



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. Requerimientos acordados con el cliente	7
2.2. Diagrama de bloques general del sistema implementado	8
2.3. Detalle del hardware	10
2.3.1. Transformador de corriente	10
2.3.2. Circuito de selección	10
2.3.3. Conversión de energía	10
2.3.4. Supercapacitor como acumulador de energía	11
2.3.5. Elevación de tensión mediante un conversor DC/DC	12
2.3.6. Microcontrolador y firmware	13
2.4. Detalle 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. Detalle del hardware por etapas	17
3.1.1. Circuito de selección de modo	17
3.1.2. Puente rectificador de onda completa	17
3.1.3. Acumulador de energía basado en supercapacitores	18
3.1.4. Circuito de detección de cortes	19
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
3.2. Firmware implementado	24
3.3. Servicios de Backend	24
3.4. Integración de la red LoRaWAN	25
3.5. Base de Datos	25
3.6. GUI basada en Grafana	25

4. Ensayos y resultados	27
4.1. PCB desarrollado	27
4.2. Medidor de valor RMS	27
4.3. Circuito detector de cortes	27
4.4. Consumo en deep sleep	27
4.5. Autonomía del supercapacitor	27
4.6. Ensayo end-to-end	27
5. Conclusiones	29
5.1. Conclusiones generales	29
5.2. Trabajo a futuro	30
Bibliografía	31

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 HW para el nodo a instalar <i>in situ</i>	9
2.2. Diagrama de bloques del FW implementado en el MC y su interacción con la red LoRaWAN y los BES privados del sistema.	9
2.3. Circuito de medición indirecta de corriente mediante un TI.[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]	11
2.6. Módulo comercial DC/DC en topología boost utilizado para alimentar la electrónica	12
2.7. Placa de desarrollo LoPy 4 [17]	13
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].	14
2.10. Ejemplo de interfaz gráfica de usuario requerida por el cliente para presentar los últimos datos recuperados por cada nodo en la ciudad de Posadas, Misiones.	15
3.1. circuito selector de modo basado en el relay HF115-005-2ZS4	18
3.2. Pinout y esquemático interno del DMHC3025 [referencia al datasheet].	19
3.3. Etapa de rectificación, filtrado y acumulación implementada.	19
3.4. Banco de SC de 250 F x 5,4 V utilizado como acumulador.	20
3.5. Circuito utilizado como detector de cortes.	20
3.6. Circuito de encendido y apagado de las diferentes etapas de HW empleando un load switch FPF2100 [25].	21
3.7. TI de tipo nucleo partido y sus dimensiones. Imágenes tomadas de [26]	22
3.8. Circuito medidor de valor RMS implementado usando 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 SC. .	24

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.	18
3.2. Características del CTSCM40-200/5 [26]	22
3.3. Tabla comparativa de chips aptos para medición RMS	22

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 380/220V no poseen la capacidad de brindar algún otro servicio agregado. Como



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]

una manera de previsión a la necesidad de montar servicios adicionales a las redes de transmisión de media y alta tensión (33 kV y 132 kV), a las redes propias de transmisión de energía, se adiciona 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, conllevando 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: física, red y aplicación. Definiendo 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.) residen en entornos controlados, los cuales se establecen mediante el despliegue e implementación de redes de diferente tecnología 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* (HW) y *software* (SW) utilizados para el desarrollo del trabajo. Se describen en las partes implementadas del HW, los servicios integrados de *backend* (BES) y solamente algunos aspectos relevantes del *firmware* (FW) que interactúa con el HW. En el capítulo 3 se abarca la lógica de negocios implementada en el FW del microcontrolador.

2.1. 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 2V en la entrada.
 - 2) Otorgar 5 Volts a la salida.
 - 3) Ser capaz de otorgar 300 miliamperes a la salida.
 - g) El transformador de corriente (TI) debe:
 - 1) Ser de tipo núcleo partido.
 - 2) Admitir 100 Amperes de corriente en el circuito primario y un máximo 5 Amperes 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 5V o menos.
 - 3) Soportar al menos 5 Amperes 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 Voltios.
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 (BES)
- a) Todos los servicios deben poder correr en una Raspberry Pi 3.
 - b) El *software* de los BES se desarrollará en lenguaje Python.
 - c) Recuperar los datos de la red LoRaWAN.
 - d) Almacenar los datos en una tabla de MySQL.
 - e) (*GUI - Graphical User Interface*) 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 Amperes y permitir realizar interrupciones de corriente de manera programada mediante una computadora adicional tipo Raspberry Pi o de manera manual.
 - b) Los BES deben estar operativos al momento de realizar los ensayos.
 - c) Contar con un gateway de acceso a una red LoRaWAN como por ejemplo *The Things Network*.

2.2. Diagrama de bloques general del sistema implementado

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

1. Circuito de selección de modo: un relay (RL) y su circuito de mando controlarán a que etapa del nodo se conectarán los terminales del TI.
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.

