



Trabajo Final: Diseño de un circuito electrónico operado por batería para la medición de la corriente de operación normal y en modo de sueño profundo de un microcontrolador

Juan Manuel Tellez Calderón - 2194235
Valentina Bernal Puentes - 2205556

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
[Enlace Repositorio en GitHub \[1\]](#)

25 de abril de 2025

Resumen

El presente proyecto consiste en el diseño de un circuito electrónico operado por batería para medir la corriente de consumo de un microcontrolador, tanto en su estado de operación normal como en sueño profundo. La medición se transmite de forma inalámbrica y el sistema puede operarse en modo manual o automático. Se seleccionan resistencias shunt de precisión y resistencias Kelvin de 4 terminales para asegurar mediciones exactas en diferentes rangos de corriente, considerando la caída de tensión (burden voltage) permitida por el sistema. Además, se diseña una etapa de acondicionamiento que limita la salida a 1000 mV, adecuada para un ADC, y se implementa un sistema de control con lógica simple. El diseño esquemático y de PCB se realiza en EasyEDA, priorizando el buen desempeño de las etapas sensibles como el ADC y los sensores. Este desarrollo permite caracterizar de forma correcta el comportamiento energético de dispositivos electrónicos de bajo consumo.

Palabras clave: Microcontrolador, ESP32, OPAM, Corriente, tensión, Mosfet, multiplexor, app inventor .

1. Introducción

En el desarrollo de sistemas embebidos y dispositivos electrónicos de bajo consumo, la medición precisa de corriente es esencial para optimizar la eficiencia energética y extender la autonomía de los dispositivos. Aplicaciones como el Internet de las Cosas (IoT), la automatización y la electrónica portátil requieren un monitoreo detallado del consumo en diferentes estados operativos para reducir el desperdicio energético y mejorar el rendimiento del sistema.

El ESP32 es un microcontrolador ampliamente utilizado

que alterna entre estados de actividad y sueño profundo para minimizar el consumo energético. Sin embargo, la medición de corrientes extremadamente bajas en estos modos presenta desafíos técnicos, ya que requiere instrumentos con alta sensibilidad y bajo burden voltage para evitar afectar el comportamiento del circuito bajo prueba.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar un circuito operado por batería capaz de medir la corriente en ambos modos de operación del ESP32, transmitiendo los datos inalámbricamente a un computador o dispositivo móvil. El sistema contará con un mecanismo de medición en modo manual y automático, garantizando un cambio de rango y una tensión máxima de salida de 1000 mV.

Para su desarrollo, se seleccionarán componentes de alta precisión, como amplificadores de instrumentación y resistencias shunt de bajo valor, asegurando mediciones confiables sin alterar el funcionamiento del microcontrolador. Además, se considerará un diseño de PCB optimizado en términos de tamaño, consumo y costo, así como el uso de tecnologías inalámbricas como Wi-Fi y Bluetooth para la transmisión de datos.

Este informe detalla la selección de componentes, el diseño del circuito y su análisis mediante simulaciones, proporcionando una herramienta útil para la evaluación del consumo en sistemas embebidos y contribuyendo a la optimización energética de dispositivos portátiles y de bajo consumo.



2. Marco Teórico

La medición de corriente es un aspecto clave en el diseño y análisis de sistemas electrónicos, ya que permite evaluar el consumo energético de un dispositivo, optimizar su rendimiento y detectar posibles fallos en la alimentación. En sistemas embebidos y dispositivos alimentados por batería, conocer con precisión el consumo de corriente es fundamental para mejorar la eficiencia energética y extender la autonomía operativa.

Los sistemas electrónicos pueden operar en diferentes estados de consumo, dependiendo de la carga de trabajo y las funciones activas. Un microcontrolador como el **ESP32** alterna entre **modo de operación normal** y **modo de bajo consumo**(deep sleep) para optimizar el uso de energía, especialmente en aplicaciones IoT y dispositivos portátiles. La medición de corriente en ambos estados permite identificar qué factores influyen en el consumo y diseñar estrategias para minimizar el desperdicio energético.

[2] Existen diversos métodos para medir la corriente en un circuito [3], cada uno con ventajas y desventajas dependiendo de la precisión requerida, la carga adicional introducida y la facilidad de implementación. Entre los métodos más utilizados en la electrónica de potencia y sistemas embebidos se encuentran:

- **Medición con resistencia shunt:** Se coloca una resistencia de bajo valor en serie con la carga para medir la caída de tensión y, a partir de ella, calcular la corriente con la Ley de Ohm. Este método es preciso y de bajo costo, pero introduce una pequeña pérdida de potencia.
- **Sensores de efecto Hall:** Utilizan el campo magnético generado por la corriente para determinar su intensidad sin contacto directo. Son útiles en aplicaciones de alta corriente, pero pueden ser menos precisos en rangos bajos.
- **Convertidores de corriente a voltaje con amplificadores operacionales:** Permiten amplificar la señal obtenida de una resistencia shunt, mejorando la precisión en la medición de corrientes pequeñas.

Para lograr mediciones precisas en sistemas embebidos, es común utilizar amplificadores de instrumentación o circuitos especializados que integran un amplificador diferencial de alta precisión con comunicación digital para facilitar la lectura de datos. La elección del método de

medición dependerá de factores como la precisión deseada, el rango de corriente a medir y las restricciones del sistema en términos de tamaño, costo y consumo energético.

2.1. Microcontrolador ESP32 y su gestión de energía

El ESP32 1 es un microcontrolador de alto rendimiento diseñado para aplicaciones IoT, comunicaciones inalámbricas y sistemas embebidos. Su arquitectura incluye un procesador dual-core, conectividad Wi-Fi y Bluetooth, múltiples periféricos y capacidades avanzadas de gestión energética. Estas características lo convierten en una opción ideal para dispositivos alimentados por batería, donde la eficiencia energética es un factor crítico.



Fig. 1: Microcontrolador Esp32.

Modos de operación y consumo de energía:

El ESP32 ofrece varios modos de operación para optimizar el consumo energético [4] según las necesidades del sistema: [5]

- **Modo Activo:** En este estado, el microcontrolador ejecuta código a máxima velocidad, utilizando todos los periféricos habilitados. Dependiendo de la carga de procesamiento y la conectividad activa, el consumo de corriente puede oscilar entre 100 mA y 250 mA.
- **Modo Light Sleep:** Suspende la CPU mientras mantiene activos algunos periféricos como el RTC y los temporizadores. El consumo se reduce significativamente, generalmente entre 0.8 mA y 10 mA.
- **Modo Deep Sleep:** La mayoría de los periféricos y la CPU se desactivan, dejando en funcionamiento solo el RTC y algunos pines de interrupción. En este estado, el consumo se reduce a aproximadamente 0.1 mA.



te $10\text{-}150 \mu\text{A}$, lo que lo hace ideal para aplicaciones de bajo consumo.

- **Modo Hibernación:** Es el estado de menor consumo, donde solo se mantiene encendido el circuito mínimo necesario para el reinicio. El consumo puede descender hasta $5 \mu\text{A}$, prolongando la autonomía del sistema.

Importancia de la gestión de energía en el ESP32:

En aplicaciones donde la alimentación proviene de baterías, una gestión eficiente del consumo energético es esencial para maximizar la autonomía del dispositivo. La capacidad de cambiar entre modos de operación según la carga de trabajo permite optimizar el balance entre rendimiento y eficiencia.

Para medir con precisión la corriente consumida en cada estado, es necesario utilizar un circuito de medición adecuado que pueda detectar tanto corrientes elevadas en modo activo como corrientes extremadamente bajas en modo de bajo consumo. Esto implica seleccionar resistencias shunt con valores adecuados y amplificadores operacionales de alta precisión para no afectar el rendimiento del sistema.

Además, la información sobre el consumo energético se puede transmitir inalámbricamente mediante las capacidades de Wi-Fi o Bluetooth del ESP32, lo que permite un monitoreo remoto del comportamiento del dispositivo en tiempo real. Esta capacidad es especialmente útil en aplicaciones de IoT, sensores autónomos y sistemas de monitoreo energético.

2.2. Amplificadores Operacionales para Medición de Corriente:



Fig. 2: Amplificador Operacional.

Los amplificadores operacionales (Op-Amps) son circuitos integrados fundamentales en la electrónica analógica y se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo la medición de corriente. Su función principal

es amplificar señales eléctricas con alta ganancia y baja distorsión. En la medición de corriente, los Op-Amps permiten convertir pequeñas variaciones de voltaje en señales más manejables sin afectar significativamente el circuito bajo prueba.

