

Acondicionamiento de variables en corriente alterna y monitoreo de consumos eléctricos a través de un servidor web utilizando ESP32

Olvera-Avila, J. C.¹; Coto-Fuentes, H.¹

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México-Campus Lerdo. Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo. División de Posgrado, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.México.
MM2210984@itslerdo.edu.mx.

Resumen - El monitoreo de variables eléctricas en corriente alterna es fundamental para la mejora de la gestión energética en el sector doméstico e industrial. Los avances tecnológicos en ramas como la electrónica, la instrumentación y las comunicaciones han permitido que dicho monitoreo y gestión se pueda realizar de manera automática y remota, aumentando la eficiencia de los sistemas eléctricos y disminuyendo pérdidas materiales debido a la mala operación de los mismos. En el presente trabajo se desarrolla la etapa de acondicionamiento electrónico y acceso remoto de un sistema para la gestión energética de cargas monofásicas. Entre las variables medidas se encuentran: tensión, corriente y factor de potencia, garantizando el monitoreo de consumos de cargas eléctricas a través de un servidor web asincrónico implementado en un SoC ESP32. Las pruebas de funcionamiento se realizaron en luminarias similares a las utilizadas para la iluminación pública, evaluando aspectos como precisión y exactitud en la medición de variables eléctricas, tiempos de operación y posibles pérdidas energéticas por uso descontrolado de las cargas.

Palabras Clave - Acondicionamiento electrónico, ESP32, Gestión energética, Monitoreo eléctrico.

Abstract - The monitoring of electrical variables in alternating current is essential for the improvement of energy management in the domestic and industrial sector. Technological advances in branches such as electronics, instrumentation and communications have allowed such monitoring and management to be carried out automatically and remotely, increasing the efficiency of electrical systems and reducing material losses due to their misoperation. In the present work the stage of electronic conditioning and remote access of a system for the energy management of single-phase loads is developed. Among the measured variables are: voltage, current and power factor, guaranteeing the monitoring of electrical load consumption through an asynchronous web server implemented in an ESP32 SoC. The performance tests were carried out on luminaires similar to those used for public lighting, evaluating aspects such as precision and accuracy in the measurement of electrical variables, operating times and possible energy losses due to uncontrolled use of the loads.

Keywords - Electrical monitoring, Electronic conditioning, Energy management, ESP32.

I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica, en la actualidad, es un elemento indispensable para llevar a cabo actividades productivas, así como factor fundamental en la transformación social, debido a que incide directamente en los servicios básicos que tiene la población mundial, debido a esto, es necesario tener en consideración dos factores fundamentales que tiene la energía eléctrica que influyen directamente en esta investigación, los cuales son consumo de usuarios finales y eficiencia energética.

En el caso del consumo de usuarios finales, según la Secretaría de energía, se define como “la energía utilizada por los diferentes Usuarios finales de la industria eléctrica”, dentro de los que se consideran los usuarios del suministro básico, calificado y de autoabastecimiento remoto, y los cuales forman parte de los sectores residencial, comercial, servicios, agrícola, empresa mediana y gran industria, los cuales tuvieron un ascenso en el 2020, llegando a registrar 45.6 millones de usuarios finales.

La eficiencia energética, según la SENER, tiene como propósito la reducción de la cantidad de energía empleada en la producción de bienes y servicios que se ve reflejado en un ahorro, teniendo como bases el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía y la actualización realizada dentro de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles mas Limpios que se publicaron por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía y la Secretaría de Energía, teniendo como trasfondo una estimación realizada en el escenario de línea de base que asegura un aumento de la tasa anual de 1.9% hasta el año 2035 en el consumo final y una disminución en la intensidad energética en menos del 1% por año entre el 2019 y el 2050. (Secretaría de Energía, 2021)

Los sistemas de monitoreo eléctrico se constituyen de una red de medidores que se encuentran conectados a un servidor central, cuyo objetivo principal se enfoca en la adecuada administración de la energía y el proporcionarle al usuario final la información necesaria acerca del monitoreo. Como elementos internos no necesariamente tienen que ser medidores eléctricos, ya que en algunos casos se puede agregar el monitoreo de otros elementos energéticos, tales como gasto de agua, presión hidráulica, etc. (Chacon, 2020)

La tecnología que se tiene en la actualidad permite obtener una comparativa de una cantidad de procesos tan variados como los mencionados con respecto a las mejoras pertinentes de los sistemas que ya se tenían anteriormente en el ámbito general, esto debido a que el impacto de la tecnología ha ido marcando una diferencia visible, las cuales se reflejan en estrategias de gestión como los Sistemas Integrados de Gestión, Sistemas de Gestión Energética, entre otras. (Sornoza Bravo & Sabando Piguabe, 2021)

