunt y calcula el valor RMS. A su salida entrega un valor proporcional de tensión DC.
4. Microcontrolador: ejecuta la lógica de negocios que rige el comportamiento del nodo, digitaliza mediciones y transmite datos a la red LoRaWAN.

Por otro lado, el sistema también implicó el desarrollo y puesta en funcionamiento de un conjunto de servicios de backend propios del proyecto que cumplen las funciones de:

- Recuperación de datos de la red LoRaWAN.
- Almacenamiento en una base de datos.
- Presentación de los datos al usuario final mediante una interfaz gráfica de usuario.

El requisito 3c impuso el uso de una red LoRaWAN como protocolo principal para la transmisión de datos generados por los nodos. Para cumplirlo se adoptó la arquitectura presentada en la figura 2.2.

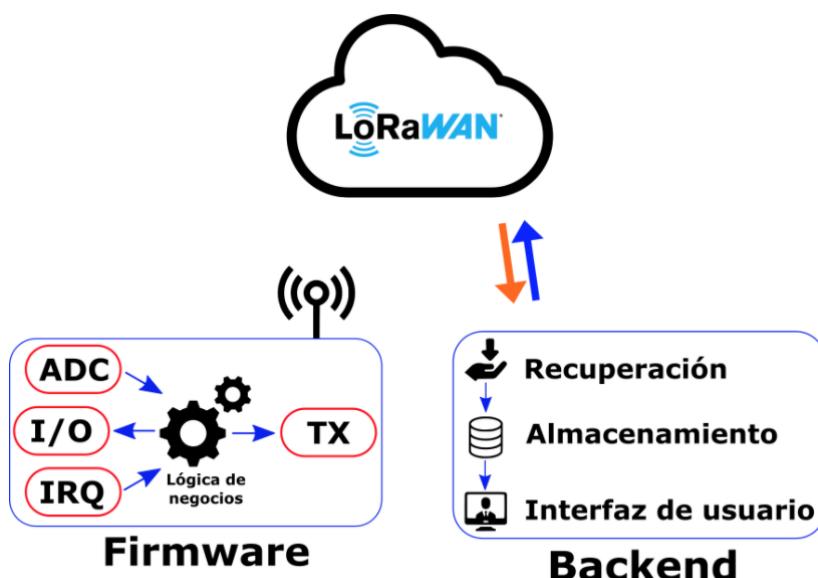


FIGURA 2.2. Diagrama de bloques del firmware implementado y su interacción con la red LoRaWAN y los servicios de backend.

Las mediciones son tomadas por el hardware y transmitidas hacia la red LoRaWAN para luego interactuar con los servicios de backend privados que se encargan de recuperar, almacenar y presentar los datos al usuario final.

2.2. Requerimientos acordados con el cliente

1. Grupo de requerimientos asociados con hardware:
 - a) El dispositivo deberá ser de tipo *plug and play*.
 - b) El circuito impreso no deberá ocupar un volumen mayor a 10x10x5 cm.

- c) Basarse en un microcontrolador ESP32 y disponer de:
 - 1) 4 entradas analógicas.
 - 2) 3 salidas digitales.
 - 3) Unidad UART.
 - 4) Integrar un módulo de comunicaciones LoRa.
 - d) Deberá tener al menos 12 horas de autonomía de funcionamiento.
 - e) Bajo consumo en modo ocioso: el consumo del hardware en total, no deberá superar los 5 mA cuando no está midiendo ni transmitiendo.
 - f) El circuito elevador de tensión DC-DC deberá:
 - 1) Funcionar con tensiones menores a 2 V en la entrada.
 - 2) Otorgar 5 V a la salida.
 - 3) Ser capaz de otorgar 300 mA a la salida.
 - g) El transformador de corriente debe:
 - 1) Ser de tipo núcleo partido.
 - 2) Admitir 100 A de corriente en el circuito primario y un máximo de 5 A en el circuito secundario.
 - h) El relay encargado de cambiar el modo de operación debe:
 - 1) Ser de tipo doble inversor sin retención.
 - 2) Su bobina debe poder energizarse con 5 V o menos.
 - 3) Soportar al menos 5 A de corriente por los contactos.
 - i) Debe funcionar de manera independiente a la frecuencia de operación de la red 50/60 Hz.
 - j) Debe funcionar de manera independiente a la tensión de fase del sistema de distribución 110/220 V.
2. Grupo de requerimientos asociados con el firmware:
- a) Debe manejar un módulo de comunicación LoRa y protocolo LoRaWAN.
 - b) Deberá tener un porcentaje de cobertura de tests unitarios del 60 % como mínimo.
 - c) Antes configurarse en modo ocioso, debe desenergizar la etapa de medición de corriente y el módulo de comunicaciones con el objeto de ahorrar energía.
3. Grupo de requerimientos asociados con los servicios de backend:
- a) Todos los servicios deben poder correr en una Raspberry Pi 3.
 - b) El software de los servicios de backend se desarrollará en lenguaje Python.
 - c) Recuperar los datos de la red LoRaWAN.

- d) Almacenar los datos en una tabla de MySQL.
 - e) Interfaz gráfica de usuario basada en Grafana.
4. Grupo de requerimientos asociados con ensayos de integración y *end-to-end*:
- a) El banco de ensayos de hardware debe contar con una carga fantasma de al menos 10 A y permitir realizar interrupciones de corriente de manera programada mediante una computadora adicional tipo Raspberry Pi o de manera manual.
 - b) Los servicios de backend deben estar operativos al momento de realizar los ensayos.
 - c) Se debe contar con un gateway de acceso a una red LoRaWAN como por ejemplo *The Things Network*.

2.3. Componentes principales del hardware

2.3.1. Transformador de corriente

Un transformador de corriente o intensidad (TI) es un dispositivo de medición utilizado para producir en su devanado secundario una corriente diferente y proporcional a la que circula por su devanado primario.

El principio de operación de un transformador de corriente no es diferente al de un transformador de potencia convencional. A diferencia de uno de potencia, el devanado primario puede ser de una sola vuelta sobre un núcleo ferromagnético como se ve en la figura 2.3. El devanado secundario suele tener un número mayor de vueltas alrededor del núcleo que depende de que tanto se debe reducir la corriente.

Muchos transformadores de corriente tienen una relación estándar de 5 A en el secundario, por ejemplo un transformador de corriente 200/5 significa que cuando por el primario fluyen 200 A en el secundario solo fluyen 5 A. Es decir, el transformador de corriente tiene una relación de transformación de corriente N de 40 veces.



FIGURA 2.3. Circuito de medición indirecta de corriente mediante un transformador de corriente [10].

Mediante esta técnica, pequeños instrumentos pueden monitorear grandes valores de corriente manteniendo una distancia segura de las líneas de alta tensión.

2.3.2. Circuito de selección

A partir del lineamiento de que el TI debe estar conectado por defecto a la entrada del rectificador y al resistor shunt cuando se energiza la bobina del relay, el número y la disposición de los contactos resulta un factor relevante al momento de elegir la mejor opción. La variante comercial que cumple con el requisito 1h es la producida por la firma Hongfa modelo HF115F/005-2ZS4A presentada en la figura 2.4.

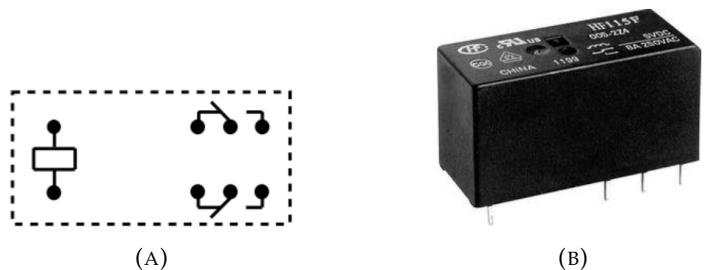


FIGURA 2.4. Pinout del relay HF115F/005-2ZS4A (izquierda) y su encapsulado (derecha). Imágenes tomadas de [11].

2.3.3. Conversión de energía

Para obtener una tensión continua a partir de una alterna generada por el TI, es necesario implementar un puente rectificador de onda completa.

En la actualidad la mayoría de los circuitos rectificadores de onda completa se basan en diodos de silicio de bajo costo. Sin embargo, un diodo de silicio posee una caída de tensión típica de 0,7 V. Esta caída de tensión se traduce en pérdidas por efecto Joule, lo que resulta relevante en dispositivos donde la conversión, acumulación y gestión de energía es crítica. Por lo tanto, se desea maximizar la transferencia de tensión y potencia entre entrada y salida del puente rectificador. Yilmaz [12] analiza técnicas de rectificación de onda completa con diferentes tipos de diodos, como así también un arreglo de transistores MOSFET pasivo y activo. Las caídas de tensión simuladas entre la entrada y salida entre un puente rectificador de diodos de silicio y uno pasivo basado en MOSFETs se comparan en la figura 2.5.

Al comparar las simulaciones expuestas en las figuras 2.5b y 2.5d se aprecia que la caída de tensión generada por el rectificador basado en MOSFET al entrar en conducción es menor que uno hecho con diodos y por lo tanto también la potencia disipada en forma de calor.

2.3.4. Supercapacitor como acumulador de energía

La decisión de optar por un banco de supercapacitores como reemplazo total de una batería, se basa principalmente en el entorno donde operará el nodo hardware. Las diferencias entre una batería y un supercapacitor de interés para este

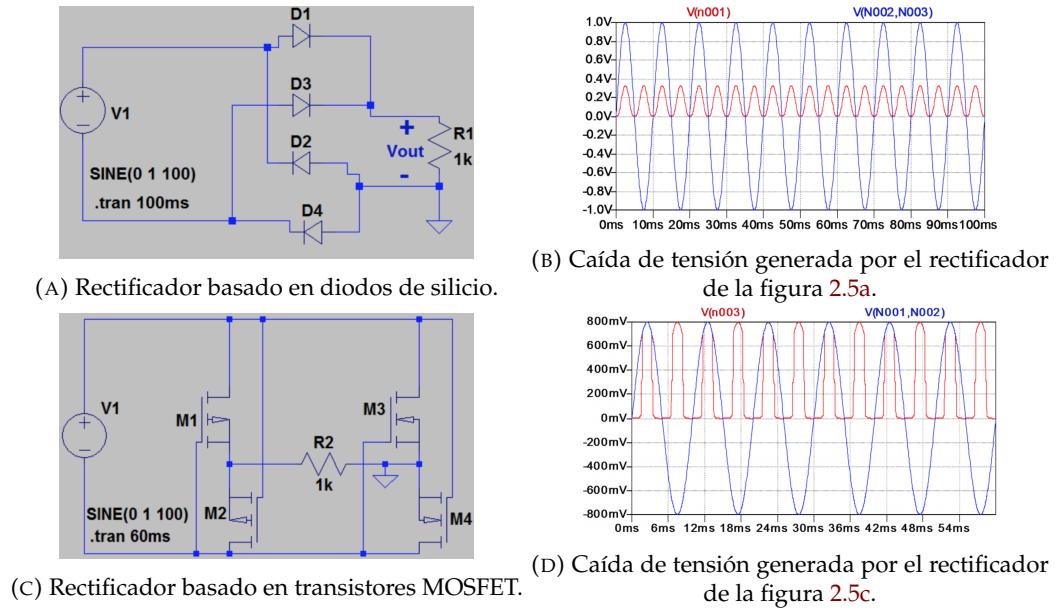


FIGURA 2.5. Simulación de rectificadores basados en diodos y MOSFET. Imágenes tomadas de [12].

proyecto, son plasmadas en la tabla 2.1.

