

# MAGNETOMETRO DE RESONANCIA NUCLEAR MAGNETICA\*

R. Velarde Méndez

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Salazar. Edo. de México

V. Beltrán-López

Centro de Estudios Nucleares, U.N.A.M.

(recibido septiembre 28, 1983; aceptado junio 12, 1984)

## RESUMEN

Se presenta un magnetómetro de resonancia nuclear magnética, para medir campos magnéticos entre 2,500 gauss y 5,000 gauss, con una precisión de algunas partes por millón. El circuito del magnetómetro, basado en un oscilador marginal, permite sintonización continua en el intervalo de frecuencias entre 10.0 MHz y 21.50 MHz. con una sola sonda y se tiene una relación señal a ruido aproximadamente igual a 20.

El amplificador de radiofrecuencia es del tipo cascode en circuito integrado y el instrumento opera con dos pilas de 9V. La modulación es a 35 Hz., y se obtiene de un oscilador externo. El instrumento es compacto, barato, fácil de operar y puede también emplearse con fines didácticos para demostrar el fenómeno de RNM y sus principales características.

---

\*Por convenio ININ-UNAM.

## ABSTRACT

We present a nuclear magnetic resonance magnetometer that measures magnetic fields, between 2,500 gauss and 5,000 gauss, with an accuracy of a few parts per million. The circuit of the magnetometer, based on a marginal oscillator, permits a continuous tuning in the frequency range comprised between 10.0 MHz and 21.50 MHz, with a signal to noise ratio of about 20.

The radiofrequency amplifier is of the cascode type in integrated circuit and it operates with two 9V batteries. The modulation is at 35 Hz and it is provided by an external oscillator. The instrument is compact, inexpensive and easy to operate; it can also be used for didactic purposes to show the phenomenon of magnetic nuclear resonance and its main characteristics.

## 1. INTRODUCCION

La medición de campos magnéticos, empleando el fenómeno de resonancia nuclear magnética (RNM), es una técnica bien conocida<sup>(1)</sup>. Abragam<sup>(2)</sup> ha señalado los aspectos relevantes de la teoría de la RNM, mientras que Andrew<sup>(3)</sup> e Ingram<sup>(4)</sup> describen los métodos de detección. En el presente trabajo se reportan el diseño y la construcción de un magnetómetro basado en este fenómeno, empleando protones.

En la primera parte del trabajo, se expone el principio de operación del instrumento y se dan las características más importantes del mismo. En la segunda parte se describen cada uno de los circuitos que forman el magnetómetro, sus características y algunos detalles de construcción. En la parte final se muestran los resultados, así como también algunos comentarios y conclusiones acerca del funcionamiento del instrumento.

## 2. PRINCIPIO DE OPERACION DEL INSTRUMENTO

El principio del método de medición, consiste en que al ocurrir la RNM, se detecta la absorción de energía por parte de una muestra, rica en protones, colocada en un campo magnético externo  $H_0$ . Esa energía proviene de un campo de radiofrecuencia (rf) producido en una bobina por un oscilador de rf. La bobina, que rodea al contenedor de la muestra forma parte del circuito tanque de este oscilador. La absorción de energía se manifiesta como el cambio en el factor de calidad (Q) de la bobina, lo que

a su vez significa un cambio en la impedancia en paralelo con dicha bobina y por lo tanto en el voltaje que existe a través de ella. Este cambio puede ser detectado por un circuito receptor y la señal de resonancia así obtenida, puede llevarse a un dispositivo externo para su observación, como un osciloscopio por ejemplo. La condición de resonancia ocurre a una frecuencia bien definida, llamada frecuencia de Larmor que está dada por

$$\omega = \gamma H_0, \quad (1)$$

donde  $H_0$  es el campo magnético externo que se desea medir y  $\gamma$  es la razón giromagnética de los núcleos particulares que se emplean en la muestra. Para la mayoría de los núcleos, la frecuencia de Larmor se encuentra en el intervalo de radiofrecuencias. De este modo, la medición del campo magnético, se reduce a la medición de una radiofrecuencia y esto puede hacerse con una gran precisión.

La Fig. 1 muestra un diagrama a cuadros del magnetómetro propuesto. El magnetómetro consta de la sonda y de los circuitos de los cuatro cuadros superiores: un oscilador de rf, un amplificador de rf, un demodulador y un amplificador de audiofrecuencia (af).

En la literatura, se encuentran numerosos reportes de osciladores marginales de varios tipos, empleando circuitos transistorizados, los cuales han sido utilizados como magnetómetros<sup>(5,6,7)</sup>, aprovechando el fenómeno de RNM. En este trabajo, se emplea una versión modificada del oscilador marginal diseñado por S. Feng<sup>(8)</sup> (Fig. 3.) el cual se elige por ser sencillo y de fácil construcción, y que con algunas modificaciones, se mejoran sus características como se mostrará más adelante.

