

Diseño de Sondas Aisladas para Prácticas Docentes de Electrónica de Potencia

D. Antolín

Escuela Politécnica de la Almunia,
Centro Adscrito a la Universidad de Zaragoza
Grupo de Diseño Electrónico
La Almunia de Doña Godina,
Zaragoza, España
dantolin@unizar.es

F. J. Pérez-Cebolla

Dept. Ingeniería Electrónica,
Escuela de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de Zaragoza
Grupo de Electrónica de Potencia
Zaragoza, España
fperez@unizar.es

B. Calvo

Dept. Ingeniería Electrónica,
Facultad de Ciencias,
Universidad de Zaragoza
Grupo de Diseño Electrónico
Zaragoza, España
becalvo@unizar.es

N. Medrano

Dept. Ingeniería Electrónica,
Facultad de Ciencias,
Universidad de Zaragoza
Grupo de Diseño Electrónico
Zaragoza, España
nmedrano@unizar.es

Abstract— En un laboratorio de electrónica de potencia resulta necesario disponer de instrumentación adecuada para la medida de tensiones y corrientes relativamente elevadas de forma segura. Ello implica el uso de sondas activas de tensión y de corriente, cuyo coste es muy superior al de las sondas pasivas sin aislamiento. Si además se trata de un laboratorio con fines docentes, el número de usuarios es elevado y en consecuencia el mantenimiento de estas sondas supone un coste adicional. Así, con el fin de disponer de una instrumentación adecuada al proceso de aprendizaje con un coste bajo, en este trabajo se presenta el diseño de dos sondas activas de tensión y de corriente.

Keywords— *Electrónica de potencia, instrumentación, sondas activas, medida de tensión, medida de corriente*

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca en la asignatura "Electrónica de Potencia" impartida en el tercer curso de los Grados de Ingeniería Eléctrica [1] e Ingeniería Mecatrónica [2] de la Universidad de Zaragoza. En las prácticas de laboratorio, los estudiantes emplean sondas activas de tensión en modo diferencial que facilitan el aislamiento galvánico. El modo diferencial posibilita la medida de corrientes mediante la inclusión una resistencia tipo *shunt*. No obstante, al ser sondas diseñadas para la medida de hasta varios cientos de voltios, en este modo las capturas quedan perturbadas salvo que las corrientes a medir sean elevadas. Además, el coste de estas sondas es relativamente alto, al igual que el de su mantenimiento. Con el objeto de solventar la problemática anterior, en este trabajo se presenta el diseño ad hoc de una sonda activa de tensión y otra de corriente, con un bajo coste de implementación y, por ende, de su mantenimiento, facilitando el equipamiento docente de los laboratorios de potencia.

Además, para el diseño y desarrollo de los diferentes subsistemas (fuentes de alimentación [3], amplificadores de aislamiento [2, 3], amplificación [5]–[7], filtros activos [5]–[7], medida de corriente y tensión [6]), se utilizan circuitos estudiados en asignaturas previas de los grados como "Tecnología Electrónica I", completando el proceso de

enseñanza-aprendizaje y mostrando la utilidad y funcionalidad real de diferentes circuitos. De esta manera se hace ver al alumnado que la teoría y los diseños estudiados en el aula pueden formar parte de una implementación real y funcional reforzando el proceso de aprendizaje y la motivación de los estudiantes.

II. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

El conjunto de sondas diseñado es capaz de medir tensiones de la red trifásica de distribución (520 V de pico) y corrientes de hasta 4 A, en ambos casos con un ancho de banda comprendido entre DC y 50 kHz.

Por otro lado, al ser sondas diseñadas para una aplicación docente se han utilizado circuitos presentados durante el desarrollo de las diferentes asignaturas de las titulaciones con el objetivo de que los alumnos sean capaces de distinguir dichas estructuras e identificarlas a través de un ejemplo a la par práctico y útil.

El diseño e implementación de ambas sondas se describe en los siguientes apartados.

A. Sonda Aislada de Tensión

La sonda de tensión se basa en el amplificador de aislamiento ISO122, o ISO124, de Texas Instruments [8], [9]; siendo estos perfectamente compatibles. Estos amplificadores operacionales basados en un aislamiento capacitivo admiten una tensión máxima de entrada de ± 100 V, siendo su rango lineal de entrada de ± 10 V. Si bien estos amplificadores a priori no se caracterizan ni por una gran precisión ni un gran ancho de banda, su disponibilidad en un formato DIP (fácilmente insertable en un zócalo) y su no elevado coste los convierten en candidatos ciertamente adecuados en términos de mantenimiento. Ayudando con ello a reforzar el aprendizaje de los circuitos estudiados en el aula y posteriormente montados en el laboratorio.

En la Fig. 1 se muestra el diagrama funcional de bloques de la sonda aislada para la medida de tensión. Se puede observar como la sonda cuenta con dos fuentes bipolares de alimentación, independientes entre sí y aisladas de la red de suministro eléctrico, las cuales se encargan de alimentar las etapas de entrada y de salida del amplificador operacional con aislamiento.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Vicerrectorado de Política Científica (PIIDUZ_19_360).