Los datos meteorológicos de la provincia de Misiones presentados en [13], muestran temperaturas por encima de 30 °C durante el período de septiembre a marzo. A diferencia de un supercapacitor que posee un rango de temperaturas de operación desde los -40 °C hasta 70 °C [14], condiciones por encima de 35 °C resultan nocivas para una batería y generan el deterioro prematuro de sus componentes[15].

TABLA 2.1. Comparativa entre una batería y un supercapacitor para este proyecto.

| | Batería | Supercapacitor |
|-----------------------------|-----------------|---|
| Densidad de energía (Wh/Kg) | 265 | 3,9 |
| Rango de temperatura (°C) | 15 a 35 | -40 a 70 |
| Gestión de carga | V o I constante | Determinado por un circuito RC serie [16] |

Es importante remarcar que la densidad de energía que pueden almacenar también es diferente, una batería tiene una densidad de energía 60 veces mayor que un supercapacitor. Sin embargo, para esta aplicación puntual no representó un factor importante a la hora de elegir el acumulador.

Por último, el ciclo de carga es más complejo en el caso de una batería. Las etapas de su curva de carga deben ser respetadas según sean a corriente o tensión constante. Esto trae acarreado implementar una electrónica adicional encargada de gestionar estos 2 parámetros. En un capacitor, la curva de carga está definida por un circuito RC serie [16].

2.3.5. Elevación de tensión mediante un conversor DC/DC

Para proveer al microcontrolador y al resto de la electrónica asociada una tensión DC fija y constante, se optó por emplear un módulo comercial DC/DC ya existente en el mercado que se presenta en la figura 2.6.



FIGURA 2.6. Módulo comercial DC/DC en topología boost utilizado para alimentar la electrónica.

Su topología interna es *boost* o elevador de tensión. En el hardware del sistema, cumple la función de llevar la tensión variable del supercapacitor conectado a su entrada a una fija de 5 V. A su entrada admite tensiones variables desde 0,9 V hasta 5 V y puede otorgar hasta 500 mA de corriente a la salida.

2.3.6. Microcontrolador y firmware

El microcontrolador es el ente encargado de ejecutar la lógica de negocios acorde a la tarea que debe cumplir el hardware. En el mercado existe una amplia gama de fabricantes de placas de desarrollo que permiten acelerar la etapa de prototipado y validación de diseño.

La placa de desarrollo elegida para el prototipo fue la LoPy 4 producida por la firma Pycom que se presenta en la figura 2.7. En su interior alberga un ESP32, 8 Megabytes de memoria flash, transceptores de radio LoRa y 802.11 y un regulador de tensión.

El lenguaje de programación de la LoPy4 es Micropython [18], un lenguaje de alto nivel lanzado por primera vez en el año 2014. Desde su lanzamiento y hasta la fecha de desarrollo de este trabajo, se presenta como una variante de Python atractiva para prototipar firmware sobre microcontroladores utilizando el paradigma de programación orientada a objetos.

2.4. Componentes principales del software

2.4.1. Red LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) es un protocolo de control de acceso al medio (MAC - Medium Acces Control) definido por LoRa Aliance [19]. Tiene



FIGURA 2.7. Placa de desarrollo LoPy 4 [17].

por objeto permitir la conexión de nodos de baja potencia, generalmente alimentados a batería y sin capacidad de manejo de protocolos de enrutamiento, con aplicaciones finales conectadas a Internet mediante una conexión inalámbrica de largo alcance utilizando modulación LoRa.

Las puertas de enlace (GW - gateways), están conectadas al servidor central mediante conexiones IP (Internet Protocol) estándar, cumpliendo la función de puente, es decir, convierten los paquetes de radiofrecuencia (RF) en paquetes IP y viceversa 2.8.



FIGURA 2.8. Arquitectura de una red LoRaWAN y sus posibles integraciones con terceras partes [19].

El protocolo LoRaWAN no es un protocolo IP, por lo tanto, los paquetes del mismo necesitan de un enrutamiento y procesamiento correspondiente antes de ser

entregados a la aplicación final.

La figura 2.9 presenta la topología tipo “estrella de estrellas” que adopta una red LoRaWAN. En ella, los *gateways* retransmiten los mensajes recibidos de los nodos finales hacia un servidor central. La comunicación inalámbrica entre nodos y gateways aprovecha las características propias de la capa física, lo que permite establecer enlaces desde un nodo hacia uno o más de estos gateways.



FIGURA 2.9. Topología de una red LoRaWAN y la interacción entre los diferentes miembros [19].

2.4.2. Motor de base de datos

Una base de datos almacena la información de manera ordenada en tablas o estructuras de datos. Las distintas aplicaciones pueden ejecutar consultas para solicitar la parte de esos datos que necesiten en ese momento.

Las bases de datos más utilizadas para aplicaciones *web* son las basadas en un modelo relacional, también conocidas como bases de datos SQL (Structured Query Language). Sin embargo, en años recientes se han popularizado las llamadas bases de datos no relacionales o NoSQL. Estas últimas están orientadas a documentos y almacenan información de un mismo tipo en la forma de clave-valor.

Por su naturaleza, este proyecto parece indicado para utilizar una base de datos no relacional. Ya que solo almacena registros de un tipo y no necesita crear relaciones complejas entre distintas tablas de datos.

En principio se pensó en utilizar *Elasticsearch* [20], un servidor de búsqueda de texto basado en documentos JSON. Se trata de una herramienta open source que se integra con Grafana, la herramienta para el desarrollo de la interfaz gráfica [21].

Sin embargo, en las primeras pruebas llevadas a cabo se pudo apreciar que el consumo de memoria y procesamiento eran muy elevados si se lo implementaba en un hardware de bajas prestaciones como las *Raspberry Pi* [22]. Finalmente, se optó por utilizar MariaDB [23], una base de datos del tipo SQL, también open source, con menos demanda de recursos y muy popular en aplicaciones *web*.

2.4.3. Interfaz gráfica de usuario

Una vez recuperados los datos de la red LoRaWAN y almacenados en la base de datos, la interfaz de usuario del sistema presenta al usuario final del centro de

operaciones los datos recolectados por cada nodo.

Una interfaz gráfica como la que se visualiza en la figura 2.10, se encarga de presentar al usuario final los últimos datos adquiridos por cada nodo. De esta manera, se puede identificar de manera simple mediante un punto verde o rojo sobre el mapa si la línea monitoreada presenta un problema.



FIGURA 2.10. Interfaz gráfica que muestra los datos capturados de cada nodo del sistema.

Para la presentación de la información se optó por Grafana, una aplicación *web* de código abierto para el análisis y visualización de datos [21].

Para mejorar aun más la experiencia del usuario se complementa con el plug-in *Worldmap Panel*, que permite mostrar información temporal sobre un mapa. Esta información se presenta como círculos en las coordenadas donde se encuentra ubicado el nodo que genera la información.

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se exponen los componentes del hardware y software desarrollado en etapas con un enfoque individual.

La subsección 3.2 expone el patrón *power save loop* adoptado en la lógica de negocios, los periféricos del microcontrolador con los cuales interactúa y la rutina de interrupción que atiende al generarse un corte. Por último, la sección 3.3 otorga al lector detalles acerca de la integración entre la red LoRaWAN y los servicios de backend implementados para este proyecto.

3.1. Diseño del hardware por etapas

En esta sección se presentan circuitos esquemáticos correspondientes a cada etapa individual y su rol en el sistema.

3.1.1. Circuito de selección de modo

En el caso límite donde el nivel del acumulador es bajo y el microcontrolador ordena cambiar su estado a un relay con retención, la energía necesaria para excitar al relay puede generar una caída de tensión significativa en el acumulador. Así, todo el hardware quedaría totalmente desenergizado sin posibilidad de volver a entrar en operación, a menos que exista una intervención humana.

Un caso extremo como el mencionado, implica que el hardware debe poseer un mecanismo para restablecer su operación tras largos períodos de tiempo, aún después de encontrarse el acumulador sin energía.

En la figura 3.1 se muestra el relay sin retención que se implementó, presentando en la sección 2.4, y su circuito de mando. Los terminales del transformador de corriente se encuentran conectados por defecto a la etapa de conversión y acumulación de energía (terminales NC1 y NC2). Una vez que la tensión en bornes del acumulador alcanza el valor mínimo para que el conversor DC/DC entre en operación, también lo hace la electrónica sin la necesidad de intervención externa. Cada vez que se desea tomar una medición de corriente, el microcontrolador activa la bobina del relay y desconecta el transformador de corriente del circuito de conversión para conectarlo al circuito de medición de valor RMS.

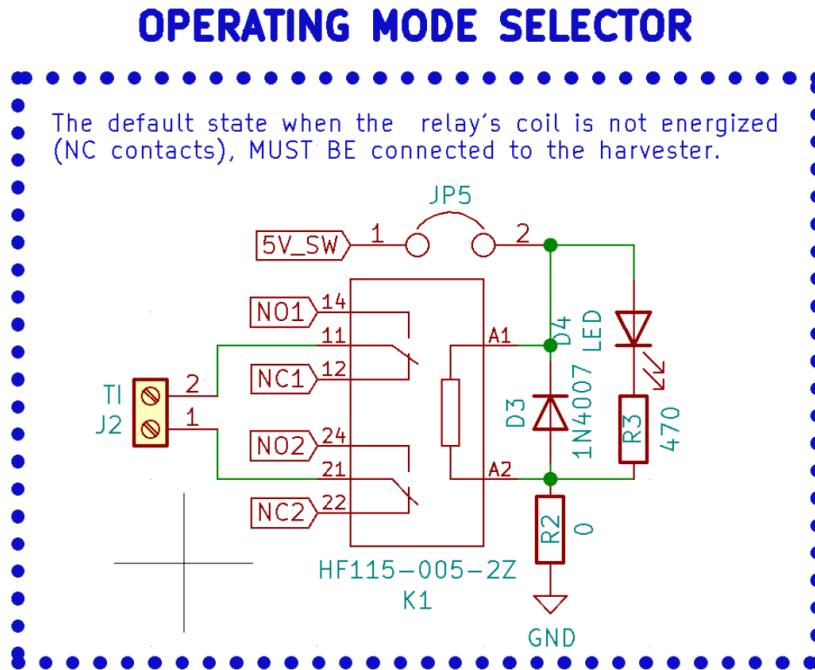


FIGURA 3.1. Circuito selector de modo basado en el relay HF115-005-2ZS4.

3.1.2. Puente rectificador de onda completa

Para el prototipo desarrollado en este trabajo, se replicó el circuito rectificador de onda completa presentado en la figura 2.5c. Con el objeto de reducir el espacio ocupado en el circuito impreso, se optó por utilizar un chip DMHC3025 [24]. El encapsulado SOIC-8 presentado en la figura 3.2, alberga un puente H formado por dos transistores MOSFET tipo P y dos tipo N. Las características eléctricas de relevancia para esta aplicación son presentadas en la tabla 3.1.

