

Diseño de un Sistema de Medición de Corriente con Conectividad Inalámbrica para Microcontroladores

DIDIER JULIAN MORENO ORTIZ - 2202932
JOHAN SEBASTIAN QUITIAN VALDERRAMA - 2210408

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander

25 de abril de 2025

Resumen

En el presente proyecto, se realizó un diseño de un circuito electrónico operado por batería, junto con su PCB, destinado a medir principalmente la corriente de operación de un microcontrolador, como el ESP32, en dos modos de funcionamiento: normal y sueño profundo. El sistema está diseñado para alternar entre dos escalas de medición, con el objetivo de evaluar el consumo energético del microcontrolador en diferentes condiciones. Los datos de la corriente medida se transmiten de forma inalámbrica a un dispositivo externo, como un teléfono móvil a través de una aplicación, para su monitoreo en tiempo real. El diseño del circuito permite la operación del medidor de corriente en modo manual o automático, con la capacidad de cambiar de rango según sea necesario. Además, se tuvo en cuenta el tamaño, el consumo energético y el costo de la tarjeta ensamblada al seleccionar los componentes.

Palabras clave: Medición de corriente, Microcontrolador, ESP32, Modo sueño profundo, Resistencia Shunt, Current Ranger, μ Current, AppInventor.

1. Objetivo General

Realizar el diseño de un sistema para medir la corriente de un microcontrolador, permitiendo la evaluación de su consumo energético en dos modos de operación: normal y sueño profundo. El sistema transmite de manera inalámbrica los datos de medición a dispositivos externos como computadoras o teléfonos móviles, y ofrece la posibilidad de cambiar el rango de medición de forma manual o automática. Se optimizó el diseño teniendo en cuenta el tamaño, el consumo y el costo de la tarjeta ensamblada.

2. Introducción

En la actualidad, los microcontroladores son el núcleo de una amplia variedad de dispositivos electrónicos,

que van desde sistemas de automatización industrial hasta productos de consumo como teléfonos inteligentes y electrodomésticos. Estos circuitos integrados desempeñan un papel esencial en la gestión de tareas específicas dentro de sistemas embebidos, permitiendo la automatización eficiente y económica de procesos. La capacidad de los microcontroladores para ejecutar instrucciones de forma rápida y precisa los convierte en herramientas indispensables para el desarrollo de aplicaciones electrónicas complejas.

Uno de los microcontroladores más populares y versátiles es el ESP32, desarrollado por Espressif Systems. Este microcontrolador destaca por su alto rendimiento, conectividad integrada y bajo consumo energético, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT), la robótica y una gran variedad de dispositivos portátiles. Con capacidades como Wi-Fi y Bluetooth, el ESP32 facilita la conexión a internet y la comunicación inalámbrica, abriendo nuevas posibilidades para la creación de sistemas inteligentes y autónomos.

Además de su conectividad, el ESP32 ofrece diversos modos de bajo consumo, como el modo de sueño ligero (Light Sleep) y el modo de sueño profundo (Deep Sleep), que permiten reducir significativamente el consumo de corriente cuando el dispositivo no realiza tareas activas. La corriente medida en el modo de sueño profundo puede ser tan baja como unos pocos microamperios (μ A), lo que presenta un desafío significativo en la medición, ya que requiere herramientas especializadas y de alta precisión.

Este informe presenta una técnica para medir la corriente del ESP32, con énfasis en su modo de sueño profundo, donde el consumo de energía es mínimo. Se analizan los desafíos inherentes a la medición precisa de corriente en estos niveles bajos y se destaca la importan-

cia de obtener mediciones exactas para optimizar el rendimiento energético, especialmente en aplicaciones IoT que requieren eficiencia a largo plazo.

3. Marco Teórico

Un microcontrolador es un circuito integrado que incluye un procesador, memoria y periféricos, diseñados específicamente para realizar tareas dentro de sistemas electrónicos embebidos. El ESP32 es un microcontrolador de alto rendimiento, basado en un procesador de doble núcleo perteneciente a la arquitectura Xtensa LX6 de Tensilica. Este procesador opera a una frecuencia de hasta 240 MHz, y está dividido en dos núcleos: uno dedicado al manejo del sistema operativo y tareas de alto nivel, como la gestión de conexiones Wi-Fi, Bluetooth y otros procesos principales, mientras que el otro se encarga de ejecutar las aplicaciones del usuario. Este diseño permite el paralelismo, es decir, la ejecución de múltiples tareas simultáneamente sin afectar el rendimiento del sistema. El ESP32 tiene una combinación de memoria RAM y almacenamiento flash que varía dependiendo del modelo. Entre sus características, se destacan los siguientes valores de memoria:

- Memoria RAM: 520 KB.
- Memoria RTC: 16 KB.
- Memoria ROM: 448 KB.