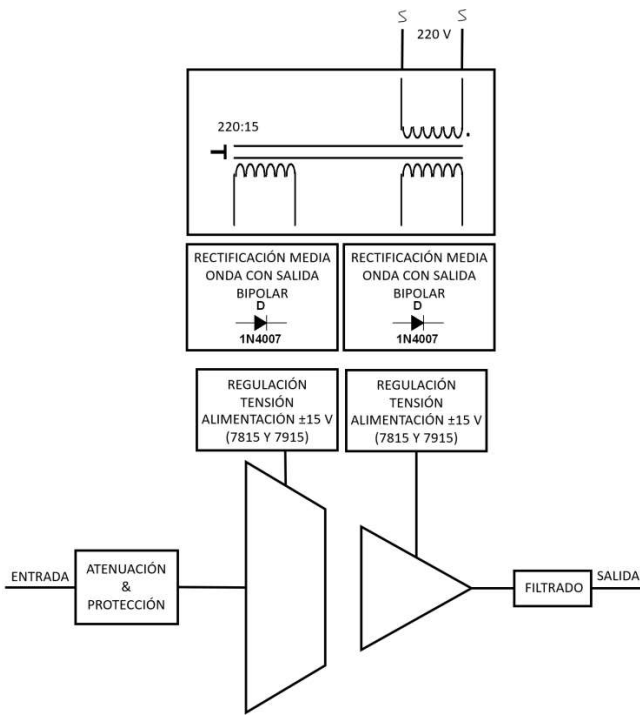


Fig. 1. Diagrama de bloques funcional de la sonda aislada de tensión.

La sonda también dispone a su entrada de una etapa atenuadora, que actúa como circuito de protección para evitar que tensiones elevadas dañen al AO de aislamiento.

Finalmente, la sonda incorpora a su salida un filtro activo implementado mediante amplificadores operacionales, encargado de reducir el posible nivel de ruido generado en la salida del amplificador de aislamiento.

Los subsistemas anteriores se describen a continuación:

1) Fuente de Alimentación

En la Fig. 2 se muestra el esquema del circuito de la fuente de alimentación. Cuenta con un transformador para atenuar la tensión de red, sus respectivos rectificadores en media onda (para los semiciclos positivo y negativo) y condensadores de filtrado. La etapa de regulación de tensión está formada por un 7815 y un 7915 que permiten establecer unas tensiones de alimentación de $\pm 15\text{ V}$, valores de tensión dentro del rango de alimentación indicado en el amplificador de instrumentación.

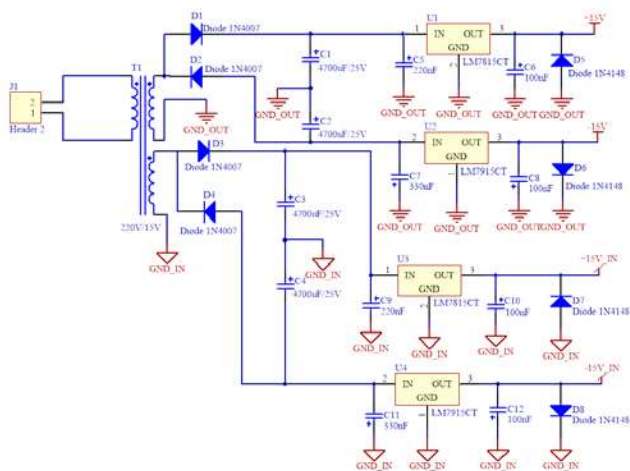


Fig. 2. Esquema del circuito de la fuente de alimentación de la sonda aislada de tensión.

El diodo que se encuentra a la salida en polarización inversa está como elemento de protección frente a posibles inversiones de polaridad en los terminales de alimentación.

A través de esta implementación se muestra al estudiante una aplicación de la versión clásica de diseño de una fuente de alimentación lineal, implementada en base a las cuatro etapas básicas ya vistas: atenuación, rectificación, filtrado y regulación.

2) Etapa de Entrada: Atenuación más Protección

Asumiendo que el rango de tensiones de entrada para el que se desea que la sonda sea funcional se extiende hasta los 520 V de pico de la red trifásica y que el amplificador de aislamiento capacitivo ISO122 tiene un rango de funcionamiento en la entrada de $\pm 10\text{ V}$, soportando hasta $\pm 100\text{ V}$ sin romperse, la tensión que puede haber en la entrada del AO de aislamiento es muy superior al rango de entrada admitido, por lo que resulta necesario incluir un atenuador. Este, tal como se muestra en la Fig. 3, se basa en un divisor resistivo compuesto por tres resistencias ($R1$, $R2$ y $R3$) que en función del estado de unos interruptores permiten atenuar la señal respectivamente $\times 1$, $\times 10$ o $\times 100$.

En el caso de que la entrada sea directa (atenuación $\times 1$), si por error se introdujesen valores de tensión superiores al límite de $\pm 100\text{ V}$ que el amplificador puede soportar, obviamente este se destruiría. Con el fin de evitar que un alumno o cualquier otro usuario pueda destruir el amplificador de ese modo, la etapa de protección compuesta por $R4$, $D1$ y $D7$ se encarga de limitar la tensión de entrada del amplificador en el rango de $\pm 15\text{ V}$.

