

Registrador de Calidad de la Tensión de Red Eléctrica conforme a la Norma IEC 61000-4-30

Fabrizio M. Contigiani ^{a,b*}, Emiliano D. Lukoski ^a, Guillermo A. Fernández ^{a,b}, Juan P. Gross ^{a,b}

^a *Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE), Instituto de Materiales de Misiones (IMAM), FI, UNaM, CONICET, Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: fabcontigiani@gmail.com, emilianolukoski@outlook.com, gross@fio.unam.edu.ar,
guillermo.fernandez@fio.unam.edu.ar

Resumen

Este artículo expone el diseño, implementación y validación de un sistema embebido orientado al registro de eventos relacionados a la calidad de la tensión de la red eléctrica, según norma IEC 61000-4-30 para dispositivos clase S. El sistema se basa en un microcontrolador STM32F103C8T6, que adquiere las mediciones provenientes de un sensor de voltaje con aislación galvánica, asegurando la integridad y seguridad de dicho dispositivo. La interfaz de usuario del registrador, incluye una pantalla OLED para mostrar los parámetros eléctricos monitoreados y las opciones de configuración, accesibles mediante un conjunto de pulsadores. El almacenamiento de los eventos anómalos detectados en la red eléctrica, es realizado mediante una tarjeta *microSD* extraíble. El registrador también cuenta con una batería del tipo 18650, lo que permite dar continuidad al monitoreo en caso de interrupciones en el suministro eléctrico externo. El desarrollo del hardware incluyó el diseño del esquema eléctrico y del circuito impreso, utilizándose para esto el software libre KiCAD, mientras que el firmware del microcontrolador fue programado con el entorno de desarrollo STM32CubeIDE. Los resultados de las pruebas realizadas sobre el prototipo ensamblado, confirmaron la correcta operación del registrador, fue verificado que los eventos detectados en la tensión de red se registraron adecuadamente en la tarjeta *microSD*.

Palabras Clave – Registrador, calidad de la tensión, norma IEC 61000, red eléctrica, microcontrolador, sistema embebido

1 Introducción

El presente trabajo se desarrolla como proyecto final integrador de la asignatura Sistemas Embebidos, perteneciente a la carrera Ingeniería en Computación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM). Las actividades demandadas por la realización del proyecto, tienen como finalidad promover la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos a través del diseño, implementación y validación de un sistema embebido orientado a resolver una problemática concreta. En este contexto, se plantea no sólo la construcción de un prototipo funcional conforme a especificaciones técnicas predefinidas, sino también la verificación experimental de su funcionamiento.

Este trabajo propone el diseño y desarrollo de un registrador de calidad de la tensión de red eléctrica, cuyo objetivo principal es medir y almacenar parámetros asociados a la calidad del voltaje en redes de baja tensión, de acuerdo con la normativa internacional IEC 61000-4-30. El sistema obtenido registra eventos tales como caídas momentáneas de tensión (sin llegar a cortes totales) y almacena la información relevante, junto a la fecha y hora correspondiente, en una tarjeta de memoria de memoria *microSD*.

Asimismo, el dispositivo desarrollado incorpora una interfaz de usuario compuesta por un *display* y pulsadores, permitiendo la visualización de los eventos más recientes y la configuración de ciertos parámetros del sistema. Como medida adicional de robustez, el registrador incorpora una fuente de alimentación secundaria que asegura su operatividad ante interrupciones en el suministro eléctrico.

Atendiendo a lo mencionado, este trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma: la sección 2 trata cuestiones relacionadas con la calidad de energía eléctrica, las normas aplicadas y la descripción de los eventos relevantes y las estrategias de detección/mediciones correspondientes; en la sección 3 se detalla el diseño del hardware y software del registrador; la sección 4 describe los ensayos y resultados; finalmente la sección 5 expresa las conclusiones del trabajo.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Concepto de calidad de energía eléctrica

La calidad de energía eléctrica está referida al grado en que el suministro eléctrico se aproxima a un estado ideal, caracterizado por una tensión senoidal, con amplitud y frecuencia constantes, sin interrupciones ni perturbaciones. Esta calidad es esencial para el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos conectados a la red, ya que las desviaciones pueden provocar desde mal funcionamiento hasta daños permanentes.

Entre los principales fenómenos que deterioran la calidad de energía, se encuentran las caídas de tensión (*sags*), interrupciones momentáneas, armónicos, variaciones de frecuencia, desequilibrios de tensión y transitorios. En particular, las redes de baja tensión pueden verse afectadas por fluctuaciones debidas a cargas no lineales, arranques de motores, fallas en la red o conmutaciones [1].

El análisis y monitoreo de estos parámetros permite establecer niveles de compatibilidad entre el suministro eléctrico y las cargas conectadas, y es fundamental tanto para tareas de mantenimiento preventivo como para la evaluación contractual del servicio eléctrico.

2.2 Norma IEC 61000-4-30

La norma IEC 61000-4-30 especifica los métodos de medición y criterios de evaluación de parámetros asociados a la calidad de la energía en sistemas de corriente alterna con frecuencia fundamental declarada de 50 Hz o 60 Hz [2]. Forma parte de la familia de normas IEC 61000 sobre compatibilidad electromagnética (EMC por su sigla del inglés *electromagnetic compatibility*), siendo el estándar de referencia para las mediciones en sitio.

Los parámetros evaluados por la norma incluyen: frecuencia de la red, magnitud de la tensión de suministro, parpadeo (*flicker*), bajadas (*dips*) y elevaciones (*swells*) de tensión, interrupciones de tensión, tensiones transitorias, desequilibrio de tensión, armónicos e interarmónicos, señales de comunicación sobre la red (*mains signalling*) y cambios rápidos de tensión.

La norma clasifica los equipos de medición en Clase A y Clase S:

- Clase A: Equipos de medición para aplicaciones contractuales, resolución de disputas, verificación de cumplimiento normativo. Se destacan por su alta precisión y trazabilidad.
- Clase S: Equipos de medición para evaluaciones estadísticas o de diagnóstico, con menores exigencias de precisión.

