

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Ingeniería Electrónica



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE
CORRIENTE CON CONECTIVIDAD
INALÁMBRICA PARA
MICROCONTROLADORES**

MQ Current v2.0

Didier Julian Moreno Ortiz - 2202932

Johan Sebastián Quitian Valderrama - 2210408

Repositorio GitHub:

https://github.com/21DJMO/Proyecto_Diseno_2025_1/tree/main

Mayo 30, 2025

Resumen

En el presente proyecto se desarrolló un sistema electrónico de precisión y bajo costo, alimentado por batería, orientado a la medición de corriente en pequeñas escalas. El diseño propuesto permite cuantificar tanto la corriente de operación normal como la correspondiente al modo de sueño profundo de un microcontrolador, como el ESP32.

El sistema cuenta con la capacidad de alternar entre dos rangos de medición, de manera automática o manual, con el propósito de adaptarse a las distintas condiciones operativas del microcontrolador. Para garantizar una alta exactitud en las mediciones, se integran dos resistencias de shunt tipo Kelvin, junto con un par de amplificadores operacionales de precisión.

Los datos adquiridos son digitalizados y transmitidos de forma inalámbrica a un dispositivo externo, como un teléfono móvil, mediante una aplicación que permite su visualización en tiempo real. El desarrollo del proyecto abarcó la selección y justificación de los componentes electrónicos, la simulación del circuito, el diseño de la PCB y la implementación del firmware encargado de la adquisición y transmisión de los datos medidos.

Palabras clave:

Medición de corriente, Microcontrolador, ESP32, Modo sueño profundo, Resistencia Shunt, Current Ranger, Current, AppInventor.

Índice

1. Glosario	1
2. Introduccion	2
3. Objetivos	2
3.1. Objetivo General	2
3.2. Objetivos especificos	3
4. Marco Teórico	4
5. Investigacion de elementos	6
5.1. Resistencias Shunt	6
5.2. Bateria	7
5.3. MOSFET	7
5.4. Amplificador Operacional	8
5.5. Conversor Analogico Digital	9
5.6. Microcontrolador	9
6. Diseño del circuito	10
6.1. Funcionamiento del circuito	11
6.2. Resultados simulación	14
7. Desarrollo codigo de ESP32	17
8. Desarrollo de aplicacion	20
9. Diseño de la PCB	22
10. Costo Diseño	23
11. Conclusiones	23
Referencias	24

1. Glosario

- **Microcontrolador (ESP32):** Controla el proyecto, procesa las lecturas de corriente y se comunica con otros dispositivos como un celular a través de Bluetooth.
- **Protocolo de transmisión de datos (BLE):** Usado para enviar los datos de corriente a otros dispositivos de manera inalámbrica.
- **ADC:** Convierte las señales analógicas de la caída de voltaje en la resistencia de shunt a valores digitales para su procesamiento.
- **Resistencia de Shunt:** Permite medir la corriente al generar una caída de voltaje proporcional a la corriente que fluye a través de ella.
- **Burden Voltage:** La caída de voltaje en la resistencia de shunt, un parámetro importante que afecta la precisión de las mediciones.
- **OPAM (Amplificador Operacional):** Amplifica la señal de corriente medida para que pueda ser leída por el ADC del ESP32. No me gusta se debe cambiar
- **MOSFET:** Actúa como interruptor para cambiar entre diferentes rangos de medición de corriente, haciendo el sistema flexible y eficiente.
- **Convertidor DC-DC:** Convierte las señales en continua de voltaje en señales de continua con menor amplitud o cambiando la polaridad.

2. Introduccion

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

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Diseño y simulación de un medidor de corriente de precisión, que sea económicamente accesible y de funcionamiento confiable. El sistema está orientado a la medición de corrientes de un microcontrolador tanto en condiciones de operación normal como en estados de bajo consumo. El dispositivo permite la transmisión inalámbrica de los datos de medición a dispositivos externos, como computadoras o teléfonos móviles. Además, ofrece la posibilidad de cambiar el rango de

medición de forma manual o automática, adaptándose a las diferentes condiciones de consumo del sistema monitoreado.

3.2. Objetivos específicos

- Realizar un estudio preliminar de dispositivos y soluciones existentes que aborden problemáticas similares, con el fin de identificar modelos previamente validados que sirvan como referencia para el desarrollo del sistema propuesto.
- Realizar un análisis detallado de los componentes electrónicos requeridos para el desarrollo del diseño, con el fin de verificar su adecuación a las especificaciones técnicas y seleccionar los más apropiados para su uso en el sistema propuesto.
- Desarrollar la simulación del circuito con el propósito de verificar su funcionamiento y evaluar su capacidad para medir corriente con precisión en distintos rangos de operación.
- Desarrollar la plataforma de visualización para los datos de medición de corriente y programar el microcontrolador con el fin de habilitar la transmisión inalámbrica de dichos datos a dispositivos externos.
- Analizar los costos asociados a la fabricación del sistema, considerando la placa de circuito impreso (PCB), los componentes electrónicos y los procesos de ensamblaje, con el objetivo de obtener una estimación del costo total del proyecto.

4. 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.

5. Investigación de elementos

En este apartado se tomarán las decisiones relativas a la selección de los componentes más adecuados para el diseño del sistema. Se realizará una comparativa detallada de los elementos clave del circuito, tales como los transistores, los amplificadores y el ADC, evaluando las características más relevantes de cada componente. Este análisis permitirá seleccionar los componentes más idóneos para garantizar el rendimiento óptimo del sistema. Cada elemento será evaluado en su contexto específico y conforme a las necesidades del diseño, con el objetivo de lograr una solución equilibrada que maximice el desempeño dentro de las restricciones establecidas.

5.1. Resistencias Shunt

La selección adecuada de resistencias *shunt* es fundamental para medir con precisión la caída de tensión que será posteriormente amplificada. Con el fin de mejorar la exactitud de la medición y minimizar los errores asociados a las conexiones, se optó por el uso de resistencias de tipo Kelvin. Este tipo de resistencias permite medir exclusivamente la caída de tensión a través del elemento por el cual circula la corriente, evitando así la influencia de las resistencias parásitas de las pistas o cables de conexión.

En el diseño propuesto se utilizaron dos resistencias Kelvin cuidadosamente seleccionadas por su baja tolerancia, lo que contribuye a reducir el error en la medición. Para el rango de medición en miliamperios se empleó una resistencia de 10 m Ω , referencia Y14870R01000B89R, con una tolerancia de $\pm 0,1$ %. Para el rango de microamperios, se utilizó una resistencia de 10 Ω , referencia Y160710R0000E9R, con una tolerancia de 0,2 %.

