

Proyecto Diseño y Mejoras μ Current

Brayan Andres Celis Godoy

Jeiffer Ivan Bernal Tellez

Profesor

Jaime Guillermo Barrero Perez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisico-Mecanicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Electrónica

Bucaramanga

2024

Tabla de Contenido

	Pág.
Lista de Figuras.....	3
Lista de Apéndices.....	3
Glosario.....	4
Introducción.....	5
1.Marco teórico.....	5
2. Objetivos.....	7
2.1 Objetivo General.....	7
2.2 Objetivos Específicos.....	7
2.2.1 Desarrollo del sistema de medición mediante simulación.....	7
2.2.2 Desarrollo del diseño del PCB.....	7
2.2.3 Desarrollo del sistema de visualización de lecturas.....	7
3. Metodología.....	8
3.1 Solución Ideal.....	8
3.2 Solución por bloques.....	10
3.2.1 Selector de Modo Automático.....	10
3.2.2 Módulo de Carga de Batería.....	14
3.2.3 Módulo Conversor DC-DC.....	15
4. Desarrollo del PCB.....	16
4.1 Esquemáticos PCB.....	17
5. Desarrollo de aplicación.....	18
5.1 Aplicativo mediante servidor web.....	19
5.2 Aplicativo dedicado.....	20
6. Conclusiones.....	22
Referencias Bibliográficas.....	24
Apéndices.....	25

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Circuito medición de corriente a voltaje	9
Figura 2: Circuito de Medición de Corriente en Rango de μA y mA con Resultados de Simulación.....	10
Figura 3: Circuito comparador umbral mínimo y máximo.....	11
Figura 4: Circuito de resistencias de medición en rango automático.....	12
Figura 5: Circuito de lógica selección automática.....	13
Figura 6: Circuito medición de corriente autónomo.....	14
Figura 7: Resultados de simulación.....	14
Figura 8: Disponibilidad del Módulo Cargador TP4056: Distribuidores Nacionales y Opciones Online.....	15
Figura 9: Disponibilidad del Módulo Reductor de Voltaje LM2596: Opciones en Distribuidores Nacionales y Plataformas Online.....	16
Figura 10: Esquemático Preliminar del PCB.....	17
Figura 11: Esquemático Final.....	18
Figura 12: Visualización de Corriente en Tiempo Real Mediante Interfaz Web Servida por ESP32: Compatible con PC y Celular.....	20
Figura 13: Visualización de Corriente Mediante Aplicación Dedicada.....	22

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Programa Esp-32 Visor online	26
Apéndice B. Programa ESP-32 aplicación dedicada.....	29
Apéndice C. Tabla Valores Implementos.....	33
Apéndice D. Esquemas PCB.....	34
Apéndice E. Detalles de los Archivos Disponibles en el Repositorio GitHub.....	35

Glosario

ESP32: Microcontrolador de bajo consumo con conectividad Wi-Fi y Bluetooth, utilizado en sistemas embebidos para procesamiento y transmisión de datos.

MOSFET: Transistor de efecto de campo utilizado como interruptor en circuitos electrónicos. En el proyecto, se emplean para seleccionar entre diferentes rangos de medición de corriente.

Resistencia Shunt: Componente electrónico utilizado para medir la corriente a través de la caída de voltaje generada en ella, según la Ley de Ohm.

Opamp (Amplificador Operacional): Componente electrónico utilizado para amplificar señales de voltaje, en este proyecto se utiliza tanto para amplificar la señal de corriente como para comparar valores de umbral.

Burden Voltage: Caída de voltaje en una resistencia shunt cuando circula corriente a través de ella. Es un parámetro clave para la precisión de la medición.

Conversor DC-DC Buck: Dispositivo que reduce el voltaje de entrada a un nivel de salida más bajo de manera eficiente, utilizado para regular el voltaje en el proyecto.

TP4056: Controlador de carga para baterías de litio, utilizado en el proyecto para gestionar de manera segura la carga de la batería Li-Ion.

μ Current: Circuito desarrollado por David Jones que permite medir corrientes extremadamente bajas con gran precisión, usado como base para este proyecto.

CurrentRanger: Versión mejorada del μ Current, desarrollado por Low Power Lab, que optimiza la medición de corriente y la alternancia automática entre rangos de medición.

Endpoint: Punto de acceso o URL utilizado en la comunicación entre dispositivos, en este caso, para la transmisión de datos entre la ESP32 y un dispositivo remoto.

Introducción

La falta de herramientas adecuadas para la medición precisa de corriente en dispositivos de bajo consumo, como el **ESP32**, afecta negativamente la optimización del rendimiento y la duración de la batería en aplicaciones **IoT**. Medir el consumo de corriente de manera eficiente es fundamental para garantizar que estos dispositivos operen correctamente en sus distintos modos, desde miliamperios hasta microamperios, sin comprometer la eficiencia energética.

Este trabajo se basa en la arquitectura de circuitos previamente desarrollados, como **μCurrent** (Jones, 2010) y **CurrentRanger** (LowPowerLab, 2018), que ofrecen soluciones para la medición de corriente de bajo consumo. Estos proyectos proporcionan una base sólida para este estudio, aunque es necesario mejorar su capacidad de alternar automáticamente entre rangos de medición y reducir las pérdidas energéticas.

El propósito de este proyecto es diseñar una herramienta de medición de corriente que permita alternar automáticamente entre diferentes rangos, optimizando tanto la precisión como el consumo energético en dispositivos portátiles y sistemas embebidos. Esta herramienta busca maximizar la vida útil de las baterías en aplicaciones **IoT**, donde el monitoreo preciso del consumo de corriente es crucial para optimizar tanto el hardware como el software de los dispositivos.

El enfoque de este proyecto incluye el uso de **resistencias shunt**, **MOSFETs**, y **opamps en realimentación** para la amplificación precisa de la señal de corriente, mejorando la exactitud de las mediciones. Además, la **ESP32** se encarga de procesar y transmitir los datos a una interfaz gráfica para su visualización en tiempo real, integrando estas mejoras en el diseño general.