Además, el ESP32 ofrece conectividad inalámbrica avanzada con protocolos de comunicación Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n, con una frecuencia de 2412 MHz hasta 2484 MHz, y con protocolo Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE, que le permite establecer conexiones Bluetooth tradicionales. Entre sus periféricos más importantes, el ESP32 incluye:

- 18 canales de convertidor analógico a digital (ADC)
- 3 interfaces SPI
- 3 interfaces UART
- 2 interfaces I2C
- 16 canales de salida PWM
- 2 convertidores digital a analógico (DAC)
- 2 interfaces I2S
- 10 pines GPIO de detección capacitiva

El ESP32 dispone de diversos modos de operación diseñados para optimizar el consumo energético en función de las necesidades de cada aplicación. Los modos más destacados son:

- **Modo Normal (Active Mode):** En este modo, el microcontrolador está completamente operativo, ejecutando instrucciones y gestionando los periféricos. Es el modo en el que el ESP32 realiza todas sus tareas de procesamiento y comunicación, manteniendo su máximo rendimiento.
- **Modo de Sueño Ligero (Light Sleep):** En este modo, el procesador se pone en pausa, pero la memoria RAM se mantiene activa. El microcontrolador puede reactivarse rápidamente en respuesta a eventos o interrupciones, lo que permite una operación más eficiente sin comprometer la capacidad de respuesta del sistema.
- **Modo de Sueño Profundo (Deep Sleep):** Este modo minimiza al máximo el consumo energético, apagando completamente la CPU. Solo la memoria RTC permanece activa, mientras que la conectividad inalámbrica se desactiva. Algunos periféricos y los circuitos de interrupción continúan funcionando, lo que permite que el dispositivo se reactive de manera eficiente y con bajo consumo energético.

Dentro del estado del arte, varios investigadores e ingenieros han propuesto soluciones innovadoras para abordar el desafío de la medición de corrientes pequeñas. Un trabajo particularmente interesante fue el de David L. Jones, ingeniero electrónico, quien desarrolló uno de los dispositivos más destacados en el campo de la medición de corriente a baja escala. El μ Current [1] fue concebido con el objetivo de permitir la medición precisa de corrientes extremadamente bajas, en el rango de nanoamperios (nA), microamperios (μ A) y miliamperios (mA), utilizando un multímetro estándar. Este adaptador resulta especialmente útil en aplicaciones que requieren un bajo consumo de energía, como sistemas IoT y dispositivos alimentados por batería. El diseño del μ Current fue tan exitoso que fue publicado en la revista Silicon Chip en abril de 2009, consolidándose como una herramienta de referencia en la medición de corriente de baja escala.

Por otro lado, el CurrentRanger [2] es otro dispositivo que ha marcado un hito en la medición de corriente en rangos ultra bajos. Este medidor de corriente, con ultra bajo voltaje de carga, fue desarrollado por Felix Rusu, ingeniero electrónico y fundador de LowPowerLab. El

CurrentRanger está diseñado para medir corrientes en el rango de nanoamperios (nA), microamperios (μ A) y miliamperios (mA), ofreciendo una alta precisión y siendo ideal para aplicaciones que requieren capturar transitorios de corriente rápidos y mediciones de alta exactitud. Este dispositivo es especialmente útil en aplicaciones como sistemas IoT y dispositivos alimentados por batería, donde la precisión y la medición de corrientes pequeñas son esenciales. El CurrentRanger fue lanzado al mercado en 2017 y se ha consolidado como una herramienta confiable para la medición de corrientes extremadamente bajas en dispositivos de bajo consumo energético.

La monitorización y conexión inalámbrica en la medición de corriente para sistemas de bajo consumo es crucial, ya que contar con una interfaz gráfica que permita observar en tiempo real el comportamiento del sistema es esencial para su eficiencia y control. En este contexto, App Inventor se presenta como una plataforma ideal para desarrollar aplicaciones móviles que faciliten esta tarea. Basada en un entorno visual, App Inventor permite a los usuarios crear aplicaciones para dispositivos Android sin necesidad de experiencia previa en programación. La plataforma utiliza bloques gráficos que representan funciones y comportamientos específicos, lo que simplifica el proceso de desarrollo al permitir que los usuarios creen aplicaciones combinando estos bloques de manera intuitiva.

App Inventor se convierte en una herramienta accesible tanto para estudiantes como para entusiastas de la tecnología, al ofrecer un puente entre la creatividad y el desarrollo tecnológico. A través de esta plataforma, los usuarios pueden diseñar interfaces gráficas, integrar componentes multimedia, gestionar bases de datos y conectarse con servicios externos, todo dentro de un entorno amigable y fácil de usar.

4. Diseño del circuito

El diseño propuesto para el sistema se presenta en la Fig. 1, el cual fue desarrollado dentro del software de simulación Proteus.

Inicialmente, para emular el comportamiento del microcontrolador al cual se le medirá la corriente en el simulador, se utilizó un componente denominado resistor controlado por voltaje (VCR, por sus siglas en inglés). Este componente permitió simular una fuente

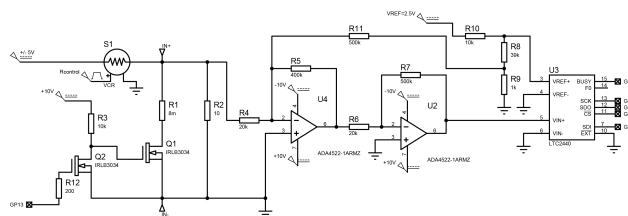


Fig. 1: Esquema circuito principal sistema de medición de corriente.

de corriente que variaba entre dos valores típicos: 100 μ A y 60 mA por ejemplo. Estos valores corresponden a las especificaciones de corriente de el microcontrolador (ESP32) según su hoja de datos, en los modos de operación de sueño profundo y operación normal, respectivamente. El diseño contempla la medición de corriente en dos rangos distintos: de 0 a 200 μ A y de 0 a 200 mA, lo que abarca los valores de corriente especificados por el fabricante, considerando factores como la utilización de diferentes periféricos, variaciones en la temperatura y el cambio entre los modos de operación normal y de sueño. Dichos valores de corriente pueden fluctuar debido a estos factores, pero se mantienen dentro de los límites permitidos por el dispositivo.