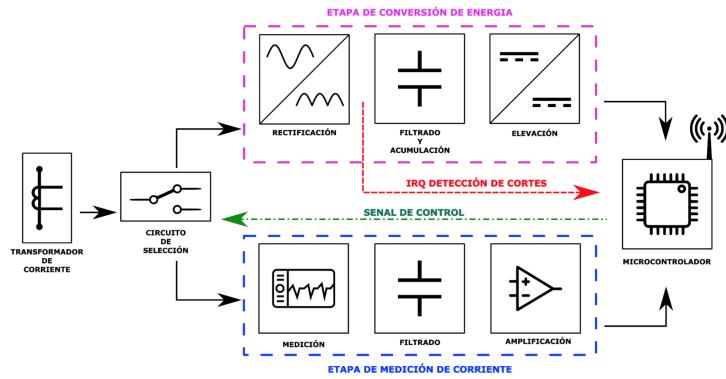


FIGURA 2.1. Diagrama de bloques del HW para el nodo a instalar *in situ*

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 (MC): ejecuta la lógica de negocios que rige el comportamiento del nodo, digitalizar mediciones y transmitir 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* (BES) propios del proyecto que cumplen las funciones de:

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

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

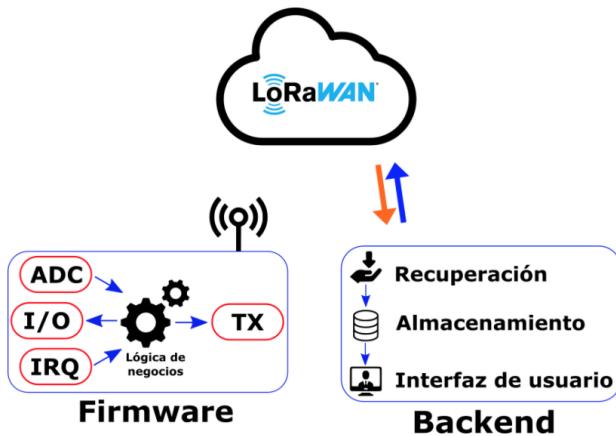


FIGURA 2.2. Diagrama de bloques del FW implementado en el MC y su interacción con la red LoRaWAN y los BES privados del sistema.

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

2.3. Detalle 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 TI 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 y depende de que tanto se debe reducir la corriente.

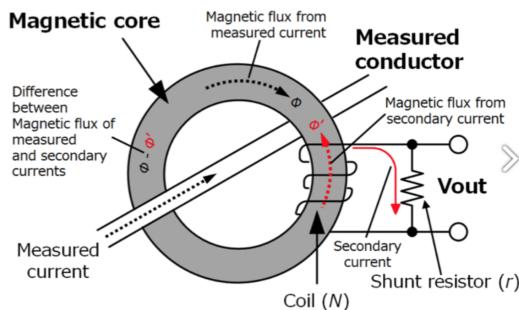


FIGURA 2.3. Circuito de medición indirecta de corriente mediante un TI.[10]

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

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 al energizarse la bobina del RL, el número y la disposición de los contactos fue un factor relevante al momento de elegir la mejor opción. La variante comercial que cumplió con los requisitos 1h es la producida por la firma Hongfa modelo HF115F/005-2ZS4A presentada en la figura 2.4.

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

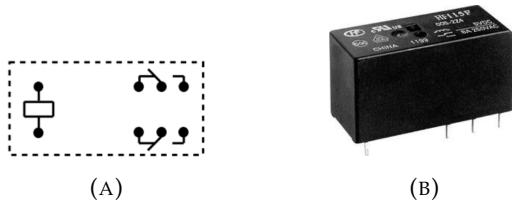


FIGURA 2.4. Pinout del relay HF115F/005-2ZS4A (izquierda) y su encapsulado (derecha). Imágenes tomadas de [11]

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 y es 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 basado en MOSFETs se comparan en la figura 2.5.

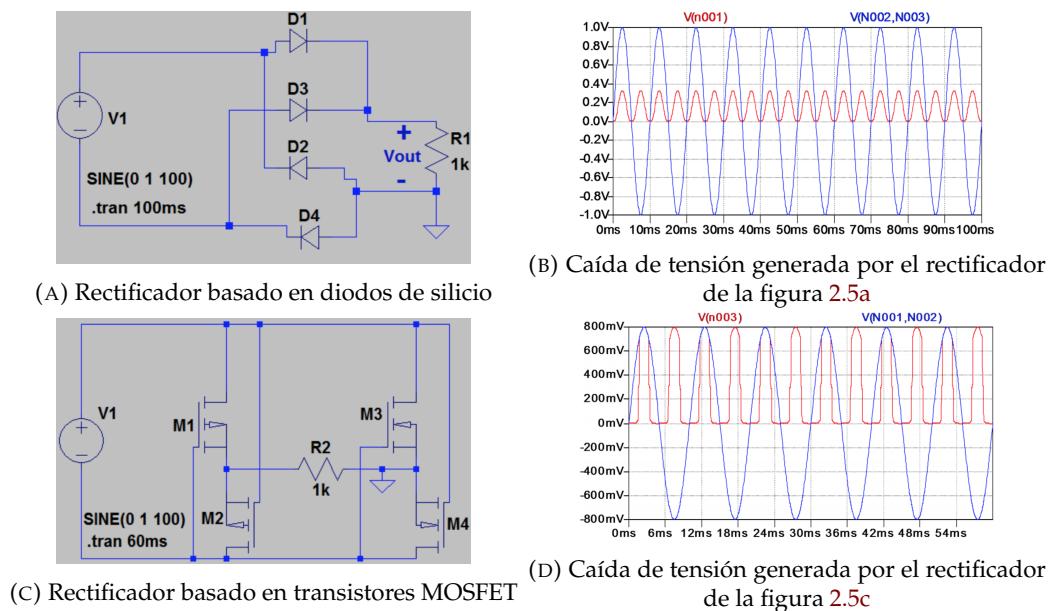


FIGURA 2.5. Simulación de rectificadores basados en diodos y MOSFET. Imágenes tomadas de: [12]

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, 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 (SC) como reemplazo total de una batería, se basa principalmente en el entorno donde operará el nodo HW.