Principio de funcionamiento:

Para medir la corriente, se utiliza generalmente una resistencia shunt, que genera un pequeño voltaje proporcional a la corriente que circula a través de ella. Este voltaje es típicamente muy bajo, por lo que se emplea un amplificador operacional para aumentarlo a niveles medibles por un microcontrolador como el ESP32.

Tipos de Amplificadores Utilizados en Medición de Corriente:

- **Amplificadores de Instrumentación:** Diseñados para ofrecer alta precisión y rechazo de ruido.
- **Amplificadores Diferenciales:** Comparan dos voltajes y amplifican la diferencia.
- **Amplificadores de Ganancia Fija:** No requieren componentes externos para definir su ganancia.

3. Métodos de Transmisión Inalámbrica de Datos:

En los sistemas embebidos modernos, la transmisión inalámbrica de datos es fundamental para la monitorización remota y la recopilación de información en tiempo real. En este proyecto, la comunicación inalámbrica permite enviar las mediciones de corriente desde el circuito de medición hacia un computador o un dispositivo móvil sin necesidad de cables, lo que mejora la portabilidad y facilita su implementación en aplicaciones de bajo consumo.

Protocolos de Comunicación Compatibles con el ESP32:

El ESP32 es un microcontrolador que integra múltiples opciones de comunicación inalámbrica, lo que lo hace ideal para este tipo de aplicaciones. A continuación, se describen los principales protocolos que pueden utilizarse en este proyecto:

1. Wifi:

- Permite la transmisión de datos a una red local o a un servidor en la nube.
- Puede ser utilizado para enviar las mediciones a una aplicación web o una base de datos.



- Su consumo energético es relativamente alto en comparación con otros métodos.

2. Bluetooth Low Energy (BLE)

- Diseñado para la comunicación con dispositivos móviles de manera eficiente.
- Bajo consumo energético en comparación con Wi-Fi.
- Útil para aplicaciones donde el usuario interactúa directamente con el ESP32 a través de una app móvil.

3. ESP-NOW:

- Protocolo de comunicación optimizado para baja latencia y bajo consumo energético.
- No requiere conexión a una red Wi-Fi para transmitir datos entre dispositivos ESP32.
- Ideal para sistemas donde se requiere comunicación rápida y eficiente sin depender de internet.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Diseñar un circuito electrónico operado por batería, junto con su PCB, capaz de medir la corriente de operación normal y de sueño profundo de un microcontrolador, como el ESP32, y transmitir los datos de manera inalámbrica a un celular, garantizando la llegada de los datos a la app, teniendo en cuenta la precisión en la medición y compatibilidad con los diferentes modos de operación.

4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar el circuito de medición de corriente con una resistencia shunt y un amplificador adecuado.
- Seleccionar y evaluar amplificadores de medición de corriente compatibles con el ESP32.
- Implementar la transmisión inalámbrica de datos mediante Wi-Fi o Bluetooth.
- Desarrollar un sistema de cambio de rango automático y manual para la medición de corriente.
- Diseñar una PCB que integre todas las etapas del sistema, asegurando su funcionalidad y rendimiento adecuado.

5. Selección de componentes

5.1. Resistencias Shunt

Para medir la corriente consumida por el microcontrolador ESP32, se utiliza una resistencia *shunt*, la cual genera una caída de tensión proporcional a la corriente que circula a través de ella. Esta caída se conoce como **burden voltage**, y debe mantenerse lo más baja posible para no interferir con el funcionamiento del sistema.

5.1.1. Cálculo del valor de la resistencia shunt

El valor de la resistencia shunt se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$R_{\text{shunt}} = \frac{V_{\text{burden}}}{I} \quad (1)$$

donde:

- R_{shunt} es el valor de la resistencia en ohmios (Ω),
- V_{burden} es el voltaje máximo permitido sobre la resistencia (V),
- I es la corriente máxima estimada (A).

Modo activo

- Corriente esperada[6]: $I = 100 \text{ mA} = 0,1 \text{ A}$
- Burden voltage máximo permitido: $V_{\text{burden}} = 1 \text{ mV} = 0,001 \text{ V}$

$$R_{\text{shunt, activo}} = \frac{0,001}{0,1} = 0,01 \Omega = \mathbf{10 \text{ m}\Omega} \quad (2)$$

Modo de sueño profundo

- Corriente esperada[6]: $I = 100 \mu\text{A} = 0,0001 \text{ A}$
- Burden voltage máximo permitido: $V_{\text{burden}} = 1 \text{ mV} = 0,001 \text{ V}$

$$R_{\text{shunt, sueño}} = \frac{0,001}{0,0001} = 10 \Omega \quad (3)$$

5.1.2. Selección de resistencias shunt

Para medir corriente en las distintas etapas del sistema, se seleccionaron resistencias shunt específicas según el modo de operación del microcontrolador. La selección se basó en criterios de precisión, tolerancia, facilidad de montaje y presupuesto. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los valores seleccionados para cada modo:



Modo	Corriente	V_{burden}	R_{shunt}
Activo	100 mA	1 mV	10 mΩ
Sueño profundo	100 μA	1 mV	10 Ω

Tab. 1: Resumen de resistencias shunt seleccionadas.

5.1.3. Resistencia de precisión

Para la etapa de medición en modo de bajo consumo, donde las corrientes son del orden de los microamperios, se requiere una resistencia de alta precisión con baja tolerancia. Se evaluaron varias opciones comerciales:

Referencia	Tolerancia	Precio
RT0603BRD0710RL	0.1 %	\$714
CPF0402B10RE41021	0.1 %	\$410
ERJ-GENF10R0V	1 %	\$561

Tab. 2: Comparativa de resistencias de precisión para medición de microcorrientes.

En la tabla 2 se comparan tres referencias de resistencias con tolerancias entre 0.1 % y 1 % para la medición de microcorrientes en modo de sueño profundo. La RT0603BRD0710RL se destaca por su excepcional tolerancia del 0.1 % y por garantizar mediciones con el menor error posible. La CPF0402B10RE41021, pese a ofrecer tolerancia similar, se ve limitada por dificultades prácticas de manejo que pueden afectar la confiabilidad de la lectura. La ERJ-GENF10R0V, con una tolerancia del 1 %, incrementa significativamente el margen de error en las mediciones, por lo que fue descartada.

5.1.4. Resistencia Kelvin de 4 terminales

Para el modo activo, donde la corriente puede alcanzar los 100 mA, se seleccionó una resistencia de 10 mΩ en configuración Kelvin de 4 terminales, lo cual permite una medición precisa sin influencias por las pistas de alta corriente.

Referencia	Tolerancia	Precio
LVK12R010DER	0.5 %	\$4950
WSLP2512R0100FEA	1 %	\$5511
SR10	1 %	\$41794

Tab. 3: Comparativa de resistencias Kelvin de 4 terminales para medición de corriente alta.

En la Tabla3 se evalúan tres opciones de resistencias de 10 m para la medición de corrientes de hasta 100 mA. La LVK12R010DER, con configuración Kelvin de cuatro terminales y tolerancia de 0.5 %, asegura la mínima influencia de las pistas y conexiones, lo que se traduce en la

máxima precisión de lectura. La WSLP2512R0100FEA, al no contar con configuración Kelvin y presentar tolerancia del 1 %, resulta menos confiable para mediciones de baja resistencia. Por último, la SR10, aunque muy estable, comprometía el presupuesto del proyecto debido a su alto costo.

5.2. Selección del MOSFET

Para la etapa de medición de corriente, se requiere un MOSFET de canal N de baja resistencia en conducción ($R_{DS(on)}$), capaz de manejar corrientes moderadas y que ofrezca una baja caída de voltaje para no alterar la medición. En la Tabla 4 se presenta la comparación entre varios dispositivos evaluados.

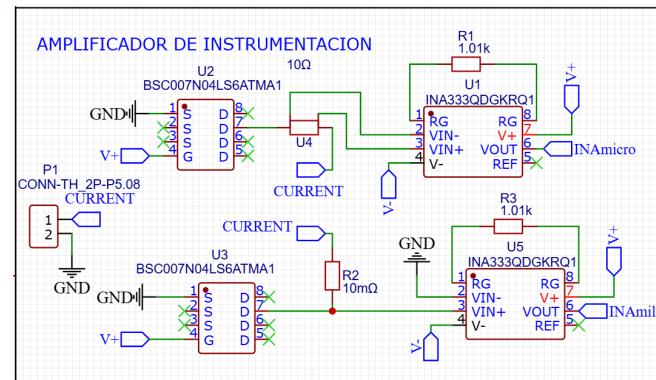


Fig. 3: Esquemático de amplificador de instrumentación junto con el mosfet seleccionado.

