

A20 - Proyecto I

SISTEMA DE MONITOREO DE RED ELÉCTRICA DOMÉSTICA Y/O INDUSTRIAL

Mancinelli, Alejo (M-6708/3)

Director: Ing. Novello, Armando
Director Externo: Ing. Gentile, Aldo

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería, y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Electrónica

Rosario, Santa Fe
2024



Irregularidades en la Red Eléctrica	2
Objetivo	4
Alcance	4
Antecedentes Tecnológicos	5
Sense	5
Inhab™ Energy Monitor	6
D52-2066 Digital Display Meter	7
Propuesta de Solución Planteada	8
Medición de energía	8
BL0940 Calibration-Free Metering IC	8
CS5480 (Cirrus Logic)	9
ACS37800 (Allegro microsystems)	10
Comparación y Elección	11
Medición de Tensión y Corriente	12
Microcontrolador	13
ESP32	14
ESP8266	15
Alimentación	16
PCB	16
Unidad Central de Procesamiento	17
Raspberry Pi 3 Model B+	17
Raspberry Pi Zero	18
Raspberry Pi Pico	19
Comparación y Elección	19
Comunicación BL0940 - ESP8266	20
SPI (Serial Peripheral Interface)	20
UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)	20
Comparación y Elección del Protocolo	21
Comunicación ESP8266 - Raspberry Pi	21
MQTT	21
Interfaz web	22
Sistema de alarma	23
Portabilidad	23
Estructura del proyecto	24
Resultados Esperados	25
Sistema de Alimentación	25
Medición de Energía	25
Alarmas	25
Bibliografía	26

Irregularidades en la Red Eléctrica

Debido al avance tecnológico, la cantidad de dispositivos eléctricos en los hogares ha experimentado un incremento significativo en las últimas décadas, una tendencia que se espera continúe en el futuro cercano. Este aumento en la demanda eléctrica plantea desafíos para las empresas generadoras y distribuidoras de energía. En Argentina, se ha observado una tendencia creciente en el consumo eléctrico desde la década de 1990 hasta el año 2022.

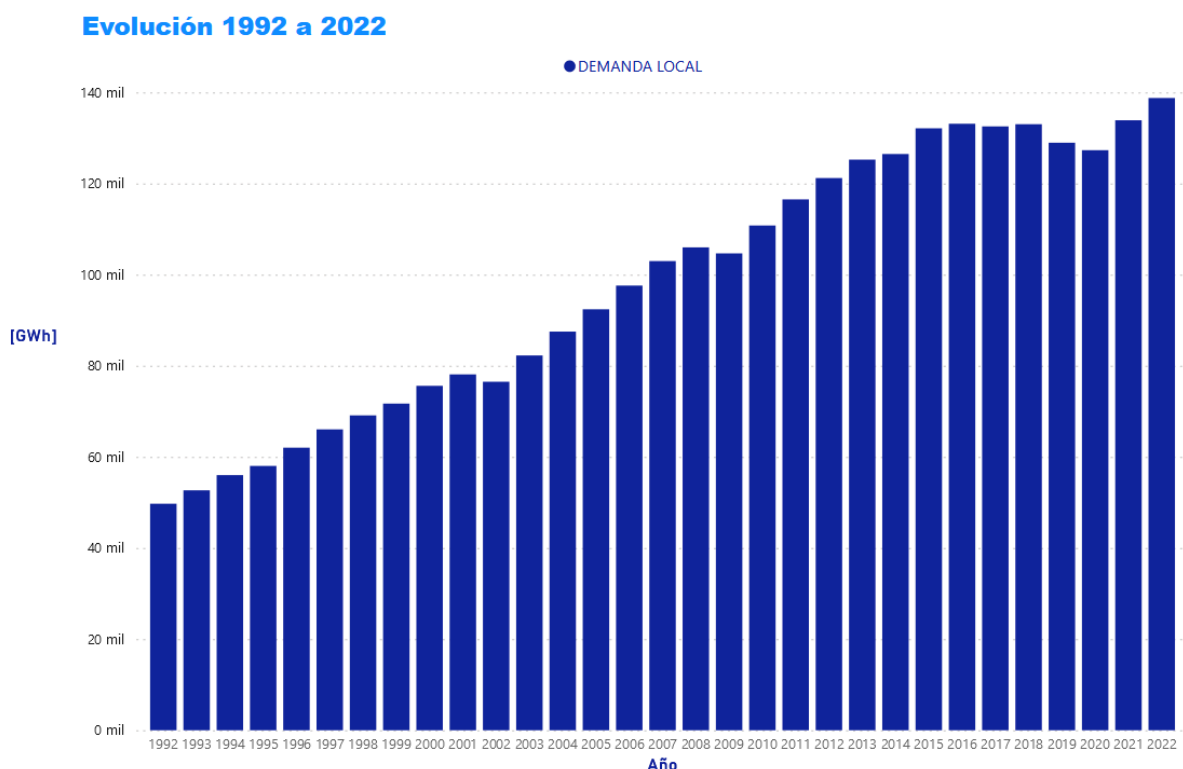


Figura 1: Evolución de la demanda energética en Argentina

Cuando la demanda energética excede la capacidad de la red de distribución, como suele ocurrir durante los meses de verano debido al uso intensivo de aires acondicionados por ejemplo, pueden surgir irregularidades en el suministro eléctrico. Además, factores ambientales, como las tormentas eléctricas con caída de rayos, así como situaciones industriales, como la conexión de grandes cargas inductivas, también pueden afectar el funcionamiento de la red. Los posibles comportamientos anómalos incluyen:

- **Transitorios:** se dividen en impulsivos y oscilatorios. Los transitorios impulsivos causan fluctuaciones abruptas en la tensión durante períodos de 50 ns. Los transitorios oscilatorios provocan variaciones alternas en la señal eléctrica.
- **Interrupción:** pérdida total del suministro eléctrico, que puede ser instantánea (0.5 a 30 ciclos), momentánea (30 ciclos a 2 segundos), temporal (2 segundos a 2 minutos) o sostenida (más de 2 minutos).



- **Caída de tensión o subtensión:** disminución del nivel de tensión por debajo del valor normal de 220V.
- **Aumento de tensión o sobretensión:** aumento del nivel de tensión por encima del valor normal de 220V.
- **Distorsión de forma de onda:** alteración en la forma de onda de la tensión o corriente, que puede incluir compensación de corriente continua, distorsión armónica, distorsión interarmónica, muesca y ruido.
- **Fluctuación de la tensión:** cambios aleatorios en la tensión eléctrica.

Estas irregularidades pueden causar daños a los dispositivos eléctricos, reducir su vida útil, o dejarlos inservibles. Por esta razón, existen dispositivos de protección, como fusibles y disyuntores, reguladores de voltaje, UPS, supresores de sobretensión, entre otros. Además de la protección, es fundamental comprender el funcionamiento de la red para tomar medidas apropiadas, como seleccionar las protecciones adecuadas, comunicarse con la empresa distribuidora local en caso de problemas en el área, o identificar fallos en la red doméstica causados por dispositivos defectuosos.

Conocer el consumo eléctrico también contribuye a un uso más eficiente de la energía, permitiendo identificar los electrodomésticos de mayor consumo y tomar acción para optimizar su uso. Este mismo análisis se puede aplicar al sector industrial, abarcando a las máquinas y equipos industriales.

Objetivo

Dada la importancia de abordar las problemáticas asociadas con las irregularidades en la red eléctrica, se plantea la necesidad de diseñar e implementar un sistema que permita la medición de la tensión y la corriente de manera monofásica. El propósito principal de este sistema es identificar anomalías en la red y notificar al usuario a través de un sistema de alarma. Además, se busca establecer un historial de consumo que sea accesible desde una página web, lo que proporcionaría al usuario un mayor control sobre su consumo energético.

Se busca independizar la medición de energía del procesamiento de datos, facilitando la instalación del dispositivo, y brindando una mayor escalabilidad al proyecto. Además, permite al usuario utilizar hardware ya disponibles, instalando los programas necesarios, permitiendo una mayor adaptabilidad y economizando los costos de aplicación. De esta forma se pueden contar con sistemas de alimentación de respaldo disponibles comercialmente, para mantener activa las alertas y la página web en caso de cortes de energía.