5.2. Bateria

La alimentación del circuito constituye un aspecto fundamental, ya que permite suministrar energía a todos los componentes del sistema. En este proyecto, se optó por utilizar una batería LiFePO_4 (fosfato de hierro y litio) en lugar de una batería Li-ion o Li-Po, debido a las ventajas significativas que ofrece en términos de seguridad, durabilidad y estabilidad. Las baterías LiFePO_4 son considerablemente más seguras, gracias a su estabilidad térmica y química, lo que reduce el riesgo de incidentes como incendios o explosiones, incluso en condiciones de sobrecarga o daño físico. Asimismo, presentan una vida útil muy superior, con una capacidad de soportar más de 2000 ciclos de carga y descarga, en contraste con los 500 a 1000 ciclos típicos de las baterías Li-ion. Estas características las hacen especialmente adecuadas para aplicaciones de larga duración y uso continuo. En este caso particular, se empleó una batería LiFePO_4 de 3.2V y 600mAh, referencia LIFE04-14505, para garantizar una fuente de alimentación estable y confiable para todo el circuito.

Para que el dispositivo funcione de manera eficiente, es fundamental que la batería cuente con una capacidad adecuada y se mantenga correctamente cargada. Por esta razón, es recomendable disponer de un módulo de carga específico para baterías. No obstante, el diseño actual no contempla un sistema de carga integrado. A pesar de ello, es posible recargar este tipo de baterías utilizando cargadores universales como el Liitokala, el cual admite distintos tipos de baterías, incluyendo Li-ion, NiMH y LiFePO_4 , además de ofrecer entradas mediante puertos USB tipo C con alimentación de 5V. Este tipo de cargadores es ampliamente accesible en el mercado, con precios que generalmente no superan los 20 USD en plataformas de venta locales. Como alternativa, también es posible utilizar baterías desechables, lo que permite operar el dispositivo de forma práctica sin necesidad de un sistema de recarga incorporado.

5.3. MOSFET

Los transistores MOSFET desempeñan un papel fundamental en el diseño del sistema, ya que son los encargados de activar o desactivar las resistencias shunt utilizadas para la medición de corriente. En este proyecto, se optó por utilizar transistores de canal N en lugar de transistores de canal P, debido a que los primeros suelen presentar una resistencia de encendido ($R_{DS(ON)}$) significativamente menor. Esta característica es crucial, ya que dicha resistencia genera una caída de tensión cuando circula corriente a través del dispositivo, lo cual puede afectar la precisión de la medición al introducir un voltaje no deseado en el sistema.

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

Figura 1: Tabla comparativa transistores

En la Figura 1 se presentan las principales características de los transistores evaluados para este diseño. La tabla incluye cinco modelos de transistores tipo N, detallando parámetros relevantes como el voltaje umbral (V_{th}) y la resistencia de encendido ($R_{DS(ON)}$). Aunque el voltaje de umbral constituye un aspecto a considerar, su influencia en el desempeño general del sistema no resulta tan determinante como la resistencia de encendido, la cual impacta directamente en la precisión de las mediciones de corriente. Tras comparar los valores de $R_{DS(ON)}$ entre los distintos dispositivos, se concluyó que el modelo IRLB3034 representa la opción más adecuada. Este transistor ofrece una resistencia de encendido considerablemente baja y un voltaje de umbral compatible con los requerimientos del circuito. Si bien su costo es superior al de otras alternativas, su rendimiento justifica plenamente su elección dentro del diseño propuesto.

5.4. Amplificador Operacional

Los amplificadores operacionales cumplen la función fundamental de amplificar la señal medida, facilitando así su detección y procesamiento. Sin embargo, estos dispositivos presentan ciertas no idealidades que pueden introducir ruido en la señal de salida, afectando la precisión de las mediciones. Por esta razón, es crucial seleccionar amplificadores de precisión que minimicen la generación de ruido y mantengan la integridad de la señal. De este modo, se garantiza que las mediciones obtenidas sean lo más exactas y fiables posible dentro del sistema.

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

Figura 2: Tabla comparativa amplificadores operacionales

La Figura 2 presenta la tabla con las características de los amplificadores operacionales seleccionados para este diseño. Entre las cinco referencias analizadas, se destaca el modelo MAX4239 debido a su bajo voltaje de offset, lo cual constituye un excelente indicador de precisión. Además, este dispositivo presenta corrientes de polarización extremadamente bajas, lo que lo convierte en una opción altamente adecuada para aplicaciones de alta sensibilidad. Su principal desventaja radica en que no permite una alimentación dual, lo que limita su capacidad para operar con voltajes negativos. No obstante, la elección de este amplificador resulta fundamental para lograr una medición precisa de corrientes de muy baja magnitud dentro del sistema.

5.5. Conversor Analogico Digital

El ADC es un componente fundamental del sistema, ya que permite digitalizar la señal analógica para su posterior transmisión inalámbrica. Para su selección, se consideraron criterios como la resolución, el voltaje de alimentación y la cantidad de canales requeridos.

Como se muestra en la Figura 3, el modelo que mejor cumple con estos requisitos es el LTC2400. Este convertidor puede ser alimentado con 3,2 V y cuenta con una entrada diferencial, lo que permite utilizar únicamente los pines necesarios, optimizando así el diseño del circuito.

ADC	Tipo	Resolución	Alimentación (A_vdd, D_vdd)	Voltaje de referencia	Canales entrada	Precio
MCP3564T-E/NC	Sigma-Delta	24-bits	-0.3[V] a 4.0[V]	0.6[V] a A_Vdd	8 single-ended	7.14USD
ADS1256IDBT	Sigma-Delta	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 y 4 diferencial	19.29USD
LTC2400	Sigma-Delta	24-bits	2.7[V] a 5.5[V]	0.1[V] a A_Vdd	1 diferencial	15.12 USD

Figura 3: Tabla comparativa convertidores analógicos digitales

5.6. Microcontrolador

El microcontrolador representa uno de los pilares fundamentales en el presente diseño, ya que permite habilitar la conectividad inalámbrica del sistema. En este contexto, se requiere un dispositivo que cuente con protocolos de comunicación como SPI, además de conectividad Wi-Fi o Bluetooth, para garantizar una integración eficiente con otros módulos.

Dentro de las múltiples opciones disponibles en el mercado, se consideran alternativas como ciertas generaciones de Raspberry Pi, las cuales ofrecen soluciones robustas y de alto rendimiento. No obstante, estas suelen implicar un mayor costo económico. En contraste, se destaca el ESP32, ya que satisface completamente los requerimientos funcionales del proyecto, ofreciendo conectividad inalámbrica, múltiples interfaces de comunicación y un bajo consumo energético, todo ello a un costo significativamente reducido. Por estas razones, el ESP32 se posiciona como la opción más adecuada y eficiente para este diseño.