El tema principal de este artículo se centra en la propuesta

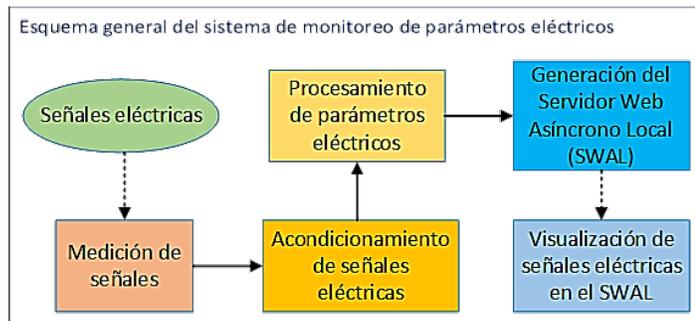
de creación de un sistema de monitoreo de variables eléctricas y la metodología de dicho proceso realizado con elementos de bajo costo que actualmente se tienen en el mercado, así como proporcionar las pruebas necesarias que lo verifiquen.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Actualmente, el monitoreo eléctrico se puede realizar de múltiples maneras, teniendo como base los sistemas locales y remotos, siendo los más utilizados los sistemas remotos debido a su flexibilidad, pero presentando a su vez el defecto de contar necesariamente con una red de internet para la publicación de los parámetros.

Como parte de la generación de este sistema, se consideró necesario realizar el monitoreo local de las variables eléctricas, pero con su publicación de los parámetros eléctricos mediante medios que permitan la visibilidad en un área determinada. Para la realización del prototipo de pruebas se tomó en consideración los métodos de medición, acondicionamiento de señales y procesamiento de variables, además de la realización de una interfaz gráfica de usuario que permita visualizar los parámetros eléctricos hacia el usuario de manera sencilla, esto se puede ver de manera completa en la Figura 1.

Figura 1
Esquema general del sistema de monitoreo de parámetros eléctricos.

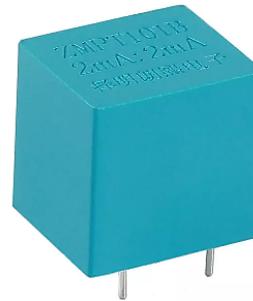


2.1 Método de medición

En el caso del método de medición de los parámetros eléctricos, se tomó en consideración los elementos fundamentales de las señales eléctricas, las cuales se basan en las señales senoidales, y son amplitud, periodo y ángulo de desfase, con esto en mente se eligieron entre los sensores comerciales el sensor de voltaje ZMPT101B y ACS712.

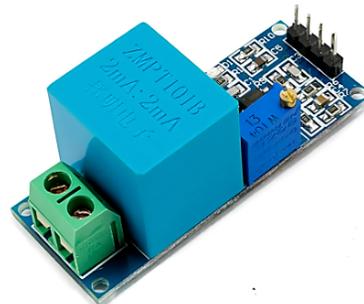
En la medición de voltaje se optó por el transformador de voltaje ZMPT101B de la empresa Qingxian Zeming Langxi Electronic, ya que es un transformador de voltaje que trabaja con una relación de corriente 1:1, posee un voltaje de aislación de 4 kV, además de que su rango de operación de entrada es de 0-1 kV y su rango de operación de salida es de 0 - 10 mA con una resistencia de muestreo de 100Ω. (Qingxian Zeming Langxi Electronic, 2018b)

Figura 2
Transformador de voltaje 2 mA/2 mA ZMPT101B. Tomado de (Qingxian Zeming Langxi Electronic, 2018).



Comercialmente existen placas que ya están creadas para la utilización de este transformador de voltaje (véase la Figura 3), lo que se debe de tener en consideración es que su voltaje de operación es alrededor de los 5V de salida, ya que existen en la actualidad microcontroladores que manejan rangos de medición de 5 V y 3.3 V en sus canales analógicos.

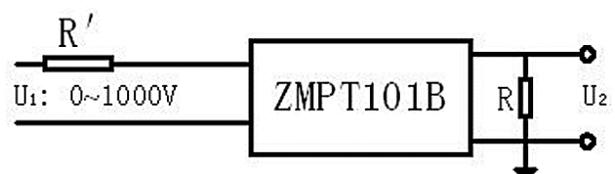
Figura 3
Módulo ZMPT101B Sensor De Voltaje AC. Tomado de (Electrónica THIDO, 2021).