Referencia	$R_{DS(on)}$	$V_{GS(th)}$	I_D (máx)	Paquete	Precio
BSC007N04LS6ATMA1	0.7 mΩ	0.7 V	100 A	SuperSO8	\$2500
IRLML6344	20 mΩ	0.6 V	5.3 A	SOT-23	\$800
CSD18532Q5B	1.2 mΩ	1.0 V	100 A	SON 5x6 mm	\$3500
AO3400A	34 mΩ	1.0 V	5.8 A	SOT-23	\$500

Tab. 4: Comparativa de MOSFETs de canal N para la etapa de medición de corriente.

Se eligió el **BSC007N04LS6ATMA1** debido a su extremadamente baja resistencia $R_{DS(on)}$ de 0.7 mΩ, lo cual minimiza las pérdidas de potencia y asegura una medición precisa de la corriente. Además, su alta capacidad de corriente (I_D de 100 A) ofrece un amplio margen de operación, y su paquete SuperSO8 permite una buena dissipación térmica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde la precisión y eficiencia son prioritarias. Las pruebas de este amplificador se observan mas adelante junto con el amplificador de instrumentación en las figuras 5 y 6.



5.3. Sensor de corriente

Para la medición de corriente en el sistema se seleccionó el amplificador de instrumentación INA333, ya que ofrece un conjunto de características esenciales para la aplicación, como bajo voltaje de offset ($25\mu V$ máx), alta relación de rechazo en modo común (CMRR 100dB), y una ganancia ajustable mediante una resistencia externa. Estas propiedades permiten realizar mediciones precisas a partir de señales débiles, como las generadas por resistencias shunt de bajo valor.

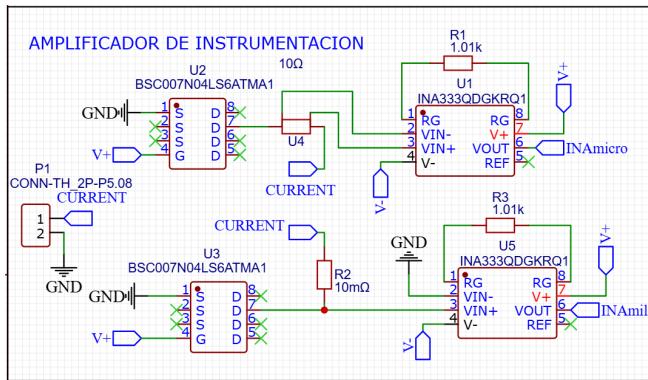


Fig. 4: Esquemático de amplificador de instrumentación - INA333.

Un aspecto clave en este tipo de medición es la capacidad del amplificador para rechazar interferencias comunes presentes en ambos terminales de entrada, como el ruido eléctrico inducido. Esta capacidad se cuantifica mediante el parámetro **CMRR (Common-Mode Rejection Ratio)**. Un CMRR superior a 80dB se considera adecuado para aplicaciones de precisión, ya que garantiza que la señal diferencial medida refleje con exactitud el fenómeno físico observado.

Además, la ganancia del INA333 puede ajustarse externamente con una resistencia R_G según la siguiente ecuación:

$$G = 1 + \frac{100 k\Omega}{R_G} \quad (4)$$

Donde G es la ganancia deseada. Para este diseño se requiere una ganancia de $G = 1000 V/V$, por lo que se calcula R_G como:

$$R_G = \frac{100 k\Omega}{G - 1} = \frac{100 000}{999} \approx 101\Omega \quad (5)$$

Esta ganancia es suficiente para la aplicación, permitiendo mantener una buena resolución y margen frente al

ruido, sin saturar las etapas posteriores.

En la Tabla 5 se comparan las principales características del INA333 con otras alternativas consideradas, como el AD601R1 y el MAX4465. Aunque el AD601R1 posee buena linealidad y control de ganancia logarítmica, su mayor consumo (5mA) y precio elevado lo descartan para una solución eficiente. El MAX4465, por su parte, tiene bajo consumo y buen CMRR, pero su voltaje de offset es mayor, y su ganancia es fija, lo cual limita la flexibilidad de diseño.

Referencia	V_{OFF}	CMRR	Ganancia	V_{ON}	Precio
INA333	25 μV	100dB	1 a 1000 v/v	1.3v - 5.5v	\$22.504
AD601R1	30 - 100 μV	100dB	1-10000	2.3V - 18V	\$63.635
MAX4465	5mV	126dB	1-1000	2.4V - 5.5V	\$5.817

Tab. 5: Comparativa de amplificadores de instrumentación para medición de corriente.

Para verificar el funcionamiento del amplificador de instrumentación, se realizó el montaje en Orcad y se llevaron a cabo las simulaciones correspondientes. Se realizaron dos pruebas. En la primera prueba, se habilitó la resistencia shunt de microamperios, y se observó que a la salida había un voltaje de 1V. La caída de tensión en la resistencia shunt fue de 1mV, y después de pasar por el amplificador, la señal de salida fue de 1V, tal como se muestra en la figura 5.

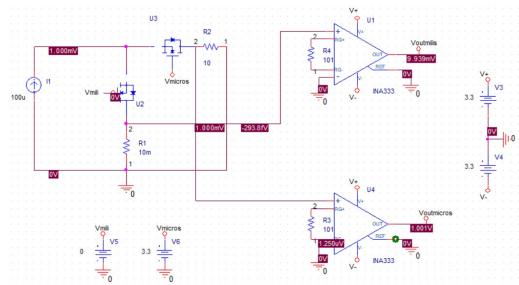


Fig. 5: Funcionamiento de INA333 amplificando micros.

En la segunda prueba, se habilitó la resistencia shunt de miliamperios y se observó la salida amplificada, que fue de 1V, se puede observar en la figura 6.

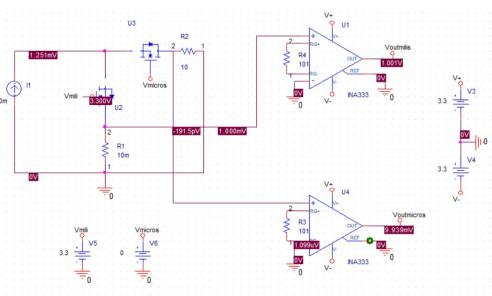


Fig. 6: Funcionamiento de INA333 amplificando milis.

5.4. Comparador de ventana

Para detectar cuando la corriente medida supera umbrales definidos (tanto en el modo normal como en el modo de sueño profundo), se implementó un comparador de ventana utilizando dos comparadores MAX9010 este diseño se realiza en base a una publicación [7]. La Figura 7 muestra el circuito diseñado.

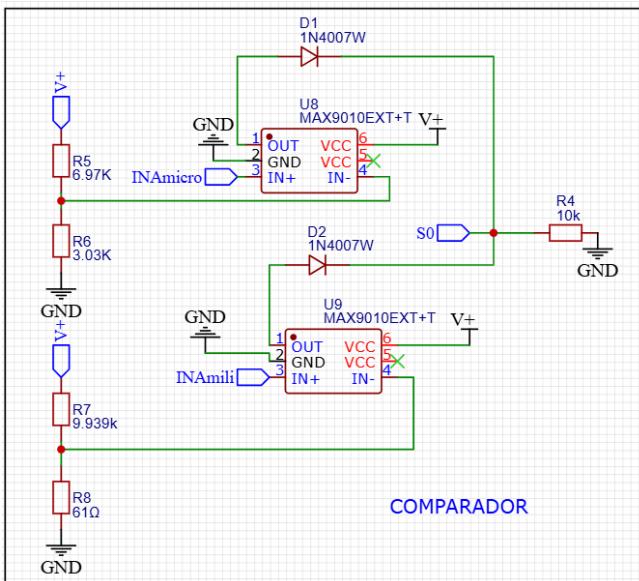


Fig. 7: Esquemático de comparador de ventana

En la Tabla 6 se presenta la comparación de algunos dispositivos evaluados para esta etapa.

Referencia	Offset de entrada	Tiempo de respuesta	Tensión de alimentación	Consumo de corriente	Precio
MAX9010	1 mV	40 ns	2.7 V – 5.5 V	120 μ A	\$14.46 ⁷
LM339	5 mV	1.3 μ s	2 V – 36 V	800 μ A	\$8000
TLV1702	0.5 mV	210 ns	2.2 V – 36 V	35 μ A	\$8.063

Tab. 6: Comparativa de comparadores de ventana evaluados.

Se seleccionó el **MAX9010** debido a su bajo offset de entrada (1 mV) y su rápido tiempo de respuesta (40 ns), características esenciales para asegurar la detección precisa de eventos de corriente tanto en el modo activo como en el modo de bajo consumo del sistema. Además, su bajo consumo de corriente y su compatibilidad con tensiones de alimentación de 3.3 V lo hacen ideal para aplicaciones alimentadas por batería.

