

Implementación de un analizador de energía eléctrica trifásico usando redes Adaline y bobinas Rogowski con circuito integrador

Implementation of a three-phase electric energy analyzer using Adaline networks and Rogowski coils with integrator circuit

Francisco J. Alcántara Benjumea^{1*}  <https://orcid.org/0000-0003-1839-7985>

Teresa E. Núñez Zúñiga²  <https://orcid.org/0000-0001-5834-9764>

Edmundo Picón Llanos²  <https://orcid.org/0000-0002-5851-5512>

Josué Alvarino Cosar¹  <https://orcid.org/0000-0002-7812-2062>

Eddy S. Aranguren Pascasio¹  <https://orcid.org/0000-0003-4866-6875>

Recibido 24 de marzo de 2021, aceptado 04 de noviembre de 2022

Received: March 24, 2021 Accepted: November 04, 2022

RESUMEN

En este trabajo se diseñó e implementó un Analizador de Energía Eléctrica Trifásico basado en la aplicación de la Red Adaline para descomponer las tensiones e intensidades de cada fase en sus armónicos. Para sensar las tensiones se usaron transformadores de pequeña potencia y circuitos con amplificadores Operacionales. Para el sensado de las intensidades se usaron bobinas Rogowski, más una etapa subsiguiente con circuito acondicionador de la señal el cual realiza la doble función de amplificación-integración, y que necesita de un ajuste cuidadoso de los componentes para no distorsionar las señales sensadas. Las señales son procesadas por un microcontrolador de bajo costo AtMega 328P optimizando los recursos en la programación de la red Adaline. Las fórmulas para la medida de las magnitudes trifásicas y por fase se basaron en el Estándar IEEE 1459. Finalmente se probó el desempeño del analizador propuesto en una medida realizada en un tablero industrial de tres conductores accesibles, y se contrastaron sus valores con las de una pinza amperimétrica Fluke 375. Los resultados muestran el correcto funcionamiento del analizador y la buena precisión y exactitud de las medidas de valores eficaces de tensiones, intensidades y sus armónicos.

Palabras clave: Calidad de energía eléctrica, mediciones eléctricas, armónicos, bobina Rogowski, red Adaline.

ABSTRACT

In this work, a Three-Phase Electric Energy Analyzer was designed and implemented based on the application of the Adaline Network to decompose the phase voltages and currents into their harmonics. For the sensing of the voltages, small power transformers and circuits with Operational Amplifiers were used. For the sensing of the currents, Rogowski coils were used, in addition to a subsequent stage with a signal conditioning circuit that performs the double function of amplification-integration and that requires a careful adjustment of the components so as not to distort the sensed signal. The signals are processed by a low-cost AtMega 328P microcontroller optimizing the resources in the programming of the Adaline network. The formulas for measuring three-phase and per-phase magnitudes were based on the IEEE

¹ Universidad Tecnológica del Perú. Facultad de Ingeniería. Lima, Perú.
E-mail: c15119@utp.edu.pe; jhymerjosueac@gmail.com; earanguren@utp.edu.pe

² Universidad Nacional Mayor de San Marcos. FIEE. Lima, Perú.
E-mail: tnunezz@unmsm.edu.pe; epiconl@unmsm.edu.pe

* Autor de correspondencia: c15119@utp.edu.pe

1459 Standard. Finally, the performance of the proposed analyzer was tested in a measure performed on an industrial panel of three accessible conductors, and its values were compared with those of a Fluke 375 clamp meter. The results show the correct operation of the analyzer and the precision and accuracy of the measurements of rms values of voltages and currents and their harmonics.

Keywords: Electric power quality, electrical measurements, harmonics, Rogowski coils, Adaline network.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se viene experimentando un crecimiento en el uso de cargas eléctricas de tipo no lineal tanto en el sector comercial como en el industrial en la región latinoamericana. Este tipo de cargas son, en muchos casos, cargas de electrónica de potencia que incluyen diodos, tiristores, IGBTs y otros dispositivos no lineales, los cuales introducen distorsión armónica en las intensidades que consumen, y como consecuencia se produce distorsión en la tensión de alimentación, al circular dichas intensidades en los transformadores y demás impedancias del sistema eléctrico de utilización [1-4]. Se han realizado muchas investigaciones sobre la definición y aplicación de índices que cuantifiquen la calidad de energía eléctrica en las condiciones citadas de distorsión armónica, dando como resultado diversos estándares de magnitudes e índices, entre los que destaca el estándar IEEE 1459, como uno de los más referenciados [5]. En dicho estándar se dan las definiciones más actuales de las magnitudes de calidad de energía en sistemas trifásicos con hilo neutro, destacando la potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, etc, las cuales deben aplicarse en la implementación de medidores eléctricos para garantizar una mayor fiabilidad de las medidas y poderlas interpretar correctamente para diagnosticar y predecir fallas. Tales equipos medidores se denominan analizadores de redes eléctricas o analizadores de calidad de energía eléctrica, y tienen diversas formas constructivas, características y aplicaciones, pudiendo ser analizadores portátiles de mano, analizadores para instalación en tableros o analizadores que incluyen solo la parte de sensado y procesamiento de magnitudes, situando el sistema de visualización de forma centralizada en sistemas SCADA, entre otros tipos [6].

La importancia de los analizadores de redes eléctricas ha ido creciendo en los últimos años en nuestra región a medida que ha ido creciendo el grado de electrificación y la aplicación de la energía eléctrica en

plantas industriales, siendo equipos muy importantes en la detección de problemas de resonancias LC causados al conectar bancos de condensadores, en problemas causados por sobretensiones transitorias y los causados por los armónicos, además de ser una herramienta imprescindible para los estudios de eficiencia energética.

Para el cálculo de las magnitudes de potencia eléctrica en sistemas trifásicos con distorsión se han usado diferentes técnicas, de las cuales, las más destacada y utilizada es la transformada rápida de Fourier (FFT). A pesar de sus ventajas, los procedimientos de medida basados en la FFT son complicados de programar, requieren microcontroladores (MCUs) de alta gama, y presentan problemas de exactitud cuando hay fenómenos de aliasing o leakage. Otras técnicas de medida usan bloques de cálculo como los filtros Paso-Bajo y los desfases de 90°, que suelen presentar problemas al ser implementados con señales discretas en el tiempo y en sistemas basados en DSP (Digital signal processing, procesamiento digital de señales), debido a las imprecisiones que se introducen y los grandes retrasos en la estabilización de la medida. Por eso, se han investigado otras técnicas de medida, como el caso de la Red Adaline. Una Red Adaline es una Neurona o red de neuronas en la que el entrenamiento de los pesos necesarios para realizar una determinada función se realiza mientras la red está recibiendo entradas (entrenamiento ON LINE), mediante el algoritmo adaptativo Least Mean Square (LMS) que minimiza el error cuadrático medio entre la salida de la Red Adaline y la señal que se está procesando. De esta forma la red puede estimar parámetros de la señal, si ésta es parametrizada según un modelo matemático lineal. Uno de los modelos más usados en la aplicación de la red Adaline en sistemas eléctricos, es la descomposición en armónicos de la tensión y la intensidad según la serie de Fourier [7].

Una etapa importante en los analizadores de redes es el sensado de las intensidades, que puede ser

realizado con transformadores de corriente, seguidos de etapas amplificadoras y acondicionadoras de la señal [8]. Sin embargo, existen otros sensores más precisos, con un mayor rango de medidas y con un comportamiento más lineal, como es el caso de la bobina Rogowski que proporciona una señal proporcional a la derivada de la intensidad [9]. Por tal motivo, la etapa amplificadora siguiente necesita realizar, además, la integración de la señal sensada.

Se implementó un analizador de redes trifásico mediante la programación de la red Adaline en un MCU de 8 bits, con 2 kB de memoria RAM y 1 kB de EEPROM. Para la medición de las intensidades se usaron bobinas Rogowski y una tarjeta amplificadora/integradora de la señal de intensidad. Para comprobar el correcto diseño del sensor de intensidad implementado, es posible comparar la función de transferencia teórica esperada con la función de transferencia implementada trazada en laboratorio.

Finalmente, para contrastar las medidas realizadas por el analizador de redes implementado se usó la pinza amperimétrica Fluke 375, con una precisión probada y certificada.

MEDIDA DE MAGNITUDES ELÉCTRICAS TRIFÁSICAS

Es necesario tener una medición adecuada del suministro y consumo de la energía tanto para las distribuidoras y comercializadoras, así como para los usuarios, lo cual garantizará una correcta facturación. En estos últimos años, han surgido nuevas definiciones de los términos de potencia, debido a que hay un mayor crecimiento de componentes armónicas y desbalance en los sistemas eléctricos trifásicos.

Además de eso, hay un fuerte aumento de la utilización de cargas de electrónica de potencia, como son los rectificadores y convertidores que regulan las máquinas eléctricas en la industria y en la tracción de los trenes eléctricos.

Estas cargas se denominan cargas no lineales ya que la intensidad tiene una forma de onda distinta de la tensión. De esta forma, si la tensión es senoidal, la intensidad se aleja de la forma senoidal. por lo que se dice que la intensidad está distorsionada, lo

cual trae como consecuencias una distorsión general de los sistemas eléctricos [10-11]. De acuerdo con el desarrollo en series de Fourier, cualquier señal periódica no senoidal se puede representar como suma de señales senoidales puras de diferentes frecuencias, todos múltiplos de la frecuencia fundamental, según la ecuación (1) y ecuación (2).

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (1)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (2)$$

Se derivan de estos desarrollos los valores rms para la tensión e intensidad, ecuación (3) y ecuación (4)

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1} V_n^2} \quad (3)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1} I_n^2} \quad (4)$$

La tasa de distorsión armónica (Total harmonic distortion, THD) de una forma de onda no senoidal tiene en cuenta el contenido de los armónicos no fundamentales respecto al fundamental ($n = 1$), y se define según la ecuación (5) y ecuación (6), para la tensión y la intensidad, respectivamente.

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (5)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} V_n^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (6)$$

La Teoría de la potencia eléctrica monofásica en sistemas no senoidales define las potencias activas y reactiva como suma de cada término correspondiente a cada armónico, ecuación (7) y ecuación (8).

$$P = \sum_{n=1}^h P_n = \sum_{n=1}^h V_n I_n \cos \varphi_n \quad (7)$$

$$Q = \sum_{n=1}^h Q_n = \sum_{n=1}^h V_n I_n \sin \varphi_n \quad (8)$$

El sistema de generación y transporte trifásico se ha desarrollado desde finales el siglo XIX por sus grandes ventajas sobre los sistemas bifásico y monofásico. Los conceptos de potencia activa, reactiva y aparente se pueden extender a los circuitos trifásicos desbalanceados y distorsionados.

La potencia activa trifásica se define como suma de los términos correspondientes a cada fase, ecuación (9).

$$P_{3f} = P_A + P_B + P_C \quad (9)$$

$$Q_{3f} = Q_A + Q_B + Q_C \quad (10)$$

En este trabajo se ha usado la ecuación (10) para la potencia reactiva trifásica, aunque no tiene vigencia actual por considerarse que lo realmente importante para dimensionar un banco de condensadores de compensación del factor de potencia es la potencia reactiva fundamental de secuencia positiva, Q_{1+} . Se justifica el uso de la ecuación (10) por la facilidad en su cálculo y por la reducida memoria del MCU de la implementación.

La potencia aparente trifásica ha sido un tema de controversia, pero hay un consenso generalizado en usar la definición de la ecuación expresada en la ecuación (11), en el caso de un sistema de tres conductores [12].

$$S_e = \sqrt{\frac{V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2}{3}} \cdot \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2} \quad (11)$$

Donde V_{xy} , I_x representan la tensión de línea entre las fases x e y, y la intensidad de línea x, respectivamente.

Esta puede descomponerse en distintos términos que tienen un significado físico diferente [13], ecuación (12)

$$S_e^2 = P_{1+}^2 + Q_{1+}^2 + S_{1u}^2 + D_{el}^2 + D_{eV}^2 + P_H^2 + D_{eH}^2 \quad (12)$$

Donde:

P_{1+} : potencia activa fundamental de secuencia positiva.

Q_{1+} : potencia reactiva fundamental de secuencia positiva.

S_{1u} : potencia aparente de secuencia positiva resultante del desbalance del sistema, es decir, de las secuencias negativa y cero.

D_{el} : potencia aparente resultante de los armónicos de la intensidad multiplicada por el armónico 1 de tensión.

D_{eV} : potencia aparente resultante de los armónicos de la tensión multiplicada por el armónico 1 de intensidad.

P_H : potencia activa resultante de los armónicos comunes de tensión e intensidad. Se trata del término denominado potencia activa armónica.

D_{eH} : potencia aparente resultante de la componente no activa del producto de la tensión armónica por la intensidad armónica. En este término se encuentran la potencia reactiva armónica Q_H así como la contribución del desbalance de las componentes armónicas.

De esta ecuación, sólo la potencia aparente S_e se considera como medida directa en el analizador propuesto. La potencia reactiva es medida en el analizador según la ecuación (8), ecuación (10) y la potencia activa según ecuación (7), ecuación (9), aunque esta última se relaciona con los términos de la ecuación (12) según la ecuación (13):

$$P_{3f} = P_{1+} + P_{1-} + P_{10} + P_H \quad (13)$$

El cociente entre la potencia activa y la potencia aparente es el Factor de Potencia, el cual expresa la fracción de potencia aparente que es consumida como potencia activa.

$$FP = \frac{P_{3f}}{S_e} = \frac{P_{1+} + P_{1-} + P_{10} + P_H}{S_e} \quad (14)$$

Donde P_{1-} y P_{10} son las potencias activas fundamental de secuencia negativa y de secuencia cero, respectivamente. Se originan cuando en la tensión e intensidad existen componentes de secuencia negativa y cero, y normalmente tienen valores muy pequeños a comparación con P_{1+} .

Todas las magnitudes que calcula el analizador se derivan directa o indirectamente de la descomposición armónica de las tensiones y las intensidades [14]. Como ejemplo, se ha tomado el desarrollo de la tensión y la intensidad de la ecuación (15) y ecuación (16).

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t) \quad (15)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t) + D_n \cos(n\omega t) \quad (16)$$

A continuación, se particulariza para una fase, por simplicidad, el desarrollo de la fórmula para V_{rms} , I_{rms} , P y Q , ecuación (17-20).

$$V = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 + B_n^2} \quad (17)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n^2 + D_n^2} \quad (18)$$

$$P = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (A_n C_n + B_n D_n) \quad (19)$$

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (B_n C_n - A_n D_n) \quad (20)$$

Todas las demás magnitudes calculadas por el analizador se derivan igualmente a partir de la ecuación (15) y ecuación (16).

LA RED ADALINE

En este trabajo se utilizan las redes neuronales adaptativas Adaline para estimar las componentes armónicas de las tensiones y de las intensidades para cada fase.

Las redes neuronales adaptativas permiten estimar cualquier variable eléctrica $f(t)$ del sistema siempre que ésta pueda descomponerse mediante una combinación lineal de funciones dependientes del tiempo, $\mathbf{x}(t) = (f_1(t), f_2(t), \dots, f_N(t))^T$ de tal forma que:

$$f(t) = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{x}(t) \quad (21)$$

donde $\mathbf{W} = (W_1, W_2, \dots, W_N)$ constituye el vector de pesos de la red. La señal estimada por la red, $\hat{f}(t)$ es comparada con la señal real y el error obtenido se usa a través de un lazo de realimentación para actualizar los pesos, Figura 1.

La señal se muestrea a un intervalo fijo Δt en los instantes de tiempo $k\Delta t$. Se tiene pues una señal estimada $\hat{f}_k(t)$, una señal real $f_k(t)$ y un error $e_k(t)$ para cada valor de k .

El algoritmo de actualización de pesos incluido es al algoritmo Least Mean Square (LMS) que minimiza la secuencia de errores entre la señal real y la estimada, $e_k(t) = \hat{f}_k(t) - f_k(t)$. Este algoritmo se rige por la expresión de la ecuación (22).

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \frac{\alpha e_k \mathbf{x}_k(t)}{\mathbf{x}_k^T(t) \cdot \mathbf{x}_k(t)} \quad (22)$$

En (22) $\mathbf{x}_k^T(t) \times \mathbf{x}_k(t)$ es la norma de $\mathbf{x}_k(t)$, por lo tanto, el segundo sumando es proporcional al error y según la dirección del vector $\mathbf{x}_k(t)$. En la expresión se introduce el parámetro α para controlar la convergencia de la red.

Como en otros trabajos donde se aplica la red Adaline en las redes eléctricas [15], en este trabajo se usa esta metodología para estimar las componentes armónicas de las tensiones y las intensidades. Por ejemplo, la tensión instantánea se puede descomponer en series de Fourier, ecuación (23).

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t) \quad (23)$$

La red neuronal Adaline descrita estima las amplitudes de la ecuación (23) en la forma descrita por la ecuación (24), ecuación (25) y la ecuación (26) y el algoritmo LMS de la ecuación (22).

$$v(t) = \mathbf{W}_k^T(t) \cdot \mathbf{x}_k(t) \quad (24)$$

$$\mathbf{W}_k^T(t) = [A_{0k}, A_{1k}, B_{1k}, A_{2k}, B_{2k}, \dots, A_{nk}, B_{nk}] \quad (25)$$

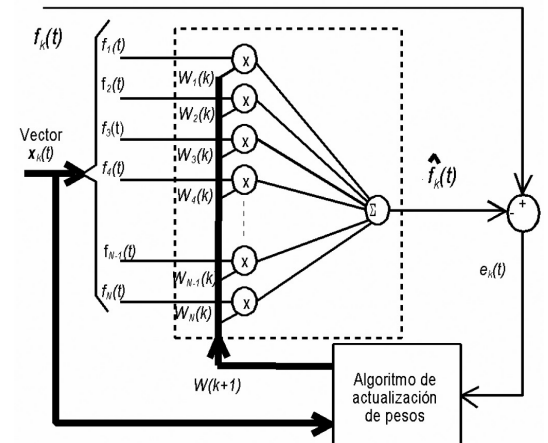


Figura 1. Diagrama de bloques de la red Adaline.

$$\mathbf{x}_k(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ \sin k\omega_1 t \\ \cos k\omega_1 t \\ \vdots \\ \sin(nk\omega_1 t) \\ \cos(nk\omega_1 t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

El desarrollo anterior se utiliza para el cálculo de los armónicos de las tensiones e intensidades, que serán la base de las medidas del analizador de energía eléctrica implementado.

IMPLEMENTACIÓN DEL ANALIZADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El analizador de energía eléctrica trifásico se implementó usando diferentes tarjetas que cumplieran diferentes funciones, Figura 2. El núcleo principal que realizaba el procesamiento de las señales de tensión e intensidad adquiridas es el microcontrolador de 8 bits AtMega 328P, con 2 kB de memoria RAM y 1 kB de EEPROM.



Figura 2. Caja del analizador de redes y tapa con la pantalla táctil.

El equipo consta de las siguientes partes:

1. Tarjeta de sensores de tensión trifásica:

se usaron tres transformadores de pequeña potencia de 220/9 V, seguido de un divisor de tensión para reducir el nivel de tensión, un amplificador inversor basado en el Amplificador Operacional LM358, un circuito RC a la salida del amplificador con resistencia variable cuya función es eliminar el desfase que introduce el transformador, y, finalmente, un seguidor de tensión que aísla la tensión de salida con la de entrada proveniente del circuito RC. La entrada + del amplificador inversor es alimentada con una señal DC de Off-set de 2,7 V proveniente de un divisor de tensión alimentado con 5V y se usa un condensador de 4,7 μ F electrolítico para acoplar la tensión de CA proveniente del transformador con la tensión de CC que existe en el amplificador inversor y etapas posteriores. El OpAmp LM358 es de tipo single-rail (alimentación con fuente de tensión positiva) y su tensión de alimentación es de 8 V. La salida del sensor de tensión en cada fase es proporcional a la forma de onda de la tensión de la red eléctrica que es medida, y se añade un nivel de OffSet en CC de 2,7 V para que siempre sea positiva. Esta condición es necesaria pues el AtMega 328P necesita tensiones positivas en el rango 0-5 V en sus entradas analógicas.

2. Tarjeta de sensores de intensidad trifásica:

toman como entradas bobinas Rogowski, medidoras de intensidad en CA con alto rango de medida de corriente y alta linealidad. La señal proveniente de la bobina Rogowski es proporcional a la derivada de la intensidad y necesita ser integrada y amplificada. La primera etapa es un amplificador no inversor al que se conecta en la entrada + una tensión de OffSet en CC de 2,9 V ajustable mediante potenciómetro y la segunda es un integrador con circuito RC en la realimentación – y se conecta la misma tensión de OffSet de 2,9 V. Como acopladores entre la señal de CA de salida de las bobinas y el resto del sensor y entre el amplificador y el integrador se usan condensadores electrolíticos de 10 μ F. Se usa el mismo OpAmp LM358 con alimentación single-rail de 8 V y otra entrada de alimentación de 5 V para la obtención de los 2,9 V mediante divisor de tensión ajustable. Esta tarjeta es muy importante para el funcionamiento

correcto del medidor y se estudiará con más detalles posteriormente.

3. **Tarjeta del MCU:** Representa el cerebro del equipo. Su componente principal es AtMega328P que recibe las 6 señales analógicas medidas (3 de tensión y 3 de corrientes), las lee a través de las 6 entradas analógicas, las convierte a señales digitales a través del convertidor A/D de 10 bits. La tarjeta posee el cristal de 16MHz de frecuencia, necesario para el funcionamiento del MCU y dos borneras de salida para los pines de comunicación I2C que envía datos a la pantalla.
4. **Pantalla táctil de 5 pulgadas Nextion:** tiene 3,5 kB memoria RAM, una resolución de 800x480 pixeles y recibe números en formato entero. La programación del MCU envía a la pantalla números en formato entero con tamaño variable en función de la magnitud que se desea medir. Por ejemplo, las magnitudes que pueden tomar valores pequeños necesitan un formato entero de 16 bits y las magnitudes que pueden tomar valores grandes o muy grandes necesitan el formato entero de 32 bits. Se evita con esto el desbordamiento (Overflow) en las variables que almacenan las medidas que se envían a la pantalla
5. **Fuente de alimentación de CC:** se usó una batería recargable de Li-ión de 1200 mAh, 9,5 V, seguida de tres reguladores de tensión, dos de los cuales son de 5V y un tercero de 8V. El regulador de 8V se usa para la alimentación de los OpAmps de los sensores de tensión/intensidad, el primer regulador de 5V se usa para alimentar las tarjetas sensores de tensión/intensidad y la pantalla y el segundo regulador se usa exclusivamente para la alimentación del MCU, el cual requiere una tensión muy estable.
6. **Carcasa del medidor:** la carcasa del equipo se realizó en impresión 3D, en dos piezas separadas: la caja donde se integran las tarjetas y la tapa donde va integrada la pantalla.

SENSOR DE INTENSIDAD Y CIRCUITO AMPLIFICADOR-INTEGRADOR

La bobina Rogowski produce una tensión de salida de baja magnitud que es proporcional a la derivada de la intensidad. Se necesita, por tanto, una tarjeta amplificadora-integradora que recupere la forma de onda de la intensidad [16]. Debido a que las señales

de entrada en el MCU están en el rango 0-5 V es necesario un ajuste cuidadoso de las etapas del sensor, para no incurrir en un desbordamiento del rango de entrada. Más específicamente, el sensor de intensidad implementado está formado por un amplificador más un integrador, siendo necesario un ajuste adecuado del amplificador inicial para que no se desborde la señal amplificada, incluso antes de llegar al integrador. Además, es de igual importancia ajustar adecuadamente el integrador para no introducir desfases indeseados entre la entrada y la salida, y no incurrir un desbordamiento de la salida [17-19].

Se ideó un circuito con una primera etapa amplificadora y una segunda integradora, usando el LM358. Idealmente sería como el circuito de la Figura 3.

Este circuito ideal se comporta como un filtro Paso-Bajo, con una frecuencia de corte muy baja, de tal forma que la frecuencia fundamental de 60 Hz y las demás frecuencias armónicas son amplificadas y desfasadas un ángulo de 90°. La amplificación decrece con frecuencias crecientes y la fase se mantiene en 90°. Del análisis del circuito en el dominio de Laplace se deduce que la frecuencia de corte es $\omega_c = 1/R_4C = 9,67$ rad/seg, lo que en hercios es $f_c = 1,54$ Hz.

Sin embargo, este circuito presenta el problema de producir salidas negativas, lo que no es tolerable por el MCU. Para corregir esto, se añadió un Off-Set de CC de 2,9 V mediante resistencia y potenciómetro ajustable, que se suma a la señal amplificada e integrada. Para acoplar la señal de entrada de Corriente Alterna con las señales de CC que procesa el circuito y se da en la salida, se añaden 3 condensadores electrolíticos, que cumplen la función de circuito abierto en CC, Figura 4.

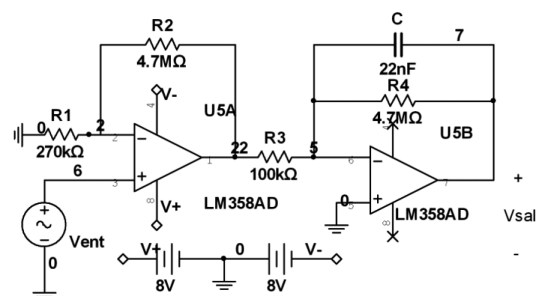


Figura 3. Circuito amplificador-inversor ideal.

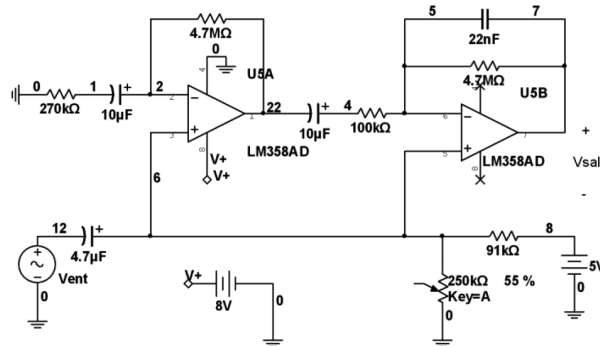


Figura 4. Circuito amplificador-inversor real.

Ambos circuitos se simularon en Multisim trazando la función de transferencia, Figura 5 y Figura 6.

Observando el diagrama de Bode, y concretamente la ganancia en tensión, se ve que el circuito real se aproxima al comportamiento ideal para frecuencias por encima de 20 Hz. Al considerar la fase, el comportamiento real difiere del ideal para frecuencias por encima de 180 Hz aproximadamente. Además, para frecuencias bajas también difieren ligeramente, aunque estas frecuencias de trabajo no son importantes, pues las medidas presentan, generalmente, frecuencias que van desde 60 Hz en adelante.

DIAGRAMA DE BODE DEL SENSOR DE INTENSIDAD IMPLEMENTADO

La tarjeta amplificadora-integradora implementada siguió el esquema de la Figura 4, considerando las tres fases. Esta tarjeta fue objeto de pruebas para determinar las diferencias entre la función de transferencia implementada, con respecto a

la ideal esperada y a la real, ambas vistas en el apartado anterior. En tales pruebas se usó una tarjeta de adquisición de datos MyDAQ de National Instruments generando entradas de tipo senoidal a diferentes frecuencias armónicas y determinando en el Osciloscopio la Ganancia en tensión A_v de la tarjeta y el ángulo de desfase entrada-salida ϕ .

Los resultados se muestran en las Figura 7 y Figura 8

El diagrama de la Figura 7 muestra un comportamiento en frecuencia muy similar al ideal y real en todas las frecuencias, si se exceptúa la frecuencia de 1 Hz a la cual no era posible generar una tensión con amplitud suficientemente pequeña para evitar la saturación de la señal en el sensor. Sin tener en cuenta esa frecuencia, la ganancia en tensión del sensor implementado es muy similar a la ideal y la real.

Por otra parte, la Figura 8 muestra que la fase del sensor implementado va disminuyendo al aumentar la frecuencia hasta casi estabilizarse en alrededor

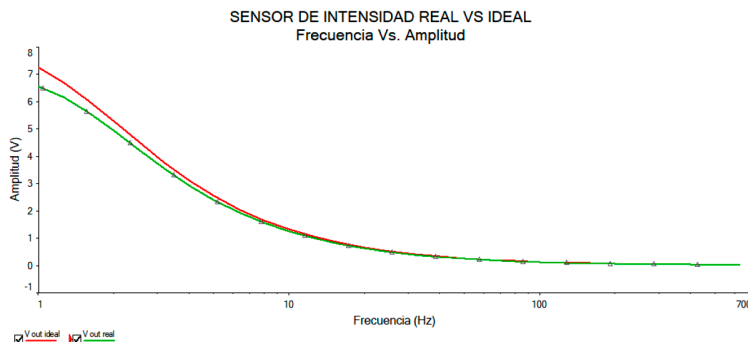


Figura 5. Trazado de las funciones de transferencia ideal y real en Multisim (magnitud).

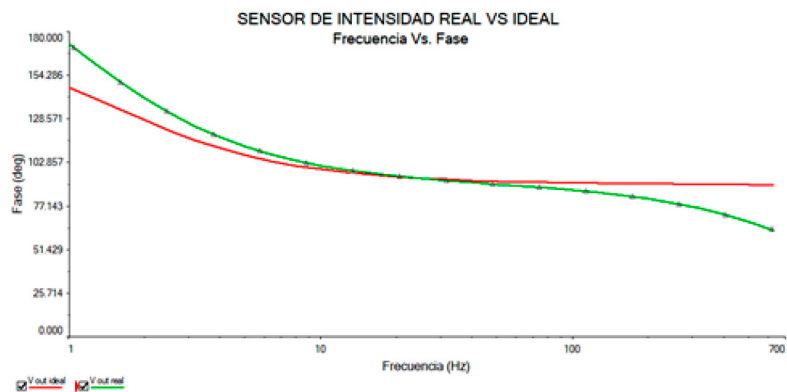


Figura 6. Trazado de las funciones de transferencia ideal y real en Multisim (fase).

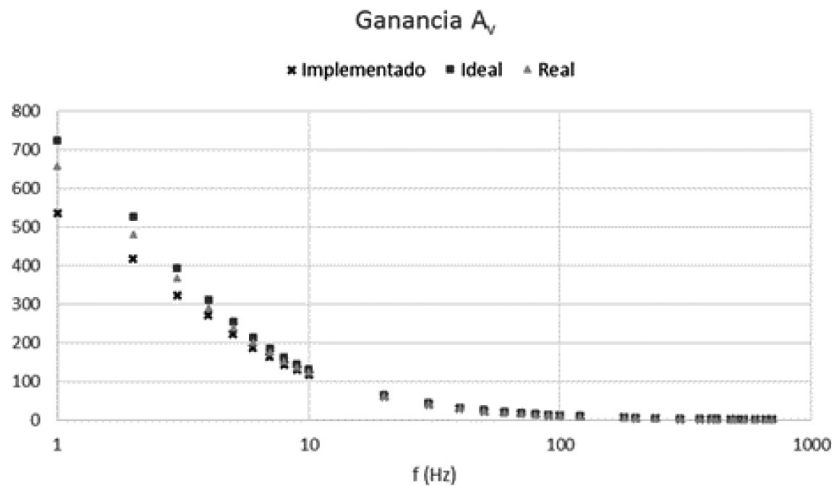


Figura 7. Representación de Bode de la ganancia en tensión.

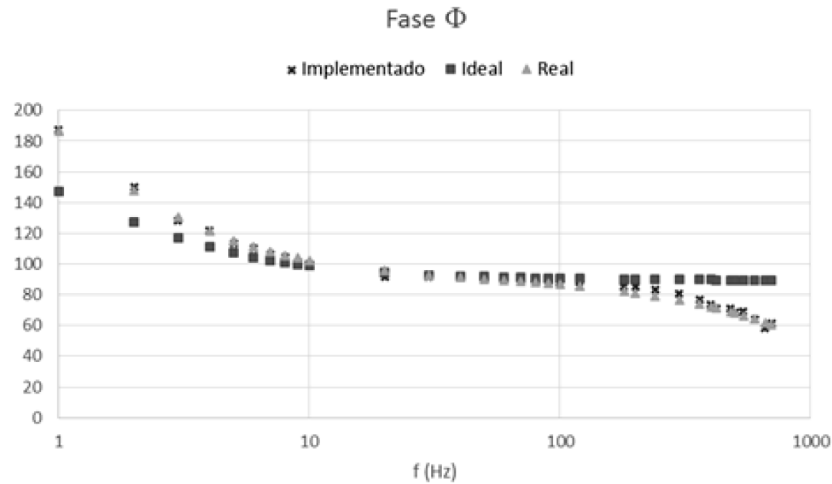


Figura 8. Representación de Bode del ángulo de fase.

de 90° para frecuencias en el rango 20-180 Hz, lo que está de acuerdo con los sensores ideal y real. Sin embargo, para frecuencias mayores a 180 Hz va disminuyendo progresivamente, lo que concuerda con el real, pero no con el ideal. Esta desviación en la fase se debe al efecto de los condensadores electrolíticos en el circuito, cuya impedancia cambia con la frecuencia y desvía la fase del valor ideal esperado para este circuito.

En la Figura 9 se representa la ganancia en tensión en escala logarítmica, en la que se puede apreciar que la desviación entre las 3 curvas es muy pequeña, para frecuencias por encima de f_c .

Hay que destacar que para el armónico fundamental se tiene unos valores muy correctos de ganancia en tensión y ángulo de fase. Además, son también correctos para los armónicos tercero y quinto, los cuales son los más importantes en las intensidades de los sistemas eléctricos.

ALGORITMO DE ENTRENAMIENTO DE LA RED ADALINE

El procesamiento de las señales digitalizadas de tensiones e intensidades lo realiza la red Adaline según una función `adaline()` programada para calcular las componentes armónicas. Inicialmente, la red neuronal Adaline cuenta con pesos nulos y, a medida que recibe las muestras de entrada secuencialmente, los pesos se van adaptando de forma On-line hasta que, al llegar a la última muestra, estos se estabilizan y se logra alcanzar la medida de la magnitud, ya

sea esta tensión o intensidad. En la Figura 10 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento de programación que se ha usado para el entrenamiento de la red y el cálculo de las medidas.

Como se aprecia en el diagrama de la Figura 10, después de completado un ciclo de medidas, los pesos finales se utilizan como pesos iniciales de un nuevo ciclo de entrenamiento y medida. El número de datos N fue de 70 muestras por cada canal de medida y la frecuencia de muestreo fue de 4,167 kHz. Mediante este procedimiento se consigue que, una vez entrenados los pesos de la red, se muestren las medidas solamente con el retraso propio del envío de datos desde el MCU a la pantalla de visualización y que la red pueda seguir sin demasiado retraso los cambios de las magnitudes medidas propios de los cambios en la red eléctrica.

Hay que resaltar que es necesario establecer un tiempo o momento de referencia en la fase A de la tensión, a partir del cual tomar datos de manera sincronizada en los 6 canales, además de que, al usar un número reducido de muestras para cada ciclo de medida, el procedimiento resulta económico en cuanto a recursos de memoria y programación.

CASO DE APLICACIÓN: INSTALACIÓN INDUSTRIAL

El Analizador se probó en un caso de aplicación en el que se midió las magnitudes eléctricas en un tablero general de una planta industrial de 220 V de tensión nominal y 3 conductores accesibles. En lo

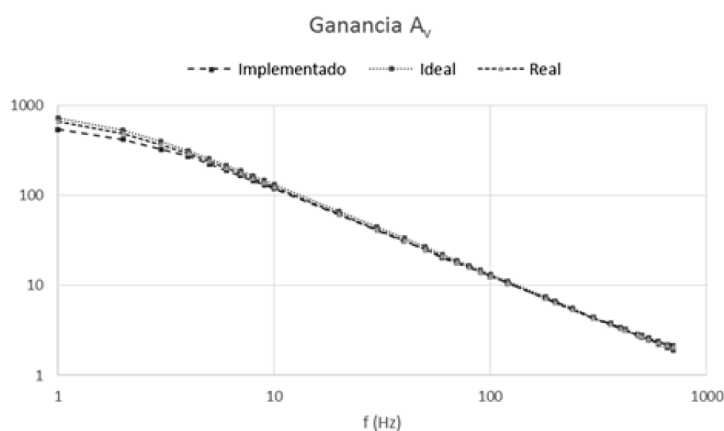


Figura 9. Representación de Bode de la ganancia en tensión en escala logarítmica.

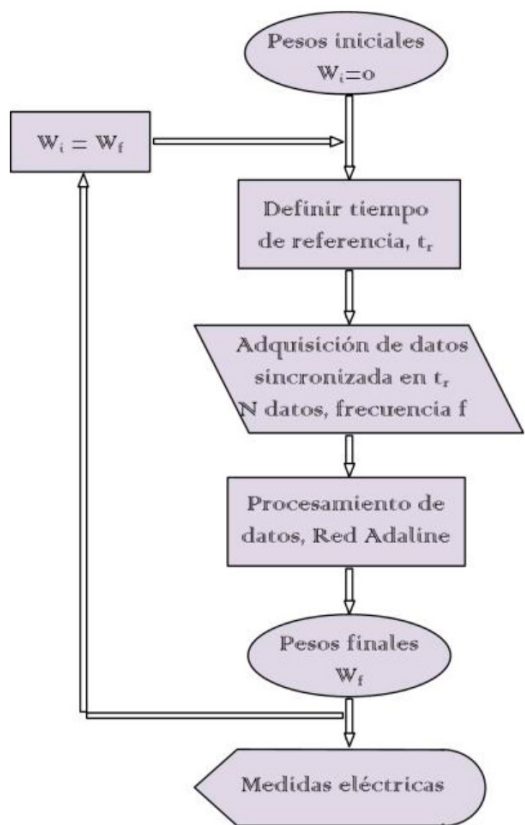


Figura 10. Diagrama de flujo del entrenamiento de la red Adaline.

que sigue se muestran algunas fotos de las pantallas de medidas del analizador, Figura 11 y Figura 12.

La Figura 11 muestra las medidas por fase y la Figura 12 los resultados trifásicos totales, incluido el factor de potencia.



Figura 11. Pantalla principal de medidas en cada fase.

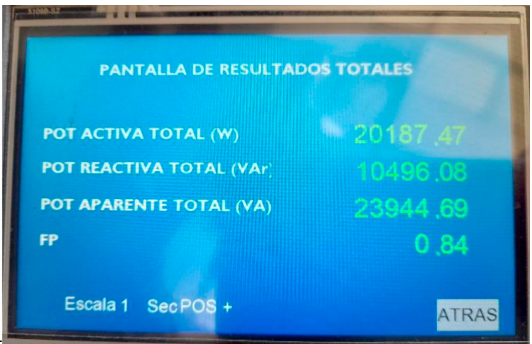


Figura 12. Pantalla de medidas totales.

Para comprobar la exactitud de las medidas se usó una pinza amperimétrica Fluke 375, comparando las medidas del analizador con las de la pinza comercial, Tabla 1.

Los resultados de la comparación muestran la buena precisión y exactitud del analizador midiendo intensidades y tensiones en un entorno distorsionado. Una limitación importante de este trabajo es no poder disponer de un analizador de redes para la comparación, por lo que no se pudo comprobar los resultados de potencias y armónicos. Sin embargo, se espera poder comparar en un futuro las medidas realizadas con un analizador de redes de probado desempeño.

Los resultados de las medidas de armónicos de tensiones e intensidades en cada fase se muestran en la Tabla 2.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que es factible la implementación de un Analizador de Calidad de Energía Eléctrica Trifásico usando redes Adaline, resultando un

Tabla 1. Análisis comparativo de las medidas del Analizador y la pinza Fluke.

	Analizador	Pinza Fluke	Error (%)
I _A (A)	71,26	69,5	2,53
I _B (A)	50,49	51,1	-1,19
I _C (A)	56,70	57,5	-1,39
V _A (V)	134,54	133,8	0,5
V _B (V)	134,38	133,2	0,9
V _C (V)	132,78	133,2	-0,3

Tabla 2. Medidas de armónicos de tensión e intensidad en cada fase.

	Fase A	Fase B	Fase C
I_1 (A)	69,37	49,08	54,50
I_3 (A)	2,41	2,84	5,03
I_5 (A)	5,19	2,07	5,98
I_H (A)	7,82	3,92	8,94
THD_I (%)	11,27	7,93	16,40
V_1 (V)	134,40	133,71	132,48
V_3 (V)	4,52	0,87	2,07
V_5 (V)	6,51	3,79	3,57
V_H (V)	4,84	3,96	4,36
THD_V (%)	4,84	2,94	3,29

procedimiento económico en cuanto a recursos de programación y muy estable. Es destacable que se logra medir los armónicos más importantes de las 3 tensiones e intensidades hasta el 11vo armónico, con tan solo 2 kB de RAM y 1 kB de EEPROM.

La tarjeta acondicionadora amplificador-integrador muestra buen desempeño una vez elegidos los valores de los componentes cuidadosamente. La magnitud de la función de transferencia de la tarjeta está muy cercana a los valores teóricos esperados, aunque la fase presenta desviaciones crecientes respecto al valor esperado de 90° para frecuencias mayores a 180 Hz. Estas desviaciones afectan en las medidas de potencias activa y reactiva armónicas, magnitudes que en muchos casos son muy pequeñas respecto a la fundamental. No obstante, en una línea de trabajo futuro se corregirán estas desviaciones en las fases.

Finalmente, las mediciones realizadas en una industria muestran el correcto desempeño del analizador en campo, arrojando mediciones estables y que se actualizan rápidamente con las variaciones en la carga de la instalación. Los errores máximos respecto a la pinza patrón Fluke son de 2,53% en las intensidades y de 0,9% en las tensiones, lo que es un muy buen desempeño.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Tecnológica del Perú por el apoyo y financiación en el marco del proyecto de Investigación "Prototipo de analizador trifásico de la calidad de la energía eléctrica implementado en Arduino usando redes Adaline" Agosto 2019-Diciembre 2020.

REFERENCIAS

- [1] J. Arriaga and R. Nerville. "Power system harmonics". Wiley and Sons. Second edition. ISBN: 978-0470851296. 2003.
- [2] Ministerio de Energía y Minas. "Norma técnica de calidad de los servicios eléctricos, DS Nº 020-97-EM". Lima. Perú. 1997.
- [3] A. Moreno Muñoz. "Power quality. Mitigation technologies in a distributed environment". Springer. First edition. ISBN: 978-1-84628-772-5. 2007.
- [4] J. Balcells. "Eficiencia en el uso de la energía eléctrica". Editorial Marcombo. Primera edición. ISBN: 9789587782257. 2016.
- [5] Institute of electrical and electronics engineers, IEEE. "Estandar IEEE 1459-2010. Definiciones de términos". 2010.
- [6] A.F. Arciniegas, D.E. Imbajoa y J. Revelo. "Diseño e implementación de un sistema de medición inteligente para AMI de la microrred de la universidad de Nariño". Enfoque UTE. Vol. 7 Nº 1, pp. 300-314. 2017. ISSN 1390-6542. DOI: 10.29019/enfoqueute.v7n1.136.
- [7] N.K. Nguyen, P. Wira, D. Flieller, D.O. Abdeslam and J. Merckle. "Harmonics identification with artificial neural networks: Application to active power filtering". International Journal of Emerging Electric Power Systems. Vol. 12 Nº 5. 2011. DOI: 10.2202/1553-779X.2783.
- [8] S. Ziegler, R.C. Woodward, H. Ho-Ching and L.J. Borle. "Current sensing techniques: A review" IEEE Sensors Journal. Vol. 9 Nº 4, pp. 354-376. 2009. DOI: 10.1109/JSEN.2009.2013914.
- [9] M.H. Samimi, A. Mahari, M.A. Farahnakian and H. Mohseni. "Review on the Rogowski coil principles and applications". IEEE Sensors Journal. Vol. 15 Nº 2, pp. 651-658. 2013. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2362940.
- [10] T.E. Núñez and J.A. Pomilio. "Shunt active power filter synthesizing resistive loads". IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 17 Nº 2, pp. 273-278. 2002. DOI: 10.1109/63.988946.
- [11] T. Núñez Z, R. Moreno, J. Ramos y A. Soto L. "Filtro Híbrido de Potencia". Tecnia. Vol. 17 Nº 2. 2007. DOI: 10.21754/tecnia.v17i2.368.

- [12] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations. "Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: A discussion". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11 N° 1, pp. 79-101. 1996. DOI: 10.1109/61.484004.
- [13] P. Salmerón, S. Pérez Litrán and J. Prieto. "Active power line conditioners: Design, simulation and implementation for improving power quality". Academic Press. First edition. ISBN: 978-0128032169. 2015.
- [14] S. Goswami, A. Sarkar and S. Sengupta. "Power components measurement using S-ADALINE". International Journal of Engineering Innovation & Research. Vol. 6 N° 2, pp. 120-126. 2017. ISSN: 2277-5668.
- [15] A. Sarkar and S. Segumpta. "On-line tracking of single phase reactive power in non-sinusoidal conditions using S-Adaline networks". Measurement. Vol. 42 N° 4, pp. 559-569. 2009. DOI: 10.1016/j.measurement.2008.10.001.
- [16] K. Draxler, R. Styblikova, J. Hlavacek and R. Prochazka. "Calibration of Rogowski coils with an integrator at high currents". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 60 N° 7, pp. 2434-2438. 2011. DOI: 10.1109/TIM.2011.2126090.
- [17] M. Tao, D. Shaotao, Z. Jingye and Z. Lianqi. "Rogowski coil for current measurement in a cryogenic environment". Measurement Science Review. Vol. 15 N° 2, pp. 77-84. 2015. DOI: 10.1515/msr-2015-0012.
- [18] A. Cataliotti, A.E. Emanuel, S. Nuccio and G. Tinè. "Characterization and error compensation of a Rogowski coil in the presence of harmonics". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 60 N° 4, pp. 1145-1181. 2011. DOI: 10.1109/TIM.2010.2090694.
- [19] L. Pandian, L. Zhenhua, L. Hongbin and L. Hongfeng. "A high-current calibration system based on indirect comparison of current transformer and Rogowski coil". Measurement Science and Technology. Vol. 24 N° 12. 2013. DOI: 10.1088/0957-0233/24/12/125005.