Diferencias entre una batería y un SC de interés para este proyecto, se plasman en la tabla 2.1.

Datos meteorológicos de la provincia de Misiones presentados en [13], acusan temperaturas por encima de 30 C durante el periodo de septiembre a marzo. A diferencia de un SC que posee un rango de temperaturas de operación desde los -40 C hasta 70 C [14], condiciones por encima de 35 grados son 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 SC. 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 respetados 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 MC, y el resto de la electrónica asociada de una tensión DC fija y constante, se ha optado por emplear un módulo comercial DC/DC ya existente en el mercado y es presentado 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 HW del sistema, cumple la función de llevar la tensión variable del SC 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 miliamperes de corriente a la salida.

2.3.6. Microcontrolador y firmware

El MC es el ente encargado de ejecutar la lógica de negocios acorde a la tarea que debe cumplir el HW. 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 y se presenta en la figura 2.7. En su interior alberga un ESP32, 8 Me-gabytes de memoria flash, transceptores de radio LoRa y 802.11 y un regulador de tensión.

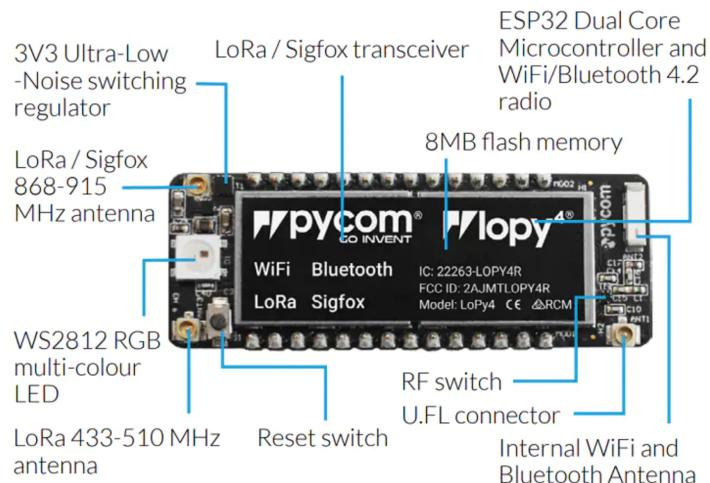


FIGURA 2.7. Placa de desarrollo LoPy 4 [17]

El lenguaje de programación del 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 FW sobre microcontroladores utilizando el paradigma de programación orientada a objetos.

2.4. Detalle 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 Alliance [19]. Tiene por objeto permitir la conexión de nodos de baja potencia (generalmente alimentados a batería y sin capacidad de manejo de protocolos de enrutamiento por ejemplo TCP/IP) con aplicaciones finales conectadas a Internet mediante una conexión inalámbrica de largo alcance utilizando modulación LoRa.

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

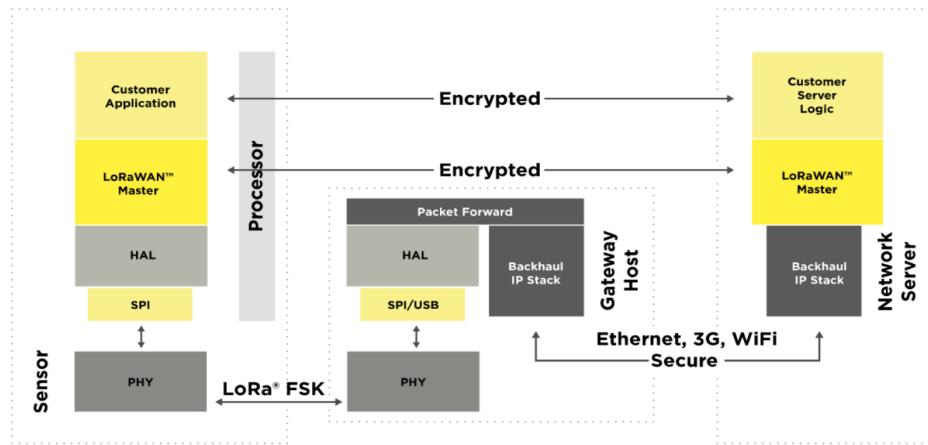


FIGURA 2.8. Arquitectura de una red LoRaWAN y sus posibles integraciones con terceras partes [19].

El protocolo LoRaWAN no es un protocolo IP, por lo tanto, los paquetes del mismo necesitan de un enruteamiento 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 GW retransmiten los mensajes recibidos de los nodos finales hacia un servidor central. La comunicación inalámbrica entre nodos y GW aprovecha las características propias de la capa física, permitiendo así enlaces de un nodo hacia uno o más gateways.