1.Marco teórico

1. Baterías de Litio en Sistemas Electrónicos: Las **baterías de ion-litio** son fundamentales en dispositivos electrónicos portátiles debido a su alta densidad energética y capacidad de recarga. Con un voltaje nominal de 3.7V, son ideales para alimentar sistemas que requieren una fuente de energía estable y de larga

duración, como la **ESP32**, que necesita funcionar de manera autónoma. Estas baterías requieren **circuitos de protección** para evitar sobrecargas o descargas profundas, que pueden reducir su vida útil. En este proyecto, se utiliza el **TP4056** para gestionar de forma segura la carga de la batería.

2. Cargadores de Batería de Litio: El **TP4056** es un cargador lineal eficiente para baterías de litio de celda única, con circuitos de protección integrados que controlan el proceso de carga para evitar sobrecargas. El proceso de carga sigue tres fases: carga rápida, carga constante y terminación de carga, optimizando el ciclo de vida de la batería.
3. **Conversores DC-DC Buck-Boost**: Los conversores DC-DC de tipo buck-boost permiten mantener un voltaje de salida estable incluso cuando el voltaje de entrada es menor o mayor al requerido, siendo así una opción versátil y eficiente para aplicaciones con variaciones en el voltaje de la batería. En este proyecto, se ha seleccionado un convertidor DC-DC buck-boost para asegurar un suministro constante de 3V, necesario para la ESP32, incluso si la batería cae por debajo de este nivel. Entre las opciones adecuadas para estas aplicaciones destacan el **LTC3440**, **LTC3531**, y **LTC3113**, que ofrecen alta eficiencia y capacidades de corriente adecuadas, lo que los hace ideales para circuitos alimentados por baterías.
4. Medición de Corriente con Resistencias Shunt: Las **resistencias shunt** permiten la medición de corriente al medir la caída de voltaje a través de ellas. En este proyecto, son esenciales para realizar mediciones precisas, con un **Burden Voltage** bajo para evitar errores. Un ejemplo típico es 5mV por 500mA.
5. MOSFETs como Interruptores de Baja Rds(on): Los **MOSFETs** se utilizan como interruptores para seleccionar entre diferentes resistencias shunt. Los **MOSFETs de baja Rds(on)**, como el **IRLZ44N**, son ideales en este proyecto para minimizar las pérdidas y mejorar la precisión en la medición de corriente.
6. Placa de Desarrollo ESP32: La **ESP32** es una placa de desarrollo con conectividad **Wi-Fi y Bluetooth**, ampliamente utilizada en sistemas embebidos. En este proyecto, se encarga de procesar las mediciones de corriente y transmitir los datos a través de **Wi-Fi**, permitiendo el monitoreo remoto del sistema.
7. Amplificadores Operacionales (Opamps): Los **amplificadores operacionales (opamps)** son componentes esenciales en el procesamiento de señales electrónicas, especialmente en sistemas de medición de corriente. En este proyecto, los opamps son utilizados tanto como **amplificadores de señal** para aumentar las pequeñas caídas de voltaje en las resistencias shunt, como también **comparadores** en los circuitos de

control. Como amplificadores, permiten que las variaciones de corriente en microamperios o miliamperios se conviertan en señales de voltaje más fácilmente detectables. En su función como comparadores, los opamps ayudan a decidir cuándo realizar un cambio entre los diferentes rangos de medición.

8. Endpoints y Comunicación entre Dispositivos: En el proyecto, la **ESP32** se comunica con otros dispositivos mediante **endpoints**, los cuales actúan como puntos de acceso a través de una red. Un **endpoint** es una URL o dirección específica que permite el intercambio de información entre la **ESP32** y cualquier dispositivo conectado, como un celular o computador. En este caso, los datos de medición de corriente se envían a través de estos endpoints, lo que permite que los dispositivos conectados reciban los valores en tiempo real y los muestren en la interfaz de usuario. Este enfoque asegura una comunicación eficiente y flexible entre el hardware y los visualizadores remotos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de medición de corriente para microcontroladores que permita monitorizar de manera precisa el consumo de corriente en diferentes modos operativos, con capacidad de cambio automático entre rangos de corriente.

2.2 Objetivos Específicos

2.2.1 Desarrollar del sistema de medición mediante simulación

Diseñar y simular un sistema de medición de corriente que permita validar el comportamiento del circuito de manera virtual.

2.2.2 Desarrollar el diseño del PCB

Desarrollar el esquema y diseño del PCB del sistema de medición de corriente, optimizando tamaño, consumo energético y costo, integrando los componentes seleccionados.

2.2.3 Desarrollar el sistema de visualización de lecturas de corriente.

Desarrollar un sistema de visualización inalámbrica que permita monitorizar las lecturas de corriente en tiempo real, proporcionando una interfaz de usuario sencilla .

3. Metodología

El diseño del circuito debe cumplir con características específicas que garanticen su correcto funcionamiento en microcontroladores. El sistema será operado por batería, lo que requiere un bajo consumo energético para maximizar la duración de la misma. El circuito estará orientado a la medición de **corriente continua**, y los rangos de medición serán de **500 mili amperios y 500 micro amperios**.

La transición entre estos rangos deberá ser manual o automática, dependiendo de las necesidades operativas. Para garantizar una interferencia mínima en el sistema, el circuito deberá tener un **Burden Voltage** de **5 mV/500 mA y 5 mV/500 μ A**, con una **salida máxima de 500 mV** en cualquier rango.

Finalmente, los datos de la medición deberán transmitirse **inalámbrica mente** a un dispositivo externo, como un celular o una computadora, para permitir el monitoreo remoto en tiempo real.

Todo esto se realizará mediante un desglose progresivo, partiendo de un modelo ideal del circuito hasta llegar a un desarrollo completo y detallado del sistema. Para validar el comportamiento del circuito, se realizarán simulaciones utilizando **LTspice**, lo que permitirá verificar el diseño antes de proceder a una posible implementación física.

3.1 Solución Ideal

El circuito de medición de corriente a voltaje es ampliamente utilizado en la industria y su construcción se basa en un **amplificador operacional (opamp)** configurado en **retroalimentación negativa**. En este tipo de

configuración, el opamp actúa como un amplificador de transimpedancia, convirtiendo la corriente de entrada en un voltaje proporcional, lo que facilita la medición precisa de corrientes.