Este enfoque integral busca no solo detectar las irregularidades en la red eléctrica, sino también brindar al usuario la capacidad de tomar medidas preventivas y de protección adecuadas. La combinación de alertas en tiempo real y un historial detallado de consumo contribuirá significativamente a mejorar la gestión y eficiencia energética en el entorno residencial o industrial donde se implemente este sistema.

Alcance

- Funcionamiento monofásico
- Rango de tensión de entrada: 110-240V
- Corriente máxima: 30A
- Capacidad de detección y alerta de:
 - Subtensión
 - Sobretensión
 - Sobrecorriente
 - Corte de energía
 - Sobreconsumo según un valor de referencia
- Historial de consumo energético
- Interfaz gráfica con visualización de historial de consumo y seteo de valores de consumo máximo
- Sistema de alarma ante irregularidades en la red por mensajería celular
- Conectividad WiFi
- Alimentación 220V para sensor de energía
- Unidad central de procesamiento
- Portabilidad de programas

Antecedentes Tecnológicos

Comercialmente se encuentran en el mercado dispositivos de prestaciones similares que cumplen parcialmente los objetivos planteados.

Sense

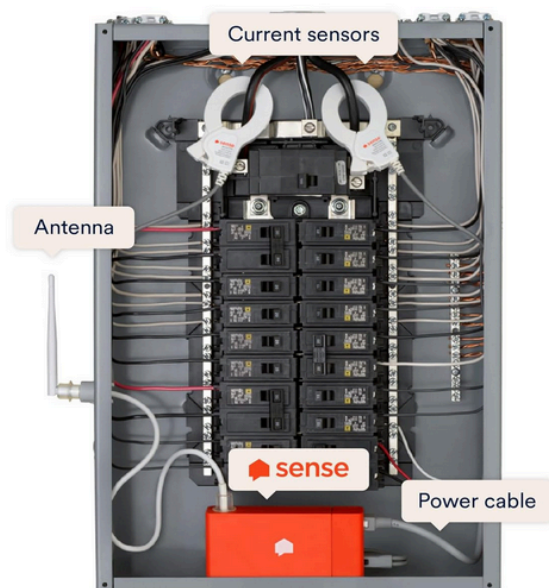


Figura 2: Sistema domiciliario de medición de energía “Sense”

El dispositivo en cuestión se conecta al tablero de protecciones mediante sensores de corriente del tipo Bobina de Rogowski. A partir de estas mediciones, calcula el consumo de energía y lo muestra en tiempo real a través de una aplicación dedicada. Además, la aplicación permite visualizar el historial de consumo, y alerta sobre posibles irregularidades detectadas.

El propósito principal de este dispositivo es monitorear el consumo energético en entornos residenciales. Su funcionamiento se distingue por la capacidad de emplear algoritmos de aprendizaje automático, lo que le permite identificar con precisión los distintos aparatos eléctricos presentes en el hogar y determinar su consumo energético individual.

Su precio oscila entre 300 y 350 dólares, dependiendo de si se desea medir únicamente la energía proveniente de la red eléctrica, o si se requiere también la medición del consumo energético por áreas específicas dentro de la vivienda. Su funcionamiento es en el rango de los 110-240V, hasta 200A en los sensores principales, y 50A en los sensores de distribución.

Es importante señalar que el diseño y método de instalación de este dispositivo están diseñados para tableros de protecciones estadounidenses, lo que podría requerir modificaciones para su instalación en otros sistemas eléctricos.

A pesar de cumplir con los objetivos planteados, la inclusión de características avanzadas, como la identificación de electrodomésticos mediante inteligencia artificial, puede incrementar significativamente su precio, y la ausencia de una fuente de alimentación externa lo hace susceptible a fallos en la distribución eléctrica.

Inhab™ Energy Monitor



Figura 3: Sistema domiciliario de medición de energía “Inhab Energy Monitor”

Este dispositivo, similar al producto Sense, se conecta al tablero de protecciones a través de sensores de corriente del tipo Bobina de Rogowski. A través de una aplicación dedicada, proporciona la capacidad de visualizar el consumo de energía en tiempo real, así como acceder al historial de consumo y recibir alertas sobre posibles irregularidades eléctricas.

Funciona en 110-240V, hasta 200A los sensores principales, y hasta 50A los sensores de distribución, con una publicación de parámetros cada 1 seg. Posee un precio aproximado de 280 dólares.

Es importante tener en cuenta que carece de alimentación externa, lo que lo hace vulnerable a interrupciones en la distribución eléctrica.

D52-2066 Digital Display Meter



Figura 4: Sistema industrial de medición de energía “D52-2066”

Este dispositivo posibilita la medición del consumo de una fase de la red eléctrica, y está equipado con un display que muestra diversos parámetros eléctricos, incluyendo voltaje, corriente, potencia activa, factor de potencia, frecuencia, y energía eléctrica. Sus rangos de operación son:

- Tensión: AC 40-300V, AC 200-450V
- Corriente: AC 0-100A con una resolución de 0.01A
- Frecuencia: 45Hz-65Hz
- Factor de potencia: 0.00-1.00
- Potencia: 0-45000W
- Energía: 0-99999KWh

Además, es capaz de realizar hasta 2 mediciones por segundo.

A diferencia de los productos previamente mencionados, este dispositivo está diseñado para su implementación en entornos industriales. Incorpora un enganche para riel DIN, lo que facilita su instalación en un tablero eléctrico estándar.

El precio de este dispositivo es de 30 dólares, sin embargo, carece de la capacidad para visualizar parámetros de forma remota, no ofrece un historial de consumo, y tampoco dispone de una función de alarma ante posibles irregularidades eléctricas.

Propuesta de Solución Planteada

Medición de energía

Para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema, es crucial contar con un sensado preciso de la energía de la red. Esto permite detectar de manera efectiva cualquier irregularidad, lo que facilita la posterior notificación y activación de alarmas correspondientes.

El sensado de energía se lleva a cabo a partir de la medición de manera independiente de tensión alterna y corriente alterna. Posteriormente, se aplican operaciones algebraicas para calcular el consumo energético total siguiendo la fórmula de energía:

$$E [Wh] = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos(\varphi) \cdot t$$

A continuación, se presentan y comparan posibles sensores para la aplicación requerida:

BL0940 Calibration-Free Metering IC

Este circuito integrado se utiliza para la medición monofásica de energía. Utiliza dos conversores ADC sigma-delta para medir simultáneamente la tensión y la corriente, lo que permite realizar cálculos energéticos precisos. Sus capacidades incluyen la medición de tensión y corriente RMS, potencia activa, y energía. Además, está equipado con protocolos de comunicación SPI y UART para la transmisión eficiente de datos.

Posee los siguientes rangos de operación:

- Corriente: 10 mA a 35 A
- Potencia activa: 1 W a 7700 W

El circuito integrado funciona con una tensión de alimentación de 3.3V y consume solo 10 mW de potencia. Además, cuenta con una función de detección de sobrecorriente, con un tiempo de respuesta máximo de 40 ms, de gran utilidad para la aplicación buscada.

Este integrado está disponible para su adquisición en paquetes de 10 unidades, con un precio total de \$3600.