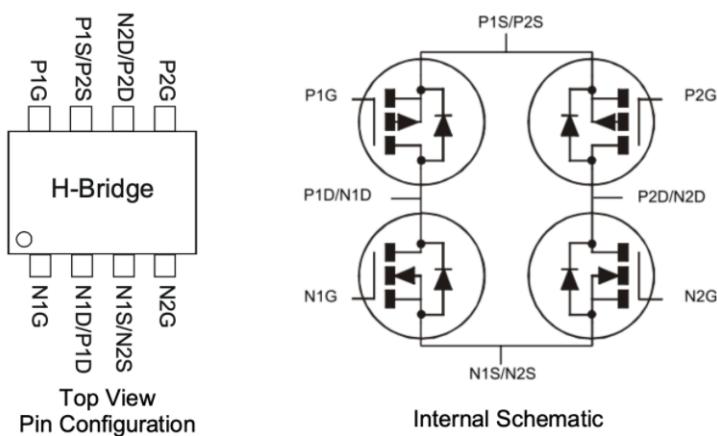


FIGURA 3.2. Pinout y esquemático interno del DMHC3025 [24].

El circuito final implementado encargado de la rectificación y filtrado de la tensión DC a la salida se presenta en la figura 3.3. Dos diodos zener D1 y D2 en antiparalelo protegen a los transistores de sobretensión recortando la onda a 27 V para cada semiciclo de la onda senoidal a la entrada.

TABLA 3.1. Características eléctricas de los transistores que forman parte del rectificador de onda completa.

| Parámetro | Valor máximo |
|-----------|--------------|
| Rds | 25 mΩ |
| Id | 6 A |
| Vdss | 30 V |

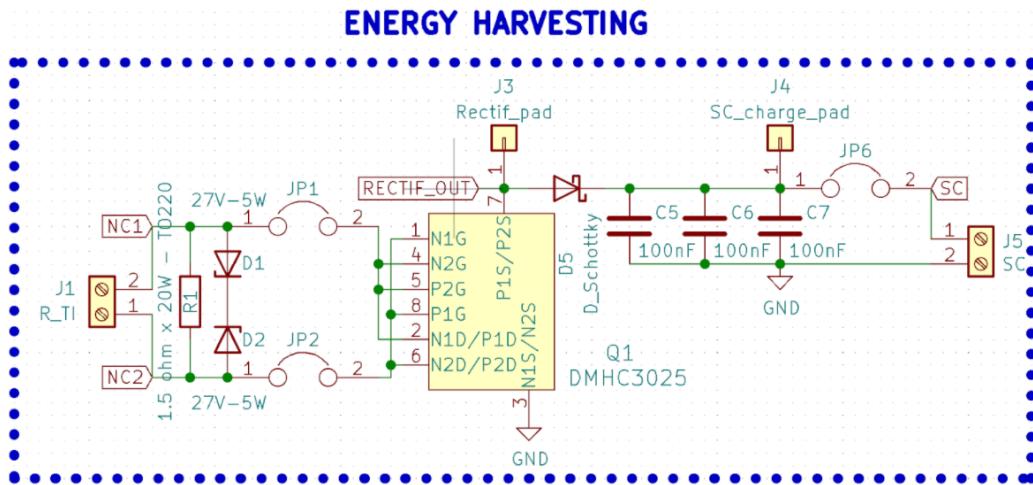


FIGURA 3.3. Etapa de rectificación, filtrado y acumulación implementada.

A su salida, un conjunto de capacitores cerámicos C5, C6 y C7 filtran ruido de alta frecuencia para luego acumular la energía en el supercapacitor conectado a J5.

3.1.3. Acumulador de energía basado en supercapacitores

A la salida del rectificador de onda completa de la figura 3.3, se conecta a través de la bornera J5 un banco compuesto por dos supercapacitores de 500 F x 2,7 V en serie, que resulta en una capacitancia equivalente de 250 F x 5,4 V.

Los supercapacitores se presentan en la figura 3.4 como un módulo, donde ya se encuentran montados sobre una placa con un circuito adicional de protección. El circuito de protección se encarga de limitar la tensión en sus bornes a 2,5 V y disipar la potencia excedente.

Al tratarse de una capacitancia, considerablemente mayor que la de un capacitor habitual, almacena también más energía. El supercapacitor cumple entonces la función de acumular energía para mantener operativa la electrónica en caso de que se interrumpa la conversión de energía.

Además de aportar simpleza al esquemático final, el módulo elegido provee un rango de temperatura de operación más amplio que el de una solución que además incluya una batería [25].

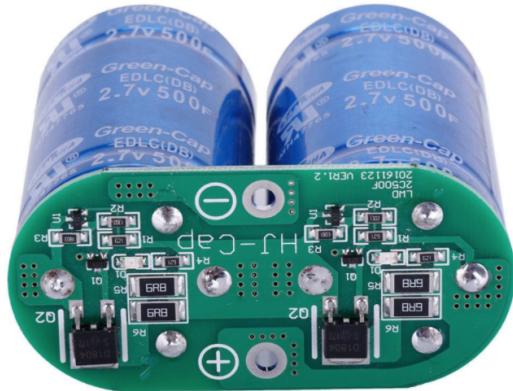


FIGURA 3.4. Banco de supercapacitores de 500 F x 2,7 V utilizado como acumulador.

3.1.4. Circuito de detección de cortes

Una de las funcionalidades relevantes del hardware, es detectar interrupciones en la distribución de energía debido a razones tales como sobrecarga en la línea o desastres naturales.

El circuito detector de cortes propuesto en 3.5 está basado en un comparador TLV3691 de la firma Texas Instruments [26]. La salida, genera una señal de 3,3 V que despierta al microcontrolador por medio de una interrupción por hardware.

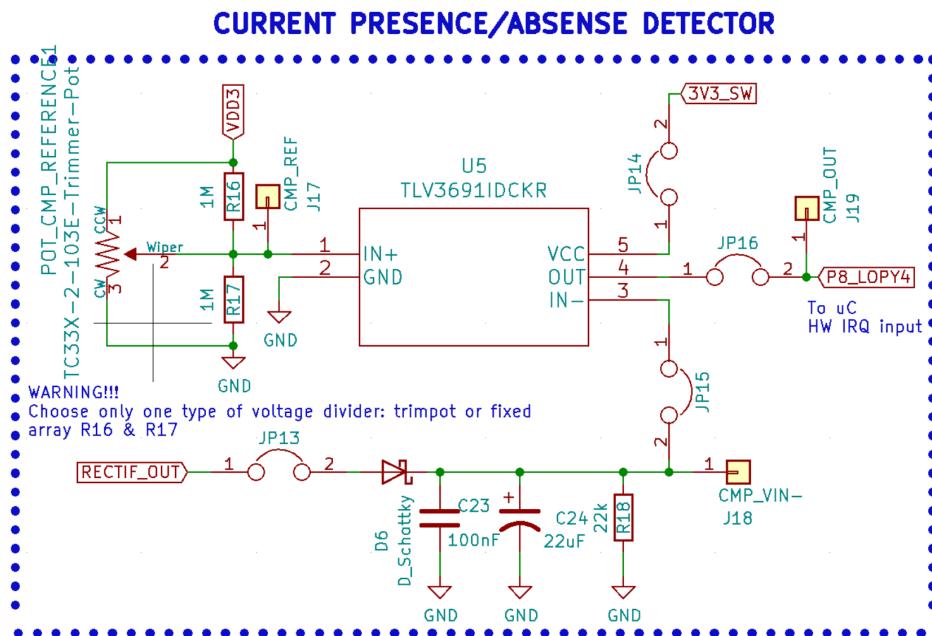


FIGURA 3.5. Circuito detector de cortes basado en el TLV3691 [26].

Como referencia para generar la señal de interrupción, se toma un valor de 1,65 V obtenido a partir de un divisor resistivo formado por R16 y R17. Este arreglo puede ser reemplazado por un *preset* en caso de ser necesario.

La salida del puente rectificador se conecta al detector mediante el diodo D6. A continuación los capacitores C23 y C24 filtran el rizado presente en la señal, resultando en una señal DC a la entrada no inversora del comparador.

En el caso de que ocurra un corte en la línea de distribución, la corriente que circula por D6 es nula y los capacitores se descargará a través de R18. Al bajar su tensión por debajo de 1,65 V, la salida se pondrá en alto y la interrupción será atendida por el firmware del microcontrolador.

3.1.5. Circuito de apagado y encendido mediante load switch

Con el objeto de minimizar el consumo en estado ocioso, es necesario desenergizar toda electrónica asociada al hardware que se encuentre en desuso, con excepción del microcontrolador y el circuito detector de la figura 3.5.

Para interrumpir la alimentación de manera electrónica, se adoptaron dos circuitos independientes basados en un *load switch* FPF2100 de la firma ON Semiconductor [27], los cuales se presentan en la figura 3.6.

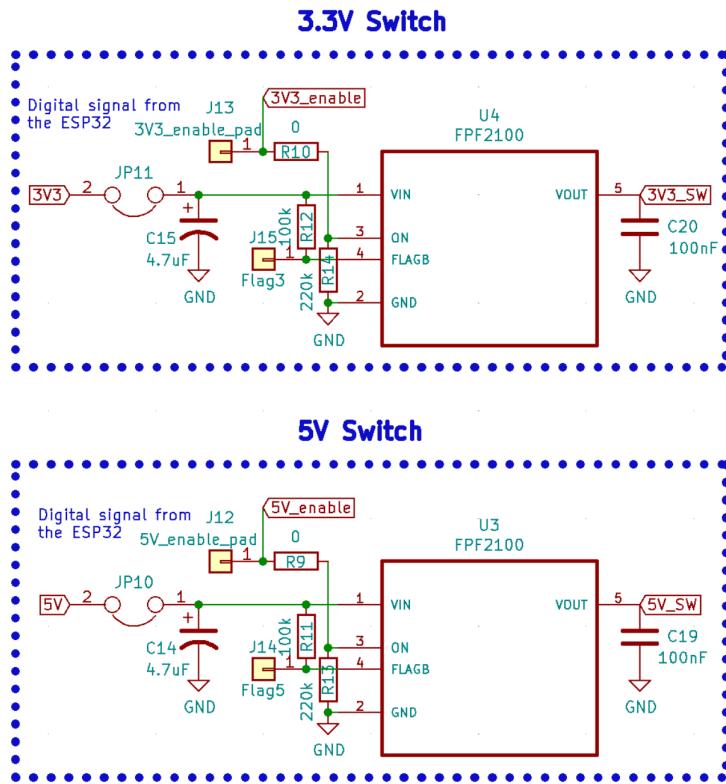


FIGURA 3.6. Circuito de encendido y apagado de las diferentes etapas de hardware mediante un *load switch* FPF2100 [27].

De esta manera las diferentes etapas de 3,3 V y 5 V se energizan únicamente cuando el microcontrolador pone en estado alto el pin ON a la entrada del *load switch*.

