

3 DISPOSITIVOS DEL MONTAJE DEL LAZO ACTIVO

3.1 Introducción

Este capítulo que se va a desarrollar a continuación está basado en el trabajo “Validación en laboratorio de equipos de alimentación a lazo activo” que realizado por el Ingeniero D. Juan Carlos del Pino López para el departamento de ingeniería eléctrica. En dicho trabajo explica los diferentes dispositivos que forman el conjunto del montaje, funcionamiento y el algoritmo de programación. En lo que se va a desarrollar a continuación se expondrá solamente aquello que se refiere a la descripción de los dispositivos y funcionamiento teórico, ya hay otro capítulo basado en su caracterización en laboratorio.

3.2 Dispositivos del montaje

Los dispositivos electrónicos necesarios para la construcción del lazo activo son:

- Inversor semipunte.
- Placa de adaptación de disparos de los transistores o driver.
- Placa de adaptación de señales de medidas.
- Placa con microprocesador DSP.
- Sensor de campo desarrollado por elektor.

A parte de estos dispositivos existen otros elementos, también esenciales, para la construcción del lazo activo que no se describirán en este capítulo.

El esquema empleado para estos dispositivos en el montaje del lazo activo es el siguiente:

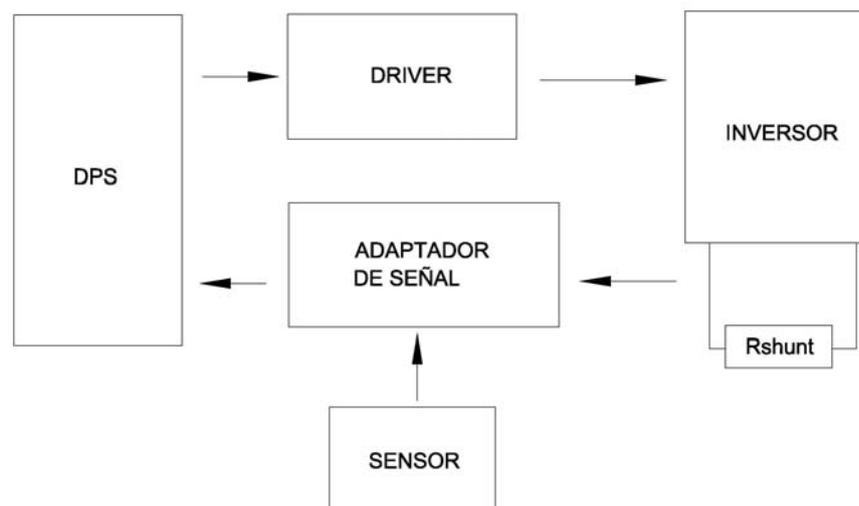


Figura 3.1. Esquema de principio

A continuación se expondrá una explicación sencilla del funcionamiento del grupo de dispositivos instalados en este proyecto para introducirse, de una manera simple, en como trabaja el control del lazo activo. A medida que el lector tenga fundamentada una idea general de su funcionamiento, entonces se desclosará con más detalle cada elemento y su funcionalidad en el montaje.

El principal elemento del montaje es el sistema de control. Éste lo ejerce el DSP. La tarea principal del DSP es recoger los datos que le van suministrando los diversos sensores colocados en el montaje, analizarlos y a continuación tomar las decisiones para cumplir los objetivos marcados. El análisis, como la toma de decisiones, se implementa por medio de un programa incorporado en el DSP.

Para que el DSP pueda recoger esos datos tenemos la placa de adaptación de señales. Este dispositivo está diseñado para recoger dos parámetros de vital importancia para el control del lazo, el campo generado por la línea y la intensidad que circula por el lazo. Para el campo magnético generado por la línea a mitigar, el adaptador está a su vez conectado a otro dispositivo cuya función es transformar la señal magnética en una señal eléctrica. Para la intensidad que circula por el lazo, el adaptador está conectado a una resistencia cuyo objetivo es transformar una señal de intensidad por una de tensión, aplicando la ley de Ohm. Una vez recogidas estas señales, el adaptador debe de llevarlas a una escala de tensión comprendida entre los 0 voltios y los 5 voltios, tensiones con que trabaja el conversor analógico digital del DSP.

Si el adaptador de señales y sus dispositivos son “los ojos del DSP”, el driver y el inversor son sus “brazos”. Para el DSP el driver no es más que una interfaz con el objetivo de convertir las señales TTL procedentes del DSP en señales lo suficiente potentes para activar los transistores del montaje inversor. La gran ventaja de utilizar este dispositivo es que el fabricante ya ha implementado un modelo de control para que con una sola señal, procedente del DSP, el driver pueda activar y desactivar alternativamente los transistores del inversor. Llegadas estas señales, el objetivo del inversor es construir una señal lo suficiente potente para producir la mitigación del campo.

Entrado ya en este punto, solo queda ya definir los elementos que actúan. El DSP se tratará más superficialmente porque ya está bastante documentado en proyectos realizados (ver biografía).