Por otro lado, como segundo sistema de seguridad, la entrada de tensión directa (sin atenuación) en el amplificador de aislamiento solo se produce al activar $S1$ y $S2$ de forma simultánea ($a = \text{ON}$). Se establece entonces la conexión física de la entrada con el amplificador a través del circuito recortador formado por $D1$, $D7$ y $R4$ mostrado en la Fig. 3.

La atenuación cuando el valor de entrada es máximo hace que la caída de tensión en $R1=100\text{ k}\Omega$ sea aproximadamente de 500 V con una disipación de potencia es de 5 W . Este valor de $R1$ provoca que con una atenuación en la sonda de $\times 10$ la medida no sea altamente precisa, pero si suficiente en una aplicación docente, donde el propósito es demostrar el funcionamiento diferentes circuitos.

El estado de los interruptores para configurar los diferentes valores de atenuación se muestra en la tabla I.

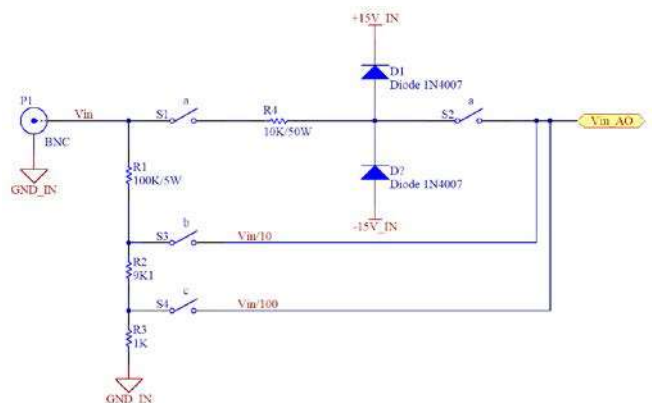


Fig. 3. Esquema del circuito de la etapa de entrada a la sonda de tensión aislada.

TABLA I. CONDICIONES DE ATENUACIÓN

Condiciones de Atenuación			
Rango de Entrada	Atenuación	Condición de Activación	Estado de los Interruptores
0-10 V	x1	a = ON	S1 = CERRADO S2 = CERRADO
		b = OFF	S3 = ABIERTO S4 = ABIERTO
		c = OFF	S1 = ABIERTO S2 = ABIERTO
0-100 V	x10	a = OFF	S3 = CERRADO S4 = ABIERTO
		b = ON	S1 = ABIERTO S2 = ABIERTO
		c = OFF	S3 = CERRADO S4 = ABIERTO
0-520 V	x100	a = OFF	S1 = ABIERTO S2 = ABIERTO
		b = OFF	S3 = ABIERTO S4 = CERRADO
		c = ON	S1 = ABIERTO S2 = ABIERTO

3) Etapa de Aislamiento

Es la etapa principal de la sonda y está basada en el amplificador de aislamiento capacitivo ISO122 o ISO 124, dicha etapa se muestra en la Fig. 4.

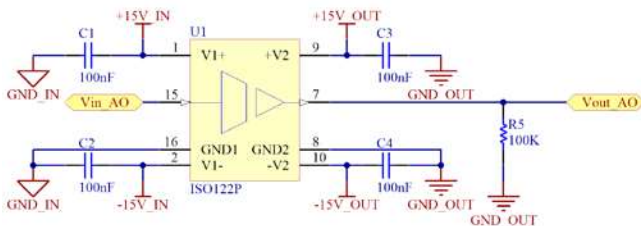


Fig. 4. Esquema del circuito de la etapa de aislamiento.

4) Etapa de Salida

La etapa de salida completa está formada por dos etapas amplificadoras básicas, cuyo esquema se muestra en la Fig. 5. La primera etapa, a la izquierda del esquema es una etapa sumadora, implementada para realizar una compensación del offset, la cual se selecciona con un selector (S5).

La siguiente y última etapa antes de salir a un conector BNC para la conexión al osciloscopio es un filtro de segundo orden analógico con comportamiento Butterworth y una topología Sallen-Key, cuyo circuito se muestra en parte derecha de la Fig. 5. El paso de la señal a la salida a través del filtro también es seleccionable a través de un conmutador (S6). La frecuencia de corte del filtro se ha hecho coincidir con la máxima que admite el amplificador de aislamiento, siendo esta igual a 50 kHz.

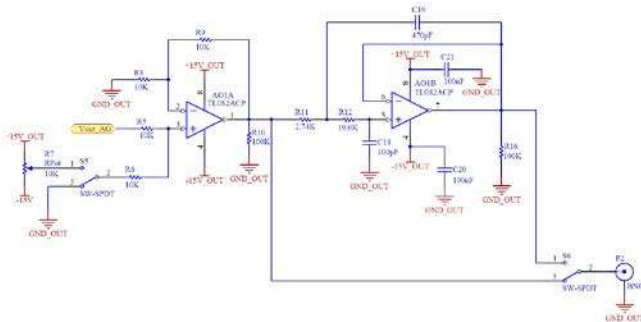


Fig. 5. Esquema del circuito de la etapa de salida.