Para lograr una medición efectiva de corriente en microcontroladores, debemos tener en cuenta las **resistencias de medición** asociadas a los **voltajes de fuga** característicos del sistema. Los valores de estas resistencias se pueden calcular utilizando la relación entre el **voltaje de fuga** y la **corriente máxima medida**. De esta manera, obtenemos:

- $R_{mA} = \frac{5\text{ mV}}{500\text{ mA}} = 10\text{ [m}\Omega\text{]}$

- $R_{\mu A} = \frac{5\text{ mV}}{500\text{ }\mu\text{A}} = 10\text{ [}\Omega\text{]}$

Con estos valores de resistencias, cumplimos las características de los voltajes de fuga exigidos por el sistema, asegurando una medición precisa sin introducir una carga significativa en el circuito.

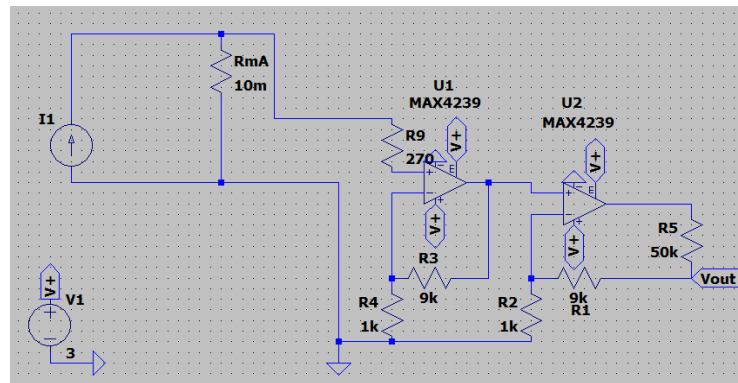


Figura 1: Circuito medición de corriente a voltaje

Como se puede observar en la Figura 1, emplea dos amplificadores operacionales en cascada para optimizar el filtrado de la señal y mejorar la adquisición de datos. Estos amplificadores fueron ajustados para utilizar completamente el rango de saturación y asegurar mediciones precisas en los modos de miliamperios y microamperios.

características	TLV333	OPA391	AD8538	MCP6V01	LTC6078	MAX4239
Offset tipico	3 μ V	5 μ V	1 mV	2 μ V	5 μ V	2 μ V
Deriva de offset	0.02 μ V/ $^{\circ}$ C	0.05 μ V/ $^{\circ}$ C	3 μ V/ $^{\circ}$ C	0.6 μ V/ $^{\circ}$ C	0.2 μ V/ $^{\circ}$ C	0.02 μ V/ $^{\circ}$ C
Ruido de entrada(0.1-10hz)	1.1 μ V _{pp}	1 μ V _{pp}	0.5 μ V _{pp}	1.6 μ V _{pp}	0.9 μ V _{pp}	1.1 μ V _{pp}
Corriente Reposo	17 μ A	12 μ A	45 μ A	115 μ A	55 μ A	1 mA
Vcc	1.8 - 5.5 V	1.7 - 5.5 V	2.7 - 5.5 V	1.8 - 5.5 V	2.7 - 5.5 V	2.85 - 5.5 V
Ancho de banda	350 kHz	10 MHz	5 MHz	1 MHz	3 MHz	4 MHz
Precio	\$5.435	\$10.918	\$11.061	\$10.775	\$41.669	\$20.167

Tabla 1: Comparativa Opamps de precision

El diseño original de **μ Current** (Jones, 2010) usa amplificadores MAX4239. Revisamos sus especificaciones junto a otros modelos recientes (Tabla 1), evaluando características como offset, deriva de offset, ruido de entrada, consumo en reposo, rango de voltaje, ancho de banda y precio. Aunque el **MAX4239** es adecuado, el **TLV333** destaca como la mejor opción en términos de precio y bajo consumo. A pesar de su ancho de banda limitado (350 kHz), es ideal para nuestro trabajo con señales **DC**, ofreciendo ventajas significativas en costo y eficiencia energética.

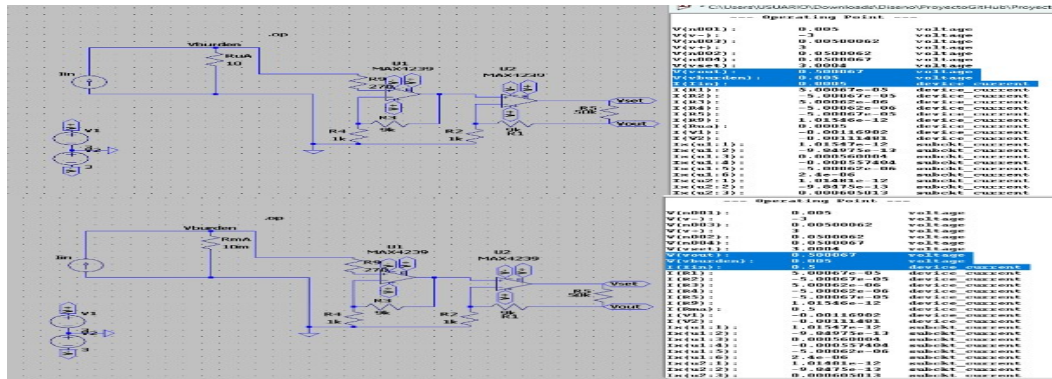


Figura 2: Comparativa medición en escala de mA y uA

En la simulación ideal de la Figura 2 se observa que, con corrientes de $500 \mu A$ y $500 mA$, el circuito entrega una salida de $500 mV$, cumpliendo con el objetivo de diseño. Esto se logró con una ganancia de 100, escalando adecuadamente las señales de corriente. Además, se aplicó una división de voltaje mediante una resistencia en serie en la salida del opamp, con un factor de 6, para ajustar la salida a $500 mV$ en el punto de medición (V_{out}) en ambos rangos, cumpliendo así las especificaciones del proyecto.

3.2 Solución por bloques

A partir de la solución ideal para la medición de corriente y su correspondiente rango de salida, se procede a desglosar el desarrollo de las demás características solicitadas, así como las mejoras que se desean implementar en el sistema. Estas mejoras se estructuran en bloques funcionales, cada uno de los cuales cumple una función específica dentro del sistema global.

3.2.1 Selector de Modo Automático

El modo de rango automático requiere un monitoreo constante de la salida. Cuando el voltaje supera el umbral máximo, el sistema cambia de μA a mA , y al caer por debajo del umbral mínimo, vuelve de mA a μA . Esto se logra usando opamps configurados como comparadores de señal, que detectan estos límites y realizan el cambio de rango automáticamente.