3.2.1 El inversor

Una de los requerimientos a la hora del diseño del conjunto de circuitos es poderse alimentar con corriente continua. ¿El por qué de la corriente continua? La idea general es la posibilidad de independencia del grupo de mitigación respecto a la fuente de alimentación, por lo que actualmente, con la tecnología disponible, los sistemas fotovoltaicos son los más atractivos. Esta tecnología suministra tensión continua y tiene la gran ventaja de su mínimo mantenimiento, y por no introducir mayor número de elementos como puede

ser un convertidor AC-DC, se da ésta como válida para la alimentación. Por tanto, la conexión del montaje a red solo está contemplada en el modo de pruebas de laboratorio y no como un diseño final.

Una vez especificado el modo de alimentación, el siguiente problema que aparece es como de una corriente en continua pasamos a una corriente alterna, que es al final al cabo la forma de onda que necesitaremos para mitigar el campo. El problema se resuelve con el inversor. El principio del inversor no es más que un convertidor continua-alterna, al ser alimentado con tensión continua y por medio de un procedimiento de disparo de transistores, encontramos en la carga una tensión alterna.

El modelo elegido para este proyecto es el semipunte debido a la simplicidad del circuito como además es más fácil la fabricación de una señal senoidal sobre el eje x con una mínima componente de continua.

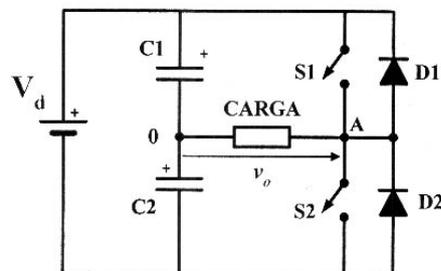


Figura 3.2. Montaje inversor semipunte

El funcionamiento del semipunte consiste en poner a tensión positiva o negativa la carga alimentada, según conduzca el transistor S1 o el transistor S2 respectivamente. Hay que destacar que la rama constituida por los condensadores se comportan de forma equivalente a la de dos fuentes de tensión de valor $V_d/2$, con lo que los valores a los que se alimentará la carga son $+V_d/2$ y $-V_d/2$.

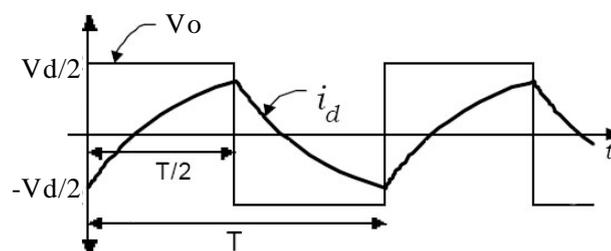


Figura 3.3. Forma de onda montaje inversor

De esta manera, si la carga es una inductancia, como se refleja en la figura, la corriente que circulará aumenta al aplicarle una tensión positiva (haciéndose positiva) y disminuye al aplicar una negativa (haciéndose negativa), según las ecuaciones de una bobina:

$$V(t) = L \frac{di}{dt} \rightarrow i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(t) dt$$

De estas expresiones se obtiene una consecuencia importante en lo que será el comportamiento de nuestro sistema: A mayor tensión aplicada a la bobina o menor valor de la inductancia L , mayor será la pendiente de ascenso (o descenso) de la corriente en la misma. De esta forma pueden alcanzarse mayores valores de intensidad en menor tiempo. Esto afectará notablemente al sistema desarrollado en cuanto a niveles de intensidad alcanzables y frecuencia de conmutación del semipunto inversor con el algoritmo de control.

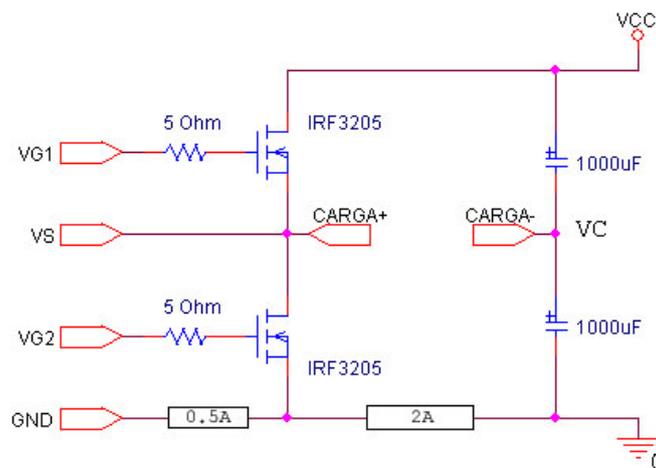


Figura 3.4. Inversor semipunto

El esquema empleado para realizar el inversor es el mostrado en el figura. El inversor ha sido alimentado a una tensión de 24V y la carga ha sido conectada entre las bornas denominadas “CARGA+” y “CARGA-“. En este esquema, el nodo denominado “VC” tiene una tensión flotante alrededor de los 12V ($V_{cc}/2$), la cual oscila ligeramente durante el funcionamiento del sistema. Se han empleado dos condensadores de alta capacidad ($1000\mu\text{F}$) para mantener VC a una tensión lo más estable posible. La tierra del inversor no coincide con la tierra de la carga debido a que se cortocircuitaría uno de los condensadores. En este caso VC se puede considerar una tierra flotante. Esto es importante conocerlo para no cometer errores en la forma de conexión con el osciloscopio, pues este si está conectado a tierra, sus pinzas también lo estarían y, con toda probabilidad, actuarían las protecciones del inversor (fusible).