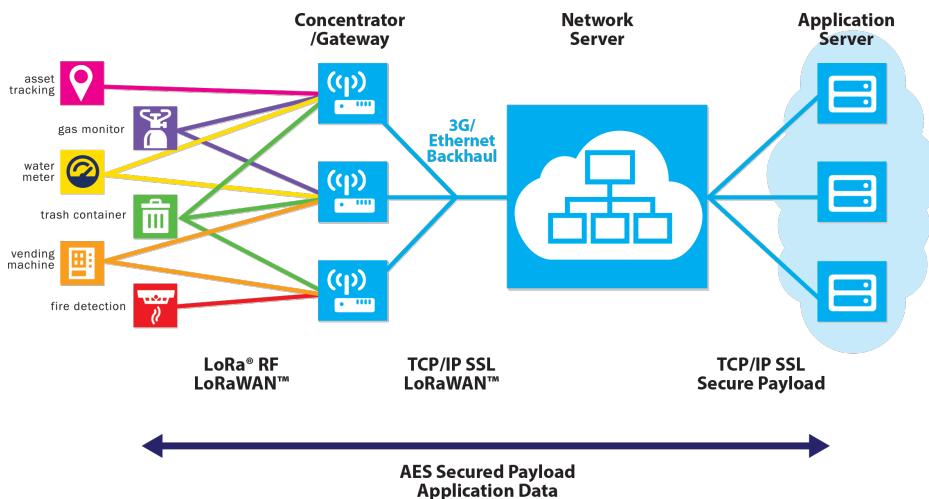


FIGURA 2.9. Topología de una red LoRaWAN y la interacción entre los diferentes miembros [19].

2.4.2. Motor de base de datos

Una base de datos (DB - *Database*) 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 NoSQL. Estas últimas están orientadas a documentos y almacena información de un mismo tipo en la forma de clave-valor.

Por su naturaleza, este proyecto parece indicado para utilizar NoSQL, ya que solo almacena registros de un tipo y no necesita crear relaciones complicadas entre distintas tablas de datos.

En principio se pensó en utilizar *Elasticsearch* [20], un servidor de búsqueda de texto basado en documentos JSON. Parecía el candidato ideal, ya que además de ser libre, se integraba perfectamente con Grafana, la herramienta para el desarrollo de la interfaz gráfica elegida [21].

Sin embargo, en las primeras pruebas llevadas a cabo se pudo apreciar que el consumo de memoria y procesamiento eran muy elevadas si se lo implementaba en un hardware modesto como las *Raspberry Pi* [22]. Finalmente se optó por utilizar MariaDB [23], una base de datos del tipo SQL, también libre, 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 DB, una GUI presenta al usuario final del centro de operaciones los datos recolectados por cada nodo.

Una interfaz gráfica como la presentada 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.

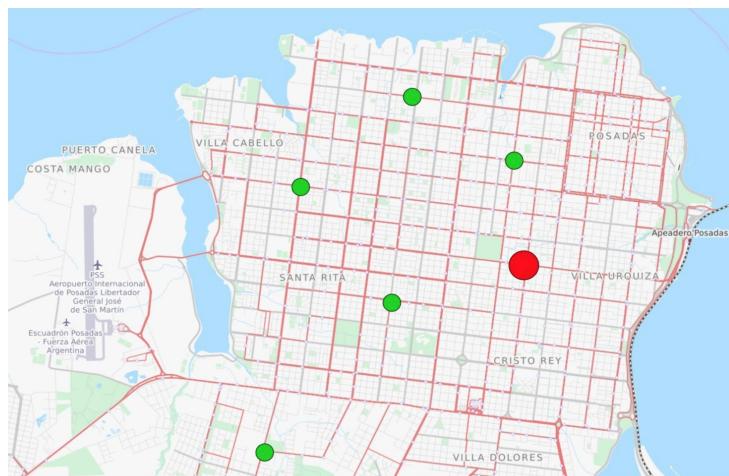


FIGURA 2.10. Ejemplo de interfaz gráfica de usuario requerida por el cliente para presentar los últimos datos recuperados por cada nodo en la ciudad de Posadas, Misiones.

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

Grafana se adaptó muy bien a las necesidades del proyecto. Para mejorar aun más la experiencia del usuario se complementa con *Worldmap Panel*, un *plug in* 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 detalla el HW desarrollado en etapas con un enfoque individual a cada etapa. Se presentan circuitos esquematicos correspondientes al circuito implementado para cada etapa individual y su rol en el sistema. La subsección 3.2 expone el patron *power save loop* adoptado en la logica de negocios, los perifericos del MC con los cuales interactua y la rutina de interrupcion que atiende al generarse un corte. Por ultimo, la sección 3.3 da al lector detalle acerca de la integracion entre la red LoRaWAN y los servicios adoptados para este proyecto.

3.1. Detalle del hardware por etapas

3.1.1. Circuito de selección de modo

Considerando el caso límite donde el nivel del acumulador es bajo y el MC ordena al relay (RL) con retención cambiar su estado, la energía necesaria para excitar al RL puede generar una caída de tensión significativa en el acumulador y resultar en un circuito totalmente desenergizado sin posibilidad de volver a entrar en operación a no ser mediante la intervención humana.

Un caso extremo como el mencionado, implica que el HW posea un mecanismo para restablecer su operación tras largos periodos de tiempo aun después de haberse vaciado el acumulador.

En la figura 3.1 se implementó el RL sin retención presentado en 2.4 y su circuito de mando. Los terminales del TI, se encuentran conectados por defecto a la etapa de conversión y acumulacion de energía (terminales NC1 y NC2). Una vez que la tensión en bornes del acumulador alcanza el valor de mínimo para que el convertor DC/DC entre en operación, también la electrónica sin la necesidad de una intervención externa.