El registrador construido en este trabajo adopta los lineamientos correspondientes a equipos de Clase S, dado que el objetivo es realizar un monitoreo orientado al análisis estadístico y a la detección general de eventos relacionados a la calidad de tensión en entornos no críticos. Esta clase permite una implementación más flexible, manteniendo una relación adecuada entre precisión, costo y complejidad del sistema embebido.

2.3 Descripción de los parámetros relevantes

El sistema diseñado tiene por objetivo medir un subconjunto específico de parámetros definidos en la norma IEC 61000-4-30, seleccionados en función de su relevancia para el monitoreo de calidad de tensión en redes de baja tensión. El registrador ha sido desarrollado considerando los siguientes cinco parámetros:

a) Frecuencia de la red: Corresponde a la frecuencia fundamental de la señal de tensión de la red eléctrica, idealmente 50 Hz en el sistema eléctrico argentino. Las variaciones fuera de los márgenes aceptables pueden indicar inestabilidad en la generación o desequilibrios entre generación y consumo. La frecuencia es medida cada 10 segundos y es utilizada como base para el cálculo de otros parámetros dependientes del tiempo.

b) Magnitud de la tensión de suministro: Hace referencia al valor eficaz o r.m.s (*por su sigla del inglés root mean square*) de la tensión de red durante intervalos 10 ciclos para 50 Hz (aproximadamente 200 ms). Este parámetro permite verificar si la tensión se mantiene dentro de los niveles normales de operación, y es la base para detectar eventos como bajadas, elevaciones o interrupciones. Las mediciones de tensión se realizan de forma continua y también son utilizadas para fijar umbrales en la detección de eventos. Según la norma IEC 61000-4-30, los valores eficaces obtenidos serán procesados mediante técnicas de agregación temporal, generando promedios cada 150 ciclos y posteriormente en intervalos de 10 minutos. Estas mediciones son agrupadas mediante procesos de agregación temporal, generando valores medios cada 150 ciclos y posteriormente cada 10 minutos, permitiendo así la evaluación de tendencias y la detección de anomalías prolongadas. En línea con los requisitos definidos para dispositivos de Clase S, se permite que estas agregaciones no estén sincronizadas estrictamente con el tiempo universal coordinado (UTC), lo cual simplifica el diseño del sistema y se ajusta a las capacidades del microcontrolador utilizado.

c) Bajadas de tensión (voltage dips): Son reducciones temporales de la magnitud de la tensión por debajo de un umbral predefinido (por ejemplo, 90 % de la tensión nominal). Se consideran eventos críticos ya que pueden afectar el funcionamiento de equipamientos sensibles, provocando

reinicios o fallas. El sistema propuesto detecta el inicio y fin del evento, registrando la tensión mínima alcanzada (tensión residual) y su duración.

d) Elevaciones de tensión (voltage swells): Ocurren cuando la magnitud de la tensión supera un umbral superior al valor nominal (típicamente > 110 %). Aunque menos comunes que las bajadas, también pueden dañar dispositivos eléctricos, especialmente los electrónicos. El prototipo desarrollado registra la tensión máxima alcanzada durante el evento y su duración.

e) Interrupciones de tensión: Implica una caída abrupta de la tensión por debajo de un valor mínimo (por ejemplo, < 10 % de la tensión nominal), generalmente debida a fallas en la red o maniobras de protección. Para el caso del dispositivo obtenido, se registra de la misma forma que las bajadas de tensión.

Tabla 1 - Requisitos de medición según IEC 61000-4-30 (Clase S).

Parámetro	Método de medición	Ventana de medición	Agregación temporal
Frecuencia de red	Conteo de ciclos por intervalo temporal	Cada 10 segundos	No requiere agregación adicional
Tensión de suministro (<i>r.m.s</i>)	Valor eficaz calculado cada 10 ciclos (50 Hz)	10 ciclos (50 Hz)	Cada 150 ciclos y cada 10 minutos
Bajadas de tensión (<i>dips</i>)	Detección basada en umbral predefinido aplicado al V_{rms} , típicamente 85% a 90%	Refresco cada 1 ciclo o medio ciclo	Registro por evento (residual y duración)
Elevaciones de tensión (<i>swells</i>)	Detección basada en umbral predefinido aplicado al V_{rms} , típicamente 110%	Refresco cada 1 ciclo o medio ciclo	Registro por evento (valor máximo y duración)
Interrupciones de tensión	V_{rms} cae por debajo del umbral mínimo definido (por ej, < 10% de V_{din})	Refresco cada 1 ciclo o medio ciclo	Registro por evento (tiempo de inicio y fin, duración)

La Tabla 1 resume los principales requisitos aplicables a los parámetros seleccionados, los cuales son cumplidos por el registrador desarrollado y son compatibles con los lineamientos establecidos por la norma. Dado que el dispositivo implementado es de Clase S, se contemplan márgenes de incertidumbre y criterios de sincronización acordes a dicha clasificación, adecuados para sistemas de monitoreo embebido no críticos. En la tabla mencionada, la sigla V_{rms} hace referencia al valor eficaz o r.m.s de la tensión medida durante un ciclo completo o medio ciclo, dependiendo de la ventana de medición elegida, y V_{din} para denotar el valor de entrada declarado, que corresponde generalmente al valor nominal de tensión del sistema.

2.4 Estrategia de medición de voltaje eficaz y frecuencia

Para obtener el valor eficaz (r.m.s.) de la tensión de suministro, existen principalmente dos enfoques: el método analítico y el método gráfico. El método analítico está basado en cálculos matemáticos a partir de la amplitud de formas de onda periódicas consideradas ideales (como una senoidal pura). El método gráfico consiste en muestrear la señal a intervalos regulares dentro de un período y aplicar numéricamente la fórmula del valor eficaz, ecuación (1).