Por otro lado, el inversor se ha construido con dos transistores MOSFET IRF3205, los cuales soportan altos valores de tensión ($V_{DS}=55\text{V}$) y de intensidad ($I_D=110\text{A}$), además de ser rápidos en las conmutaciones y tener baja resistencia en conducción ($R_{DS(on)}=8\text{m}\Omega$). Estas especificaciones permiten que puedan ser empleados para amplios valores de tensión e intensidad en investigaciones posteriores. Se ha elegido este tipo de transistores al no ser la tensión empleada en el sistema demasiado alta, además de su sencillez en el disparo por ser controlados en tensión. Para limitar la intensidad en la señal de disparo se han dispuesto resistencias de 5Ω en las puertas de los mismos. El

esquema de montaje que se ha empleado para el inversor ha sido con el objeto de que pueda ser empleado en distintas condiciones de tensión e intensidad, sin la necesidad de aplicar cambios o instalación de componentes en la placa, incluso si se emplea un modelo DSP diferente al empleado.

Ha sido necesario incluir en el montaje una serie de medidas de protección para evitar daños en algunos de los componentes, como son los fusibles de 0.5 A y 2 Amperios en la placa y un portafusibles aéreo en el cableado del lazo. El primero de ellos evita que corrientes elevadas circulen hacia tierra, debido a que estas corrientes atravesarían el DSP y podrían dañarlo (por la posible conexión, opcional, del DSP a tierra a través del PC). El segundo pretende evitar y detectar posibles cortocircuitos en la rama semipiente del inversor por estar ambos transistores en conducción de forma accidental. El último es para proteger el cableado del lazo de una sobreintensidad que podrían dañarlo. Estos fusibles pueden ser reemplazados fácilmente por otros de distinto valor si es necesario trabajar a otros niveles de intensidad a los empleados a lo largo de las pruebas.

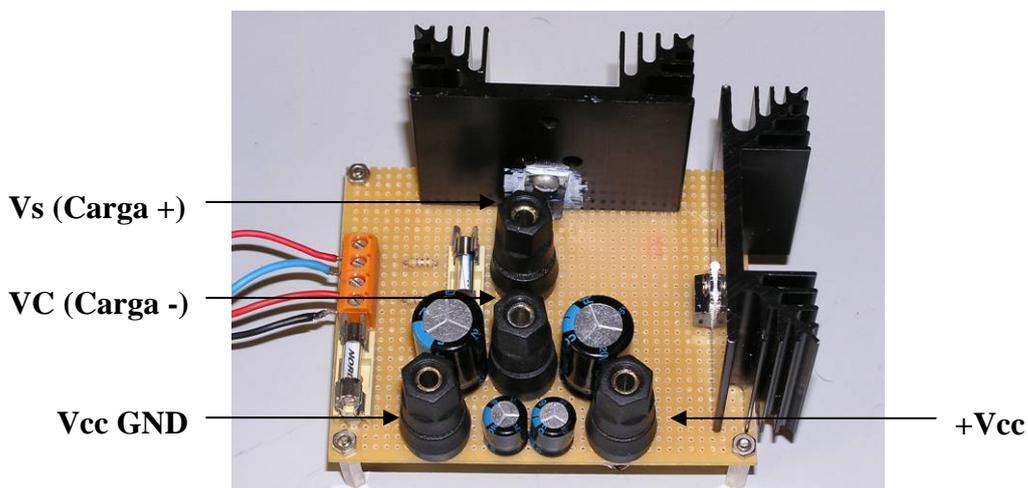


Figura 3.5. Fotografía del montaje inversor

3.2.2 DSP

El núcleo “inteligente” del sistema lo realiza un microcontrolador DSP, ya que estos procesadores disponen de múltiples periféricos que incrementan sus prestaciones para el control de casi cualquier tipo de sistemas. Estos procesadores suelen distribuirse en placas de prueba denominados Starter Kits, habiéndose empleado el basado en el procesador TMS320F243. Estas placas disponen de una serie de conectores de expansión a través de los cuales se tiene acceso a las distintas señales del procesador. En este caso, son tres los conectores que dispone el starter kit, de los cuales se han empleado dos:

- El conector de expansión analógico (P1), el cual se conecta a la placa de adaptación de señales. A través de este conector, el DSP, conecta el convertidor analógico-digital con el exterior para la realización de medidas analógicas. Son dos los canales utilizados para la obtención de

datos, uno para la señal de intensidad del lazo y otro para la lectura del campo.

- El conector de expansión de entradas/salidas digitales (P2), mediante el cual se accede a las señales de control del DSP. Este conector enlaza los puertos digitales del DSP con el driver para el manejo del inversor. Debido a los requerimientos de tensión necesarios para disparar los transistores del inversor no es posible la conexión directa y por ello la necesidad del driver. De todas formas, el driver, facilita de cierta manera la programación del algoritmo de control al no ser necesario programar los tiempos muertos entre los disparos de ambos transistores.

3.2.3 Driver

Para el correcto funcionamiento de los transistores del semipunto inversor, es necesario que las señales de disparo en las puertas estén en ciertos niveles de tensión. Estos transistores pueden ser disparados directamente con las señales de 0 a 5V que proporciona el DSP, pero para cerciorarse de que entren en corte o conducción, sobretodo a altas frecuencias, es recomendable que estas señales sean de 0 a 15V. El driver es en este caso el elemento indispensable.