El oscilador marginal produce en la bobina de rf un campo magnético oscilatorio  $H_1$  perpendicular al campo externo  $H_0$ , cuyo valor se desea medir. La bobina de rf que constituye la sonda, tiene como núcleo el contenedor de la muestra. Cuando el campo  $H_1$  se encuentra en resonancia con la precesión de Larmor de los momentos magnéticos nucleares, producida por el campo externo  $H_0$ , éstos absorben energía del campo de rf, lo cual se manifiesta por un cambio en el factor de calidad (Q) y en la impedancia de la bobina, como demuestra Hughes<sup>(9)</sup>. Como consecuencia de esto, disminuye la amplitud del voltaje de rf a través de la bobina. De lo anterior se

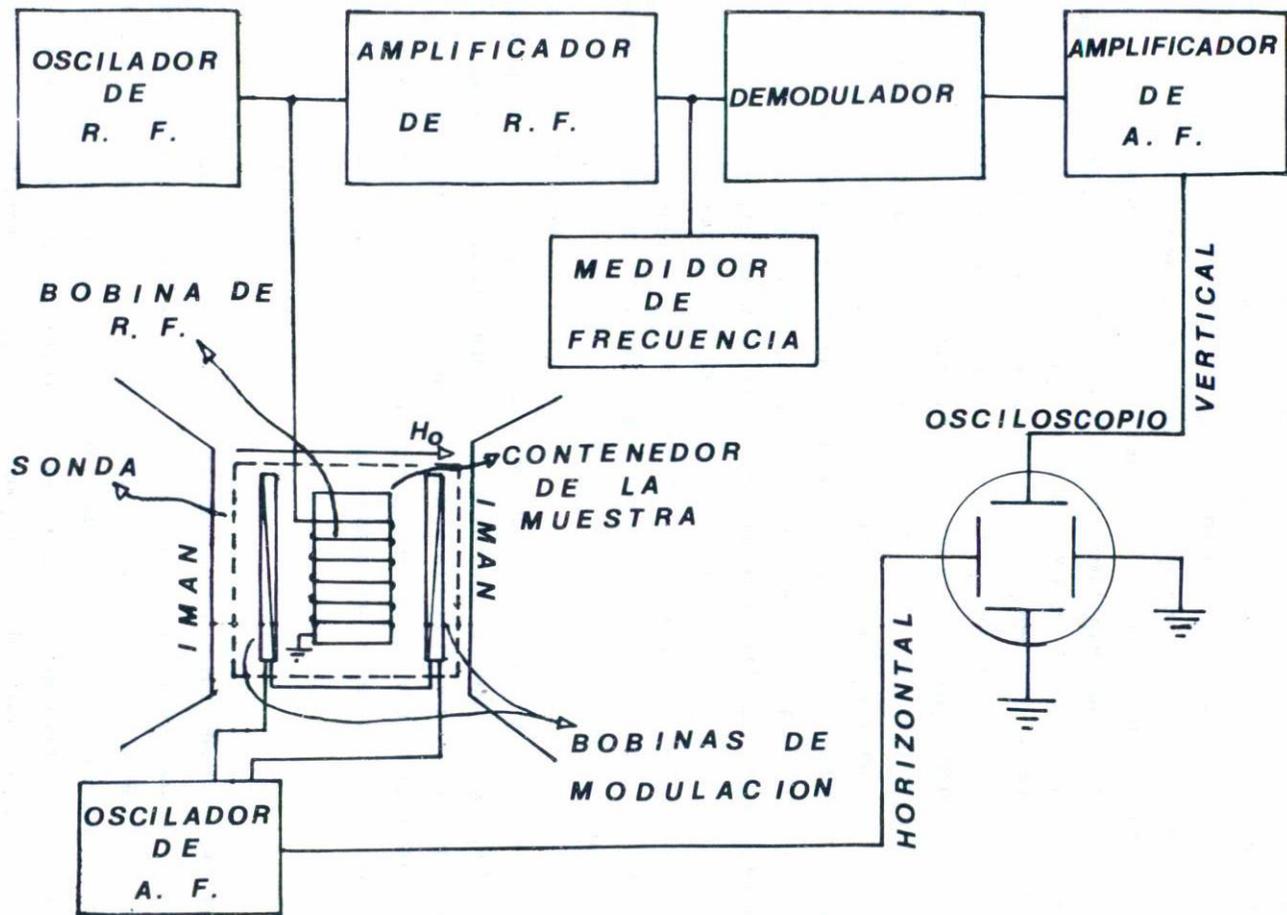


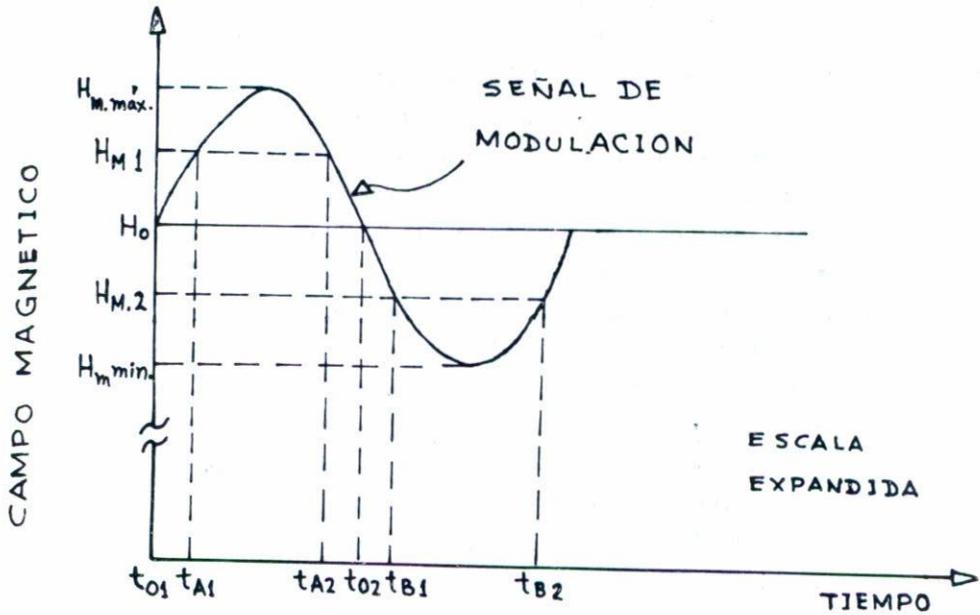
Fig. 1 Diagrama de bloques.

deduce que, el factor de calidad de la bobina de rf es de primordial importancia en el diseño de este circuito; ya que además un valor alto de  $Q$ , corresponde a una mejor relación señal a ruido<sup>(10)</sup>. Por otra parte, la salida del oscilador de rf debe estar limitada a unas pocas decenas de milivolts. Esto es necesario ya que la intensidad de la señal en resonancia, es proporcional a la amplitud del voltaje de rf en la bobina, cuando se evita la saturación de la muestra<sup>(11)</sup>. Para medir campos magnéticos cuyos valores se encuentran entre 2,500 y 5,000 gauss, se requiere que el oscilador de rf sea capaz de cubrir un intervalo de frecuencias de oscilación entre 10 MHz. y 21.5 MHz. aproximadamente, de acuerdo con (1). En la que se usó para  $\gamma$  el valor de  $4257.76 \pm 1$  Hz/gauss para protones<sup>(12)</sup>.

Como se ha mencionado, la medición del campo magnético se reduce a la medición de una radiofrecuencia; por lo que otro parámetro de importancia en el diseño del oscilador es su estabilidad en frecuencia. Los factores que limitan la precisión en la medición de esta frecuencia son:

- a) El ancho natural de la línea de resonancia.
