

34  
2E



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**ANALISIS DE LA ENERGIA CINETICA EN IONES  
POSITIVOS ACELERADOS EN UN SISTEMA VAN  
DER GRAAFF DE 700 keV**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

F I S I C O

P R E S E N T A :

JESUS MANUEL ORTEGA RUEDA DE LEON



MEXICO, D. F.



MAYO 1994

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CIUDAD UNIVERSITARIA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS  
División de Estudios  
Profesionales  
Exp. Núm. 55

M. EN C. JOAQUIN CIFUENTES BLANCO  
Jefe de la División de Estudios Profesionales  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Presente.

Me permito solicitar a Usted que los profesores que a continuación se mencionan, integren el Jurado que revise el trabajo de tesis, cuyo título es ANÁLISIS DE LA ENERGIA CINETICA EN IONES POSITIVOS ACELERADOS EN UN SISTEMA VAN DER GRAAFF DE 700 KeV

elaborado por el pasante Jesús Manuel Ortega Rueda de León  
con número de cuenta 7933001-3  
de la Carrera de Física

Señores Profesores, se les suplica atentamente consideren los siguientes puntos:

- 1.- Como norma interna de la Facultad, se autoriza que de los cinco sinodales que integrarán el examen profesional, de menos cuatro deberán ser profesores que estén impartiendo clases en la Facultad.
- 2.- El aceptar integrar el Jurado implica por parte de los señores profesores el compromiso de revisar dicho trabajo y emitir su opinión sobre la tesis, además de estar presentes los cinco, el día del examen.

Señores Profesores, en caso de estar totalmente de acuerdo con lo antes expuesto, ruego a ustedes emitir su aprobación con la firma que a continuación se solicita:

- 1.- FIS. FRANCISCO FERNANDEZ ESCOBAR  
grado Nombre(s) Apellidos completos *Fernandez Escobar* Firma
- 2.- DR. JORGE RICKARDS CAMPBELL  
grado Nombre(s) Apellidos completos *Jorge Rickards Campbell* Firma
- 3.- DR. ROBERTO ORTEGA MARTÍNEZ  
grado Nombre(s) Apellidos completos *R. Ortega M.* Firma
- 4.- Sup. DRA. ALICIA OLIVER GUERRERO  
grado Nombre(s) Apellidos completos *Alicia Oliver Guerrero* Firma
- 5.- Sup. FIS. MANUEL ADRIAN HERNANDEZ ESCOBAR  
grado Nombre(s) Apellidos completos *Manuel Hernandez Escobar* Firma

Vo.Bo.  
COORDINADOR DEL DEPTO. DE  
*Tatsuo Akachi Miyazaki*  
DR. TATSUO AKACHI MIYAZAKI

FIRMA DEL INTERESADO  
*Jesús Manuel Ortega Rueda*  
JESUS MANUEL ORTEGA RUEDA

Dedico esta Tesis a:

Mis Padres,

**Celia Rueda de León de Ortega**

Y

**Ruswaldo Ortega Velázquez**

Quienes me brindaron todo su apoyo en todo momento en el desarrollo de este trabajo.

A mis hermanos:

José Luis,

Martín Alonso,

Mirya del Carmen,

Erika Beatriz y

Martina Guadalupe.

Por todo su apoyo incondicional.

Agradezco:

A las personas que integraron mi jurado de examen por sus valiosos comentarios para la elaboración final de este trabajo.

Fís. Francisco Fernández Escobar.

Dr. Jorge Rickards Campell.

Dr. Alicia María Oliver Gutiérrez.

Dr. Roberto Ortega Martínez

Fís. Manuel Adrián Mezà.

Al Sr. Luis Rosas Pérez, por permitirme usar equipo y material del Laboratorio de Electrónica en la Fac. de Ciencias, además de brindarme su atención y apoyo durante todo el desarrollo de esta tesis.

A Edgar Méndez Moreno, por facilitarme los elementos necesarios para la construcción de los impresos y brindarme todo su apoyo.

A Karim Uriel López Guzmán, por su ayuda incondicional en el manejo, operación del equipo asociado al acelerador de 700 keV y obtención de las curvas de excitación.

Al grupo de electrónica :

Francisco Javier Pena Blanco,

César Arzate Trujillo,

Carlos Alberto Munive Vázquez,

José Manuel Alvarado Reyes,

Alberto García Ramírez,

Hilda Rodríguez Castillo,

Martha González Alvarez.

Por las sugerencias y aportaciones en cada etapa de diseño y construcción de los circuitos electrónicos.

Y especialmente a mi Padre, el haberme inculcado la metodología matemática para seguir en esta carrera y a Francisco, por inducirme la paciencia, la persistencia y humildad hacia las cosas y a mis semejantes, además de haber aceptado dirigir mi tesis.

## CONTENIDO

INTRODUCCION GENERAL	1
1. SIMULACION ANALOGICA.	2
1.1 OPERADORES ANALOGICOS.	3
1.2 UN PROCESO PARA LA SEÑAL DE SALIDA DE UN TRANSDUCTOR.	4
REFERENCIAS.	7
2. REACCIONES NUCLEARES.	8
2.1 REACCION NUCLEAR.	8
2.2 LAS LEYES DE CONSERVACION. Y EL CALOR (Q).	14
2.3 SECCION EFICAZ.	14
2.4 REACCIONES RESONANTES.	16
2.5 DETECTORES.	17
2.6 CURVA DE EXCITACION.	20
REFERENCIAS.	22
3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE MEDICION DE ENERGIAS.	23
3.1 DESCRIPCION DEL ACELERADOR DE 700 keV Y CAMARAS DE DISPERSION.	23
3.2 COMPARACION DE LOS METODOS DE MEDICION DEL CAMPO MAGNETICO.	27
3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICION DE CAMPOS DE MAGNETICOS Y ENERGIAS ASOCIADAS.	29

3.4	LECTURA DIGITAL DE VOLTAJES ANALOGOS A CAMPO MAGNETICO Y ENERGIA DEL HAZ.INTERCONEXION CON UNA MICROCOMPUTADORA.	32
3.5	CONVERSION DEL VOLTAJE ANALOGO A CAMPO MAGNETICO, A VOLTAJE DE CONTROL PARA LA FUENTE DEL ELECTROIMAN.	34
	REFERENCIAS.	39
4.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.	40
4.1	ESTABILIDAD DE CAMPO MAGNETICO.	41
4.2	CALIBRACION INICIAL DEL ACELERADOR.	44
4.3	CALIBRACION DEL SISTEMA DESARROLLADO.	51
4.4	CONCLUSIONES GENERALES.	60
	APENDICES.	
A.	PROCESO ANALOGICO DE ECUACIONES LINEALES	63
B.	MEDICION DE CAMPO MAGNETICO POR EFECTO HALL	64
C.	TRANSDUCTOR DE CAMPO MAGNETICO POR EFECTO HALL	68
D.	ANALISIS CONTRA VARIACIONES TERMICAS AMBIENTALES	76
E.	MEDICION DE CAMPO MAGNETICO POR EL METODO N.M.R.	83
	REFERENCIAS.	91

## INTRODUCCION GENERAL

El objetivo de esta tesis consiste en ofrecer una alternativa para la determinación directa e inmediata de la energía cinética de partículas positivas aceleradas en un sistema Van der Graaff de 700 keV. Tradicionalmente, el conocimiento de tal parámetro se ha hecho desviando el haz de iones hacia detectores fijos, mediante un electroimán que genera un campo magnético  $B$ , medido a través de técnicas de resonancia magnética nuclear, que si bien permiten una precisión difícilmente mejorable en la evaluación de dicho campo, -y por ende de la misma energía cinética asociada al haz-, presentan las desventajas de cubrir intervalos relativamente cortos y tener una respuesta lenta.