La forma de obtener el voltaje del sensor ZMPT101B, en el caso de solo tener el transformador de voltaje como en la Figura 2, es a partir del circuito de la Figura 4 y para obtener los valores de voltaje se utiliza la ecuación (1), donde U_1 es el voltaje proveniente de la red eléctrica, U_2 es el voltaje de salida del transformador, R' es una resistencia limitadora de corriente de entrada y R es la resistencia de muestreo del transformador.

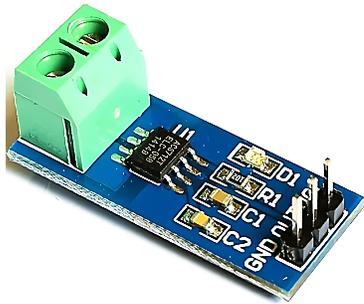
$$U_2 = \frac{U_1}{R'} * R \tag{1}$$

Figura 4
Circuito eléctrico del uso típico del transformador de voltaje ZMPT101B. Tomado de (Qingxian Zeming Langxi Electronic, 2018b).



En la medición de corriente, se optó por el sensor ACS712 de la empresa Allegro (ver Figura 5), el cual es una solución precisa y económica para la medición de corriente AC o DC con aplicaciones industriales, comerciales y de sistemas de comunicación, además de eso, posee un filtro de señal para las señales con ruido, un error de salida total del 1.5%, una resistencia conductora interna de medición de corriente de 1.2 mΩ, una sensibilidad de salida desde 66 hasta 185 mV/A, un voltaje de salida proporcional a la corriente, entre otras cosas. (Octopart, 2020)

Figura 5
Módulo del sensor de corriente ACS712. Tomado de (Naylamp Mechatronics SAC, 2016).



2.2 Acondicionamiento de señales

Los acondicionadores de señales, según (Granda Miguel & Mediavilla Bolado, 2015, pp. 01-40), es un circuito que convierte los parámetros eléctricos de salida de los transductores en una señal eléctrica (corriente, voltaje o frecuencia) que se puede medir fácilmente, el cual incluye todas aquellas transformaciones realizadas a las señales y que son previas al procesado para extraer la información que se necesita.

En el caso de las señales eléctricas que se tienen, los métodos para acondicionar una señal son varios, en este caso se escogió el método de punto pendiente, la cual es determinada dentro de la ecuación (2).

$$Y_{out} = \left(\frac{y_{max} - y_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) (X_{IN} - x_{min}) + y_{min} \quad (2)$$

Teniendo en consideración este escalamiento, en el caso del sensor ZMPT101B, según la ecuación (1), el acondicionador de señal, considerando un voltaje U_1 máximo de 140 Vrms, una resistencia R' de 820 kΩ y una resistencia R de 100Ω, el rango de operación del acondicionamiento de señal es de:

$$-25mV \rightarrow 25mV ; 0 \rightarrow 3300mV$$

Aplicando la ecuación (2):

$$Y_{OUT} = \left(\frac{3300m - 0}{25m - (-25m)} \right) (X_{IN} - (-25m)) =$$

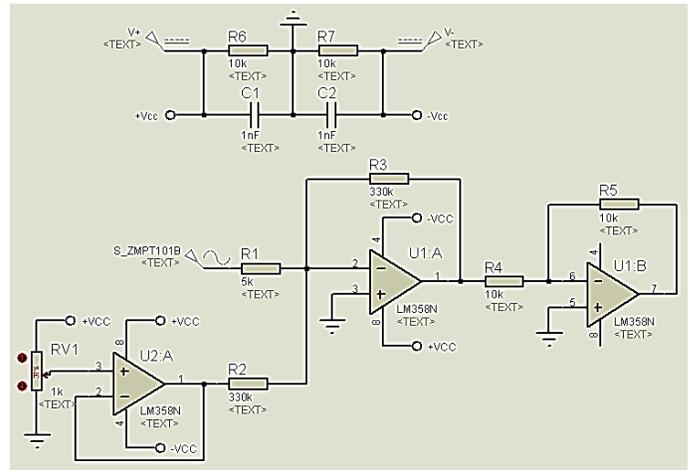
$$Y_{OUT} = \left(\frac{3300m}{50m} \right) (X_{IN} + 25m) \quad (3)$$

$$Y_{OUT} = 66X_{IN} + 1650m$$

Considerando la ecuación (3), el acondicionamiento ideal de este sensor se basó en un amplificador de voltaje en configuración de sumador inversor en cascada con un amplificador inversor (ver Figura 6), dentro de lo cual se toman los valores ideales y se tiene:

$$\frac{R_f}{R_1} = 66 ; si R_f = 330k\Omega \therefore R_1 = \frac{330k}{66} = 5k\Omega \quad (4)$$

Figura 6
Circuito electrónico del acondicionador de señal del transformador de voltaje ZMPT101B.