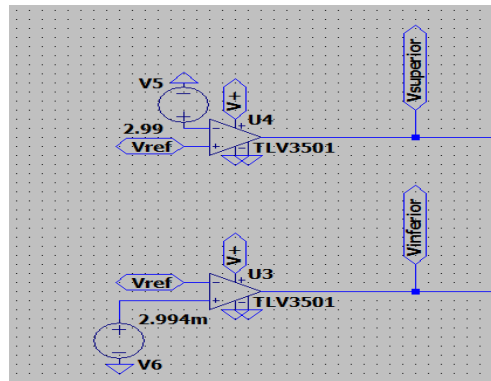


Figura 3: Circuito comparador umbral mínimo y máximo

En la Figura 3 se muestra que estos comparadores detectan los límites de cambio de rango. Al alcanzar el umbral predefinido, un MOSFET actúa como interruptor para cambiar entre microamperios y miliamperios, facilitando una transición suave y ajustando el circuito según la corriente medida.

Características	TLV3601	LTC6752	AD790	TLV3501
Propagacion típica	2.5 ns	2.9 ns	4 ns	4.5 ns
Vcc	2.7 - 5.5 V	2.7 - 5.5 V	2.7 - 5.5 V	2.7 - 5.5 V
Corriente de reposo	4.5 mA	2.9 mA	1 mA	1.8 mA
Frecuencia maxima	140 MHz	100 MHz	50 MHz	80 MHz
Precio	4.02	6.54	14.51	3.6

Tabla 2: Comparadores de alta velocidad

Según la Tabla 2, el comparador TLV3501 es la opción más rentable. Aunque no es el más rápido, su tiempo de respuesta y frecuencia son adecuados para medir cambios de modos en microcontroladores, un proceso que generalmente toma alrededor de 1 ms, lo que lo convierte en una opción aceptable.

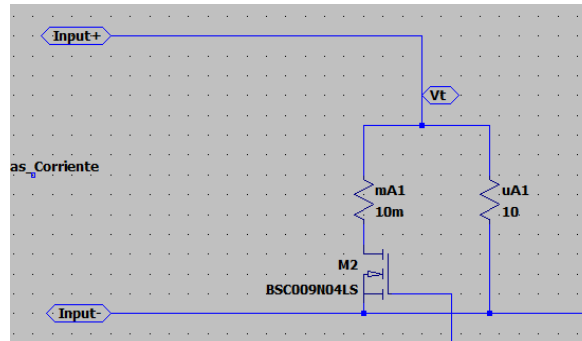


Figura 4: Circuito de resistencias de medición en rango automático

En la **Figura 4**, se observa que el MOSFET, con una referencia BSC009N04LS y una R_{ds} de aproximadamente $0.9\text{ m}\Omega$, se coloca en serie con la resistencia de $10\text{ m}\Omega$. Esto permite que el rango de microamperios funcione con la resistencia de $10\text{ }\Omega$; cuando se alcanza el valor máximo de salida, el MOSFET se activa automáticamente, redirigiendo la corriente al rango de miliamperios.

La corriente fluye por el camino de menor resistencia, por lo que, al encenderse el MOSFET, pasa por la resistencia de 10 mΩ, permitiendo una medición precisa en miliamperios. Es esencial que la resistencia de encendido del MOSFET sea baja para evitar caídas de tensión que afectarían la precisión en el rango de mA.

Con la señal lógica generada al superar los umbrales definidos, se puede implementar un sistema lógico para controlar el encendido del MOSFET, automatizando el cambio entre rangos y manteniendo la independencia del proceso de medición.

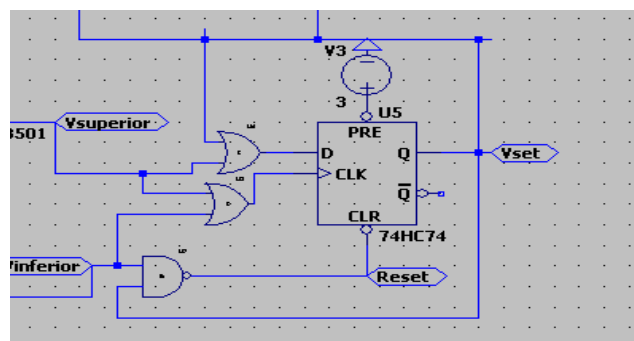


Figura 5: Circuito de lógica selección automática

En el circuito mostrado en la **Figura 4**, se implementa la lógica de encendido mediante un latch Set/Reset (SR). La entrada D (Set) utiliza una compuerta OR que recibe la señal del umbral superior y la salida del propio latch, manteniéndose activado hasta que se requiera cambiar. Esto previene cambios accidentales debido a la medición, pues la compuerta OR asegura que el umbral superior o el estado del latch configuren el sistema.

Para el cambio entre rangos, la entrada CLK del latch responde a flancos ascendentes, mientras que los umbrales superior e inferior generan el pulso de reloj a través de otra compuerta OR. Así, el sistema alterna automáticamente entre los rangos de microamperios y miliamperios según la corriente medida.

La señal CLR (Reset) está controlada por una compuerta NAND, lo que permite retornar al rango de μA cuando la corriente descende del umbral inferior. Esta configuración evita cambios inesperados en el estado del latch.

Característica	74HC74	SN74LV74	SN74AUC7	MC74VH1H74
Vcc	2 - 6V	1.8 - 3.6V	0.8 - 2.7V	1.65 - 5.5V
Corriente	20 μA	5 μA	<5 μA	1 μA
Delay	75 ns at 3V	10 ns	1.8 ns	3 ns
Precio	0.2	0.28	0.71	0.15

Tabla 3: Comparativa Latches S/R

En la Tabla 3 se observa que, aunque se probó el 74HC74, existen latches con mejores características a precios similares. Para el diseño final, es recomendable elegir un latch con tiempo de respuesta inferior al del comparador, asegurando que no sea más lento que este.