Para llevar a cabo esta medición, se emplean dos resistencias shunt conmutables. La primera, de 10 Ω , permite medir corrientes muy bajas sin comprometer la sensibilidad del sistema. La segunda, de aproximadamente 10 m Ω , se obtiene mediante la conexión en paralelo de la resistencia de 10 Ω con una resistencia adicional de 8 m Ω , esta última conectada en serie con la resistencia de encendido del MOSFET, cuyo valor es de aproximadamente 1.5 m Ω . Esta configuración minimiza la caída de tensión durante la medición de corrientes elevadas, lo cual es esencial para evitar que la medición interfiera en el comportamiento del circuito bajo prueba.

La conmutación entre los rangos de medición se lleva a cabo mediante dos transistores MOSFET de canal N. Estos fueron seleccionados debido a que presentan una resistencia de encendido significativamente menor en comparación con los de canal P. Los MOSFET operan en la región de triodo, actuando como interruptores electrónicos de baja resistencia cuando son activados. El MOSFET Q1 es responsable de conectar o desconectar la resistencia de bajo valor (8 m Ω), mientras que el MOSFET Q2, controlado por una señal lógica de 3.3 V proveniente del microcontrolador interno (el ESP32-A1S), permite aplicar o interrumpir el voltaje de

compuerta de Q1. Esta configuración de tipo pull-up controlado posibilita la activación adecuada de un MOSFET que requiere 10 V en la compuerta, a partir de una señal de control de baja tensión, sin comprometer las especificaciones eléctricas del microcontrolador.

En la Fig. 2 se muestra una tabla con las referencias de los transistores considerados para este sistema. En ella se detallan cinco modelos de transistores, junto con sus características más relevantes para este diseño. Si bien el voltaje de umbral es una característica importante, su impacto no es tan decisivo como la resistencia de encendido, que es un factor clave en la elección del transistor adecuado. En este caso, todos los transistores seleccionados son de tipo N, y al comparar los valores de resistencia de encendido, se concluyó que el IRLB3034 es la opción más adecuada. Esto se debe a su bajo valor de resistencia de encendido y a que su voltaje de umbral se encuentra dentro de los límites establecidos por el circuito. Aunque el precio del componente es relativamente alto, su excelente desempeño para este diseño justificó su selección.

Transistor	Voltaje Umbral (V_{th})		Resistencia Encendido ($R_{DS\ ON}$)		Precio
	Condiciones de Test	Valor	Condiciones de Test	Valor	
IRLB8721	VDS = VGS ID = 25mA	1.80 [V] - TYP	VGS = 10V ID = 31A	6.5 [mΩ] - TYP	\$ 1.4 USD
STP75NF75	VDS = VGS ID = 250μA	3 [V] - TYP	VGS = 10V ID = 40A	9.5 [mΩ] - TYP	\$ 3.77 USD
FDP8880	VGS = VDS ID = 250μA	1.2 [V] - MIN 2.5 [V] - MAX	ID = 40A VGS = 10V	9.5 [mΩ] - TYP	\$0.5 USD
IRLB3034	VDS = VGS ID = 250μA	1 [V] - MIN 2.5 [V] - MAX	VGS = 10V ID = 195A	1.4 [mΩ] - TYP	\$3.74 USD
AOD4184A	VDS = VGS ID = 250mA	2.1 [V] - TYP	VGS = 4.5V ID = 15A	7.6 [mΩ] - TYP	\$1.05 USD

Fig. 2: Tabla comparativa referencias de los transistores

Al seleccionar el transistor, es fundamental tener en cuenta que las características presentadas en la tabla de la Fig. 2 corresponden a condiciones específicas de prueba. Para validar el comportamiento adecuado del transistor, es necesario realizar una prueba de test y verificar si el modelo utilizado cumple satisfactoriamente con el parámetro de resistencia de encendido requerido. Con este objetivo, se llevó a cabo una simulación en la que se conectó el transistor a una fuente de voltaje de 10 V, imponiendo una corriente de 195 A a través del transistor tal como se evidencia en la Fig. 3. Como resultado de esta prueba, se calculó el valor de la resistencia de encendido, obteniendo un valor de 1.4635 mΩ, lo que confirma que el modelo cumple con las

especificaciones y puede ser utilizado en la simulación.

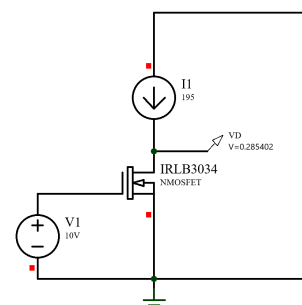


Fig. 3: Circuito de prueba Transistor RLB3034.

