

Proyecto final: Diseño de un Medidor de Corriente para el Microcontrolador ESP32 con Cambio de Rango Automático

Joseph Trigos - 2201832

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

Noviembre 25, 2024

Resumen

En este proyecto se diseña un circuito electrónico capaz de medir la corriente consumida por el procesador del microcontrolador ESP32 (Xtensa dual-core de 32 bits LX7) tanto en *modo activo* como en *modo Deep Sleep*. Se utiliza el diseño creado por David L. Jones donde hace uso de dos amplificadores operacionales de precisión para garantizar la exactitud en la medición. Para realizar el cambio en la escala de medición se implementa un control automático, mejorando la precisión y posibles sobrecargas en los componentes internos.

1. Introducción

En la actualidad, la innovación en microtecnologías ha avanzado de la mano con los esfuerzos por preservar el medio ambiente. Ambos campos se influyen mutuamente: el desarrollo de microtecnologías depende, en gran medida, de la disponibilidad de recursos naturales como el silicio o litio, mientras que la preservación del entorno natural se ve favorecida por la creación de tecnologías avanzadas que promueven la eficiencia energética y el uso de fuentes renovables. Este vínculo destaca la importancia de diseñar e implementar soluciones tecnológicas que no solo sean eficientes, sino que también contribuyan al bienestar del planeta.

Una de las tecnologías que ha tenido un impacto significativo en la durabilidad y eficiencia energética de los dispositivos inteligentes es el modo de *Deep Sleep*, contribuyendo directamente a la preservación y vida útil de las baterías. En este contexto, el microcontrolador ESP32, uno de los más populares en el mercado para la implementación de proyectos educativos o más avanzados, incorpora esta funcionalidad, lo que permite desarrollar proyectos con un enfoque en la optimización del consumo energético. Al utilizar el modo de sueño profundo en la ESP32, es posible extender considerablemente la duración de los dispositivos, lo que resulta en una mayor eficiencia operativa y ahorro de energía, factores clave

en la implementación de soluciones tecnológicas sostenibles.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Rediseñar un adaptador para el multímetro UT-39C capaz de medir corrientes pequeñas basándose en modelos disponible en el mercado.

2.2. Objetivo específico

- Adquirir conocimientos sobre factores importantes en la selección de componentes electrónicos para realizar un diseño eficiente de sistemas electrónicos.
- Implementar un cambio de escala automático en el adaptador para la medición de corrientes pequeñas.
- Implementar un sistema de recarga en la batería del adaptador para la medición de corrientes pequeñas.
- Diseñar un dispositivo calidad-precio competitivo en el mercado.

3. Marco Teórico

En esta sección se exponen conceptos teóricos para la comprensión total de todo el artículo, conceptos como la medición de corriente, la incertidumbre asociada a una medición, *burgen voltage*. Se exponen diferentes opciones disponibles en el mercado y el funcionamiento de algunos componentes presentes en el diseño.

3.1. Medidores de corriente pequeñas en el mercado internacional

- El **multímetro UT-39C** es un instrumento que permite medir diversas variables electrónicas, incluyendo corrientes en rangos de 2 mA a 20 A en corriente directa (DC) y alterna (AC), con una incertidumbre de ± 1.0008 en DC y ± 3.001 en AC. Sin embargo, para medir corriente, es necesario abrir el circuito y conectar el multímetro en serie, lo que puede introducir errores, especialmente al medir pequeñas corrientes. La selección manual en el rango de medición puede aumentar la incertidumbre en corrientes muy bajas. Por otro lado, la **pinza amperimétrica digital**, diseñada para medir corrientes sin contacto directo, detecta el campo magnético generado al pasar corriente por un conductor. Su rango de medición inicia en 60 mA a 600 A en AC y DC, con una incertidumbre de ± 5.002 , la hace ideal para corrientes grandes, pero su precisión disminuye significativamente en corrientes pequeñas, lo que la convierte en una opción poco óptima para mediciones de baja corriente. Ambos instrumentos, a pesar de ser útiles para ciertas aplicaciones, no ofrecen la precisión ni la sensibilidad necesarias para medir corrientes extremadamente bajas, como las que se encuentran en el modo sueño profundo de dispositivos como el ESP32. [1] [2]



Fig. 1: Multímetro UT29C y pinza amperimétrica UT204+.

- El **uCurrent** fue diseñado por David L. Jones para dar solución a la medición de corrientes pequeñas con gran precisión. Uno de sus objetivos principales es minimizar el voltaje de carga. Fue diseñado como un adaptador para usarlo en conjunto con multímetros. Cuenta con un rango de medición de corriente que va de $\pm 0 - 1250\text{ nA}$ con burden voltage (voltaje que se obtiene al medir una corriente con un instrumento de medición, la corriente pasa por una resistencia interna muy pequeña) de 10 uV/nA y precisión de $\pm 0.5\%$ a $\pm 0 - 1250\text{ mA}$ con burden voltage de 20 uV/nA y precisión de $\pm 0.1\%$. Esta configuración cuenta con dos amplifica-

dores de precisión, el opam U1 (Fig.2) se encarga de amplificar el voltaje de las resistencias de derivación; su ganancia está asociada a las resistencias conectadas en sus terminales de entrada. El opam U2 (Fig.2) se utiliza para generar una tierra virtual, esto proporciona un punto de referencia estable. [3]

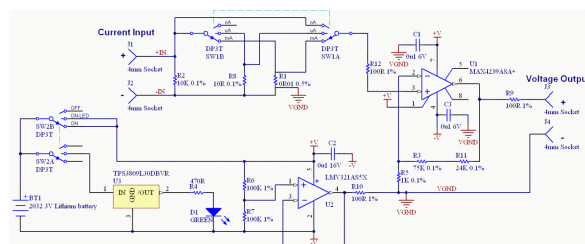


Fig. 2: The uCurrent circuit by David L. Jones

- El **Current Ranger** fue diseñado por Félix Russo, es considerado una extensión del uCurrent. Su función es ser un adaptador al multímetro que permite medir corrientes de escala pequeña. Esta variación cuenta con tres amplificadores de precisión, los primeros dos opams (U1 y U4) forman parte de dos etapas de amplificación en el circuito. Las dos etapas amplifican la señal de voltaje en la resistencia de derivación a un nivel accesible del multímetro. La ganancia en cada etapa está dada por las resistencias de ganancia. [4]

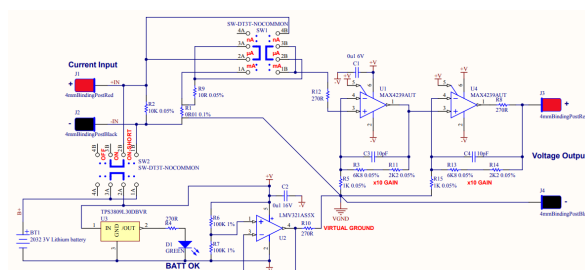


Fig. 3: The uCurrent circuit by David L. Jones

3.2. Modos de operación y consumo de corriente en ESP32

El ESP32 es un microcontrolador único en el mercado, combina módulo WIFI, Bluetooth, módulo de radio y demás componentes de un microcontrolador en un mismo dispositivo. Debido a la cantidad de módulos incorporados en la placa, se han diseñado cinco modos de trabajo para el ESP32, pero en este artículo hablaremos de dos modos: Modo activo y modo *Deep Sleep*. En el modo activo todos los periféricos, módulo WIFI, Bluetooth, RTC

y demás componentes están habilitados. En este modo, el consumo de corriente puede estar entre los 95mA a los 240mA, dependiendo de la aplicación realizada. En el modo *Deep Sleep*, se desactivan la mayoría de componentes del microcontrolador exceptuando la memoria RTC, el controlador RTC, el coprocesador ULP y algunos periféricos asociados al RTC. En este modo, el consumo de corriente puede estar entre 10uA a los 150 uA, dependiendo de la aplicación realizada.