3.1.6. Transformador de Intensidad

Teniendo en cuenta que el comisionamiento debe realizarse sobre redes ya existentes y operativas, no resulta práctico utilizar un transformador de intensidad de núcleo sólido. Uno de tipo núcleo partido como el presentado en la figura 3.7a, permite sortear el problema de tener que interrumpir el cable a monitorear para enhebrarlo por el primario. Esto facilita notablemente el comisionamiento o

remoción del hardware.

Basado en el requerimiento 1g, se eligió uno fabricado por la empresa Howard Butler Ltd modelo CTSCM40-200/5 y sus características se presentan en la tabla 3.2.

TABLA 3.2. Características del CTSCM40-200/5 [28].

| Parámetro | Valor máximo |
|--|-----------------|
| Burden (VA) | 2,5 |
| Corriente sobre el circuito primario (A) | 200 |
| Corriente sobre el circuito secundario (A) | 5 |
| Relación de transformación (N) | 40 |
| Rango de frecuencia (Hz) | 50 - 60 |
| Clase | 1 |



FIGURA 3.7. Transformador de intensidad de tipo núcleo partido y sus dimensiones. Imágenes tomadas de [28].

3.1.7. Circuito de medición de valor RMS de corriente y acondicionamiento de señal

Para medir corriente mediante un transformador de intensidad, primero es necesario convertir la intensidad en una señal de tensión equivalente y a partir de ésta, calcular su valor RMS. Un resistor shunt de $0,1\ \Omega$ con encapsulado TO-220-2 fue adoptado para convertir la corriente del secundario del transformador de intensidad en una señal de tensión apta para realizar su medición RMS.

En el mercado existen circuitos integrados dedicados a realizar la medición RMS de señales. Generalmente otorgan una tensión DC a la salida proporcional al valor RMS de la tensión a la entrada.

La tabla 3.3 compara el ancho de banda, la tensión pico a pico máxima admitida a sus entradas y la tensión de operación de los posibles candidatos a utilizar en este proyecto.

Por disponibilidad del autor al momento del ensayo se eligió el LTC1966 de la firma Linear Technologies [29].

El LTC1966 posee dos entradas IN1 e IN2 que se conectan a la señal de tensión generada en bornes del shunt representado por R6 en el esquemático 3.8. A su

TABLA 3.3. Tabla comparativa de chips aptos para medición RMS.

| Modelo | Ancho de Banda (BW) | Vpp (máx) | Tensión de operación (máx) |
|-------------|---------------------|-----------|----------------------------|
| AD636 [29] | 1,5 MHz | 283 mV | 5 V |
| LH0091[30] | 2 MHz | +/- 15 V | 22 V |
| LTC1966[31] | 800 kHz | +/- 1 V | 5,5 V |

salida VOUT, otorga una tensión DC proporcional al valor RMS de la señal senoidal inyectada entre IN1 e IN2.

Siendo 500 mV el valor de pico de un semiciclo de una onda senoidal en la entrada, el valor eficaz a la salida del circuito integrado está dado por la ecuación 3.1.

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{500}{\sqrt{2}} = 353,55 \text{ mV} \quad (3.1)$$

Los capacitores C10 y C12 se encargan de realizar el promedio y filtrar el posible ruido de alta frecuencia.

C9 y C11 filtran la tensión de alimentación que energiza al circuito integrado.

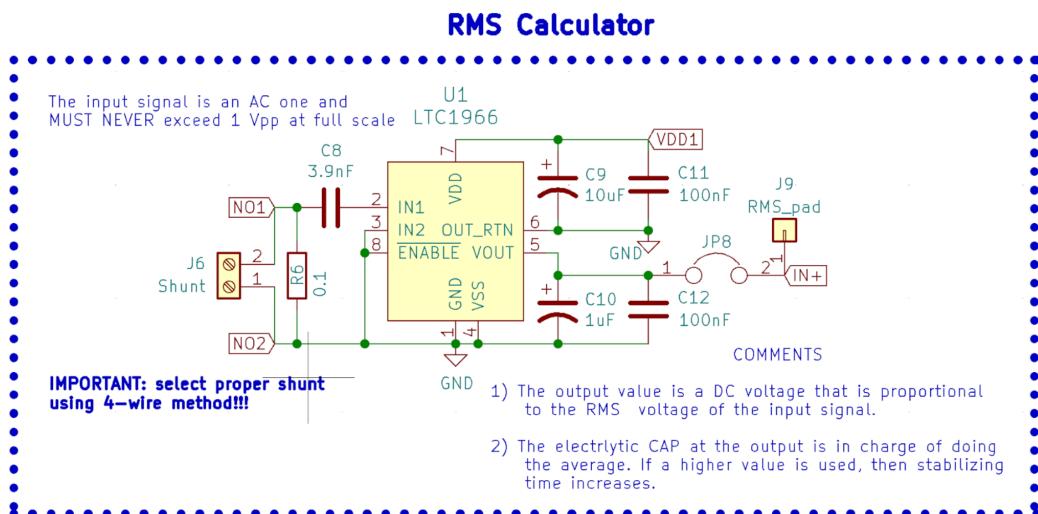


FIGURA 3.8. Circuito medidor de valor RMS implementado con el LTC1966.

Dado que las mediciones a realizar se harán en líneas de distribución que operen a 50 Hz o 60 Hz, se ajustó la etapa de filtrado de la señal de entrada. Con una impedancia de entrada de $8 \text{ M}\Omega$ entre los pines IN1 e IN2 del LTC1966, el capacitor C8 en serie forma un filtro pasa alto.

La frecuencia de corte (fc) adoptada por el autor para este filtro es de 5 Hz y el valor de capacitancia quedó determinado por la ecuación 3.3.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R C} \rightarrow \frac{1}{2\pi R f_c} \quad (3.2)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 8 \times 10^6 \cdot 5} = 3,978 \times 10^{-9} \text{ F} \quad (3.3)$$

El valor comercial más próximo adoptado para C8 es 3,9 nF.

La señal de salida del LTC1966 es del orden de los mV. Para poder digitalizarla con un conversor analógico-digital es necesario amplificarla de modo que el fondo de escala de la medición tenga como máximo la misma tensión de alimentación que el conversor (3,3 V).

El circuito de la figura 3.9, utiliza un amplificador operacional MP6001U [32] en configuración amplificador no inversor. La ganancia A del arreglo está definida por la ecuación 3.4.

$$A = \frac{R7 + Pot1 + R8}{R7} \quad (3.4)$$

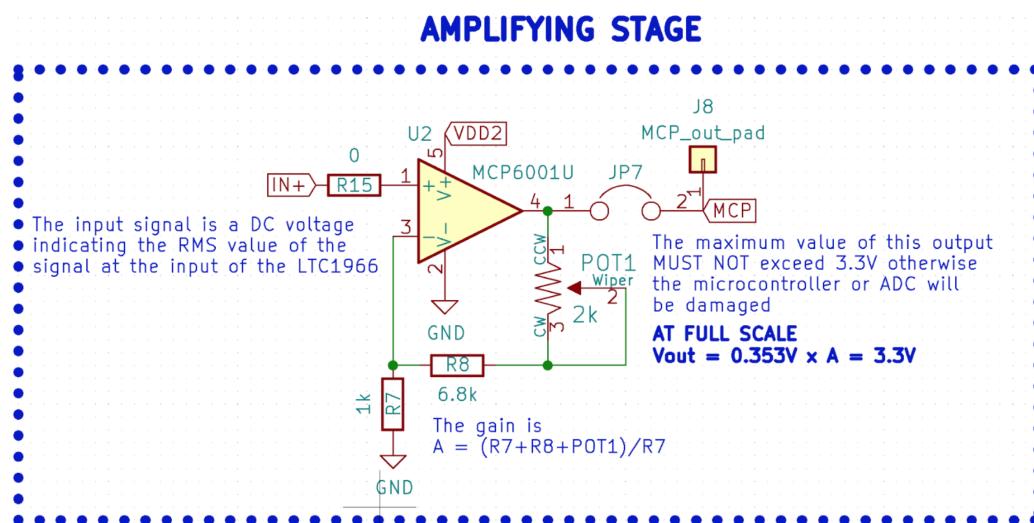


FIGURA 3.9. Circuito amplificador de la señal de salida del LTC1966.

El ajuste de la ganancia del amplificador, se realizó mediante una tensión de 353,55 mV constante a la entrada IN+ y variando el preset POT1 hasta que la salida alcance 3,3 V. Finalizado el ajuste, la salida se encuentra lista para ser conectada a la entrada del conversor analógico digital.

3.1.8. Monitoreo de tensión en bornes del acumulador

La tensión máxima a la que puede llegar el acumulador de la figura 3.4 es 5 V, este valor de tensión es mayor que el máximo admitido por las entradas del conversor analógico-digital (3,3 V). Para obtener una señal de tensión apta y equivalente a la tensión en bornes del acumulador, es necesario atenuar la tensión máxima a medir a un valor de 3,3 V o menos.

El divisor resistivo formado por R4 y R5 presentado de la figura 3.10, es una solución efectiva para atenuar una señal de tensión DC. De esta manera, un valor de tensión de 5 V en bornes del acumulador, representa como máximo 2,5 V a la entrada del conversor analógico-digital.

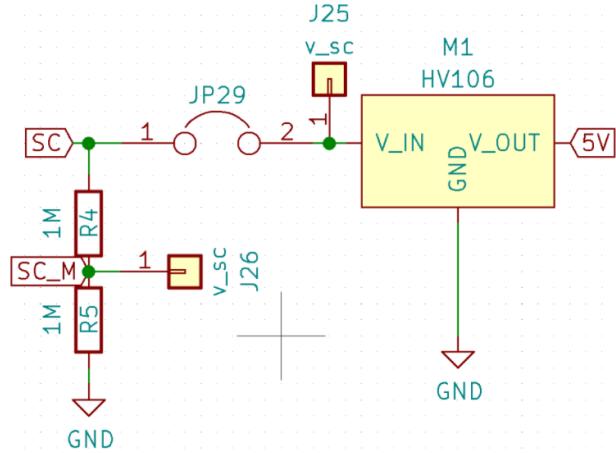


FIGURA 3.10. Divisor resistivo utilizado para medir la tensión en bornes del supercapacitor.

3.1.9. Etapa de conversión analógica digital

Las señales correspondientes a la tensión en bornes del supercapacitor y valor RMS de corriente son analógicas. Por este motivo, es necesario digitalizar las señales para que luego puedan ser transmitidas por el módulo de comunicaciones. Como solución, en el esquemático de la figura 3.11 se adoptó el chip ADS1015 de la firma Texas Instruments [33]. El ADS1015 consiste en un convertidor analógico digital de 12 bits de resolución, 3,3 V de tensión de alimentación, interfaz de comunicaciones I₂C, 4 canales de entrada, tensión de referencia interna y amplificador de ganancia programable.