B. Sonda Aislada de Corriente

A nivel comercial las sondas activas para la medida de corriente cuyo rango en frecuencia comienza en continua (DC) están basadas en el efecto Hall. Estas sondas permiten no interferir en el circuito para realizar la medida presentando

un elevado nivel de seguridad. Las desventajas que tienen son su precio, su difícil mantenimiento y construcción mecánica.

El método elegido en este trabajo para la medida de corriente se basa en el uso de una resistencia tipo shunt. Este procedimiento es barato y fácil de mantener, si bien en contraposición presenta el inconveniente de tener que modificar levemente el circuito al incluir la resistencia para la medida de la corriente.

En este caso el amplificador empleado para proporcionar el aislamiento galvánico entre la entrada y la salida de la sonda es un HCPL-7840 de Broadcom [10], siendo este de tipo opto-electrónico.

Las aplicaciones típicas de este amplificador son: la medida de la corriente de fase en motores, el sensado de corriente en un inversor, el aislamiento de la señal de una fuente de alimentación conmutada, el aislamiento de una señal analógica de propósito general y la monitorización y medida de corriente en aplicaciones de propósito general, siendo esta última la que se pretende alcanzar en nuestro caso.

Este amplificador también se encuentra disponible con un encapsulado en formato DIP (para su inserción con zócalo) y presenta un coste muy adecuado en términos de mantenimiento, siendo, por tanto, su uso recomendable en laboratorios docentes.

Las tensiones de alimentación tanto para la entrada como para la salida de este amplificador de aislamiento óptico son de +5 V, mientras que su rango de entrada en operación lineal se encuentra entre ±200 mV en modo diferencial.

En la Fig. 6 se muestra el diagrama funcional de bloques de la sonda aislada para la medida de corriente. Se puede observar como la sonda cuenta con dos fuentes de alimentación independientes entre sí y aisladas de la red, encargadas de alimentar las etapas de entrada y de salida del amplificador con aislamiento y las diferentes etapas básicas para la acomodación de su tensión de salida.

Dado que la medida de la corriente se realiza a través de una resistencia y la señal pasa a través del amplificador de aislamiento cuyo rango de salida es de ±200 mV con salida

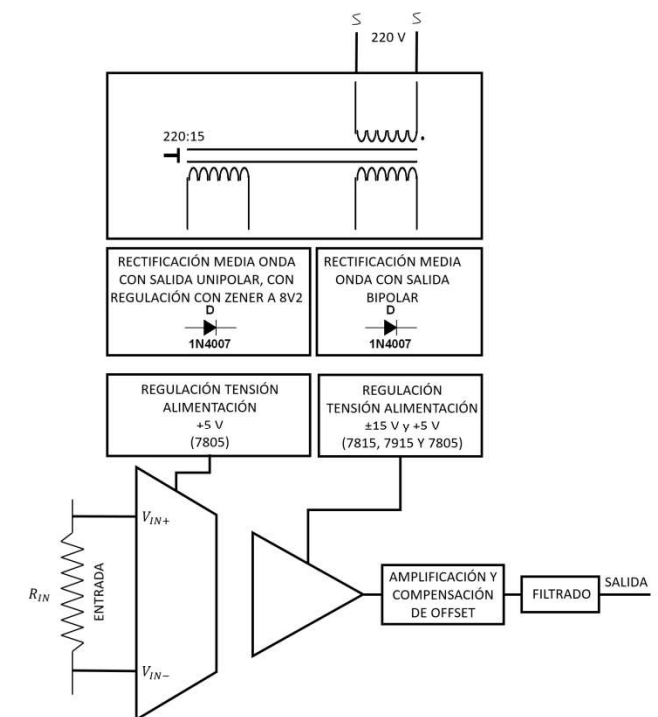


Fig. 6. Diagrama de bloques funcional de la sonda aislada de corriente.

diferencial, resulta necesario amplificar y restar dicha señal para lograr una medida apropiada. Se incluye además la compensación del posible offset de salida del amplificador de aislamiento.

Al igual que en la sonda de tensión, a la salida de la sonda de corriente se ha incluido una etapa de filtrado también implementada mediante amplificadores operacionales.

Los subsistemas anteriormente descritos se detallan a continuación:

1) Fuente de Alimentación

En la Fig. 7 se muestra el esquema del circuito de la fuente de alimentación diseñada para esta sonda. La metodología de diseño seguida es la misma que para la sonda anterior, con la particularidad de que en este caso las tensiones del amplificador de aislamiento son de +5 V tanto para la etapa de entrada como para la de salida, siendo ±15 V para el resto de etapas amplificadoras encargadas de la acomodación y el filtrado de la señal a medir.

Con el objetivo de mostrar a los estudiantes que el uso o la estandarización en el uso de componentes es una práctica habitual en la industria para la reducción de costes se ha utilizado el mismo transformador, con una relación de transformación 220/15. De nuevo la implementación de las fuentes lineales se ha realizado en base a estructuras clásicas fácilmente identificables para los estudiantes.