En este trabajo, se desarrolla un sistema de proceso para la señal de salida de una punta Hall, usada como transductor del campo magnético existente en el analizador de energías de dicho acelerador; tal que la respuesta final de dicho proceso, llevada hasta etapas de medición, registros numéricos adecuados y escalamiento para retroalimentación, permitieron, -mediante el acoplamiento de este sistema y el acelerador-, conocer por lectura directa las energías de iones positivos acelerados en el mismo.

El principio de funcionamiento se basa en la determinación precisa y repetible del campo magnético necesario para desviar el haz de partículas hacia los colectores preubicados. Se garantiza la precisión del sistema por calibraciones efectuadas tomando como referencia la resonancia a 340 keV de energía, que ocurre en la reacción nuclear  ${}^{18}\text{F}(p, \alpha \gamma){}^{16}\text{O}$ .

## 1. SIMULACION ANALOGICA

En la naturaleza, existen diversos fenómenos físicos que se estudian mediante modelos a fin de comprender, describir y predecir su comportamiento lo más cercano posible a la realidad. En tales estudios es indispensable el uso de la herramienta matemática la cual permite representar al fenómeno mediante ecuaciones ya sean de tipo algebraico, diferencial, integral o una combinación de éstas, cuya solución dentro del modelo establecido aporta los resultados de interés al investigador. Uno de los problemas que encierra el estudio de tales fenómenos, es precisamente la solución de las ecuaciones involucradas, ya que éstas no siempre tienen solución analítica "exacta"; es decir, en ocasiones es necesario recurrir a métodos aproximados como solución por series, métodos numéricos, etc.. Una alternativa para la solución de ecuaciones que representan un problema físico, es la simulación analógica, la cual consiste en utilizar dispositivos electrónicos capaces de realizar operaciones algebraicas y de cálculo con señales eléctricas, los cuales acoplados de acuerdo a la ecuación a resolver y mediante las analogías pertinentes, permiten obtener la solución en tiempo real del fenómeno bajo estudio.

Otro aspecto importante en el estudio de problemas físicos, ocurre cuando se procesa la señal de salida de un transductor<sup>1</sup> que forma parte indispensable de determinado experimento. El éxito en la investigación, depende fuertemente del proceso correcto y adecuado de dicha señal.

Para efectos de lo anterior, es necesario utilizar algunas

técnicas de la simulación analógica, las cuales se describen a continuación; en base a la teoría de los amplificadores operacionales.<sup>2,3,4</sup>

### 1.1.- OPERADORES ANALÓGICOS<sup>5</sup>.

Existen operadores electrónicos capaces de realizar las operaciones de suma, resta, multiplicación, integración, diferenciación, logaritmo, etc. con señales de voltaje o corriente. En la Tabla 1.1, se muestran varios operadores de ese tipo y las expresiones asociadas a las mismas.

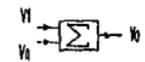
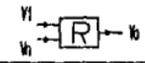
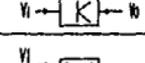
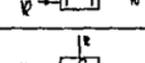
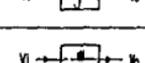
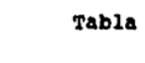
operador	Simbolo	Señal de Entrada	Señal de Salida
Sumador		$V_1$ $V_2$	$V_0(t) = (V_1(t) + \dots + V_n(t))$
Restador		$V_1$ $V_2$	$V_0(t) = V_1(t) - V_2(t)$
Multiplicador por una cte.		$V_1$	$V_0(t) = K V_1(t)$
Multiplicador		$V_1$ $V_2$	$V_0(t) = V_1(t) \cdot V_2(t)$
Integrador		$V_1$	$V_0(t) = \int V_1(t) dt$ <small>con constante de integración</small>
Diferenciador		$V_1$	$V_0(t) = RC(dV_1(t)/dt)$
Logaritmo		$V_1$	$V_0(t) = LN[V_1(t)]$
Exponencial		$V_1$	$V_0(t) = EXP[V_1(t)]$

Tabla 1.1

Operadores electrónicos en la simulación analógica

Como se mencionó al principio, el uso de operadores análogos permite el proceso adecuado de la señal proveniente de un transductor eléctrico, a fin de utilizar la respuesta final para efectos de retroalimentación y control, o simplemente medición y registro apropiado.

Antes de entrar en el problema específico que motivó este trabajo, se presenta a continuación a manera de ejemplo, el proceso electrónico para una señal proveniente de un termopar, hasta las etapas de medición análoga a temperatura y retroalimentación para formar el "controlador de temperatura" clásico.

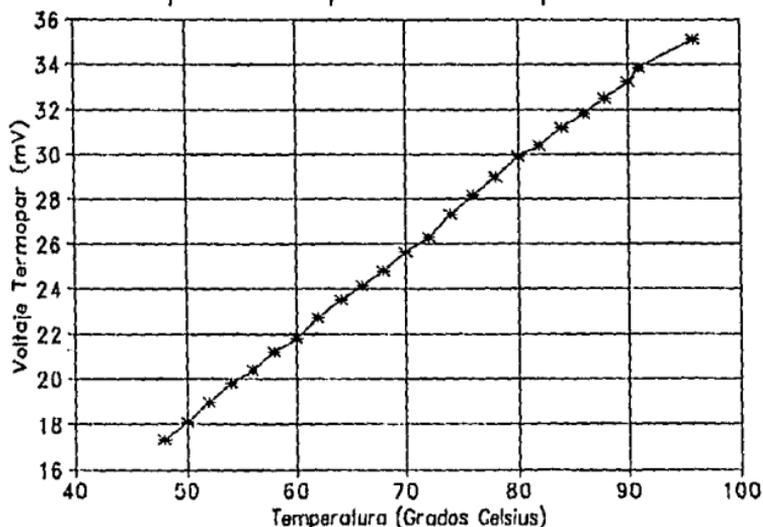
#### 1.2.- UN PROCESO PARA LA SEÑAL DE SALIDA DE UN TERMOPAR

Se tiene un termopar cuya única información existente es el intervalo de temperaturas de trabajo: [ $T_1 = -100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ]. El primer paso consiste en averiguar la respuesta de dicho elemento. Para ello es necesario montar en el laboratorio el sistema que permita lograr la respuesta voltaje del termopar contra Temperatura (Tabla 1.2 y Gráfica 1.1).

T oC	VT	T oC	VT
48	17.3	72	26.3
50	18.1	74	27.3
52	19.0	76	28.2
54	19.8	78	29.0
56	20.4	80	29.9
58	21.2	82	30.4
60	21.8	84	31.2
62	22.7	86	31.8
64	23.5	88	32.2
66	24.1	90	33.2
68	24.8	91	33.8
70	25.6	96	35.1

Tabla 1.2

## Voltaje Termopar vs Temperatura



Gráfica 1.1

Dado el comportamiento obtenido, a los datos de la Tabla 1.2, se les aplica una regresión lineal, resultando la expresión:

$$V_T = M T + b \quad (1.1)$$

donde  $M = 0.378666$  y  $b = -0.77607$ .

Es deseable llegar a un comportamiento tal que se obtenga una respuesta de la forma:

$$V_{T_{final}} = K T \quad (1.2)$$

con  $K$  una constante igual a una potencia negativa de 10 ( $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ , etc...) a fin de poder interpretar directamente una lectura de voltaje como la existente de temperatura.