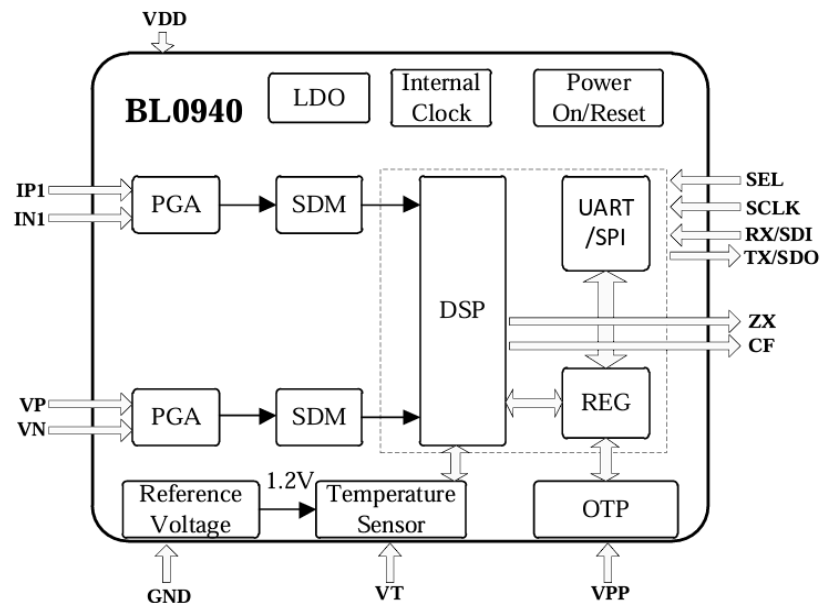


Figura 5: Diagrama esquemático del BL0940

CS5480 (Cirrus Logic)

Este circuito integrado representa un medidor de energía de alta precisión con tres canales, cada uno equipado con convertidores analógico-digitales delta-sigma. Su versatilidad permite la medición precisa de potencia activa, reactiva, y aparente, así como los valores RMS de tensión y corriente, junto con el factor de potencia. Además, está dotado de protocolos de comunicación SPI y UART para la transmisión eficiente de datos.

Una característica destacada de este chip es su capacidad para configurar interrupciones ante la detección de eventos como caídas de tensión, aumentos de tensión, sobrecorriente, entre otros. Esta funcionalidad lo convierte en una opción completa y adaptable para la aplicación requerida.

El circuito integrado opera con una tensión de 3.3V y consume menos de 13mW, lo que lo hace eficiente en términos de consumo de energía.

Este dispositivo tiene un precio aproximado de \$4000 por unidad.

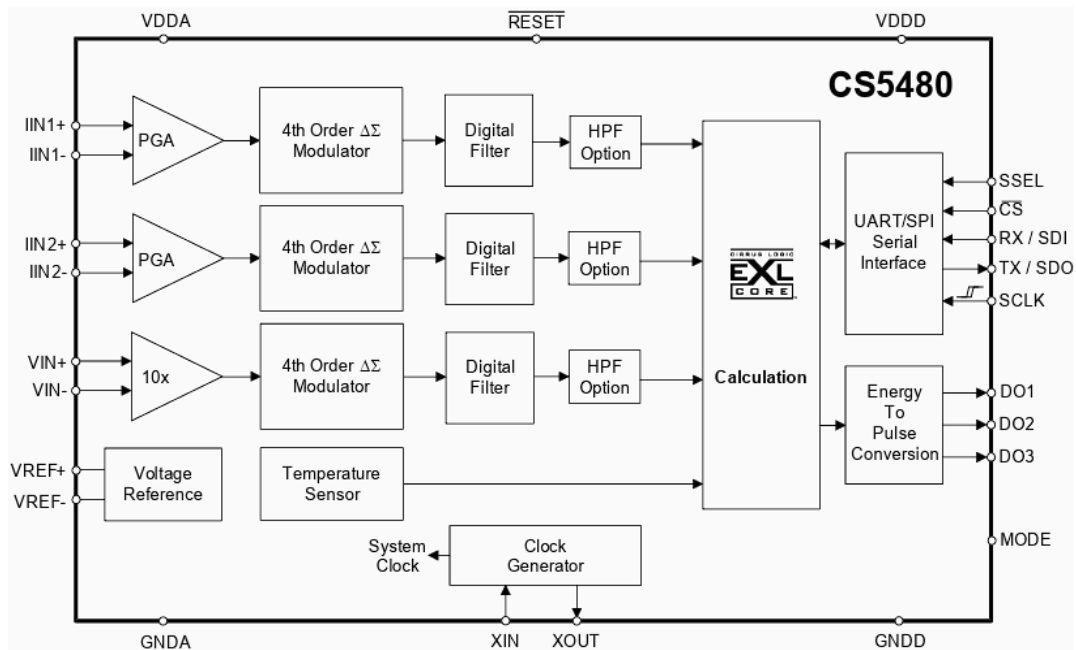


Figura 6: Diagrama esquemático del CS5480

ACS37800 (Allegro microsystems)

El circuito integrado en cuestión ofrece funcionalidades avanzadas para la medición de energía en sistemas monofásicos. Equipado con tecnología de efecto Hall galvanicamente aislada, permite una medición precisa de corriente sin la necesidad de contacto físico con el conductor, garantizando un aislamiento seguro.

Integra sensores tanto para la medición de tensión como de corriente alterna, eliminando la necesidad de componentes adicionales externos y simplificando el diseño del circuito. Esto facilita la implementación de sistemas de medición de energía eficientes y compactos.

Además de la medición básica de tensión y corriente, el circuito integrado ofrece capacidades avanzadas para el cálculo de potencia activa, reactiva y aparente, así como el factor de potencia. Esto proporciona una amplia gama de mediciones útiles para el análisis y la gestión de la energía eléctrica.

El dispositivo también cuenta con pines de entrada/salida configurables que permiten la implementación de medidas de seguridad y protección, como avisos de subtensión, sobretensión y sobrecorriente. Con interfaces de comunicación SPI e I2C integradas, el circuito facilita la integración con sistemas de control y monitoreo, permitiendo la transmisión eficiente de datos a otros dispositivos.

Ofrece opciones de sensado de corriente de 15A, 30A o 90A, dependiendo de la versión del integrado. Además, para funcionar con una alimentación de 3.3V o 5V, según corresponda, y posee un bajo consumo de energía. Su precio es de USD 6.76 por unidad.