La señal de corriente, convertida en voltaje a través de una resistencia shunt, es amplificada por una etapa compuesta por dos amplificadores operacionales ADA4522-1ARMZ, configurados en modo sumador inversor e inversor. Se seleccionó una etapa de sumador inversor porque fue necesario añadir un offset a la señal, lo cual nos permite medir voltajes negativos en caso de una conexión incorrecta del dispositivo de medición. Este offset, de aproximadamente 1 V, permite que el sistema interprete corrientes positivas cuando el voltaje medido por el ADC está en el rango de 1 V a 2 V, y corrientes negativas cuando el valor está en el rango de 0 V a 1 V.

Se seleccionaron las topologías inversoras y de múltiples etapas debido a su alta estabilidad frente a perturbaciones externas, ya que la realimentación negativa directa minimiza el acoplamiento de señales no deseadas y mejora la inmunidad al ruido. La implementación de dos etapas de amplificación en cascada permite optimizar la relación señal-ruido y alcanzar una ganancia total adecuada sin comprometer la estabilidad del lazo.

Los amplificadores operacionales se alimentan con una fuente dual, ya que al trabajar con una única fuente, esto podría ocasionar distorsión o recorte de la señal debido a que nuestro diseño contempla voltajes cercanos a 0 V. Además, los amplificadores operacionales presentan una característica distintiva en su salida: la excursión, que limita el voltaje a un rango ligeramente superior a cero voltios y ligeramente inferior al voltaje de la fuente, impidiendo que la salida sea rail-to-rail y cubra todo el rango disponible. Para superar esta limitación, se optó por una fuente dual, lo que aumenta la excursión de salida y permite ampli-

ficar la señal de entrada sin ningún tipo de distorsión.[3]

Los valores de las resistencias utilizadas en los amplificadores (R4 a R11) fueron seleccionados de manera cuidadosa, con el objetivo de mantener un bajo consumo de potencia, evitando al mismo tiempo valores excesivamente altos que pudieran incrementar el ruido térmico.

Amplificador	Voltaje Offset (Vos)	Corriente Bias entrada (IB)	Alimentacion	Precio
AD8551ARZ-REEL7	1 [μV] - TYP	150 [pA] - TYP	single: 2.7 [V] a 5 [V]	\$ 5.86 USD
OPA2188AIDR	6 [μV] - TYP	±160 [pA] - TYP	Dual: ±2 [V] a ±18 [V]	\$ 2.56 USD
MAX4239AUT-T	0.1 [μV] - TYP	1 [pA] - TYP	single: 2.7 [V] a 5 [V]	\$ 3.21 USD
LT1001CN8#PBF	7 [μV] - TYP	±0.5 [nA] - TYP	Dual: ±22[V]	\$ 5.86 USD
ADA4522-1ARMZ	0.7 [μV] - TYP	50 [pA] - TYP	Dual: ±2.25 [V] a ±27.5 [V]	\$ 4.04 USD

Fig. 4: Tabla comparativa referencias de los amplificadores operacionales

La Fig .4 presenta la tabla de los amplificadores operacionales seleccionados para este diseño. Dentro de las cinco referencias mencionadas, se incluye el opamp utilizado en el diseño del current ranger, el MAX4339. Sin embargo, nuestro diseño no contempla el uso de dicho opamp debido a que opera con una única fuente de alimentación. Por este motivo, se decidió elegir solo entre los amplificadores con alimentacion dual. Para seleccionar el amplificador operacional adecuado, el criterio más determinante fue el voltaje de offset, siendo preferible aquel con el valor más bajo. En este caso, se optó por el modelo ADA4522-1ARMZ, ya que presenta un voltaje de offset excepcionalmente bajo y, además, es compatible con una alimentación dual y un amplio rango de funcionamiento.

ADC	Tipo	Resolución	Alimentacion (A_Vdd,D_Vdd)	Voltaje Referencia	Canales Entrada	Precio
MCP3564T-E/NC	Delta-Sigma	24-bits	-0.3[V] a 4.0 [V]	0.6[V] a A_Vdd	8 single-ended o 4 diferenciales	\$ 7.14 USD
ADS1256IDBT	Delta-Sigma	24-bits	A_Vdd: -0.3[V] a 6.0[V] D_Vdd: -0.3[V] a 3.6[V]	2.5 [V]	8 single-ended y 4 diferenciales	\$ 19.29 USD
LTC2440CGN#TRPBF	Delta-Sigma	24-bits	-0.3[V] a 6.0 [V]	0.1[V] a A_Vdd	1 diferencial	\$ 16.46 USD

Fig. 5: Tabla comparativa referencias de los convertidores analógicos digitales

La etapa final del sistema corresponde a la digitalización de la señal amplificada, para lo cual se emplea el convertidor analógico-digital LTC2440. Este ADC de alta resolución (24 bits) requiere una referencia de voltaje extremadamente estable para garantizar mediciones precisas y repetibles. Con el fin de cumplir con este requisito, se incorporó una referencia de voltaje precisa

de 2.5 V utilizando el LM4040, la cual es ajustada a 2.0 V mediante un divisor resistivo compuesto por las resistencias R8, R9 y R10 , esto se realizó teniendo en cuenta la corriente máxima de salida proporcionada por dicho elemento. Este valor específico de referencia fue seleccionado en base al offset del amplificador y partir de él se calcularon las ganancias de la etapa de amplificación, asegurando que la señal de salida se mantuviera dentro del rango dinámico óptimo del ADC. Esta estrategia permite aprovechar al máximo la resolución del convertidor, maximizando así la fidelidad con la que se representa la señal analógica en el dominio digital.