- b) La estabilidad en frecuencia del oscilador.
- c) La precisión del medidor de frecuencias.

Ahora bien, con el fin de observar continuamente en el osciloscopio la ocurrencia de la resonancia, es necesario modular el campo magnético externo  $H_0$  por medio de unas bobinas de modulación, alimentadas por un oscilador de audiofrecuencia (af). Las bobinas de modulación, que también se encuentran en la sonda, (Fig. 1) producen un campo magnético de baja frecuencia y de pequeña amplitud, que se superpone al campo magnético externo  $H_0$ . De este modo, el campo externo queda modulado haciendo que la condición de resonancia (1), se satisfaga repetidamente y con la frecuencia del oscilador de af. De la misma manera, el voltaje a través de la bobina de rf, queda también modulado con la frecuencia de af. En otras palabras, la señal del oscilador de rf es modulada en amplitud por el fenómeno de RNM. Cuando el valor promedio del campo magnético externo modulado está próximo al valor resonante, el campo pasa dos veces en cada ciclo a través de la condición de resonancia, como se muestra en la Fig. 2. Si el barrido horizontal del osciloscopio se toma del mismo oscilador de af que proporciona la modulación del campo, y se introduce en las placas verticales la señal de resonancia, ésta se observará dos veces en cada ciclo de barrido del osciloscopio.



$H_0$  — campo magnético externo (K gauss)

$H_m$  máx. — amplitud máxima de la señal de modulación (gauss)

$H_m$  min. — amplitud mínima de la señal de modulación (gauss)

La resonancia ocurrirá en los tiempos  $T_{01}$  y  $T_{02}$  cuando:  $\omega = \gamma H_0$ .

Si la frecuencia del campo de rf. aumenta ligeramente, la resonancia ocurrirá a los tiempos  $T_{A1}$  y  $T_{A2}$ , cuando:  $\omega_1 = \gamma H_{M1}$

Si la frecuencia del campo de rf disminuye ligeramente, la resonancia ocurrirá a los tiempos  $T_{B1}$  y  $T_{B2}$ , cuando:  $\omega_2 = \gamma H_{M2}$ .