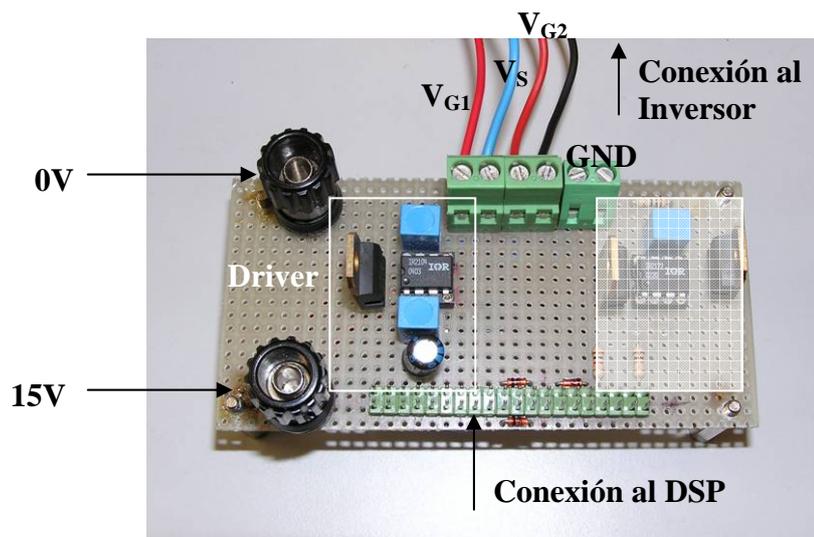


Figura 3.6. Fotografía del driver

El circuito integrado que se ha empleado es el IR2104, el cual es un driver de semipunto que incluye un tiempo muerto de 500ns entre las dos señales de disparo de la rama. Se ha elegido este modelo debido a que con una sola señal de disparo es capaz de generar las dos señales necesarias para los dos transistores de un mismo semipunto, de forma que ambas señales sean opuestas y con un tiempo muerto de 500ns. De esta forma solo es necesario generar una única señal de control mediante el DSP para controlar el semipunto.

Para el correcto funcionamiento de este dispositivo es necesario incluir una serie de componentes adicionales según las especificaciones del fabricante, con lo que el montaje de la placa sigue el siguiente esquema:

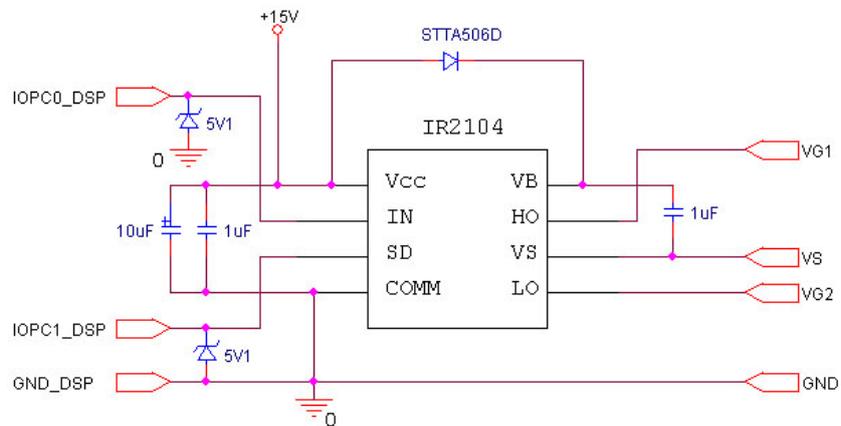


Figura 3.7. Esquema montaje del driver

En dicho esquema se indican las distintas señales del driver y del DSP que son empleadas: *IOPC0_DSP* es la señal de disparo generada por el DSP para el semipunto a partir de la cual el driver genera V_{G1} para el transistor superior del puente y V_{G2} para el inferior (figura 3.8 y figura 3.10). Por otro lado, la señal *IOPC1_DSP* se encarga de habilitar o deshabilitar el funcionamiento del driver cuando esta señal vale 1 o 0 respectivamente. Por último se encuentran las conexiones a las distintas tierras del DSP y el inversor, además de la conexión al punto medio del semipunto V_s (figura 3.9).

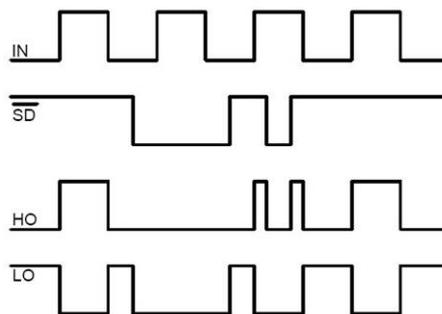


Figura 3.8. Señales entrada-salida del driver

Del esquema de la placa driver destacan una serie de componentes:

- **Circuito Bootstrap:** Esta constituido por el diodo rápido STTA506D y el condensador de $1\mu\text{F}$ de baja resistencia equivalente (no electrolítico) situado a la salida del driver. Este circuito se encarga de suministrar al driver la tensión necesaria para poder disparar el transistor de la parte alta del inversor, debido a que es necesario disponer de una tensión de al menos 15V entre la puerta y la fuente de los MOSFET para ponerlos en conducción. El situado en la parte inferior del puente no tiene

problemas al tener su fuente a tierra, pero el superior la tiene a la tensión del nodo V_s , que varía según el estado del circuito, y para disparar este transistor es necesario dar una señal en la puerta 15V superior a la de dicho nodo. Para esto, el circuito Bootstrap carga su condensador hasta los 15V cuando el transistor inferior conduce, para luego sumar esta tensión a la del nodo V_s en la puerta del transistor superior (V_{G1}) y así ponerlo en conducción (figura 3.9).