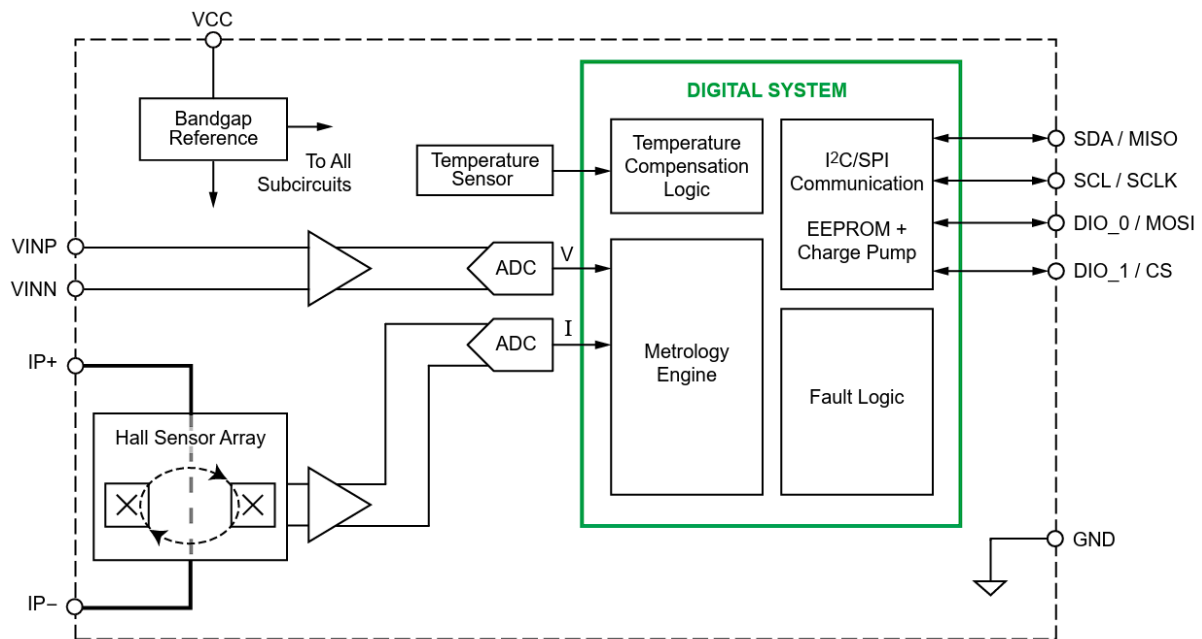


Figura 7: Diagrama esquemático del ACS37800

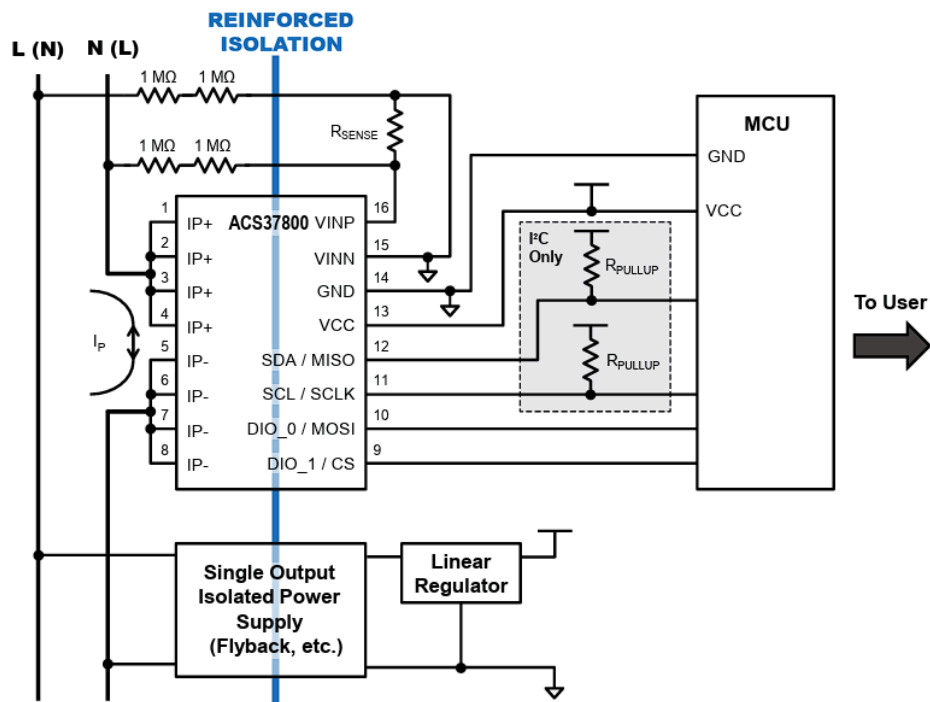


Figura 8: Circuito de aplicación para el ACS37800

Comparación y Elección

Dado que todos los dispositivos poseen las características necesarias para el desarrollo de este proyecto, se elige utilizar el BL0940 debido a la gran diferencia de precio que posee este respecto a los otros circuitos integrados, además de su mayor disponibilidad en el

mercado. Las ventajas de interrupciones que poseen unos dispositivos sobre otros pueden ser replicadas mediante software, aunque sin obtener la misma velocidad de respuesta. Sin embargo, no se requiere tomar medidas de forma inmediata ante irregularidades en la red, por lo que esto no sería un inconveniente. Por otro lado, la ventaja de aislación galvánica que presenta el ACS37800 puede replicarse mediante un transformador de tensión y un transformador de corriente, como se detalla a continuación. Además, se puede mejorar el rango de corriente admisible, a coste de una menor resolución.

Medición de Tensión y Corriente

En la hoja de datos de circuitos de aplicación para el sensor de energía BL0940 se especifica la siguiente configuración:

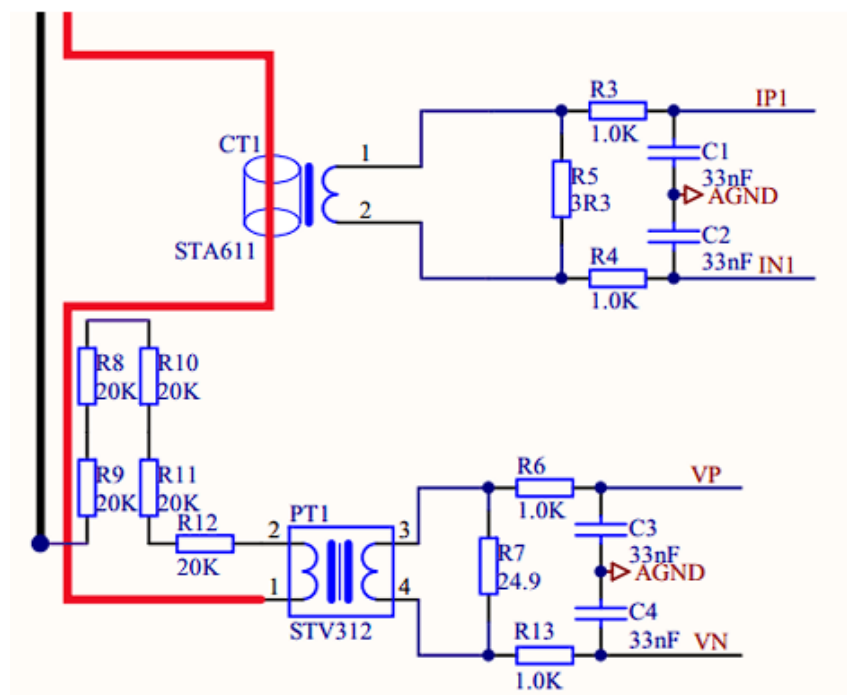


Figura 9: Circuito de aplicación para el BL0940

La medición de tensión se realiza mediante un conjunto de resistencias en configuración divisor resistivo, para disminuir el voltaje a un valor admisible por el circuito integrado, y un transformador de tensión 1:1, que brinda aislación galvánica entre sus bobinados primarios y secundarios. El uso de este transformador es opcional, pero agrega una protección adicional al sistema. Se utiliza una carga de 24.9Ω con un filtro RC, mejorando la precisión de la medición.

La medición de la tensión se rige por la siguiente fórmula:

$$V_{RMS-Reg} = \frac{79931 \cdot V(V)}{V_{ref}}$$

Donde V_{RMS} es el valor del registro donde se almacena la medición del voltaje, y V_{ref} tiene un valor típico de 1.128V.

Añadiendo el divisor resistivo, se obtiene:

$$V_{RMS} = \frac{V_{RMS-Reg} \cdot V_{ref} \cdot (R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11} + R_{12})}{79931 \cdot R_7 \cdot 1000} V$$

Las resistencias R_7 , R_8 , R_9 , R_{10} , R_{11} , y R_{12} pueden modificarse para optimizar el rango de medición y la precisión, según sea necesario. Además, existe la posibilidad de utilizar un número distinto de resistencias en el divisor resistivo, siempre teniendo en cuenta la potencia máxima que soportan las mismas.

Por otro lado, la medición de corriente se realiza utilizando una resistencia shunt, en este caso de valor 3.3Ω , conectada mediante un transformador de corriente de relación 2000:1. El transformador aísla galvánicamente al circuito integrado de la medición, brindando una protección adicional al sistema. A su vez, permite mejorar la resolución, o agrandar el rango de medición, según sea necesario, dependiendo la relación entre los bobinados y la resistencia shunt. Por último, utiliza un filtro RC para mejorar la precisión.

La medición de la corriente se rige por la siguiente fórmula:

$$I_{RMS-Reg} = \frac{324004 \cdot I(A)}{V_{ref}}$$

Donde I_{RMS} es el valor del registro donde se almacena la medición del corriente, y V_{ref} tiene un valor típico de 1.128V.

Añadiendo el transformador de corriente y la resistencia shunt, se obtiene:

$$I_{RMS} = \frac{I_{RMS-Reg} \cdot V_{ref}}{324004 \cdot (R_5 \cdot 1000) / R_t} A$$

Microcontrolador

El microcontrolador actuará como intermediario entre el dispositivo de medición de energía y la unidad central de procesamiento. Debe ser capaz de comunicarse con los sensores utilizando protocolos de comunicación UART o SPI, además de comunicarse con la unidad central de procesamiento, preferentemente a través de WiFi para que ambos dispositivos no necesiten estar vinculados físicamente.