5.4.1. Importancia del comparador de ventana

En este proyecto, cuyo objetivo es medir la corriente de operación normal y en sueño profundo de un microcontrolador, el **comparador de ventana** cumple una función crítica: *detectar de manera rápida y precisa los eventos de corriente* que indican cambios en el estado de funcionamiento del dispositivo.

La importancia del comparador se resume en los siguientes puntos:

- **Detección precisa de umbrales:** Permite identificar si la corriente medida se encuentra dentro de un rango aceptable (ventana) o si ha salido de los límites establecidos, lo cual podría indicar un cambio de modo (activo \leftrightarrow sueño profundo) o una falla en el sistema.
- **Respuesta rápida:** Gracias a su alta velocidad (40 ns de tiempo de respuesta), el comparador garantiza que los eventos de corriente sean detectados casi en tiempo real, sin retrasos que puedan comprometer la supervisión del sistema.
- **Bajo consumo:** Al estar integrado en un sistema alimentado por batería, el comparador seleccionado (MAX9010) contribuye a mantener el consumo de energía del circuito de medición en niveles mínimos.
- **Simplificación del procesamiento:** La salida digital del comparador facilita la interpretación de los eventos de corriente sin necesidad de procesamiento analógico adicional, permitiendo que el



microcontrolador tome decisiones rápidamente o active transmisiones inalámbricas según el estado detectado.

En conjunto, el comparador de ventana actúa como un **módulo de supervisión inteligente** que protege, optimiza y hace más eficiente la medición de corriente, aspecto fundamental para lograr un diseño confiable y de bajo consumo en aplicaciones electrónicas modernas.

5.5. Selección modo manual y automático

Para la selección del modo manual y automático, se utilizaron dos multiplexores 8, cada uno con señales de control y entradas diferentes, las cuales se explicarán más adelante en la sección de 'Funcionamiento general'.

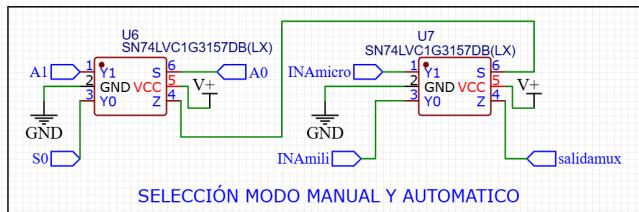


Fig. 8: Esquemático de multiplexor para selección modo manual y automático.

5.6. Filtro pasabajas para acondicionamiento de señal

En sistemas de adquisición de señales analógicas, como en este caso donde se mide la corriente de operación de un microcontrolador, es crucial garantizar la integridad de la señal antes de ser digitalizada por el convertidor ADC. Una de las principales fuentes de error en la conversión analógica-digital es el ruido de alta frecuencia, proveniente tanto de interferencias electromagnéticas del entorno como del propio sistema digital. Este ruido puede inducir fluctuaciones en la señal, degradando la precisión de la medición, especialmente en señales de baja amplitud como las asociadas a modos de bajo consumo.

Para mitigar este problema, se implementó un filtro Butterworth 9, cuya función es atenuar frecuencias superiores al rango de interés, permitiendo solo el paso de señales útiles hacia el ADC. Este tipo de filtro mejora la estabilidad de la lectura y reduce la probabilidad de aliasing.

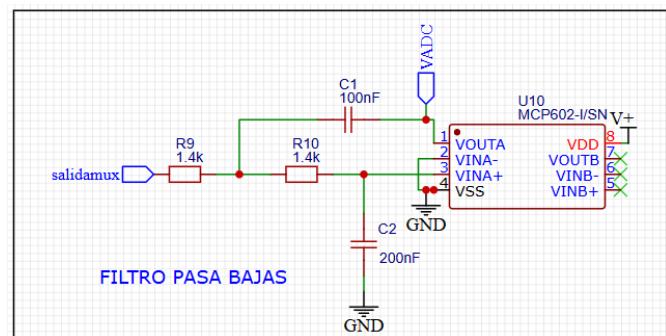


Fig. 9: Filtro pasabajas implementado con amplificador operacional MCP602.

El amplificador operacional seleccionado fue el MCP602, el cual ofrece características ideales para este tipo de aplicación: bajo consumo de corriente, entrada y salida rail-to-rail, buen ancho de banda (10 MHz) y una baja corriente de polarización de entrada. Además, tiene una buena tasa de rechazo al modo común (CMRR) y bajo offset, lo que garantiza precisión en la señal filtrada. Estas propiedades lo hacen adecuado para entornos de baja potencia y señales de bajo nivel, como los presentes en este sistema.

OpAmp	CMRR (dB)	Offset V (mV)	BW (MHz)	I (mA)	Precio (COP)
MCP602	85	0.4	10	1.0	\$3.980
TLV2372	100	0.5	3	1.7	\$8.800
LM358	70	2.0	1	0.7	\$4.235

Tab. 7: Comparativa de amplificadores operacionales para el filtro pasabajas.

De acuerdo con la comparativa anterior 7, el MCP602 ofrece un balance adecuado entre bajo offset, excelente CMRR y un ancho de banda suficientemente alto para mantener la fidelidad de la señal dentro del rango de interés, lo que lo convierte en una opción idónea para el diseño del filtro pasabajas en este sistema.

5.7. Muestreo ADC

La sección de muestreo utiliza el convertidor ADC ADS1115IDGST 10, un conversor analógico-digital de 16 bits de resolución, que ofrece una alta precisión en la medición de señales analógicas de corriente. El ADS1115 opera mediante comunicación I2C, lo que simplifica el diseño del circuito y reduce la cantidad de pines requeridos para la transmisión de datos.

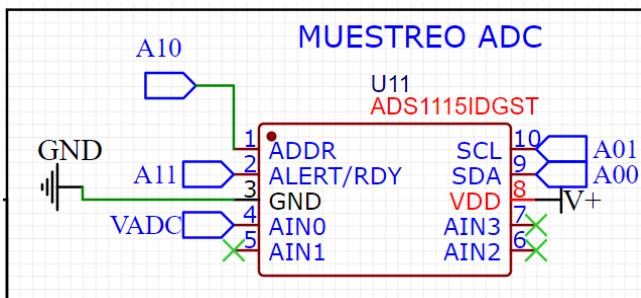


Fig. 10: Esquemático de muestreo ADC.

Este ADC tiene entradas diferenciales y un sistema de comparación interna mediante alertas configurables, permitiendo realizar mediciones estables tanto en modos manual como automático. Gracias a su alta resolución, es capaz de detectar pequeñas variaciones de corriente que serían ignoradas por conversores de menor resolución.

Se presenta a continuación una tabla 8 comparativa entre diferentes ADCs similares:

Tab. 8: Comparación de conversores ADC

ADC	Resolución	Interfaz	Entradas	Consumo
ADS1115	16 bits	I2C	4 canales (diferencial/single-ended)	Bajo
ADS1015	12 bits	I2C	4 canales (diferencial/single-ended)	Bajo
MCP3424	18 bits	I2C	4 canales (diferencial)	Medio
ADS1256	24 bits	SPI	8 canales	Alto

El ADS1115 ofrece el balance ideal entre resolución, consumo energético y facilidad de implementación, haciéndolo ideal para aplicaciones donde la precisión es crítica y el consumo debe mantenerse reducido.

5.8. ESP32

El microcontrolador empleado en el proyecto es el **ESP32-WROVER-IE (8MB)**¹¹, el cual proporciona una solución robusta para sistemas embebidos que requieren procesamiento, conectividad y bajo consumo de energía. El ESP32 cuenta con un amplio rango de funcionalidades que permiten la implementación eficiente de las etapas de adquisición, control y comunicación inalámbrica.

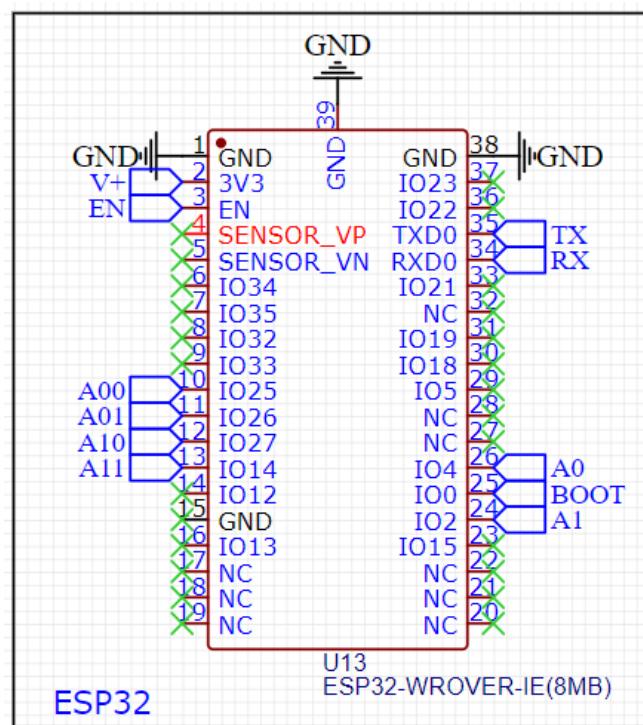


Fig. 11: Esquemático de conexiones en la ESP32.