Este trabajo adopta el método gráfico, ya que permite calcular el verdadero valor eficaz (*true RMS*). Es decir, el valor eficaz real, independientemente de la forma de onda de la señal sobre la cual se aplica. Esta estrategia resulta particularmente importante debido a que, en condiciones reales, la tensión de red suele presentar distorsiones y no siempre se comporta como una señal senoidal perfecta. Para ello, la señal de tensión es muestreada periódicamente durante un ciclo, dividiéndola en “n” muestras. Cuanto mayor sea el número de muestras, mayor será la precisión del resultado. Cada una de estas muestras representa el valor instantáneo de la señal, y el conjunto de estas muestras permite calcular de forma precisa el valor eficaz conforme a las exigencias de medición del sistema [3].

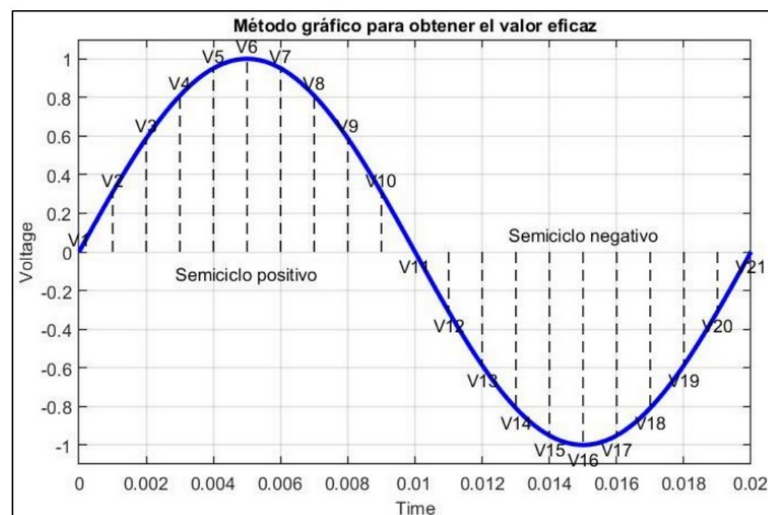


Fig. 1. Muestreo periódico para la obtención del valor eficaz de un periodo de voltaje senoidal [5].

Siendo cada muestra de voltaje V_i en la Fig. 1, el valor eficaz de la tensión puede obtenerse a partir de la ecuación (1).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n}} \quad (1)$$

El método gráfico resulta fácilmente implementable en un microcontrolador, ya que únicamente requiere acumular el cuadrado de cada muestra de tensión, calcular el promedio de dichos valores y finalmente aplicar la raíz cuadrada al resultado para obtener el valor eficaz deseado.

La medición de la frecuencia de la tensión de la red se realizó midiendo su periodo mediante la detección de los cruces por cero ascendentes. Es decir, los instantes en que la señal pasa de un valor negativo a positivo. Esta técnica permite identificar con precisión el período de la onda, calculando el intervalo de tiempo entre dos cruces consecutivos. A partir de este valor, la frecuencia es calculada como el inverso del período medido.

2.5 Estrategia de detección de eventos anómalos

La estrategia de detección de eventos anómalos está basada en la comparación del valor eficaz de la tensión (V_{rms}) con umbrales predefinidos derivados del valor nominal de 220 V. Atendiendo a esto, el registrador considera un evento de sobretensión cuando el V_{rms} supera el 110 % del valor nominal (242 V). Mientras que considera un evento de caída de tensión cuando V_{rms} desciende por debajo del 85 % del valor nominal (187 V). Un evento de interrupción es considerado si V_{rms} cae por debajo del 10 % del valor nominal (22 V). Para robustecer la lógica de inicio/fin del evento ante oscilaciones alrededor del umbral a causa de posible ruido o perturbaciones externas en las señales provenientes del sensor, el registrador desarrollado aplica una banda de histéresis interna equivalente al $\pm 1\%$ del valor nominal ($\pm 2,2$ V). Esta histéresis no es un límite de calidad del suministro sino un recurso para evitar oscilaciones indeseadas que puedan provocar detecciones erróneas, su valor es elegido de forma arbitraria y es configurable.

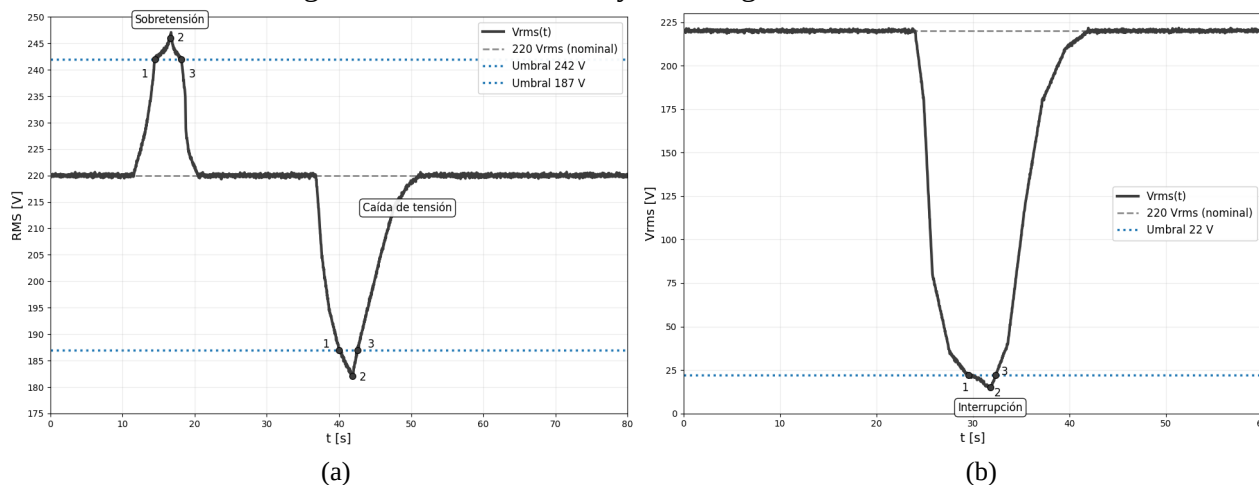


Fig. 2. Puntos a registrar para cada evento anómalo en la tensión de red medida: (a) Casos de sobretensión y caída de tensión; (b) Caso de interrupción.