Cada vez que se desea tomar una medición de corriente, el MC enciende la bobina del relay y conecta el TI al circuito de medición de valor RMS. Al

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 PCB, se optó por utilizar un chip DMHC3025 en encapsulado SOIC-8 [REFERENCIA A DATASHEET]. El encapsulado presentado en la 3.2 alberga un puente H formado dos transistores MOSFET tipo P y dos tipo N. Las

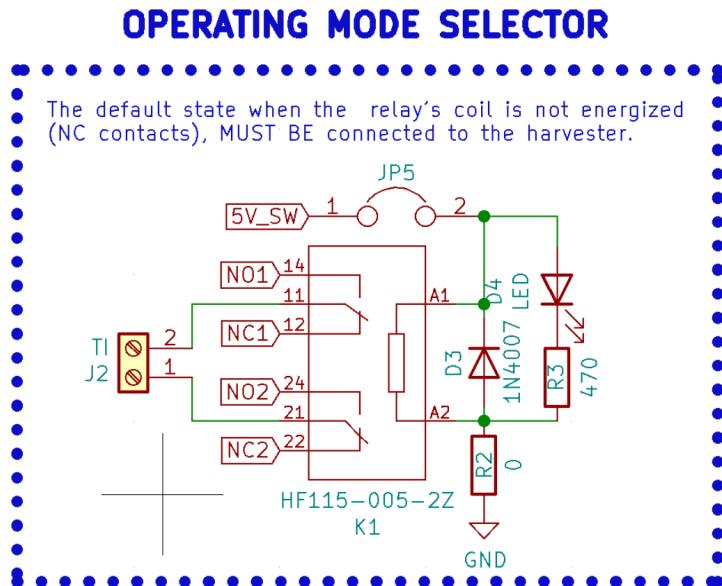


FIGURA 3.1. circuito selector de modo basado en el relay HF115-005-2ZS4

características eléctricas de relevancia para esta aplicación son presentadas en la tabla 3.1.

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

Parámetro	Valor máximo
Rds	25 miliohmms
Id	6 A
Vdss	30 V

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 el a los transistores de picos de sobretensión recortando la onda a 27 V para cada semicírculo de la onda senoidal a la entrada.

A su salida, un conjunto de capacitores cerámicos C5, C6 y C7 filtran ruido de alta frecuencia para luego acumular toda la energía en el SC 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 en la bornera J5 un banco de dos SC de 500 F x 2,7 V en serie con una capacitancia equivalente de 250F x 5,4 V.

Los SC, se presentan en la figura 3.4 como un módulo único donde ya se encuentran montados sobre una placa con una electrónica 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.

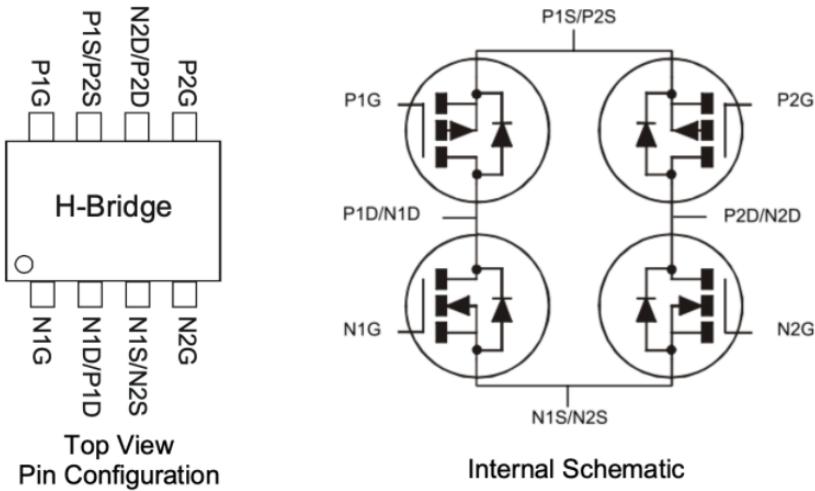


FIGURA 3.2. Pinout y esquematico interno del DMHC3025 [referencia al datasheet].

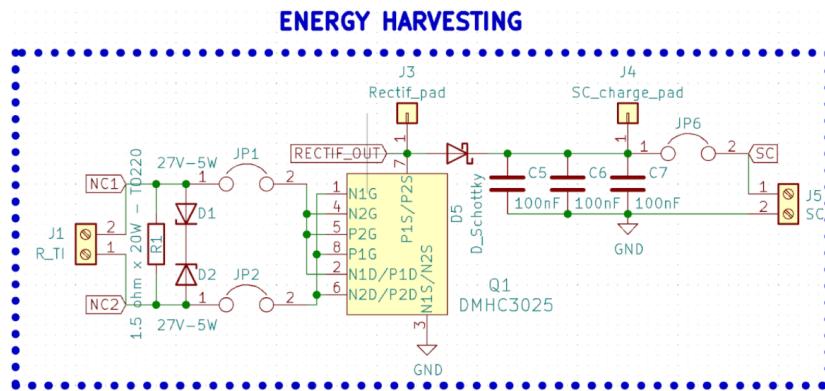


FIGURA 3.3. Etapa de rectificación, filtrado y acumulación implementada.