Teniendo en consideración el escalamiento de la señal de la ecuación (2) y los parámetros del sensor de corriente ACS712, el rango de operación del acondicionamiento de señal es:

$$0 - 5V ; 0 - 3.3V$$

Al aplicar la ecuación (2) en estas condiciones se tiene:

$$Y_{OUT} = \left(\frac{3.3 - 0}{5 - 0} \right) X_{IN} = \frac{33}{50} X_{IN} \quad (5)$$

Considerando la ecuación (4), el escalamiento ideal para el sensor de voltaje, sin necesidad de utilizar elementos adicionales como amplificadores operacionales, es una reducción de voltaje por un divisor de tensión, el cual se calcula:

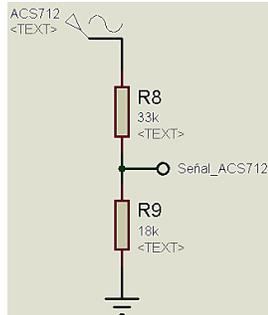
$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{33}{50} ; si R_1 = 33k\Omega;$$

$$R_2 = \frac{17R_1}{33} = \frac{17(33k)}{33} = 17k\Omega \quad (6)$$

Considerando que el valor más cercano de R_2 comercial es de 18 kΩ, este será el valor utilizado en el prototipo.

Teniendo estos valores se genera un circuito eléctrico como el de la Figura 7, el cual es el modelo que se utilizó para medir los parámetros eléctricos dentro del prototipo de pruebas.

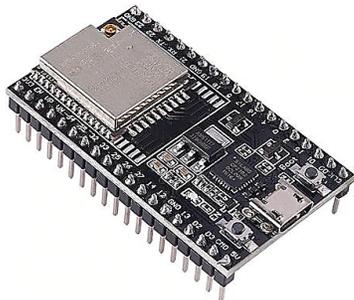
Figura 7
Circuito electrónico del acondicionador de señal del sensor de corriente ASC712.



2.3 Procesamiento de variables

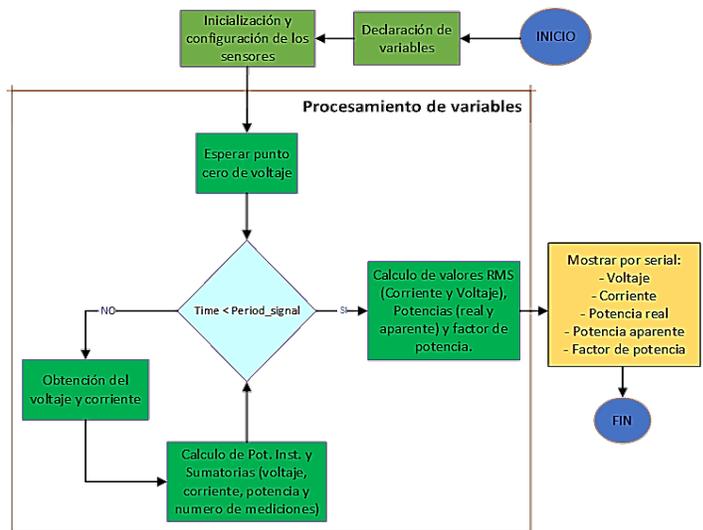
El procesamiento de las variables eléctricas se llevó a cabo mediante un procesamiento por microcontrolador, esto con base en las señales eléctricas que se midieron y acondicionaron, el microcontrolador seleccionado fue el SoC ESP 32 (ver la Figura 8), esto debido a que es un elemento que internamente contiene un módulo genérico de WIFI, Bluetooth y Bluetooth LE MCU, además de que dentro de sus especificaciones destacan un doble microprocesador Xtensa de 32 bits de tipo LX6, 34 GPIO programables de nivel de 3.3 V, un doble ADC de 12 bits de tipo SAR, un host de tipo SD/eMMC/SDIO, entre otras cosas, que reducen la cantidad de elementos dentro del sistema del prototipo de pruebas. (Espressif Systems, 2023).

Figura 8
Tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM-32U. tomado de (Electrónica I + D, 2023).