6. Diseño del circuito

El diseño propuesto para el sistema medidor de corriente se muestra en la Figura 4. En dicho esquema se observa la incorporación de dos resistencias tipo Kelvin, tal como se mencionó previamente. La utilización de resistencias con tolerancias controladas contribuye a mejorar la precisión en la medición de corriente.

Adicionalmente, el sistema incluye una lógica de conmutación, la cual permite seleccionar dinámicamente cada resistencia shunt, habilitando así el paso de corriente a través de la resistencia correspondiente según el rango de medición requerido. Complementando este diseño, se ha integrado una etapa de amplificación, cuyo propósito es aumentar la señal de tensión generada sobre las resistencias de shunt. Esta señal amplificada es posteriormente procesada mediante un conversor analógico-digital, lo que permite su tratamiento en el dominio digital para futuras etapas del sistema.

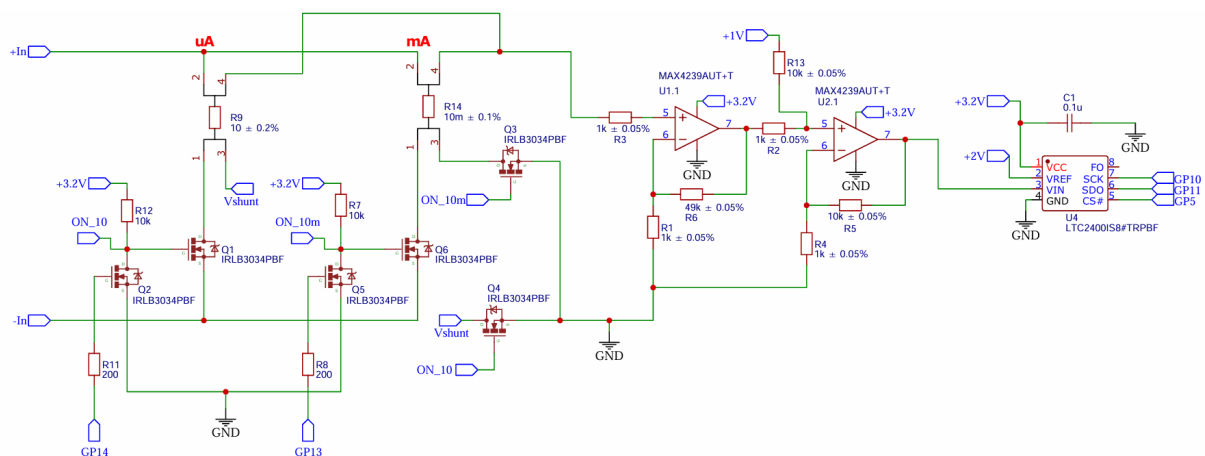


Figura 4: Esquema circuito principal sistema de medición de corriente.

6.1. Funcionamiento del circuito

El diseño contempla la medición de corriente en dos rangos distintos: de 0 a 200 μA y de 0 a 200 mA, lo que abarca los valores de corriente del ESP32 en modo sueño profundo y modo normal especificados por el fabricante. La conmutación entre los distintos rangos de medición se realiza mediante dos transistores MOSFET de canal N. Estos fueron seleccionados debido a que presentan una resistencia de encendido considerablemente menor en comparación con los dispositivos de canal P. Los MOSFET operan en la región de triodo, actuando como interruptores electrónicos de baja resistencia cuando se encuentran activados. En particular, los transistores Q1 y Q6 son controlados directamente por señales lógicas de 3.3V provenientes del microcontrolador, utilizando una configuración tipo *pull-up*. Esta configuración permite aislar la etapa de potencia del microcontrolador, protegiendo sus salidas frente a posibles condiciones eléctricas adversas. Adicionalmente, se ha incorporado una resistencia de 200 Ω en serie con cada compuerta para limitar los picos de corriente durante la conmutación y evitar daños en los pines del microcontrolador.

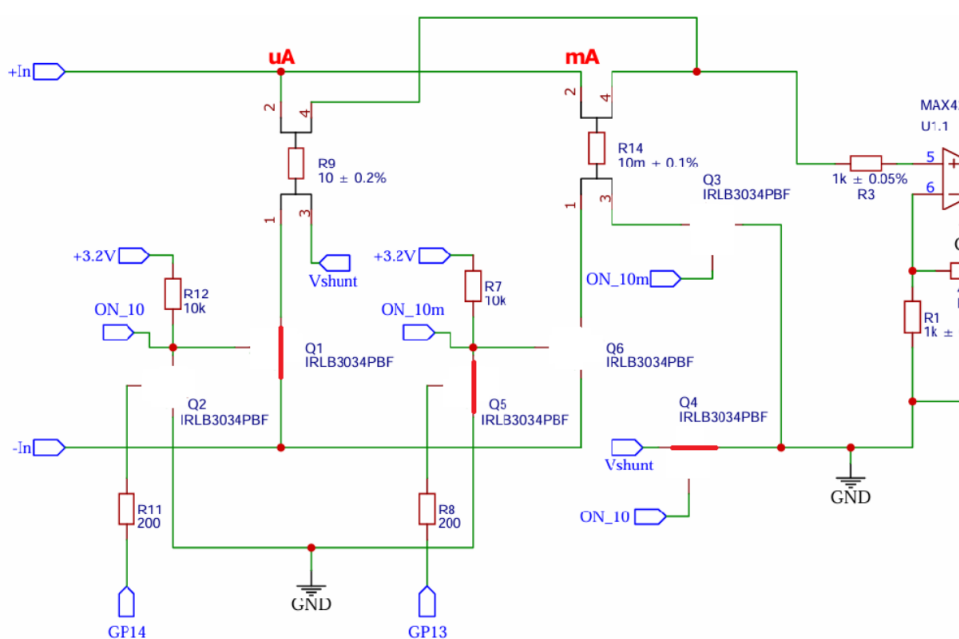


Figura 5: Funcionamiento rango en microamperios

Para la medición de corriente, se contemplan dos modos de operación. En el modo de microamperios, la resistencia Kelvin de 10Ω es la encargada de generar el voltaje de shunt. En este modo, el transistor Q1 se activa, permitiendo el paso de corriente, mientras que Q2 permanece desactivado. Simultáneamente, el transistor Q4 se activa para conectar el extremo de la resistencia de shunt a tierra, completando el circuito de medición.

Además, el transistor Q5 se activa para inhibir la conducción de Q6, asegurando que la corriente fluya únicamente a través de la ruta correspondiente a esta escala. Los pares de transistores Q1–Q2 y Q5–Q6 operan con lógica opuesta, lo que garantiza la conmutación adecuada entre los distintos rangos de medición y evita interferencias entre ellos. La Figura 5 representa la escala de medición en el rango de microamperios.