ESP32

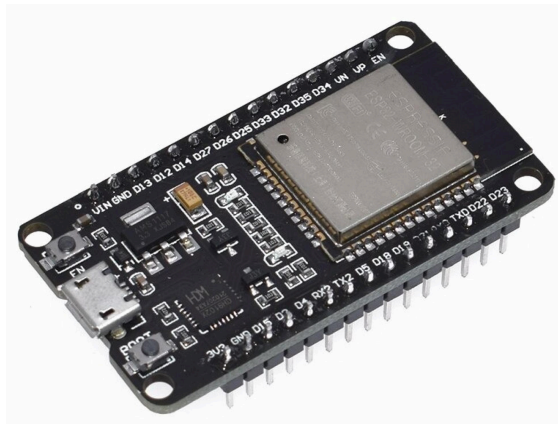


Figura 10: SoC ESP32 modelo Nodemcu ESP-Wroom-32

El System-on-Chip (SoC) de bajo costo desarrollado por Espressif, reconocido por su diseño robusto y apto para aplicaciones industriales, se distingue principalmente por su capacidad de comunicación WiFi mediante el protocolo TCP/IP incorporado. Además, ofrece interfaces que posibilitan la comunicación I2C, SPI, o UART con otros dispositivos periféricos. Esta solución, que cuenta con una gran eficiencia energética, presenta las siguientes especificaciones en su variante en la placa de desarrollo Nodemcu ESP-Wroom-32:

- Voltaje de Alimentación: 5V DC
- Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC
- Frecuencia de Reloj: hasta 240 MHz
- Protocolo WiFi: 802.11 b/g/n/e/i
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR y Bluetooth de Bajo Consumo de Energía (BLE)
- Memoria ROM: 448 KB
- Memoria SRAM: 520 KB
- Memoria Flash/SRAM QSPI, 4 MB
- Pines Digitales de Entrada/Salida (GPIO): 24 (Algunos configurables solo como entrada)
- Convertidores Analógico-Digital (ADC): Dos ADC de 12 bits tipo SAR, admitiendo hasta 18 canales, con algunos pines equipados con amplificadores de ganancia programable
- Puertos UART: 2

ESP8266

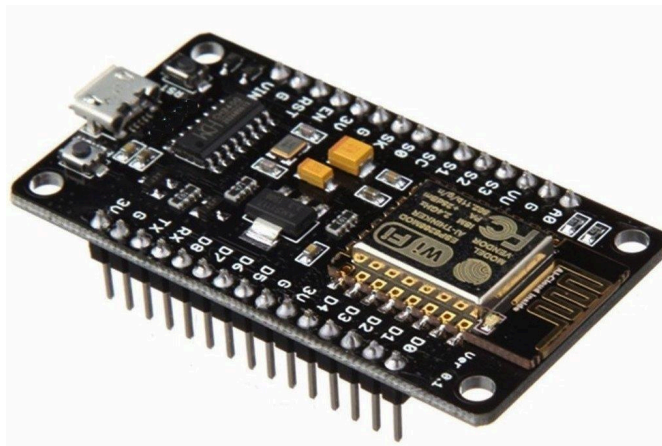


Figura 11: SoC ESP8266 modelo Nodemcu Wifi ESP8266

El ESP8266, otro SoC desarrollado por Espressif, destaca por su bajo costo y ofrece una alternativa con funcionalidades similares al ESP32, aunque con prestaciones reducidas. Este dispositivo conserva las características principales de su contraparte, incluyendo conectividad WiFi mediante el protocolo TCP-IP, capacidad de comunicación con dispositivos periféricos mediante los protocolos I2C, SPI o UART, y una eficiencia energética notable. La placa de desarrollo Nodemcu Wifi ESP8266 presenta las siguientes especificaciones:

- Voltaje de Alimentación: 5V DC
- Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC
- CPU: Tensilica Xtensa LX3 (32 bits)
- Frecuencia de Reloj: 80 MHz/160 MHz
- Memoria de Instrucciones RAM: 32 KB
- Memoria de Datos RAM: 96 KB
- Memoria Flash Externa: 4 MB
- Pines Digitales de Entrada/Salida (GPIO): 17 (con posibilidad de configurarse como PWM a 3.3V)
- Pin Analógico Convertidor Digital (ADC): 1 (rango de 0-1V)
- Puertos UART: 2
- Protocolo WiFi: 802.11 b/g/n

En comparación con el ESP32, el ESP8266 se presenta como una opción más económica, manteniendo características similares. Dado que la función específica de este microcontrolador consiste únicamente en interactuar con el sensor de energía y transmitir la información a la unidad central de procesamiento mediante algún protocolo de comunicación utilizando WiFi, sus prestaciones son adecuadas para cumplir con los requisitos establecidos sin dificultades.

Alimentación

El circuito integrado funciona a 3.3V con un consumo de 10mW, mientras que el microcontrolador ESP8266 necesita 5V con un consumo máximo de 100 mA aproximadamente. Para alcanzar los requisitos necesarios de alimentación, se utilizará una fuente switching 220V a 5V, con corriente mínima de 1A. Se deberá tener dos alimentaciones, de 5V y 3.3V, para los distintos dispositivos, por lo que se deberán utilizar reguladores de tensión.

Se contarán con las medidas de protección necesarias para garantizar el cuidado de los dispositivos, como fusibles ante sobrecorrientes, y protección contra sobretensión.

La alimentación de la unidad central de procesamiento queda fuera del alcance de este proyecto, quien dependerá de qué dispositivo se utilice y de su consumo. Existen diversas opciones comerciales de alimentación, algunas que cuentan con fuentes de alimentación de respaldo, lo que permitiría mantener al sistema en funcionamiento aún ante cortes de energía.

PCB

Todo el sistema estará integrado en un PCB de diseño propio. Contará con un sector de potencia, dedicado a la alimentación mediante la fuente switching, un sector para el circuito del medidor de energía, y por último un sector para la placa de comunicación.

El diseño esquemático y se PCB se realizará mediante el software gratuito Kicad, siguiendo los estándares de diseño correspondientes.

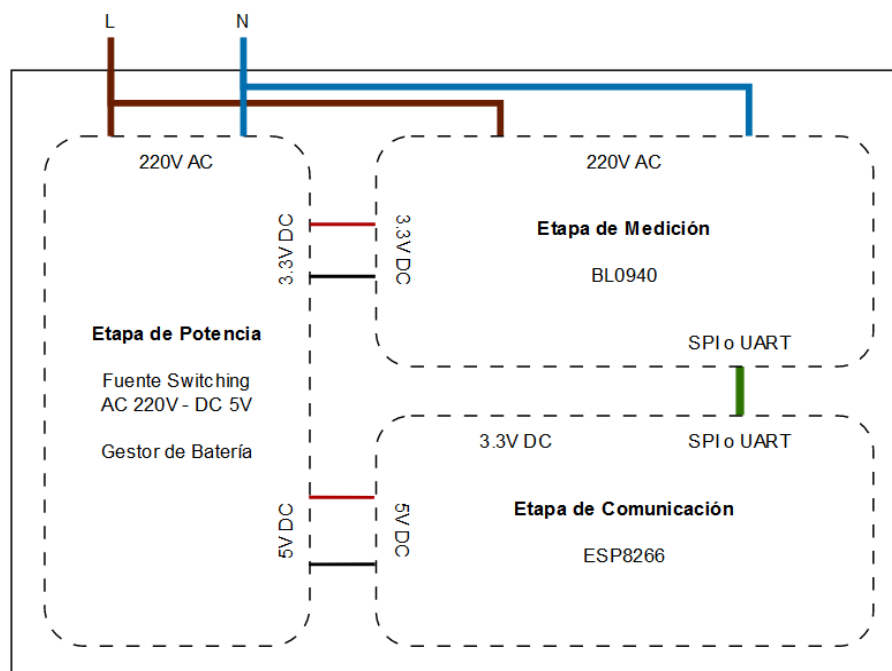


Figura 12: Esquemático de PCB del sistema

Unidad Central de Procesamiento

La unidad central de procesamiento será un dispositivo encargado de recibir y procesar los datos de medición de energía provenientes del ESP8266, para lo cual debe contar con conectividad a la red, preferentemente mediante WiFi. Además, debe tener la capacidad de generar una señal de alarma en caso de detectar una irregularidad en la red, y la capacidad de enviar mensajes a través de un sistema de mensajería. También es fundamental que pueda almacenar los datos de consumo en una base de datos para luego presentar el historial de consumo y alarmas al usuario a través de una interfaz gráfica.