Para ello es necesario partir de la ecuación (1.1) y hacer una transformación de la forma  $A(V_T) = \alpha V_T + \beta$ , que conduzca a la expresión (1.2) (ver Apéndice A).

Tal transformación, donde se obtiene para este caso  $\alpha=264.08$ ,  $\beta=-0.205$  con  $K=10^{-1}$  requiere de los operadores de suma ( $\beta$ ) y producto por una constante ( $\alpha$ ).

El diagrama correspondiente a lo anterior, se muestra en la figura siguiente.

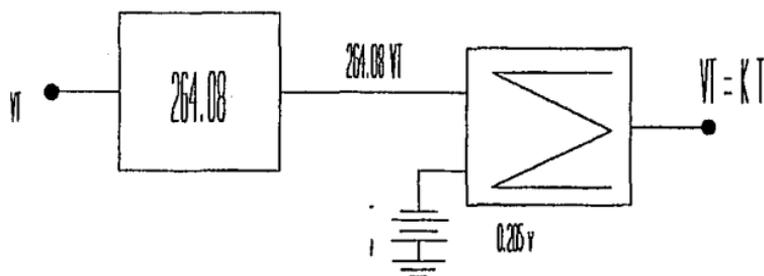


Figura 1.2

Cabe mencionar que los transductores no siempre tienen respuestas de tipo lineal, por lo que a veces es necesario trabajar ya sea con otro tipo de operadores o bien aproximar comportamientos no lineales usando segmentación lineal, u otras técnicas de linealización<sup>6,7,8</sup>. Afortunadamente en nuestro caso el comportamiento del transductor usado fue de tipo lineal.

Antes de exponer el desarrollo de la instrumentación asociada a este trabajo, es conveniente mencionar los aspectos generales de algunas reacciones nucleares y las técnicas de detección y análisis de sus productos; ya que la calibración final del sistema implementado se basa en una reacción nuclear conocida. De éste, se ocupa el Capítulo siguiente.

## REFERENCIAS.-

1. A. Porta, A. Amano., Masso.; "Boletín Informa # 6 Señales y Transductores."; Ed. Fac. de Ciencias. 1981.
2. Jerarl G. Graeme, Gene E Tobey; "Operational Amplifiers Desing and Application"; Ed. Burr-Brown. 1980.
3. Ortega, M.R.; "Amplificadores Operacionales en Fotometría Fotoeléctrica"; Tesis de Licenciatura en Física. UNAM, Fac. de Ciencias, abril de 1971.
4. Jacob Millam, C. Chistos Halkias; "Integrad Fundamentals ans Applications for Enginners and Scientist"; Ed. McGraw-Hill, Sec. 13. 1976.
5. Stephen D. Centuria, Bruce D. Wedlock, "Electronic Circuit and Applications"; Ed. John Wiley & Son, Inc. Sec. 18. 1975.
6. Sheingol, Daniel H.; "Transducer Interfacing Hanbook.", Analog Device (1981). PAG 105.
7. Schilling & Belove., "Electronic Circuits: Discrete and Integrated ", Intrenational Student Edition; Ed. Mcgraw-Hill 1968.
8. Cesar Arzate T., Francisco Fernández E. "Control y Automatización de líneas para Comparación de Gases de Analisis isotopicos", Cap. # 3. 1992.

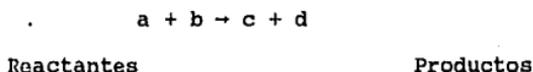
## 2.- Reacciones Nucleares

Existen reacciones nucleares a bajas energías de proyectil que han sido estudiadas y cuyas secciones eficaces se han medido con precisión alta. Actualmente estas reacciones son de utilidad para determinar concentraciones de elementos ligeros, sin importar qué elementos constituyen la matriz del material, o bien en la determinación de trazas de isótopos. En particular, la existencia de resonancias en la sección eficaz de las reacciones nucleares, permite una buena resolución en la determinación de perfiles de concentración o espesores de películas.

Otra aplicación de estas reacciones, es que al conocerse con precisión la energía del proyectil a la cual se producen, sirven para calibrar la energía del haz de iones de un acelerador. Este es el principio físico que se utilizó en este trabajo para la calibración en energía del haz de iones del acelerador Van de Graaff de 700 keV del Instituto de Física de la U.N.A.M. A continuación se describen de manera breve los fundamentos de la interacción nuclear<sup>1</sup>.

### 2.1.- Reacción Nuclear.

En la mayoría de las reacciones nucleares se tienen dos partículas o núcleos que interactúan para formar dos núcleos diferentes:



Cualquier reacción debe cumplir el requisito de que la suma de los números atómicos y los números de masa de los reactantes

y productos deben ser balanceados; es decir,

$$\begin{aligned} Z_a + Z_b &= Z_c + Z_d \\ A_a + A_b &= A_c + A_d \end{aligned} \quad (2.1)$$

Sin embargo, la masa total cambia.

A pesar de que no hay limitaciones teóricas para determinar cuáles son los nucleidos (protones+neutrones) que deben interactuar, generalmente cada lado de la ecuaciones (2.1) tiene un nucleido ligero (a,b) a los cuales se les designa como partículas; a saber:



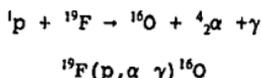
teniendo como notación abreviada:



las partículas ligeras, tanto reactante como producto, se colocan en el paréntesis y se separan por una coma.

Un núcleo reactante o producto puede escribirse de la forma  ${}^A_ZX$ ; donde el superíndice A es la suma de los nucleidos, también conocida como número de masa. El subíndice Z es el número de protones; por ejemplo, si el núcleo tiene 3 protones y 4 neutrones, el núcleo reactante o producto se escribiría de la forma  ${}^7_3X$ .

Considérese el ejemplo siguiente:



Una partícula cargada no puede penetrar al núcleo, a menos que tenga una energía comparable a la barrera de Coulomb de los núcleos usados como blanco (Figura 2.1), lo que impone un límite inferior a la energía del proyectil; si el nucleido tiene

suficiente energía para remontar la barrera coulombiana, éste puede ser capturado por el núcleo blanco, para formar un núcleo compuesto. El núcleo compuesto queda en un estado altamente excitado y la energía cinética de la partícula incidente también se suma a la energía de excitación. En el modelo de núcleo compuesto se supone que la energía de excitación está distribuida al azar entre los nucleones (protones y neutrones) del núcleo resultante, de tal manera que ninguno de ellos tiene suficiente energía para escapar inmediatamente, por lo que al núcleo compuesto se le asigna una vida media ( $10^{-14}$  a  $10^{-18}$  seg) que es larga comparada con el tiempo que toma a un nucleón atravesar el núcleo ( $10^{-21}$  a  $10^{-22}$  seg). El núcleo compuesto altamente excitado puede desexcitarse emitiendo rayos  $\gamma$ , protones, neutrones, partículas  $\alpha$ , etc. Si el núcleo compuesto que se forma es  ${}^A_Z X$  y se supone que la interacción produce un núcleo compuesto en el estado excitado  $E^*$ , éste puede decaer, ya sea por emisión radiactiva ( $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ ) y llegar al estado base de  ${}^A_Z X$ , o (por ejemplo) la emisión de protones  $p_0, p_1$  y  $p_2$  a tres distintas energías, como se muestra en la Figura 2.2; o bien emitiendo otro tipo de partículas como las  $\alpha$ . Además, la emisión de protones da como resultado estados excitados del núcleo residual  ${}^{A-1}_{Z-1} Y$ , el desexcitarse emitiendo rayos  $\gamma$  ( $\gamma_5, \gamma_6$  y  $\gamma_7$ ), hasta llegar al estado base de  ${}^{A-1}_{Z-1} Y$ . Este núcleo es a su vez inestable y decae emitiendo partícula  $\beta$  a un estado excitado o al estado base  ${}^{A-1}_Z X$ . Las transiciones  $\gamma_1$  a  $\gamma_7$  y la emisión de protones, ocurren muy rápidamente después de la formación del núcleo compuesto ( $\sim 10^{-12}$  seg), pero la vida media para el decaimiento  $\beta$  y de aquí la emisión de  $\gamma_8$  puede tomar mucho más tiempo.