Al tratarse de una capacitancia total considerablemente mayor que la de un capacitor habitual, almacenará también más energía. El SC puede entonces cumplir la función de acumular energía para mantener operativa la electrónica en caso de que se interrumpa la conversión de energía.

Adicionalmente el módulo elegido, aporta simpleza al esquemático final y un rango de temperatura de operación mayor que una solución que además incluya una batería [24].

3.1.4. Circuito de detección de cortes

Una de las funcionalidades relevantes del HW, 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 Figura detector está basado en un comparador TLV3691 de la firma Texas Instruments. Su salida, se encarga de generar una interrupcion (IRQ) por flanco ascendente y despertar al MC.

Como referencia para generar la señal IRQ, se toma un valor de 1,65 V obtenido a

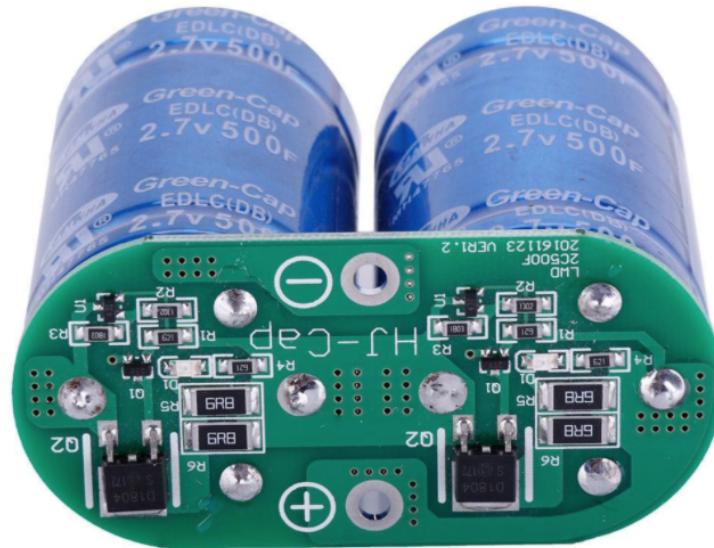


FIGURA 3.4. Banco de SC de 250 F x 5,4 V utilizado como acumulador.

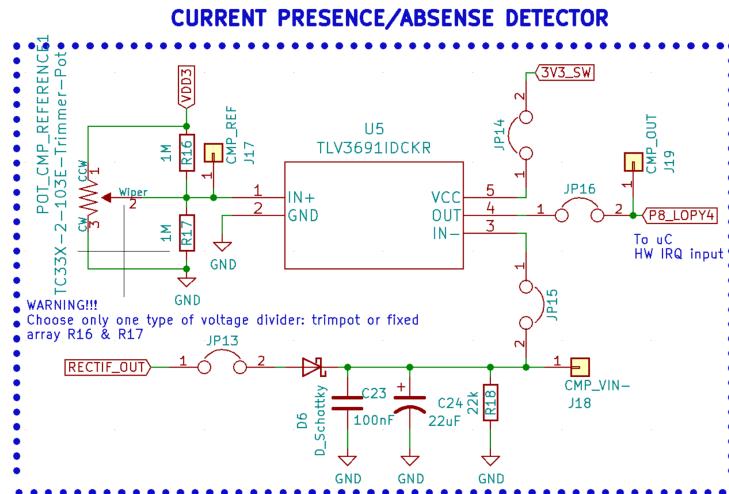


FIGURA 3.5. Circuito utilizado como detector de cortes.

partir de un divisor resistivo formado por R_{16} y R_{17} . Este divisor resistivo puede ser reemplazado por un potenciómetro en caso de ser necesario.

La salida del puente rectificador se conecta al detector mediante el diodo D_6 . A continuación los capacitores C_{23} y C_{24} filtran el rizado presente en la señal resultando en una señal de continua a la entrada no inversora del comparador.

En el caso de que ocurra un corte en la línea de distribución, la corriente que circule por D_6 es nula y los capacitores se descargan a través de R_{18} . Al bajar su tensión por debajo de 1,65 V, la salida se pondrá en alto y la IRQ será atendida por el FW del MC.

3.1.5. Circuito de apagado y encendido mediante load switch

Con el objeto de lograr un mínimo consumo en estado ocioso, es necesario desenergizar toda electrónica asociada al HW que se encuentre en desuso, con excepción del MC y el circuito detector de la figura 3.5.

Para interrupcion la alimentacion de manera electrónica, se adoptaron dos circuitos independientes basados en un *load switch* (LS) FPF2100 y se presentan en la figura 3.6.