La Fig. 2 (a) ilustra los tres puntos registrados durante los eventos de sobretensión y caída de tensión. Como puede apreciarse, durante cada evento el sistema desarrollado registra tres momentos clave: Punto 1 (inicio del evento), correspondiente al primer valor en que la tensión medida excede el umbral; Punto 2 (peor valor del evento), cuando se alcanza el valor de tensión más crítico durante

el evento; Punto 3 (finalización del evento), definido como el primero en el que la tensión retorna a un rango aceptable, considerando la histéresis mencionada. La Fig. 2 (b) muestra una interrupción de tensión como único evento, siguiendo el mismo esquema de tres puntos: Punto 1 (inicio), primer cruce por debajo del umbral de interrupción (~ 22 V); Punto 2 (peor valor), mínimo de tensión (p. ej., ~ 16 V); y Punto 3 (fin), primer valor que retorna a rango aceptable con histéresis. Si el descenso es gradual, el criterio discrimina el inicio e incluso una caída contenida previa, manteniendo un registro más detallado.

3 **Diseño del registrador**

3.1 *Requerimientos del sistema*

Además de los requerimientos técnicos establecidos por la norma IEC 61000-4-30, el registrador desarrollado incorpora una serie de requisitos funcionales adicionales con el objetivo de mejorar su usabilidad, autonomía y capacidad de análisis de datos posterior. Estos requerimientos funcionales son:

- Almacenar en una tarjeta *microSD* extraíble la información relativa a cada evento detectado, incluyendo fecha, hora, tipo de evento, duración y magnitud registrada.
- Visualizar en pantalla *OLED*, tanto los parámetros eléctricos actuales como los últimos eventos detectados, a través de una interfaz basada en menús navegables con pulsadores físicos.
- Mantener la operatividad básica del sistema en presencia de cortes del suministro eléctrico mediante una fuente de alimentación secundaria basada en una batería de litio recargable tipo 18650.
- Registro de eventos en formato estructurado (tipo *CSV*), adecuado para el análisis posterior con herramientas externas.
- Navegación de usuario mediante tres pulsadores (siguiente, previo y selección), sin necesidad de conexión a sistemas externos.

3.2 *Diseño del hardware*

La Fig. 3 muestra el diagrama de bloques que describe las diferentes etapas del registrador desarrollado, cumpliendo con los requisitos establecidos anteriormente.

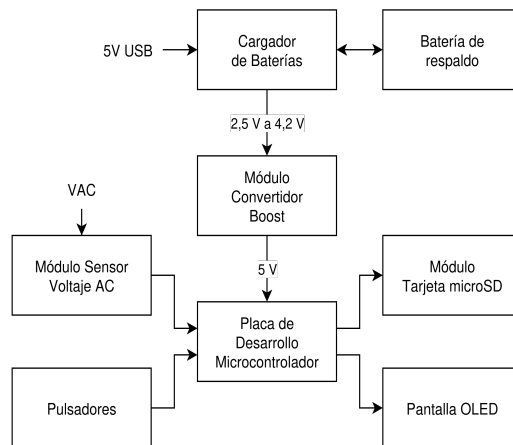


Fig. 3. Diagrama de bloques del hardware del sistema.

A continuación, se describen los diferentes componentes electrónicos elegidos para cada etapa del sistema.

Fuente de alimentación

El sistema embebido desarrollado está diseñado para ser alimentado por dos fuentes de energía. La principal consiste en una entrada de 5 V (CC) suministrada a través de un conector USB tipo C, que puede provenir de un adaptador CA/CC convencional, como los utilizados comúnmente para dispositivos móviles. En situaciones donde esta fuente externa no esté disponible, por ejemplo, ante un corte en el suministro eléctrico, el sistema utiliza una fuente de alimentación de respaldo, implementada con una batería recargable de ion de litio tipo 18650. Esta configuración de la fuente de alimentación, permite asegurar la continuidad operativa del sistema en condiciones de ausencia de la tensión de red.

Para garantizar la carga de la batería, el circuito del registrador tiene un módulo de carga de batería dedicado (módulo TP4056 [4]). Como la tensión de salida de la batería puede estar entre 2,5 V y 4,2 V (según su estado de carga), el circuito también posee un convertidor de voltaje CC-CC tipo *boost* (módulo MT3608 [5]), para elevar la tensión proporcionada por la batería hasta un nivel estable de 5 V, apto para alimentar el resto de los componentes que conforman el circuito del registrador. A continuación, se expresan algunas características de los módulos mencionados:

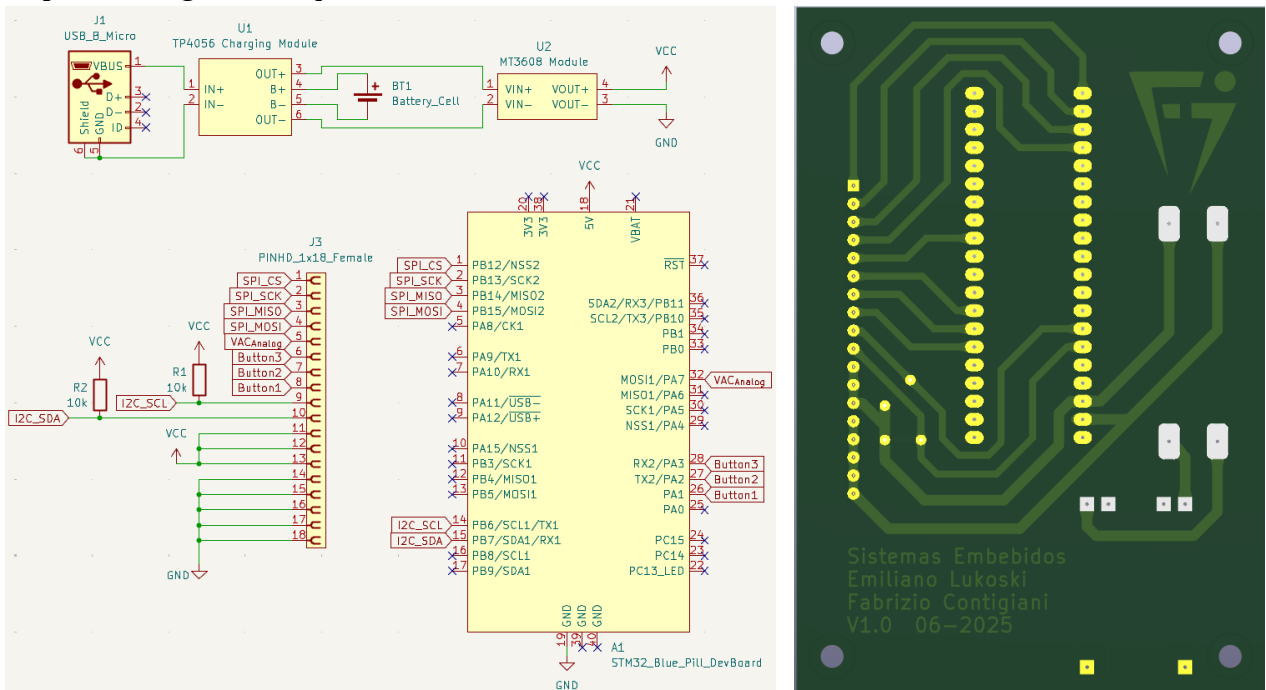
- TP4056: Módulo cargador de baterías
 - o Permite la carga controlada de baterías de ion de litio de una celda mediante una fuente de 5 V.
 - o Incorpora protección contra sobrecarga, sobredescarga y cortocircuito, lo cual incrementa la seguridad y vida útil de la batería.
- MT3608: Módulo convertidor *Boost*

- Eleva el voltaje de entrada (entre 2 V y 24 V) a una salida regulable de hasta 28 V, con una corriente máxima de salida de 2 A (dependiendo de la carga y condiciones térmicas).
- Cuenta con un potenciómetro que facilita el ajuste fino de la tensión de salida según los requerimientos del sistema.

Circuito de sensado y unidad de control

Esta etapa corresponde a los bloques módulo sensor de voltaje AC y microcontrolador, indicados en la Fig. 3. La etapa fue diseñada bajo una arquitectura modular, a los efectos facilitar la reparación en caso de falla. La selección de los componentes se basó en sus características técnicas, la amplia disponibilidad en el mercado nacional y también el bajo costo, facilitando así la reparación y reproducibilidad del sistema diseñado. Para el caso de la unidad de control, fue seleccionada la placa de desarrollo “Blue-Pill” por su capacidad de procesamiento y compatibilidad con múltiples periféricos. Esta placa está basada en un microcontrolador STM32F103C8T6 [6], que posee un núcleo ARM Cortex-M3 y opera a 72 MHz, con 64 KB de memoria flash y 20 KB de RAM. Cuenta además con conversores analógico-digitales (ADC) de 12 bits, temporizadores y diversas interfaces de comunicación (USART, I2C, SPI), lo que facilita la integración de sensores y módulos externos.

Para la medición de la tensión alterna red, fue seleccionado un módulo sensor basado en el transformador de medida ZMPT101B [7], el cual proporciona una señal analógica proporcional a la tensión de línea. Este sensor ofrece aislamiento galvánico entre la red eléctrica y el sistema de adquisición, además dispone de un potenciómetro de ajuste que permite calibrar la sensibilidad del dispositivo según los requerimientos del sistema.



(a)

(b)

Fig. 4. Registrador de calidad de la tensión de red eléctrica: (a) Esquema eléctrico; (b) Diseño del circuito impreso.

El almacenamiento de datos es realizado a través de un módulo lector/escritor de tarjetas *microSD*, que se comunica con la unidad de control mediante una interfaz SPI y es compatible con sistemas de archivos FAT16 y FAT32. Este módulo incorpora regulación de tensión y protección contra polaridad inversa y es compatible tanto con microcontroladores de 3,3 V como de 5 V.

La visualización de datos fue implementada con una pantalla OLED SSD1306 de 0,96 pulgadas, con resolución de 128×64 píxeles y comunicación mediante interfaz I²C. Gracias a su bajo consumo energético y alto contraste, resulta ideal para mostrar texto e iconografía básica relacionada con el estado del sistema y los eventos detectados.

Para el circuito de sensado y adquisición de datos fue diseñada una placa personalizada en el software KiCAD, presentada en la Fig. 4 (b).

3.3 *Diseño del software*

El firmware que ejecuta la unidad de control, ha sido desarrollado en lenguaje C, aprovechando las capacidades del microcontrolador STM32F103C8T6, mediante el uso del entorno de desarrollo STM32CubeIDE.

La filosofía de diseño adoptada es modular y orientada a eventos, combinando eficientemente el procesamiento de tareas críticas a través de rutinas de servicio a interrupción con la gestión de operaciones de mayor nivel y la interacción con el usuario mediante un bucle principal.

Arquitectura y organización del proyecto

La estructura del firmware ha sido desarrollada en módulos conceptualmente separados, cada uno abordando una funcionalidad específica. Esta modularidad facilita la comprensión, el desarrollo y el mantenimiento del firmware. Los principales módulos y su organización son:

- **ADC:** Lectura periódica y centrado de muestras.
- **Eventos/RMS:** Detección de cruces y cálculo de RMS.
- **SD:** Registro en CSV con FatFs.
- **OLED:** Actualización de pantalla.
- **Menús:** Gestión de pulsadores y navegación.
- **Main:** Inicialización y orquestación de módulos.