La resonancia no ocurre si la frecuencia de rf excede el valor:  $\gamma H_m$  máx., o si es menor que:  $\gamma H_m$  min.

Fig. 2 Gráfica de la intensidad de campo magnético contra tiempo, para un ciclo de la modulación.

Como la energía que se absorbe en el fenómeno de RNM es una fracción muy pequeña de la disponible, se hacen necesarios uno o varios pasos de amplificación de rf, antes de obtener señales observables. Debido al alto Q del circuito tanque del oscilador, al amplificador de rf pasan sólo las señales que se encuentran dentro de una banda muy estrecha de frecuencias, esto es frecuencias muy cercanas a la de resonancia<sup>(13)</sup>. El amplificador de rf debe entonces proporcionar una amplificación de la señal proveniente del oscilador, tal que permita que se lleve a cabo eficientemente el proceso de demodulación, por medio de un circuito detector convencional. Esta amplificación debe efectuarse dentro de todo el intervalo de barrido de frecuencias del oscilador, lo cual implica que el amplificador debe tener un ancho de banda igual al intervalo de variación de las frecuencias de oscilación (10-21 MHz). En este circuito se emplea un amplificador de rf de banda ancha, conectado en una configuración cascode. La salida de este amplificador se lleva tanto al medidor de frecuencias, como al circuito detector. El proceso de demodulación se efectúa empleando diodos de germanio y un circuito filtro RC. La señal demodulada es amplificada por un amplificador de audiofrecuencia, obteniéndose así la señal que, al aparecer en el osciloscopio, indica la ocurrencia de la RNM. Cuando esto sucede, se mide la frecuencia del oscilador y se determina el valor del campo magnético externo utilizando la Ec. (1) y el valor de  $\gamma$  dado anteriormente para los núcleos de hidrógeno en la muestra.

### 3. DESCRIPCION DEL CIRCUITO

Los diagramas de los circuitos que componen el magnetómetro se muestran en las Figs. 3 a 6. El oscilador de rf es del tipo Colpitts (Fig. 3) y se hace funcionar marginalmente para obtener la sensibilidad óptima en la detección de la señal de absorción de RNM<sup>(11)</sup>. La amplitud de oscilación se ajusta por medio de la resistencia variable  $R_E$ , para evitar saturación y el oscilador se sintoniza continuamente, hasta satisfacer la condición de resonancia, con el capacitor variable C. Como se mencionó, la muestra se coloca en la misma bobina del circuito LC que determina la frecuencia de operación del oscilador, con lo que se evitan ajus-

tes independientes de sintonía. La bobina de rf consta de 12.5 vueltas de alambre de cobre calibre 14 AWG., cuyas dimensiones son:  $D = 1.2$  cm. y  $\ell = 3$  cm. La bobina se devana sobre el contenedor de la muestra con una separación entre espiras igual al diámetro del alambre empleado, con lo cual se obtiene el máximo posible del factor de calidad  $Q^{(14)}$ . Esta bobina se sitúa dentro del campo magnético externo que se desea medir, con su eje perpendicular a las líneas del campo y se conecta al resto del circuito a través de un cable coaxial de baja capacidad (RG-71/U). Con los valores de  $L$  y  $C$  mostrados en la figura 3, es posible variar la frecuencia del oscilador en el intervalo de 10 MHz a 21.5 MHz. aproximadamente. La modificación básica hecha al circuito de Feng, consiste en que en lugar de tomar la señal de salida del oscilador del colector del transistor, esto es en paralelo con el circuito tanque, se toma del emisor del transistor a través de un capacitor. Con esto el efecto de la carga de salida sobre el circuito resonante se reduce, con lo que es posible obtener valores de  $Q$  mayores que los que se tienen en el circuito original.

Como la señal proveniente del oscilador es muy pequeña (aproximadamente de 50 mV.) se requiere amplificar esta señal antes del proceso de demodulación. La amplificación se realiza con un amplificador de rf de banda ancha (Fig. 4) que es del tipo cascode y en circuito integrado. El que se emplea<sup>(15)</sup>, posee excelentes características a alta frecuencia, ya que está diseñado para operar en sistemas de comunicación que trabajan a frecuencias de hasta 100 MHz., con una sola fuente de poder. Estas características son<sup>(16)</sup>: buena estabilidad, producto ganancia-ancho de banda grande y provee además un buen aislamiento entre la entrada y la salida. Con esto último se logra que al tomar las lecturas de la frecuencia a su salida, los efectos de carga sobre el oscilador, sean despreciables. Con los valores mostrados en la figura 4 se obtiene una amplificación en voltaje de 26 aproximadamente, en el intervalo de frecuencias que va de 10 a 21.5 MHz.