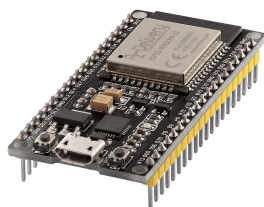


Fig. 4: Esp32

3.2.1. Programación de ESP32 en modo Deep Sleep

El ESP32 es un microcontrolador programable y para acceder al modo *Deep Sleep* es necesario realizar un código. Para este código utilizaremos la interfaz de programación de Arduino. Antes de empezar a programar en esta interfaz, es necesario instalar el paquete del ESP32. [5]

```
int Time_sleep = 10;
//Tiempo en que la ESP estará en sueño profundo (segundos)
void setup() {

    // Modo activo, se conectará a WIFI
    while (WIFIMulti.run() !=WL_CONNECTED){
        Serial.print(".");
        delay(500);
    }

    esp_sleep_enable_timer_wakeup(Time_sleep*(1000000));
    //Aquí se define después de cuanto tiempo se levanta
    //Esta función recibe un valor en microsegundos,
    //por eso es necesario multiplicar por un factor

    esp_deep_sleep_start(); // Inicia el modo sueño profundo
}

void loop() {

}
```

Fig. 5: Código para la programación del EPS32 en modo Deep Sleep

Fue agregado un bucle de código para que en el modo de activación la ESP32 encienda el módulo WIFI y permita un consumo de aproximadamente 500mA.

3.3. Amplificadores operacionales de precisión

Son dispositivos diseñados para proporcionar exactitud y estabilidad en una amplia gama de aplicaciones. Características como su capacidad para aceptar voltajes en pequeña escala, baja corriente de polarización, bajo voltaje de offset y alta tasa de rechazo al ruido determinan su funcionalidad. Estos amplificadores se diferencian de otros por su capacidad para minimizar errores y ofrecer una gran precisión, incluso en condiciones exigentes. La gran precisión de estos amplificadores proviene de sus componentes internos optimizados y de los mecanismos de compensación que emplean para asegurar una correcta lectura de la señal de entrada.

Cuando se genera una tierra virtual, es común utilizar un amplificador operacional en configuración de buffer. Esta configuración proporciona una tensión de referencia estable, importante al tener una batería de litio como alimentación. Características recomendadas del Opamp: Entrada/salida carril a carril: Permite que el amplificador funcione eficazmente en todo el rango de tensión de la fuente de alimentación. Bajo consumo: Un opam con baja corriente de reposo es ideal para ahorrar energía. Baja tensión de offset: Ayuda a mantener la precisión en la referencia de tierra virtual.

3.4. Amplificadores de detección de corriente (CSA)

Son dispositivos especializados para medir con precisión la corriente que circula por una resistencia de derivación *Rshunt*, perfectos para medir corrientes pequeñas. La corriente que pasa por *Rshunt* genera una caída de tensión proporcional a la corriente, luego esta tensión es amplificada. Están diseñados para recibir pequeñas caídas de tensión en sus terminales de entrada sin que el voltaje de offset afecte considerablemente. Otra de sus características es el bajo consumo de energía, siendo un componente ideal para esta aplicación.

Han sido diseñados varios circuitos con el fin de detectar la corriente através de la resistencia, entre estos se encuentra:

- Esta configuración utiliza un opam con realimentación, en la salida del opam se encuentra un transistor n-mos encargado de controlar la corriente que se realimenta y la que llega a la resistencia de carga,

por último se encuentra la etapa de identificación, un opam configurado en buffer se encarga de comparar la tensión en la resistencia de carga, según el valor de este voltaje, el buffer arroja 3.3V o 0V.

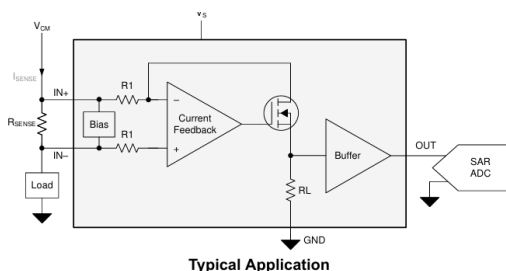


Fig. 6: Esquemáticos del CSA INA280.

3.5. Conmutador analógico

Son dispositivos diseñados para dirigir el paso de una señal analógica a partir de una señal de control. La señal de control determina hacia que salida del conmutador se dirige la señal de entrada, normalmente la señal de control es digital (cero o uno). En el interior del conmutador existe un switch y puede encontrarse en diferentes en dos estados: Estado abierto o estado cerrado. Existen varias configuraciones de conmutadores analógicos pero nos centraremos en los de dos salidas, una señal de control y una señal de entrada. Cuando la señal de control esté en bajo (cero), el switch se encuentra en un estado (estado de reposo o normalidad) y cuando la señal de control se encuentre en alto (uno), el switch se encuentra en el otro estado.

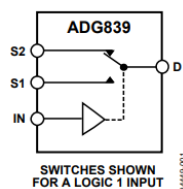


Fig. 7: Esquemáticos conmutador analógico ADG839.

En la Fig. 7, el terminal IN corresponde a la señal de control, el terminal D corresponde a la señal de entrada y los terminales S1 y S2, corresponden a los dos estados de switch.

3.6. MOSFET para la protección a polaridad inversa

El MOSFET en configuración fuente común y en serie a la carga es un dispositivo. Es un componente perfecto para aplicaciones de precisión, su baja caída de tensión permite que no se pierda la señal en resistencias de shunt, por ejemplo. El drane debe ir conectado a la fuente de alimentación, la carga (ESP32) al source y al gate se conecta una resistencia. Entonces, al estar la polaridad directa, el mosfet conducirá la corriente por drain y source, si se invierte la polaridad, el diodo se comporta como circuito abierto. Los parámetros a analizar en el datasheet son: Voltaje de ruptura (V_{ds}), debe ser superior a 7.4V, corriente máxima de drenador (I_d) y resistencia de encendido ($R_{ds(on)}$).

Para la protección se ha decidido usar el mosfet de canal p *CSD22206W*, porque cumple con los parámetros deseados [6]: $V_{ds} = 8V$, $R_{ds(on)} = 4,7m\Omega$,