Entradas utilizadas en el ESP32

En este proyecto se utilizó el microcontrolador ESP32-WROVER-IE (8MB), empleando exclusivamente sus pines GPIO para la lectura de señales y el control del sistema. Los pines seleccionados fueron:

- **GPIO0, GPIO2, GPIO4, GPIO14, GPIO27, GPIO26, GPIO25:** utilizados para señales de selección y control de los multiplexores.
- **Comunicación UART:** Los pines TX y RX se emplean para la comunicación serie, facilitando el envío de datos hacia dispositivos externos o para tareas de depuración (debug).
- **Alimentación y Tierra:** Se utilizan los pines GND para referencia de tierra y 3V3 para alimentar algunos circuitos auxiliares.

El uso del ESP32 en este proyecto garantiza no solo la adecuada adquisición y procesamiento de datos, sino también la posibilidad de expansión futura mediante sus capacidades de comunicación inalámbrica (Wi-Fi y Bluetooth), optimizando el desempeño del sistema tanto en modo manual como automático.



6. Selección de batería

Debido a la necesidad de que el dispositivo sea portátil, se decidió alimentar el sistema mediante una batería recargable. Para seleccionar la batería más adecuada, se evaluaron aspectos fundamentales como la tensión nominal, la capacidad energética, el precio y las dimensiones físicas.

A continuación, en la Tabla 9, se comparan diferentes tipos de baterías consideradas durante el proceso de selección:

Tab. 9: Comparativa de diferentes tipos de baterías.

Referencia	Tensión nominal (V)	Capacidad típica (mAh)	Dimensiones típicas (mm)	Precio aproximado
Li-ion 18650	3.7	2000–3500	Ø18 x 65	\$20,000 – \$35,000
LiPo (celda estándar)	3.7	600 – 6000	Variable	\$25,000 – \$60,000
Plomo-ácido (Gel 6V)	6	4000–12000	70x47x101	\$35,000 – \$80,000
LiFePO ₄ 26650	3.2	2500–3500	Ø26 x 65	\$30,000 – \$55,000

Con base en la información anterior y las necesidades específicas del proyecto, se seleccionó una batería de tipo **Li-ion 18650**, la cual proporciona una capacidad de **2000 a 3500 mAh**, una tensión nominal de **3.7 V** y dimensiones de **Ø18 x 65 mm**. Esta batería ofrece un balance adecuado entre tamaño, peso y capacidad de energía para garantizar una operación confiable del sistema. El precio aproximado de la batería seleccionada es de **\$20,000 a \$35,000**.

6.1. Regulador de tensión DC-DC

Al utilizar una batería de ion-litio como fuente de alimentación primaria, para lograr una operación estable del circuito a un voltaje constante, se implementa un módulo de carga basado en el **TP4056**, junto con un regulador de voltaje **TLV75709PDBVR** que proporciona una salida de 3.3 V.

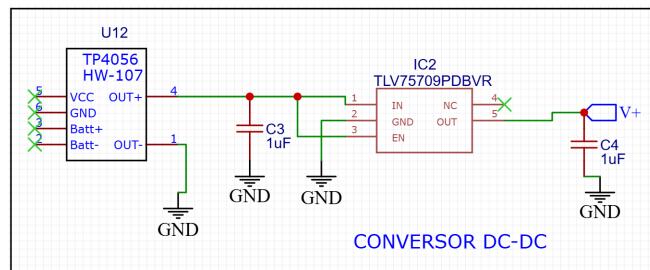


Fig. 12: Esquemático para conversor DC-DC.

El **TP4056** es un cargador lineal completo para baterías de ion-litio de una sola celda. Además de realizar la carga de la batería, incorpora protección contra sobrecarga y sobredescarga, lo cual es fundamental para garantizar la seguridad y prolongar la vida útil de la batería.

Posteriormente, la salida pasa a través de un regulador **TLV75709PDBVR**, que se encarga de estabilizar la tensión de salida en 3.3 V, independientemente de las fluctuaciones de la batería, asegurando así un suministro de voltaje confiable para los circuitos sensibles.

La siguiente tabla 10 muestra una comparación entre el **TP4056** y otros componentes similares que podrían haberse utilizado:

Referencia	Corriente	Voltaje	Protecciones	Precio
TP4056	1 A	4.2 V	Sobrecarga, Sobredescarga	\$5.000
MCP73831	500 mA	4.2 V	No incluye protección	\$17.900
BQ24072	1.5 A	4.2 V	Completa (incluye térmica)	\$4500
MAX1811	500 mA	4.1/4.2 V	Protección limitada	\$25.430

Tab. 10: Comparativa de cargadores de batería de ion-litio.

Se eligió el **TP4056** debido a su facilidad de implementación, bajo costo y porque incluye protecciones integradas de sobrecarga y sobredescarga, lo que simplifica el diseño del circuito de alimentación. A pesar de que otros componentes como el **BQ24072** ofrecen mayor capacidad de carga y protecciones térmicas, su precio y complejidad no resultaban justificados para los requerimientos de este proyecto.

Referencia	Voltaje de Salida	Corriente Máx	Quiescent Current	Precio
TLV75709PDBVR	0.9 V	500 mA	6.8 μA	\$2500
AMS1117-3.3	3.3 V	800 mA	5 mA	\$10.000
LP2985-3.3	3.3 V	150 mA	50 μA	\$10.000

Tab. 11: Comparativa de reguladores de voltaje DC-DC.

En la tabla 11, el regulador **TLV75709PDBVR** fue elegido



por su alta eficiencia en aplicaciones de bajo consumo, ofreciendo una corriente en reposo (quiescent current) de tan solo $6.8 \mu\text{A}$, lo cual permite extender la duración de la batería significativamente. Además, proporciona una salida de voltaje precisa de 0.9 V , adecuada para etapas analógicas sensibles o para alimentar referencias internas de ciertos microcontroladores. Su diseño es estable con capacitores cerámicos de baja ESR, y cumple con los requisitos de ruido y respuesta dinámica necesarios para este proyecto.

6.2. Inversor DC-DC

Para generar un voltaje negativo a partir de una entrada positiva, se utilizó el circuito integrado **MAX660ESA**, configurado como inversor de tensión. Este componente es ideal para aplicaciones de bajo consumo debido a su eficiencia, simplicidad de conexión y mínimo número de componentes externos (solo requiere capacitores de $1 \mu\text{F}$ para operar).¹³

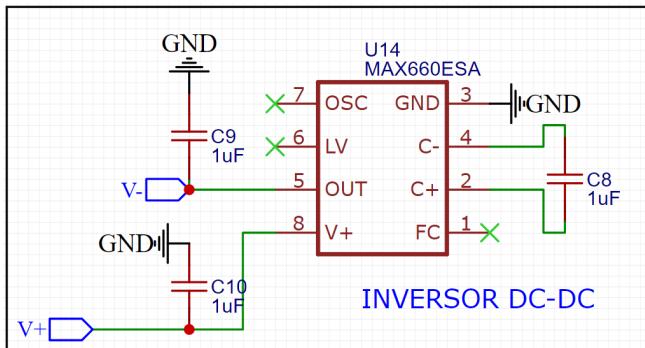


Fig. 13: Esquemático de inversor de tensión

El MAX660 puede entregar una corriente de hasta 100 mA , suficiente para la demanda del circuito. Su frecuencia interna de operación reduce la necesidad de filtrado adicional, mejorando la estabilidad del sistema.

A continuación se presenta una tabla 12 comparativa entre el MAX660 y otros inversores DC-DC comúnmente utilizados:

Componente	Voltaje de entrada	Corriente de salida	Precio
MAX660ESA	1.5V - 5.5V	hasta 100 mA	\$63.890
ICL7660	1.5V - 10V	hasta 20 mA	\$ 21.484
LT1054	3V - 15V	hasta 100 mA	M\$16.279
TPS60403	1.8V - 5.5V	hasta 60 mA	\$9.870

Tab. 12: Comparación entre inversores DC-DC.

Como puede observarse, el MAX660 ofrece un buen balance entre corriente de salida, rango de operación y sim-

plicidad, lo cual lo hace particularmente adecuado para este diseño.