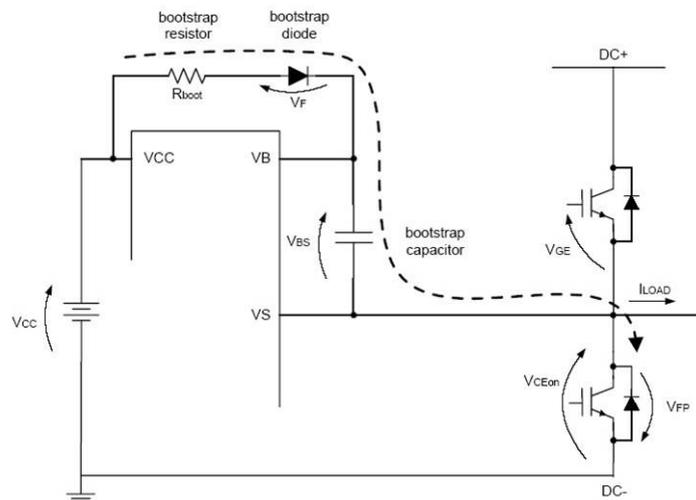


Figura 3.9 Montaje circuito Bootstrap

De esta manera se obtienen las señales de disparo V_{G1} y V_{G2} de la figura 3.10, en donde la señal de control de la parte inferior del puente oscila entre 0 y 15V, mientras para la parte superior oscila entre 0 y $V_{cc}+15V$. Para nuestro caso, el inversor se alimenta a 24V, con lo que oscila entre 0 y 39V. Como se puede comprobar ambas señales son opuestas, donde la señal V_{G1} está en fase con la señal de control de entrada al driver (figura 3.8). Estas medias son tomadas siempre respecto de tierra.

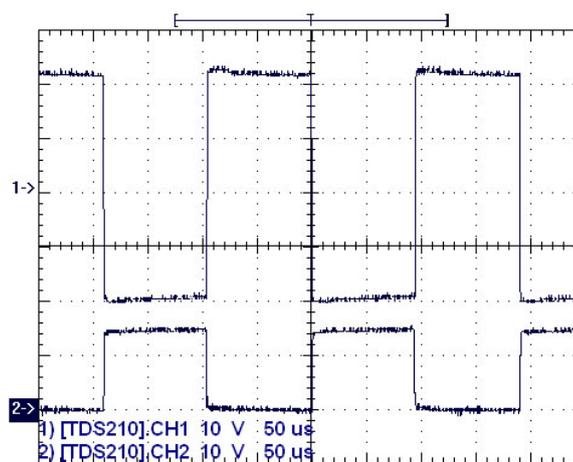


Figura 3.10. Forma de onda V_{G1} y V_{G2}

Debido a la necesidad de emplear este circuito para el correcto funcionamiento del driver, es absolutamente necesario que la primera señal de control que llegue al driver ponga en conducción el transistor

inferior del puente para la correcta carga del condensador Bootstrap (es decir, una señal a nivel alto según figura 3.8), ya que en caso contrario no se generan correctamente las señales de disparo del transistor superior del puente.

- Para estabilizar la tensión de 15V necesaria para alimentar el driver se han situado un par de condensadores de 10 μ F y 1 μ F entre los pines de alimentación al integrado. Esta configuración se debe a que el fabricante recomienda situar en la alimentación condensadores de, al menos, 10 veces la capacidad del condensador del circuito bootstrap, siendo al menos alguno de ellos de baja resistencia equivalente o ESD (no electrolíticos).
- Por último se han instalado diodos zener de 5V en las señales de salida del DSP hacia el driver para protegerlas frente a sobretensiones, ya que este procesador trabaja con tensiones máximas de 5V.

Este driver está capacitado para trabajar con señales de control generadas a 5V y 3.3V, por lo que la placa puede emplearse con otro modelo de DSP que trabaje a 3.3V con la única modificación de cambiar los diodos zener por otros de 3.3V por seguridad. Una posible mejora de este módulo es la de situar entre el DSP y el driver algún dispositivo opto-acoplador que aisle ambos elementos, evitando que los daños por defectos se propaguen a todo el sistema.

3.2.4 Placa de adaptación

La placa de adaptación de señales no es más que un interfaz para comunicar el DSP, por medio del convertor analógico-digital, con los sensores del sistema. Una de las características del convertor es el rango de trabajo, entre 0 a 5 voltios, por lo que cualquier tensión fuera de ese rango no solo puede producir una falsa lectura sino incluso una avería del dispositivo dejándolo inutilizable. Para que esto no se produzca se instala la placa de adaptación diseñada para este propósito. En ella se llevan las medidas de la intensidad del lazo y del campo magnético al rango de valores del convertidor, ya sea atenuando o amplificando la señal, además de introducirle un offset que permita convertir valores negativos y puedan ser evaluados por el DSP.