La Figura 5 presenta los ADC disponibles para este diseño. La elección del ADC se basó en la necesidad de contar con una entrada diferencial para medir el voltaje amplificado, así como en la intención de utilizar únicamente los pines estrictamente necesarios. Bajo esta última condición, el LTC2440 fue el único que cumplía con los requisitos, ofreciendo además una resolución de 24 bits para un único canal, un amplio rango de entrada analógica y un voltaje de referencia ajustable, lo que lo convirtió en la mejor opción.

5. Diseño esquemático en PCB

En la Fig. 6 se presenta el esquema del diseño de la PCB, en el cual se detalla de manera precisa la alimentación principal del circuito, así como la alimentación específica para cada una de las etapas de amplificación, el ADC y los demás componentes que requieren un voltaje de alimentación. Para llevar a cabo este tipo de conexiones, se realizó una investigación exhaustiva en las hojas de datos de los componentes utilizados, con el fin de determinar la forma más adecuada de conectarlos y asegurar que cada uno de ellos cumpla con la función para la cual fue diseñado.

Para la alimentación general del circuito, se han designado dos pines: uno marcado como +3.7V y el otro referenciado a tierra. Estos pines serán los encargados de recibir la conexión directa con la batería LGMJ1INR ,la cual contará con un módulo TP4056 externo a la pcb diseñada para recargar la batería en caso de ser necesario. Adicionalmente, el diseño incluye dos pines denominados +In y -In, los cuales se conectarán directamente al microcontrolador o circuito externo del cual se desea medir la corriente de operación.

Para la alimentación dual de los amplificadores, se

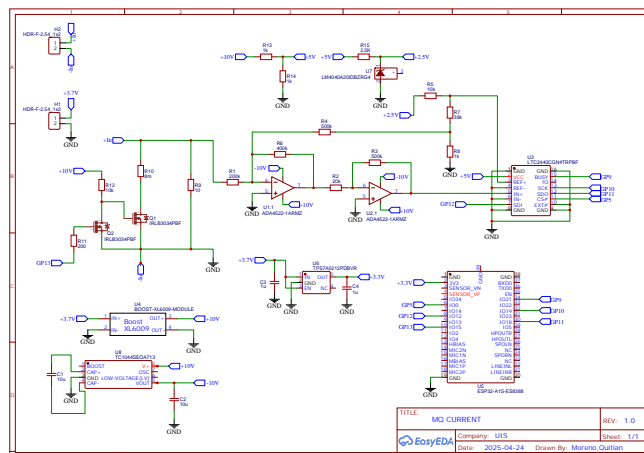


Fig. 6: Esquemático diseño PCB

utilizó el convertidor boost XL6009, el cual eleva el voltaje de 3.7V a +10V. Este dispositivo cuenta con todos los componentes integrados, lo que elimina la necesidad de conectar componentes externos, limitándose únicamente a las conexiones de entrada y salida. Además, para la alimentación negativa, se empleó un convertidor DC-DC inversor tipo bomba de carga TC1044SEOA713. Este componente permite invertir el voltaje de +10V a -10V. Para su correcta operación, se requirió la utilización de dos capacitores de 10 μ F, uno en la entrada y otro en la salida, tal como lo especifica el fabricante en su hoja de datos, para garantizar el funcionamiento adecuado de la conexión inversora. Este dispositivo es capaz de invertir señales dentro del rango de 1.5V a 12V, lo cual es adecuado para la función que se necesita en este diseño.

El microcontrolador seleccionado para la conexión inalámbrica en la PCB fue el ESP32-A1S-ES8388, debido a su tamaño compacto y su capacidad para cumplir con los requisitos necesarios para enviar datos y controlar el cambio en modo manual y automático dentro del diseño del circuito. Para alimentar este microcontrolador, encargado de gestionar el modo automático y realizar la transmisión inalámbrica de los datos del ADC, se requiere un voltaje de 3.3V en la entrada.

Para este fin, se eligió el regulador TPS7A0233DQNR, debido a su baja tensión de dropout de 270 mV. La tensión de dropout se refiere a la diferencia mínima entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida que permite un funcionamiento adecuado del regulador. Dado que la entrada es de 3.7 V y la salida deseada es de 3.3 V, la búsqueda de un regulador con una tensión

de dropout adecuada presentó un desafío, ya que no se encontraron dispositivos que cumplieran con estas especificaciones requeridas. La principal ventaja de este regulador es su capacidad para operar con un rango de entrada de 1.5 V a 6 V, lo que permite utilizar la batería de iones de litio como fuente de alimentación, la cual también abastece al regulador.

Dentro del diseño de la PCB, el regulador incluye capacitores en la entrada y salida de 1 μ F para reducir la impedancia de la fuente de entrada, minimizar el ruido y asegurar la estabilidad del regulador, proporcionando además una buena respuesta transitoria. Finalmente, para garantizar que el regulador permanezca encendido al aplicar la alimentación de entrada, el pin EN se conecta al pin VIN, conforme a las indicaciones del fabricante.