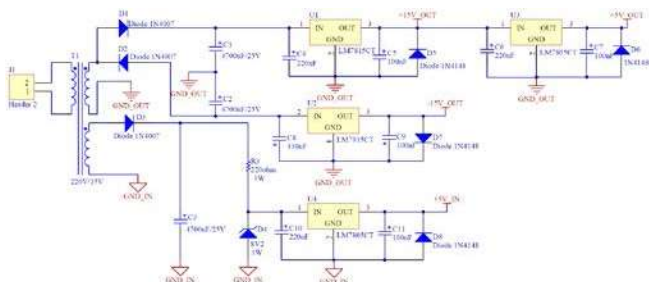


Fig. 7. Esquema del circuito de la fuente de alimentación de la sonda de corriente.

En el diseño de la fuente alimentación de la etapa de la salida de la sonda se han utilizado los mismos reguladores lineales de +15 V y -15 V (7815 y 7915) que en la sonda anterior. Los +5 V se han obtenido conectando en cascada la tensión de salida de +15 V (7815) a la entrada del regulador de +5 V (7805).

2) Etapa de Entrada y Aislamiento

La sonda está diseñada para la medida de corrientes no superiores a 4 A. Su etapa de entrada completa se muestra en la Fig. 8.

La conexión de entrada, como en el caso de la sonda aislada de tensión, también es del tipo BNC. Con el fin de evitar sobre corrientes en la entrada de la sonda, como primer sistema de protección se incluye un fusible de 4 A.

El rango de entrada objetivo en corriente es de 4 A, mientras que el amplificador operacional tiene un rango de operación lineal en tensión de entrada en modo diferencial de de ±200 mV. Para obtener estos rangos de operación con una resolución adecuada se han utilizado dos resistencias de 0,1 Ω y 2 W. La primera de ellas (R1) se encuentra siempre conectada y sirve para realizar medidas en el rango de 0 a 2 A. La medida en el rango de 0 a 4 A se realiza conectando en paralelo una segunda resistencia (R2) con las mismas características, obteniendo así una resistencia equivalente de 0,05 Ω. De esta manera se consigue una resolución apropiada para cada rango y que haya una caída de tensión diferencial de ±200 mV en la entrada del AO.

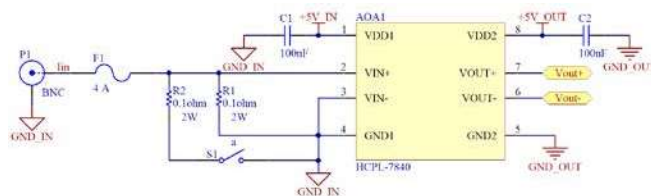


Fig. 8. Esquema del circuito de la etapa de entrada para la sonda aislada de corriente.

Como la relación entre la tensión de entrada y de salida en el amplificador es 1, la tensión diferencial en la salida se encuentra entre ±200 mV. Este rango de tensión resulta muy bajo para la adquisición de información a través de su representación en el osciloscopio. Por otro lado, la medida de corriente con determinada precisión requiere el uso de diferentes rangos de funcionamiento. Si además, como es el caso, se pretende conseguir una relación directa entre los valores medidos de corriente y la tensión representada por la sonda en el osciloscopio, resulta necesario incluir una etapa amplificadora a la salida del amplificador de aislamiento.

La relación entre los rangos de corriente de entrada, la resistencia shunt, los rangos tensión de entrada y salida en el AO y los rangos de tensión en el terminal BNC de la sonda se muestra en la Tabla II.

TABLA II. TABLA DE RANGOS DE CONVERSIÓN DE CORRIENTE

Tabla de Rangos de Conversión de Corriente			
Escala (I_{IN})	Resistencia de Entrada	Rango de Tensión de Entrada en el AO (V_{IN})	Rango de Tensión de Salida de la Sonda (V_{OUT})
0-20 mA	0,1 Ω	0-2 mV	0-2 V
0-200 mA	0,1 Ω	0-20 mV	0-2 V
0-2 A	0,1 Ω	0-200 mV	0-2 V
0-4 A	0,1 Ω/0,1 Ω=0,05 Ω	0-200 mV	0-4 V

3) Etapa de Amplificación

La Fig. 9 muestra el circuito de amplificación. La medida dentro de los cuatro rangos especificados utiliza tanto el interruptor que conecta la primera resistencia de entrada (S1) como los tres asociados a la etapa amplificadora (S3, S4 y S5).

La amplificación de la señal diferencial se realiza mediante un único amplificador de instrumentación INA217 de Texas Instruments [11] y la resistencia de ganancia. El amplificador dispone además de una entrada adicional que conectada a través del conmutador S2 al potenciómetro R6 permite compensar el offset.