La operación del firmware del sistema está dividida estratégicamente entre dos mecanismos de ejecución para optimizar el rendimiento y la respuesta. El primero es, el bucle principal que ejecuta tareas de mayor latencia o que no requieren una temporización crítica. Estas tareas incluyen el procesamiento de las entradas de usuario provenientes de los pulsadores, la actualización de la visualización en la pantalla OLED, el monitoreo y control del estado de los eventos de calidad de tensión (detección de transiciones, finalización de eventos), y la gestión de las escrituras en la tarjeta microSD de eventos finalizados. También se encarga de realizar los cálculos de promedios de tensión para los intervalos de 10 ciclos, 150 ciclos y 10 segundos. El segundo corresponde a las rutinas de servicio a interrupción (ISRs por sus siglas del inglés *Interrupt Service Routine*), encargadas de atender eventos que requieren una respuesta inmediata y control temporal preciso. Las interrupciones gestionadas son:

- ***ISR_Conversión ADC completa:*** Esta rutina es iniciada por el Timer 3 que provoca interrupciones con frecuencia 5 kHz. La ISR lee la muestra, la centra y la almacena en un búfer de memoria; allí mismo es detectado el cruce por cero con histéresis y, al producirse un cruce o al superar un timeout, se inicia el cálculo del valor RMS del ciclo.
- ***ISR_Referencia de tiempo:*** El RTC interno que posee el STM32F103C8T6, es utilizado para generar fecha y hora con precisión de segundos, pero para los milisegundos se cuentan 5 interrupciones de Timer 3 = 1 ms, integrando esa información en los cálculos de temporización y frecuencia basados en los cruces por cero.

Flujo de ejecución del firmware

La Fig. 5 presenta dos diagramas de flujo correspondientes al firmware desarrollado para el microcontrolador que posee el registrador. La Fig. 5 (a) representa al bucle principal, responsable de la configuración y control general. Mientras que la Fig. 5 (b) representa a la rutina de servicio a interrupción, que opera en paralelo para garantizar la precisión temporal y la eficiencia en el registro de los eventos relacionados a la calidad de tensión.

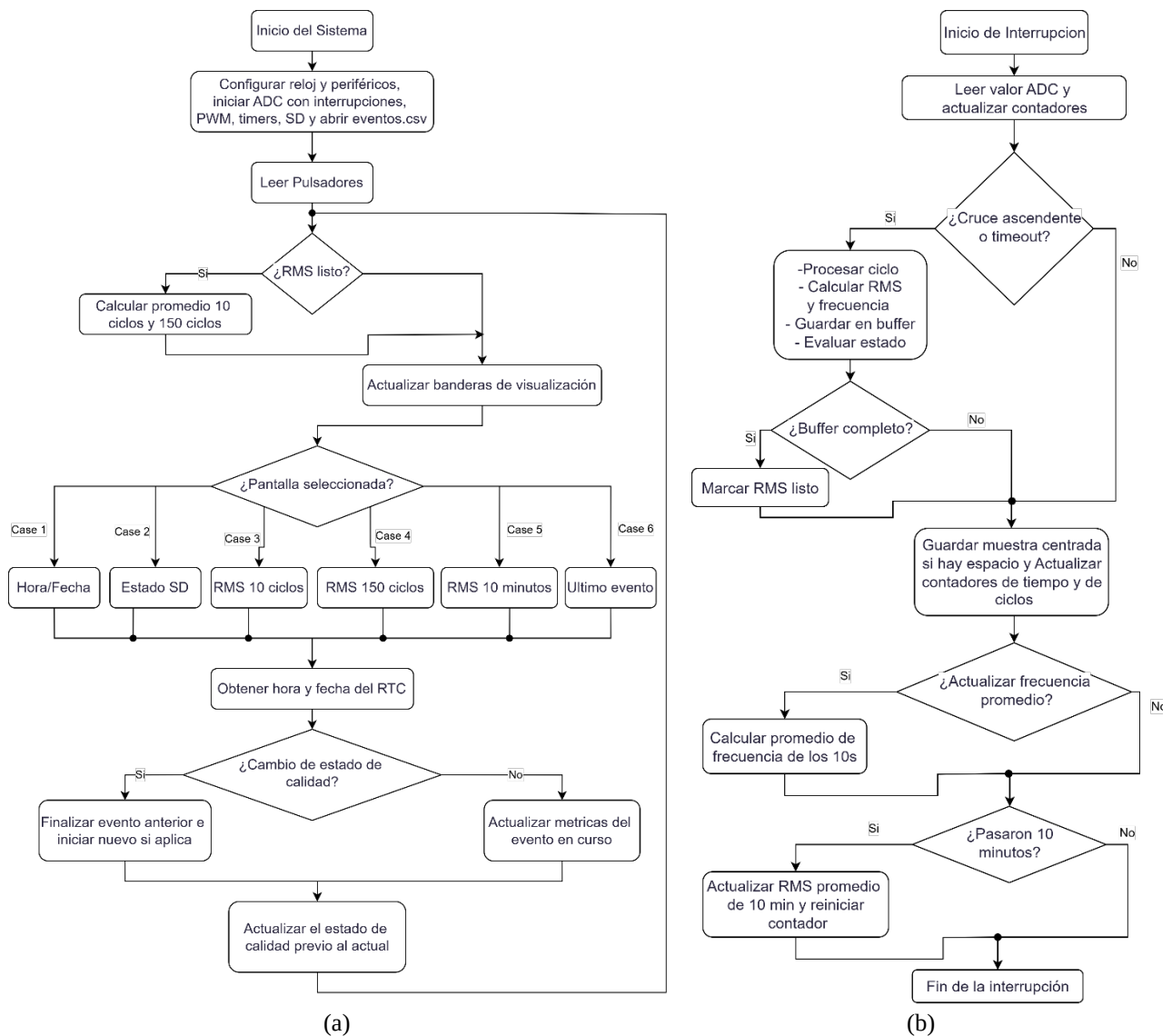


Fig. 5. Diagrama de flujo del firmware: (a) Bucle principal; (b) Rutina de servicio a interrupción.