6.3. PCB

Se procedió a crear el esquemático general del sistema 14, en el cual se integran todas las etapas desarrolladas en el proyecto, tales como el sensor de corriente, el comparador de ventana, el multiplexor analógico, el inversor de voltaje, el módulo ESP32 y el sistema de carga y regulación de potencia.

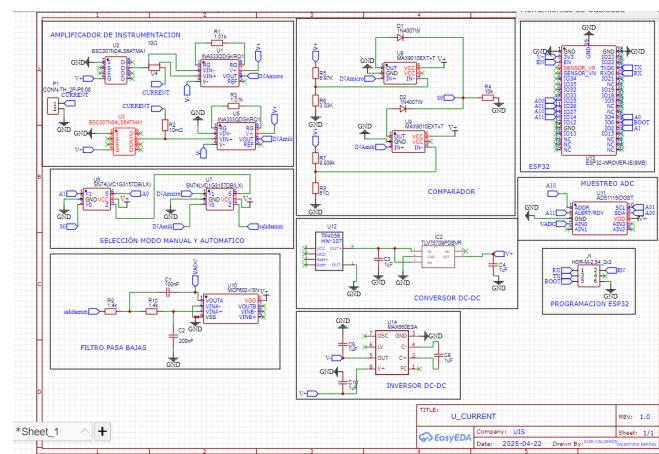


Fig. 14: Esquemático del diseño general, agrupando todos los subsistemas.

Una vez finalizado el esquemático, se realizó el proceso de ruteo y organización de los componentes sobre la placa. Se optó por un diseño de 4 capas, ya que esta configuración permite una mejor distribución de señales y potencia.

La estructura de las capas se distribuyó de la siguiente forma:

- Capa 1 (Top Layer): ruteo de señales principales.
- Capa 2 (Plano de Tierra): proporciona retorno de baja impedancia y reduce ruido.
- Capa 3 (Plano de Alimentación): distribuye las líneas de VCC con mínima caída de tensión.
- Capa 4 (Bottom Layer): ruteo de señales secundarias.

Gracias a esta organización, se logró un diseño que garantiza el buen desempeño del sistema, especialmente en las etapas sensibles como el ADC y los sensores. El esquemático y el diseño de la PCB fueron desarrollados en EasyEDA. En la Figura 15 se muestra la vista general



en 2D del diseño, que permite apreciar la distribución de los componentes. La Figura 16 presenta la capa superior de la PCB, donde se ubican la mayoría de las señales críticas. Por su parte, la Figura 17 muestra la capa inferior, utilizada principalmente para enrutar señales auxiliares. Finalmente, en la Figura 18 se observan las distintas capas internas que tiene el sistema.

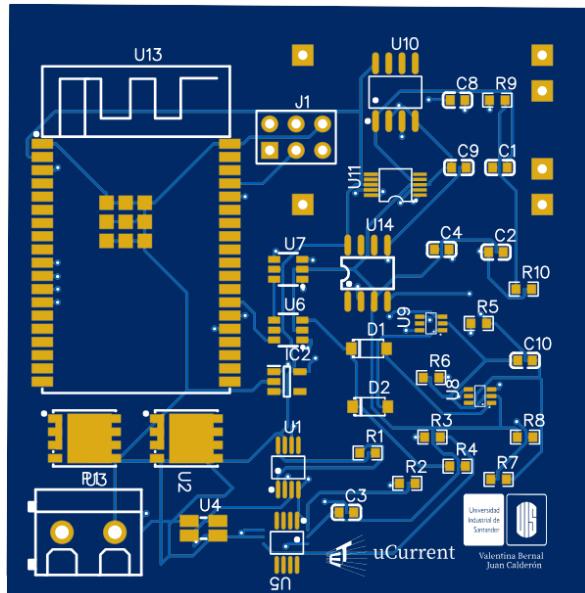


Fig. 15: Vista en 2D de la PCB

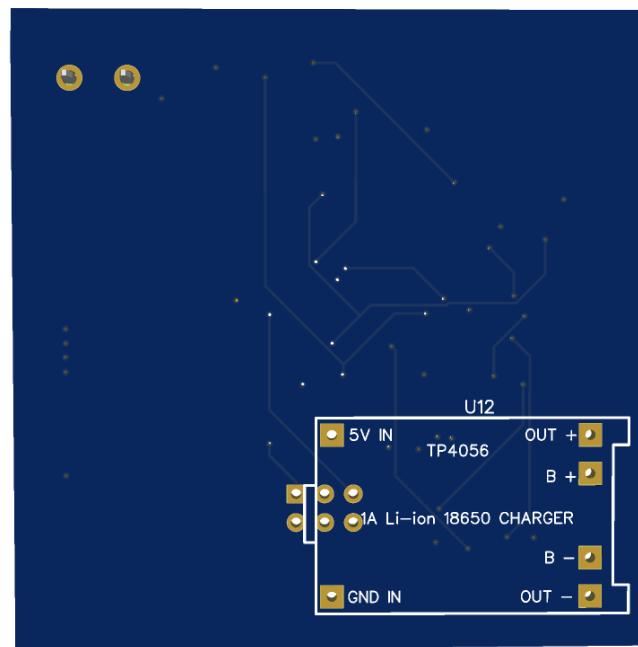


Fig. 17: Vista capa inferior de la PCB

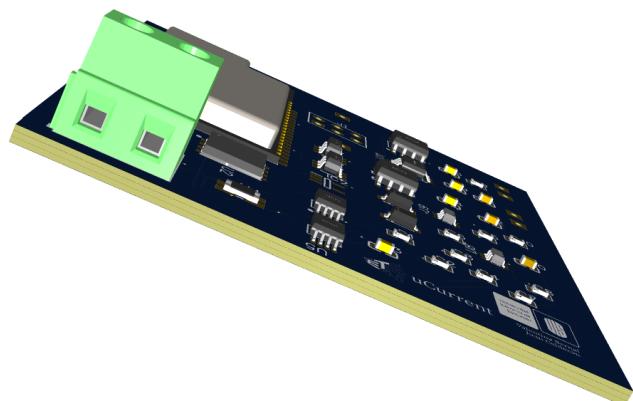


Fig. 18: Vista capas PCB

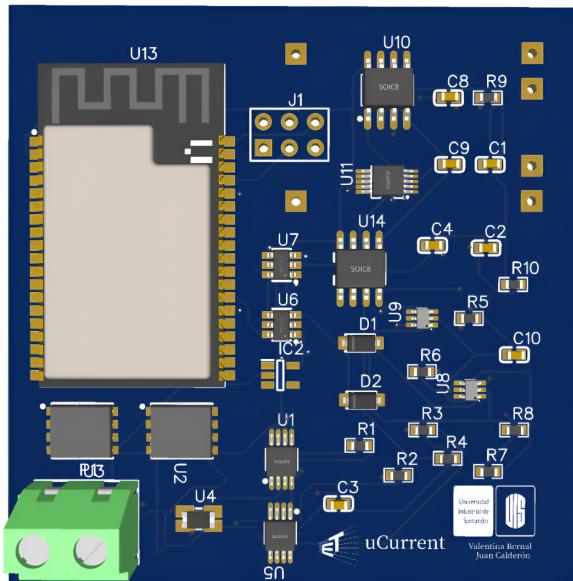


Fig. 16: Vista capa inferior de la PCB

6.4. Aplicación

La aplicación fue diseñada utilizando la plataforma MIT App Inventor [8], que permite el diseño de aplicaciones móviles de manera fácil e intuitiva. Esta plataforma facilita la creación de bloques de conexión con otros dispositivos, así como la generación de diferentes páginas y la visualización de datos. Para el diseño de la aplicación, se crearon tres páginas. El funcionamiento de la app puede observarse en un video disponible en el repositorio, en el apartado 'aplicación - video funcionalidad'.



La pagina 1 (figura 19), tiene un titulo con el nombre de la app ademas de 3 botones, uno para la conexión bluetooth ya que para recibir los datos provenientes de la ESP32 se hara por bluetooth, un botón donde se selecciona el modo manual y otro donde se selecciona el modo automatico.

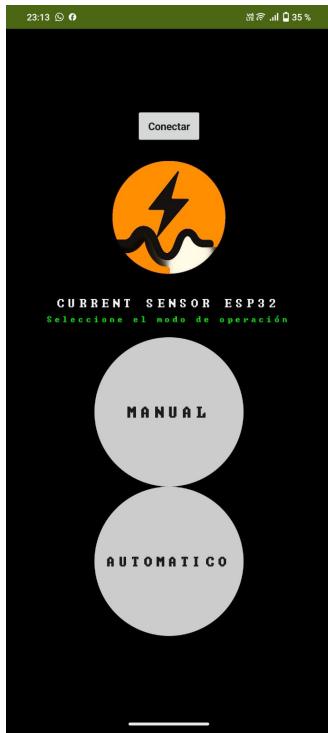


Fig. 19: Página 1 de la aplicación donde se permite seleccionar entre modo manual o automático.