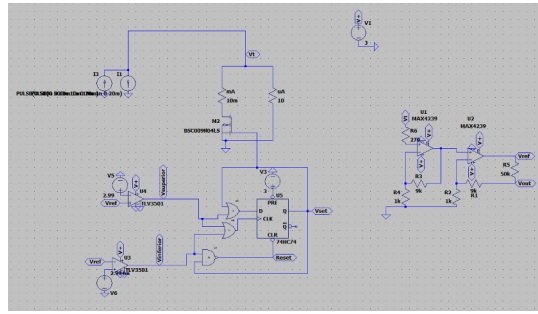


Figura 6: Circuito medición de corriente autónomo

En la **Figura 6** muestra el circuito completo de medición con el selector de rangos automático, que cambia entre los rangos de miliamperios y microamperios según los umbrales predefinidos. Para evaluar el comportamiento en simulación, se emplean dos fuentes de corriente: una para el rango de mA y otra para el de μA .

La simulación permite visualizar tanto la salida del sistema como las corrientes a través de las resistencias de medición. Esto confirma que el sistema cambia adecuadamente entre los rangos de $10\text{ m}\Omega$ para miliamperios y $10\text{ }\Omega$ para microamperios según el nivel de corriente, asegurando que el selector de rangos funcione de manera eficiente y precisa en el control de la medición.

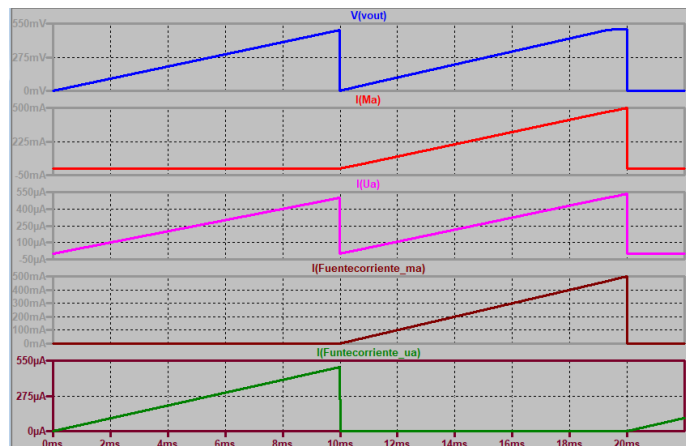


Figura 7: Resultados de simulación

En los resultados de simulación (Figura 7), los gráficos inferiores muestran el comportamiento del circuito con ambas fuentes de corriente activas. La segunda y tercera gráficas representan las corrientes a través de las

resistencias de medición. Cuando la corriente alcanza valores de miliamperios, la resistencia correspondiente se activa automáticamente, aunque hay una leve fuga en la resistencia del rango de microamperios.

En la primera gráfica se observa el voltaje de salida, que se mantiene cerca de 500 mV en ambos casos. Sin embargo, debido a la resistencia del MOSFET, el valor de salida en el rango de miliamperios presenta una ligera desviación respecto al ideal.

3.2.2 Módulo de Carga de Batería

Para maximizar el aprovechamiento de los recursos y garantizar un uso eficiente del circuito, se ha optado por utilizar una batería **Li-Ion** debido a su alta densidad energética y capacidad de recarga. Esto evita el desperdicio de recursos al eliminar la necesidad de reemplazar la batería constantemente.

Existen dos enfoques principales para implementar el sistema de carga:

1. **Compra de un módulo de carga preensamblado:** Esta opción incluye módulos como el **TP4056**, que ya vienen con las protecciones necesarias (contra sobrecarga, descarga profunda, etc.) y un puerto de carga USB integrado, lo que facilita su uso y reduce el tiempo de implementación.
2. **Diseño propio del circuito de carga:** Se puede diseñar un circuito utilizando componentes como el controlador **TP4056**, lo que ofrece mayor flexibilidad en la configuración de la carga. Sin embargo, este enfoque es más laborioso y puede implicar un mayor costo de desarrollo.

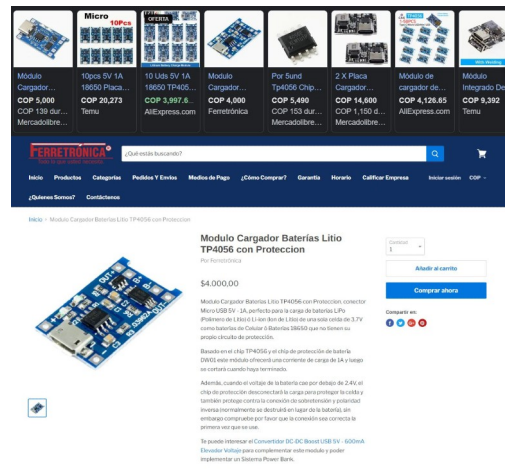


Figura 8: Disponibilidad del Módulo

Cargador TP4056: Distribuidores

Nacionales y Opciones Online

Dado que los módulos **preensamblados** ya incluyen todas las protecciones y puertos necesarios, suelen ser la opción más rentable y sencilla de integrar en el diseño.

En la **Figura 7**, se presenta un ejemplo de las opciones disponibles para la compra del módulo TP4056, tanto en distribuidores nacionales como en tiendas online.

3.2.3 Módulo Conversor DC-DC

Un componente adicional que se puede incorporar al diseño es un **convertor DC-DC**, el cual se utilizará para alimentar el **ESP32** y su módulo Wi-Fi, lo que permitirá el envío de datos de manera inalámbrica. Este convertor también será esencial para mantener un valor de alimentación fijo de **3V**, dado que fue bajo este voltaje que se realizó la calibración del sistema.

Al igual que el módulo de carga, el convertor **DC-DC** puede ser adquirido como un módulo preensamblado que cumpla con las características necesarias para garantizar la estabilidad de la salida. Una alternativa es diseñar un circuito propio utilizando componentes discretos, como el **LM2596**, que permite ajustar el voltaje de salida de forma precisa y garantiza la estabilidad del sistema.