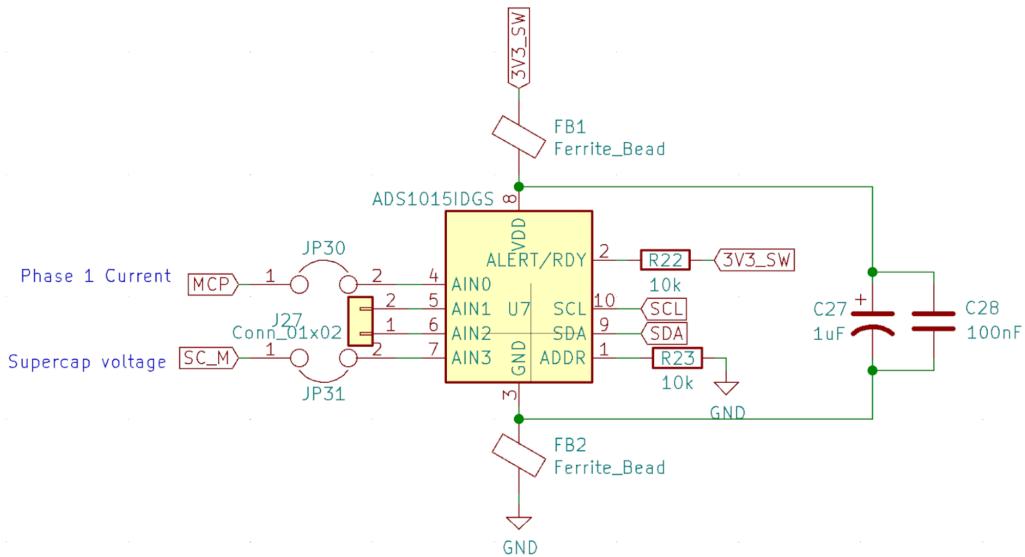


FIGURA 3.11. Etapa de conversión analógico-digital basada en el ADS1015.

Las señales correspondientes al valor RMS de corriente y tensión en bornes del supercapacitor se conectan a las entradas AIN0 y AIN3 del chip respectivamente. Las restantes entradas AIN1 y AIN2, se conectaron a una tira de pines para agregar de manera opcional otros 2 módulos de medición de corriente.

3.2. Firmware implementado

3.2.1. Lógica de negocios y patrón arquitectónico adoptado

Cada hardware tomará una medición y la transmitirá de manera periódica. Al momento de su comisionamiento, el hardware se encontrará en modo conversión y acumulación por defecto.

Para lograr la lógica de negocios se adoptó el patrón arquitectónico de la figura 3.12, resultante de una combinación entre un sistema reactivo y un bucle de ahorro de energía.

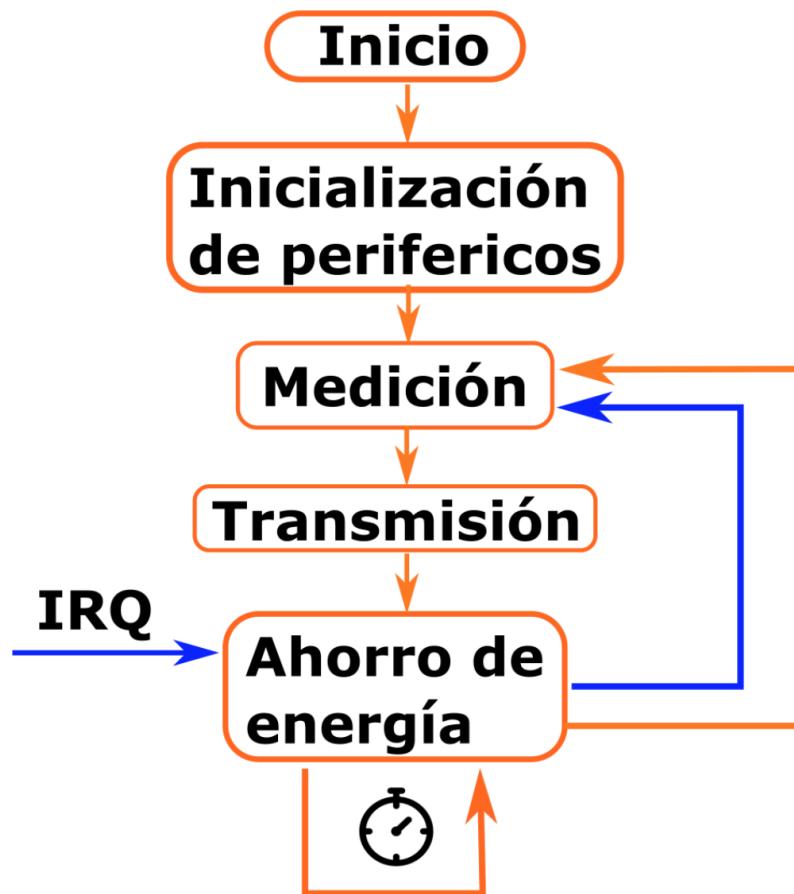


FIGURA 3.12. Patrón adoptado para la implementación de la lógica de negocios del firmware.

Al entrar en operación, el microcontrolador verificará que la tensión en bornes del supercapacitor sea mayor a un umbral de 2,5 V antes de enviar su primer reporte de estado. Seguidamente, entrará en modo ahorro de energía o *deep sleep* durante un lapso de tiempo determinado.

Si durante el modo *deep sleep* ocurre un corte en el suministro de energía, la señal generada por el circuito de la figura 3.5 hará que el sistema, prematuramente, realice una medición, transmita y nuevamente vuelva a modo ahorro de energía.

3.2.2. Inicialización de periféricos

Esta es la primera tarea que se ejecutará cada vez que ocurre un reset en el microcontrolador. La tabla 3.4 presenta la función asignada de cada pin físico de la placa de desarrollo LoPy 4, dirección y periférico interno del microcontrolador asociado.

TABLA 3.4. Pines de la placa LoPy4 utilizados y los periféricos del ESP32 asociados.

| Pin (LoPy4) | Puerto (ESP32) | Dirección | Periférico asociado | Comentarios |
|----------------|-------------------|-------------------|------------------------|--|
| 2 | P0_RX0 | entrada | UART0 | 115200 bps |
| 3 | P0_TX0 | salida | UART0 | 115200 bps |
| 10 | P8 | entrada | GPIO | IRQ por flanco ascendente. |
| 11 | P9 | entrada salida | I2C | SDA |
| 12 | P10 | salida | I2C | SCL |
| 13 | P11 | salida | GPIO | Control del <i>load switch</i> de 3,3 V. |
| 14 | P12 | salida | GPIO | Control del <i>load switch</i> de 5 V. |

3.2.3. Medición

Al cumplirse el período de ahorro de energía u ocurrir una interrupción, esta función del firmware pone en alto los pines 13 y 14 con el fin de activar los *load switch* de 3,3 V y 5 V para configurar el hardware en modo medición.

El relay cambia de estado y conecta el transformador de intensidad al shunt de medición. La etapa de medición de valor RMS formada por los circuitos de las figuras 3.8 y 3.9, otorgan a la entrada del conversor una tensión DC filtrada y acondicionada lista para ser digitalizada.

La comunicación con el conversor se realiza a través del bus de comunicaciones I2C. Una biblioteca de libre acceso lista para interactuar con el ADS1015 [34], se utiliza para tomar 10 valores consecutivos de la señal de interés y almacenarlos en un arreglo. Finalmente se calcula su media aritmética. El mismo método se invoca para digitalizar la tensión correspondiente al supercapacitor otorgada por el circuito de la figura 3.10.

3.2.4. Compresión de las mediciones y transmisión a través de LoRa

Con el objeto de optimizar el tiempo de aire requerido para realizar la transmisión de los datos a la red LoRaWAN, se deben comprimir las lecturas como un conjunto consecutivo de 48 bits.

La porción de código presentada en 3.1, realiza la compresión de las 4 mediciones recibidas como un arreglo mediante corrimiento de 12 bits para finalmente retornar un valor de 48 bits equivalente a la carga útil.

¹ `def compress_analog_reading_payload(self, mediciones):`

```

2 """
3 el orden es mediciones = [0x111, 0x222, 0x333, 0xcc]
4 para hacer una anidacion de todos tengo que ir corriendo de a 12 bits
5 # 1 tribble = 3 nibbles = 12 bits
6 """
7 payload = 0
8 NUMBER_OF_PARAMETERS = 4 # 3 Phase RMS CURRENT readings + SUPERCAP
9          VOLTAGE
10 DEFAULT_ERROR_PAYLOAD = [3333] * NUMBER_OF_PARAMETERS
11
12 if isinstance(mediciones, list) and len(mediciones) == NUMBER_OF_PARAMETERS:
13     tribble_shifts = len(mediciones) - 1
14 else:
15     print("ERROR: Did not receive the right amount of params to compress.\nWas expecting {0} but received {1}.\n".format(NUMBER_OF_PARAMETERS, len(mediciones)))
16     print("Returning: ", DEFAULT_ERROR_PAYLOAD)
17     return DEFAULT_ERROR_PAYLOAD
18
19 if all(isinstance(medicion, int) for medicion in mediciones):
20     for medicion in mediciones:
21         #print(medicion << (12 * tribble_shifts))
22     payload = payload | (medicion << (12 * tribble_shifts))
23     tribble_shifts -=1
24     return payload
25 else:
26     print("ERROR: not all the elements of the list are INT. VERIFY!!! ")
27     print("Returning: ", DEFAULT_ERROR_PAYLOAD)
28     return DEFAULT_ERROR_PAYLOAD
29

```

CÓDIGO 3.1. Función encargada de comprimir las 4 lecturas de 12 bits.

Finalizado el ensamblado de la carga útil, se transmite a la red LoRaWAN mediante el transceptor embebido en la misma placa.

Una biblioteca provista por Pycom se encarga de gestionar la interacción con las capas superiores del protocolo LoRaWAN para autenticarse y acceder a la red.

3.2.5. Modo ahorro de energía e interrupciones

Luego de tomar y transmitir mediciones acorde a lo descrito en [3.2.3](#) y [3.2.4](#), y antes de configurarse en modo ahorro de energía, el firmware habilita la interrupción por flanco ascendente en el pin 10 de la LoPy4 para permitir que un agente externo haga salir al hardware del modo ahorro de energía.

El tiempo t1 requerido para tomar y transmitir mediciones es de tan solo algunos segundos. En comparación con el tiempo t2 en el que el microcontrolador permanece en modo ahorro de energía, que suele ser de varios minutos, puede ser casi despreciable.

En caso de que no exista una interrupción, el microcontrolador permanecerá en modo ahorro de energía durante un periodo t2 hasta cumplir un ciclo T y se restablecerá debido al *timeout* generado (figura [3.13](#)).

Si durante el lapso de tiempo t2 ocurre un corte en el suministro de energía eléctrica, el circuito de la figura [3.5](#) genera una señal de restablecimiento del sistema y el ciclo comienza nuevamente midiendo y transmitiendo.