La página 2, observada en la figura 20, se abre al seleccionar el modo manual. En esta página, se puede elegir el rango de la corriente, es decir, si se mide en microamperios o miliamperios. Para ello, se disponen de dos botones, cuyo objetivo es cambiar el modo de medición dentro del sensor de corriente. Al seleccionar 'microamperios', los datos visualizados en la aplicación corresponden a la resistencia shunt diseñada para esa medición. Por otro lado, al seleccionar 'miliamperios', el valor mostrado corresponde a la resistencia shunt diseñada para medir miliamperios.

Es importante señalar que, al cambiar de página, es necesario conectar el Bluetooth de la ESP32, ya que MIT App Inventor no permite mantener una conexión fija entre múltiples páginas. Por esta razón, en esta página también se incluye un botón para realizar la conexión con la ESP32, cuyo nombre es 'ESP32 Sensor'. Cuando aún no se ha seleccionado ningún botón, pero la

conexión ya está establecida, la medición por defecto se realiza en microamperios hasta que se elija el valor correspondiente.

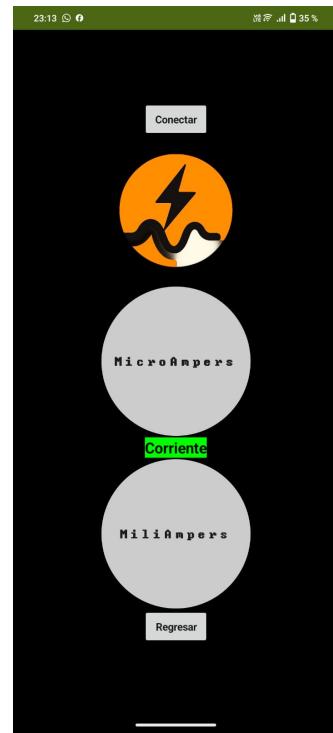


Fig. 20: Página 2 de la aplicación, correspondiente a selección MANUAL.

Por último, la página 3 (figura 21) corresponde a la pantalla que aparece cuando se selecciona el modo automático en la página 1. En esta página, como se mencionó anteriormente, es necesario conectar el Bluetooth de la ESP32 para establecer la conexión y recibir los datos. En esta página, solo se encuentran los botones de 'conectar' y 'regresar', ya que los datos se visualizan de manera automática.

La aplicación está programada para mostrar las unidades de corriente dentro del autorango. El funcionamiento de cada una de las páginas se puede observar en el video del repositorio, donde se generan datos aleatorios mediante la ESP32, utilizando el código mostrado en la figura 22, que también se encuentra disponible en el repositorio. Se activa el Bluetooth y la aplicación comienza a recibir y visualizar los datos. Cabe resaltar que cada botón dentro de la aplicación envía una señal de control a la ESP32, con el objetivo de controlar los multiplexores para el cambio automático entre señales. Este funcionamiento se explicará más adelante en otra sesión.

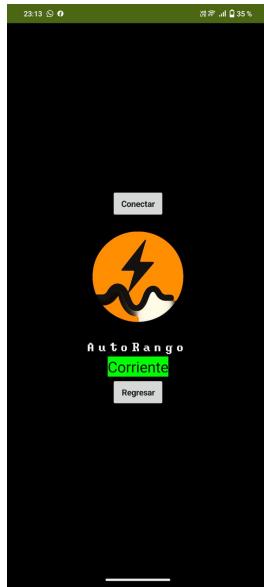


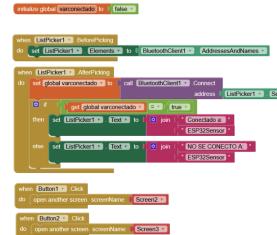
Fig. 21: Página 3 de la aplicación, correspondiente a selección AUTOMÁTICO.

```
bluetoothESP.ino
1 #include "BluetoothSerial.h"
2
3 BluetoothSerial SerialBT;
4
5 bool activo = true;
6 String modo = "MILL"; // por defecto
7
8 void setup() {
9   Serial.begin(115200);
10  Serial.begin("ESP32sensor");
11  Serial.println("Bluetooth iniciado como ESP32sensor");
12 }
13
14 void loop() {
15   // Leer desde Bluetooth
16   if (SerialBT.available()) {
17     char comando = SerialBT.read();
18     procesarcomando(comando, "Bluetooth");
19   }
20
21   // Leer desde el Monitor Serial (IDE)
22   if (Serial.available()) {
23     char comando = Serial.read();
24     procesarcomando(comando, "Serial");
25   }
26
27   // Imprimir datos al serial
28   if (activo) {
29     int corriente = 0;
30     int unida = 0;
31     String valida = "Corriente (" + modo + "): ";
32     String linea = valida + random(0, 100) + "\n";
33     Serial.println(valida);
34     Serial.println(linea);
35     delay(2000);
36   }
37 }
38
39 void procesarcomando(char comando, String origen) {
40   if (comando == 'g') {
41     modo = "MILL";
42     Serial.print(origen + ": Modo MILL seleccionado");
43     Serial.print(origen + ": Modo MICRO seleccionado");
44   } else if (comando == 'l') {
45     modo = "MICRO";
46     Serial.print(origen + ": Modo MILL seleccionado");
47     Serial.print(origen + ": Modo MICRO seleccionado");
48   } else if (comando == 'x') {
49     modo = "DETENIDA";
50     Serial.print(origen + ": transmisión detenida");
51     Serial.print(origen + ": transmisión detenida");
52   } else if (modo == "S") {
53     activo = true;
54     Serial.println(origen + ": transmisión activada");
55     Serial.println(origen + ": transmisión activada");
56   }
57 }
```

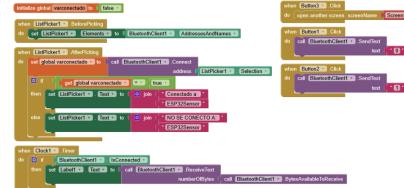
Fig. 22: Código implementado en la ESP32 para generar datos aleatorios de corriente.

En la figura 23 se muestra una parte de la programación de la aplicación, en la cual se visualiza la estructura de cada una de las páginas y los bloques que conforman su funcionamiento.

SCREEN1



SCREEN 2



SCREEN 3

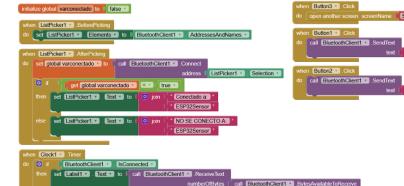


Fig. 23: Bloques de programación que conforman la aplicación en MIT inventor.

7. Funcionamiento General

En sesiones anteriores se presentaron los componentes utilizados en el diseño del sensor de corriente. En esta sección se abordará el funcionamiento de la interacción entre la aplicación y el sensor, así como el proceso de cambio automático. En la figura 24 se muestra el diagrama de bloques correspondiente tanto a la aplicación como al sensor de corriente.

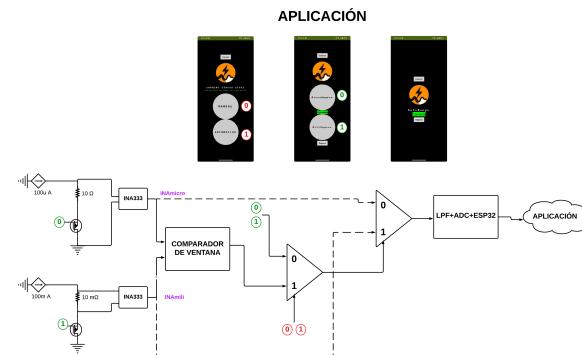


Fig. 24: Diagrama de bloques correspondiente a las conexiones entre el aplicativo y el sensor de corriente.



7.1. Aplicación y sensor de corriente

La aplicación fue dividida en tres páginas que se pueden observar en el diagrama de bloques presentado anteriormente:

- Página 1: Permite el cambio entre el modo **Manual (0)** y **Automático (1)**.
- Página 2: Correspondiente a la selección de modo **Manual (0)** y en donde se encuentran dos botones para seleccionar las unidades de la señal **MicroAmpers (0)** y **Miliampers (1)**.
- Página 3: Correspondiente a la selección de modo **Automático (1)** y se encuentra una casilla donde se observa el valor de la corriente en miliampers o microampers dependiendo del estado en que se encuentra la ESP32.