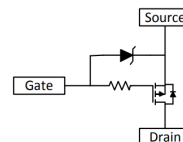
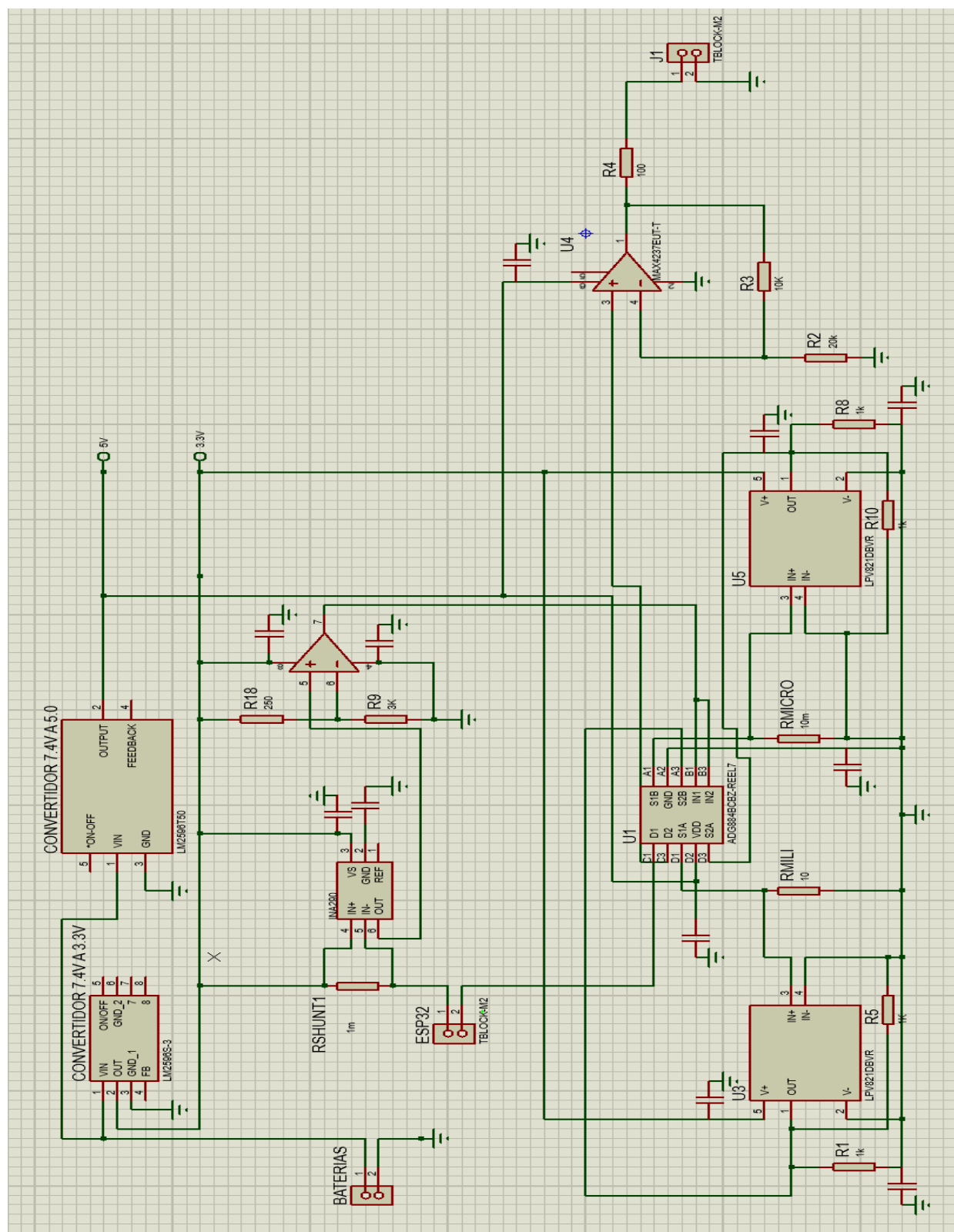


Fig. 8: Conexión de Mosfet tipo p, diodo zener y resistencia para la protección de polaridad inversa.d

4. Propuesta de diseño

4.1. Elección de esquemático

Luego de un análisis acerca de los dos esquemáticos expuestos en la sección 2.1, es necesario tomar una decisión para el desarrollo del medidor de corriente para el microcontrolador ESP32. La diferencia entre ambas propuestas radica en el número de amplificadores operacionales de precisión implementados en la etapa de amplificación. El primer esquemático propone un solo opam de precisión y el segundo esquemático propone dos opams de precisión conectados en cascada. Se ha tomado la decisión de implementar el primer esquemático por dos razones justificables: La primera, es el consumo energético en la batería, es coherente minimizar el número de componentes que necesitan alimentación directa de la batería, esto proporcionalmente minimiza el gasto energético y el tiempo de vida útil en la batería. La segunda justificación incita al ahorro de dinero, los opams de precisión son componentes electrónicos de gran costo, al incorporar uno menos ayuda al diseño propuesto para tener un precio competitivo en el mercado.



5. Procedimiento

5.1. Selección de componentes

Para la selección del **amplificador de precisión** nos basaremos en las siguientes especificaciones:

- **Voltaje de offset:** Debe ser muy pequeño para no interferir en el voltaje que aporta la resistencia de shunt a la entrada del opam.
- **Impedancia de entrada/Corriente de polarización:** Se debe garantizar el mínimo consumo de corriente por parte del opam. Se considera una gran impedancia de entrada, esto directamente afecta a la corriente de polarización haciéndola pequeña.
- **Slew rate:** Es necesario tener una respuesta rápida a los cambios de corriente en la entrada, así se evita el daño en componentes internos de la placa.
- **Alto rechazo de modo común (CMRR):** Para prevenir posibles fluctuaciones en los cambios bruscos de corriente, se considera un alto CMRR.
- **Voltaje de alimentación:** Este voltaje lo suministra la batería, así que debe ser menor a 3.3V.
- **Precio:** Monto que compete comprar el dispositivo e importarlo a Colombia.

5.2. Amplificadores de precisión

En esta sección se exponen referencias de amplificadores de precisión encontrados en las páginas web *Mouser Electronics* y *Texas Instruments*. Las páginas mencionadas permiten filtrar por características los componentes buscados.

Los amplificadores expuestos en esta sección cumplieron el filtro de características, precio (<15.000 COP) y disponibilidad en Colombia. Las viñetas en esta sección representan las características más relevantes de los amplificadores: OPA33A/D, OPA187, MAX4237EUT+T y TLE272B.

5.2.1. OPA330AID

Tiene una configuración de ocho pines y cuenta con módulo CAD para la conexión en proteus.[7]

- **Voltaje de alimentación:** Tiene alimentación mínima de +/- 0.9V o 1.8V y una alimentación máxima de +/- 2.75V o 5.5V.

- **Voltaje de offset** A temperatura ambiente, con $R_L=10k$ y alimentación 1.8V a 5.5V, el voltaje de offset es típicamente 8 μV y máximo de 50 μV .
- **Corriente de polarización:** A temperatura ambiente (25°), I_B típicamente es de 200 pA y máxima de 500 pA.
- **Corriente de offset:** Tiene un valor típico de 400 pA y un valor máximo de 1 nA.
- **CMRR:** A temperatura ambiente y $(-0.1 < V_{cm} < 0.1)$ el factor de rechazo a modo común es de 100 dB.
- **Slew Rate:** Incorpora una tasa de cambio típica de 0.16 V/us.
- **Precio:** En la página web de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 12.000 COP

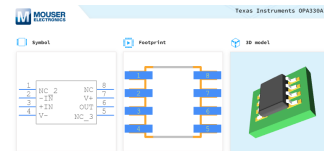


Fig. 9: Modelo CAD del opam OPA330AID.

5.2.2. OPA187

Tiene una configuración de cinco pines y cuenta con módulo CAD para la conexión en proteus. Las siguientes características son obtenidas teniendo: Temperatura ambiente, V_s de 4V a 18V y $R_L=10k$. [8]

- **Voltaje de offset:** Presenta un voltaje de offset muy bajo, típicamente de 1 μV y máximo de 10 μV .
- **Corriente de polarización:** Tiene un valor máximo de 7.5 nA.
- **Corriente de offset:** Tiene un valor máximo de 14.5 nA.
- **CMRR:** Cuenta con un valor mínimo de 126 dB y un valor típico de 140 dB. Estos valores con $V_s = \pm 18V$.
- **Slew Rate:** Incorpora una tasa de cambio típica de 0.2V/us.
- **Precio:** En la página web de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 9.000 COP

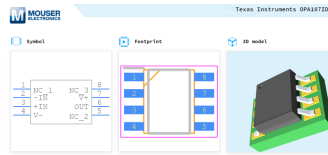


Fig. 10: Modelo CAD del opam OPA187.

