

## A1.1 Funcionamiento del motor de flujo radial

Inicialmente el motor se enfría sumergiéndolo en nitrógeno líquido. Esto se hace para que el rotor se enfríe en ausencia de campo magnético (zero field cooled). Posteriormente, se alimenta el estator. La simetría del campo magnético creado hace que el rotor se estabilice y centre.

La alimentación de las bobinas del estator se hace secuencialmente con pulsos cuadrados de tensión. La forma de alimentar cada una de las fases se muestra en la

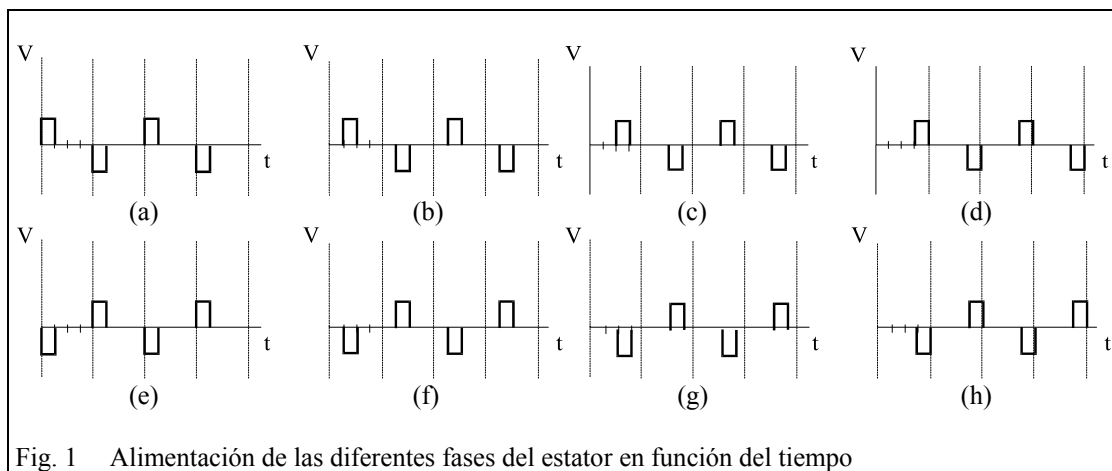


figura 1

En presencia de un campo magnético, los materiales superconductores se magnetizan creándose una red de vórtices de corrientes superconductoras. La creación de nuevos vórtices o la destrucción de ellos comporta un consumo energético. Al producir un campo magnético en el espacio ocupado por un superconductor, se provoca la magnetización del mismo y ello implica una energía asociada al proceso de desplazarlo. Como:

$$F = \frac{dU}{dx} \quad (1)$$

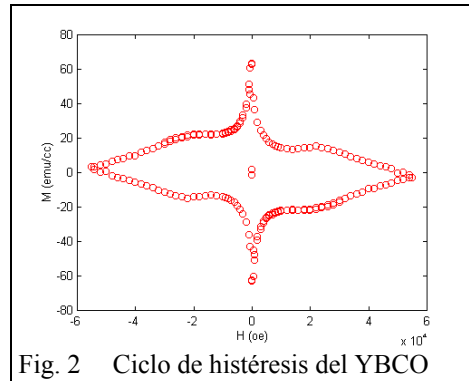
Donde: F es la fuerza [N]

U es la energía [J]

x el desplazamiento [m]

Siempre que cuando se realice un desplazamiento exista una variación de energía, se producirá una fuerza. Esto es lo que le ocurre a un superconductor cuando se acerca a un campo magnético, sufre una fuerza de repulsión que le impulsa hacia las zonas donde su magnetización se mantiene constante.

La curva de magnetización  $B(H)$  del superconductor está representada en la figura 2. Como se puede observar, presenta un comportamiento claramente histerético. La energía almacenada en el superconductor es el área de la curva de magnetización, según la ecuación 2 :



$$U_m = \frac{1}{2} \int_V HB \, dV \quad (2)$$

Si el rotor es colocado en el interior del estator, se magnetiza debido al campo existente. De esta forma, el punto de trabajo de la curva de magnetización se desplaza, lo que implica una variación de la energía en el superconductor.

La corriente de alimentación crea cuatro polos magnéticos, que inducen otros cuatro en el rotor. El superconductor queda entonces fijo en el interior del estator. Cualquier alteración de su posición relativa al campo supone un cambio del punto de trabajo en la curva anterior, lo que implica la aparición de una fuerza de recuperación según la ecuación 3:

$$\vec{F} = \int_V (M \nabla) B \, dV \quad (3)$$

Si se hace girar el campo respecto al rotor, toda la red de vórtices es alterada. Cada región del rotor en la que se altera el campo sufre un proceso de magnetización y desmagnetización que conlleva un consumo de energía asociada al giro del campo. El par se define como la variación de energía por ángulo de giro :

$$\tau = \frac{dU}{d\varphi} \quad (4)$$

Donde  $\tau$  es el par del motor

$\varphi$  es el ángulo de giro

Gracias a la histéresis de magnetización, se produce un par que es el responsable del giro del rotor. Por todo lo explicado anteriormente, inicialmente el motor se comporta como un motor de histéresis.

Cuando el rotor está magnetizado, puede alcanzar el régimen de sincronía. El punto de trabajo de la curva de magnetización no varía, por lo cual, a partir de este momento desaparecen la pérdidas en el rotor y su par motor dependerá sólo del flujo atrapado, del flujo inductor y del ángulo que forman rotor y campo inductor.