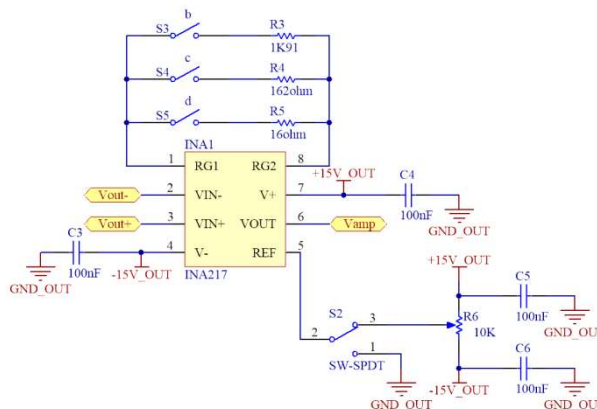


Fig. 9. Esquema del circuito de la etapa de amplificación para la sonda aislada de corriente.

Con este diseño se hace uso de otra topología clásica explicada junto con otras similares en la asignatura Instrumentación Electrónica.

La amplificación se lleva desde las tensiones de entrada indicadas en la Tabla II hasta 10 V de pico en todos los rangos de entrada.

4) Etapa de Salida (Filtrado y Atenuación)

Tras la etapa de amplificación, donde el valor máximo en cada intervalo llega a alcanzar los 10 V, resulta necesaria la inclusión de otras dos etapas.

La primera de ellas se compone de dos filtros de segundo orden con respuesta plana en la banda de paso de tipo Butterworth implementados en base a una topología Sallen-Key y cuyas frecuencias de corte son 50 kHz (S7) y 150 kHz (S8).

El primer filtro se encuentra en consonancia con la frecuencia de corte del filtro en la sonda de tensión, mientras que el segundo posibilita el funcionamiento de la sonda aislada de corriente en todo el rango de operación del amplificador operacional de aislamiento.

La activación del interruptor (S6) elimina la acción de filtrado, conectando la salida de la sonda directamente con la del amplificador de aislamiento.

Por último, para posibilitar una relación directa entre la corriente medida y la tensión a la salida de la sonda, es necesario atenuar el voltaje máximo alcanzado (10 V) en la salida amplificador de instrumentación tras la amplificación.

La Tabla III recoge la relación entre los rangos de entrada en la sonda de corriente, el rango de tensión amplificada, así como el factor de atenuación necesario para que exista una relación directa entre la corriente que circula por la resistencia shunt y la tensión representada en la pantalla del osciloscopio, es decir, que con 2 A de corriente el osciloscopio muestre 2 V de tensión.

TABLA III. TABLA DE RANGOS DE CONVERSIÓN DE CORRIENTE-TENSIÓN

Tabla de Rangos de Conversión de Corriente-Tensión			
Escala (I_{IN})	Tensión Salida tras la Amplificación (V_o) INA217	Factor de Atenuación	Rango de Tensión de Salida de la Sonda (V_{OUT})
0-20 mA	0-10 V	1/5	0-2 V
0-200 mA	0-10 V	1/5	0-2 V
0-2 A	0-10 V	1/5	0-2 V
0-4 A	0-10 V	2/5	0-4 V

La Fig. 10 muestra la implementación de esta etapa. La conexión al osciloscopio se realiza a través de un conector BNC.

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este apartado se van a presentar algunas de las pruebas realizadas que permiten validar el uso de las sondas aisladas presentadas en este trabajo. Para ello se van a comparar las medidas con las sondas diseñadas ad hoc con las obtenidas utilizando las sondas aisladas comerciales (TESTEC 15101 SI9001) empleando el mismo procedimiento de medida para ambas sondas. Estas sondas comerciales están concebidas para la medida de tensiones, pero hasta ahora también se utilizaban para la medida de corriente, por lo que era necesario incluir un shunt de la misma manera que la sonda aquí propuesta. Los resultados del desarrollo y montaje de ambas

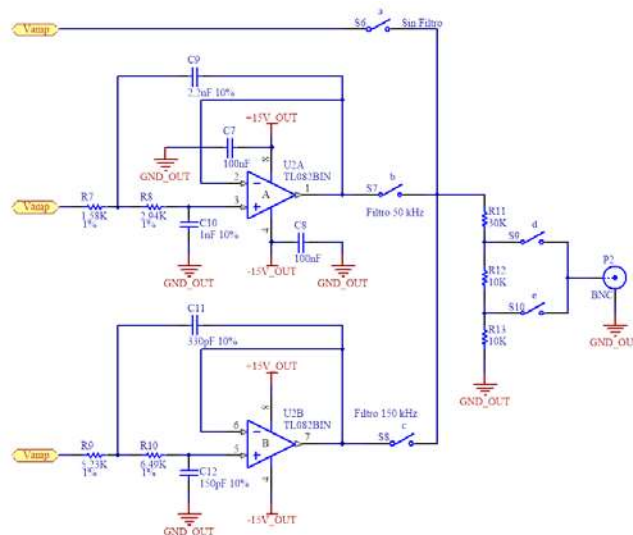


Fig. 10. Esquema del circuito de la etapa de amplificación para la sonda aislada de corriente.

sondas de manera independiente para la medida de las dos magnitudes, tensión y corriente.