Para el diagrama de la Fig. 5 (a), las partes esenciales corresponden a: configuración inicial (reloj, periféricos, sistema de archivos); activación del ADC en modo interrupción, PWM y temporizadores; lectura de pulsadores y actualización de UI; cálculo de promedios RMS (10, 150 ciclos); adquisición de fecha/hora (RTC); y gestión de eventos de calidad de tensión (finalización/actualización). Este diagrama resalta la estructura modular y la lógica de alto nivel que gestiona las funcionalidades del registrador, concentrándose en pasos críticos y omitiendo detalles de bajo nivel.

Por su parte, la Fig. 5 (b) ilustra la rutina de servicio a interrupción (ISR) por fin de conversión del ADC. Opera en paralelo al bucle principal, dedicándose a la adquisición/centrado de muestras, detección de cruces por cero o timeout de ciclo, cálculo de RMS y frecuencia instantáneos, y alimentación de búferes de agregación. Esta separación de responsabilidades asegura que la ISR

garantice la precisión temporal para un monitoreo confiable, permitiendo al bucle principal enfocarse en tareas de alto nivel e interacción del usuario.

4 Resultados

4.1 Proceso de armado e integración de partes

Una vez completado el diseño se procedió al armado e integración final del sistema embebido. Cada módulo fue montado y conectado dentro de una caja protectora, permitiendo el acceso a los elementos de interacción, como pulsadores y tarjeta microSD. En la Fig. 6 puede apreciarse todas las partes que componen al registrador.

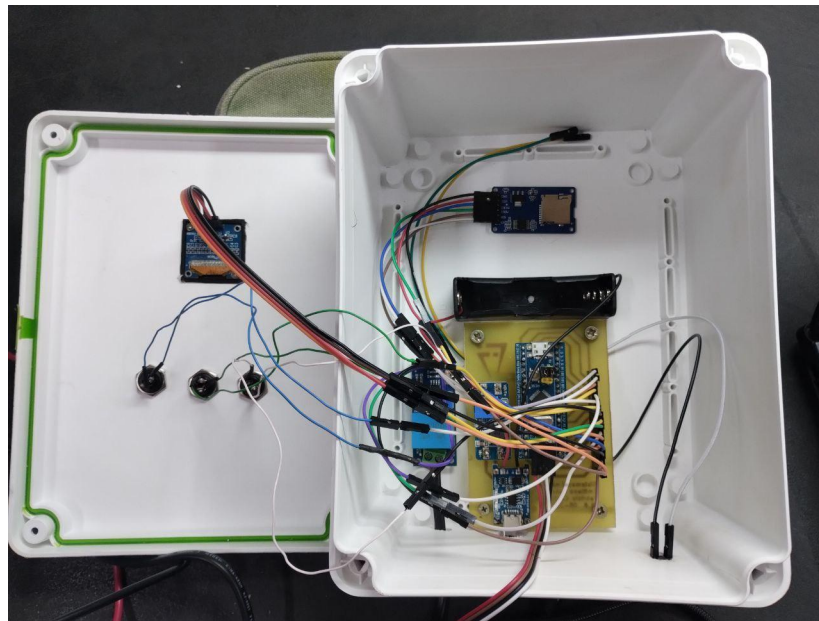


Fig. 6. Vista interior del prototipo del registrador.

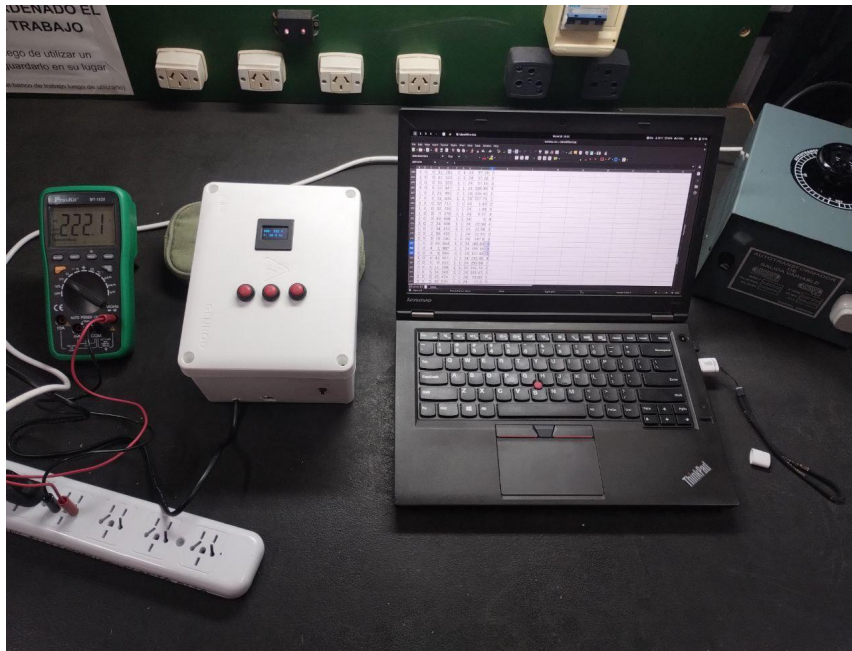


Fig. 7. Vista externa del prototipo del registrador y de los elementos utilizados para su testeo.

Como puede apreciarse en la Fig. 7, en el frente del dispositivo se dispusieron la pantalla OLED y los tres pulsadores para navegación del menú, mientras que en el lateral quedó habilitado el acceso a un botón de reset, el cable de medición para la tensión de red y el conector USB mediante el cual puede acoplarse la fuente de alimentación externa. En el interior, se aseguraron las conexiones mediante soldaduras y conectores tipo *header* para facilitar el mantenimiento y/o reemplazo de los módulos utilizados.