### A1.2 Sistema de medidas

La figura 1 muestra una fotografía del sistema montado para efectuar las medidas

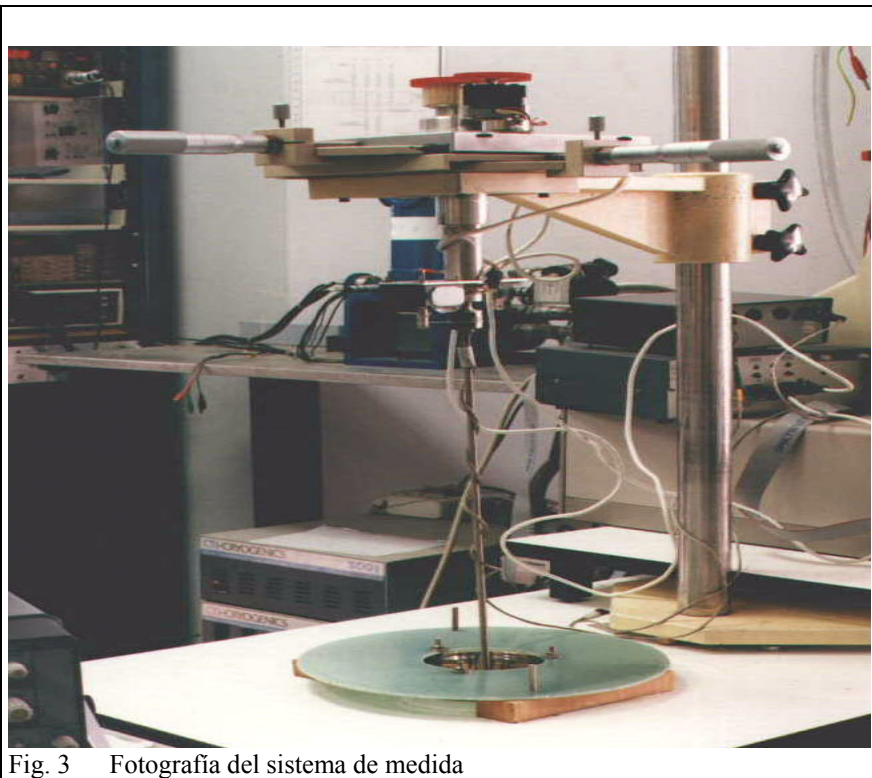
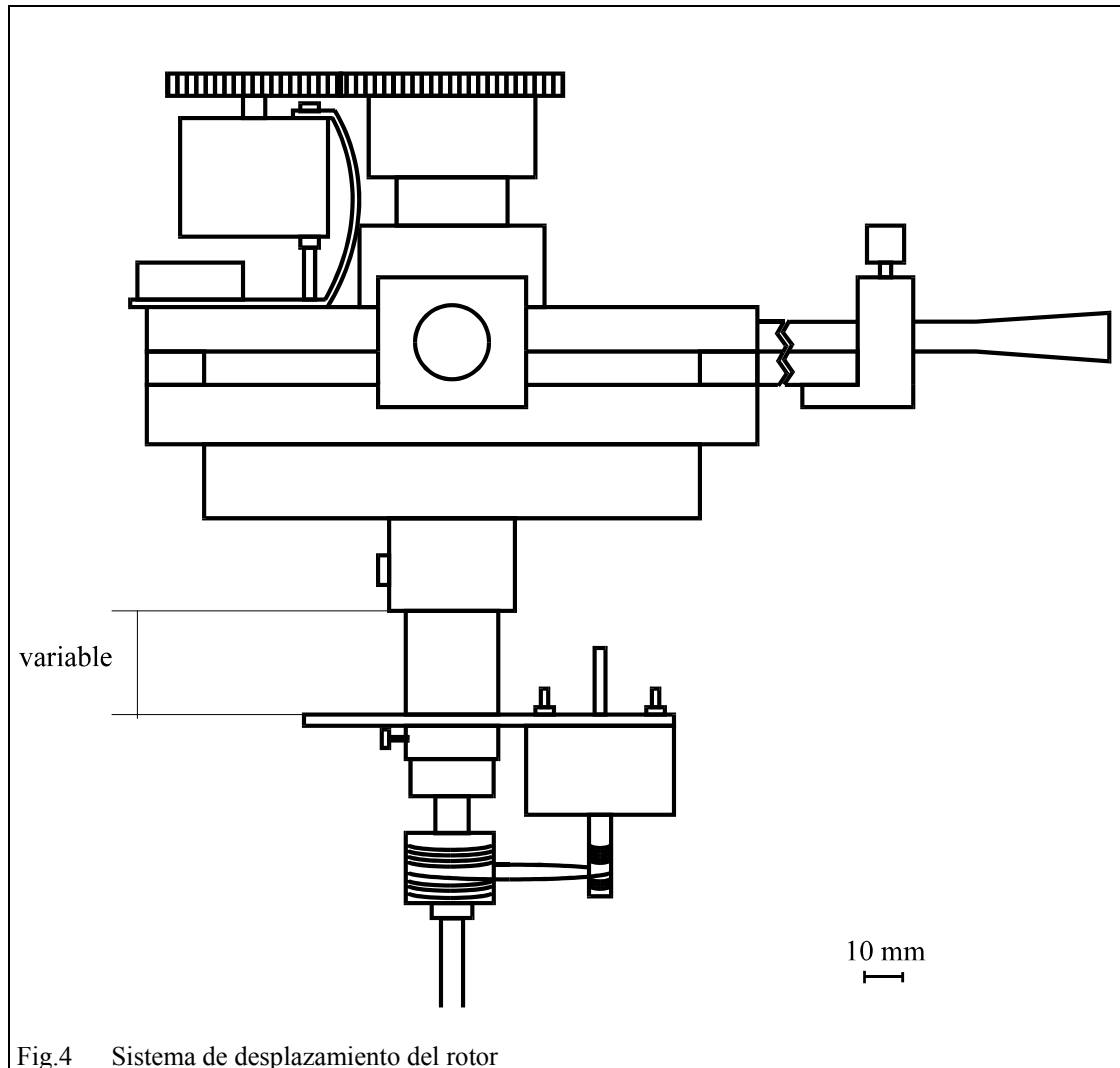
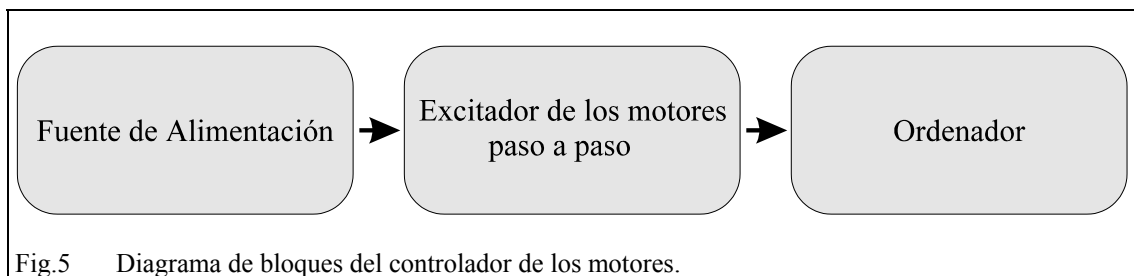