5.2.3. MAX4237EUT+T

Tiene una configuración de seis pines y cuenta con módulo CAD para la conexión y simulación en proteus. Las siguientes características son obtenidas teniendo: $V_{CC}=2.4V$ a $5.5V$, $V_{EE}=0V$, $R_L=10k$ y temperatura ambiente. [9]

- **Volatje de offset:** Presenta un Voffset típico de $5\ \mu V$ y máximo de $50\ \mu V$.
- **Corriente de polarización:** Cuenta con un valor típico de $1\ pA$ y un valor máximo de $500\ pA$.
- **Corriente de offset:** uenta con un valor típico de $1\ pA$.
- **CMRR:** Presenta un valor mínimo de $82\ dB$ y un valor típico de $102\ dB$.
- **Slew Rate:** Incorpora una tasa de cambio típica de $1.3\ V/\mu s$.
- **Precio:** En la página web de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de $14.000\ COP$.

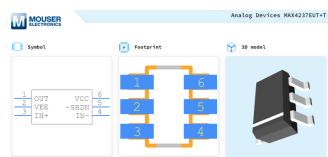


Fig. 11: Modelo CAD del opam MAX4237EUT+T.

5.2.4. TLE272B

Tiene una configuración de ocho pines y cuenta con módulo CAD para la conexión y simulación en proteus. Las siguientes características son obtenidas teniendo: $V_{CC}=5V$, $V_o=1.4V$, $R_L=10k$ y temperatura ambiente. [10]

- **Volatje de offset:** Cuenta con voltaje típico de $230\ \mu V$ a un máximo de $2mV$.
- **Corriente de polarización:** El opam gastará típicamente $0.6\ pA$ a un máximo $60\ pA$ de corriente.

- **Corriente de offset:** El opam genera internamente un valor típico de $0.1\ pA$ a un máximo de $60\ pA$ de corriente.
- **CMRR:** El factor de rechazo a modo común es típicamente de $80\ dB$ y mínimo de $60\ dB$.
- **Precio:** En la página web de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de $7.500\ COP$.

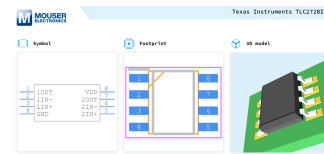


Fig. 12: Modelo CAD del opam TLC272.

5.2.5. LPV821

Tiene una configuración de cinco pines y cuenta con módulo CAD para la conexión y simulación en proteus. Las siguientes características son obtenidas teniendo: $V_{CC}=1.8V$ a $3.3V$, $R_L=10M\Omega$ y temperatura ambiente. [11]

- **Volatje de offset:** Cuenta con voltaje típico de $1.5\ \mu V$ a un máximo de $10\ \mu V$.
- **Corriente de polarización:** El opam gastará típicamente $7\ pA$.
- **Corriente de offset:** El opam genera internamente un valor típico de $14\ pA$.
- **CMRR:** El factor de rechazo a modo común es típicamente de $125\ dB$ y mínimo de $100\ dB$.
- **Precio:** En la página web de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de $9.300\ COP$.

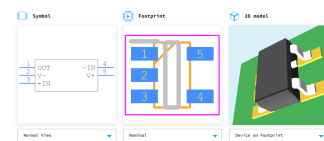


Fig. 13: Modelo CAD del opam LVP821.

5.3. Amplificador de detección de corriente

Para la la selección del CSA fueron concideradas características específicas, se consideraron las configuraciones

internas y primordialmente, el tipo de salida. En esta sección se exponen los datos más relevantes del INA280 y el INA290.

5.3.1. INA280

Tiene una configuración de cinco pines. Fue necesario emular el circuito interno en el software de Proteus. Las siguientes características son obtenidas teniendo: $V_s=5V$, $V_{sense}=V_{in+} - V_{in-} = 0.5V/Gain$ y temperatura ambiente.[12]

- **Volatje de offset:** Cuenta con voltaje típico de 15 μV a un máximo de 150 μV .
- **Corriente de polarización:** El opam gastará típicamente 20 μA .
- **Voltaje de polarización:** Este opam se puede alimentar mínimamente con 2.7V y hasta 20V.
- **Precio:** En la página web de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 11.000 COP.

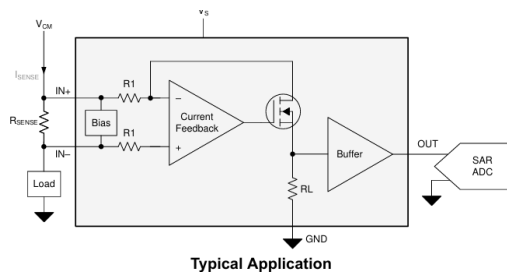


Fig. 14: Esquemático interno de INA280.

5.3.2. INA290

Tiene una configuración de cinco pines y es similar a la configuración del INA280. Fue necesario emular el circuito interno en el software de Proteus. Las siguientes características son obtenidas teniendo: $V_s=5V$, $V_{sense}=V_{in+} - V_{in-} = 0.5V/Gain$ y temperatura ambiente.[13]

- **Voltaje de offset:** Típicamente tiene un voltaje de offset de 3 μV y un valor máximo de 15 μV .
- **Corriente de polarización:** La I_B tiene un rango que inicia en 10 μA y termina en 30 μA .
- **Voltaje de polarización:** El opam puede ser alimentado desde 2.7V a 20V.

- **CMRR:** Tiene un rechazo mínimo al ruido de 140 dB.
- **Slew Rate:** Suporta cambios de voltaje con un factor de 2V/ μs .
- **Ganancia:** Tiene una ganancia típica de 100 [V/V].
- **Precio:** En la página web de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 11.000 COP.

5.4. Conmutador analógico

En esta sección se exponen diferentes opciones de conmutadores analógicos para implementar en la etapa de auto-range. Se utiliza la página web Mouser Electronics para el filtrado de conmutadores analógicos. Se utilizaron los filtros de alimentación menor a 5V, dos salidas disponibles, corriente soportada y la resistencia asociada al componente.

5.4.1. ADG839

Dispositivo de cuatro pines y cuenta con módulo CAD para la conexión en proteus. Los siguientes datos fueron calculados con $VDD=2.7V$ a $3.6V$ y $GND=0V$. [14]

- **Alimentación:** Tiene un rango de voltaje de alimentación entre 2.7V a 3.6V
- **Número de salidas:** Dos pines de salida S1 y S2.
- **Capacidad de corriente soportada:** 300 mA de corriente continua y 500 mA de corriente alterna.
- **Resistencia de entrada:** 0.35 Ω

5.4.2. ADG884

Dispositivo de ocho pines, incorpora dos conmutadores y dos señales de control por separado. Cuenta con módulo CAD para la conexión en proteus. Los siguientes datos fueron calculados con $VDD=5V$ y $GND=0V$. [15]

- **Alimentación:** Tiene un rango de voltaje de alimentación entre 1.8V a 5.5V.
- **Número de salidas:** Cuatro pines de salida S1A, S1B, S2A y S2B.
- **Capacidad de corriente soportada:** 400 mA de corriente continua y 600 mA de corriente alterna.
- **Resistencia de entrada:** 0.41 Ω .

5.4.3. XS3A1T3157

Dispositivo de seis pines, incorpora un conmutador y una señal de control. Cuenta con módulo CAD para la conexión en proteus. [16]

- **Alimentación:** Tiene un rango de voltaje de alimentación entre 1.4V a 4.3V.
- **Número de salidas:** Dos pines de salida Y1 y Y2.
- **Capacidad de corriente soportada:** 350 mA de corriente continua y 500 mA de corriente alterna.
- **Resistencia de entrada:** 0.5Ω .