La señal de salida del amplificador de rf es demodulada por el circuito detector de la Fig. 5, que emplea dos diodos de germanio y un circuito RC. Esta señal es amplificada por el amplificador de audiofrecuencia mostrado en la Fig. 6 y alimentada a la entrada vertical de un osciloscopio de entradas X-Y para poder observarla. En este circuito se utiliza

un amplificador operacional muy popular, el  $\mu A$  741 C, obteniéndose una ganancia de aproximadamente 1.200 con los valores mostrados en la figura.

Como se menciona anteriormente, la señal de resonancia se observa por medio de una técnica en la cual, el campo magnético que se desea medir se modula con un pequeño campo magnético variable. La amplitud y frecuencia óptimas de la modulación del campo magnético dependen del proceso de relajamiento del sistema nuclear<sup>(17)</sup>. Para muestras líquidas como la empleada aquí (glicerina) una frecuencia aceptable es 35 Hz. y la amplitud debe ser aproximadamente igual al ancho de la línea de resonancia (generalmente unos pocos gauss)<sup>(18)</sup>. La modulación del campo se logra por medio de dos bobinas colocadas una a cada lado de la bobina de rf que contiene la muestra. Cada bobina consiste de 27 vueltas de alambre de cobre del número 27 AWG, devanadas en carretes de lucita de 7 cm. de diámetro. La corriente para alimentar estas bobinas se toma de un generador externo de onda sinusoidal de audiofrecuencia, con posibilidades de variación tanto en frecuencia como en amplitud. De este mismo generador de af se toma la señal para el barrido horizontal del osciloscopio, logrando con ésto, observar continuamente la señal de resonancia en el mismo.

Una vez que se tiene la señal de resonancia centrada en el oscilador de rf, empleando un contador de frecuencias y se sustituye este valor y el de  $\gamma$  en la Ec. (1) para encontrar el valor del campo magnético externo.

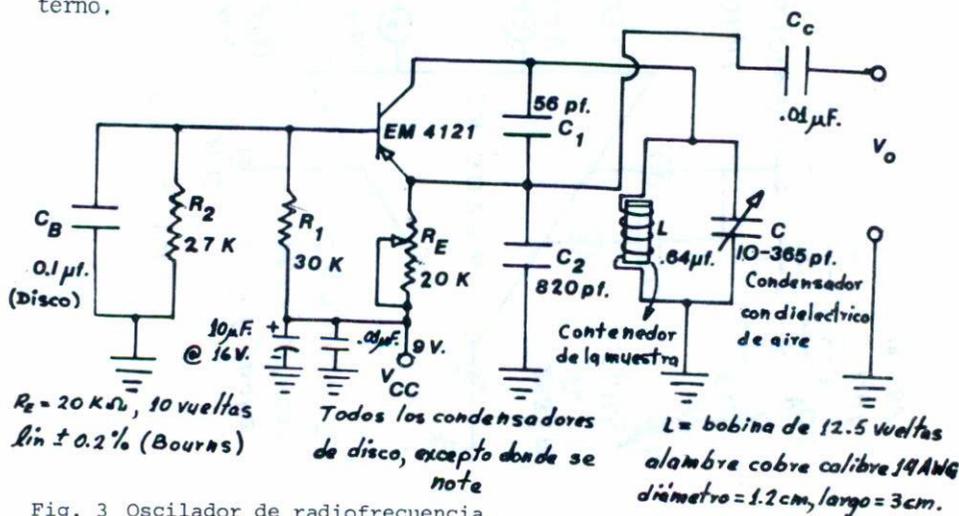


Fig. 3 Oscilador de radiofrecuencia.