Fig. 3 Fotografía del sistema de medida

La figura 2 es un esquema del montaje efectuado.

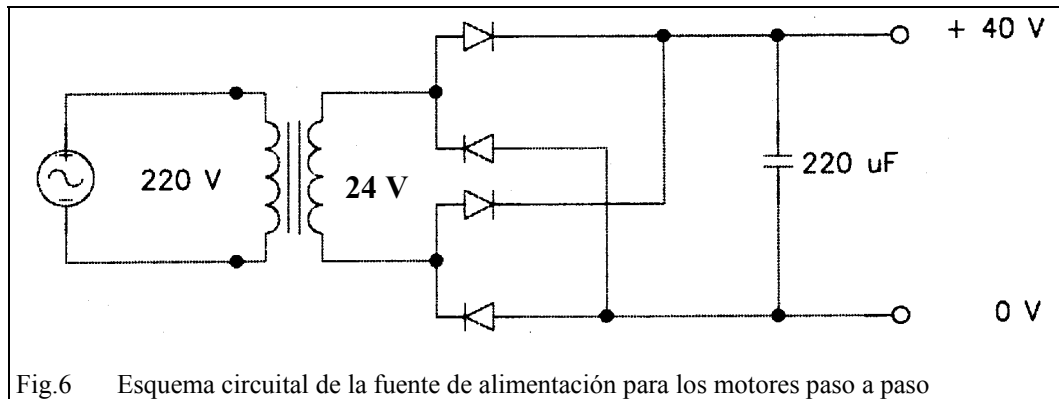


**Alimentación de los motores paso a paso:** El sistema consta de una fuente de alimentación continua de 40V y 2A, un sistema excitador de los motores y de un ordenador (figura 3).



### - Fuente de alimentación

La fuente consta de un transformador de 220V a 24V (2 A), un puente de diodos y un condensador de 4700  $\mu\text{F}$  (figura 4)



La señal de salida obtenida es de tensión continua, de 40V y 2A de intensidad, lo que es suficiente para alimentar los dos circuitos excitadores (uno para cada motor).

### -Excitador para motor paso a paso

El sistema incorpora un interfaz para ordenador convencional, un dispositivo de control de motor con circuito integrado y etapas de salida excitadoras de control . Como existen dos motores paso a paso, se ha construido un sistema de control para cada uno de ellos.

El sistema representado en la figura 5, controla motores bipolares de dos fases, como es el caso de los dos motores paso a paso utilizados. La corriente máxima por fase es de 2A, lo que es más que suficiente.