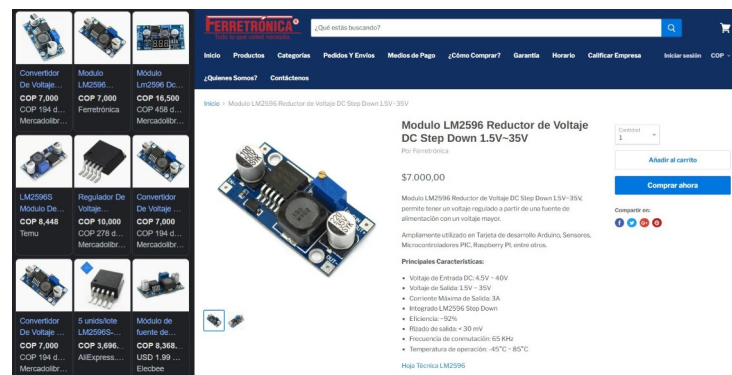


Figura 9: Disponibilidad del Módulo Reductor de Voltaje

LM2596: Opciones en Distribuidores Nacionales y Plataformas

Online

La elección entre adquirir un módulo preensamblado o diseñar uno propio dependerá de factores como el costo y el tiempo disponible. En muchos casos, optar por un módulo preensamblado es la opción más práctica, ya

que garantiza la estabilidad del voltaje sin poner en riesgo la calibración del sistema o la integridad del microcontrolador.

En la Figura 9, se muestra la disponibilidad del módulo **LM2596**, tanto en distribuidores nacionales como en plataformas de venta online.

4. Desarrollo del PCB

El desarrollo del **PCB** con los elementos seleccionados comienza con la realización de un bosquejo del **esquemático** en **LTspice**. Este esquema preliminar sirve como una representación inicial, permitiendo organizar los componentes y definir las conexiones, antes de decidir en qué programa se completará el diseño final del **PCB** para proceder con su construcción.

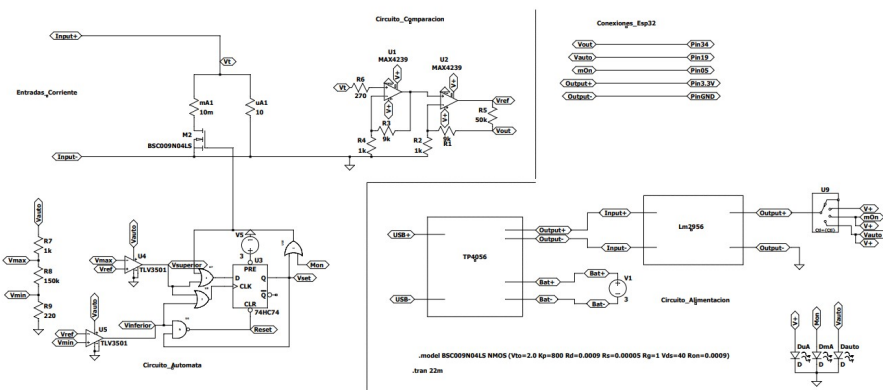


Figura 10: Esquemático Preliminar del PCB

En la **Figura 10**, se puede observar la organización y separación de los diferentes bloques del circuito, como el **circuito de comparación**, el **circuito automático**, y los integrados de **alimentación**, tales como el **TP4056** y el **LM2596**. También se incluyen implementaciones finales, como los **LEDs de encendido** para indicar cada modo de rango, así como las conexiones adicionales para la **ESP32**.

4.1 Esquemáticos PCB

Con todos los componentes del sistema identificados y claramente definidos, el siguiente paso es seleccionar el programa adecuado para la realización del **PCB**. Para este proyecto, se ha optado por utilizar **EasyEDA**, debido a su accesibilidad en línea y su amplio soporte de bibliotecas actualizadas. **EasyEDA** ofrece una gran variedad de componentes y proveedores, lo que facilita la integración de los elementos seleccionados en el diseño del **PCB**.

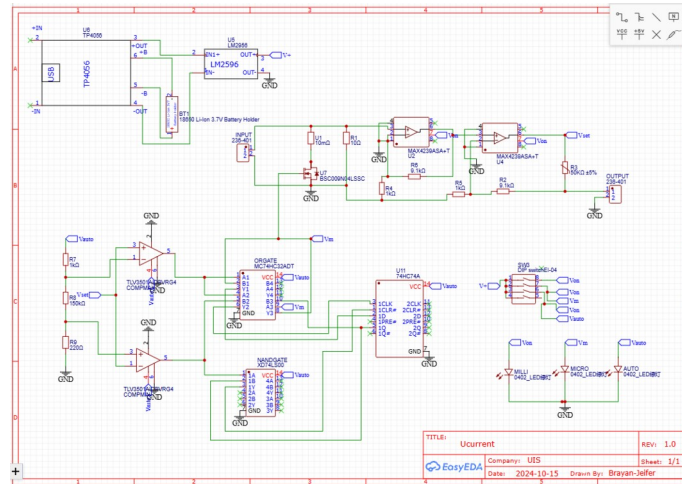


Figura 11: Esquemático Final

En la **Figura 11**, se presenta el resultado final del diseño en **EasyEDA**, mostrando la construcción del circuito con todos los componentes y sus respectivas referencias. Este enfoque también permite consultar precios y disponibilidad de los elementos en el mercado, información que se detalla en el **Apéndice Error: no se encontró el origen de la referencia**. Además, en el **Apéndice Error: no se encontró el origen de la referencia**, se encuentra el montaje de las capas del **PCB** para su fabricación.

5. Desarrollo de aplicación

Dadas las especificaciones requeridas para el circuito, donde la única función obligatoria del ESP32 es enviar los datos a una interfaz gráfica para su visualización en un computador o dispositivo móvil, es importante considerar la incertidumbre que se genera durante la conversión de una señal analógica a digital.

El ESP32 cuenta con un convertidor analógico a digital (ADC) de 12 bits, que presenta varios problemas de linealidad inherentes. Este problema es ampliamente conocido, como se describe en proyectos como

[How2Electronics](#). Debido a estas limitaciones, a menudo resulta necesario utilizar un convertidor analógico a digital externo para mejorar la precisión y reducir la incertidumbre en las mediciones.

Entre las opciones más comunes y efectivas se encuentran el **ADS1115**, un ADC de 16 bits, y el **ADS1220**, un ADC de 24 bits. Estos dispositivos permiten alcanzar menores márgenes de incertidumbre, mejorando la precisión de las mediciones. La incertidumbre en estos ADC se calcula considerando sus especificaciones técnicas y el rango de entrada de la señal, lo que garantiza resultados más confiables para aplicaciones de alta precisión.

$$resolucion = \frac{1}{2^{n - Bits}}$$

Este enfoque no solo asegura mediciones más precisas, sino que también permite superar las limitaciones del ADC interno del ESP32, logrando un sistema de monitoreo más robusto y confiable.