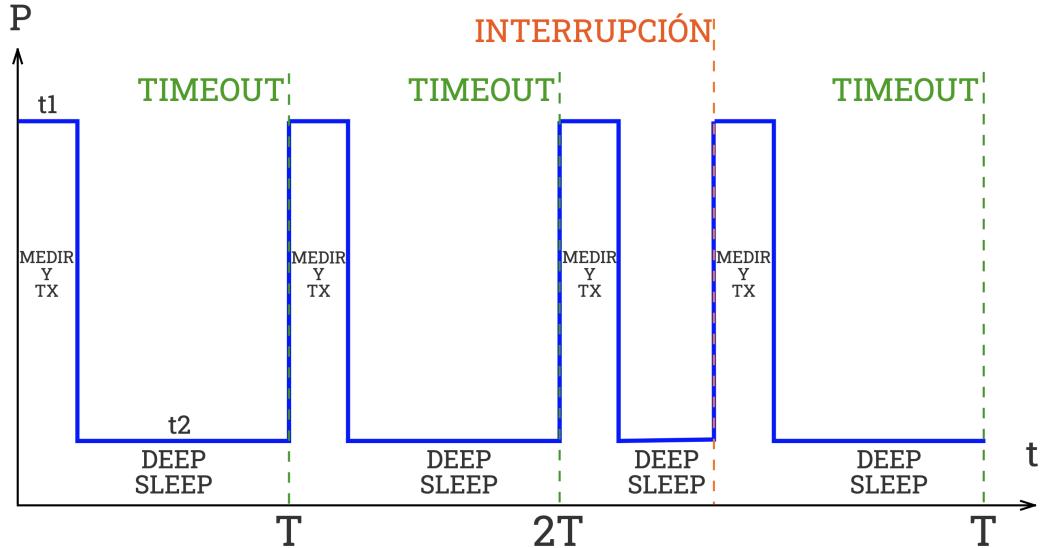


FIGURA 3.13. Ciclo de transmisión, ahorro de energía e interrupciones generadas por cortes.

3.3. Servicios de Backend

En esta sección se presenta la integración entre los servicios de backend, la red *The Things Network* y la estructura de los datos almacenados para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario.

3.3.1. Integración de la red LoRaWAN

Cuando la red LoRaWAN recibe la carga útil generada por cada nodo, es necesario realizar el camino inverso al descrito en [3.2.4](#).

The Things Network provee una herramienta dedicada llamada *payload format decoder*. Con esta herramienta cada vez que un paquete de un nodo llega, el código [3.2](#) lo procesa y separa cada lectura como clave de un elemento JSON antes de realizar el envío a los servicios de backend.

```

1 function Decoder(byte , port) {
2   factor_conversion_corriente = 127/1635;
3
4   i1 = ((byte[0] << 4) | (byte[1]>>4))*factor_conversion_corriente ;
5   i2 = (((byte[1] & 0x0F) << 8) | byte[2])*factor_conversion_corriente ;
6   i3 = (((byte[3] << 4) | (byte[4]>>4)))*factor_conversion_corriente ;
7   supercapacitor_adc = (byte[4] & 0x0F) << 8 | byte[5];
8
9   FACTOR_DIVISOR_RESISTIVO = 2
10  supercapacitor = (((supercapacitor_adc<<4) *4.096/32767))* 
11    FACTOR_DIVISOR_RESISTIVO;
12
13  var decoded = {};
14  decoded.corriente_1 = i1;
15  decoded.corriente_2 = i2;
16  decoded.corriente_3 = i3;
17  decoded.super_capacitor = supercapacitor;
18

```

```

19     return decoded;
20 }

```

CÓDIGO 3.2. Función encargada de descomprimir las 4 lecturas de 12 bits.

Las primeras experiencias de integración con *The Things Network* se realizaron a través de suscripciones a un tópico de MQTT. Sin embargo, *The Things Network* ya no brinda soporte a este servicio, motivo por el cual se cambió a envíos HTTPS utilizando el método POST.

En el servidor web, se encuentra un script PHP (ver anexo A) que atiende las consultas que llegan desde *The Things Network*. Este mismo script es el encargado de almacenar los datos en la base de datos. Las credenciales de usuario de la base de datos que se utiliza en este script tiene, por motivos de seguridad, únicamente permisos de INSERT.

3.3.2. Base de datos

Los datos recibidos a través de cada petición POST mencionada en la subsección 3.3.1, se almacenan de manera cronológica en una tabla llamada *corrientes_por_fase*.

Las columnas que componen esta tabla y el tipo de dato que almacenan se presentan en la figura 3.14.

```

Database changed
MariaDB [estado_trafos]> describe corrientes_por_fase;
+-----+-----+-----+-----+-----+
| Field      | Type       | Null | Key | Default | Extra           |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| id          | int(11)    | NO   | PRI | NULL    | auto_increment |
| id_sensor   | varchar(40) | NO   |     | NULL    |                 |
| datetime    | datetime   | NO   | MUL | NULL    |                 |
| rssi         | int(11)    | YES  |     | NULL    |                 |
| snr          | decimal(6,3)| YES  |     | NULL    |                 |
| counter      | int(11)    | NO   |     | NULL    |                 |
| v_supercap  | float      | YES  |     | NULL    |                 |
| I_fase_1    | float      | YES  |     | NULL    |                 |
| I_fase_2    | float      | YES  |     | NULL    |                 |
| I_fase_3    | float      | YES  |     | NULL    |                 |
| alerta       | tinyint(1) | YES  |     | 0       |                 |
| latitud      | float      | YES  |     | NULL    |                 |
| longitud    | float      | YES  |     | NULL    |                 |
+-----+-----+-----+-----+-----+
13 rows in set (0.01 sec)

```

FIGURA 3.14. Tabla de la base de datos utilizada para guardar los datos de los nodos.

Es relevante destacar que el origen de los datos almacenados, es una combinación entre las mediciones realizadas por el hardware (*I_fase_1*, *I_fase_2*, *I_fase_3*, *v_supercap*), información acerca de la señal de RF provista por el gateway (*rssi* y *snr*) y metadatos propios de cada nodo (*id_sensor*, *latitud*, *longitud*) provistos por

el servidor de aplicaciones de *The Things Network*.

3.3.3. Interfaz gráfica basada en Grafana

La integración entre MariaDB y Grafana fue inmediata. Gracias a asistentes dedicados, la conexión con la base de datos se redujo únicamente a configurar la dirección del host, usuario y contraseña.

La generación de gráficos de corriente por fase se presenta en la figura 3.15. La consulta realizada a la base de datos es de pocas líneas y el formato deseado por usuario se ajusta según cuantas trazas se deseen presentar.

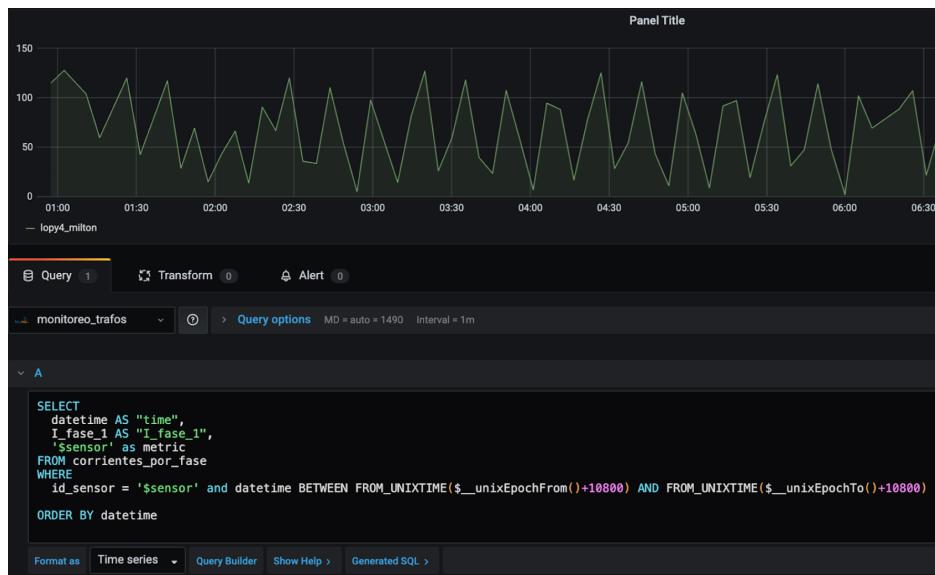


FIGURA 3.15. Gráfico histórico de corrientes de fase.

Como único contratiempo se puede mencionar la dificultad que tiene Grafana de manejar muestras temporales si no se utiliza la misma zona horaria que el sistema operativo. En este proyecto se prefirió guardar la información en la base de datos en formato UTC. De esta manera, aumenta la compatibilidad y se puede desplegar el sistema en cualquier lugar del mundo, independientemente de la zona horaria local.

Para subsanar las diferencias entre la base de datos y Grafana se generaron manualmente las consultas SQL agregando el parámetro zona horaria. En la figura 3.15, el valor +10800 equivalen a los segundos necesarios para compensar en este caso UTC-3.

Finalmente en la figura 3.16, se creó un panel de Worldmap y la consulta SQL se realizó contra una vista que se encarga de recoger los últimos datos individuales de cada nodo.

Mediante una herramienta *hover*, una ventana despliega los últimos datos enviados por cada nodo al colocar el cursor sobre el nodo de interés. Esto permite la lectura rápida de los valores de corriente y tensión en el supercapacitor.

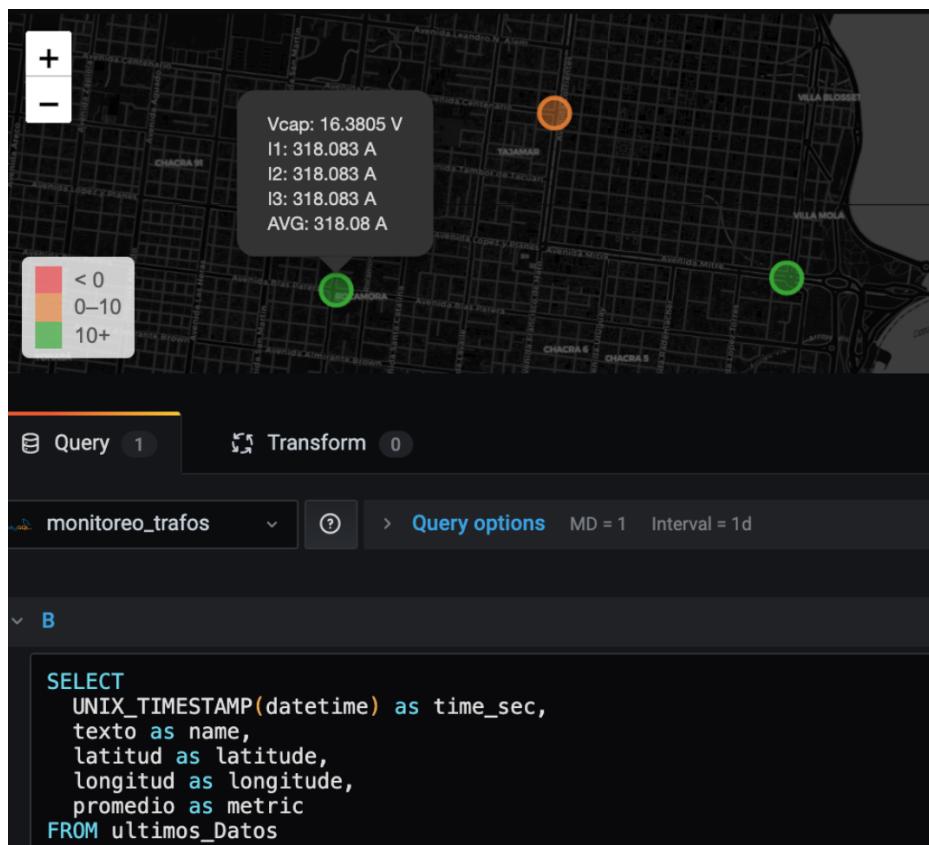


FIGURA 3.16. Panel de Worldmap presentando la lectura de corriente RMS por fase y la tensión del acumulador.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de hardware y software. Se analiza el cumplimiento de requisitos de desempeño impuestos por el cliente y finalmente, se exponen resultados de un ensayo *end-to-end* con la red LoRaWAN.