5.4.4. TS3A24159

Dispositivo de diez pines, incorpora dos conmutadores y una señales de control. Cuenta con módulo CAD para la conexión en proteus. Los siguientes datos fueron calculados con VDD=2.3V a VDD=3.6V y GND=0V.[16]

- **Alimentación:** Tiene un rango de voltaje de alimentación entre 1.65V a 3.6V.
- **Número de salidas:** Cuatro pines de salida NC1, NO1, NC2 y NO2.
- **Capacidad de corriente soportada:** 350 mA de corriente continua y 500 mA de corriente alterna.
- **Resistencia de entrada:** 0.5Ω .

5.5. Alimentación del diseño

Para garantizar un correcto funcionamiento del diseño, es fundamental contar con una alimentación estable y duradera. En este caso se utilizará una batería de iones de litio basándose en el diseño de David L. Jones.

Se conoce que, la alimentación de la ESP32 y varios de los componentes electrónicos utilizados en el diseño del sistema necesitan, generalmente, una alimentación de 3.3V. Existen varias opciones de baterías de litio, como las baterías de iones de litio (Li-ion), las de polímero de litio (LiPo) y las de fosfato de hierro y litio (LiFePO4), cada una con características específicas que se deben considerar. La opción que más se facilita adquirir por economía y por disponibilidad es la batería de iones de litio.

5.5.1. Batería 18650

Para el proyecto se utilizó una batería una sola celda que ofrece un promedio de 3.7 V al estar cargada,

entrega una corriente de 2500 mAh. Para llegar a un valor aproximado de 7.4V y alimentar el conmutador analógico y el amplificador de precisión (con alimentación de 4.5V tienen un mejor desempeño), se implementa un porta batería de doble ranura, permitiendo conectar dos baterías 18650 en serie.[17]

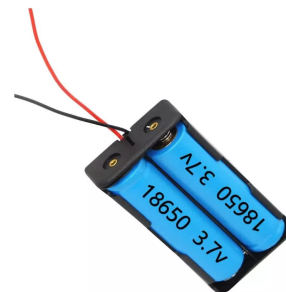


Fig. 15: Batería de iones de litio 2500 mAh con porta batería.

Al ser una batería de iones de litio, los electrones almacenados en la batería se van dissipando con el trabajo de los componentes en el circuito. Para conocer su comportamiento de descarga se debe analizar su gráfica de voltaje versus descarga capacitiva.

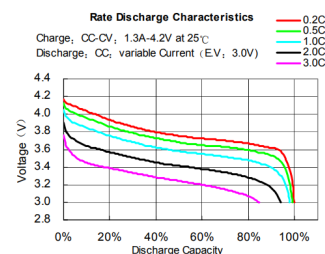


Fig. 16: Batería de iones de litio 2500 mAh con porta batería.

Al ser un dispositivo de alto consumo y necesario para una durabilidad medida en años, es necesario implementar un sistema de carga en las baterías. En la siguiente gráfica se puede analizar la capacidad de voltaje en las baterías respecto al tiempo de carga en ellas.

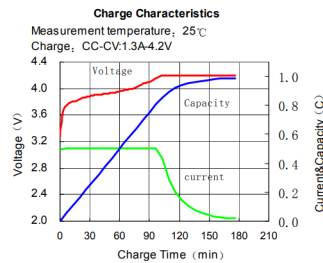


Fig. 17: Batería de iones de litio 2500 mAh con porta batería.

5.5.2. Módulo para la regulación de voltaje

Ya que la batería de iones de litio entrega un aproximado de 7.4V, es necesario regular este voltaje para evitar daños en los componentes electrónicos. Para incorporar esto, se realizó la búsqueda de reguladores de 7.4V a 3.3V.

El LM2596 es un circuito integrado diseñado para la construcción de fuentes de alimentación tipo buck, toma una tensión de entrada y la regula mediante un resistor o ya se encuentra previamente ajustada para tener un voltaje de salida más pequeño y continuo. Se seleccionó este componente por su capacidad de reducción, alta eficiencia y su disponibilidad en el software de proteus. Se utilizarán dos de estos reguladores con configuraciones diferentes, el primero se encarga de pasar de 7.4V a 3.3V y el segundo se encarga de pasar de 7.4V a 5.0V. [11]

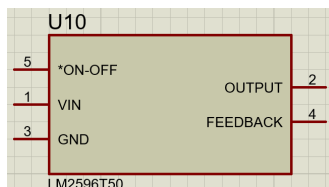


Fig. 18: Esquemático de proteus del LM2596 de 7.4V a 5.0V.

El regulador soporta tensiones de entrada entre 2.5 V a 12 V y a la salida va a entregar 3.3 V, que es el valor de tensión con el que se alimenta la ESP32.

5.5.3. Módulo TP4056 para la carga de las baterías

Se propone la implementación de un módulo para la carga y descarga para las dos baterías de litio de 3.7V. Para su uso, se ha diseñado una PCB adicional. Esto permite el desmonte de las baterías de la PCB principal únicamente desconectando los cables del portador de baterías de las borneras. Para la carga de ambas baterías, se

debe cambiar la polaridad de una de las baterías, quedando ambas en paralelo (ambas baterías deben tener el mismo nivel de carga, evitando corrientes de balanceo).

Controla la carga para evitar sobrecargas que puedan dañar la batería y regula la descarga para evitar que se vacíe por completo, lo que prolonga su vida útil.

Se utilizó un módulo cargador de baterías de Li-ion tp4056 el cual tiene una entrada usb que soporta 4V mínimo y hasta 8V máximo con una corriente de 1A máxima. La tensión de salida que genera el dispositivo para cargar baterías de una sola celda es de 4.2V con una desviación de $\pm 1.5\%$. La resistencia Rprog utilizada en el módulo fue de 2k para que la corriente de salida de la batería fuera de 520 mA.

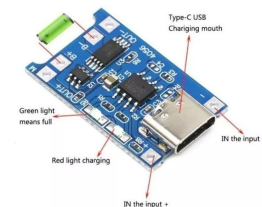


Fig. 19: Módulo TP4056.

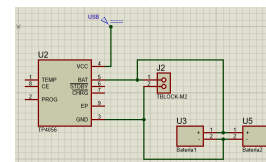


Fig. 20: Ilustración de la conexión para la carga de baterías.

5.5.4. Protección a polaridades inversas

Debido a que la periódica conexión y desconexión de la batería para garantizar su alto nivel de carga, el usuario del dispositivo puede cometer el error de conectar equivocadamente la polaridad de la fuente de alimentación. Por lo expuesto anteriormente, se plantea la implementación de una protección a polaridades inversas, evitando así posibles sobre tensiones o daños considerables en los componentes internos de las PCB's. Estas protecciones estarán presentes en la PCB para la medición de corrientes pequeñas y para la PCB encargada de la carga de las baterías.

6. Simulación

Para comprobar y realizar pruebas en el circuito diseñado se utilizó el software Proteus, ya que permite una buena visualización en las gráficas, es un software intuitivo y permite realizar la conexión de varios dispositivos electrónicos.

6.1. Cálculos matemáticos

Aquí se encontraran todas las operaciones matemáticas consideradas para conocer los valores necesarios en los componentes a seleccionar.

- Para el cálculo de las resistencias asociadas a cada rango de medición. Se utiliza el criterio de *Burden Voltage*.