Dentro del SoC ESP32 se llevaron a cabo las tareas de medición de variables, dentro de estas fueron variables directas (tales como voltaje y corriente) y variables indirectas (potencia real, potencia aparente y el factor de potencia), todo esto siguiendo el diagrama de la Figura 9.

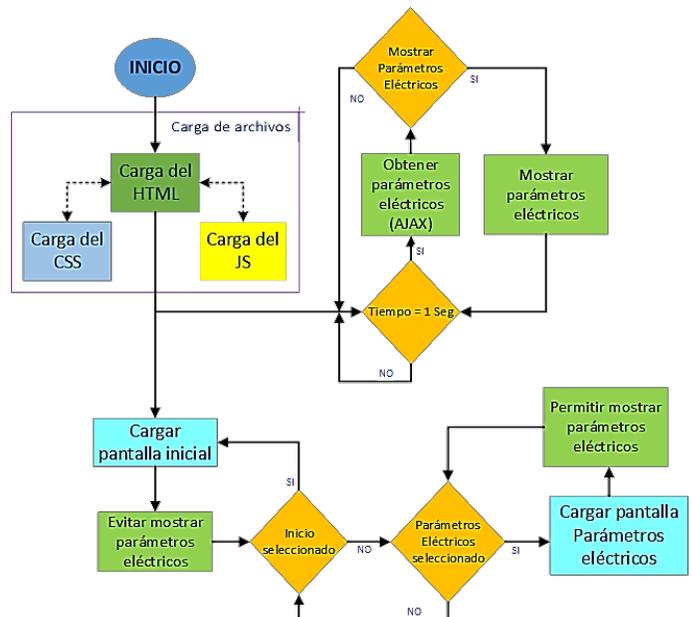
Figura 9
Diagrama de flujo del proceso de medición de variables eléctricas.



2.4 Interfaz de usuario

La interfaz gráfica de usuario (GUI) aplicada en el prototipo de pruebas se llevó a cabo mediante Visual Studio Code IDE, en el cual se programó mediante HTML, CSS y JavaScript la página web, para después incluir estos archivos dentro del SoC ESP32, esto a partir de la funcionalidad de almacenar algunos tipos de archivos en la memoria interna del SoC mediante el sistema de archivos flash SPI (SPIFFS).

Figura 10
Diagrama de flujo del proceso de la página web del Servidor Web Asíncrono Local.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Acondicionamiento de señales

Mediante las ecuaciones (3), (4), (5) y (6), así como los diagramas esquemáticos de la Figura 6 y de la Figura 7, se realizaron las pruebas con el circuito físico y las señales producidas por el prototipo se pueden ver en la Figura 11 y la Figura 12.

Figura 11

Oscilogramas de las señales del escalamiento analógico de la Figura 7, considerando la señal de entrada (Color azul) y la señal de salida (Color Amarillo).

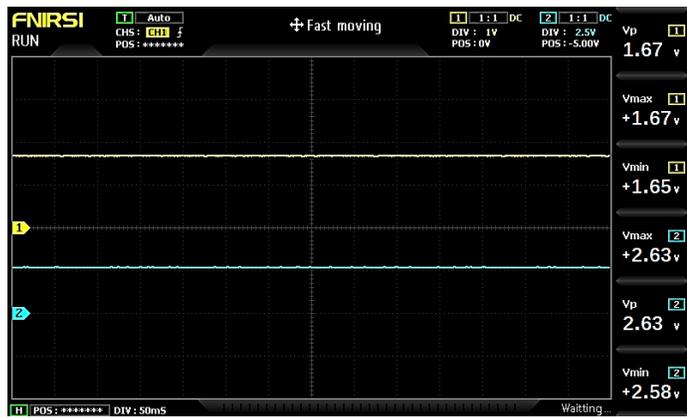
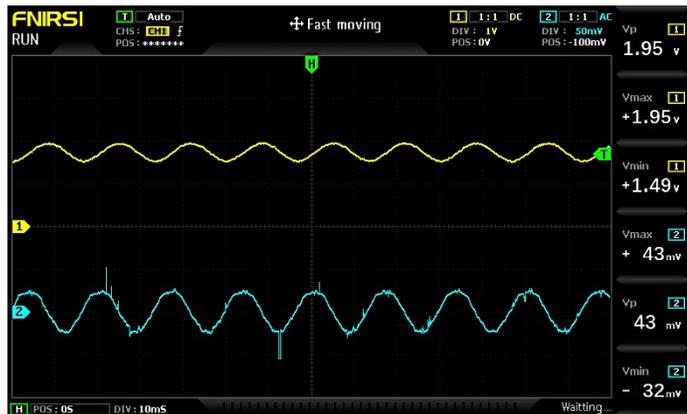


Figura 12

Oscilogramas de las señales del escalamiento analógico de la Figura 6, considerando la señal de entrada (Color azul) y la señal de salida (Color Amarillo).