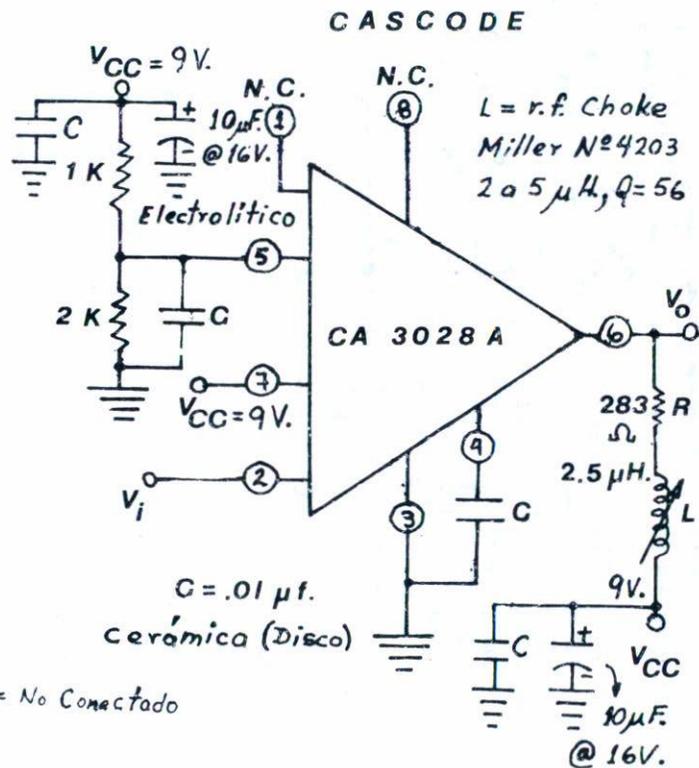
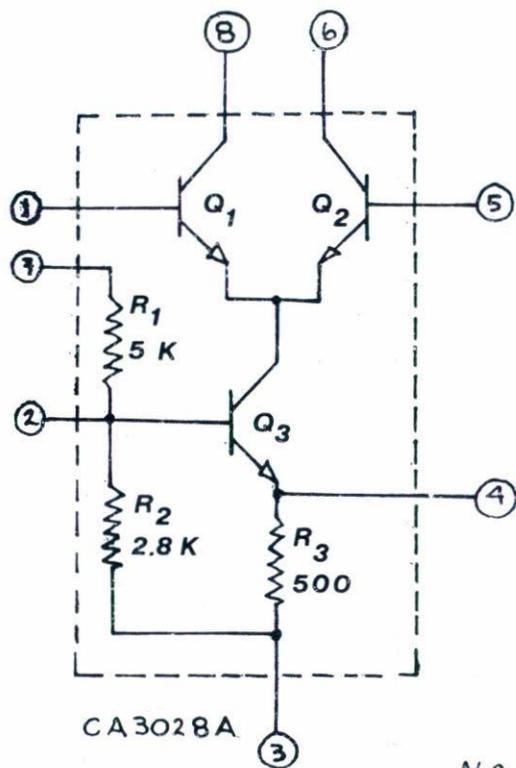
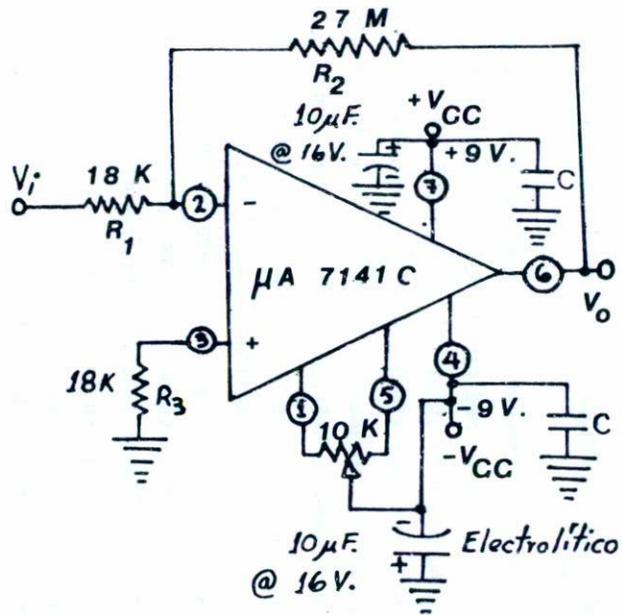


Fig. 4 Amplificador de R.F.

155



$C = 0.1\mu\text{F}$  (Disco)

Fig. 6 Amplificador de A.F.

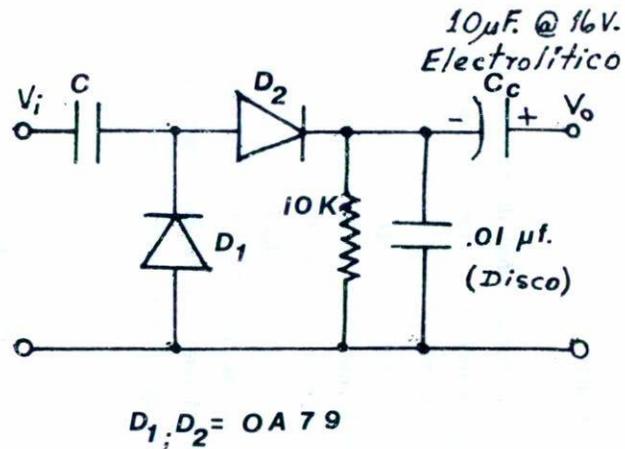


Fig. 5 Demodulador

## 4. RESULTADOS

Con el fin de obtener una buena señal de resonancia en el osciloscopio se hicieron pruebas colocando en la sonda bobinas de diferentes dimensiones, así como diversas muestras: agua con sales agregadas (nitrato ferroso, sulfato de manganeso), benceno y glicerina. Se obtuvieron los mejores resultados empleando como muestra glicerina y usando la bobina de rf, cuyas dimensiones se dan en la Fig. 3.

Se midieron tanto el valor de la inductancia L, como el factor de calidad Q de la bobina, con un medidor de Q BOONTON RADIO CO. TIPO 260-A, al final del cable coaxial que conecta dicha bobina con el resto del circuito y a una frecuencia de 16 MHz, obteniéndose

$$L = 0.67 \mu\text{H. y } Q = 96.$$

Se encuentra experimentalmente que la amplitud óptima a la salida del oscilador está entre 50 y 100 mV.