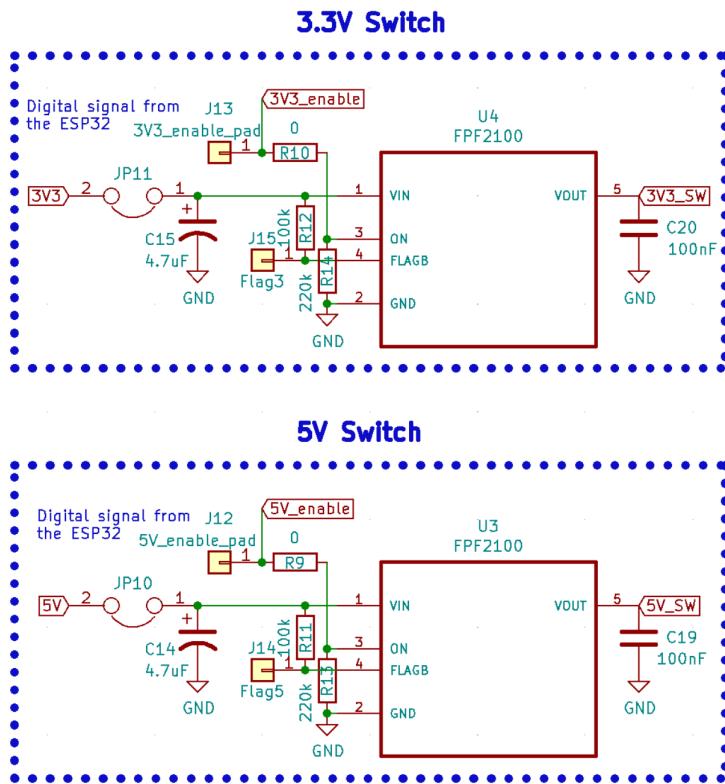


FIGURA 3.6. Circuito de encendido y apagado de las diferentes etapas de HW empleando un load switch FPF2100 [25].

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

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 TI de núcleo sólido. Un TI de tipo nucleo partido como el presentado en la figura del ti permite sortear el problema de interrumpir el cable a monitorear para enhebrarlo por el primario facilitar notablemente su comisionamiento o remoción.

En base al requerimiento de corriente mínima admisible en circuito primario del TI, se eligió uno fabricado por la empresa Howard Butler Ltd modelo CTSCM40-200/5 y sus características se presentan en la 3.2.

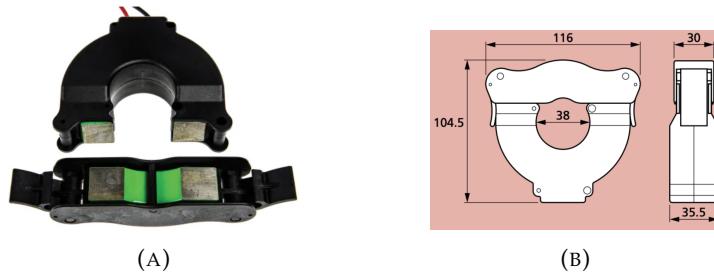


FIGURA 3.7. TI de tipo nucleo partido y sus dimensiones. Imágenes tomadas de [26]

TABLA 3.2. Características del CTSCM40-200/5 [26]

Parametro	Valor maximo
Burden (VA)	2,5
Corriente sobre el circuito primario (A)	200
Corriente sobre el circuito secundario (A)	5
Relacion de transformacion (N)	40
Rango de frecuencia (Hz)	50 - 60
Clase	1

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

Para medir corriente mediante un TI, es primero necesario convertir la intensidad en una señal de tensión representativa y partir de esta ahí calcular su valor RMS. Un resistor shunt de 0,1 Ohms con encapsulado TO-220-2 fue adoptado para convertir la corriente del secundario del TI en una señal de tensión apta para realizar su medición RMS.

En el mercado existen circuitos integrados (CI) dedicados a cumplir esta tarea, estos funcionan generalmente otorgando una tensión DC a la salida proporcional al valor RMS de la tensión a la entrada. Una tabla comparativa resaltando el ancho de banda, la tensión pico a pico máxima admitida a sus entradas y tensión de operación de los posibles candidatos a utilizar en este proyecto se elaboró en la tabla 3.3

Por disponibilidad del autor al momento del ensayo se eligió el LTC1966 de la

TABLA 3.3. Tabla comparativa de chips aptos para medición RMS

Modelo	Ancho de Banda (BW)	Vpp (max)	Tensión de operación (max)
AD636 [27]	1,5 MHz	283 mV	5 V
LH0091[28]	2 MHz	+/- 15 V	22 V
LTC1966[29]	800 kHz	+/- 1 V	5,5 V

firma Linear Technologies.

El CI posee dos entradas *IN1* e *IN2* que se conectan a la señal tensión generada en

bornes del shunt representado por R_6 en el esquemático Figura RMS. A su salida V_{OUT} , otorga una tensión DC proporcional al valor RMS de la señal senoidal inyectada entre $IN1$ e $IN2$.

Siend el valor máximo de un semiciclo de una onda senoidal en la entrada de 500 mV, el valor eficaz de esa señal de entrada y esperado a la salida del IC es

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

Los capacitores C_{10} y C_{12} se encargan de realizar el promedio y filtrar el posible ruido de alta frecuencia.

C_9 y C_{11} filtran la tensión de alimentación que energiza al CI.

Dado que las mediciones a realizar se harán en líneas de distribución que operen

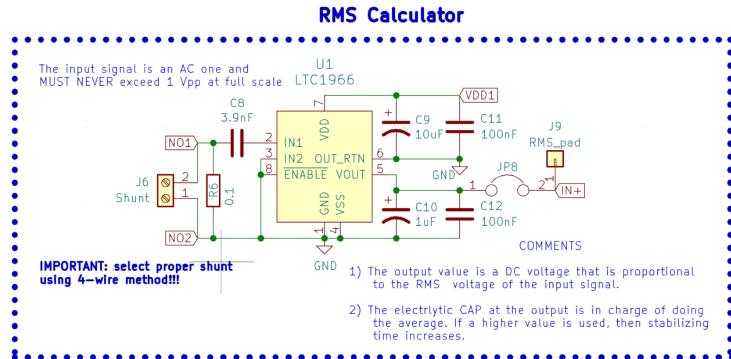


FIGURA 3.8. Circuito medidor de valor RMS implementado usando el LTC1966.

a 50 Hz o 60 Hz, se ajustó la etapa de filtrado de la señal de entrada. Adoptada una impedancia de entrada de 8 Megaohms entre los pines $IN1$ e $IN2$ el capacitor C_8 en serie forma un filtro pasa alto (HPF).