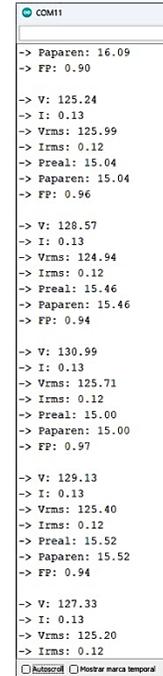


3.2 Procesamiento de variables

El procesamiento de las variables se realizó mediante el SoC ESP32, el cual siguió el procedimiento de la Figura 9, para poder obtener los resultados que se visualizan en la Figura 13.

Figura 13

Impresión de las variables por comunicación serial entre el SoC ESP32 y la computadora.



3.3 Interfaz de usuario

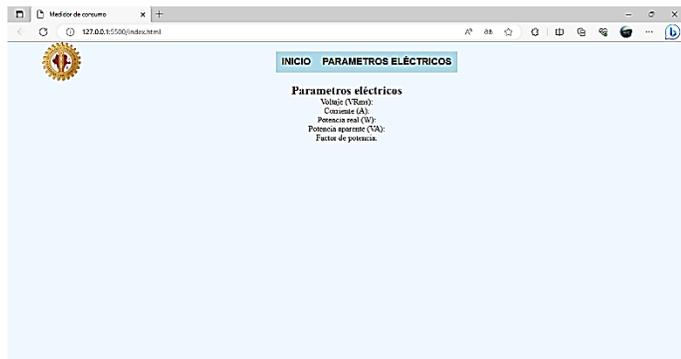
La interfaz de usuario, según lo teorizado en la sección D del capítulo II, y teniendo en consideración el diagrama de flujo de la Figura 10 se pudieron obtener los elementos visualizados dentro de la Figura 14 y la Figura 15.

Figura 14

Interfaz gráfica de usuario realizada dentro de Visual Studio Code IDE a partir de la Figura 10 (Pantalla inicial).



Figura 15
Interfaz gráfica de usuario realizada dentro de Visual Studio Code IDE a partir de la Figura 10 (Pantalla de parámetros eléctricos).



3.4 Servidor Web Asíncrono Local

Al obtener la integración de los códigos de medición de parámetros eléctricos con el código de visualización del servidor se generaron los resultados vistos en la Figura 16, esto a partir de los diagramas de la Figura 9 y la Figura 10.

Al tener un sistema basado en Web, existe una mayor probabilidad de obtener un sistema multiplataforma, debido a esto, se realizaron pruebas con otros aparatos electrónicos, los cuales presentaron los resultados expuestos en la Figura 17 y la Figura 18.

Figura 16
Interfaz gráfica de usuario aplicado en el servidor a partir de la Figura 15 y visualizado en una laptop (Pantalla de parámetros eléctricos).

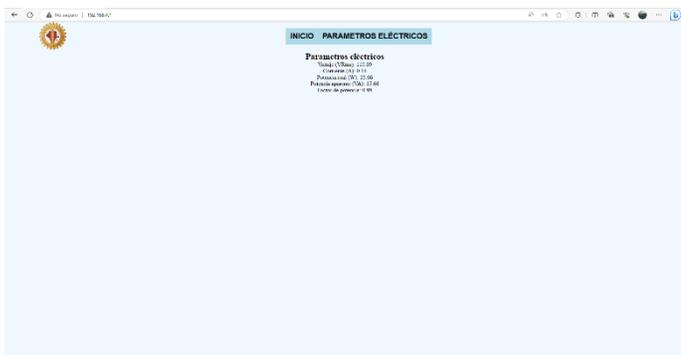


Figura 17
Interfaz gráfica de usuario aplicado en el servidor a partir de la Figura 15 y visualizado en teléfono celular (Pantalla de parámetros eléctricos).



Figura 18
Interfaz gráfica de usuario aplicado en el servidor a partir de la Figura 15 y visualizado en una tableta (Pantalla de parámetros eléctricos).



3.5 Prototipo de pruebas

El prototipo físico se realizó a partir de la integración de los diagramas esquemáticos de los escalamientos electrónicos del sistema, en la Figura 19 se puede ver el armado del circuito prototipo de pruebas, en la Figura 20 se puede observar la comunicación serial del prototipo de pruebas que muestra algunas acciones realizadas en el servidor web y en la Figura 21 se puede visualizar el diagrama esquemático completo del prototipo de prueba.

Cabe mencionar que este sistema se realizó mediante dos SoC ESP32, esto debido a que la cantidad de procesos utilizados dentro del Servidor Web Asíncrono Local en conjunto con el procesamiento de señales entregaban errores debidos a la cantidad de memoria que se tenían.

Figura 19

Prototipo de pruebas con la integración del sistema completo para el monitoreo de variables eléctricas.

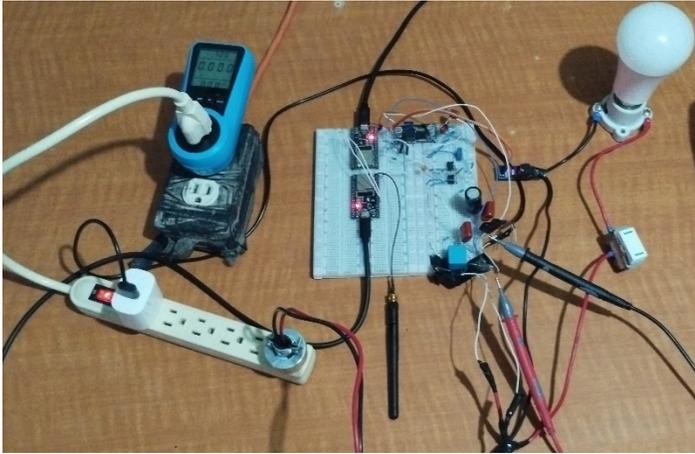
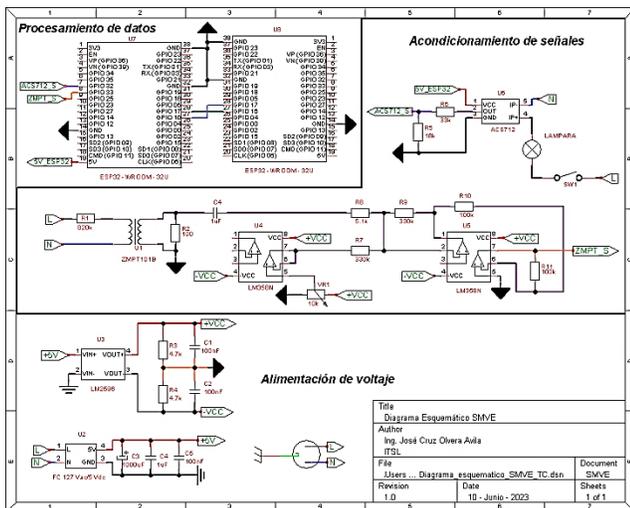


Figura 20
Impresión de actividades del Servidor del prototipo de pruebas del sistema de la Figura 19.

```

COM6
Enviar
rst:0x1 (POWERON_RESET),boot:0x13 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
configsip: 0, SPIWP:0xee
clk_drv:0x00,q_drv:0x00,d_drv:0x00,cs0_drv:0x00,hd_drv:0x00,wp_drv:0x00
mode:DIO, clock div:1
load:0x3fff0018,len:4
load:0x3fff001c,len:1216
ho 0 tail 12 room 4
load:0x40078000,len:10944
load:0x40080400,len:6388
entry 0x400806b4
Setting AP (Access Point)...
AP IP address: 192.168.4.1
    
```

Figura 21
Diagrama esquemático del circuito de la Figura 19 (prototipo de pruebas)



3.6 Comparación de la medición de consumo eléctrico

En el caso de la medición del consumo eléctrico se puede ver en el apartado 3.5 la realizada por el prototipo de pruebas, el cual ha sido sometido a comparativas a partir de un medidor de consumo eléctrico comercial encontrado en (DeRemate.Com (Mercado Libre), 2023), las cuales se pueden observar en la Figura 22.

A partir de esto se han encontrado resultados cercanos a los generados con el prototipo de pruebas, con una diferencia aproximada de 8 VRms, 2W y 0.06 en el caso del factor de potencia, esto permite visualizar el error de medición que se cuenta al momento de medir con el prototipo desarrollado.

Figura 22
Mediciones de parámetros eléctricos de un medidor comercial.



IV. CONCLUSIONES

Los sistemas de monitoreo de las variables eléctricas como el presentado en el artículo permiten obtener los parámetros deseados de la red eléctrica de manera directa e indirecta, esto por métodos matemáticos a partir de la medición de los parámetros fundamentales, además de que presentan un reto para la realización del mismo debido a la calidad de los materiales con los que se cuenta, aunado a esto, el poder realizar un sistema de esta categoría con elementos de bajo costo representa la viabilidad de realizar sistemas de bajo costo para poder monitorear procesos dedicados a la red eléctrica.

Estos sistemas de monitoreo local permiten la visualización de los parámetros eléctricos sin la necesidad de tener una red Wi-Fi o contar con internet para interactuar con el sistema, lo que permite expandir el área de aplicación del sistema a los lugares donde no se cuentan con estos elementos.

Los elementos presentados presentan una buena funcionalidad, pero en recomendación es necesaria una mejora en código debido a los tiempos de procesamiento y cálculo, obteniendo una mejora en tiempos y en efectividad.

Con base en los resultados expuestos en el presente documento, se planea implementar este sistema de manera integral con un control de cargas eléctricas, permitiendo obtener tanto el control como la medición de las variables, realizando un sistema más completo de los procesos eléctricos.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo económico por parte del CONAHCYT referente a las becas otorgadas por el mismo organismo a estudiantes por sus estudios de posgrado.

VI. REFERENCIAS

- Chacon, H. (2020, June 10). Sistema de monitoreo eléctrico, gestión y ahorro energético. Energiayredes.com.
<https://energiayredes.com/monitoreo-de-energia-electrica/>
- DeRemate.com (Mercado Libre). (2023). Medidor de consumo eléctrico ahorrador luz wattmetro benkel. Artículo.mercadolibre.com.mx.
https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1371618429-medidor-de-consumo-electrico-ahorrador-luz-wattmetro-benkel-_JM
- Electrónica I + D. (2023). Tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM-32U. Didacticaselectronicas.com.
<https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sistemas-de-desarrollo/expressif-systems/esp32/tarjeta-de-desarrollo-esp32-wroom-32u-tarjetas-modulos-de-desarrollo-con-de-wifi-y-bluetooth-esp32u-con-conector-u-fl-tarjeta-comunicaci%C3%B3n-wi-fi-bluetooth-esp32u-iot-esp32-nodemcu-d0wd-detail>
- Electrónica THIDO. (2021). Módulo ZMPT101B sensor de voltaje AC. Electronicathido.com.
<https://www.electronicathido.com/detallesProducto.php?id=Q2hZNHMvRiZYVDhFcTJocUVkQVVRQT09>
- Espressif Systems. (2023). ESP32 WROOM32D & ESP32 WROOM32U datasheet. In Espressif Systems (pp. 01-33). Espressif Systems.
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf
- Granda Miguel, M., & Mediavilla Bolado, E. (2015). Instrumentación electrónica: Transductores y acondicionadores de señal (1st ed., Vol. 1, pp. 01-40). Editorial De La Universidad De Cantabria.
- Naylamp Mechatronics SAC. (2016). Tutorial sensor de corriente ACS712. Naylamp Mechatronics - Perú.
https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-ac712.html
- Octopart. (2020, January 30). Datasheet for ACS712ELCTR-30A-T allegro microsystems current sensors. Octopart.
<https://octopart.com/datasheet/acs712elctr-30a-t-allegro+microsystems-38944689>
- Qingxian Zeming Langxi Electronic. (2018). 2mA/2mA voltage transformer - buy voltage transformer, 2ma/2ma voltage transformer, potential transformer product on qingxian zeming langxi electronic devices co., ltd. Www.micro-Transformer.com. <https://www.micro-transformer.com/2ma-2ma-voltage-transformer-ZMPT101B.html>
- Qingxian Zeming Langxi Electronic. (2018b). ZMPT101B current-type voltage transformer. In www.micro-transformer.com (pp. 1-2).
<https://5nr0rxhmqqjjik.leadongcdn.com/ZMPT101B+specification-aidijBqoKomRilSqqokpjkp.pdf>
- Secretaría de Energía. (2021). Programa para el desarrollo del sistema eléctrico nacional 2021-2035. In Centro Nacional De Control De Energía (pp. 35-77). Centro Nacional De Control De Energía.
https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/Prod ecen/14%202021-2035%20Cap%C3%ADtulos%201%20al%206.pdf
- Sornoza Bravo, J. C., & Sabando Piguabe, L. F. (2021). Estado del arte de la gestión energética en la industria. Dominio de Las Ciencias, 7(3), 778-802. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i3.1966>