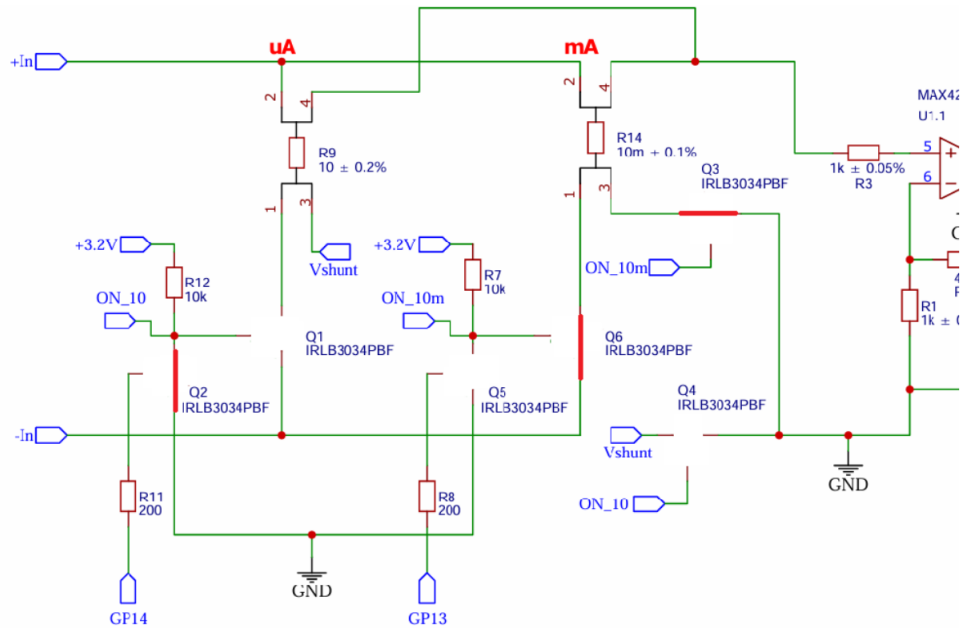


Figura 6: Funcionamiento rango en miliamperios

De manera análoga, el rango de miliamperios opera mediante la activación de los transistores Q6 y Q3, los cuales permiten el flujo de corriente y conectan a tierra la tensión generada en la resistencia Kelvin de 10 mΩ. Simultáneamente, el transistor Q2 se activa, dejando inactivo a Q1 y habilitando así la ruta de corriente correspondiente a este rango de medición. La Figura 6 representa el funcionamiento de este modo de operación.

La señal de corriente, convertida en voltaje a través de una resistencia shunt, es amplificada por una etapa compuesta por dos amplificadores operacionales MAX4239, configurados en modo sumador no-inversor y no-inversor. Se seleccionó una etapa de sumador no-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 valor e 0.99903V, permite que el sistema interprete corrientes positivas cuando el voltaje medido por el ADC está en el rango de 1V a 2V, y corrientes negativas cuando el valor está en el rango de 0V a 1V.

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 de realimentación. Los amplificadores operacionales son alimentados mediante una fuente de

alimentación simple, ya que, gracias al offset incorporado, no es necesario amplificar señales de voltaje negativas.

Los valores de las resistencias utilizadas en los amplificadores (R1 a R13) 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.

La etapa final del sistema corresponde a la digitalización de la señal amplificada, para lo cual se emplea el convertidor analógico-digital LTC2400. 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 V utilizando el ADR130BUJZ-REEL7, la cual también se emplea para generar un voltaje de 1 V que se suma en la etapa del sumador no inversor. Este valor específico de referencia fue seleccionado considerando el offset del amplificador, y a 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 7 presenta la configuración del referenciador de voltaje utilizada para obtener los valores de 1 V y 2 V positivos.

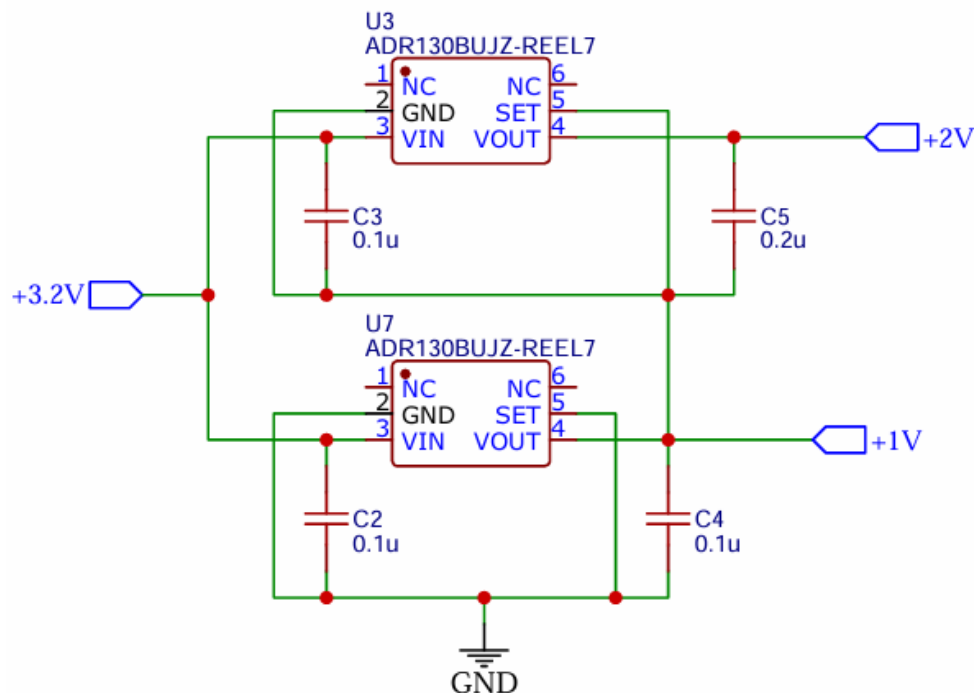


Figura 7: Referenciador de voltaje

6.2. Resultados simulación

El esquema de simulación utilizado se presenta en la Figura 8. En dicho esquema se muestra la conexión implementada en el software Proteus para llevar a cabo la medición de la tensión en la resistencia de shunt. Es posible observar las señales de control que activan o desactivan cada transistor del sistema. Un aspecto relevante del modelo es que las resistencias Kelvin fueron representadas mediante fuentes de tensión dependientes de tensión, con el objetivo de emular una alta impedancia. Esto se debe a que en los terminales de medición de voltaje del shunt, la corriente es prácticamente nula.