Algunos botones tienen asignado un bit y un color característico, con el objetivo de visualizar el funcionamiento entre la aplicación y el auto rango del sensor de corriente. Cuando se presiona un botón en la aplicación, este envía un bit a la ESP32, que es la encargada de controlar la señal de control del (*MUX1*) o de la entrada de este (*MUX1* entrada 0). Dado que se trata de señales digitales, cada una tiene un tiempo de respuesta, lo cual podría afectar el funcionamiento del circuito ante cualquier anomalía. Sin embargo, en este caso, dichas anomalías están controladas por el comparador de ventana, lo cual será explicado más adelante.

7.2. Comparador de Ventana

Los MOSFETs que permiten activar o desactivar las resistencias shunt permanecen activos en todo momento, lo que permite una caída de tensión en la resistencia y garantiza que el amplificador de instrumentación (INA333) entregue la señal al comparador de ventana de manera continua. El funcionamiento del comparador de ventana se puede resumir de la siguiente manera:

$$INAmicro > INAmili \Rightarrow 0 \quad (6)$$

$$INAmicro < INAmili \Rightarrow 1 \quad (7)$$

El comparador de ventana recibe dos señales provenientes de los amplificadores de instrumentación y opera según las ecuaciones (6) y (7). Cuando se cumple la ecuación (6), se envía un 0, y cuando se cumple la ecuación (7), se envía un 1. Estas señales son bits que se utilizan como señal de control para el siguiente multiplexor (*MUX2*).

7.3. Autorango y modo manual

La selección de estos modos depende, en primer lugar, de la opción elegida en la primera página de la aplicación. Si se selecciona el modo manual, se envía un 0, y si se selecciona el modo automático, se envía un 1, el cual ingresa como señal de control al *MUX1*. Si se selecciona el modo automático, el comparador de ventana comienza a controlar el *MUX2* y a permitir el paso de las señales del INA333.

Por otro lado, si se selecciona el modo manual, se abre la página 2, donde se eligen las unidades de corriente, es decir el valor de la resistencia shunt correspondiente, lo que hace que la señal de control del *MUX2* dependa de la selección realizada en esa página.

8. Precios totales

En la figura 25 se presenta una tabla con cada una de las referencias utilizadas en el diseño y su respectivo precio. Estos valores no incluyen costos de envío, ya que fueron consultados en distintas fuentes, principalmente en Mouser Electronics [9].

Nombre	ID	Footprint	Cantidad	Precio (COP)
100nF	C1	C0603	1	\$ 654,00
200nF	C2	C0603	1	\$ 2,400,00
1uF	C3, C4, C8, C9, C10	C0603	5	\$ 930,00
1N4007W	D1, D2	SOD-123_L2.8-W1.8-L33.7-RD	2	\$ 2,400,00
TLV75709PDBVR	IC2	SOT95P280X145-5N	1	\$ 8,000,00
Header 2x3	J1	HDR-M_2.54_2X3	1	\$ 860,00
Conector 2P	P1	CONN-TH_2P-P5,08	1	\$ 1,000,00
1.01kΩ	R1, R3	R0603	2	\$ 1,960,00
10mΩ	R2	R0603	1	\$ 4,950,00
10kΩ	R4	R0603	1	\$ 180,00
6.97kΩ	R5	R0603	1	\$ 150,00
3.03kΩ	R6	R0603	1	\$ 120,00
9.939kΩ	R7	R0603	1	\$ 120,00
61Ω	R8	R0603	1	\$ 220,00
1.4kΩ	R9, R10	R0603	2	\$ 240,00
INA333CDGKRQ1	U1, U5	VSSOP-8_L3.0-W3.0-P0.65-L55.0-BL	2	\$ 45,008,00
BSC007N041LS6ATMA1	U2, U3	PG-TDS0N-8-FL_L5.0-W6.0-P1.27-L56.2-BL	2	\$ 5,000,00
100	U4	RES-SMD_4P_L3.2-W1.6-BL_1206	1	\$ 714,00
SN74LVC1G3157DB(LX)	U6, U7	SOT-23-6_L2.9-W1.6-P0.95-L52.8-BR	2	\$ 1,500,00
MAX9010EXT-T	U8, U9	SC-70-6_L2.0-W1.3-P0.65-L52.1-BL	2	\$ 28,934,00
MCP602-VSN	U10	SOIC-8_L4.9-W3.9-P1.27-L56.0-BL	1	\$ 3,980,00
ADS1115IDGST	U11	VSSOP-10_L3.0-W3.0-P0.50-L54.9-BL	1	\$ 1,308,00
HW-107 TP0456_NICKS	U12	HW-107_TP0456_NICKS	1	\$ 56,000,00
ESP32-WROVER-IE (8MB)	U13	WIFI-SMD_ESP32-WROVER-E	1	\$ 15,258,00
MAX6606SA	U14	SOIC-8_L5.0-W4.0-P1.27-L56.0-BL	1	\$ 22,120,00
TOTAL				\$ 204,006,00

Fig. 25: Tabla con precios del diseño.

El precio total en componentes es de \$204,006 sin incluir el valor de impresión de la PCB y sin contar envíos.

9. Conclusiones

- La selección de los componentes para el diseño del circuito se realizó de manera cuidadosa, siguiendo diversos parámetros de diseño. Esto se debió a que la medición de corrientes pequeñas requiere una atención especial a factores como el voltaje



de offset de los componentes antes de la amplificación, ya que cada componente puede generar voltajes que afecten las mediciones. El cumplimiento riguroso de los parámetros de diseño garantiza que los valores obtenidos en la salida correspondan al valor real de la corriente medida.

- Los MOSFETs tienen una resistencia interna que puede afectar la medición en las resistencias shunt. Por esta razón, se utilizó una resistencia de cuatro terminales para las resistencias de menor valor, ya que esta configuración permite realizar la medición de forma directa, sin que la resistencia interna del MOSFET interfiera.
- En el diseño de la PCB, se consideraron parámetros básicos como un diseño práctico y sencillo. Sin embargo, este apartado puede mejorarse en el futuro, reduciendo su tamaño y el número de capas, lo que podría optimizar tanto el espacio como la eficiencia.
- La aplicación presenta una limitación relacionada con la conexión Bluetooth en cada una de las páginas. Esto se debe a que MIT App Inventor no permite establecer una conexión fija entre varias páginas. Para mejorar la experiencia del usuario, se podría considerar el manejo de una única página donde se muestre toda la información. Esta opción mejoraría la conexión, aunque podría afectar la presentación visual. Por lo tanto, este aspecto queda abierto a futuras mejoras, buscando una solución que permita una conexión fija o reduciendo el número de páginas.
- Dado que se implementó la comunicación mediante Bluetooth, el usuario debe estar cerca de la ESP32 para poder acceder a los datos que esta envía. Este método fue elegido por su simplicidad, ya que no requiere el uso de una base de datos para almacenar los datos. La razón principal es que los usuarios necesitan la medición solo en el momento, y no para un procesamiento futuro de datos. Sin embargo, si se desea implementar un procesamiento de datos a futuro, sería necesario diseñar una

base de datos y cambiar la comunicación a través de WiFi.

Referencias

- [1] “Repositorio en github.” [Online]. Available: <https://github.com/jumacal/ProyectoDise-o>
- [2] “Esp32 series datasheet version 4.8.” [Online]. Available: <https://acortar.link/WpM9Cc>
- [3] “Medición de corriente eléctrica: métodos y herramientas para una medición precisa.” [Online]. Available: <https://enik.es/medicion-de-corriente-electrica-metodos-y-herramientas-para-un>
- [4] G. L. Álvarez Rosado, K. A. Martínez-Hernández, M. A. Camarillo-Ramos, V. Quintero-Rosas, A. Díaz-Ramírez, and R. López-Avitia, “Energy consumption of an internet of things development board,” *Revista de Ciencias Tecnológicas*, vol. 5, no. 4, p. e234, 2022. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2594-19252022000400106&lng=es&nrm=iso
- [5] “Consumo de energía en el esp32.” [Online]. Available: <https://www.luisllamas.es/esp32-consumo-energia>
- [6] M. Electronics, “Guía sobre los modos de sueño del esp32 y su consumo de energía,” 2024. [Online]. Available: <https://cursos.mcilelectronics.cl/2024/08/05/guia-sobre-los-modos-de-sueno-del-esp32-y-su-consumo-de-ene>
- [7] Scribd, “Comparadores de ventana,” 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/presentation/486373772/Comparadores-de-ventana>
- [8] M. A. Inventor, “Mit app inventor,” 2025. [Online]. Available: <https://appinventor.mit.edu/>
- [9] Mouser Electronics, “Distribuidor de componentes electrónicos,” 2024. [Online]. Available: <https://co.mouser.com>