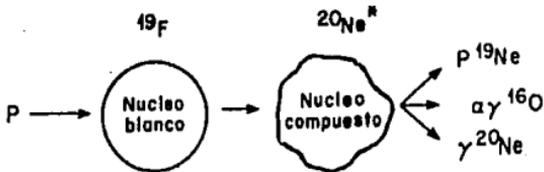


Figura 2.1

Representación Esquemática de la Formación y Decaimiento de un Núcleo  $^{19}\text{Ne}$  Compuesto Durante la Reacción Nuclear Entre Protones y  $^{19}\text{F}$ .

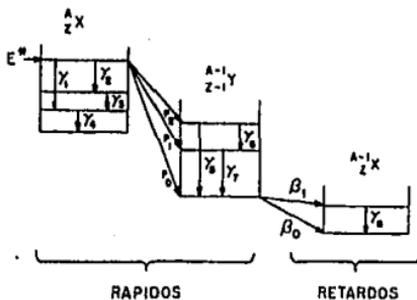


Figura 2.2

Niveles de Energía de un Núcleo Compuesto  $^A_Z X$  en un Estado  $E^*$ , el Cual Decae Inmediatamente por Emisión  $\gamma$  a su Estado Base o Por Emisión de Protones a Uno de los Estados del Núcleo Residual  $^{A-1}_{Z-1} Y$ . Este Núcleo es Inestable y Decae Posteriormente Por Emisión  $\beta$  a Un Núcleo  $^{A-1}_Z X$ .

Con base en lo anterior, se describe a continuación la reacción  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ .

Se hace incidir un haz de protones en un blanco con Flúor ( $^{19}\text{F}$ ). Si los proyectiles tienen la suficiente energía para romper la barrera coulombiana, serán capturados por algún núcleo de  $^{19}\text{F}$ , formándose uno nuevo: Neón ( $^{20}\text{Ne}$ ), que es el núcleo compuesto. En la Figura 2.3 se muestran las energías de los proyectiles y estado de excitación del núcleo  $^{20}\text{Ne}$  (1). Tales energías dejan al núcleo  $^{20}\text{Ne}$  en estado excitado, para que este decaiga a su estado base (2), emitiendo  $\gamma$ 's. Si emite partículas  $\alpha$ 's, produce otro núcleo Oxígeno ( $^{16}\text{O}$ ) (3) en estado base o excitado, si el núcleo queda en estado excitado debe decaer al estado base emitiendo  $\gamma$ 's produciéndose la reacción nuclear de interés.

Las emisiones gammás que se producen al final son las que se observan en un detector de centelleo.

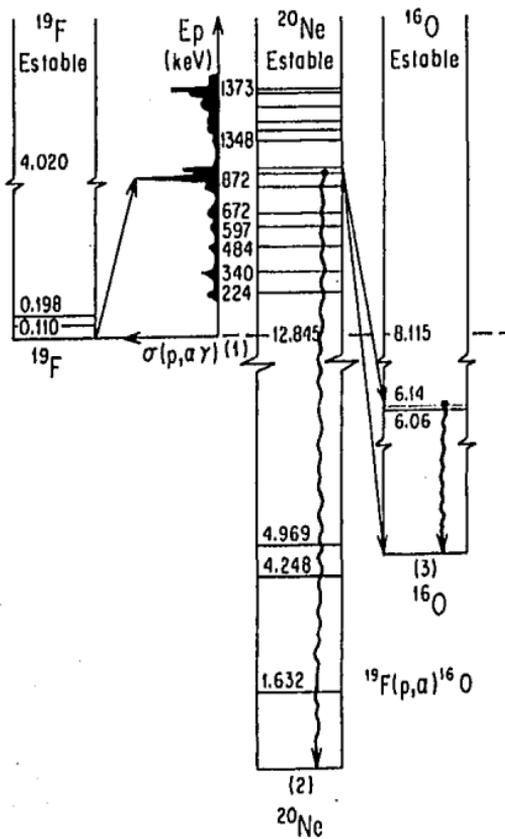


Figura 2.3  
 Reacción Nuclear del  $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$

## 2.2.- Las leyes de conservación y el valor (Q).

Una reacción nuclear obedece las leyes de conservación siguientes:

- 1.- Conservación de los nucleones (A)
- 2.- Conservación de la carga (Z)
- 3.- Conservación de la masa-energía (E)
- 4.- Conservación del momento (P)

Si la masa exacta en reposo de los reactantes y de los productos en una reacción nuclear, se suman; generalmente se obtendrá una diferencia entre los dos debido al cambio de masa en energía. La diferencia en masa corresponderá a la emisión o absorción de energía:

$$a + X \rightarrow b + Y + Q$$
$$Q = (M_X + M_a) c^2 - (M_Y + M_b) c^2, \quad (2.3)$$

donde Q es la energía cedida o absorbida, según sea positiva o negativa y se dice que la reacción es exoenergética o endoenergética.

## 2.3.- Sección Eficaz.

La probabilidad de reacción entre una partícula incidente y un núcleo blanco se puede entender como el área transversal que presenta el núcleo blanco a un proyectil puntual. El radio R de un núcleo puede estimarse por la relación empírica:

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

Donde  $A$  es el número de masa y  $R_0$  es una constante igual a  $1.4 \times 10^{-13}$  cm. Por tanto, en forma muy aproximada, la sección será  $\sigma = \pi R^2$ . Un cálculo rápido muestra que la mayoría de las secciones son del orden de  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>, por lo que se creó la unidad barn:

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Las secciones eficaces en general no se pueden expresar en relaciones analíticas simples. Como ejemplo se muestra la gráfica de la sección eficaz de la reacción  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$  en la Figura 2.4, como función de la energía del proyectil<sup>2</sup>.

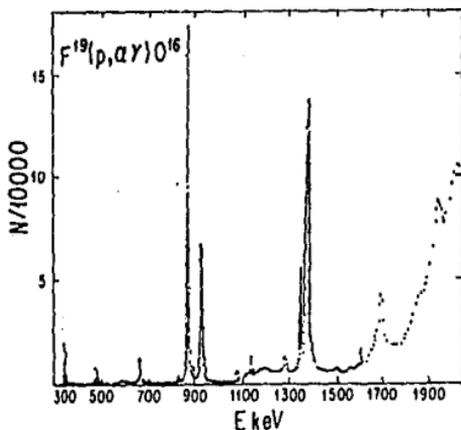


Figura 2.4

Producción de Fotones  $\gamma$  Contra Energía Incidente de Protón, Detectados a un Angulo de  $\theta=90^\circ$ , Para la Reacción  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ .

#### 2.4.- Reacciones Resonantes.

La Figura 2.3 muestra picos muy definidos para ciertas energías del proyectil. Para expresar analíticamente estas secciones eficaces se utiliza el tratamiento de Breit-Wigner.