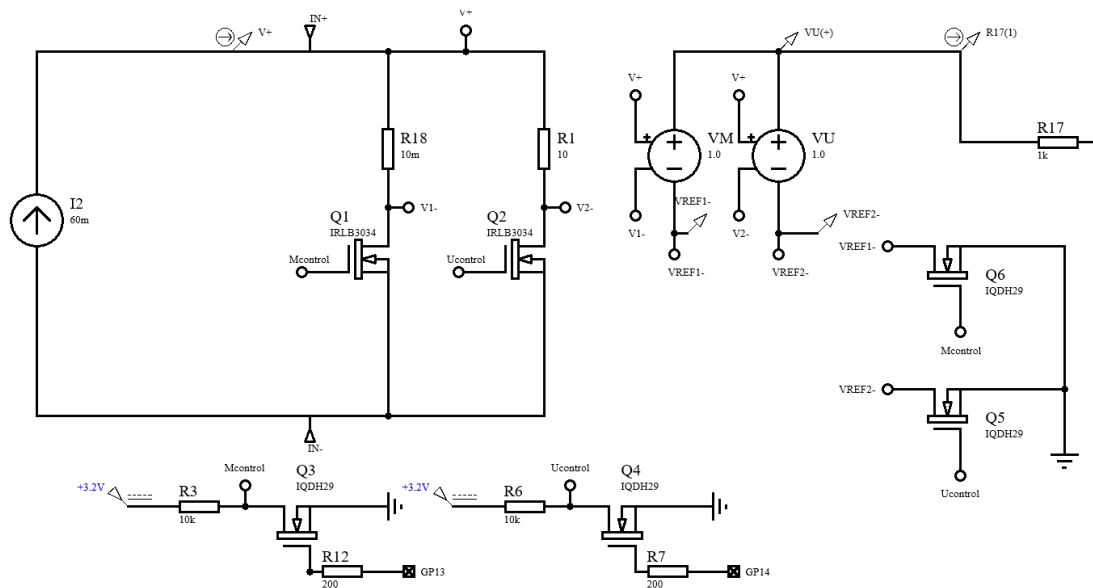


Figura 8: Esquema de simulación en el software Proteus (Resistencias de Shunt)

Como consecuencia, en la Figura 9 se presenta la etapa de amplificación previamente descrita en el diseño, la cual se mantuvo sin modificaciones durante la simulación. Asimismo, se muestra el convertidor analógico-digital (ADC), que por motivos prácticos de simulación fue reemplazado por su modelo más cercano, el LTC2440. Ambos ADC comparten una resolución de 24 bits, emplean el mismo protocolo de comunicación y presentan una estructura funcional similar, lo que permite validar el comportamiento del sistema sin comprometer la precisión de los resultados obtenidos.

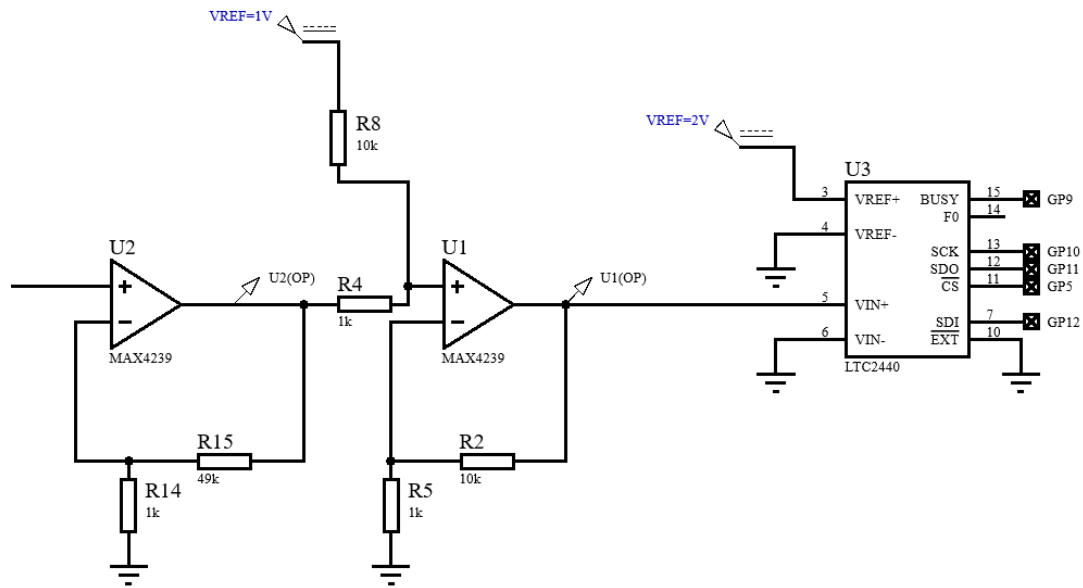


Figura 9: Esquema de simulación en el software Proteus(Etapa amplificación y ADC)

En la simulación, el circuito fue diseñado para operar en cuatro modos diferentes. El primer modo corresponde a la medición de corriente en el rango de miliamperios con polaridad positiva, mientras que el segundo modo ajusta el sistema para medir corrientes del orden de microamperios, también con polaridad positiva. Los modos tres y cuatro son equivalentes a los dos primeros, pero diseñados para medir corriente con polaridad negativa.

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema en cada modo, se modificó la fuente de corriente en la simulación para generar valores de ± 10 y ± 60 .

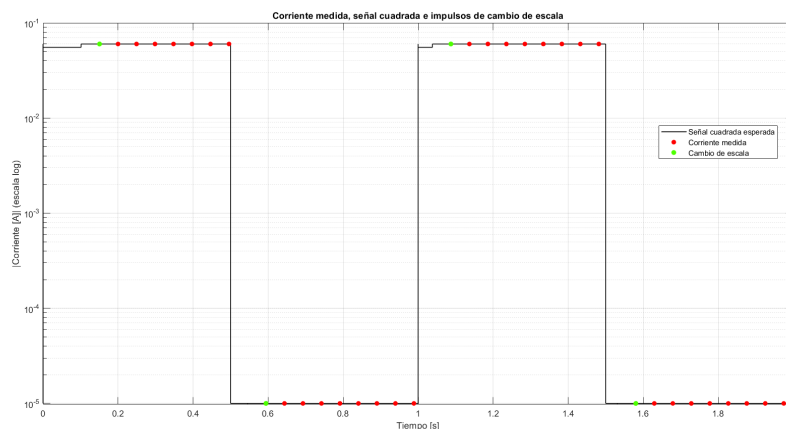


Figura 10: Gráfica de simulación rango de corrientes positivas.