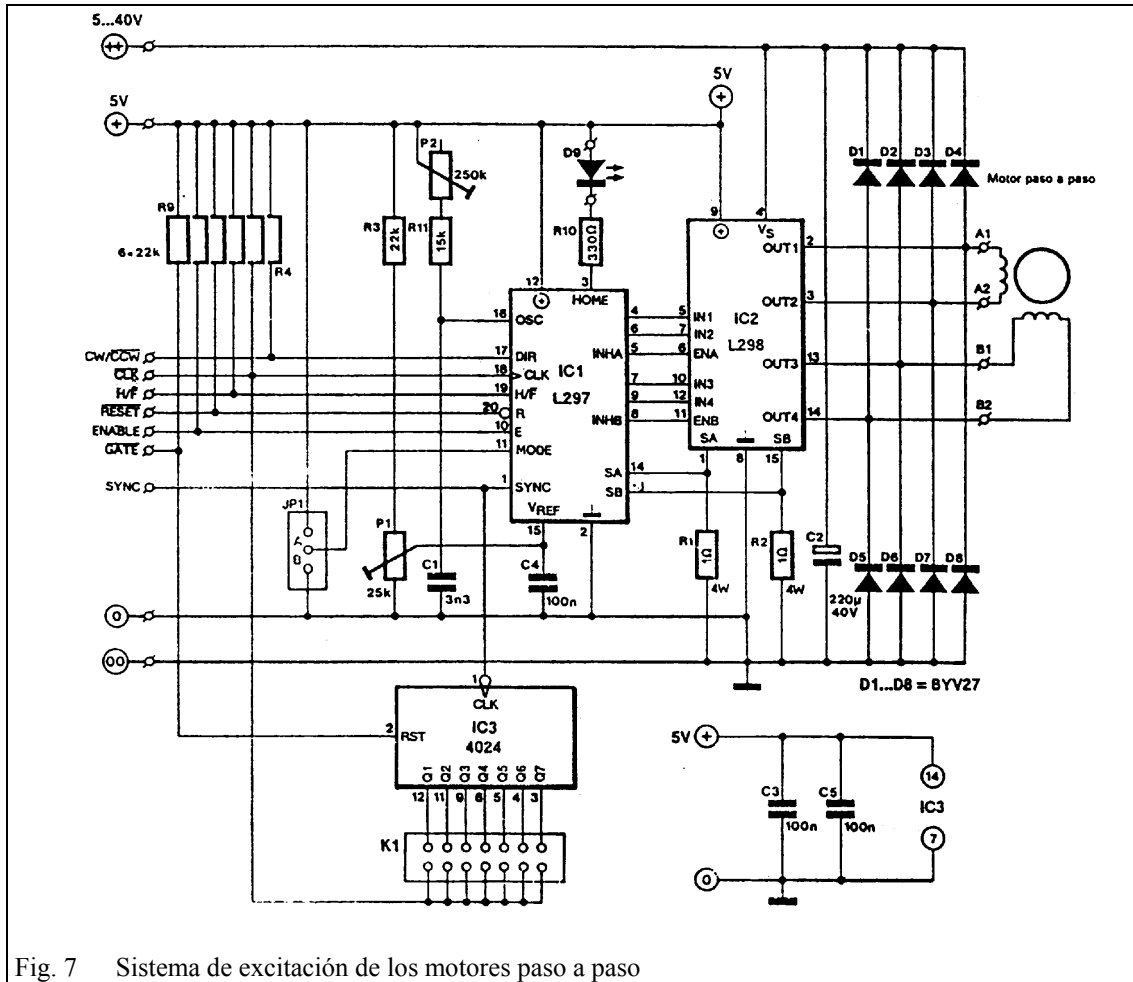


Fig. 7 Sistema de excitación de los motores paso a paso

El corazón de este montaje son un par de circuitos integrados de SGS-Thomson Microelectronics, el L297 y el L298. El L297 genera las señales de control para cada una de las dos fases de un motor bipolar. Mediante la programación en sus dos entradas (compatibles TTL) permite la selección del sentido de rotación y del tamaño del paso (paso completo o semipaso). Según el caso, el motor avanza o retrocede un paso, o un semipaso, en el flanco descendiente de la señal aplicada a la entrada de reloj (CLK).

La corriente media resultante es función de diversas variables:  $V_{ref}$  (ajustable mediante P1), la frecuencia del oscilador (ajustable mediante P2), y el valor de las resistencias de detección de corriente.

La amplitud del rizado residual (ripple) presente en la corriente del estator depende de la autoinducción del mismo así como del nivel aplicado en la patilla mode. Con un nivel alto en dicha entrada, las salidas del L298 se ponen en estado de alta impedancia durante el periodo de funcionamiento de los diodos de protección, que entran en conducción porque la tensión instantánea en bornes de los bobinados del estator sobrepasa ligeramente la tensión de alimentación, de forma que el campo del estator cae rápidamente.

Cuando la entrada MODE está a nivel bajo, uno de los transistores internos del L298 permanece activo durante el período de conducción de los diodos, lo que tiene como efecto mantener a un valor relativamente débil la tensión de freno en bornes del bobinado del estator, lo que conlleva una disminución menos importante de la fuerza del campo del estator, reduciendo así la amplitud del rizado residual. Esta opción permite mantener a una intensidad suficiente la corriente de control de un motor que presente una autoinducción de estator relativamente baja.

El divisor incorporado en el esquema, 4024, está destinado a proporcionar una señal de reloj cuando la salida del ordenador desde el que se controla el circuito no puede ser programado para conmutar a la velocidad de paso necesaria. El selector de velocidad, K1, permite escoger entre una de las siete frecuencias (velocidades de paso) posibles. Se puede colocar el dispositivo divisor de frecuencia fuera de servicio mediante la aplicación de un nivel bajo en la entrada GATE disponible sobre el circuito impreso. La entrada CLOCK funciona en este caso como una salida, lo que permite al ordenador seguir el número de pasos efectuados. Si se aplica un reloj externo a la placa de control se podrá simplemente eliminar 4024.

### **Control por el ordenador**

El software ha sido desarrollado en el entorno Turbo Pascal. Se ha diseñado un programa (ver anexo numero 3) que permite controlar el sentido de giro, el número de pasos y la velocidad de rotación de cada uno de los motores. El programa también es el encargado de la adquisición y almacenamiento de los datos en un fichero.