Aunque se podría utilizar una PC o servidor corriendo una distribución de Linux con los programas necesarios, se busca proveer una opción más económica y portátil. Entre las diversas posibilidades, se han evaluado los kits de desarrollo de Raspberry Pi debido a su potencia, versatilidad, y bajo costo. Estos dispositivos permiten instalar sistemas operativos basados en Linux, como Raspbian o Ubuntu, lo que facilita el desarrollo de aplicaciones en lenguajes de programación Python o C, además de proporcionar acceso a una amplia gama de programas disponibles en Linux. Además, cuentan con pines específicos para los distintos protocolos de comunicación, así como entradas y salidas GPIO, entre otras características.

Raspberry Pi 3 Model B+

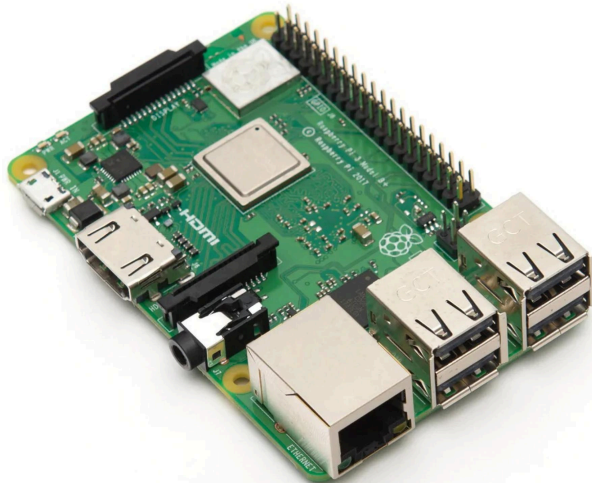


Figura 13: Raspberry Pi 3 Model B+

- CPU Broadcom BCM2837 de 64 bits con cuatro núcleos a 1.2 GHz
- 1 GB de RAM
- LAN inalámbrica BCM43438 y Bluetooth de baja energía (BLE) integrados
- 40 pines GPIO extendidos
- 4 puertos USB 2.0
- Salida de audio estéreo de 4 polos y puerto de video compuesto
- Puerto HDMI de tamaño completo
- Puerto de cámara CSI para conectar una cámara Raspberry Pi

- Puerto de pantalla DSI para conectar una pantalla táctil Raspberry Pi
- Puerto Micro SD para cargar el sistema operativo y almacenar datos
- Fuente de alimentación micro USB mejorada de hasta 2.5A

Con un precio aproximado de \$60000, este dispositivo cumple con los requisitos necesarios para este proyecto. Aunque, para la aplicación buscada se podría utilizar una placa de menores prestaciones a un menor costo, el uso de una Raspberry Pi 3 Model B+ (o modelo superior) permitiría un mejor funcionamiento del sistema, y la posibilidad de escalabilidad a futuro, pudiendo integrarse una mayor cantidad de sensores sin mayores inconvenientes en cuanto a su capacidad de procesamiento de datos.

Raspberry Pi Zero

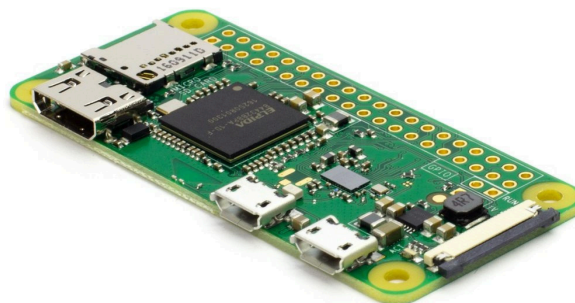


Figura 14: Raspberry Pi Zero

- CPU de un solo núcleo a 1 GHz
- 512 MB de RAM
- Puerto mini HDMI
- Puerto micro USB OTG
- Puerto de alimentación micro USB
- Encabezado de 40 pines compatible con HAT
- Conector de cámara CSI (solo v1.3)
- Conector de vídeo compuesto y encabezados de reinicio

Con un precio de \$30000, pines GPIO, y puede correr Raspbian o Linux. Además, cuenta con conexión WiFi, y un puerto Micro SD, siendo este dispositivo una opción viable para el proyecto. Con un menor a un menor costo, las características de esta versión de Raspberry Pi son suficientes para la aplicación dada. Sin embargo, no permite la escalabilidad de la placa Raspberry Pi 3 Model B+.

Raspberry Pi Pico

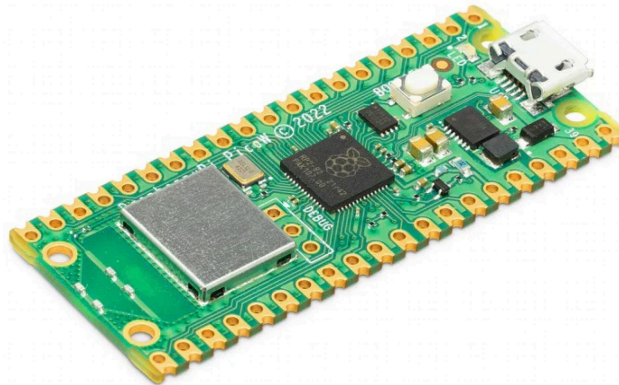


Figura 15: Raspberry Pi Pico

- Chip microcontrolador RP2040 diseñado por Raspberry Pi
- Procesador Arm Cortex-M0+ de doble núcleo con reloj flexible de hasta 133 MHz
- 264 kB de SRAM integrada
- 2 MB de flash QSPI a bordo
- 26 pines GPIO multifunción, incluidas 3 entradas analógicas
- 2 UART, 2 controladores SPI, 2 controladores I2C, 16 canales PWM
- 1 controlador USB 1.1 y PHY, con soporte de host y dispositivo
- 8 máquinas de estado de E/S programables (PIO) para soporte de periféricos personalizados

Pequeño y económica alternativa de la familia Raspberry, con un precio de \$20000. Este microcontrolador posee una baja capacidad de procesamiento que no le permite correr ninguna distribución de Linux, por lo que habría inconvenientes para lograr ciertas especificaciones del proyecto. Además, no cuenta con conectividad WiFi ni lector Micro SD, problemas que pueden resolverse utilizando hardware adicional y aumentando el costo de la aplicación.

Comparación y Elección

La Raspberry Pico no es adecuada para la aplicación buscada. Aunque sería posible cumplir con las especificaciones requeridas mediante el uso de hardware adicional, esto aumentaría el costo de la aplicación y aún así no se lograrían las mismas características que con otros kits disponibles.

Por otro lado, la placa Raspberry Pi Zero cuenta con las capacidades necesarias para funcionar como unidad central de procesamiento, además de ofrecer la ventaja de un bajo costo y un tamaño reducido. Sin embargo, carece de la potencia de procesamiento de la Raspberry Pi 3 Model B+, que proporciona una mayor escalabilidad al proyecto.

Por consiguiente, entre ambas opciones, se ha elegido utilizar la Raspberry Pi 3 Model B+ debido a su mayor capacidad de procesamiento y su potencial para escalar el proyecto de manera efectiva.

Comunicación BL0940 - ESP8266

Existen dos protocolos de comunicación disponibles para esta aplicación: SPI (Interfaz Periférica Serial) y UART (Receptor-Transmisor Asincrónico Universal).

SPI (Serial Peripheral Interface)

El protocolo SPI es una interfaz full-duplex que emplea cuatro señales para el intercambio de datos:

- CLK (Clock)
- MISO (Master Input - Slave Output)
- MOSI (Master Output - Slave Input)
- SS (Slave Select)

Cada pulso del reloj (CLK) implica la lectura o transmisión de un bit de datos. Los datos son transmitidos desde el maestro al esclavo a través de MOSI, mientras que desde el esclavo al maestro mediante MISO. La señal SS se utiliza para seleccionar un esclavo específico en el caso de que haya varios conectados al bus.