Inicialmente, la fuente de corriente emulada comienza en el rango de miliamperios, sin embargo, el circuito de control automático, específicamente el MOSFET Q1, inicia en la escala

de microamperios. En este estado, Q1 se encuentra activado y el MOSFET Q6 apagado. Esto provoca un cambio de escala antes de cualquier medición, lo que repercute en el apagado de Q1. Posteriormente, tras este cambio de escala, Q6 se activa, configurando la resistencia de shunt como la resistencia de 10 mΩ. 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. 10, 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	Voltaje Shunt	Voltaje ADC
60mA	6mV	1.3026
100uA	0.99998mV	1.49996
-60mA	-5.9899mV	0.7039
-100uA	-0.9887mV	0.49875

Figura 11: Resultados simulación diseño de circuito medidor de corriente para rangos positivos y negativos

La Figura 11 presenta una tabla con los valores de tensión medida sobre la resistencia de shunt y la señal de entrada al ADC para los cuatro modos de operación descritos. Se observa que la caída de tensión en la resistencia de shunt es prácticamente la misma para corrientes de igual magnitud pero con polaridades opuestas, con una ligera variación atribuible al cambio de signo.

Asimismo, se evidencia que el voltaje aplicado al ADC se encuentra en el rango de 1V a 2V para corrientes positivas, y entre 0V y 1V para corrientes negativas. Estos resultados confirman el correcto funcionamiento del sistema de adquisición en todos los rangos de medición, tanto para el sentido positivo como negativo de la corriente.

7. Desarrollo código de ESP32

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, tal como se muestra en el siguiente fragmento:

Listing 1: Lectura SPI por software

```
def soft_spi_read():
    data = 0
    for i in range(32):
        SCK.value(1)
        bit = MISO.value()
        data = (data << 1) | bit
        SCK.value(0)
    return data
```

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:

Listing 2: Definición de pines en el ESP32

```
cs = Pin(5, Pin.OUT)
Busy = Pin(9, Pin.IN)
SCK = Pin(10, Pin.OUT)
MISO = Pin(11, Pin.IN)
SDI = Pin(12, Pin.OUT)
Mcontrol = Pin(13, Pin.OUT)
Ucontrol = Pin(14, Pin.OUT)
```

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. Este valor fue ajustado por el offset y la ganancia de la etapa de amplificación, y posteriormente convertido en corriente según la escala activa (μA o mA):

La adición de la capacidad de medir corrientes negativas permitió también detectar señales de corriente alterna. Se implementó el cálculo del valor RMS de la señal mediante integrales numéricas en tiempo real sobre las mediciones:

Listing 3: Cálculo RMS e integral promedio

```
delta_t = (time.ticks_us() - prev_time) / 1000000
```

```

integralRms += (prev_value2 + Corriente2) * delta_t / 2
integralPromedio += (prev_value + Corriente) * delta_t / 2

```

Para implementar un modo de escala automática, se evaluaron los valores de voltaje/corriente medidos. En función de estos valores y la escala actual, el sistema puede cambiar entre las escalas de μA y mA :

Listing 4: Cambio automático de escala

```

if Mcontrol.value() == 1 and abs(Voltaje + offset) < 1e-7:
    Mcontrol.value(0)
    Ucontrol.value(1)
    unidad = "[mA]"
    # reinicio de integrales
elif Mcontrol.value() == 0 and bajo_count >= 20:
    Mcontrol.value(1)
    Ucontrol.value(0)
    unidad = "[uA]"
    # reinicio de integrales

```

El cambio a mA ocurre cuando la señal es demasiado grande y satura al ADC, mientras que el cambio de mA a μA se activa si el valor de corriente medida se mantiene por debajo de aproximadamente 0.19 mA durante 180 muestras consecutivas. Este umbral fue ajustado considerando los cruces por cero de las señales senoidales de corriente alterna, evitando así cambios incorrectos de escala.

Finalmente, cabe destacar que la comunicación con la aplicación de 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 permitir la transmisión inalámbrica de los datos medidos por el sistema, se implementó una interfaz basada en Bluetooth Low Energy (BLE), utilizando el perfil UART. Este perfil emula una comunicación serial sobre BLE, lo que facilita la integración con aplicaciones móviles o de escritorio que interpreten los datos como si provinieran de un puerto serie convencional.

El código presentado a continuación configura un servicio BLE personalizado compatible con el estándar de perfil UART definido por Nordic Semiconductor. Este servicio consta de dos características: una de transmisión (TX) y otra de recepción (RX), identificadas mediante UUIDs específicas:

Listing 5: Definición de servicio BLE UART

```

_UART_UUID = bluetooth.UUID("6E400001-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E")
_UART_TX = (bluetooth.UUID("6E400003-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"), bluetooth.FLAG_NOTIFY,)
_UART_RX = (bluetooth.UUID("6E400002-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E"), bluetooth.FLAG_WRITE,)
_UART_SERVICE = (_UART_UUID, (_UART_TX, _UART_RX, ),)

```

Se define una clase BLEUART, la cual se encarga de inicializar el hardware BLE del ESP32, registrar el servicio UART, y gestionar los eventos de conexión, desconexión y recepción de datos. Esta clase también inicia la publicidad BLE para que el dispositivo sea visible desde otros dispositivos compatibles:

Listing 6: Inicialización y publicidad BLE

```
self._ble.active(True)
self._ble.irq(self._irq)
((self._tx_handle, self._rx_handle),) = self._ble.gatts_register_services((_UART_SERVICE,))
self._payload = advertising_payload(name=name, services=[_UART_UUID])
self._advertise()
```

Dentro del manejador de interrupciones `_irq`, se controlan tres tipos de eventos:

1. Conexión de un dispositivo central (por ejemplo, un teléfono móvil).
2. Desconexión del dispositivo central.
3. Escritura de datos en la característica RX (útil para recibir comandos).

Una vez conectado, el microcontrolador puede enviar datos a través del método `send()`, que utiliza `gatts_notify()` para notificar nuevos valores a los dispositivos conectados.

En el bucle principal, se genera periódicamente una simulación de mediciones de corriente (en mA), junto con su valor RMS. Estos datos se formatean como una cadena con el siguiente formato:

```
corriente_instante, corriente_RMS, unidad,
```

y se transmiten cada dos segundos mediante BLE:

Listing 7: Bucle principal de transmisión BLE

```
while True:
    Corriente = random.uniform(min_val, max_val)
    CorrienteRMS = random.uniform(min_val, max_val)
    Mensaje = str(Corriente) + "," + str(CorrienteRMS) + "," + unidad + ","
    uart.send(Mensaje + "\n")
    print("Enviado:_" + Mensaje + "_")
    time.sleep_ms(2000)
```

Cabe destacar que, para efectos de simulación en esta etapa, se generan valores aleatorios dentro de un rango representativo. En la implementación final, estos valores serán reemplazados por las mediciones reales del sistema de adquisición descrito anteriormente.