Para la corriente de uA tendremos una relación 5 mV/500 uA:

$$R_{uA} = \frac{5E^{-3}}{500E^{-6}} = 10\Omega \quad (1)$$

- Para la corriente de mA tendremos una relación 5 mV/500 mA:

$$R_{mA} = \frac{5E^{-3}}{500E^{-3}} = 0,01\Omega \quad (2)$$

- Para determinar el voltaje de comparación en la etapa 3 del circuito, se realiza un divisor de tensión:

$$V_{comp} = \frac{3,3 * (1k)}{1k + 250} = 2,64V \quad (3)$$

- Cálculo de la ganancia del amplificador de precisión utilizando la fórmula para la ganancia de un amplificador no inversor.

$$A_v = \left(1 + \frac{10k}{10k}\right) = 2[V/V] \quad (4)$$

6.2. Etapa de detección de corriente

En esta etapa se analiza la conexión del amplificador de detección de corriente. Para simular la corriente que consume la ESP32 en los dos modos, fue utilizada una fuente de corriente cuadrada con un valor en bajo de 500 uA, un valor en alto de 500mA y un periodo de 20 segundos (Ver Fig. 8). Esta conexión supone previamente la alimentación (Pin 2) y la puesta a tierra (Pin 57) de la ESP23.

Se consideró utilizar una resistencia de shunt de 0.1Ω, apropiada para el voltaje recibido por el CSA

y, para simular la impedancia asociada a la ESP32 fue utilizada una resistencia de 1MΩ. [18].

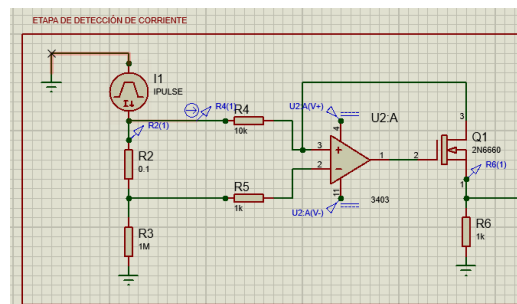


Fig. 21: Simulación de etapa del CSA.

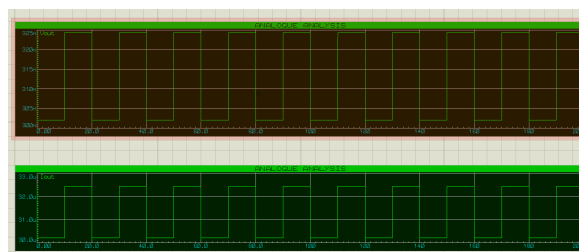


Fig. 22: Gráfica de corriente de entrada y voltaje de salida.

6.2.1. Observaciones

- El opam del CSA tiene una realimentación de la corriente de drenador en el mosfet, también muestrea tensión.
- En la primera gráfica se observa la función cuadrada correspondiente a la corriente consumida por el ESP32 en los dos modos. Su Vp(+) es de 500mA y su Vp(-) es de 500 uA, en la gráfica es aproximadamente cero por la escala que proporciona Proteus.
- La resistencia que proporciona el voltaje de entrada es muy pequeña para el consumo en la batería sea mínimo y le lleguen los 3.3V al ESP32.
- El voltaje de salida en RL tiene un rango de voltaje que inicia en 400 mV y termina en 3.85V.

6.3. Etapa de comparación

En esta etapa fue utilizado un opam en configuración de comparador. La señal resultante de la etapa

anterior será comparada con el voltaje obtenido en la ecuación 3, es decir, si la salida de la etapa uno se encuentra en alta (1.31 V aproximadamente), la salida del comparador será de 1.72 V aproximadamente; en caso contrario, salida de la etapa 1 en baja (400 mV), la salida del comparador será 62mV aproximadamente.

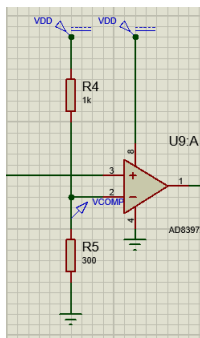


Fig. 23: Circuito de etapa 2.

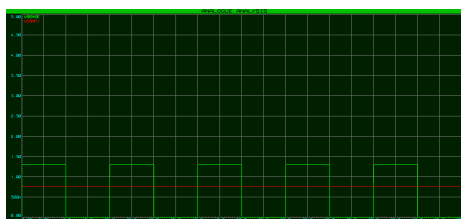


Fig. 24: Gráfica del voltaje de comparación (rojo) y el voltaje de salida en la etapa 2.

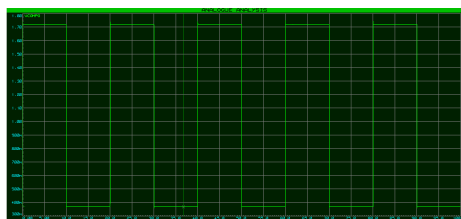


Fig. 25: Gráfica de voltaje de salida en etapa 2.

6.3.1. Observaciones

- Las resistencias en el divisor de voltaje se ajustaron específicamente para lograr un valor ligeramente superior a la mitad entre $V_p(+)$ y $V_p(-)$.

6.4. Etapa de control de switches

En esta etapa se implementaron dos switches analógicos controlados por la señal retornada en la etapa anterior. Si la señal de control es 0, S1 se cierra y hace que la corriente de microamperios llegue a la resistencia de 10Ω , al otro switch llega el mismo 0 lógico y cierra S1 haciendo que pase la tensión generada por la resistencia de 10Ω y la corriente de microamperios. Ahora exponemos el otro caso, si la señal de control es 1, S2 se cierra y hace que la corriente de miliamperios llegue a la resistencia de 0.01Ω , al otro switch llega el mismo 1 lógico y cierra S2 haciendo que pase la tensión generada por la resistencia de 0.01Ω y la corriente de miliamperios.

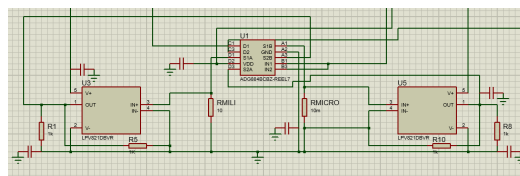


Fig. 26: Circuito de etapa 4 (conmutación).

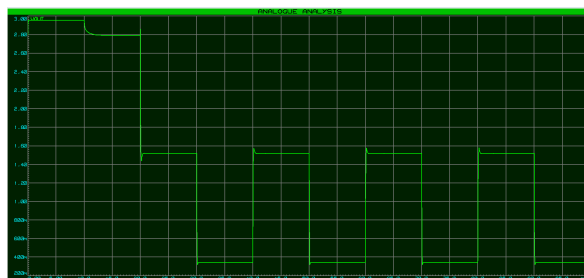


Fig. 27: Gráfica del voltaje de salida en etapa 4.

6.4.1. Observaciones

- Fue necesario utilizar nuevamente la fuente de corriente que simula el comportamiento de la corriente consumida por la ESP32. Esto con el fin de tener un control más preciso.
- Se adicionó un capacitor de $0.1\mu F$ para la mitigación del ruido, se encarga de filtrar los armónicos obtenidos en la señal de salida, esto debido a los cambios muy rápidos en la corriente.
- En la gráfica de salida de la etapa 4 se evidencia un sobrepico al inicio de control, después de 20 segundos la señal se establece, dando un

voltaje en alto de 1.5 V aproximadamente y un voltaje en bajo de 350 mV aproximadamente.

6.5. Etapa de amplificación

Para esta etapa fue utilizado el opam de precisión seleccionado, se alimentó con $V_{DD}=3.3V$ y $V_{EE}=-3.3V$. La conexión de resistencias convierte al opam en una configuración no inversora y, son las resistencias las encargadas de asignar la ganancia en la salida.