Del ordenador se han obtenido los controles de todas las señales. Igualmente, ha proporcionado la señal continua de alimentación de 5V y GND (la cual es común con la GND de la fuente de 40 V).

Las señales de GATE, SYNC, RESET, H/F y ENABLE no han sido conectadas, dejándose en circuito abierto, ya que su uso no ha sido necesario.

La señal CW/CCW y CLK se controlan desde el programa en pascal, enviando las correspondientes señales en forma de pulsos.

## **Sistema de acondicionamiento de la señal**

Hay dos señales de entrada a la tarjeta del ordenador, la que proviene de la sonda Hall y la del potenciómetro. La alimentación de ambos se hace con una fuente de tensión continua común de tres salidas: -12, 0 y +12V.

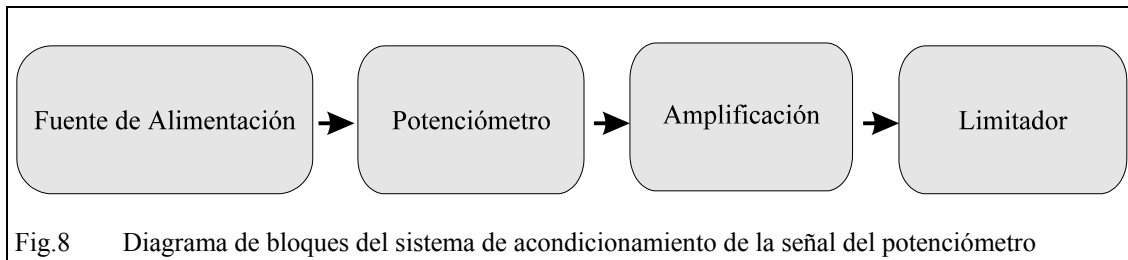
Para su correcta lectura, el voltaje de entrada a la tarjeta del ordenador ha de estar entre -5 a +5V. Para ello, se necesita un sistema que amplifique la señal cuando sea necesario y la sitúe entre los valores comentados anteriormente, pero sin sobrepasarlos. Para que la tarjeta no tenga sobretensiones que puedan dañarla, se ha colocado un limitador de tensión a  $\pm 5V$  a la salida de cada una de las señales.

El sistema de amplificación de la sonda es más delicado, ya que la señal es más débil y el ruido la afecta mucho más. Así que, se ha utilizado un amplificador de instrumentación (INA 110 Burr Brown).

### **-Acondicionamiento de la señal del potenciómetro**

Como se puede observar en el diagrama de bloques de la figura 6, el sistema consta de una fuente de alimentación, un potenciómetro, un sistema de amplificación de la señal de salida del potenciómetro y un limitador de tensión.

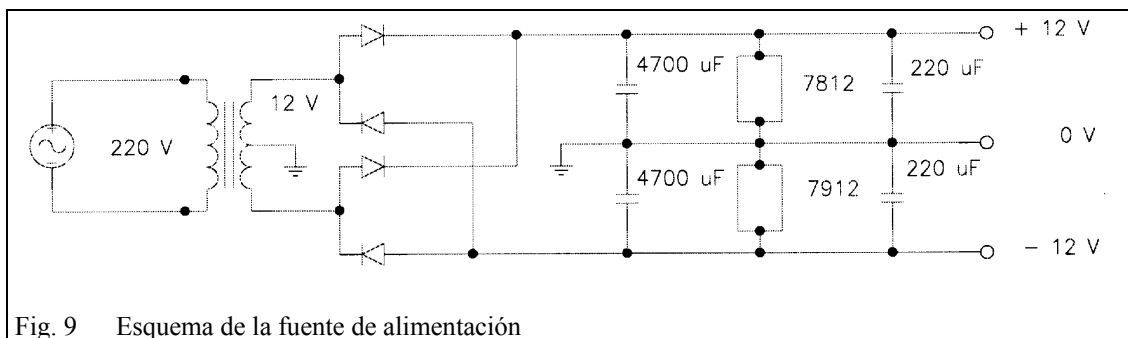




A continuación se explicará con más detalle cada uno de los bloques.

### - Fuente de alimentación

La fuente de alimentación suministra una tensión continua mediante tres salidas de +12, 0 y -12V. Para su construcción se ha utilizado un transformador de 220 a 12V y de 0.75 A, dos puentes de diodos, cuatro condensadores y dos referencias de tensión (figura 7)



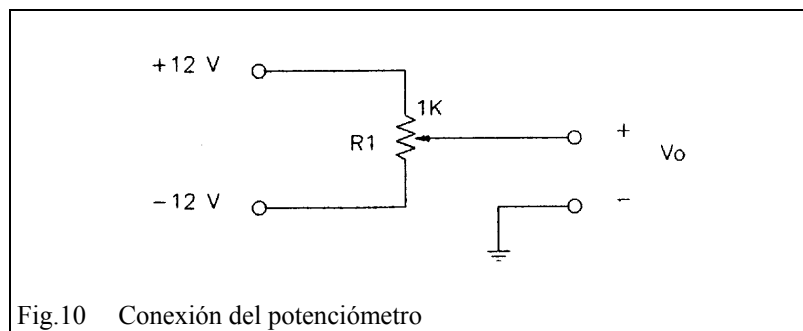
El transformador convierte la señal proveniente de la red eléctrica (220V, 50Hz), en dos señales alternas de la misma frecuencia y de amplitud 12V. El objetivo de los puentes de diodos es transformar las señales de corriente alterna en continuas de 12 V, una de signo positivo y otra de signo negativo.