Las pruebas se han realizado sobre la placa de prácticas cuyo esquema se muestre en la Fig. 11, concretamente seleccionando carga resistiva y el triac como dispositivo de conmutación. Es necesario, además, incluir un circuito de disparo en sincronismo con la red.

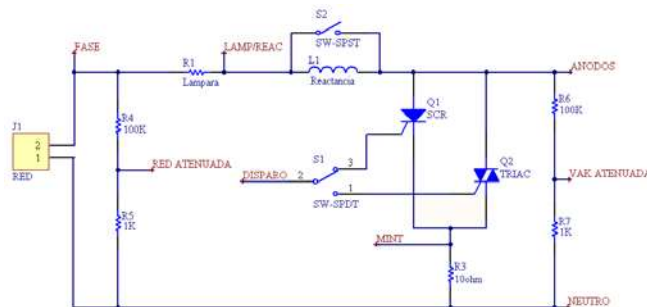


Fig. 11. Esquema del circuito de tiristor y triac sobre el que se han realizado las pruebas de validación.

A. Sonda Aislada de Tensión

La Fig. 12 muestra la implementación final del diseño de la sonda de tensión. En ella se pueden ver los diferentes elementos del diseño: transformador, condensadores de filtrado, reguladores lineales de tensión, circuito de protección frente sobre tensiones (circuito recortador), etapa de atenuación de entrada y filtro de salida.

Para validar el funcionamiento se ha montado un circuito que controla el ángulo de disparo del triac mostrado en la Fig. 11. El resultado de la medida entre los terminales principales de este dispositivo se puede ver en la Fig. 13. En esta figura se muestran las señales adquiridas por el osciloscopio entre los mismos puntos del circuito, tanto con la sonda comercial (TESTEC 15101 SI9001) como la específicamente diseñada, ambas conectadas de forma simultánea. En rojo se presenta la gráfica de medida tomada utilizando la sonda comercial mientras que en azul se observa la adquisición con la sonda diseñada.

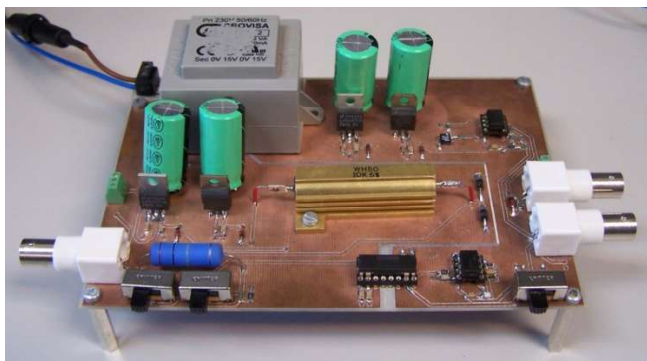


Fig. 12. Implementación física de la sonda aislada de tensión.

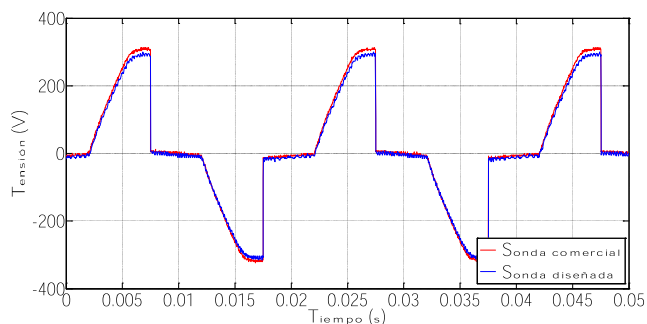


Fig. 13. Capturas de la tensión en un triac mediante una sonda comercial y las presentadas en este trabajo.

Se puede observar cierta diferencia entre valor de pico de la señal capturada por la sonda presentada en este trabajo (304 V) y la comercial (312 V), esto hace que el error relativo, asumiendo como valor objetivo la medida realizada por la sonda comercial, se encuentre por debajo del 4%.

En cuanto al coste de ambas sondas, la comercial se encuentra en torno a 350 € y la diseñada ad hoc por debajo 100 €. A esa reducción de costes hay que añadir la propia de mantenimiento. De hecho, las sondas comerciales se ha comprobado que tienden a fallar en las escalas con alta atenuación, haciéndolas por tanto inservibles para la medida de bajos valores de tensión.

B. Sonda Aislada de Corriente

El desarrollo de la sonda aislada de corriente se observa en la Fig. 14. De la misma forma que en la sonda anterior también se pueden identificar los diferentes sub-circuitos que componen el diseño completo.

Siguiendo la metodología anterior, se realiza una prueba similar a la presentada para la sonda de tensión. En este caso la resistencia empleada para la medida con la sonda comercial es sustancialmente mayor, puesto que al ser una sonda diseñada para la medida de tensiones elevadas necesita una caída de tensión mayor en bornes de la resistencia (10 Ω) con el fin de mejorar la relación señal ruido, este valor que interfiere significativamente en el circuito.