Para utilizar correctamente el ADC, se empleó una referencia de voltaje en derivación de precisión y micropotencia (LM4040AIZ). Este dispositivo se alimenta con una fuente de 5V, que proviene directamente de un divisor de tensión ubicado dentro del circuito de voltaje del boost, y que también suministra energía al ADC. El voltaje de 5 V se utiliza para generar la referencia conectando una resistencia de 2.5 k Ω en serie con el LM4040, lo que limita la corriente a 1 mA, siendo el valor máximo permitido de 20 mA. Esto garantiza que se imponga una tensión de referencia de 2.5 V en el cátodo del diodo Zener. Posteriormente, a través de un divisor de tensión resistivo, esta tensión se reduce a 2 V, la cual se aplica directamente al pin de referencia del ADC.

Es importante resaltar que los cuatro pines GND del ADC deben estar unidos para garantizar una referencia de voltaje común durante el funcionamiento del dispositivo. Esta configuración contribuye a minimizar el ruido y las interferencias que puedan afectar la precisión de las conversiones analógico-digitales y asegura la integridad de la señal tanto para las interfaces analógicas como digitales.

La Fig. 7 presenta el diseño completo de la PCB en la placa física de tamaño 76.77 mm por 65.91 mm, mientras que la Fig. 8 presenta el modelo tridimensional de dicho diseño de PCB.

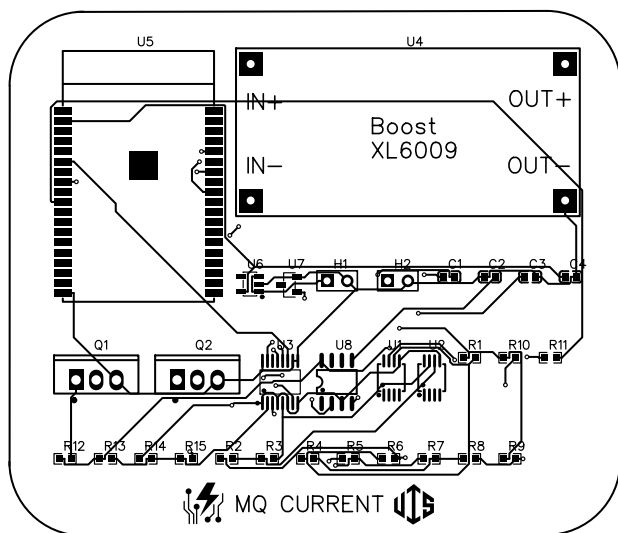


Fig. 7: Diseño PCB

6. Programación del Microcontrolador para el Control del Sistema

En primera instancia, fue necesario desarrollar una función que permitiera obtener las mediciones del ADC como valores que pudieran ser operados por el microcontrolador, utilizando comunicación SPI. Para ello, se creó una función sencilla que generaba una señal de reloj y capturaba bit a bit la información transmitida por el ADC. Se definieron los pines de entrada/salida necesarios: la señal de reloj, el canal de entrada de datos (MISO), chip select para indicar al ADC que deseamos leer datos, la línea BUSY para saber cuándo el ADC está ocupado, un pin especial llamado SDI para seleccionar entre el modo de ultra precisión con filtrado de ruido o el modo normal del ADC, y un pin para controlar la escala de medición, activando o desactivando el MOSFET Q2.

Del dato recibido por el ADC, se tomaron únicamente los bits del 5 al 28, ya que estos representan el valor numérico correspondiente al voltaje medido. Posteriormente, este valor fue operado considerando las ganancias de la etapa de amplificación, el offset añadido y los factores de cada escala, con el fin de obtener finalmente un valor de corriente.

La adición de la capacidad de medir corrientes negativas permitió también detectar señales de corriente alterna. En particular, se implementó el cálculo del valor

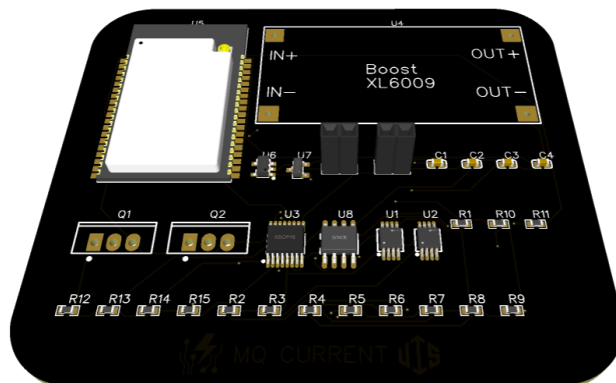


Fig. 8: Diseño PCB en 3D

RMS de la señal mediante el uso de integrales numéricas aplicadas en tiempo real sobre las mediciones. Para ello, se definieron variables específicas que permiten calcular el valor RMS conforme se reciben las muestras. Ajustando el ADC al modo normal (en lugar del modo de ultra precisión), fue posible alcanzar una frecuencia de muestreo aproximada de 800 Hz, lo que permite medir señales de corriente alterna de hasta 400 Hz.