1. **Servidor web con el ESP32:** Se decidió optar por esta opción debido a la **autonomía del circuito**, ya que el ESP32 solo funcionará como un mediador entre el circuito de medición y el dispositivo de visualización. En este caso, se desarrollará un **servidor web** utilizando el ESP32, permitiendo que cualquier dispositivo conectado a su red visualice los datos a través de un navegador. La página web se desarrollará en **HTML**, lo que permitirá que los datos sean accesibles desde cualquier dispositivo con un navegador, siempre y cuando esté conectado a la red generada por el ESP32. Esta opción es práctica y versátil, permitiendo el acceso sin necesidad de instalar software adicional.
2. **Aplicativo dedicado:** Aunque se ha optado por el servidor web, se incluirá un apartado para explorar la posibilidad de desarrollar un **aplicativo dedicado**. Este enfoque permitiría cambiar el procesamiento de la señal, controlando completamente el sistema a través del microcontrolador **ESP32**. Un aplicativo dedicado podría desarrollarse tanto para computador como para dispositivos móviles, lo que ofrecería mayor control sobre el sistema y optimizaría la experiencia del usuario. Sin embargo, esta opción presenta la desventaja de requerir versiones distintas para cada tipo de dispositivo, además de la necesidad de que los usuarios instalen la aplicación.

Cada enfoque tiene sus ventajas y desventajas. El **servidor web** es más versátil y fácil de implementar, mientras que un **aplicativo dedicado** ofrece mayor control y personalización, con la posibilidad de modificar cómo se procesa y controla la señal directamente desde el **ESP32**.

5.1 Aplicativo mediante servidor web

El diseño del circuito es completamente autónomo en el procesamiento de la señal, y la **ESP32** se utilizará únicamente para transmitir la información a un dispositivo móvil o un computador. Por lo tanto, el desarrollo del **aplicativo de visualización** se centrará exclusivamente en mostrar el valor medido. Dado que el circuito del **latch** maneja la lógica del cambio de rangos, la **ESP32** solo deberá implementar un sistema que permita visualizar los datos a través de un navegador web.

El desarrollo del aplicativo web incluirá:

- Un **puerto de entrada** de la **ESP32** para la visualización del valor medido (corriente).
- Un **puerto de detección** que indicará si el sistema está operando en el rango de **miliamperios (mA)** o **microamperios (μ A)**.
- Un **puerto para el modo automático**, que indicará si el sistema está realizando los cambios de rango de manera automática.

Otra opción para visualizar los datos es conectando la **ESP32** a una red Wi-Fi existente. Conociendo la **dirección IP** de la **ESP32**, los usuarios podrán acceder a la interfaz web y visualizar los datos desde cualquier dispositivo conectado a la misma red. Esta alternativa ofrece mayor flexibilidad, permitiendo el acceso remoto a los datos sin necesidad de depender únicamente de la red generada por la **ESP32**.

Este diseño web permitirá a los usuarios visualizar, en tiempo real, el estado y las mediciones del sistema desde cualquier dispositivo conectado a la red de la **ESP32**, ya sea a través de su red local o una red Wi-Fi existente.



Figura 12: Visualización de Corriente en Tiempo Real
Mediante Interfaz Web Servida por ESP32: Compatible con
PC y Celular

En la **Figura 12**, se muestra la página web tanto en un **PC** como en un **dispositivo móvil**, ilustrando la interfaz diseñada para la visualización de los datos. En el **Apéndice A** se incluye el código fuente utilizado para el desarrollo del servidor web, junto con una explicación detallada de su funcionamiento. En este caso, la **ESP32** ha sido configurada para generar su propia red Wi-Fi, a la cual se conectan los dispositivos que visualizarán los datos.

5.2 Aplicativo dedicado

En un enfoque donde se utilice un **aplicativo dedicado**, la mejor opción sería eliminar la lógica de control del circuito en favor de un procesamiento centralizado en la **ESP32**. En lugar de depender del **latch** para los cambios de rango, el **procesamiento de la señal** se realizaría directamente en la **ESP32**, que se encargaría también de controlar el **MOSFET** encargado de los cambios entre los diferentes rangos de medición.

El desarrollo de este aplicativo dedicado incluirá:

- Un **puerto de entrada** en la **ESP32** para la visualización del valor medido (corriente).
- Un **puerto de activación**, que se encargará de controlar el encendido del **MOSFET** para alternar entre los diferentes rangos (microamperios, miliamperios y modo automático).

El uso de un **aplicativo dedicado** permite una mejora en la eficiencia del sistema, ya que elimina el procesamiento HTML en el propio ESP32. De esta manera, el microcontrolador puede operar en **modo de sueño ligero** la mayor parte del tiempo, despertándose únicamente cuando se detecte un cambio en la corriente o cuando sea necesario enviar datos. Este enfoque reduce el consumo de energía del sistema y optimiza el rendimiento general.



Figura 13: Visualización de Corriente Mediante
Aplicación Dedicada.

En laFigura 13Figura 13 , se muestra el desarrollo de la aplicación dedicada, la cual está diseñada para obtener los datos desde la **ESP32** mediante **endpoints** en la red. Los endpoints son **puntos de acceso** que permiten que la aplicación reciba la información desde la ESP32 de manera directa y eficiente. Este enfoque mejora la **reducción del procesamiento** en la ESP32, ya que solo se envían los datos básicos de la medición, y todo el procesamiento se realiza en la aplicación móvil. Al centralizar el procesamiento en la app, se asegura una experiencia de usuario más ágil y flexible, mientras que la ESP32 se encarga únicamente de la adquisición de datos.

6. Conclusiones

Este proyecto logró cumplir con los objetivos planteados, desarrollando un sistema de medición de corriente preciso y eficiente para dispositivos embebidos, como el ESP32. El sistema es capaz de alternar automáticamente entre los rangos de microamperios y miliamperios, gracias al uso de resistencias shunt, MOSFETs, amplificadores operacionales y la ESP32 como procesador central. Esto permite un monitoreo optimizado del consumo de corriente, contribuyendo a mejorar la eficiencia energética y extendiendo la vida útil de las baterías en aplicaciones IoT.

Se realizaron simulaciones previas en LTspice para validar el comportamiento del circuito antes de su implementación física. Esto garantizó la precisión en las mediciones y minimizó errores en el diseño.