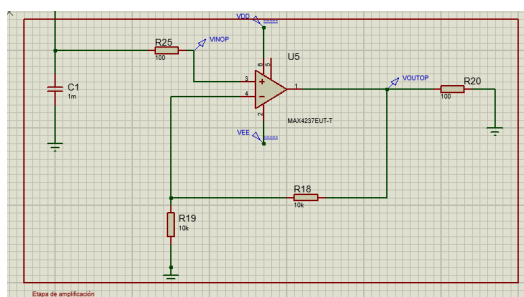


Fig. 28: Circuito de etapa 5.

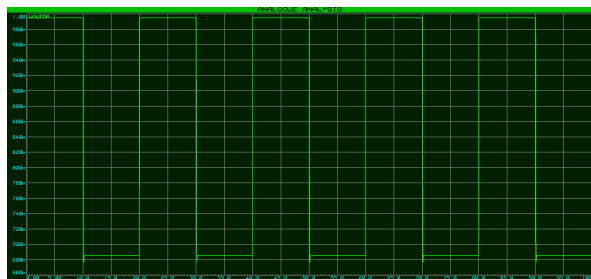


Fig. 29: Gráfica del voltaje de salida en etapa 5.

6.5.1. Observaciones

- En esta etapa también fue necesario el uso de un capacitor de 1mF para la mitigación del ruido y picos no deseados.
- La ganancia del opam de precisión es considerablemente pequeña (ver ecuación 5). En este diseño no se buscaba una gran amplificación, se buscaba una tolerancia a los valores pequeños.
- Las dos resistencias de 100Ω conectadas a la entrada y salida de la etapa de amplificación permiten disminuir un poco el voltaje en esos nodos.

- Respecto a la gráfica de salida, se obtiene un valor en alto de aproximadamente 1V y un valor en bajo de aproximadamente 690 mV. Esto permite un rango considerable para la conversión a corriente.

7. Costos y durabilidad

En esta sección se encuentran los precios de los componentes electrónicos seleccionados.

Para tener un precio de referencia comercial, se realizó la investigación del precio correspondiente al uCurrent diseñado por David L. Jones y al current ranger diseñado por Félix Russo. Según la página web de David L. Jones, el precio para adquirir este adaptador es de 89.00 AUD, esto para un habitante en Australia, para Colombia se aproximará a un costo de 100 USD (424.000 cop). El dispositivo diseñado por Félix Russo tiene un costo aproximado de 120 USD, se aproximará a 140 USD (594.000 COP)

7.1. Amplificador de detección de corriente INA290

- En la página de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 14.350 COP. El costo de envío es de 122.000 COP y garantizan la entrega en 4 días hábiles.
- En la página de AliExpress tiene un precio por unidad de 13.000 COP. El costo de envío es de 25.000 COP y garantizan una entrega en 30 días.
- La corriente propia consumida es de 370 microAmpers.

7.2. Amplificador de comparación AD8397ARZ

- En la página de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 32.000 COP. El costo de envío es de 122.000 COP y garantizan la entrega en 4 días hábiles.
- En la página de AliExpress tiene un precio por unidad de 23.500 COP. El costo de envío es de 0 COP y garantizan una entrega en 45 días.
- La corriente de suministro expuesta en el datasheet afirma un consumo de 0.1 microAmpers al alimentarse a 3.3V.

7.3. Conmutador analógico ADG884

- En la página de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 22.000 COP. El costo de envío es de 122.000 COP y garantizan la entrega en 4 días hábiles.
- En la página de AliExpress tiene un precio por unidad de 1.800 COP. El costo de envío es de 16.0000 COP y garantizan una entrega en 30 días.
- El datasheet expone que al estar apagado el conmutador se consumen aproximadamente 0.2 nanoAmperes cuando $VCC=5V$. También el poco consumo lo puede asignar su resistencia R_{on} , esta tiene un máximo valor de 0.41Ω .

7.4. Regulador de voltaje LM2596

- En la página de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 27.000 COP. El costo de envío es de 122.000 COP y garantizan la entrega en 4 días hábiles.
- En la página de AliExpress tiene un precio por unidad de 2.000 COP. El costo de envío es de 16.0000 COP y garantizan una entrega en 30 días.
- El datasheet afirma un consumo de corriente en operación de 5 miliAmperes con $VCC=3.3V$.

7.5. Amplificador de precisión MAX4237EUT+T

- En la página de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 14.000 COP. El costo de envío es de 122.000 COP y garantizan la entrega en 4 días hábiles.
- En la página de DigiKey tiene un precio por unidad de 19.600 COP. El costo de envío es de 170.0000 COP y garantizan una entrega en 6 días.
- El datasheet expone un consumo de corriente de reposo de 0.1 microAmperes en modo **shunt-down** (entra en ahorro de energía, no trabaja pero ahorra energía, se maneja mediante una señal de control) y, en modo normal un consumo de 350 microAmperes.

7.6. Dispositivo de protección CSD22206W

- En la página de Mouser Electronics tiene un precio por unidad de 4.000 COP. El costo de envío es de 122.000 COP y garantizan la entrega en 4 días hábiles.
- En la página de DigiKey tiene un precio por unidad de 6.200 COP. El costo de envío es de 170.0000 COP y garantizan una entrega en 6 días.
- El datasheet expone una corriente de fuga de drain a source de 1 microAmper.

7.7. Batería

- En la página de Mercado libre tiene un precio por unidad de 46.500 COP. El costo de envío es de 20.000 COP y garantizan la entrega en 5 días hábiles.
- En la página de Ferretrónica tiene un precio por unidad de 55.000 COP. El costo de envío es de 20.0000 COP y garantizan una entrega en 4 días.

7.8. Módulo de carga TP4056

- En la página de Amazon tiene un precio por unidad de 8.700 COP. El costo de envío es de 49.000 COP y garantizan la entrega en 9 días hábiles.
- En la página de AliExpress tiene un precio por unidad de 4.300 COP. El costo de envío es de 15.0000 COP y garantizan una entrega en 2 días.

7.9. Resistencias

Para la implementación de las resistencias utilizadas en el diseño se estima un valor de 5.000 COP.

7.10. Portabatería

- En la página de Amazon tiene un precio por unidad de 5.200 COP. El costo de envío es de 49.000 COP y garantizan la entrega en 9 días hábiles.

- En la página de MercadoLibre tiene un precio por unidad de 6.000 COP. El costo de envío es de 15.0000 COP y garantizan una entrega en 2 días.

7.11. Cálculo total de precio

En esta cotización se asume un único valor de envío y la fabricación de 1 PCB.

$$C_{osto} = (14,350) + (32,000) + (22,000) + (2 * 27,000) + (14,000) + (2 * 46,500) + (9,000) + (6,000) + (70,000) + (155,000) + (4,000) + (8,700) + (5,000) + (5,200) = 492,250[COP] \quad (5)$$

7.11.1. Observaciones

- Para tener un margen de ganancia de 10 %, el diseño termina con un precio por unidad de 542.000 COP. Siendo un precio competitivo en el mercado.
- El precio elevado se le atribuye a los costos de exportación de componentes y fabricación de las placas.
- Al exportar productos de manera masiva, los costos de exportación pueden no influir en tan gran escala en comparación a la exportación de pocas unidades. Esto puede disminuir el precio de venta en el mercado.