La frecuencia de corte (f_c) adoptada por el autor para este HPF es de 5 Hz, por lo tanto

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

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

El valor comercial más próximo adoptado para C_8 fue entonces 3,9 nanofaradios. Antes de conectar la señal de salida del LTC1966 es necesario amplificarla de modo que el fondo de escala de la medición tenga como máximo la misma tensión de alimentación que el ADC (3,3 V).

El circuito de la figura 3.9, utiliza un amplificador operacional MCP6001U [mcp6001] en configuración amplificador no inversor. La ganancia de amplificación A del arreglo esta definida por

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

Calibrada la ganancia del amplificador mediante una tensión constante a la entrada $IN+$ y el potenciómetro $POT1$, la salida se encuentra lista para ser conectada a la entrada $AIN0$ del ADC.

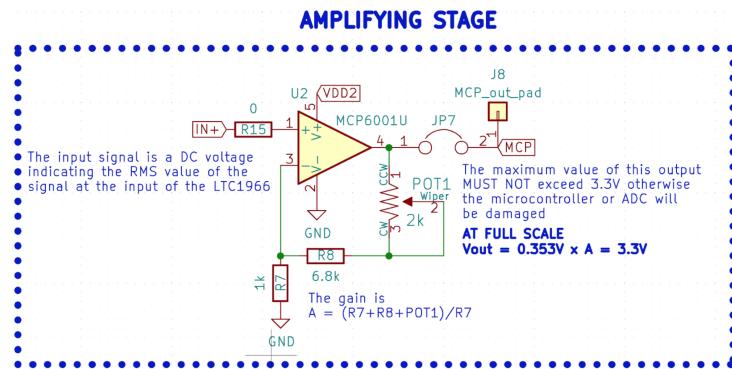


FIGURA 3.9. Circuito amplificador de la señal de salida del LTC1966.

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 5V, este valor de tensión es mayor que el máximo admitido por las entradas del ADC. 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 una tensión de 3,3V o menos.

El divisor resistivo formado por R_4 y R_5 implementado en el circuito de la Figura divisor resistivo SC, es una solución efectiva para atenuar una señal de tensión DC. De esta manera un valor de 5V en bornes del acumulador, representaría como máximo 2,5V a la entrada del ADC.

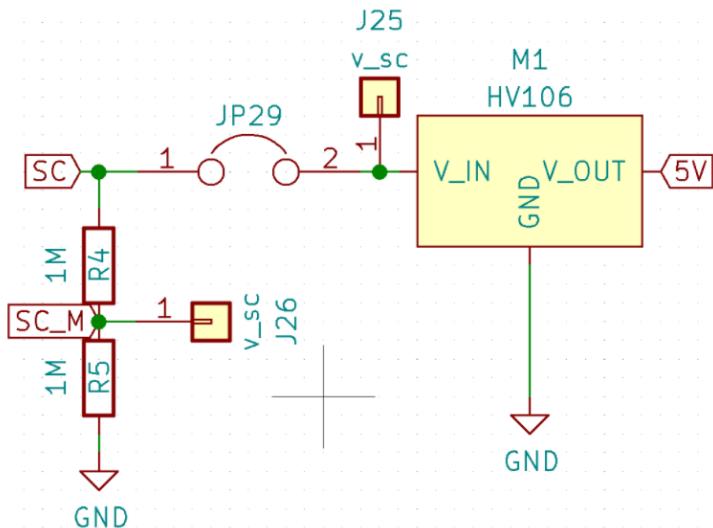


FIGURA 3.10. Divisor resistivo utilizado para medir la tensión en bornes del SC.

3.2. Firmware implementado

3.3. Servicios de Backend

3.4. Integración de la red LoRaWAN

3.5. Base de Datos

3.6. GUI basada en Grafana

Capítulo 4

Ensayos y resultados

- 4.1. PCB desarrollado
- 4.2. Medidor de valor RMS
- 4.3. Circuito detector de cortes
- 4.4. Consumo en deep sleep
- 4.5. Autonomía del supercapacitor
- 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 solución de continuidad, 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 HW como SW:

- Actualizar de manera inalámbrica el firmware (OTA): 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 PCB para realizar mediciones de 3 fases: dado que los sistemas de distribución son trifásicos, el HW 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 GUI 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.

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] 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>.
- [25] ON Semiconductor. *FPF2100 - Load switches*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fpf2104-d.pdf>.
- [26] Howard Butler. *SPLIT-CORE CURRENT TRANSFORMERS*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.hobut.co.uk/Split%20Core%20Clip%20together%20range.pdf>.
- [27] Analog Devices. *True RMS-to-DC Converter*. Disponible: 2021-05-05. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD636.pdf>.
- [28] National Semiconductor. *True RMS-to-DC Converter*. Disponible: 2021-05-05. URL: <http://www.mit.edu/~6.301/LH0091.pdf>.
- [29] 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>.