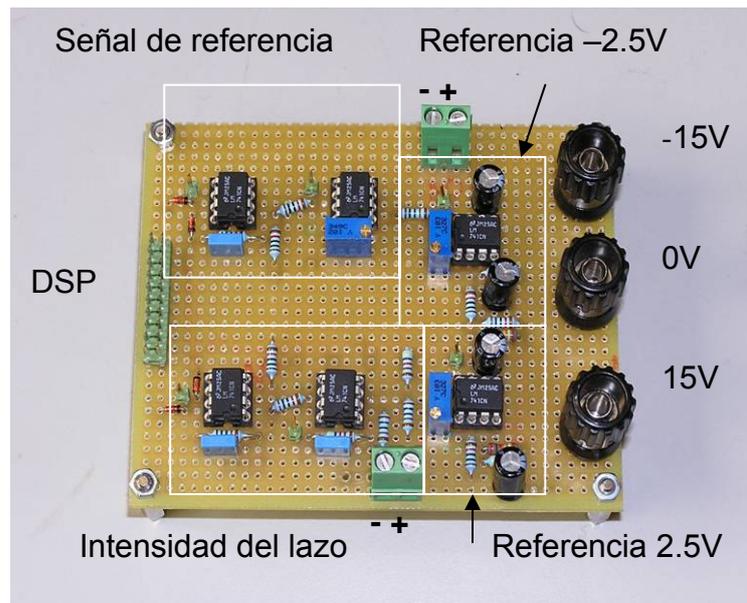


Figura 3.11 Adaptador de señales

Como muestra la figura 3.11, dicha placa consta de cuatro partes diferenciadas dedicadas a distintas tareas, todas ellas construidas con el amplificador operacional LM741:

- Adaptación de señal de referencia:

Este módulo de la placa de adaptación se encarga de adecuar la señal de referencia al rango del convertidor. Consiste en dos etapas: una primera etapa en la que se amplifica la señal y una segunda en la que se le incluye un offset de 2.5V. La etapa amplificadora tiene ganancia unidad (figura 3.12), con lo que se puede introducir una referencia de hasta 5V de amplitud pico-pico. Si es necesario, esta ganancia se puede disminuir mediante el potenciómetro situado en esta etapa, con lo que la referencia puede ser atenuada. Por otro lado, la siguiente etapa se encarga de elevar dicha señal 2.5V, proporcionándole así un offset hasta el valor central del rango del convertidor (0-5V) para poder realizar medidas de señales con valores negativos. Esto se consigue mediante la configuración de sumador inversor del operacional, donde se suman la señal amplificada y una tensión de offset de $-2.5V$.

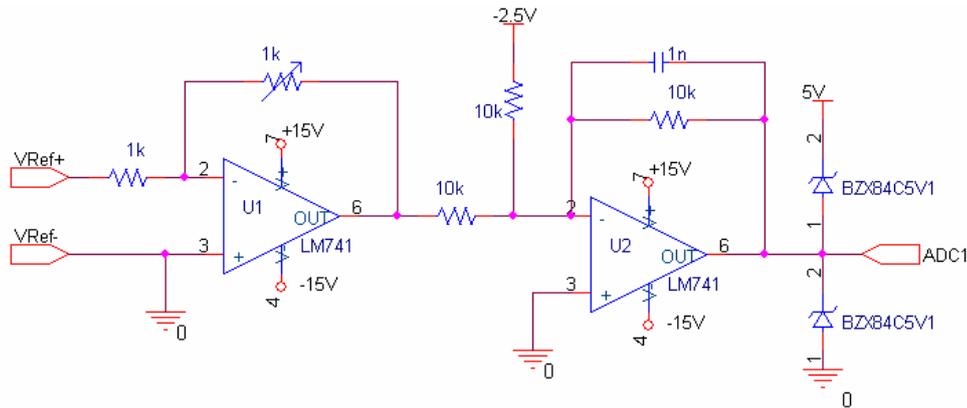


Figura 3.12. Montaje amplificador señal de referencia

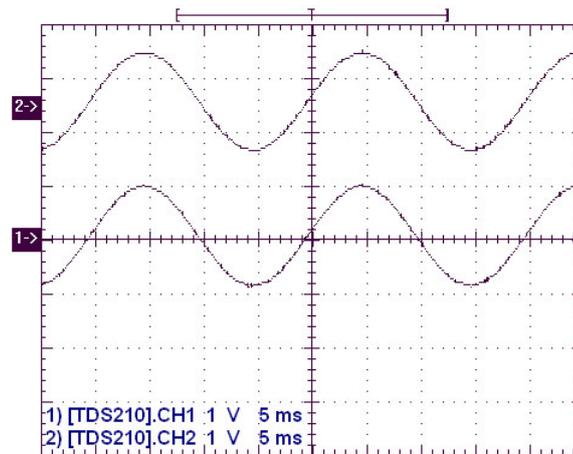


Figura 3.13. Entrada y salida del módulo de adaptación

Destacar que ambas etapas tienen una configuración inversora, con lo que la señal será invertida dos veces, una por etapa. Debido a esto es necesario que el polo positivo de la señal de referencia sea conectado al terminal negativo del amplificador operacional inicial, y el polo negativo al terminal positivo del mismo, tal y como se muestra en la figura 3.12.

Como se comprueba en la figura 3.12, existen en la señal de salida de este módulo dos diodos Zener de protección para evitar sobretensiones ($>5V$) y subtensiones ($<0V$) a la entrada del convertidor analógico-digital del DSP, recortándose la señal a los 0 y 5V.