Las mediciones de campo magnético se hicieron en el electroimán de un Espectrómetro de Resonancia Paramagnética Electrónica (RPE). Este sistema es capaz de producir campos magnéticos estáticos entre 0 y 3,000 gauss, con una estabilidad a períodos cortos de 1 p.p.m. ó 3mG, cualesquiera que sea mayor<sup>(19)</sup>.

Como el intervalo de frecuencia del oscilador está comprendido entre 10 y 21 MHz, se efectuaron mediciones del valor del campo magnético del imán que corresponden a este intervalo de variación de la frecuencia, esto es de 2348 a 4932 gauss aproximadamente. Los valores así obtenidos se comparan con las lecturas tomadas de las perillas de la consola de control del imán con las cuales se selecciona el valor del campo cuya exactitud según dato del fabricante es de 0.2%<sup>(19)</sup>. Obteniéndose de esta forma una exactitud en la medición de aproximadamente 1% con respecto a la lectura en las perillas. Sin embargo si se requiere de mayor exactitud es posible emplear un estándar de frecuencia externo (generador de rf de precisión) para determinar con mayor exactitud la frecuencia a la que ocurre la resonancia; o como se sugiere en la referencia (20) de la forma de la línea de resonancia, es posible determinar el centro de dicha línea con una precisión mejor que un tercio de su ancho lo que significa

que la precisión en la medición del campo magnético puede llegar hasta  $\pm 0.04$  gauss.

La Fig. 7 es una fotografía donde se muestra la señal de resonancia tal como se ve en el osciloscopio para una frecuencia de 16 MHz que corresponde a un valor de campo magnético de 3,757.84 gauss.

Se tiene una relación señal a ruido de 20 aproximadamente en todo intervalo de variación de la frecuencia, excepto en el extremo de baja frecuencia, donde para mejorar esta relación, se requiere de hacer pequeños ajustes en la amplitud de oscilación.

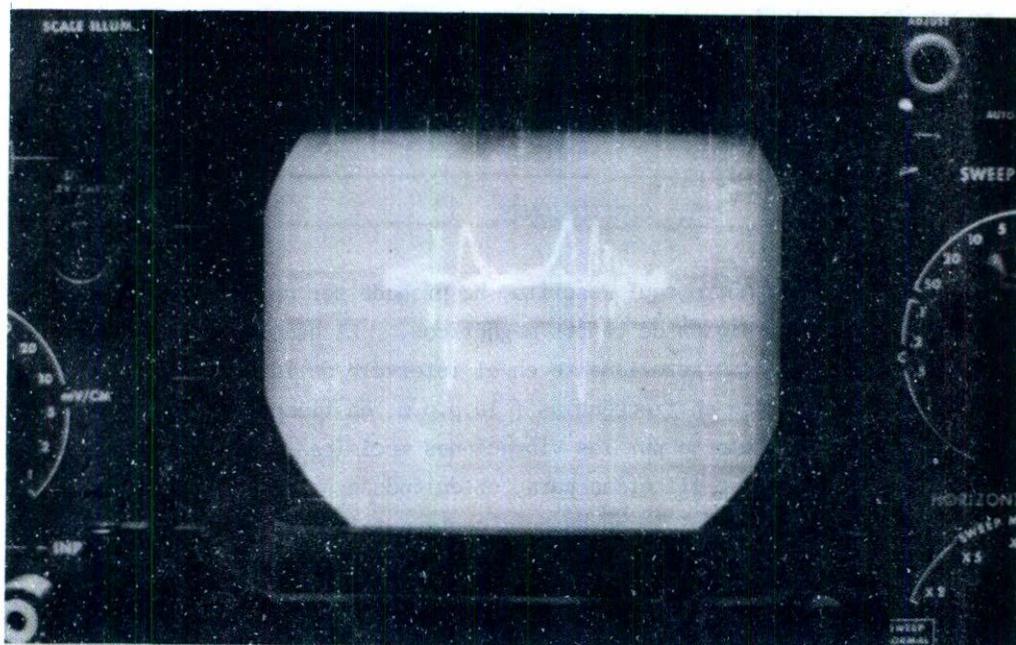


Fig. 7 Señal de resonancia.

## 5. CONSTRUCCION DEL MAGNETOMETRO

Los diferentes circuitos que conforman el magnetómetro, se montaron en una tablilla de circuito impreso con cobre por las dos caras, cuyas dimensiones son 11 cm. x 18 cm. La distribución de los componentes electrónicos es tal, que el plano de tierra rodea a todas ellas, reduciendo así a un mínimo las capacidades parásitas. Tanto la parte del oscilador

como del amplificador de rf se blindan con cajas hechas de lámina de cobre para evitar perturbaciones externas. Asimismo, la interconexión entre los diferentes circuitos y la alimentación de los mismos se lleva a cabo por medio de cable coaxial de baja capacidad y se emplean capacitores de desacoplamiento en las fuentes de alimentación. Estas son técnicas comúnmente empleadas en la construcción de circuitos de alta frecuencia como el presente.