La probabilidad de la reacción  $X(a,b)Y$  se puede denotar por la sección  $\sigma(a,b)$ . De acuerdo con el modelo de núcleo compuesto, en la cual la reacción se lleva a cabo en dos etapas, se puede escribir:

$\sigma(a,b) = \sigma_c(a) \times (\text{probabilidad relativa de la emisión de } b)$ , donde  $\sigma_c(a)$  es la sección eficaz para la formación del núcleo compuesto. La probabilidad relativa para la emisión de  $b$  es  $\Gamma_b/\Gamma$ , donde  $\Gamma_b$  es la razón de transición para la emisión de  $b$ , -también llamada el ancho del nivel parcial para  $b$ -, y  $\Gamma$  es el ancho del nivel total  $\Gamma = (\hbar/\tau)$ , donde  $\tau$  es la vida media del estado y  $\hbar$  es la constante de Planck. Así que:

$$\sigma(a,b) = \sigma_c(a) \frac{\Gamma_b}{\Gamma}. \quad (2.5)$$

En general, el valor de las secciones eficaces y el ancho de niveles dependen tanto de la energía de la partícula incidente, como de la carga y de la masa del núcleo blanco. En su forma más simple, la fórmula de Breit-Wigner para el valor de la sección eficaz en la vecindad de un nivel resonante en el núcleo compuesto formado por una partícula incidente con un momento angular cero, tiene la forma siguiente:

$$\sigma(a,b) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E-E_0)^2 + (\Gamma/2)^2},$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de De Broglie de la partícula incidente ( $\lambda=h/mv$ ),  $E_0$  la energía del pico de la resonancia,  $E$  la energía de incidencia de la partícula y  $\Gamma$ , es el ancho del nivel parcial para la emisión de  $a$  en la reacción inversa.

## 2.5.- Detectores.

En la actualidad se conoce una variedad de detectores de radiación, tanto sólidos, como líquidos y gaseosos. Es de interés mostrar aquí los detectores sólidos por centelleo; y más específicamente un material (cristal) de yoduro de sodio con impurezas de talio  $\text{NaI(Tl)}^3$ , que es usado extensivamente para la detección de rayos gamma, teniendo una eficiencia relativamente alta.

En el detector de centelleo (Marca Bicrom, Modelo PA-14 de 3"), las moléculas son excitadas en forma directa o indirecta por el paso de la radiación emitiendo destellos (fotones), regresando las moléculas a su estado base.

La radiación produce fotones los cuales son transportados a través del material hacia el fotocátodo, donde se producen fotoelectrones. Estos son enfocados y acelerados al primer dínodo iniciándose un proceso en cascada de electrones e incrementándose en intensidad el flujo de electrones a los dínodos siguientes, hasta que el pulso inicial del electrón es colectado en el ánodo. Típicamente la amplificación total del tubo fotomultiplicador es del orden de  $10^6$ .

A continuación se describen de manera breve algunos procesos que se pueden manifestar, para que un fotón deposite toda o parte de su energía en el cristal.

Cuando incide un fotón con energía  $E_\gamma$  en el cristal, inicialmente se tiene la posibilidad de que existan algunos procesos: dispersión Compton, efecto fotoeléctrico, producción de pares o en muy pocos casos absorción por un núcleo (Figura 2.5).

Si el fotón incidente en el cristal excede de 1.022 MeV, se puede crear un par electrón-positrón. El electrón puede ser absorbido vía ionización, por excitación de las moléculas o bien por efecto Bremsstrahlung; El positrón está sujeto a este proceso hasta que su energía se hace cero; o puede aniquilarse con un electrón produciendo dos fotones de 0.511 MeV. Al producirse estos dos fotones puede suceder que: Los dos se vuelvan absorber en el cristal, lo que dará una energía total  $E_\gamma$ ; absorbiéndose uno mientras que el otro fotón escapa, obteniéndose  $E_\gamma - 0.511$  MeV (primer pico de escape); o bien, que ambos fotones escapen obteniéndose  $E_\gamma - 1.022$  MeV (segundo pico de escape), proporcionando un pulso a la salida del detector.

En la Figura 2.6, se muestra el espectro de un rayo gamma con energía 6.14 MeV, detectado con un cristal de NaI(Tl). Claramente se observan el primero y segundo pico de escape de los fotones.

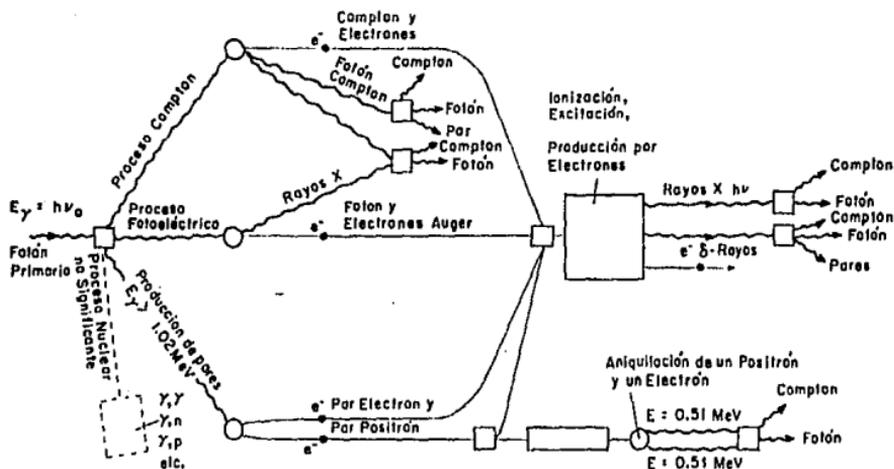


Figura 2.5

Interacciones de Protones con Materia.

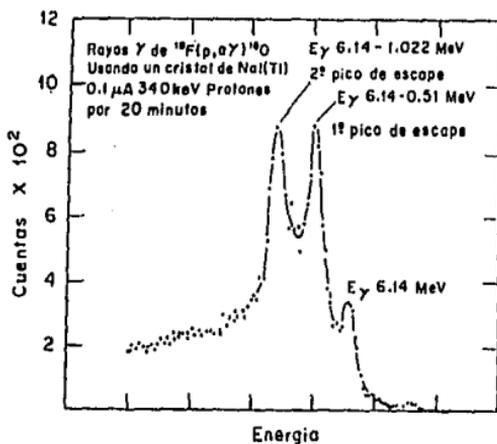


Figura 2.6

Rayos Gamma de la Reacción  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$

## 2.6.- Curva de Excitación.

A continuación se describe cómo se obtiene una curva de excitación detectando el producto de una reacción nuclear resonante<sup>4</sup>.

Considérense blancos planos y pulidos, de composición uniforme, que tienen al elemento que presenta una reacción nuclear resonante con una concentración que depende de la profundidad, dada por la función  $C(x)$ . Los blancos se bombardean con el haz perpendicular a la muestra. Las partículas o los rayos  $\gamma$  producidos por la reacción nuclear se detectan a cierto ángulo  $\theta$ , con un ángulo sólido  $\Omega$ . El espectro de energía se integra en los límites escogidos, de tal manera que se desprece el ruido electrónico en la integración y se obtengan los conteos más altos del evento de interés. La sección eficaz correspondiente al proyectil de energía  $E$  es  $\sigma_e(E)$ , lo cual dará un número de eventos  $N(E)$  para un total de  $n$  partículas incidentes y una eficiencia de detección  $\epsilon$ . El uso de resonancias en la determinación de perfiles de concentración tiene la gran ventaja de tener una ventana de energía muy definida, determinada por el ancho de la resonancia. Considérese el caso ideal de la Figura 2.7, en el cual existe sólo una resonancia en la curva de la sección eficaz y los valores de ésta fuera de la resonancia son despreciables. El método consiste en medir el número de eventos producidos por el ión incidente en el elemento de interés como función de la energía  $E_0$ , que debe ser mayor a la energía  $E_R$  de la resonancia. A medida que el ión va penetrando y pierde energía dentro de la muestra, -a una profundidad  $x$ , cuando el proyectil

tiene energía  $E_R$ , se producirá la reacción. De esta manera, variando la energía del proyectil y detectando los eventos producidos para cada energía distinta, se obtiene lo que se llama curva de excitación. La profundidad  $x$  y la energía incidente del haz  $E_0$  están relacionadas por:

$$E_0 = E + \frac{dE}{dx} x_R \quad (2.6)$$

La ecuación anterior permite relacionar el número de eventos detectados con la profundidad  $y$ ; por tanto, obtener el perfil de concentración.

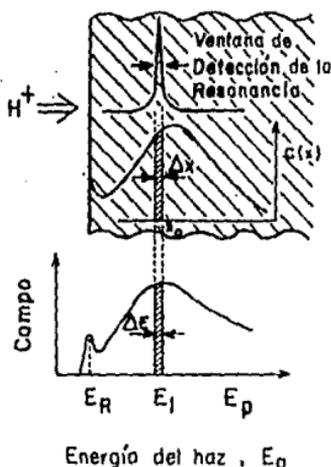


Figura 2.7

**Esquema de la Medida del Perfil de Concentración de un Elemento en Material Utilizando una Resonancia Nuclear.**

## Referencias.-

1. Leonard C. Feldman, James W. Mayer;"Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis", Ed. North-Holland. Cap. 12.
2. L.C. Feldman, S.T. Picraux;"Select Low Energy Nuclear Reaction Data, en Ion Beam Handbook for Material Analysis, J.W. Mayer y E. Rimini"; Ed. Academic Press, N.Y. 1977
3. W.D. Bygrave, P.A. Treado, J.M.;"Accelerator Nuclear Phisics"; High Voltage Eng. Corp., Mass. U.S.A., Sec 6.
4. Notas:"I Curso Regional sobre Aplicaciones de los Aceleradores de Partículas", IFUNAM, 10 de Septiembre de 1993,Sec. 12.

### 3.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE MEDICION DE ENERGIAS

Con base en lo descrito en los Capítulos anteriores, se presenta en este Capítulo el problema que motivó este trabajo y el diseño y desarrollo del sistema implementado, en contraste con las técnicas de medición usadas hasta la fecha.

#### 3.1.- Descripción del Acelerador de 700 keV y Cámaras de Dispersión

En la Figura 3.1, se ilustran las partes principales del acelerador de 700 keV.

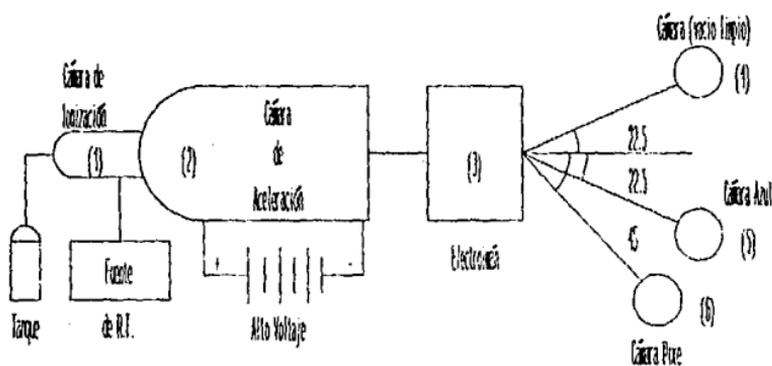


Figura 3.1

Diagrama Esquemático del Acelerador de 700 keV y Cámaras de Dispersión

En la cámara de ionización (1), que consiste en una ampolla de vidrio donde se introduce gas desde un tanque, se producen las partículas positivas a acelerar. Esto se consigue ionizando el gas por medio de una fuente de radiofrecuencia, es decir, los electrodos de R.F., dentro de dicha cámara, agitan a los átomos del gas transfiriendo a sus electrones la energía necesaria para separarse de ellos. El plasma que queda en la ampolla (iones positivos), se extrae mediante campos eléctricos y magnéticos y se conduce a la cámara de aceleración (2), donde las partículas positivas adquieren energía cinética debido a una fuente de alto voltaje y gran estabilidad, que distribuye el potencial eléctrico de aceleración, a lo largo de esta cámara, mediante electrodos sucesivos separados por aislantes a fin de definir los planos equipotenciales.

El haz de partículas positivas aceleradas, atraviesa el electroimán analizador de energías (3), donde por fuerzas de Lorentz, éstos son desviados hacia la cámara de análisis de interés (4,5 o 6).

El electroimán analizador de energías tiene asociada una fuente de alta corriente y bajo voltaje, la cual es a su vez gobernada por una unidad de control que maneja voltajes y corrientes bajas, obteniéndose así el control del electroimán. Dicha unidad de control es manualmente variable por el operador mediante perillas (diales).

El electroimán, fuente de corriente y unidad de control forman un conjunto a lazo cerrado por retroalimentación y proceso

analógico, a fin de estabilizar el campo magnético predeterminado; tal tecnología data de los años 50's, la que a la fecha permite la operación suficiente de dicho analizador.

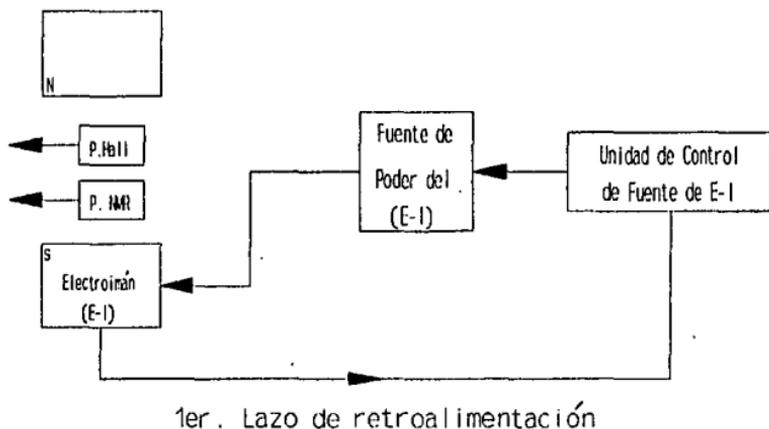


Figura 3.2

**Analizador de Energías del Acelerador de 700 keV.**

La importancia del electroimán a los propósitos de este trabajo, radica en que es la etapa del conjunto mencionado, que permite la medición de la energía cinética  $T$  [MeV] de las partículas que conforman el haz, mediante la conocida expresión de la rigidez magnética  $BR^1$ ; es decir,

$$T = \frac{Z^2 B^2 R^2}{m (144)^2} \quad (3.1)$$

donde  $Z$  es el número de ionizaciones del átomo constituyente del haz,  $m$  la masa en unidades atómicas,  $R$  el radio de curvatura de la trayectoria circular en cm provocada por el analizador y  $B$ , en KGauss, el campo magnético aplicado.

Obviamente la precisión en la determinación de  $T$  depende, entre otros de la incertidumbre en cada uno de los parámetros anteriores, siendo el campo magnético uno de los que puede propagar mayor error, además de ser susceptible a variaciones indeseables.

Por tales motivos, en el Apéndice B se discute la técnica de medición de campo magnético por efecto Hall; presentando posteriormente las evaluaciones y análisis del transductor de patente a partir del cual se diseñó y construyó el medidor de campo magnético de lectura directa (Apéndices C y D). En el Apéndice E se discute brevemente el método N.M.R. en la medición de dicho campo, haciéndose las comparaciones entre ambos métodos en la Sección siguiente. Se finaliza el Capítulo integrando el medidor desarrollado al conjunto acelerador para formar el sistema de medición de energías, objetivo de esta tesis.

### 3.2.- Comparación de los Métodos de Medición del Campo Magnético.

De comparar las dos técnicas descritas en los Apéndices B y E, se resumen a continuación las características más relevantes de cada una de ellas, especificando los criterios que determinaron el desarrollo de la instrumentación necesaria a este trabajo.

Indudablemente la medición de campo magnético por el método N.M.R. ofrece una precisión difícilmente mejorable, pero obviamente requiere de una instrumentación electrónica más elaborada que la que se utiliza en el efecto Hall, además de presentar una rapidez de respuesta relativamente lenta, dada la necesidad de entonar (para cada medida de campo magnético), la frecuencia de absorción de energía nuclear en la sustancia sensora.

En las mediciones por efecto Hall, la precisión alcanzable depende fuertemente tanto de la calidad del transductor como de la electrónica de procesamiento de la señal transducida, ya que ésta presenta órdenes de magnitud comparables con el ruido electrónico; además, las pastillas Hall presentan por naturaleza, una sensibilidad en voltaje ante cambios térmicos ambientales. No obstante de lo anterior, la instrumentación electrónica para el método Hall es menos elaborada que la técnica N.M.R., en parte debido tanto a la linealidad alta de respuesta y la rapidez que presentan los transductores Hall, como al hecho de operarlos con voltajes y corrientes prácticamente directas.

Por otra parte, las necesidades ideales para el acelerador de 700 keV, serían las de contar con un medidor de campos magnéticos

y energías asociadas, con precisión mejor o igual que las involucradas en las reacciones nucleares que se analizan, con 100% de estabilidad (contra temperatura, tiempo, etc.), con rapidez de respuesta inmediata, etc., etc.; lo cual en la realidad no es posible.

Aún cuando hasta la fecha se utiliza la técnica N.M.R. en la operación del mismo, siempre es necesario obtener periódicamente curvas de calibración de todo el sistema, -llamadas curvas de excitación-, en base a reacciones nucleares conocidas, como lo es el caso del  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ , según lo desarrollado en el Capítulo 2.

De acuerdo a lo anterior, se decidió el desarrollo de un sistema de medición de campos magnéticos del analizador y energías asociadas, con óptima rapidez de respuesta, estabilidad aceptable (coeficientes menores o iguales a 1%), sin importar demasiado la precisión (errores máximos del 2%) en las lecturas de campos magnéticos y energías, debido a las calibraciones periódicas que se mencionan en el Apéndice E, que de hecho se hacen en el Capítulo 4 de este trabajo.

Con tales características se optó por usar el efecto Hall en el desarrollo de dicho sistema, con el enfoque de hacer NO un sustituto del método N.M.R., sino más bien una alternativa adicional que permitiera aprovechar las ventajas de cada uno de ellos en la operación de todo el conjunto acelerador de 700 keV del IFUNAM.

En las secciones siguientes se presenta el desarrollo de dicho instrumento.



En el diagrama anterior, cuando el selector S, está en la posición de lazo abierto (L.A.), se permite operar al conjunto en la forma tradicional; esto es, se pueden obtener lecturas directas de voltajes análogos a campo magnético y energía de haz, pero la estabilidad del campo producido por el analizador, que depende de la estabilidad de la fuente de poder, gobernada a su vez por la unidad de control, sólo es garantizada por el primer lazo de retroalimentación incluido en el diseño del acelerador desde su origen.

Cuando el selector S se cambia a la posición de lazo cerrado (L.C.), además de lo anterior, se convierten los voltajes mencionados a parámetros de control en la unidad que gobierna la fuente del electroimán, cerrando el segundo lazo de retroalimentación adicional, lo cual reditúa una mejora notable en la estabilidad del sistema, según las evaluaciones que se presentan en el Capítulo 4. Cabe mencionar que cuando el conjunto se opera en esta modalidad, los diales de la unidad de control deben permanecer fijos y asegurados en posiciones ya calibradas, dado que se transfiere el control ya sea a la microcomputadora o a una fuente externa de alta regulación, fabricada con tecnología actual.

En resumen, la instrumentación desarrollada, consistió en cubrir cada uno de los objetivos que a continuación se listan.

- a).- Selección, análisis y polarización de un transductor Hall, para la medición de campos magnéticos (Apéndice C).

- b).- Diseño y construcción de los circuitos para el proceso analógico del voltaje Hall y su escalamiento en las unidades adecuadas (Apéndice C).
  
- c).- Análisis de las etapas anteriores y evaluación de su dependencia ante cambios térmicos ambientales. Diseño y construcción de los circuitos de compensación térmica (Apéndice D).
  
- d).- Lectura de voltajes análogos a campo magnético y energía del haz. Interconexión con una microcomputadora.
  
- e).- Diseño y construcción de los circuitos convertidores de los voltajes anteriores, a parámetros de control, para la cerradura opcional del segundo lazo de retroalimentación en la operación del conjunto.

En las Secciones siguientes, se describen los procesos correspondientes a los incisos d) y e) anteriores.

### 3.4.- Lectura Digital de Voltajes Análogos a Campo Magnético y Energía del Haz. Interconexión con una Microcomputadora.

En el Apéndice C, se desarrollaron las etapas que procesan la señal del transductor Hall, regulando la respuesta de éste contra variaciones térmicas ambientales, (Apéndice D) para entregar finalmente como dato medible, el voltaje analógico correspondiente al campo magnético en el analizador.

Tal voltaje se presenta en la salida del amplificador operacional 4, mostrado en la Figura C.1, bajo una impedancia típica de  $100\Omega$ ; por lo que el despliegue de la lectura de dicho campo magnético, se puede hacer mediante cualquier voltímetro, de preferencia digital con por lo menos  $4\frac{1}{2}$  dígitos, debido a la constante K de escalamiento usada y el intervalo de valores contemplado para el campo magnético (0-10000) Gauss.

Para lo referente al despliegue de la energía asociada al haz de partículas, hay que recordar la expresión 3.1:

$$T = \frac{Z^2 B^2 R^2}{m (144)^2} \quad (3.1)$$

donde es claro que la energía cinética depende de dos tipos de constantes, a saber  $(R/144)^2$  y  $Z^2$ , m; además del cuadrado del campo magnético.

La distinción entre las constantes obedece al hecho de que mientras las primeras son invariantes para cualquier tipo de partículas bajo aceleración, las segundas sólo son constantes para

el tipo de iones con que se trabaje en un momento dado.

Con base en lo anterior, se plantearon dos opciones para obtener la lectura de la energía del haz de partículas. Una de ellas fué utilizar las técnicas analógicas convencionales de amplificadores operacionales a fin de lograr un voltaje análogo a T en forma similar a lo desarrollado para B. La segunda opción fué la de proyectar el uso de convertidores analógicos-digitales y la interconexión adecuada, -mediante una tarjeta de patente-, al puerto RS232C con que cuenta cualquier microcomputadora actual o reciente, de tipo PC compatible con IBM.