Esta parte de adaptación dispone de un condensador de 1nF en paralelo con una resistencia de 10K que hacen las veces de filtro (figura 3.12), atenuando así posibles ruidos en la referencia. La expresión de la frecuencia de corte según la documentación consultada es:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

que para este caso resulta ser una frecuencia de 16Khz.

- Adaptación de la medida de intensidad del lazo:

Esta etapa de la placa es la encargada de adecuar la señal que representa la intensidad que circula por el lazo activo. Esta intensidad será medida mediante la caída de tensión sufrida en una pequeña resistencia conectada en serie con la carga inductiva. Para medir esta tensión serán llevados los dos terminales de la resistencia a este módulo de adaptación (uno de ellos conectado al punto medio de la rama de condensadores del inversor *VC* de la figura 3.14 y el otro denominado *VR*), cuya primera etapa tiene una configuración de diferenciador, es decir, que halla la diferencia entre las dos tensiones de entrada (figura 3.14).

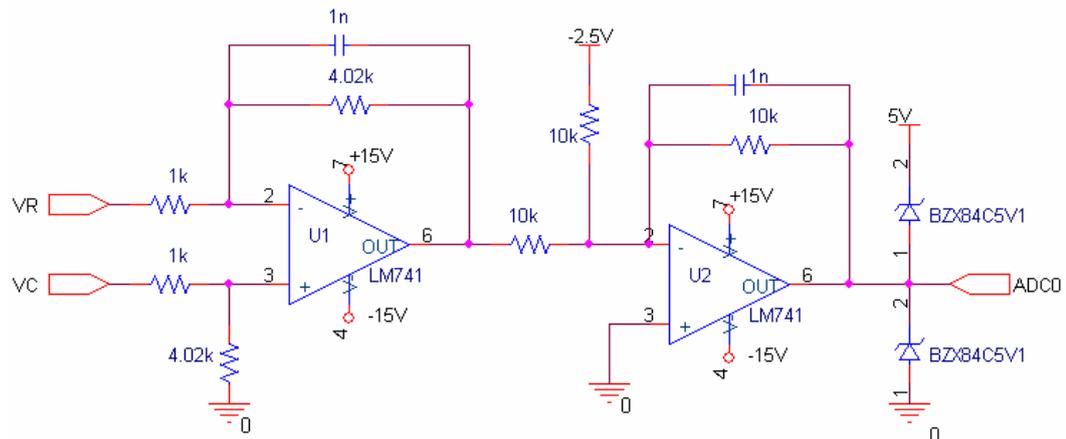


Figura 3.14. Montaje adaptación medida de la intensidad del lazo

Este módulo se divide en dos etapas: Una de amplificación y otra de offset. En la primera de ellas, la diferencia de tensión entre las entradas del operacional es amplificada con una ganancia de 4. De esta manera se pretende ajustar la señal de intensidad al rango de operaciones del convertidor analógico-digital, amplificando las pequeñas oscilaciones que sufrirá la misma al aplicar el control y facilitando así su medición como muestra la figura 3.15, en la que también se aprecia como la señal es invertida además de ser amplificada, para luego sumarle el offset de 2.5V que realiza la segunda etapa del módulo

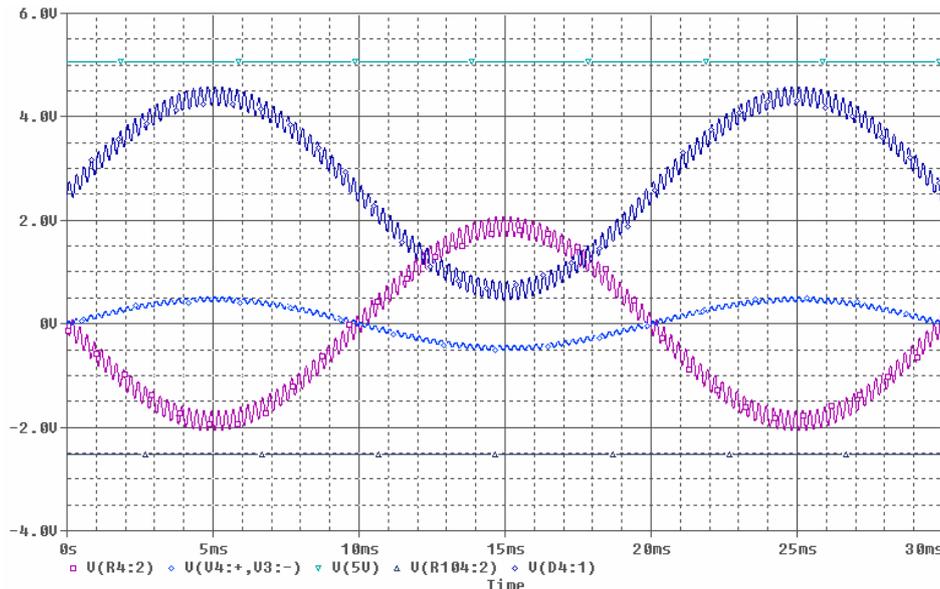


Figura 3.15. Entrada y salida de las señales de medida intensidad del lazo

Al contrario que en el módulo de adaptación de la referencia, la primera etapa amplificadora está diseñada para una ganancia de valor 4 constante. La expresión de la ganancia de un amplificador operacional en configuración inversora es:

$$\text{Ganancia} = \frac{R_2}{R_1}$$

donde R2 son las resistencias de 4.02k Ω y R1 las de 1k Ω en nuestro caso. La relación entre estas resistencias en ambas entradas del operacional debe ser la misma y con los mismos valores de resistencias para que la ganancia sea la deseada. Por tanto, si se desea modificar la ganancia es necesario cambiar las resistencias de 4.02 k Ω al valor deseado.

Para filtrar ruidos de alta frecuencia hay dispuestos condensadores en paralelo con las resistencias, siendo las frecuencias de corte de 40Hz y 16Khz respectivamente. Estos condensadores tienen la desventaja de producir pequeños retrasos como también atenuaciones. En el capítulo de caracterización del circuito en laboratorio se explica con mucha mayor profundidad.

- Referencia de -2.5V para offset

Para poder medir señales que oscilen entorno a cero, una práctica común es añadirle un offset a la señal para elevar el cero a un valor deseado positivo. En nuestro caso, al querer trabajar en un rango entre 0 y 5V, interesa que nuestro “cero” se sitúe en el punto medio de dicho rango, es decir, en 2.5V (figura 3.15). Para esto es necesario disponer en la placa de un amplificador sumador que realice esta operación. Éste ya se encuentra implementado en los dos módulos anteriormente

descritos, pero al tener configuración inversora la señal de offset necesaria debe ser de -2.5V . Para obtener esta tensión de forma estable se optó por producirla mediante un divisor de tensión a partir de los 15V que alimentan la placa, para luego hacerla pasar por un operacional de ganancia unidad variable mediante un potenciómetro (figura 3.16). Al tener configuración inversora, a la salida se obtienen directamente los menos 2.5V deseados. Esta salida no suele ser muy precisa, pero puede ser ajustada mediante el potenciómetro de precisión hasta el valor deseado. El inconveniente que tiene este método de regulación son los errores que una mala calibración tiene en la lectura, pues si no está correctamente centrado se produce por un lado una lectura incorrecta de la tensión y por el otro un desfase en la señal como consecuencia de adelantar o atrasar la señal. A pesar de todo, si por motivos técnicos no es posible, por ejemplo, de ajustar la fase de la señal al lugar apropiado se podría variar el “cero” de la señal subiendo o bajando la tensión de referencia, eso si, produciendo un error en tensión de la señal. En tal caso se deberá cuantificar lo crítico que puede resultar ese desfase introducido y el error en tensión.

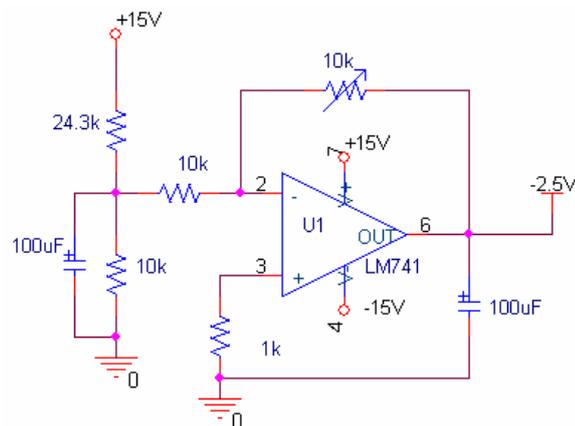


Figura 3.16. Fuente de alimentación estabilizada a -2.5V

- Tensión de 5V estable para Zener de protección

Para la realización de medidas a través del convertidor analógico-digital del DSP es recomendable situar alguna medida de protección que evite daños al mismo. La opción más sencilla es la de situar en las entradas al convertidor diodos Zener conectados a 0 y 5V , de forma que la onda sea cortada a esos valores si los sobrepasa. Para esto es necesario disponer de una tensión de 0V y otra de 5V . La tensión de 0V se obtiene realizando una conexión a la tierra del sistema DSP, pero la otra, la de 5V , es necesario una fuente. Un método eficaz para conseguir esta tensión a un valor estable es mediante el circuito indicado en el esquema de la figura 3.17, semejante al caso anterior. En él se obtienen 2.5V del divisor de tensión para pasarlos por un amplificador no inversor de ganancia 2 variable. Por tanto, a la salida se obtienen 5V de valor ajustable mediante el potenciómetro de precisión instalado en la placa hasta el valor deseado.

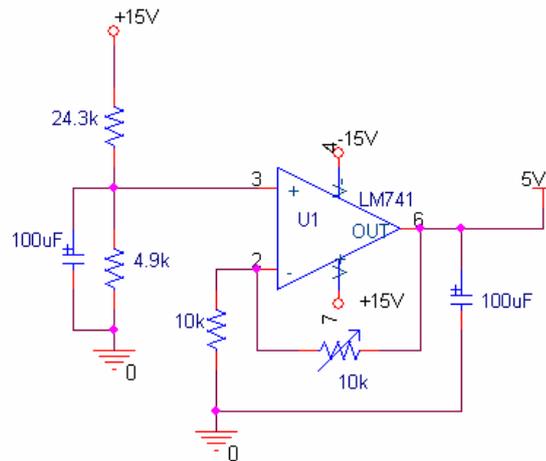


Figura 3.17. Fuente de alimentación estabilizada a 5 V