4.2 Pruebas realizadas

Para validar el correcto funcionamiento del hardware y software del sistema, fueron realizadas algunas pruebas funcionales. A través de un autotransformador variable, también conocido como VARIAC [8], se generaron señales sinusoidales entre 0 Vrms y 250 Vrms, comparando las mediciones del sistema con las de un multímetro digital y comprobando la detección adecuada de los tres tipos de eventos definidos. También se evaluó la interfaz de usuario, incluyendo la respuesta de los pulsadores, la visualización en pantalla y la navegación por los menús de configuración y consulta. Por último, fue verificada la escritura correcta de los eventos en la tarjeta *microSD*, cuyo contenido ha sido visualizado en una computadora. La Tabla 2 muestra un extracto del archivo generado, convertido desde formato CSV a tabla para facilitar su análisis.

Tabla 2 – Extracto de datos almacenados en *microSD*.

Evento	Ciclo	Hora	Minuto	Segundo	Milisegundo	Día	Mes	Año	Vrms
--------	-------	------	--------	---------	-------------	-----	-----	-----	------

Sobretensión	Inicio	9	4	41	987	18	7	25	242,45
Sobretensión	Peor	9	5	9	152	18	7	25	250,69
Sobretensión	Fin	9	5	11	258	18	7	25	241,74
Caída	Inicio	9	32	40	654	18	7	25	185,83
Caída	Peor	9	33	1	987	18	7	25	155,18
Caída	Fin	9	33	9	994	18	7	25	187,44
Interrupción	Inicio	10	20	31	623	18	7	25	8,6
Interrupción	Peor	10	20	31	282	18	7	25	1,25
Interrupción	Fin	10	20	35	815	18	7	25	192,99

4.3 Análisis de resultados y validación

Los resultados de las pruebas demostraron que el registrado construido cumple con las especificaciones funcionales establecidas. El cálculo del voltaje eficaz (Vrms) presentó un error relativo inferior al 3 % respecto a una referencia calibrada, y todos los eventos simulados fueron correctamente detectados, clasificados y almacenados. La visualización en pantalla resultó clara y estable, y la interfaz de usuario permitió una navegación fluida.

Estos resultados validan la operatividad del sistema bajo condiciones representativas de su entorno de uso, confirmando su aptitud para tareas de monitoreo de calidad de energía conforme a los lineamientos de la norma IEC 61000-4-30 para dispositivos de Clase S.

5 Conclusiones

El sistema embebido desarrollado cumple satisfactoriamente con los objetivos propuestos para la supervisión de calidad de tensión en redes de baja tensión, alineándose con los criterios establecidos por la norma IEC 61000-4-30 para dispositivos de Clase S. A través de una arquitectura modular, basada en componentes de bajo costo y amplia disponibilidad local, se logró una solución funcional, autónoma y portátil, capaz de medir parámetros eléctricos en tiempo real, detectar eventos anómalos y registrar información relevante para su análisis posterior.

Por otro lado, la realización de este proyecto permitió consolidar y profundizar los conocimientos adquiridos, en particular en la asignatura de Sistemas Embebidos, tanto en lo referente al uso de microcontroladores como en el desarrollo del firmware del sistema. Asimismo, se reforzaron conceptos abordados en Sistemas Digitales y otras asignaturas afines, los cuales fueron aplicados al diseño de la placa de circuito impreso (PCB) y a la selección adecuada de componentes. A lo largo del desarrollo se incorporaron nuevos dispositivos y técnicas que resultaron fundamentales para alcanzar una solución funcional y robusta. Además, la experiencia favoreció la aplicación de un enfoque sistemático para la resolución de problemas, partiendo de una problemática concreta y abordándola mediante un proceso estructurado por etapas.

Como trabajo futuro, se propone implementar una forma de notificar que un evento está en curso desde las pantallas que no muestran esta información, por ejemplo, invirtiendo los colores del

display. Además, se pretende implementar una lógica basada en colas para la escritura en la tarjeta *microSD*, dado que actualmente durante el proceso de escritura en la misma (luego de un evento) si ocurren nuevos eventos anómalos para registrar, es posible que se produzca una condición de carrera donde no finalice correctamente la escritura previa o no se registren todos los eventos la tarjeta, si la escritura toma una cantidad anormal de tiempo. Cabe mencionar en el sistema desarrollado el proceso de escritura tiene una duración de 5 ms aproximadamente, según las pruebas realizadas, y la duración mínima de un evento para su detección es de dos periodos de 20 ms (uno para el inicio y otro para la finalización). Finalmente, para una implementación futura es recomendable el uso de conectores que permitan una mayor fiabilidad en la conexión eléctrica entre los módulos.

Referencias

- [1] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2000.
- [2] IEC 61000-4-30, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*, Edition 3.1, 2021-03.
- [3] F. N. Krindges, *Desarrollo de prototipo de medidor de energía inteligente para generación fotovoltaica*. Facultad de Ingeniería, Oberá, 2024 [Online] <https://drive.google.com/file/d/1Ivjxsek6G9xM7T-5GLxPs1rYqL0xZLqu> Accedido: Mayo 2025.
- [4] NanJing Top Power ASIC Corp. *TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8*, <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf> Accedido: Mayo 2025
- [5] AEROSEMI Technology Co. Ltd., *MT3608 High Efficiency 1.2MHz 2A Step Up Converter*, <https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf> Accedido: Mayo 2025
- [6] STMicroelectronics, *Medium-density performance line Arm® -based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. Interfaces*, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf> Accedido: Mayo 2025
- [7] Qingxian Zeming Langxi Electronic, *ZMPT101B Current-type Voltage Transformer*, https://lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2504101957_ZHE-MING-LANG-XI-ZMPT101B_C111858.pdf Accedido: Mayo 2025
- [8] Circuit Specialists, *Circuitspecialists.com*, [Online]. <https://www.circuitspecialists.com/variacs-ac-power-supplies> Accedido: Julio 2024