4.1. Circuito impreso desarrollado

Gracias al desarrollo temprano de la primera placa prototipo de la figura 4.1, se realizaron las primeras validaciones de diseño de circuitos y selección de componentes para las diferentes etapas del hardware presentadas en 3.1.

Disponer de una placa con la mayoría de las etapas ya montadas, soldadas y depuradas, ayudó a reducir fallas eléctricas tales como falsos contactos que ocurrieron al usar protoboards.

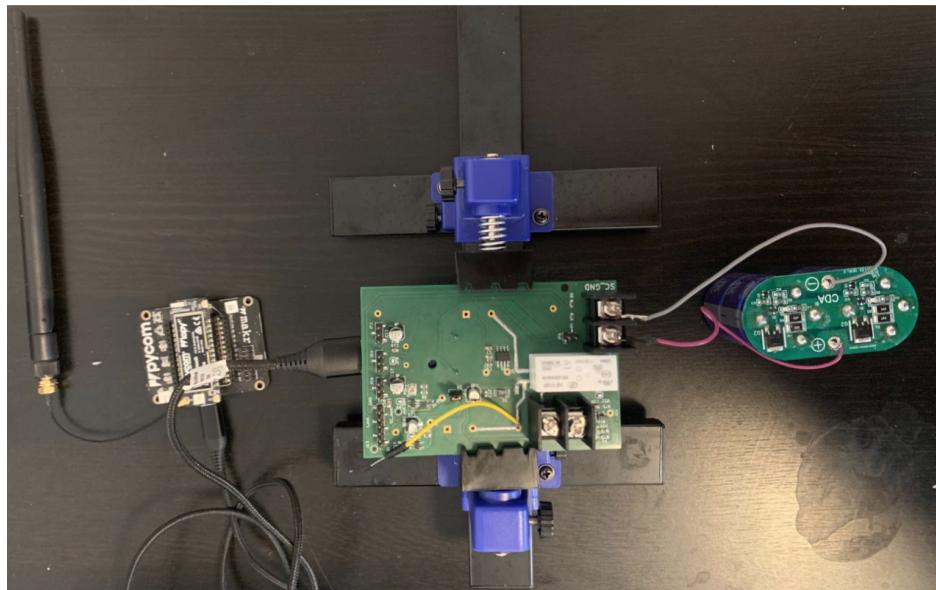


FIGURA 4.1. Placa prototipo desarrollada para validacion de diseño de etapas.

Una vez validados los diseños mediante la primera placa, se desarrolló la placa final presentada en las figuras 4.2 y 4.3. Esta, a diferencia de la primera versión integra toda las etapas en un único circuito impreso.

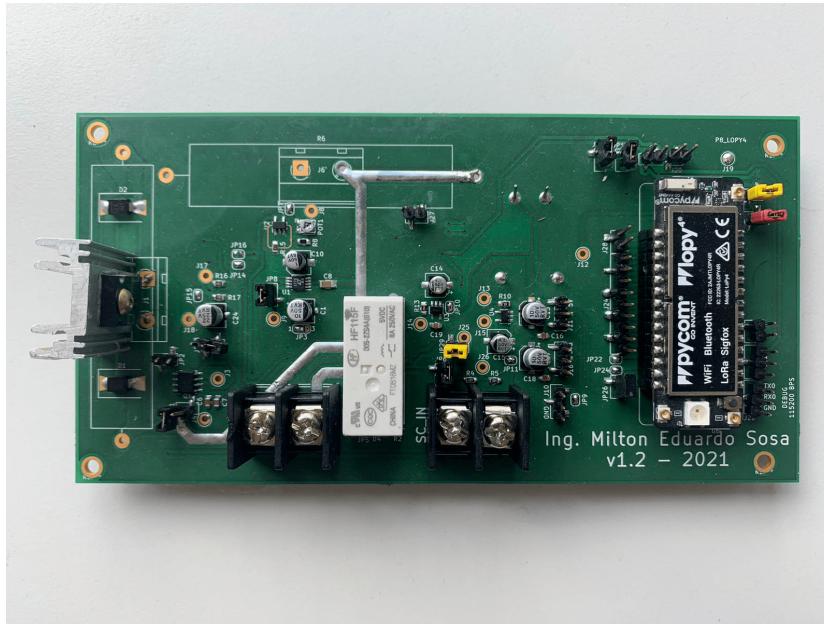


FIGURA 4.2. Lado TOP del circuito impreso final integrando todas las etapas.

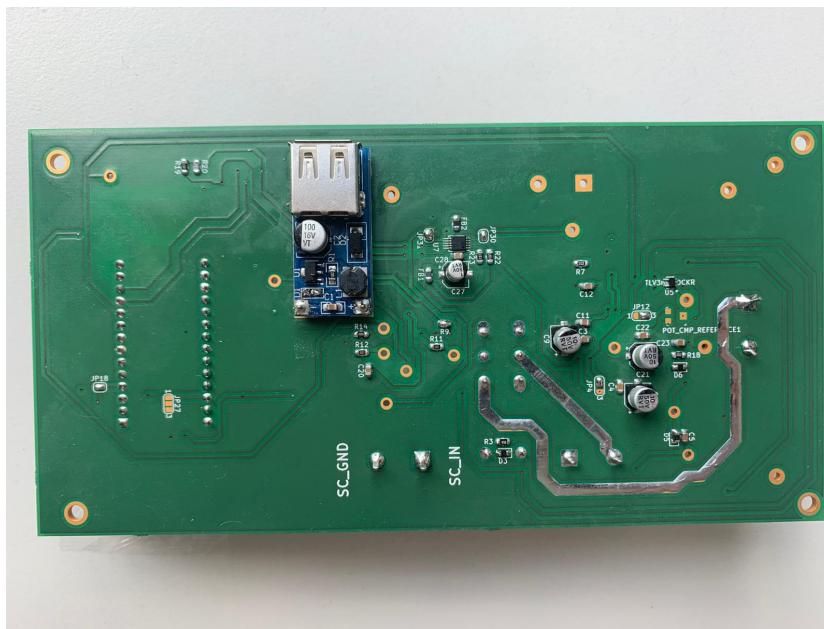


FIGURA 4.3. Lado BOTTOM del circuito impreso final que alberga todas las etapas.

4.2. Medidor de valor RMS

4.3. Circuito detector de cortes

4.4. Consumo en deep sleep

Debido a la imposibilidad de poder acceder a un laboratorio con instrumental de precisión, las mediciones tomadas en los ensayos se realizaron por partes y en diferentes turnos.

Como instrumento de medición se contó únicamente con un multímetro de la marca HoldPeak modelo HP-770d [35].

El instrumento elegido tiene un rango de medición de corriente que permite medir desde los uA hasta 400 mA. Este rango pareció suficiente para la medición de corriente en ambos estados sin la necesidad de cambiar de escala. Sin embargo, en las primeras rondas de medición se advirtió que al salir del modo ahorro de energía y transmitir, la corriente consumida por el hardware generó una tensión de burden en el instrumento que causó que el microcontrolador se reseteara por desvanecimiento (Brown Out Reset-).

Como solución, para el ensayo de consumo en deep sleep se grabó sobre la LoPy4 una versión de firmware que llevó al hardware al modo ahorro de energía apenas se energizo por al menos 10 minutos. Un tiempo suficiente para registrar el consumo de corriente en este modo.

Para la medición de consumo durante la transmisión, se programó la versión final de firmware. Para sortear el problema de reseteo por desvanecimiento se utilizó la escala de amperes en conjunto con la función que retiene el pico máximo de la señal.

La tabla 4.1, expone los resultados promedio para un total de 10 mediciones efectuadas en cada modo.

TABLA 4.1. Consumo máximo registrado en los diferentes modos.

| Modo | Consumo máximo |
|-------------|-------------------|
| Deep sleep | 62 uA |
| Transmisión | 127 mA |

Si bien el perfil estimado de consumo del hardware es similar al presentado en 3.13, por falta de equipamiento no se ha podido capturar un oscilograma para graficar su perfil exacto. Tal gráfico se podría haber adquirido con un multímetro de 7 ½ dígitos con la función de almacenamiento.

Desenergizar toda la electrónica salvo al microcontrolador, ha reducido el consumo total de la electrónica al orden de los microamperes. Este valor de consumo registrado, se encuentra debajo de lo requerido por el cliente en 1e e implica un aumento en la autonomía del acumulador.

4.5. Autonomía del supercapacitor

Este ensayo tuvo como objetivo principal, verificar el cumplimiento del requerimiento 1d.

El ensayo comenzó con el banco de supercapacitores completamente cargado y

4.6. Ensayo end-to-end

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

El sistema desarrollado, en concordancia con el objetivo general, conforma una herramienta económica para la prestadora del servicio de energía. Esta herramienta está diseñada para otorgar mayor granularidad de información sobre el estado de operación de las redes de distribución, sin implicar cambios significativos de infraestructura. Por otra parte, el análisis de la información suministrada permite identificar eventos recurrentes y evaluar sus posibles causas para poder delinejar acciones correctivas y/o preventivas para mejorar la calidad de servicio. Cumplimentando todos los requerimientos planteados por el cliente, y el tiempo planteado en la planificación, se ha logrado el desarrollo exitoso del sistema en todas sus partes: hardware, firmware, servicios de backend; como así también su integración con la red LoRaWAN.

El uso de la red LPWAN de acceso público *The Things Network* seleccionada para el trabajo, ha prestado servicios durante todo el desarrollo del proyecto sin problema alguno, demostrando así su buena cobertura y calidad de servicio a nivel global. Aún habiendo cambiado la localización geográfica de Europa a Sudamérica para realizar pruebas de laboratorio, la operación del sistema no se ha visto afectada en ningún aspecto.

El hardware es capaz de convertir energía de corriente alterna proveniente del transformador de intensidad en otra de corriente continua y almacenarla. Los resultados del Capítulo 4, demuestran que el uso de circuitos de *energy harvesting* en conjunto con tecnologías alternativas de acumulación en constante evolución como los supercapacitores, podrían ser sustitutos factibles de las baterías litio en aplicaciones autónomas que operen en régimen 24/7 y donde el rango de temperatura de operación necesaria sea mayor.

Las mediciones de valor RMS de corriente realizadas en el laboratorio, simulando la señal del TI con un generador de ondas y usando una carga de prueba presentadas en 4.2, demostraron la linealidad del circuito de medición dentro del rango de medición adoptado.