Posteriormente, el diseño del PCB fue desarrollado en EasyEDA, lo que facilitó la integración de componentes, la optimización del espacio y el análisis de costos y disponibilidad en el mercado.

Adicionalmente, se implementaron dos opciones de visualización para las mediciones:

1. **Un servidor web alojado en la ESP32:** Permite un acceso rápido y universal desde cualquier dispositivo conectado a la red Wi-Fi generada por el ESP32.

2. **Una aplicación dedicada:** Ofrece una solución personalizada con mayor control sobre las funciones del sistema, aunque requiere instalación previa.

Ambas opciones demuestran la flexibilidad del sistema para adaptarse a diferentes necesidades, desde un monitoreo básico hasta un control más detallado y especializado.

El proyecto también exploró opciones para mejorar la autonomía del sistema, como el uso de un convertidor DC-DC buck-boost para mantener un suministro constante de 3V incluso cuando el voltaje de la batería cae por debajo de este nivel. Esto garantiza un rendimiento estable del sistema en condiciones de carga variables.

Análisis de Costos

ID	Name	Quantity	Price	Total
1	Leds	3	0,15	0,45
2	TLV3501AIDBVR	2	3,48	6,96
3	236-401	2	1,26	2,52
4	XD74LS00	1	0,173	0,173
5	MC74HC32ADT	1	0,163	0,163
6	10Ω	1	1,19	1,19
7	9.1kΩ	2	0,034	0,068
8	50KΩ ±5%	1	0,41	0,41
9	1kΩ	3	0,1	0,3
10	150kΩ	1	0,41	0,41
11	220Ω	1	0,008	0,008
12	DIP switch EI-04	2	0,45	0,9
13	10mΩ	1	0,1	0,1
14	TLV333	2	5,4335	10,867
15	LM2956	1	1	1
16	TP4056	1	2	2
17	BSC009N04LSSC	1	3,09	3,09
18	74HC74A	1	0,2	0,2
			Total	30,809

La tabla presentada muestra un desglose de los costos totales estimados del proyecto, los cuales ascienden a **30,809 COP**. Este análisis incluye:

1. Componentes principales:

TLV333 (10,867 COP): Representa el 35.3% del costo total. Este es un amplificador operacional clave para garantizar la precisión del circuito de medición.

TLV3501 (6,96 COP): Con un 22.5% del costo, este comparador rápido asegura la detección eficiente de transiciones en el sistema.

TP4056 (3,09 COP) y LM2596 (3 COP): Estos módulos de alimentación constituyen el 20% combinado del costo, destacándose como elementos esenciales para la regulación y recarga eficiente del sistema.

2. Resistencias y pequeños componentes:

Las resistencias (de 10 Ω a 150 k Ω) y elementos pasivos tienen costos individuales bajos (entre 0,008 y 0,21 COP), representando en conjunto menos del 5% del costo total. Su impacto económico es mínimo, pero son cruciales para el diseño del circuito.

3. Otros semiconductores y componentes discretos:

BSC009N04LS (0,39 COP): Este MOSFET, utilizado para el cambio de rangos, representa un costo insignificante del total, pero es clave para el correcto funcionamiento del sistema automático.

74HC74A (0,2 COP) y XD74LS00 (0,173 COP): Ambos componentes digitales soportan la lógica del sistema con un costo menor al 1% combinado.

Mejores prácticas y futuras mejoras

1. **Conectividad con redes Wi-Fi externas:** Una posible mejora sería permitir que la ESP32 se conecte a redes Wi-Fi con acceso a Internet, lo que permitiría enviar datos a una base de datos en la nube para monitoreo global. Esto abriría la puerta a nuevas aplicaciones, como la integración con plataformas de análisis de datos o servicios como Google Firebase.

2. **Pantalla integrada:** Incluir una pantalla en el dispositivo permitiría una supervisión inmediata de las mediciones sin depender de dispositivos externos.

3. **Carcasa protectora:** Diseñar un modelo 3D para imprimir una carcasa que proteja los componentes del circuito sería un paso importante para asegurar su durabilidad y facilitar su transporte y manejo.

4. **Optimización de la lógica de medición:** Se puede considerar el uso de un dispositivo lógico programable (PAL o FPGA) para mejorar la gestión de las transiciones entre rangos de medición, lo que podría reducir aún más el consumo energético y aumentar la velocidad de respuesta.

Impacto del proyecto

El desarrollo del sistema ha permitido aplicar conocimientos en electrónica analógica, programación de microcontroladores y diseño de interfaces gráficas. Además, se ha promovido el acceso abierto al conocimiento mediante la publicación de todos los elementos del proyecto en un repositorio de GitHub (Celis Godoy, 2024). Este repositorio incluye:

- Simulaciones realizadas en LTspice.
- Programación del ESP32 para ambas opciones de visualización.
- Diseños del PCB junto con el análisis de costos y disponibilidad de componentes.
- El informe completo detallando cada etapa del proyecto.

Esto fomenta la colaboración y el uso del sistema como base para futuras mejoras o aplicaciones en la industria.

Referencias Bibliográficas

- Celis Godoy, B. A. (2024). **Proyecto Ucurrent UIS** [Repositorio GitHub]. GitHub.
<https://github.com/BrayanACelisGodoy/ProyectoUcurrentUIS>
- Jones, D. (2010). **μCurrent - Low Level Current Measurement Adapter**. *EEVblog*.
<https://www.eevblog.com/projects/ucurrent/>
- Libbey, R. (2017). **Resistencias Shunt para Medición de Corriente**. *All About Circuits*.
<https://www.allaboutcircuits.com>
- LowPowerLab. (2018). **CurrentRanger - A Low Power Precision Current Meter and Data Logger**.
Low Power Lab. <https://lowpowerlab.com/guide/currentranger/>
- Redondo, S. (2020). **Baterías de Ion-Litio: Usos y Características**. *Electro-Tech Online*.
<https://www.electro-tech-online.com>
- SparkFun Electronics. (2021). **ESP32 Development Guide**. *SparkFun Tutorials*.
<https://www.sparkfun.com>
- Texas Instruments. (2019). **DC-DC Buck Converter Applications**. *Technical Note*. <https://www.ti.com>
- Wolf, D. (2018). **MOSFET Switching and Application in Power Electronics**. *Power Electronics Magazine*. <https://www.powerelectronics.com>