Para implementar un modo de escala automática, se evaluaron los valores de voltaje/corriente medidos. En función de esos valores y la escala actual, el sistema puede cambiar entre las escalas de μA y mA. El cambio a mA ocurre cuando la señal es demasiado grande y satura al ADC, lo que impide la medición precisa de valores bajos debido a un sistema de protección interno del convertidor. Por otro lado, el cambio de mA a A se activa si el valor de corriente medida se mantiene por debajo de aproximadamente 0.19 mA durante 180 muestras consecutivas. Inicialmente, el cambio se producía con una sola muestra por debajo del umbral, pero con la implementación de la medición de corriente alterna, este enfoque causaba cambios incorrectos de escala debido a los cruces por cero característicos de las señales senoidales. El valor de 180 muestras fue elegido considerando la frecuencia de muestreo y la necesidad de poder medir señales de corriente alterna de muy baja frecuencia sin errores en la escala.

La comunicación con la aplicación para visualización remota de datos fue implementada por separado, debido a que la versión virtual del ESP32 utilizada en Proteus no permite transmitir datos de forma inalámbrica.

Para una mejor comprensión del funcionamiento del

firmware y del proyecto en general, se elaboró un video explicativo en el que se detallan las distintas etapas del sistema. Tanto el video como el código fuente utilizado se encuentran disponibles en el repositorio de Github del proyecto (Ver Anexos).

7. Resultados Simulación

En la simulación, el circuito está diseñado para operar en cuatro modos diferentes. El primer modo corresponde a la medición de corriente en el rango de miliamperios con sentido positivo, mientras que el segundo modo ajusta el rango para medir corrientes en el orden de microamperios, también con sentido positivo. Los modos tres y cuatro son equivalentes a los primeros dos, pero con sentido negativo de la corriente. Para verificar el funcionamiento del sistema, se modificó el valor de la resistencia controlada por voltaje: una resistencia de 500 k Ω para generar una corriente de $\pm 10 \mu\text{A}$ y una resistencia de 83.333 Ω para generar $\pm 60 \text{ mA}$, partiendo de una tensión de $\pm 5 \text{ V}$, respectivamente.

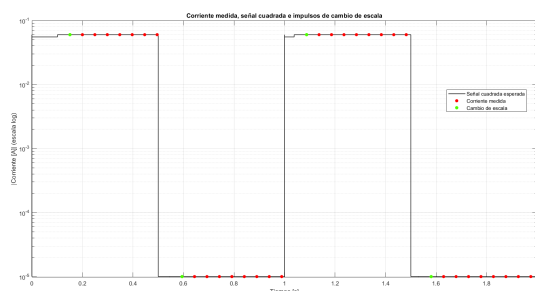


Fig. 9: Gráfica de simulación rango de corrientes positivas.

Inicialmente, la fuente de corriente emulada comienza en el rango de miliamperios, sin embargo, el circuito de control automático, específicamente el MOSFET Q2, inicia en la escala de microamperios. En este estado, Q2 se encuentra activado, y en consecuencia, el MOSFET Q1 permanece apagado. Esto provoca un cambio de escala antes de cualquier medición, lo que repercute en el apagado de Q2. Posteriormente, tras este cambio de escala, Q1 se activa, configurando la resistencia de shunt como el paralelo entre la resistencia de 10 Ω y la resistencia de 8 m Ω , que se encuentra en serie con la resistencia del MOSFET Q1. El voltaje que cae a través del shunt es amplificado 500 veces, a esta señal se le añade un offset de 0.999031 [V], y finalmente,

se envía al convertidor analógico-digital (ADC) para digitalizar la señal de voltaje. Cuando Q2 se vuelve a activar, Q1 se apaga, dejando el rango de miliamperios con la resistencia de 10 Ω , y el proceso previamente mencionado se repite. En la Fig. 9, se evidencia la gráfica de la corriente de entrada y las mediciones tomadas por el ADC junto con el momento donde se cambia la escala de medición de forma automática.

De manera análoga, cuando el circuito recibe una corriente negativa en la entrada, su comportamiento permanece equivalente, activando y desactivando las resistencias necesarias para el shunt, así como alternando los MOSFET Q1 y Q2 para determinar el voltaje que cae dicha resistencia de shunt. Posteriormente, el voltaje resultante es amplificado 500 veces, se le añade el voltaje de offset mencionado previamente y, finalmente, se envía al ADC para su conversión a formato digital.

Fuente	Resistencia Shunt	Voltaje Shunt	Voltaje entrada ADC
60mA	9.45204m Ω	567.059 [μV]	1.28256 [V]
10uA	9.99488 Ω	99.9469 [μV]	1.049[V]
-60mA	9.45203m Ω	-567.058 [μV]	0.715503 [V]
-10uA	9.9948 Ω	-99.947 [μV]	0.949057 [V]

Fig. 10: Resultados simulación diseño de circuito medidor de corriente para rangos positivos y negativos

La Fig. 10 presenta una tabla que muestra las mediciones de las resistencias de shunt, el voltaje que cae en dichas resistencias y el voltaje que ingresa al ADC para los cuatro modos de operación mencionados. Como se puede observar, el valor de la resistencia de shunt permanece prácticamente constante al cambiar el sentido de la corriente, al igual que el voltaje, aunque este último cambia de signo según el modo de operación. Además, se evidencia que el voltaje que entra al ADC, cuando la corriente es positiva, se encuentra en el rango de 1 V a 2 V, mientras que cuando la corriente es negativa, el voltaje oscila entre 0 V y 1 V. Esto demuestra el correcto funcionamiento del ADC para los rangos de medición en miliamperios y microamperios, tanto en sentido positivo como negativo de la corriente.