Todos los materiales empleados en la construcción tanto de la sonda como del gabinete que contiene el resto del circuito, debe ser del tipo no magnético (aluminio, bronce, lucita) ya que el equipo se coloca cerca del imán del espectrómetro y podría afectarse la homogeneidad de su campo.

La Fig. 7 es una fotografía del instrumento donde se observa el blindaje empleado en el oscilador y en el amplificador de rf.

## 6. CONCLUSIONES

El magnetómetro aquí descrito, ha probado ser un excelente instrumento para la medición de campos magnéticos. El oscilador de rf empleado, funciona satisfactoriamente en el intervalo de 10 a 21 MHz, con una buena estabilidad en frecuencias (10 p.p.m. en tiempos cortos) y no es afectado prácticamente por las vibraciones mecánicas. La muestra empleada en la sonda fue glicerina pura, obteniéndose a la salida del instrumento, una buena señal de resonancia con una relación señal a ruido satisfactoria (aproximadamente de 20). Dos magnetómetros como éste se encuentran actualmente en operación: uno en el Centro Nuclear de Salazar del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y el otro en el Centro de Estudios Nucleares de la UNAM.

Con el fin de emplear el instrumento para propósitos didácticos, de demostración del fenómeno de la RNM, en laboratorios de enseñanza, donde generalmente se cuenta con pequeños electroimanes, se sugiere modificar el instrumento, bajo las siguientes consideraciones:

- a) Es posible escalar los valores de L y C en el circuito tanque del oscilador con el fin de ajustar el intervalo de frecuencia para los valores de campo magnético más bajos que se obtienen en un electroimán pequeño.

- b) Emplear un oscilador tipo Robinson<sup>(21)</sup> en lugar del oscilador marginal, para aumentar la sensibilidad del sistema.
- c) Se puede emplear un esquema de detección sensitivo a la fase, con el fin de aumentar la relación, señal a ruido de la señal de resonancia<sup>(17,21,19)</sup>.

## REFERENCIAS

1. G. Germain, *Nuclear Instruments and Methods*, 21 (1963) 17.
2. A. Abragam, *The Principles of Nuclear Magnetism*, Oxford University Press, London (1961).
3. E.R. Andrew, *Nuclear Magnetic Resonance*, Cambridge University Press (1958).
4. D.J.E. Ingram, *Spectroscopy at Radio and Microwave Frequencies*, Butterworths, 2nd. edition, London (1967).
5. J.R. Singer and S.D. Johnson, *Rev. Sci. Instrum.*, 30, No. 2 (1959) 92.
6. B. Donnally and T.M. Sanders JR., *Rev. Sci. Instrum.*, 31, No. 9 (1960) 977.
7. Y. Yand and Chen, *Rev. Sci. Instrum.*, 37, No. 9 (1966) 1274.
8. S. Feng, *Rev. Sci. Instrum.*, 40, No. 7 (1969) 963.
9. D.G. Hughes and M.R. Smith, *J. Phys. E., Sci. Instrum.*, 4 (1971) 13.
10. F.N.H. Robinson, *J. Sci. Instrum.*, 36 (1959) 481.
11. H.D. Hill and R.E. Richards, *J. Sci. Instrum.* (J. Phys. E), 1 series 2 (1968)971.
12. B.N. Taylor *et al.*, *Rev. of Modern Phys*, 41 (3) (1969)375.
13. D.L. Shilling and Ch. Belove, *Electronic Circuit: Discrete and Integrated*, Mc Graw Hill. E.E.E. Series (1968); M.S. Ghausi, *Electronic Circuits*, Van Nostrand Reinhold Co. (1971).
14. D. Pollack, *RCA. Review*, 2.2 (1937)184.
15. H.C. Kiehn, "Application of the RCA-CA 3028A y CA 3028B Integrated Circuit RF Amplifiers in the HF and VHF Ranges", Linear Integrated Circuits Application Note ICAN-5337, RCA solid State Division.
16. J.R. James, *Electronic Engineering*, January (1960)44
17. R. Peón, Tesis para obtener grado M. en C. Umist, Manchester University, England (1982).
18. W.R. Wampler *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, 46, No. 1 (1975)58.
19. Technical Manual E-line E.P.R. Systems manual Mod. E-15 Varian Analytical Instruments División.
20. J. Castro Tello, Tesis Profesional, Facultad de Ciencias de la U.N.A.M. (1974).
21. F.N.H. Robinson, *M. Sci. Instrum.*, 42 (1965)653.
22. Hoja de datos C.I.µA741C High performance operational Amplifier. Fairchild Semiconductors.