Los resultados obtenidos de la comparación se muestran en la Fig. 15. En ella podemos observar en rojo la medida con la sonda comercial, en esta medida se aprecia cantidad elevada de ruido a pesar de trabajar con un *shunt* muy alto (10 Ω), mientras que en azul se muestra la corriente en el triac con una señal muchos más limpia y sin nivel de offset.

En la medida con la sonda comercial se obtiene un valor de pico de 444 mA, mientras que con el diseño específico propuesto se mide un valor de 456 mA. En consecuencia, se puede concluir que la precisión conseguida con el diseño ad hoc es suficiente para los objetivos docentes propuestos.

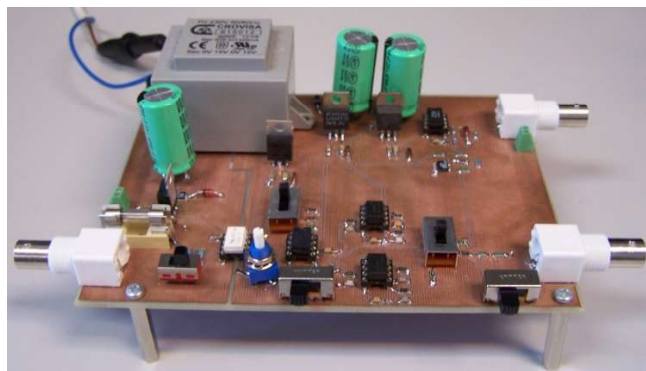


Fig. 14. Implementación física de la sonda aislada de corriente.

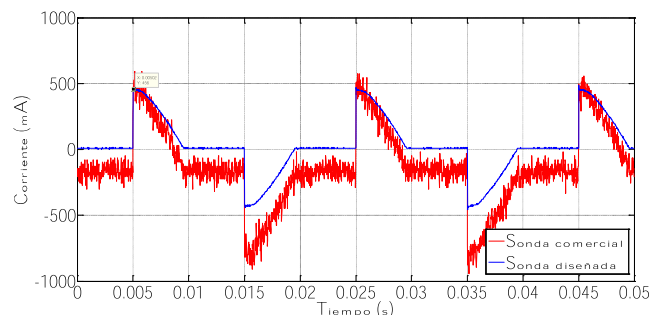


Fig. 15. Esquema de circuito de la etapa de entrada para la sonda aislada de corriente.

IV. CONCLUSIONES

Se han diseñado dos sondas aisladas, una de tensión y una de corriente, cuyo funcionamiento se ha comprobado y verificado. Las figuras de las capturas obtenidas muestran que los resultados conseguidos son adecuados para un laboratorio docente puesto que prima la posibilidad de poder ver experimentalmente el funcionamiento de los sistemas y contrastar los datos con las formas de onda estudiadas en el aula.

Además, los diseños propuestos presentan facilidad de uso, una gran mantenibilidad e integran diferentes circuitos de protección que previenen el deterioro de los equipos frente al mal uso o a los errores debidos a la inexperiencia de los estudiantes.

Los resultados en la comparación con la medida de las ondas de tensión aisladas comercial y ad hoc no presentan diferencias significativas en los rangos de trabajo para los que ha sido concebidas.

El diseño de la sonda de corriente propuesta posibilita operar con valores de inserción tipo *shunt* mucho menores que con la sonda comercial de tensión. Con ello se logra interferir significativamente menos en el circuito donde se realiza la medida. Además, a pesar de trabajar con un *shunt* mucho menor, la señal de salida de la sonda propuesta resulta mucho más limpia, sin tan apenas ruido, frente a la medida con la sonda comercial.

REFERENCIAS

- [1] "Asignaturas del plan del Grado en Ingeniería Eléctrica," [En línea]. Disponible en: https://estudios.unizar.es/estudio/asignaturas?anyo_academico=2019&estudio_id=20190146¢ro_id=110&plan_id_nk=430&sort=curs o.
- [2] "Asignaturas del plan del Grado en Ingeniería Mecatrónica," [En línea]. Disponible en: https://estudios.unizar.es/estudio/asignaturas?anyo_academico=2019

&estudio_id=20190150¢ro_id=175&plan_id_nk=424&sort=curs
o.

- [3] "Linear & Switching Voltage Regulator Handbook," ON Semiconductor, 2002.
- [4] "Isolation Types and Considerations When Taking a Measurement». National Instruments.
- [5] S. Franco, "Design with operational amplifiers and analog integrated circuit," New York: McGraw Hill, 2001.
- [6] J. G. Webster, "The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook," CRC Press LLC, 1999.
- [7] M. Á. Pérez García, "Instrumentación Electrónica," Asturias, Ediciones Paraninfo, 2014.
- [8] "ISO122 Low-Cost Precision Isolation Amplifier, Datasheet," Texas Instruments, ene-2015.
- [9] "ISO124 Precision Isolation Amplifier, Datasheet," Texas Instruments, jun-2018.
- [10] "HCPL-7840 Isolation Amplifier, Datasheet", Broadcom, 09-jul-2012.
- [11] "INA217 Low-Noise, Low-Distortion Instrumentation Amplifier Replacement for SSM2017, Datasheet," Texas Instruments, nov-2015.