Posteriormente, el regulador de voltaje positivo (7812) convierte la señal continua de entrada en una de valor +12V. El regulador de voltaje negativo (7912) tiene la misma función, pero en este caso la señal de salida es de -12V. Por último, la función de los condensadores es filtrar la señal eléctrica.

#### 5.5.1.2 Potenciómetro

El potenciómetro utilizado es multivuelta (diez vueltas), y con una resistencia de  $1\text{K}\Omega$ . En las medidas que se han realizado, se ha girado el rotor únicamente vuelta y media, por lo que la variación de resistencia requerida es de  $150\Omega$ . La sensibilidad del potenciómetro es pues de  $150\Omega/540^\circ$ , lo que es igual a  $0.28\ \Omega/^\circ$ .

Los dos terminales del potenciómetro entre los que hay una resistencia fija de  $1\text{K}\Omega$  se han conectado entre los terminales de tensión  $+12\text{V}$  y  $-12\text{V}$ , por lo que la tensión de alimentación aplicada es de  $24\text{V}$ . La alimentación se ha buscado simétrica porque la tensión de entrada a la tarjeta del ordenador es también simétrica, variando entre  $\pm 5\text{V}$ .



El tercer terminal de resistencia variable junto con la señal GND forman la tensión de salida. Cuando  $V_O$  es nula, el potenciómetro se encuentra en el punto central, es decir, con una resistencia de  $500\Omega$ .

### Amplificación

La excursión de la medida es de 1.5 vueltas, lo que indica que el extremo inferior se encuentra a  $-0.75$  vueltas y el superior a  $+0.75$  vueltas. Como la tensión de alimentación es de  $24\text{V}$ :

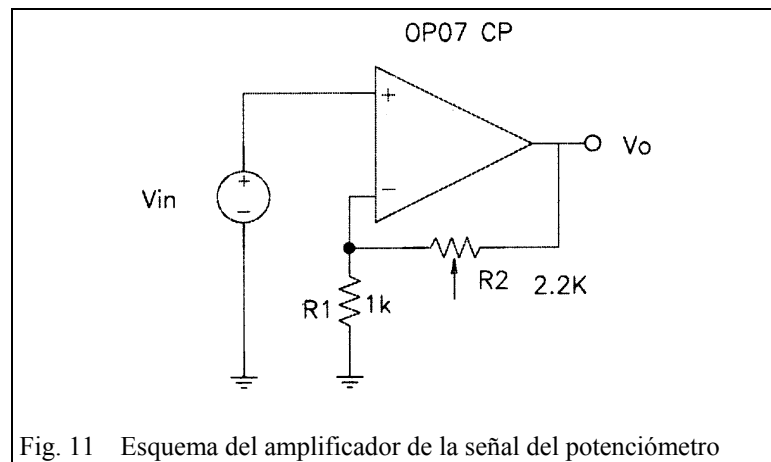
$$\text{Extremo inferior} = -0.75 \text{ vueltas} \times \frac{24\text{V}}{10 \text{ vueltas}} = -1.8\text{V} \quad (5.1)$$

$$\text{Extremo superior} = 0.75 \text{ vueltas} \times \frac{24\text{V}}{10 \text{ vueltas}} = 1.8\text{V} \quad (5.2)$$

Como la entrada de la tarjeta ha de ser de  $\pm 5\text{V}$ , la amplificación necesaria es de:

$$\text{Ganancia del amplificador} = \frac{\pm 5V}{\pm 1.8V} = 2.78 \quad (5.3)$$

El amplificador utilizado ha sido un no inversor como se muestra la figura 9



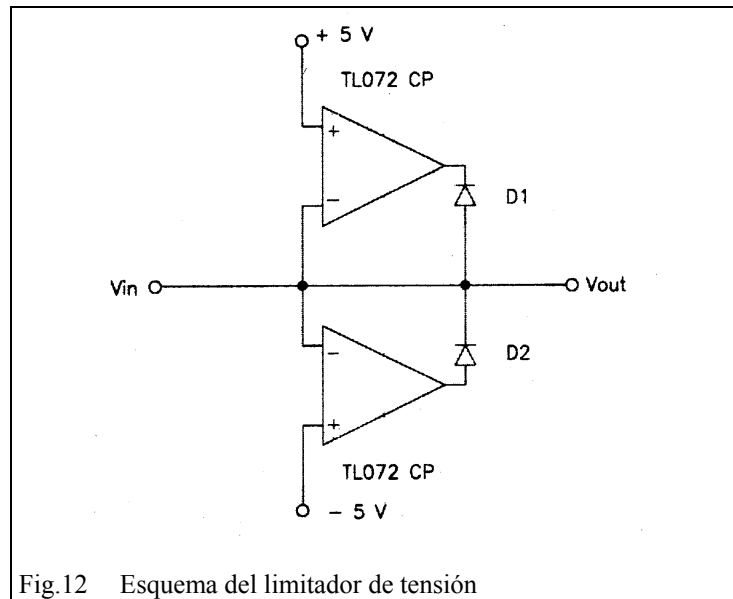
La relación entre la tensión de salida y la de entrada en un amplificador no inversor, como ya se conoce, viene dada por la ecuación 5.3:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_i \quad (5.4)$$

Como la ganancia había de ser de aproximadamente de 2.78, los valores de las resistencias utilizados fueron de  $1K\Omega$  para  $R_1$  y un potenciómetro de  $2.2K\Omega$  para  $R_2$ . El amplificador que se hizo servir era del tipo OP07CP.

### - Limitador de tensión

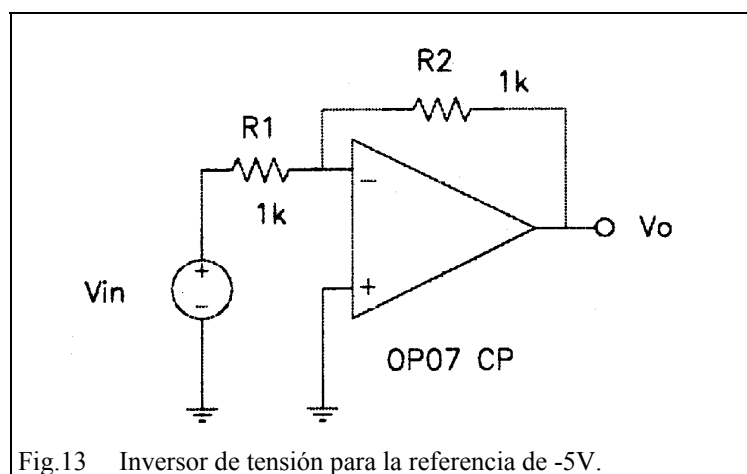
Por último, se ha añadido un limitador de tensión para que un giro excesivo de potenciómetro no supere los  $\pm 5V$  a la entrada del convertidor A/D y pueda dañarla. El limitador consta de dos amplificadores, dos diodos y dos referencias de tensión, una de  $+5V$  y la otra de  $-5V$  (figura 10).



En este caso, los amplificadores actúan como comparadores. Cuando la amplitud de la señal de entrada está entre las referencias, la señal de salida es igual que la de entrada. Si supera las referencias, en cambio, la señal de salida es igual a una de las referencias.

Se ha utilizado un TL072, ya que el circuito integrado contiene dos amplificadores operacionales. Los diodos son de baja corriente de fugas.

La referencia de +5V se ha conseguido con un circuito integrado REF02, el cual da una tensión continua muy estable de esa amplitud. Para obtener la referencia de -5V se ha invertido la señal de salida del REF02 con un inversor de tensión (figura 11) [Thom].



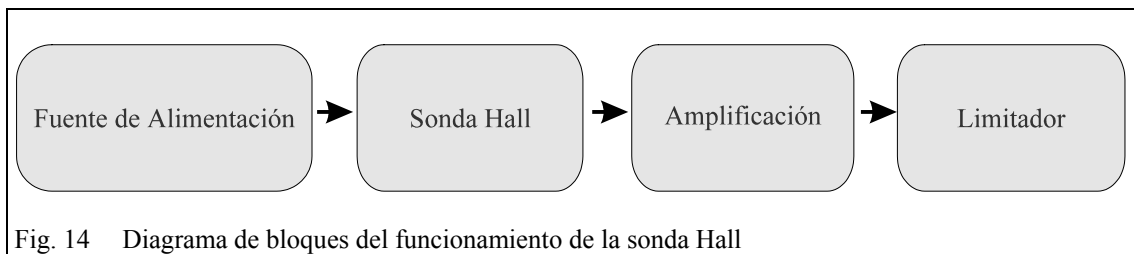
La relación entre la señal de entrada y salida es:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (5.5)$$

Donde  $R_1 = R_2 = 1K\Omega$ .

### Acondicionamiento de la sonda Hall

El diagrama de bloques del funcionamiento de la sonda se muestra en la figura 12. Consta de una fuente de alimentación, una sonda Hall, un sistema de amplificación de la señal y un limitador de tensión.



A continuación se comenta con más detalle cada uno de los bloques.

#### - Fuente de corriente

La fuente de alimentación utilizada es la descrita en la figura 7. La tensión positiva de salida de esta fuente (+12V), la cual es común con el sistema de alimentación del potenciómetro, además se utiliza para alimentar el circuito integrado REF02.

La sonda Hall se alimenta con una corriente constante de 5mA, no con tensión. Por este motivo, es necesario la implementación de una fuente de corriente para que su alimentación sea correcta. El esquema de esta fuente de corriente se representa en la figura 13.

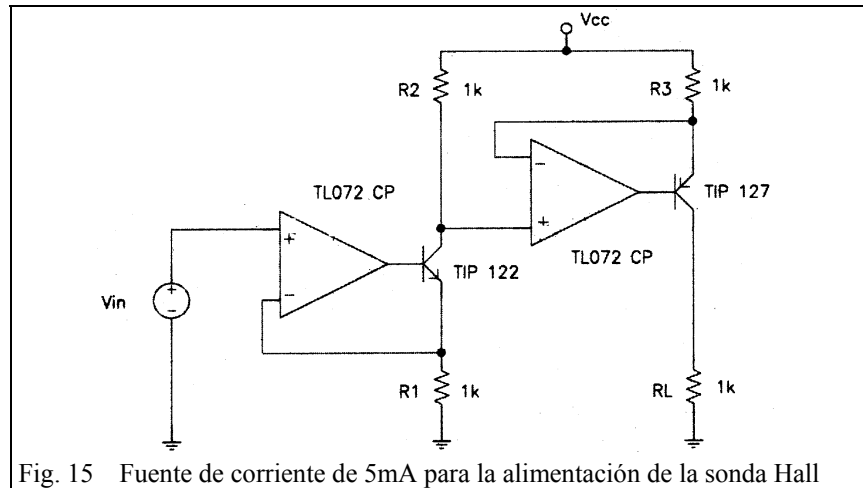


Fig. 15 Fuente de corriente de 5mA para la alimentación de la sonda Hall

La relación entre la tensión de entrada y la corriente de salida es la siguiente:

$$I_L = \frac{R_2}{R_1 R_3} V_i \quad (5.6)$$

Donde  $V_i$  es la señal de entrada, que en este caso proviene del REF02 (Texas Instruments), por lo que son 5V. Los amplificadores operacionales se obtienen de un circuito integrado TL072, y los transistores son uno del tipo TIP 122 y otro un TIP 127 (ver anexo), npn y pnp respectivamente. Las resistencias se han escogido de forma que la corriente de salida sea de 5mA, por lo que  $R_1 = R_2 = R_3 = 1K\Omega$ . De esta forma se consigue una corriente continua de 5mA muy estable.

### -Sonda Hall

La sonda Hall presenta cuatro terminales aislados, dos de entrada y dos de salida. Como ya se ha visto, necesita una alimentación de 5mA para su correcto funcionamiento.

La resistencia entre los terminales de entrada es de aproximadamente  $660 \Omega$ , aunque este valor varía de una sonda a otra. La resistencia entre los terminales de salida es de unos  $900\Omega$ , y entre cualquiera de los otros terminales de unos  $715\Omega$ . La tensión de offset nominal es de  $2.6\text{mV}$  y la sensibilidad nominal de  $0.8\text{V/T}$ .

Al utilizarse a temperaturas muy inferiores a temperatura ambiente (que es el funcionamiento normal de la sonda), ha sido necesaria una calibración previa, tanto de la tensión de offset como de la sensibilidad, ya que ambas cambian con la temperatura. Para este fin, se han utilizado dos imanes y un gausímetro.

En primer lugar, se mide el campo magnético de los imanes con el gausímetro. Posteriormente, se acercan cada uno de los imanes a la sonda hall, tanto con la sonda a temperatura ambiente como con la sonda sumergida en nitrógeno, y se anotan los resultados. Ninguno de los imanes se ha enfriado en nitrógeno, ya que entonces variaría su punto de trabajo en la curva de histéresis, y con ello el valor del campo magnético.

Los resultados obtenidos son:

$V_{\text{offset}} = 2.2 \text{ mV}$	Sensibilidad = $0.81 \text{ V/T}$	A $298 \text{ K}$ ( $T_{\text{ambiente}}$ )
$V_{\text{offset}} = 0.47 \text{ mV}$	Sensibilidad = $1.23 \text{ V/T}$	A $77 \text{ K}$

Como se aprecia claramente, las características de la sonda mejoran al introducirla en nitrógeno líquido. Además, los valores a temperatura ambiente son muy similares a los nominales.

### - Amplificación

Los cálculos del valor necesario de amplificación de la señal se realizaron antes de su calibración, ya que primero es necesario tener construida la fuente de alimentación, así como el sistema de acondicionamiento de la señal. Es por eso que se han escogido los valores nominales para el cálculo de la amplificación.

El campo de saturación del hierro es de  $2\text{T}$ , por lo que los campos obtenidos no serán superiores a este valor. Esto implica un voltaje máximo de :

$$V_{\text{máximo}} = V_{\text{sat.Hierro}} = 2T \times \frac{0.8V}{1T} = 1.6V \quad (5.7)$$

La tarjeta del ordenador es de 12 bits, por lo que el mínimo valor de tensión medible es de :

$$V_{\text{mínimo}} = \frac{\text{excursión } (2 \times 1.6V)}{2^{12}} = \frac{3.2V}{4096} = 7.81 \cdot 10^{-4}V = 0.78mV \quad (5.8)$$

Lo que es un campo de (suponiendo una sensibilidad igual a la nominal):

$$B_{\text{mínimo}} = 0.78mV \times \frac{1T}{0.8V} = 9.76 \cdot 10^{-4}T = 9.76 \text{ Gauss} \quad (5.9)$$

El campo de offset nominal que tendremos será de:

$$B_{\text{offset}} = 2.6V \times \frac{1T}{0.8V} = 3.25 \cdot 10^{-3}T = 32.5 \text{ Gauss} \quad (5.10)$$

Lo cual es un campo muy pequeño, por lo que no hace falta corregir el offset con un amplificador diferencial.

Para ajustar la señal de salida de la sonda a la entrada de  $\pm 5V$  de la tarjeta, hace falta amplificarla. Pero como la señal suele ser débil, el ruido del amplificador podría degradarla. Por este motivo, se ha utilizado un amplificador de instrumentación INA110 de Burr Brown.

Si, como se ha mencionado antes, los campos más intensos que puede medir la sonda son de 2T debido a la saturación del hierro, el voltaje de entrada al ordenador está entre  $\pm 1.6V$ . Como el máximo de la tarjeta es de  $\pm 5V$ , la ganancia del amplificador necesaria es de:



$$Ganancia = \frac{\pm 5V}{\pm 1.6V} = 3.125 \quad (5.11)$$

El amplificador de instrumentación INA 110 tiene unos valores fijos de ganancia, que son 10, 100, 200 y 500. El valor escogido fue 10, ya que es el más próximo a la ganancia que se necesita. De todos modos, nunca se ha excedido el voltaje de entrada a la tarjeta, ya que los campos medidos no han sido tan intensos como 2T.