Para una mejor comprensión del funcionamiento del firmware y del proyecto en general, se elaboró un video explicativo disponible junto con el código fuente en el repositorio de GitHub del proyecto (ver Anexos).

8. Desarrollo de aplicacion

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.

El diagrama de bloques correspondiente se presenta en la Figura 12. Este está compuesto por módulos funcionales que permiten la recepción de datos a través de la comunicación Bluetooth. A partir de esta información, se actualizan tanto los valores de corriente como las unidades asociadas a la medición. Asimismo, desde la aplicación de visualización es posible enviar comandos al microcontrolador para seleccionar entre el modo de escala automática o manual. En caso de optar por el modo automático, la escala de medición se ajusta dinámicamente siguiendo la lógica previamente descrita en la sección de programación del microcontrolador. Para facilitar la interacción con el sistema, se añadieron botones que permiten seleccionar el dispositivo al cual conectarse mediante BLE, así como escoger entre el modo automático o manual de la escala. Además, se presentan en tiempo real tanto los valores instantáneos de corriente como su valor RMS. Este último resulta especialmente útil en el caso de señales de corriente alterna, ya que proporciona una medida efectiva de la potencia. No obstante, en el caso de señales de corriente continua, es más conveniente centrarse en el valor instantáneo, dado que el cálculo del RMS al basarse en integrales numéricas puede requerir cierto tiempo para estabilizarse en el valor correcto.

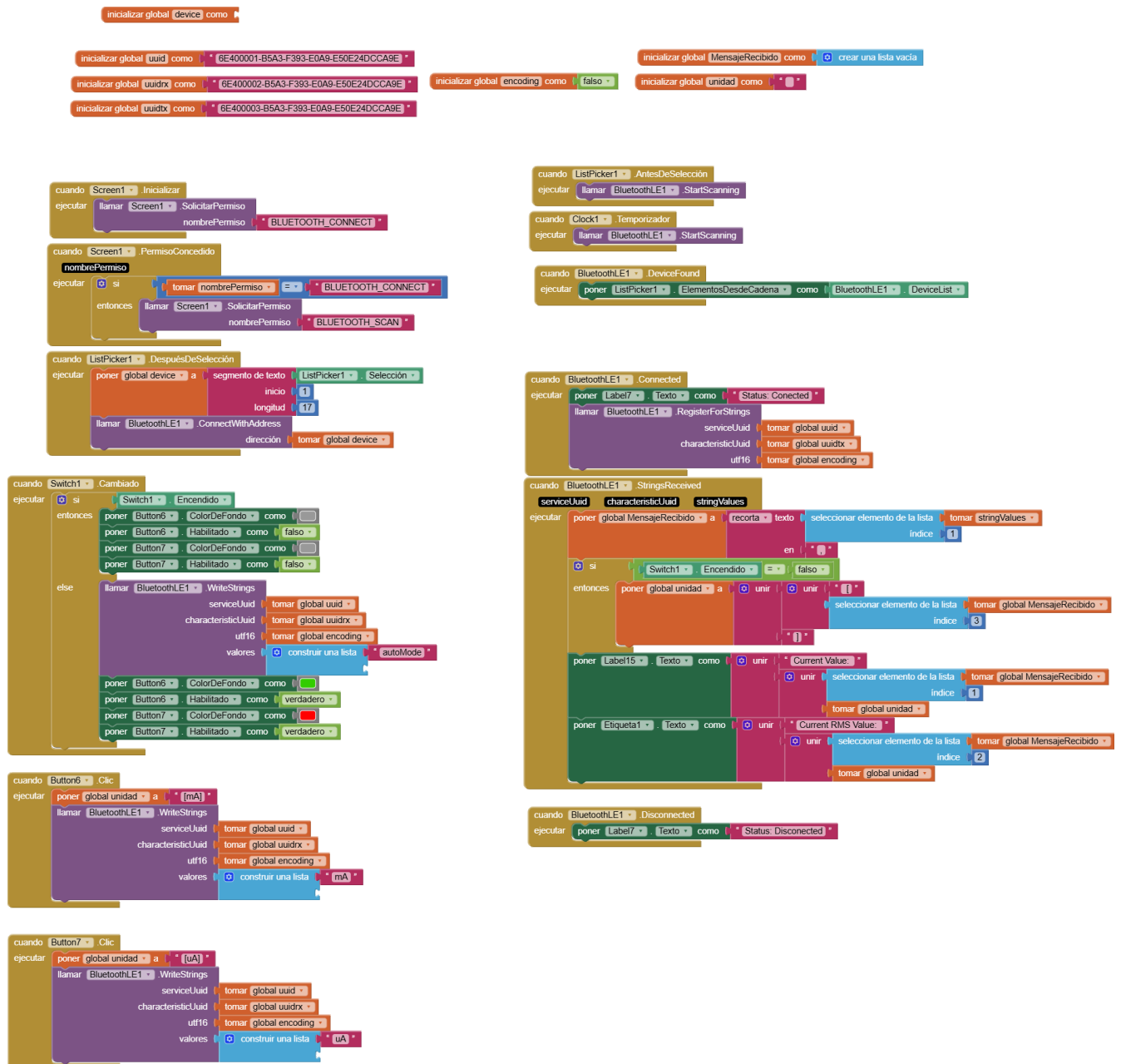


Figura 12: Diagrama de bloques de la aplicación implementada en MIT App Inventor.

La Figura 13 presenta la interfaz gráfica del diseño de la aplicación móvil para el monitoreo de la corriente del microcontrolador.

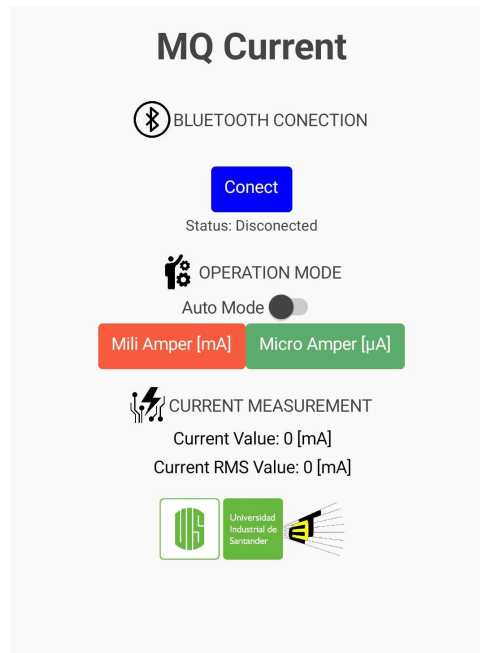


Figura 13: Interfaz gráfica aplicación móvil para monitoreo de corriente.