7.12. Cálculo total del consumo base

$$C_{onsumo} = (0,37) + (0,1) + (0,0000002) + (2 * 5) + (0,35) + (0,1) = 10,92[mA] \quad (6)$$

Cálculo de la duración de la batería de litio.

$$Time = \frac{Capacidad[Ah]}{Corriente[A]} = \frac{2500mAh}{10,9mA} = 229horas. \quad (7)$$

7.12.1. Observaciones

- Con un consumo total de corriente de 10.98 mA y una capacidad de las baterías de 2500 mAh, se obtiene una duración teórica de 229

horas. Esto indica que el dispositivo es eficiente en cuanto a consumo energético, prolongando el tiempo de funcionamiento continuo

8. Diseño PCB

En esta sección se presenta la estrategia utilizada para el diseño de la PCB. Se empleó el software Proteus como entorno de desarrollo, el cual permite optimizar la conexión de componentes, dimensionar su tamaño y visualizar con precisión cada etapa involucrada en el proceso de diseño. El principal objetivo de este diseño fue obtener una placa de dimensiones reducidas, con un desempeño eficiente en términos de consumo energético y una alta capacidad de rechazo al ruido.

La PCB fue diseñada utilizando cuatro capas, cada una con un propósito específico para garantizar un diseño eficiente y funcional:

- **Primera capa (Alimentación):** Esta capa se dedicó exclusivamente a la distribución de la alimentación desde la bornera de las baterías hacia los componentes del circuito, incluye las conexiones necesarias para integrar los dos reguladores de voltaje utilizados en el diseño.
- **Segunda y tercera capa (Aislamiento):** Estas capas se destinaron al aislamiento de las señales de corriente y voltaje, minimizando interferencias.
- **Cuarta capa (Tierra - GND):** Todas las conexiones a tierra están concentradas en esta capa, proporcionando un plano de referencia común y mejorando el manejo de señales, así como la protección frente al ruido.

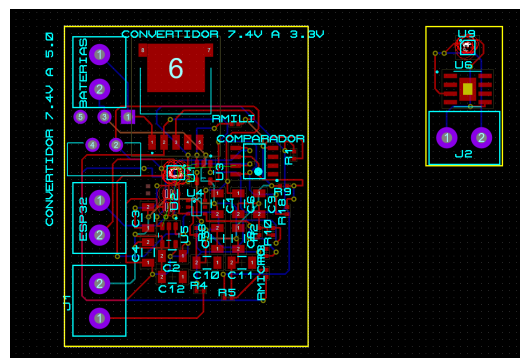


Fig. 30: Vista de las interconexiones de las PCBs.

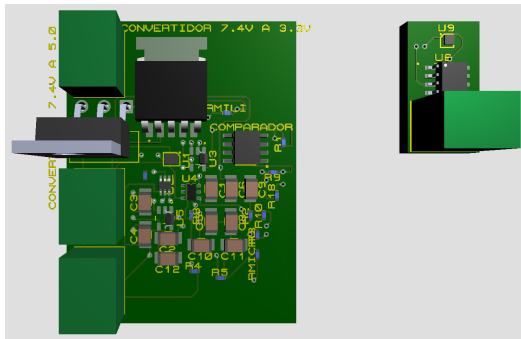


Fig. 31: Vista en 3D de las PCBs.

9. Conclusiones

- Durante el desarrollo del proyecto, el rango inicial de medición de corriente, que abarcaba desde $500\ \mu\text{A}$ hasta $500\ \text{mA}$, fue ajustado a un nuevo rango de $400\ \mu\text{A}$ a $350\ \text{mA}$. Esta reducción fue necesaria para poder utilizar componentes electrónicos de mayor precisión. Aunque esta decisión mejora significativamente la precisión y estabilidad de las mediciones, también implica una limitación en la capacidad del dispositivo para medir corrientes, lo que podría restringir su aplicación en ciertos contextos.
- El diseño del dispositivo fue desarrollado y evaluado mediante simulaciones en el software Proteus. El software Proteus presenta ciertas limitaciones, como la disponibilidad restringida de modelos de componentes electrónicos y su respectivo modelo para simulación. Esto limitó el uso de componentes electrónicos más óptimos teóricamente y se utilizaron aproximaciones como el uso de una fuente tipo escalón para la simulación de la corriente entregada por la ESP32. Además, aspectos como el ruido no son considerados en el software. Por lo anterior, se recomienda complementar las simulaciones de este diseño utilizando herramientas más avanzadas y así evidenciar su comportamiento de mejor manera.
- Una de las metas del proyecto fue mantener el costo total de implementación por debajo de los 500,000 COP, lo cual fue logrado gracias a una selección cuidadosa de componentes y al uso de recursos accesibles. El enfoque en la optimización del presupuesto hace que este dispositivo sea viable para aplicaciones prácticas de bajo costo, aunque podría beneficiarse de

una inversión mayor en componentes si el presupuesto no tuviese restricción.

- Para mitigar el aporte resistivo del conmutador ADG884 ($0.28\ \Omega$), fue necesario la incorporación de otra etapa de amplificación para el voltaje generado por las resistencias R_{MILI} y R_{MICRO} . Esta resistencia interna del conmutador generará ruido en la medición de voltaje, es por eso que para la etapa de amplificación se utiliza un opam de precisión (LPV821) especialmente por su mitigación al ruido (CMMRR típica de 125 dB), su su bajo voltaje de alimentación (1.8V a 3.3V), su bajo aporte máximo en voltaje offset ($10\ \mu\text{V}$) y su rápida conmutación ($3.3\text{V}/\text{ms}$).

Referencias

- [1] "Ut-39c digital multimeter specifications." [Online]. Available: <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/U/UT-39C.PDF>
- [2] "Ut202a digital clamp multimeter datasheet." [Online]. Available: https://www.mantech.co.za/Datasheets/Products/UT202A_UNI-T.pdf
- [3] "D. l. jones,"the ucurrent: Precision current adapter." [Online]. Available: <https://eevblog.com/files/uCurrentArticle.pdf>
- [4] "ucurrent gold multimeter adapter." [Online]. Available: <https://eevblog.store/products/ucurrent-gold-multimeter-adapter>
- [5] "Tutorial de instalación paquete esp32. programming electronics academy." [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=mwi01JG_OGA
- [6] "Texas instrument, csd22206w datasheet." [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd22206w.pdf?ts=1732464238109&ref_url=https%253A%252F%252Fco.mouser.com%252F
- [7] "Opa330aid datasheet by texas instruments." [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa330.pdf?ts=1729366889624&ref_url=https%253A%252F%252Fco.mouser.com%252F
- [8] "Opa187 datasheet by texas instruments." [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa187.pdf?ts=1729369036387&ref_url=https%253A%252F%252Fco.mouser.com%252F



- [9] "Max4237eut+t datasheet by texas instruments." [Online]. Available: https://co.mouser.com/datasheet/2/609/MAX4236_MAX4237-3470329.pdf
- [10] "Tlc272b datasheet by texas instruments." [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc272b.pdf?ts=1729380907920&ref_url=https%253A%252F%252Fco.mouser.com%252F
- [11] "Texas instrument, lm2596 datasheet." [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- [12] "Mcp60001 datasheet by microchip." [Online]. Available: https://co.mouser.com/datasheet/2/268/MCP6001_1R_1U_2_4_1_MHz_Low_Power_Op_Amp_DS2000173-3443000.pdf
- [13] "Ina290-q1 datasheet by texas instrument." [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina290-q1.pdf?ts=1729388657800&ref_url=https%253A%252F%252Fco.mouser.com%252F
- [14] "Analog devices, ad839 datasheet." [Online]. Available: <https://co.mouser.com/datasheet/2/609/ADG839-1502994.pdf>
- [15] "Analog devices, adg884 datasheet." [Online]. Available: <https://co.mouser.com/datasheet/2/609/ADG884-1602031.pdf>
- [16] "Analog devices, adg884 datasheet." [Online]. Available: <https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/XS3A1T3157.pdf>
- [17] "Eemb, batería 18650 datasheet." [Online]. Available: <https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAALtem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>
- [18] "Esp32 s3 datasheet by espressif." [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf