

MEDIDA DE CORRIENTE Y POTENCIA DE LÍNEA AC BASADA EN MULTIPLICADOR ANALÓGICO Y SENSOR DE CORRIENTE MAGNETORRESISTIVO

*AC LINE CURRENT AND POWER MEASUREMENT
BASED ON ANALOG MULTIPLIER AND
MAGNETORESISTIVE CURRENT SENSOR*

Sandra Soriano Díaz

Universidad de Valencia, España
sanso3@alumni.uv.es

Diego Ramírez Muñoz

Universidad de Valencia, España
ramirez@uv.es

Recepción: 25/noviembre/2022

Aceptación: 13/marzo/2023

Resumen

Actualmente, el consumo de energía eléctrica es cada vez más importante en la sociedad. La capacidad de monitorizar y controlar con precisión la energía se convierte en una parte crucial a la hora de realizar el diseño de cualquier sistema. Sin embargo, diseñar un sistema que proporcione sensibilidad, rango dinámico y monitorización continua de energía siempre presenta una mayor complejidad. El objetivo se centra en diseñar un sistema que englobe las características anteriormente comentadas. Para ello, se emplea el monitor LT2940 diseñando un sistema novedoso en el cual se utiliza un sensor magnetorresistivo de corriente de efecto túnel en la entrada del canal de corriente del monitor. En la fase experimental se desarrolla un conjunto de subsistemas para analizar la capacidad de monitorización de la energía.

Los resultados obtenidos permiten identificar el correcto funcionamiento del sistema diseñado proporcionando una gran precisión de la monitorización continua.

Palabras Clave: Acondicionamiento, corriente, magnetorresistencias, potencia y sensores.

Abstract

Nowadays, the consumption of electrical energy is increasingly important in society. The ability to accurately monitor and control power becomes a crucial part of any system design. However, designing a system that provides sensitivity, dynamic range, and continuous power monitoring is always more complex. The work is focused on designing a system that encompasses the aforementioned characteristics. For this, the LT2940 monitor is used, designing a novel system in which a magnetoresistive tunnel effect based current sensor is used at the input of the monitor's current channel. In the experimental phase, a set of subsystems is developed to analyze the energy monitoring capacity. The results obtained allow to identify the correct functioning of the designed system, providing a great precision of the continuous monitoring.

Keywords: *conditioning, current, magnetoresistance, power and sensors.*

1. Introducción

Monitorizar la potencia y la corriente es muy útil desde el punto de vista de adquirir la información del consumo en las diferentes cargas electrónicas o el consumo energético cada vez más demandado por la sociedad actual. Ello se debe a la necesidad de tener y poder mantener un control exhaustivo del consumo energético por razones económicas y de sostenibilidad. Por ello, en el ámbito de la electrónica existen distintos procesadores mixtos (analógicos y digitales) que están diseñados para desempeñar estas funciones [Ramírez, 2009].

Para llevar a cabo este objetivo se utilizará el monitor LT2940 en conjunto con el hardware necesario para la adaptación de las especificaciones de entradas y salidas de este. Además, se implementan sensores basados en tecnología magnetorresistiva que ofrecen aislamiento galvánico, son no disipativas y permiten medir corrientes AC y DC. Otras tecnologías como el transformador de corriente ofrecen aislamiento galvánico, pero solo miden corrientes AC. La técnica que utiliza resistencia shunt no ofrece aislamiento y es disipativa. Los sensores Hall, si bien miden corriente AC y DC con aislamiento necesitan en general un núcleo magnético y la tecnología Rogowsky-Chattock ofrece aislamiento, pero no mide corrientes AC

[Lee, 2010].

El sensor magnetorresistivo de corriente utilizado en este proyecto está formado por cuatro magnetorresistencias conectadas en configuración de puente de Wheatstone. La disposición de éstas respecto al sentido de la corriente conlleva a que esta técnica alcance linealidad directa y máxima sensibilidad.

2. Métodos

Diseño del sistema electrónico propuesto

Se ha diseñado un sistema electrónico para monitorizar la potencia y la corriente a partir del integrado LT2940. Para ello, se debe acondicionar las señales de entrada y salida para cumplir con las especificaciones del monitor. En la figura 1 se presenta un diagrama de bloques el cual se divide principalmente en: subsistema acondicionador del canal de corriente, subsistema acondicionador del canal de tensión y subsistema procesador monitor de potencia y corriente.

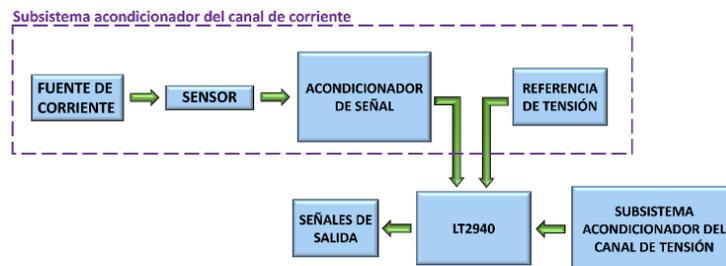


Figura 1 Diagrama de bloques del sistema electrónico propuesto.

El esquema electrónico completo se visualiza en la figura 2. Posteriormente, se compara cada uno de los bloques respecto al esquema eléctrico describiendo el conjunto del hardware utilizado para el cumplimiento de las especificaciones de dicho monitor.

Subsistema acondicionador del canal de corriente

Fuente de corriente

El circuito de la figura 3 corresponde a un convertidor de tensión a corriente basado en un amplificador operacional (OP07) y una referencia de tensión

(LM4040). Mediante esta configuración se puede ajustar la corriente que circula por el sensor independientemente del propio sensor [Franco, 2003] ya que la red en serie formado por la resistencia R_2 y el potenciómetro RV_1 permite ajustar la corriente deseada ecuación 1.

$$I_R = I_L = \frac{V_{ref}}{R} \quad (1)$$

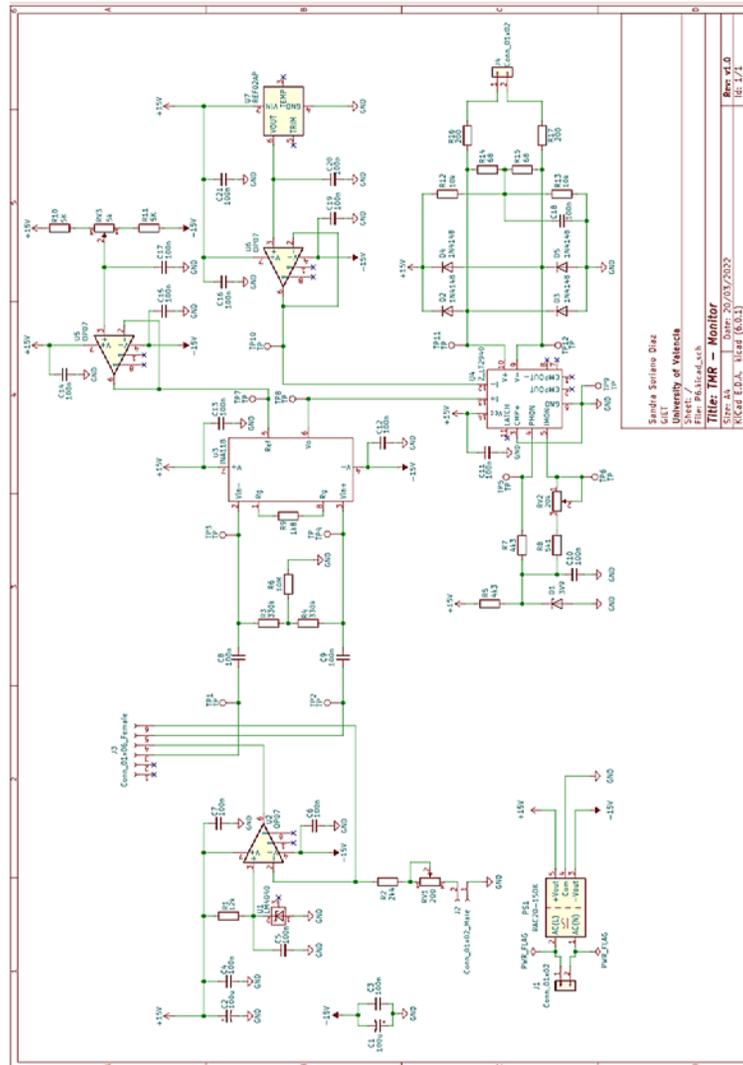


Figura 2 Esquema electrónico propuesto.

Sin embargo, para que el circuito funcione correctamente es necesario que la tensión en la carga V_L cumpla la ecuación 2. Siendo V_{O,SAT_H} la máxima tensión proporcionada por el amplificador operacional.

$$V_L \leq V_{O,SAT,H} - V_{ref} \quad (2)$$

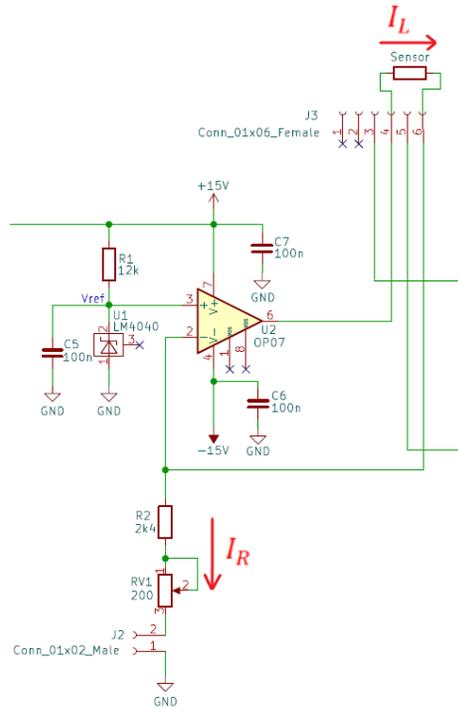


Figura 3 Fuente de corriente.

Sensor de corriente

El sensor se compone por un conjunto de cuatro sensores magnetorresistivos (basado en uniones magnéticas de efecto túnel, MTJ) implementados en una topología en puente de Wheatstone, figura 4 [García, 2017]. La configuración de puente completo se obtiene de manera que el cable conductor de prueba (línea de corriente en forma de U) se monta debajo del chip, figura 4. Este sensor se conecta directamente al conector J3 de la figura 3.

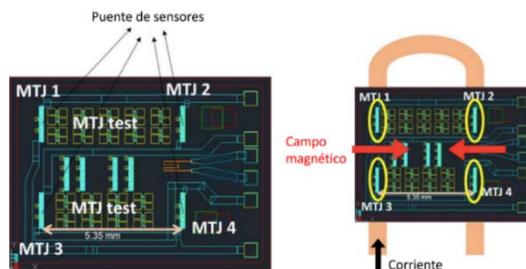


Figura 4 Sensor de corriente TMR.

Como se muestra en la ecuación 3, la configuración de la figura 5 proporciona una salida máxima y una linealidad directa [Pallàs, 2001].

$$V_{os^+} - V_{os^-} = I_0 \cdot R_0 \cdot x \quad (3)$$

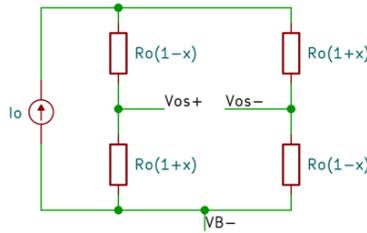


Figura 5 Puento de Wheatstone.

R_0 es el valor que tiene la magnetorresistencia en ausencia de campo magnético H o de corriente I_0 por la pista. El parámetro adimensional x está relacionado con la corriente $i(t)$ a sensar a través de la ecuación 4.

$$x(t) = S_S \cdot \frac{i(t)}{R_0 \cdot I_0} \quad (4)$$

Siendo S_S la sensibilidad en corriente de la magnetorresistencia (mV/A) y I_0 laente de corriente que polariza la magnetorresistencia (mA).

Acondicionador de señal

El acondicionador de señal está compuesto por un filtro pasa-alta y un amplificador de instrumentación como se observa en la figura 6.

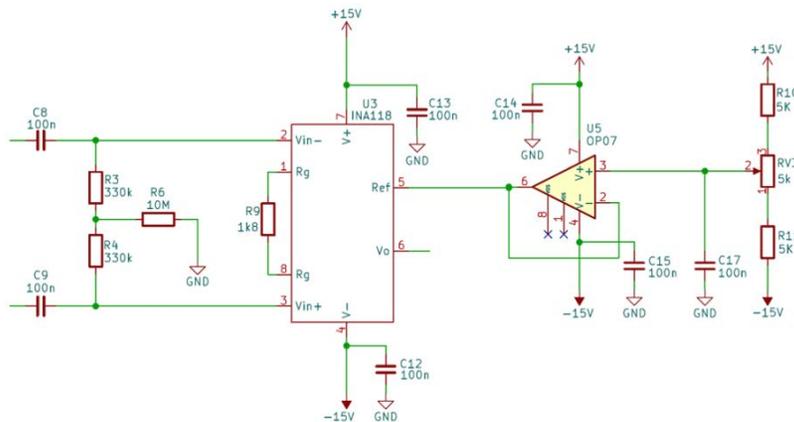


Figura 6 Bloque acondicionador del esquema electrónico.

El diseño del filtro pasa-alta se basa en una estructura totalmente diferencial consiguiendo mejorar el rechazo a las señales de modo común manteniendo la información de interés en modo diferencial durante el mayor número de etapas posibles. La frecuencia a la que se ha diseñado el filtro en base a ecuación 5, con $R = 330 \text{ k}\Omega$ y $C = 100 \text{ nF}$, es de 4.82 Hz .

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5)$$

El Amplificador de Instrumentación utilizado corresponde al modelo INA118. Este requiere de una tensión de referencia y un seguidor. La tensión de referencia se implementa a través del divisor resistivo formado por las resistencias R_{10} , R_{11} y el potenciómetro lineal de ajuste vertical multivuelta de precisión (RV_3). Dicha tensión de referencia presenta una determinada impedancia que debe anularse a la entrada del amplificador de instrumentación (U3) debido a las especificaciones proporcionadas por el fabricante en su hoja de datos. Para ello, se implementa el amplificador operacional, modelo OP07, en configuración modo seguidor (U5) con la finalidad de obtener a su salida una impedancia cero y la tensión de referencia obtenida anteriormente.

La ganancia se ha diseñado empíricamente adecuando la señal obtenida del sensor a máxima corriente para cumplir con las especificaciones requeridas por el monitor LT2940. El valor deseado de la ganancia ($G_{INA} = 28.8$) se fija mediante la resistencia R_9 de $\frac{1}{4} \text{ W}$ y tolerancia del 1% cuyo valor es de $1.8 \text{ k}\Omega$, ecuación 6.

$$G_{INA} = 1 + \frac{2 \cdot R_3}{R_9} \quad (6)$$

Nota: La resistencia R_3 corresponde al diagrama interno del propio INA118. Dicho valor viene fijado por el fabricante siendo este de $25 \text{ k}\Omega$.

Subsistema acondicionador del canal de tensión

Para cumplir con las especificaciones del fabricante [Linear, 2009], la entrada $V^+ - V^-$ debe ser de 3 V y superpuesta en una señal continua centrada en 7.5 V . Para ello, se diseña un atenuador pasivo para producir un factor de atenuación frente a la tensión de secundario de $12 \text{ V}_{\text{rms}}$ proporcionado por el transformador que

se conecta al conector (J4) de la figura 7. Dicho factor de atenuación se compone de las resistencias R_{14} , R_{15} , R_{16} y R_{17} , las cuales corresponden a $\frac{1}{4}$ de W y tolerancias del 1%, ecuación 7. Se fijan los valores de las resistencias $R_{16} = R_{17} = 200 \Omega$ y se calculan las resistencias R_{14} y R_{15} , ecuación 8, obteniendo que su valor es de 68Ω .

$$V^+ - V^- = \frac{V_{2^o} \cdot R_{14}}{R_{16} + R_{14}} \quad (7)$$

$$R_{14} = R_{15} = \frac{(V^+ - V^-) \cdot R_{16}}{V_{2^o} - (V^+ - V^-)} \quad (8)$$

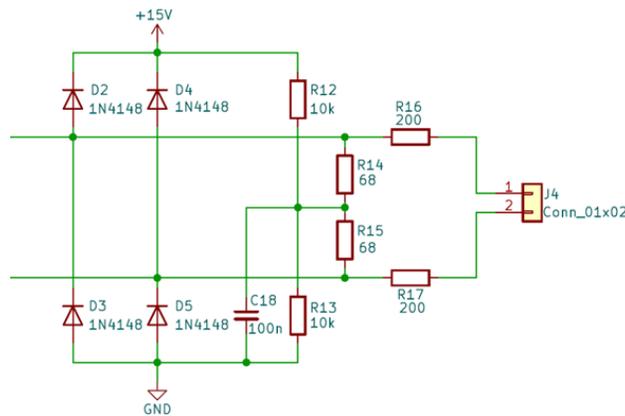


Figura 7 Atenuador pasivo y rectificador de onda completa.

El rectificador de onda completa está formado a partir de un puente de diodos (D_2 , D_3 , D_4 y D_5) cuyo modelo corresponde al 1N4148. Dicha señal, es atenuada por el divisor de tensión formado por las resistencias R_{12} y R_{13} de $\frac{1}{4}$ W y tolerancia del 5 % cuyos valores son de $10 \text{ k}\Omega$. A continuación, la señal atenuada es filtrada mediante el condensador cerámico C_{18} de 100 nF consiguiendo finalmente la señal continua de 7.5 V .

Subsistema procesador monitor de potencia y corriente

Canal de corriente

El terminal I_{MON} (pin 5 del circuito integrado LT2940) (Figura 8) monitoriza de forma instantánea la corriente que circula por la carga a través de su valor de tensión $v(t)_{I_{MON}}$ de acuerdo con la ecuación 9.

$$v(t)_{IMON} = V_{ref} + i_{IMON}(t) \cdot R_{IMON} = V_{ref} + G_{IMON} \cdot (V_{I+}(t) - V_{I-}(t)) \cdot R_{IMON} \quad (9)$$

En el caso del diseño realizado se tiene:

- $G_{IMON} = 1 \frac{mA}{V}$ dato obtenido del data-sheet del fabricante.
- $V_{ref} = 3.29 V$ valor medido de la tensión de Zener (D1).
- $G_{INA} = 28.8$ ganancia ajustada experimentalmente para $R_g = 1.793 k\Omega$.
- $R_{IMON} = 15.7 k\Omega$ valor experimental de R_{IMON} ajustado mediante la suma $R_8 + R_{V3}$ ($5 k\Omega$ y un trimmer de $20 k\Omega$).
- $S_S = 0.2896 \frac{mVpk}{Apk}$, es la sensibilidad experimental que se ha obtenido para el sensor cuando ha sido sometido a un barrido en corriente.

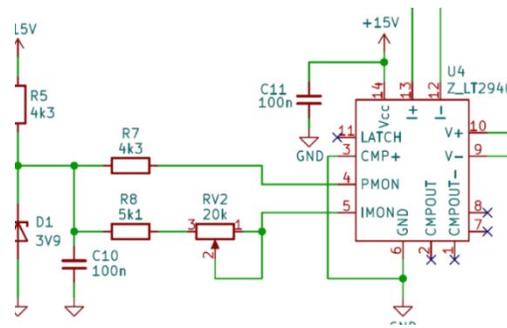


Figura 8 Esquema electrónico del monitor LT2940 y sus salidas.

Canal de potencia

El terminal P_{MON} (pin 4 del circuito integrado LT2940) monitoriza de forma instantánea la potencia que circula por la carga a través de su valor de tensión $V_{P_{MON}}$. El valor medio de esta viene dado de acuerdo con la ecuación 10.

$$\bar{V}(t)_{P_{MON}} = V_{ref} + \frac{1}{2} \cdot R_{P_{MON}} \cdot K_{P_{MON}} \cdot K_v \cdot n \cdot G_{INA} \cdot S_S \cdot V_{pk} \cdot I_{pk} \cdot \cos \varphi \quad (10)$$

Los valores experimentales de la ganancia del amplificador de instrumentación G_{INA} y de la sensibilidad del sensor son los descritos en el diseño del canal de corriente, además:

- $R_{P_{MON}} = 4310 \Omega$ valor experimental de $R_{P_{MON}}$ obtenido con una resistencia de valor nominal $4.3 k\Omega$, 1%.

- K_{PMON} es la ganancia o factor de conversión del canal de potencia cuyo valor nominal según el fabricante es de $500 \mu A/V^2$.
- $K_v = 0.254$ valor experimental obtenido para el factor de atenuación de la tensión de línea con resistencias experimentales $R_{14} = 68.8 \Omega$, $R_{15} = 68.3 \Omega$, $R_{16} = 201 \Omega$ y $R_{17} = 201.6 \Omega$ (nominales $R_{14} = R_{15} = 68 \Omega$, $R_{16} = R_{17} = 200 \Omega$, todos con tolerancia del 1%).
- $n = 0.055$ es la relación de transformación del transformador de tensión utilizado con tensiones nominales en primario de $220 V_{rms}$ y en secundario de $12 V_{rms}$.

Fase experimental

Comprende la caracterización eléctrica del sensor (obtención de su sensibilidad), el ajuste de los canales de corriente y de potencia a los valores aceptados por el procesador y la recogida de medidas experimentales con diferentes configuraciones de carga.

Caracterización del sensor

Para llevar a cabo la caracterización del sensor se ha diseñado un banco de pruebas (Figura 9) que tiene como objetivo obtener la relación entre la tensión de salida del sensor y la corriente que mide el mismo. Para ello, se ha dispuesto del generador de funciones (modelo 33521A) para generar una tensión que se le introducirá al amplificador de transconductancia (modelo PCS-2B). Este a su vez, generará la corriente de interés por la pista del sensor. Para obtener la tensión de salida del sensor se utilizará la sonda diferencial (modelo ADA400A) y el módulo de alimentación (modelo 1103). Estos equipos permiten acondicionar la señal de salida del sensor para posteriormente, poder visualizarla correctamente en el osciloscopio (modelo DS1074Z).

Una vez conectados y ajustados los equipos comentados anteriormente, se introducen diferentes tensiones en el generador de funciones de 0 a 10 V para adquirir un barrido de corriente continua de 0 a 10 A obteniendo para cada valor de la corriente, la tensión de salida del propio sensor.

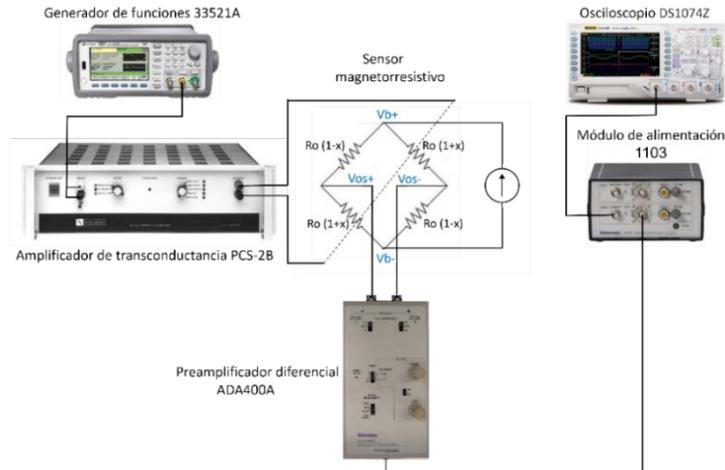


Figura 9 Esquema de conexión propuesto para caracterizar el sensor TMR32.

Comprobación del canal de corriente

Para llevar a cabo la comprobación del canal de corriente se ha dispuesto de un banco de pruebas compuesto por: analizador de fuente de alimentación de CA (modelo 6834A), vatímetro (modelo 2551), osciloscopio (modelo DS1074Z), un conjunto de cargas accionadas con sus correspondientes interruptores (Figura 10), sensor de corriente (serie TMR) y el montaje del prototipo propuesto (Figura 11). Dentro del rango de salida del analizador de fuente de alimentación se selecciona $150 V_{rms}$ para alimentar las cargas. Con esta tensión se varía el conjunto de cargas para obtener un barrido de corriente variable hasta un fondo de escala máximo de $10 A_{rms}$. Esto se consigue accionando en cada caso los diferentes interruptores. Los datos obtenidos se visualizan a través de las lecturas proporcionadas por el uso del vatímetro.

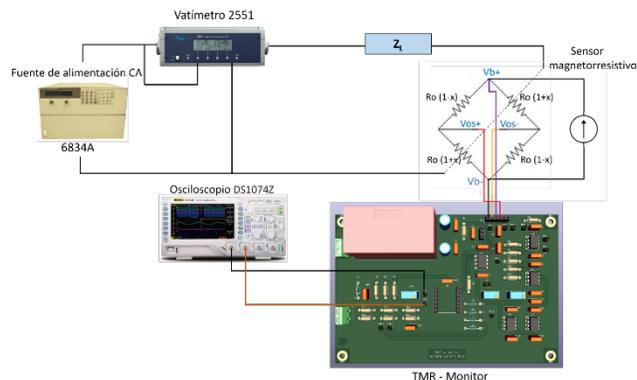


Figura 10 Banco de pruebas para la verificación de los canales del LT2940.

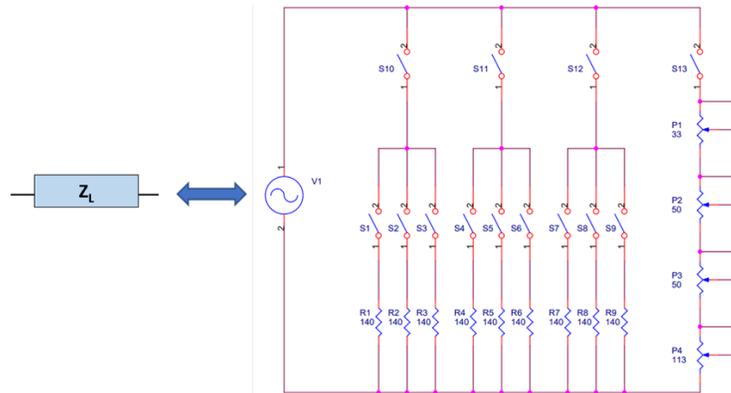


Figura 11 Equivalencia de cargas para la obtención de un barrido de corriente variable.

El barrido de corriente obtenido se aplica a la entrada del sensor. Este, en función de la corriente aplicada, ofrece a la salida una tensión proporcional a la entrada, es decir, el sensor se comporta de forma lineal. La tensión generada se introduce al montaje del prototipo propuesto a través del conector (J3). Este montaje se acondiciona mediante un conjunto de módulos (filtrado, amplificación, acondicionador de señal, etc.) para el tratamiento de las correspondientes entradas del monitor LT2940 para comprobar el correcto funcionamiento de su salida de corriente IMON (pin 5). Los datos experimentales obtenidos se visualizan mediante las lecturas proporcionadas por el uso del osciloscopio.

Comprobación del canal de potencia

Para llevar a cabo la comprobación del canal de potencia se ha dispuesto del banco de pruebas utilizado para el canal de corriente, implementando en éste un conjunto de condensadores que asociados por medio de los correspondientes interruptores se obtienen distintos factores de potencia mediante los valores (30 μF , 50 μF y 80 μF), (Figuras10 y 12).

Para verificar el canal de potencia se cerrarán los interruptores asociados a las resistencias con el objetivo de obtener plena carga. A su vez, mediante el analizador de fuente de alimentación se realiza un barrido de tensión de salida comprendido entre (100 a 150) V_{rms} para las diferentes combinaciones de condensadores. Se utiliza el vatímetro para tomar las medidas referidas a la tensión y corriente eficaz, factor de potencia y potencia activa.

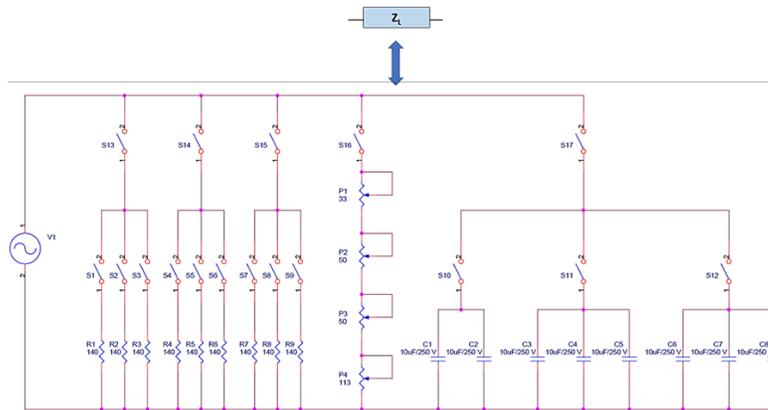


Figura 12 Esquema de conexión propuesto basado en las cargas y condensadores.

Al variar la tensión de línea se logró cambiar la potencia entregada sin modificar el factor de potencia. Este nuevo barrido de corriente se aplica a la entrada del sensor realizando el mismo procedimiento analizado en la comprobación del canal de corriente. Pero en este caso, los valores experimentales se visualizan en el osciloscopio conectado a la salida PMON (pin 4) del integrado LT2940.

3. Resultados

Caracterización del sensor

La figura 13 representa la relación entre la corriente de entrada del sensor (eje x) respecto a la tensión de salida del mismo (eje y). Además, se visualiza la estimación lineal junto con el coeficiente de correlación. En consecuencia, se tiene una sensibilidad S_S para el sensor utilizado de 0,2896 mV/A.

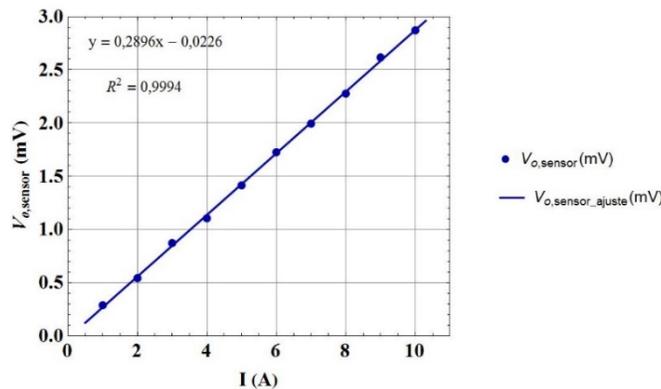


Figura 13 Caracterización del sensor TMR32.

Canal de corriente

La figura 14 representa el barrido de la corriente eficaz (eje x) respecto a la dependencia de la tensión eficaz en el terminal IMON (eje y) para la referencia del valor experimental medido y por otro lado, para el valor calculado de forma teórica. Puede observarse como las medidas experimentales del canal de corriente concuerdan con el modelo teórico utilizado.

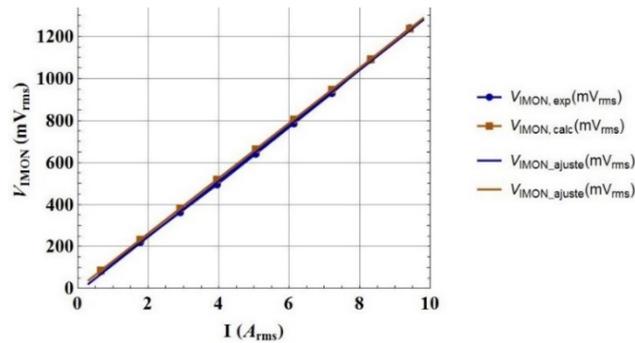


Figura 14 Respuesta del canal de corriente del integrado LT2940.

Canal de potencia

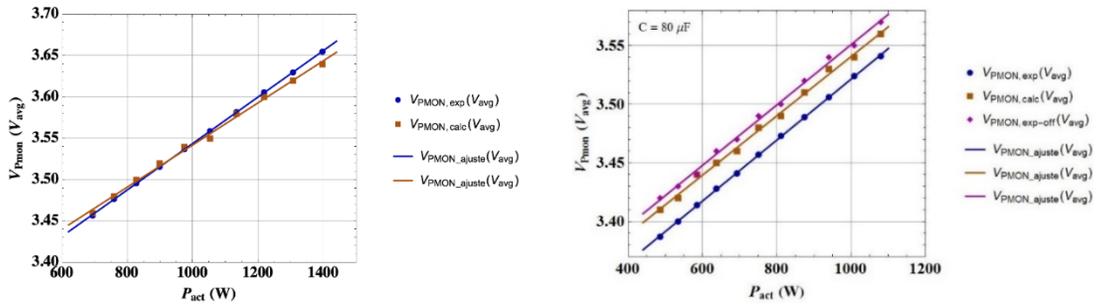
Los resultados experimentales para verificar el canal de potencia del monitor LT2940 se divide en: canal de potencia sin condensador y con condensador.

Sin condensador

La figura 15a representa en el eje x la potencia activa (W) respecto a la dependencia de la tensión del valor promedio en el terminal PMON (eje y) para la referencia del valor experimental medido y el valor calculado de forma teórica. Puede observarse como las medidas experimentales concuerdan con el modelo teórico utilizado.

Condensador de 80 μ F

La figura 15b representa en el eje x la potencia activa (W) respecto a la dependencia de la tensión del valor promedio en el terminal PMON (eje y) para la referencia del valor experimental medido, el experimental sumando el offset y el calculado de forma teórica. Se comprueba el correcto funcionamiento del sistema.



a) Sin condensador.

b) $C = 80 \mu F$.

Figura 15 Respuesta del canal de potencia del integrado LT2940.

La figura 16 muestra las tensiones de entrada del monitor LT2940 procedentes de la corriente y tensión a máxima carga una vez acondicionadas. La figura 17 muestra las corrientes y potencias instantáneas procesadas por el monitor LT2940 a máxima carga.



Figura 16 CH3: V+-V, 1 V/div, CH4: I+-I-, 500 mV/div. $P_{entregada}$: 1402,8 W.

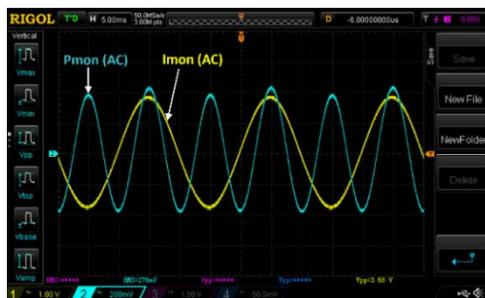


Figura 17 CH1: IMON (AC), 1 V/div. CH2: PMON (AC), 200 mV/div. $P_{entregada}$: 1404,6 W.

4. Discusión

El objetivo fundamental del sistema electrónico propuesto ha sido incorporar la tecnología de sensado magnetorresistiva a la monitorización de potencia eléctrica

de línea y por tanto del consumo eléctrico realizado por una carga o un conjunto de ellas. En las notas de aplicación que ofrecen los diferentes fabricantes de monitores de potencia y energía no es usual que incluyan la tecnología magnetorresistiva, por lo general ofrecen soluciones basadas en resistencia shunt, sensores Hall o transformadores de corriente. El trabajo ofrece una solución adaptada a puentes de Wheatstone magnetorresistivos e implica el diseño de una interfaz electrónica adecuada a la respuesta del sensor pues ésta viene dada en término de una tensión diferencial. En consecuencia, se ha tenido que utilizar etapas de filtrado y de amplificación con características diferenciales. Este sensor añade ventajas como son su aislamiento galvánico inherente por lo que no se necesita transformadores de corriente y su ausencia de autocalentamiento pues la corriente de interés no atraviesa el sensor como en el caso de utilizar una resistencia shunt.

Por otra parte, han implementado dos señales de referencia independientes: una para la entrada de referencia del amplificador de instrumentación y otra, ligeramente diferente para la entrada I^- del procesador. Ello ha permitido compensar el desequilibrio interno que pudiera tener el procesador en el canal de corriente. Los resultados experimentales han sido obtenidos frente a carga resistiva y con cierta componente reactiva de forma que también se comprueba la funcionalidad de la propuesta para factores de potencia inferiores de la unidad.

5. Conclusiones

Se ha propuesto un diseño novedoso que permite monitorizar la corriente y la potencia mediante la utilización del integrado LT2940 junto al sensor basado en la tecnología TMR cuya aplicación ofrece grandes posibilidades por sus altas prestaciones y no excesivo coste en los diferentes sectores de la industria.

Se ha diseñado un sistema de acondicionamiento y adquisición de las señales de entrada y posteriormente, el procesamiento de las señales de salida de corriente y potencia del monitor LT2940. El acondicionamiento tiene que cumplir, por un lado, con las especificaciones de las señales de entrada empleando un proceso de filtrado, amplificadores y circuito de referencia de tensión, así como las especificaciones de salida de dicho monitor.

Se ha conseguido caracterizar el sensor para verificar su correcta linealidad y obtener su sensibilidad para después, poder comprobar teóricamente el correcto funcionamiento de las salidas de corriente y potencia del monitor.

Mediante un proceso experimental se ha realizado un seguimiento de las ondas en cada uno de los bloques más relevantes en el diseño para verificar el correcto funcionamiento de cada uno de ellos.

Finalmente, se han obtenido experimentalmente los resultados en las salidas del monitor LT2940, realizando una comparativa respecto a los resultados esperados teóricamente, comprobando el correcto funcionamiento del sistema completo.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Franco, S. *Circuits with Resistive Feedback en Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*, 3^a ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, pp. 60-105, 2003.
- [2] García, E. *Electronic Energy Meter Based on a Tunnel Magnetoresistive Effect (TMR) Current Sensor. Materials*. pp 1-11, 2017.
- [3] Lee, M., DiGiacomo, T. *Unique Analog Multiplier Continuously Monitors Instantaneous Power and Simplifies Design for Power Control Loops*, LT Journal of Analog Innovation, pp.10-18, Jul, 2010.
- [4] *LT2940 Power and Current Monitor*, Linear Technology Corporation, 2009.
- [5] Pallàs Areny, R. *Sensores y acondicionadores de señal*. Ed. Marcombo, Barcelona, 2001.
- [6] Ramírez, D. et al. *Design and experimental verification of a smart sensor to measure the energy and power consumption in a one-phase AC line. Measurement*. pp. 412-419, 2009.