Especificaciones del circuito integrado BL0940:

- Modo half-duplex
- Tasa de comunicación máxima de 900 kHz
- Transmisión de información de 8 bits (MSB-LSB)
- Permite multiplexación con UART

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

El protocolo UART es una interfaz de comunicación que puede operar en modos simplex, half-duplex o duplex. Requiere tres señales para la conexión:

- GND (Tierra)
- Tx (Transmisor)
- Rx (Receptor)

Es necesario configurar la misma velocidad de transmisión de datos en ambos dispositivos para una comunicación correcta. Al ser un protocolo asincrónico, no se utiliza una señal de reloj, por lo que los frames de datos comienzan con un bit de inicio y finalizan con un bit de parada. Además, se incluyen bits de paridad en el frame para verificar la integridad de la transmisión.

Especificaciones del circuito integrado BL0940:

- Baud Rate: 4800 bps
- Bits de comprobación: Ninguno
- Bits de datos: 8
- Bits de parada: 1.5
- Comunicación half-duplex

Comparación y Elección del Protocolo

Ambos protocolos operan en modo half-duplex y transmiten 8 bits de información. Sin embargo, el protocolo SPI tiene una velocidad de transmisión de datos superior al UART. Ninguno de los dos protocolos incluye un mecanismo de verificación de errores, lo que implica que la integridad de la transmisión debe ser controlada a nivel de programa. Por otro lado, para el protocolo SPI son necesarias 4 señales, mientras que para el UART solo se necesitan 3.

Dado que la principal diferencia entre los protocolos es la velocidad de comunicación, la diferencias de pines necesarios es mínima y no hay escasez de los mismos, y que el ESP8266 es compatible con ambos, se opta por implementar el protocolo SPI debido a su mayor velocidad de transmisión.

Comunicación ESP8266 - Raspberry Pi

Después de adquirir los datos, es esencial transmitirlos a la unidad central de procesamiento para su análisis y visualización. Con el objetivo de lograr que la Raspberry Pi sea físicamente independiente de la medición de energía, es decir, que no haya necesidad de conexiones cableadas entre ambos dispositivos, se propone transmitir la información utilizando un protocolo TCP/IP. De este modo, el ESP8266 podrá enviar los valores de la medición a través de WiFi, y la Raspberry Pi podrá recibirlos mediante la misma vía o utilizando Ethernet. Entre los posibles protocolos, se destaca el MQTT.

MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) es un protocolo de mensajería liviano utilizado principalmente en aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) sobre TCP/IP. Su funcionamiento se basa en el modelo de publicación/suscripción, donde los dispositivos publicadores envían sus mensajes a temas específicos (o "topics"), y los dispositivos suscriptores reciben los mensajes de los temas de su interés. Además, existe un servidor o broker encargado de transmitir los mensajes entre publicadores y suscriptores, según sea requerido. En el contexto de este proyecto, la unidad central de procesamiento actuaría como broker y suscriptor simultáneamente, recibiendo los datos del ESP8266, el publicador, para su procesamiento.

Por otro lado, este protocolo facilita la incorporación de dispositivos adicionales, tanto publicadores como suscriptores. De esta manera, se podrían agregar más sensores para medir otras variables, como tensiones u otros parámetros, y enviar estos datos a la unidad central de procesamiento sin necesidad de cableado adicional. Además, también podrían

existir más dispositivos suscritos a los tópicos, recibiendo y analizando dichos datos. Esto confiere una alta escalabilidad al proyecto.

Interfaz web

Una interfaz web, al ser accesible desde cualquier dispositivo con conexión a la red local, no requiere la instalación de software adicional. Esto proporciona una mayor comodidad y accesibilidad para el usuario, quien podrá monitorear y gestionar su consumo energético desde cualquier lugar y dispositivo que posea un navegador de internet.

Utilizando la Raspberry Pi como servidor y el software Node-RED, se creará un dashboard que permitirá al usuario controlar su consumo energético en tiempo real, recibir alertas sobre irregularidades en el sistema y acceder al historial de consumo. Además, esta interfaz web ofrecerá la capacidad de establecer valores máximos de consumo y recibir alertas cuando dichos valores sean superados.

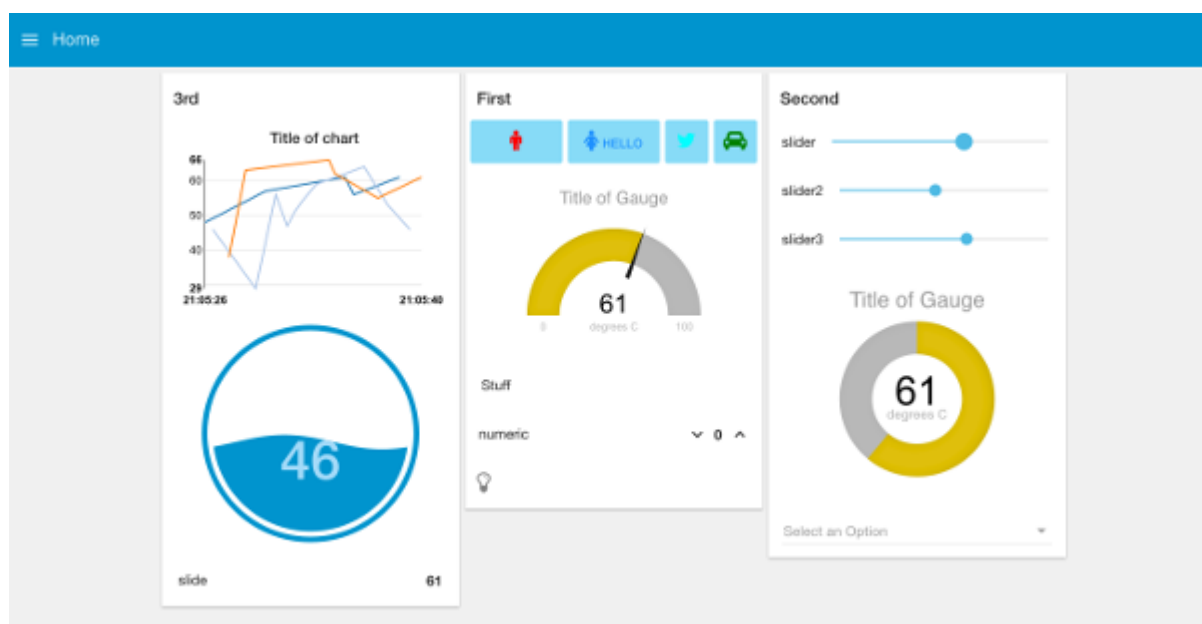


Figura 16: Ejemplo de interfaz web utilizando Node Red

Dado que la interfaz web estará limitada al uso local, surge la problemática de que no se podrá acceder a la misma si el usuario no se encuentra conectado directamente a dicha red. Una solución para esta limitación sería alojar la página web en un servidor público, donde se pueda acceder mediante autenticación de usuario. Esto permitiría a los usuarios acceder a la información desde cualquier ubicación con acceso a Internet. Otra forma sería habilitar la conexión al router de forma remota, lo que podría acarrear problemas de seguridad.

Es importante destacar que las alertas solo serán visibles si el usuario tiene el dashboard abierto en su dispositivo. Por lo tanto, el enfoque principal de la página web será



proporcionar acceso al historial de consumo y de alarmas, y configurar los umbrales de alerta de consumo.

Sistema de alarma

Las alertas relacionadas con irregularidades en la red eléctrica serán emitidas a través de mensajería utilizando un bot de Telegram o WhatsApp. Esta elección permite que el usuario reciba notificaciones en cualquier lugar donde tenga acceso a Internet, aprovechando la amplia disponibilidad de estas aplicaciones, y evitando la necesidad de instalar software adicional, lo que ahorra espacio en el dispositivo.

El bot permitirá al usuario configurar las alertas según sus preferencias, brindando la opción de seleccionar qué tipos de alertas desea recibir. Además, ofrecerá la funcionalidad de solicitar el historial de alertas y el historial de consumo, aunque para una visualización más completa y detallada de esta información se recomienda utilizar el dashboard web.

Portabilidad

Aunque el alcance del proyecto proporciona una unidad central de procesamiento mediante la Raspberry Pi 3 Model B+, la capacidad de ejecutar programas en cualquier hardware ofrecería una mayor versatilidad al usuario. De esta manera, se podría utilizar un servidor existente y vincular la medición de energía con otra base de datos, o integrar el sistema de alarma con uno ya existente.

Por este motivo, se ha decidido utilizar Docker, un sistema de contenedores que permite ejecutar código en cualquier dispositivo en el que pueda instalarse. De esta forma, una vez desarrollado el proyecto, se creará una imagen de Docker en la que se instalan todas las dependencias necesarias para un correcto funcionamiento de los programas. Esto permitirá utilizar una amplia variedad de dispositivos como unidad central de procesamiento.

Estructura del proyecto

En la Figura 17 se observa, de forma básica, la estructura del proyecto.

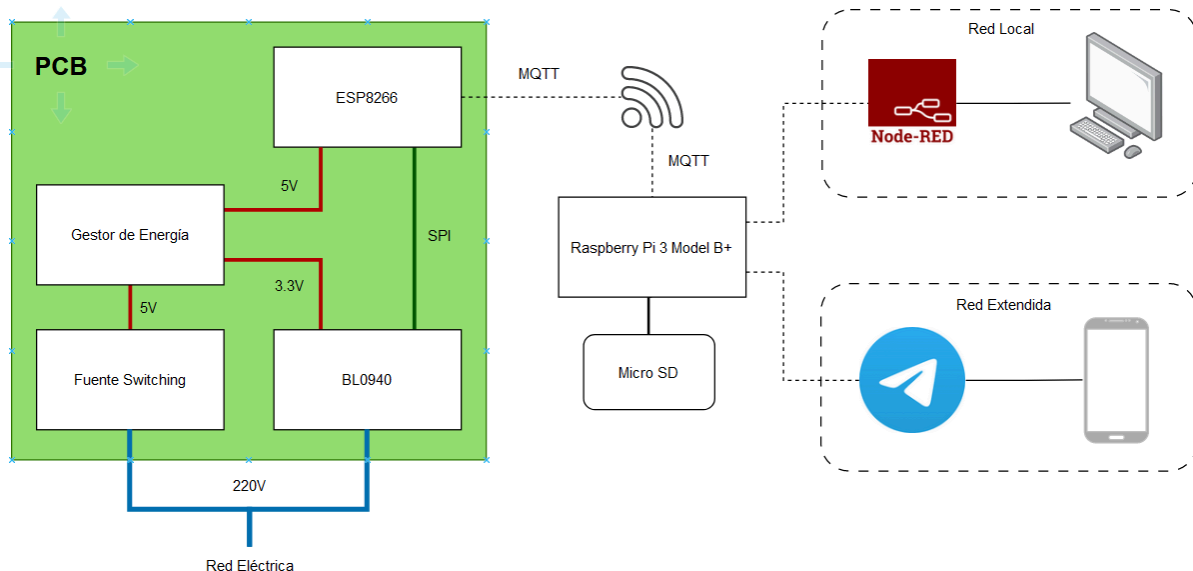


Figura 17: Esquema del proyecto

Para la alimentación del sistema, la PCB diseñada incorpora un gestor de energía y una fuente switching. El gestor de energía se encargará de administrar la fuente de alimentación y generar los 3.3V necesarios. Por su parte, la fuente switching proporcionará los 5V requeridos para el funcionamiento del sistema.

El sensor de energía BL0940 se conectará a la red para realizar mediciones, y a los 3.3V del gestor de energía para su alimentación. Por otro lado, el ESP8266 se conectará a los 5V y se comunicará a través del protocolo SPI con el circuito integrado. Luego, enviará los datos por WiFi mediante el protocolo MQTT para su procesamiento.

La Raspberry Pi recibirá los datos provenientes del sensor, los analizará, y generará las alarmas en caso de ser necesario. Además, cuenta con una tarjeta de memoria Micro SD donde se almacenarán los datos para el historial de consumo y alarmas.

Finalmente, los usuarios podrán interactuar con el sistema mediante la aplicación de Telegram, donde un bot les enviará alarmas en caso de detectar irregularidades en la red. Alternativamente, podrán acceder a un dashboard web creado con Node-RED cuando estén conectados a la red local. Este dashboard permitirá no solo visualizar las alarmas, sino también acceder al historial de consumo. Todo este sistema estará contenido en un contenedor Docker para su portabilidad a otro dispositivo en caso de ser necesario.

Resultados Esperados

Para validar el correcto funcionamiento del sistema, se llevarán a cabo una serie de ensayos destinados a evaluar las características especificadas en el alcance del proyecto.

Sistema de Alimentación

El sistema de alimentación deberá suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del sistema en cuestión. Con este propósito, se realizarán pruebas de conversión de energía de 220V a 5V y de 220V a 3.3V bajo diferentes condiciones de carga, incluso superando la capacidad nominal de consumo para la cual fue diseñado. Asimismo, se examinará la estabilidad de la tensión de salida frente a irregularidades en la red eléctrica.

Medición de Energía

Dado que la función principal del sistema es la medición de energía, la precisión de esta variable es crucial para evitar falsas alarmas y errores en el registro del consumo. Por consiguiente, se llevará a cabo una evaluación del correcto funcionamiento del circuito integrado encargado de la medición de energía, sometiénolo a diferentes niveles conocidos de tensión y corriente para determinar la exactitud de los valores medidos. Además, se expondrá el sensor a condiciones extremas y fuera de rango con el fin de evaluar su comportamiento en situaciones límite.

Alarmas

Las alarmas deben alertar al usuario sobre las irregularidades en la red eléctrica, permitiéndole tomar las medidas necesarias en caso de ser requerido. Por lo tanto, se procederá a verificar el correcto funcionamiento de los diferentes tipos de alarmas, sometiendo al sistema a todas las anomalías previstas en el alcance del proyecto:

- Sobretensión
- Subtensión
- Sobrecorriente
- Interrupción del suministro eléctrico
- Exceso de consumo



Bibliografía

- [1] CAMMESA, *Informe Anual (2022)*. Recuperado de [Informe Anual | CAMMESA](#)
- [2] AP Ingeniería, *Seis Tipos de Irregularidades Eléctricas (8 de febrero 2018)*. Recuperado de <https://www.apingenieria.com/seis-tipos-irregularidades-energeticas/>
- [3] [Sense Energy Monitor](#)
- [4] [Inhab Energy Monitor - Siemens USA](#)
- [5] [D52-2066 Household Watt-Hour Meter Smart Single Phase Energy Meter LCD Display Electric Meter 6 Parameters Multimeter Ammeter Voltmete AC40.0300.0V: Amazon.com](#)
- [6] Shanghai Belling Corp., Ltd, *BL0940 Calibration-free Metering IC Datasheet*
- [7] Cirrus Logic Inc (2013), *CS5480 Three Channel Energy Measurement IC Datasheet*
- [8] ALLEGRO microsystems (17 de marzo 2022), *ACS37800 Isolated, Digital Output, Power Monitoring IC with Zero-Crossing Detection, Overcurrent and Overvoltage Flagging Datasheet*
- [9] [ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC | Espressif Systems](#)
- [10] [ESP8266 Wi-Fi SoC | Espressif Systems](#)
- [11] [Raspberry Pi 3 Model B+](#)
- [12] [Raspberry Pi Zero](#)
- [13] [Raspberry Pi Pico](#)
- [14] E. Peña, M. G. Legaspi, *UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*. Recuperado de <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>
- [15] P. Dhaker, *Introduction to SPI Interface*. Recuperado de <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>
- [16] Amazon Web Services, *¿Qué es MQTT?*. Recuperado de <https://aws.amazon.com/es/what-is/mqtt/>
- [17] [Docker](#)