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.

9. Diseño de la PCB

Para el diseño de la PCB se utilizó el software EasyEDA. La Figura ?? muestra el esquema general del circuito implementado en dicha plataforma.

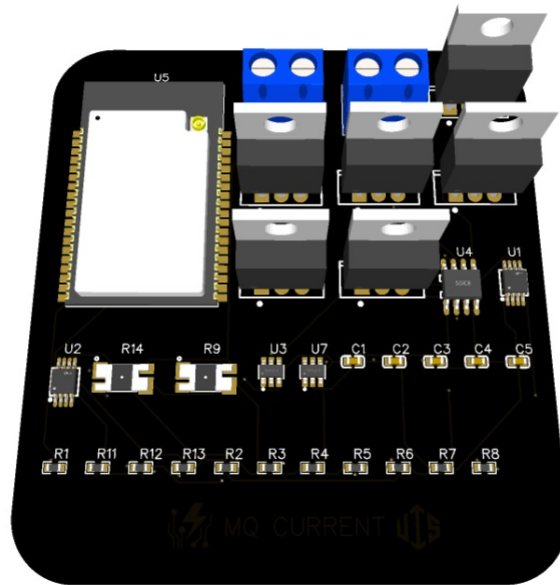


Figura 14: Diseño PCB en 3D

10. Costo Diseño

Elemento	referencia	cantidad	precio	Proveedor
Opamp	MAX4239AUT+T	2	\$ 6.42	MAX4239AUT+T Analog Devices Inc./Maxim Integrated Integrated Circuits (ICs) DigiKey
Transistor	IRLB3034	6	\$ 9.00	IRLB3034PBF Infineon Technologies Discrete Semiconductor Products DigiKey
ADC	LTC2400	1	\$ 15.12	LTC2400CS8#PBF Analog Devices Inc. Integrated Circuits (ICs) DigiKey
Referenciador de voltaje	ADR130AUJZ-REEL7	2	\$ 8.48	ADR130AUJZ-REEL7 Analog Devices Inc. Integrated Circuits (ICs) DigiKey
Bateria	3145-LIFE04-14505-ND	1	\$ 3.99	LIFE04-14505 Dantona Industries Battery Products DigiKey Marketplace
Resistencia 10mΩ	Y14870R01000B89R	1	\$ 3.23	Y14870R01000B89R VPG Foil Resistors Resistors DigiKey
Resistencia 10Ω	Y160710R0000E9R	1	\$ 1.04	Y160710R0000E9R VPG Foil Resistors Resistors DigiKey
Resistencia 1kΩ	ERA-3ARW102V	4	\$ 1.76	ERA-3ARW102V Panasonic Electronic Components Resistors DigiKey
Resistencia 10kΩ	ERA-3ARW103V	3	\$ 1.32	ERA-3ARW103V Panasonic Electronic Components Resistors DigiKey
Resistencia 39kΩ	RG1608N-393-W-T1	1	\$ 0.57	RG1608N-393-W-T1 Susumu Resistors DigiKey
Resistencia 200Ω	SFM2000AHKANHWS	2	\$ 0.49	SFM2000AHKANHWS Vishay Electro-Films Resistors DigiKey
Resistencia 10kΩ	RC0402JR-0710KL	2	\$ 0.20	RC0402JR-0710KL YAGEO Resistors DigiKey
Microcontrolador	ESP32-A1S-ES8388	1	\$ 6.06	Tarjeta De Desarrollo Esp32 Entrada Usb Tipo C Cuotas sin interés
PCB	JLCPBC	1	\$ 19.44	JLCPCB PCBA Viewer
Total			\$ 77.12	

Figura 15: Costo total diseño circuito medidor de corriente

La Figura 15 presenta una tabla con los costos estimados para la implementación física del diseño propuesto. En ella se observa que, por un valor aproximado de 77.12 USD, es posible adquirir un dispositivo capaz de medir corriente en baja escala, el cual además incorpora funcionalidad de transmisión inalámbrica

11. Conclusiones

A partir de la revisión crítica de la primera versión del proyecto, se identificaron y corrigieron diversos aspectos fundamentales que impactaban tanto en la precisión del sistema como en su eficiencia general. Uno de los principales problemas detectados en el diseño anterior fue el

uso de múltiples niveles de voltaje para alimentar los distintos componentes del sistema. Esta práctica no solo incrementaba la complejidad del circuito, sino que también introducía elementos adicionales, como convertidores de voltaje, que ocupaban espacio en la PCB y generaban ruido eléctrico indeseado.

En la versión actual, se priorizó la homogeneización del sistema de alimentación, de manera que todos los componentes electrónicos operaran a una única tensión de 3.2V. Esta decisión no solo simplificó el diseño eléctrico y redujo significativamente el tamaño de la PCB, sino que además permitió eliminar el convertidor boost utilizado previamente, lo cual contribuyó a minimizar el ruido eléctrico y mejorar la estabilidad de las mediciones.

Otro cambio fundamental fue la selección cuidadosa de resistencias de precisión. En la versión anterior, no se especificaron las tolerancias de los componentes pasivos, lo cual representaba un error crítico en un sistema de medición de alta precisión. En esta nueva iteración, se optó por resistencias con baja tolerancia y alta estabilidad térmica, asegurando una mayor fiabilidad y repetibilidad en las lecturas de corriente.

Además, la implementación de estas mejoras no tuvo un impacto significativo en el costo total del proyecto. No obstante, los beneficios obtenidos justifican ampliamente su inclusión: se logró una mayor precisión en las mediciones, una notable reducción del ruido electrónico, una simplificación en el sistema de alimentación, una disminución en el tamaño físico del dispositivo y una mejora sustancial en la calidad general del diseño. En conjunto, estos cambios representan un avance significativo hacia un sistema más robusto, eficiente y profesional.

Referencias

- [1] David L. Jones. «The μ Current, a professional precision current adapter for Multimeters». En: *Silicon Chip* (2010).
- [2] Felix Rusu. *Current Ranger*. LowPowerLab. Sep. de 2018. URL: <https://lowpowerlab.com/guide/currentranger/>.
- [3] ESP32 Espressif. *WROOM-32 Datasheet v3.4*. 2023.
- [4] Piyu Dhaker. «Introduction to SPI interface». En: *Analog Dialogue* 52.3 (2018), págs. 49-53.
- [5] F. Rusu. *Current ranger – ultra low power current measurement*. 2018. URL: <https://lowpowerlab.com/guide/currentranger/>.
- [6] K. Magdy. *ESP32 Sleep Modes & Power Consumption*. DeepBlue Embedded. 2023. URL: <https://deepbluembedded.com/esp32-sleep-modes-power-consumption/>.