8. Diseño de la aplicación

Para el diseño de la aplicación que permite visualizar en tiempo real los valores medidos, fue necesario implementar un protocolo de transmisión de datos.

En nuestro diseño, se eligió Bluetooth Low Energy (BLE) debido a su alta eficiencia energética, ideal para sistemas alimentados por batería. Además, al momento de implementar el sistema completo, resultaba poco práctico definir la red Wi-Fi a la que debía conectarse el microcontrolador sin necesidad de reprogramarlo, lo que hacía que BLE fuera una opción mucho más flexible. Se desarrolló un código sencillo que permite al microcontrolador enviar datos a través de BLE, así como una aplicación capaz de recibir y mostrar estos datos en tiempo real. La Fig. 11 presenta la interfaz gráfica del diseño de la aplicación móvil para el monitoreo de la corriente del microcontrolador.

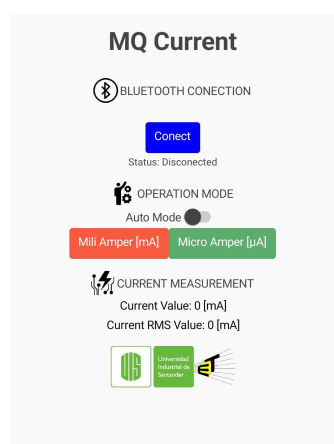


Fig. 11: Interfaz gráfica aplicación móvil para monitoreo de corriente.

Se añadieron botones para seleccionar el dispositivo al cual conectarse mediante BLE, así como para escoger entre el modo automático o manual de la escala de medición. Además, se muestran en tiempo real los valores de corriente medidos y su valor RMS. El valor RMS es especialmente útil en el caso de señales de corriente alterna, ya que proporciona una representación efectiva de su potencia. Sin embargo, para señales de corriente continua, es preferible centrarse en el valor de corriente instantáneo, ya que el cálculo del RMS, al basarse en integrales numéricas, puede tardar en estabilizarse en el valor correcto.

Para una mejor comprensión del funcionamiento del diseño de la aplicación y del proyecto en general, se elaboró un video explicativo en el que se detallan las distintas etapas del sistema. Tanto el video como el código fuente utilizado se encuentran disponibles en el repositorio de Github del proyecto (Ver Anexos).

9. Costo Diseño

La Fig. 12 presenta una tabla con los costos estimados para la implementación física del diseño propuesto. En ella se observa que, por un valor aproximado de 76.12 USD, es posible adquirir un dispositivo capaz de medir corriente en baja escala, el cual además incorpora funcionalidad de transmisión inalámbrica.

Elemento	referencia	cantidad	precio
Opamp	ADA4522-1ARMZ	2	\$ 8.04
Transistor	IRLB3034	2	\$ 3.00
ADC	LTC2440	1	\$ 16.13
Regulador	TPS7A0233DQNR	1	\$ 0.65
Boost	XL6009	1	\$ 5.82
Integrado Vref	LM4041AIZ	1	\$ 1.93
Resistencias SMD	ERA-2VPB2262X	14	\$ 1.40
Bateria	LG MJ1 INR	1	\$ 7.14
Resistencia 8mΩ	WFCP06128L000FE66	1	\$ 0.67
Modulo cargador Bateria	TP4056	1	\$ 1.04
Conversor DC	TC1044SEOA	1	\$ 1.52
Microcontrolador	ESP32-A1S	1	\$ 14.84
PCB	JLCPBC	1	\$ 13.94
Total			\$ 76.12

Fig. 12: Costo final proyecto sistema medidor de corriente.

10. Conclusiones

Como parte del proyecto de diseño del circuito se concluye que, se logró realizar un sistema que permite medir la corriente de un microcontrolador tanto en modo de operación normal como en modo de sueño profundo, considerando corrientes positivas y negativas. Se integró conectividad inalámbrica mediante Bluetooth Low Energy, lo cual permitió optimizar tanto el consumo energético como el espacio en la tarjeta ensamblada. Asimismo, se implementaron con éxito funciones de cambio de escala, tanto automático como manual, gestionadas desde una aplicación móvil. El diseño se plantea como un dispositivo de medición de corriente con el potencial de ser utilizado en aplicaciones de corriente continua (DC) y alterna (AC) de hasta 400 Hz.

Como trabajo futuro, se propone la incorporación de un módulo de carga dentro de la propia PCB, que permita recargar la batería de manera interna a través de una conexión USB, con el fin de facilitar la portabilidad y permitir la carga del dispositivo en cualquier parte del mundo.

Referencias

- [1] D. L. Jones, “The μ current, a professional precision current adapter for multimeters,” *Silicon Chip*, 2010.
- [2] F. Rusu, “Current ranger,” sep 2018, lowPowerLab. [Online]. Available: <https://lowpowerlab.com/guide/currentranger/>
- [3] INCB, “Lo que significa rail-to-rail (rro),” sep 2023, iNCB - Información y Consejos Básicos. [Online]. Available: <https://incb.com.mx/index.php/articulos/12-informacion-y-ideas-practicas-ip000s/1679-lo-que-significa-rail-to-rail-rro-art279s>

Anexos

Repositorio del proyecto: https://github.com/21DJM0/Proyecto_Diseno_2025_1/tree/main