A partir de los ensayos de consumo en modo *deep sleep* y autonomía de operación presentados en el capítulo 4, queda demostrado que el patrón *power save loop* ha tenido un impacto significativamente positivo en la gestión de energía del nodo. El tiempo total de propagación de datos desde el nodo *in situ* hacia la red LoRaWAN, recuperación por los servicios de backend y presentación en la interfaz gráfica de usuario, es menor a 5 segundos. Este tiempo de propagación para el reporte de un problema, es considerado excelente en contraste con la situación actual en la provincia de Misiones.

Un conjunto de software con abundante documentación tal como lo es LAMPP,

ha ayudado a reducir el tiempo requerido para la puesta en funcionamiento de los servicios de backend propios del proyecto y la integración con la red LoRaWAN a través de su API REST.

Durante la etapa de integración entre LoRaWAN y los servicios de backend, fue destacable la importancia de la unificación del lenguaje de programación a Python en éste proyecto. Además de su uso para el desarrollo del firmware, se lo utilizó para implementar mockups que emulen los datos generados por el hardware. Mediante el uso de esta técnica se pudo garantizar un flujo de desarrollo totalmente desacoplado de la necesidad de involucrar el hardware, pero sí con una interacción constante entre servicios *web* públicos y privados.

5.2. Trabajo a futuro

Cumplidos los requerimientos y finalizado el trabajo propuesto, se han identificado las siguientes áreas de mejoras a futuro tanto en hardware como software:

- Actualizar de manera inalámbrica el firmware (OTA - *Over The Air*): nuevas versiones del firmware del microcontrolador aportarán nuevas funcionalidades, correcciones o mejoras sobre las ya existentes en nodos desplegados. Sin embargo, desarrollar esta funcionalidad es de alta prioridad antes de que el sistema llegue a una etapa de lanzamiento de producto. De esta manera, se prescindirá de la necesidad de intervenir físicamente cada nodo para actualizarlo.
- Modularizar el circuito impreso para realizar mediciones de 3 fases: dado que los sistemas de distribución son trifásicos, el hardware deberá también permitir realizar mediciones de corrientes sobre las 3 fases del sistema. Para lograr esto se debería proponer una modularización de la etapa de medición de valor RMS de corriente.
- Integrar servicios de mensajería instantánea: si bien la interfaz gráfica de usuario permite de manera rápida identificar sobre un mapa el punto geográfico donde la red presenta un problema o su estado actual de operación, contar con una aplicación similar para dispositivos móviles será de utilidad para el personal encargado de cumplir horarios de guardia.

Apéndice A

Código en PHP encargado de recibir peticiones POST y almacenar en la base de datos

```

1 <?php
2 //Make sure that it is a POST request.
3 if(strcasecmp($_SERVER['REQUEST_METHOD'], 'POST') != 0){
4     throw new Exception('Request method must be POST!');
5 }
6
7 //Make sure that the content type of the POST request has been set to
8 //application/json
9 $contentType = isset($_SERVER["CONTENT_TYPE"]) ? trim($_SERVER["CONTENT_TYPE"]) : '';
10 if(strcasecmp($contentType, 'application/json') != 0){
11     throw new Exception('Content type must be: application/json');
12 }
13 //// HTTP Authorization header
14 //Receive the RAW post data.
15 $content = trim(file_get_contents("php://input"));
16 //Attempt to decode the incoming RAW post data from JSON.
17 $decoded = json_decode($content, true);
18
19 //If json_decode failed, the JSON is invalid.
20 if(!is_array($decoded)){
21     throw new Exception('Received content contained invalid JSON!');
22 }
23
24 $id_sensor = $decoded['dev_id'];
25 $datetime = $decoded['metadata'][ 'gateways'][0][ 'time'];
26 $rss = $decoded[ 'metadata'][ 'gateways'][0][ 'rss'];
27 $snr = $decoded[ 'metadata'][ 'gateways'][0][ 'snr'];
28 $v_supercap = $decoded[ 'payload_fields'][ 'super_capacitor'];
29 $I_fase_1 = $decoded[ 'payload_fields'][ 'corriente_1'];
30 $I_fase_2 = $decoded[ 'payload_fields'][ 'corriente_2'];
31 $I_fase_3 = $decoded[ 'payload_fields'][ 'corriente_3'];
32 $I_Neutro = $decoded[ 'payload_fields'][ 'corriente_neutro'];
33 $latitud = $decoded[ 'metadata'][ 'latitude'];
34 $longitud = $decoded[ 'metadata'][ 'longitude'];
35
36 // Create connection
37 $servername = "mysqlserver";
38 $username = "ttn";
39 $password = "*****";
40 $dbname = "estado_trafos";
41

```

```
42 $myConnection= mysqli_connect($servername,$username,$password,$dbname)
     or die ("could not connect to mysql");
43
44 $sqlCommand="INSERT INTO corrientes_por_fase(id_sensor,datetime,rssi,snr
     ,v_supercap,I_fase_1,I_fase_2,I_fase_3,I_Neutro,latitud,longitud)
     VALUES('$id_sensor','$datetime','$rssi','$snr','$v_supercap','$I_fa$'
45
46 $query=mysqli_query($myConnection, $sqlCommand) or die(mysqli_error(
     $myConnection));
47 ?>
```

CÓDIGO A.1. Código PHP encargado de recibir peticiones POST desde *The Things Network*.

Bibliografía

- [1] Asociación Electrotécnica Argentina. «AEA 95301 - Reglamentación Líneas Aéreas Exteriores de Media Tensión y Alta Tensión». En: Asociación Electrotécnica Argentina - AEA, 2007, pág. 13.
- [2] MYEEL. *Meterlink*. <https://www.myeel.com.ar/novedad/Meterlink>. Mayo de 2021. (Visitado 04-05-2021).
- [3] Misiones Online. *La breve tormenta que pasó por Posadas dejó a un árbol sujeto al tendido eléctrico y hay alerta entre los vecinos*. Visitado el 2021-05-04. 2020. URL: <https://misionesonline.net/2020/02/25/la-breve-tormenta-que-paso-por-posadas-dejo-a-un-arbol-sujeto-al-tendido-electrico-y-hay-alerta-entre-los-vecinos/>.
- [4] L. Lu Y. Liang B. Li y J. Guo. «Maintenance of the OPGW using a distributed optical fiber sensor». En: *International Conference on Power System Technology, Chengdu* (2014), págs. 1251-1256. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6993536>.
- [5] Eduardo Omar Sosa Milton Eduardo Sosa. «Internet de las Cosas en Entornos Académicos. Caso de Éxito en la Universidad de Misiones». En: *UBA Elektron* (2017). URL: <http://elektron.fi.uba.ar/index.php/elektron/article/view/9>.
- [6] Internet Engineering Task Force (IETF). *Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1*. RFC 8376. Mayo de 2018. DOI: [10.17487/rfc2616](https://doi.org/10.17487/rfc2616). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc8376>.
- [7] J. Filho y V. Moreli H. Filho. «The adequacy of LoRaWAN on smart grids: A comparison with RF mesh technology». En: *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)* (2016).
- [8] S. Dalola y e. al. «Autonomous Sensor System With Power Harvesting for Telemetric Temperature Measurements of Pipes». En: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58 (2009), págs. 1471-1478.
- [9] X. Hua. *Power Management Techniques for Supercapacitor Based IoT Applications*. Disponible: 202-03-17. URL: <https://bit.ly/3eZIAjM>.
- [10] HIOKI. *Current sensor measurement principles*. Disponible: 2016-06-25. URL: <https://www.hioki.com/en/products/listUse/?category=17>.
- [11] HONGFA. *HF115F - MINIATURE HIGH POWER RELAY*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://datasheet.octopart.com/HF115F-005-2ZS4AF%28257%29-Hongfa-datasheet-150612269.pdf>.
- [12] Yilmaz, Mehmet. «Passive Full-Wave MOSFET Rectifiers for Electromagnetic Harvesting». Tesis de mtría. 2013. URL: <http://hdl.handle.net/10012/7722>.
- [13] Meteoblue. *Archivo meteorológico de la ciudad de Posadas, Misiones*. Disponible: 2021-05-05. URL: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/posadas_argentina_3429886?fcstlength=1m&year=2020&month=9.
- [14] Samwha. *Green Cap - Electric double layer capacitors*. Disponible: 2021-05-05. URL: http://www.samwha.com/electric/product/list_pdf1/DB.pdf.

- [15] Shuai Ma y col. «Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review». En: *Progress in Natural Science: Materials International* 28.6 (2018), págs. 653-666. ISSN: 1002-0071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007118307536>.
- [16] M. Ceraolo y D. Poli. *Fundamentals of Electric Power Engineering: From Electromagnetics to Power Systems*. Wiley, 2014. ISBN: 9781118868751.
- [17] PYCOM. *LoPy 4*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://docs.pycom.io/datasheets/development/lopy4/>.
- [18] Damien George. *Micropython*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://micropython.org/>.
- [19] LoRa Alliance. *Micropython*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://lora-alliance.org/>.
- [20] Shay Banon. *Elasticsearch*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.elastic.co/es/what-is/elasticsearch>.
- [21] Torkel Ödegaard. *Grafana, the open observability platform*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://grafana.com/>.
- [22] Raspberry Pi Foundation. *Raspberry Pi 3b+*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>.
- [23] MariaDB Foundation. *Grafana, the open observability platform*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://mariadb.org/>.
- [24] Diodes Incorporated. *ENHANCEMENT MODE MOSFET H-BRIDGE*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/DMHC3025LSD.pdf>.
- [25] Danilo Porcarelli, Davide Brunelli y Luca Benini. «Clamp-and-Forget: A self-sustainable non-invasive wireless sensor node for smart metering applications». En: *Microelectronics Journal* 45.12 (2014), págs. 1671-1678. ISSN: 0026-2692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2014.05.019>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026269214001785>.
- [26] Texas Instruments. *TLV3691 0.9-V to 6.5-V, Nanopower Comparator*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv3691.pdf?ts=1620868495839>.
- [27] ON Semiconductor. *FPF2100 - Load switches*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fpf2104-d.pdf>.
- [28] Howard Butler. *SPLIT-CORE CURRENT TRANSFORMERS*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.hobut.co.uk/Split%20Core%20Clip%20together%20range.pdf>.
- [29] Analog Devices. *True RMS-to-DC Converter*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD636.pdf>.
- [30] National Semiconductor. *True RMS-to-DC Converter*. Disponible: 2021-05-05. URL: <http://www.mit.edu/~6.301/LH0091.pdf>.
- [31] Linear Technologies. *LTC1966 - True RMS-to-DC Converter*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1966fb.pdf>.
- [32] Microchip. *MCP6001 - Low Power Op Amp*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP6001-1R-1U-2-4-1-MHz-Low-Power-Op-Amp-DS20001733L.pdf>.
- [33] Texas Instruments. *ADS1015 - 12-bit, 3.3-kSPS, 4-channel, delta-sigma ADC with PGA, oscillator, VREF, comparator and I2C*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.ti.com/product/ADS1015>.

- [34] robert-hh. *Driver for the ADS1015/ADS1115 Analogue-Digital Converter.* Disponible: 2021-05-05. URL: <https://github.com/robert-hh>.
- [35] Hold Peak. *770 Series multimeter.* Disponible: 2021-05-05. URL: <https://santatechnology.com/products-datasheet/2962-1613702879.pdf>.