Dada la necesidad de almacenar información en cada análisis que se hace con el conjunto acelerador de 700 keV del IFUNAM (desventaja que presentan los métodos analógicos), además de los costos relativamente bajos que presentan dichos elementos digitales, a la velocidad requerida de manejo de datos, se decidió por la segunda opción, sin mayor complicación que seleccionar cualquier microsistema digital de tipo XT o posterior, con tarjeta A/D, D/A de adquisición de datos de por lo menos de 12 bits, lo que permite resolver un mínimo de 2 gauss en campo magnético, ya que el intervalo de voltajes para éste último fué normalizado al intervalo 0 a 10 volts. Según lo descrito en los Apéndices C y D.

### 3.5.- Conversión del voltaje análogo a campo magnético, a voltaje de control para la fuente del electroimán.

De acuerdo a lo mencionado en la Sección 3.3, la instrumentación desarrollada permitió lograr una señal de control para cerrar un segundo lazo de retroalimentación en el gobierno de la fuente que maneja al electroimán; la cual no obstante de poseer su propia regulación, mediante una retroalimentación local (primer lazo, Figura 3.3), no forma un conjunto a lazo cerrado en la operación de todo el sistema acelerador; lo que lo hace susceptible de agentes de variación indeseables, según evaluaciones que se presentan en el Capítulo 4.

Recordando que en la operación del acelerador, se tiene la presencia del haz de partículas desviado bajo determinado campo magnético  $B$ ; la generación de éste último depende de la corriente aplicada al electroimán por su fuente de poder, la cual es a su vez gobernada por un voltaje manualmente variable (Voltaje de Control) en la unidad de control respectiva, que posee un voltaje de referencia interno. Así, por dar un ejemplo, un haz de protones de 500 keV, desviados a  $22.5^\circ$ , requieren de 806.3 Gauss de campo magnético (frecuencia de NMR = 3337.1 KHz), el cual es generado mediante 0.1812 Volts producidos en la unidad de control. Nótese que como voltaje análogo a campo magnético se tendrán 8.063 Volts.

Existe una mejora notable en la estabilidad del campo magnético producido (Sección 4.1) cuando el voltaje de control  $V_c$  se obtiene a partir del voltaje análogo al campo magnético y de una

fuentes de referencia externa de alta regulación, fabricada con tecnología actual.

En la implementación de lo anterior, fué necesario averiguar la relación existente entre dicho voltaje de control y el campo magnético generado; para ello, se reemplazó el voltaje de referencia interno a la unidad de control por el de una fuente de voltaje programable Keithley modelo 230, con la que se analizaron 20 valores en el intervalo de 0 a 9.500 Volts, los que produjeron valores correspondientes para el campo magnético, -medidos por la técnica N.M.R.- en el intervalo de 300 a 4510 gauss. Una regresión lineal de la Tabla así obtenida, dió por resultado la ecuación siguiente, bajo un coeficiente de correlación de 0.999994.

$$B = (443.9835) V_c + 300.7286 \quad (3.2)$$

De la expresión anterior, el lograr el voltaje de control ( $V_c$ ) en términos del voltaje análogo a campo magnético ( $V_B$ ) requirió de sustituir en ésta última la expresión  $V_B=KB$  (con  $K=0.001$ , según lo desarrollado en el Apéndice C) y hacer explícito a  $V_c$ ; es decir:

$$V_c = \xi V_B + \eta \quad (3.3)$$

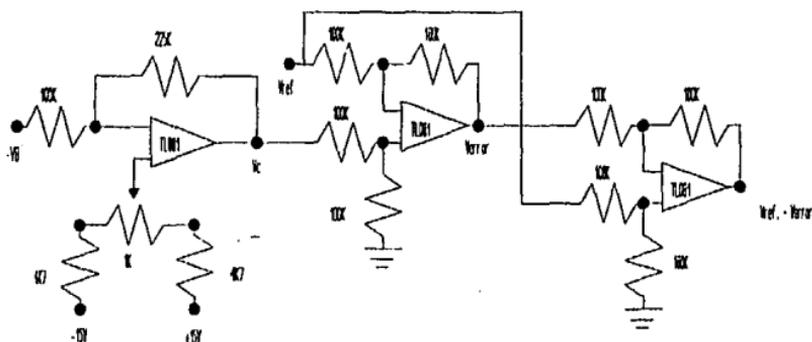
con  $\xi=2.2523$  y  $\eta=-0.6773$  Volts.

En principio, la ecuación 3.3 permite el cierre de la segunda malla de retroalimentación mencionada, mediante los operadores analógicos de producto por la constante  $\xi$  y adición de la constante

$\eta$ , bajo la hipótesis de preexistencia de determinado campo  $B$  y su análogo  $V_B$ , originados por el voltaje  $V_c$  correspondiente; el cual de acuerdo a la Figura 3.3 no existe de inicio, dada la función del selector  $S$  en la misma.

Por tal motivo, fué necesario diseñar y construir la citada fuente externa de alta regulación, a fin de proporcionar el voltaje de control inicial, como referencia contra la cual comparar el resultado de la expresión 3.3, usando el posible error existente para corregir continuamente el valor de campo magnético generado, asegurando de esta manera su estabilidad.

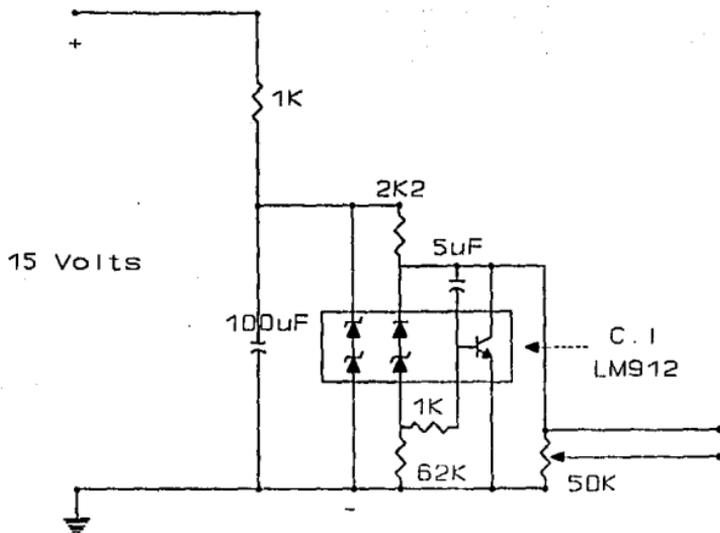
La instrumentación de lo anterior, se presenta en la Figura 3.4, donde se usaron tres amplificadores operacionales TL081. El de entrada fué configurado para reproducir la ecuación 3.3; el central es un arreglo de diferencias donde se efectúa la comparación del voltaje de control contra el voltaje de referencia, proporcionando en su salida la señal de error bajo ganancia unitaria. El tercer operacional fué configurado como sustractor del voltaje de error al voltaje de referencia mismo. De esta forma, bajo condiciones normales el error es nulo y el valor de  $B$  es generado por el valor de  $V_c = V_{ref}$ . Un incremento no previsto en  $B$  se traduce en un voltaje de error positivo, el cual es inmediatamente sustraído al voltaje de referencia, proporcionando un voltaje de control final inferior al nominal, compensándose así la elevación indeseable en  $B$ . Cambios opuestos ocurren ante decrementos de  $B$  originados por agentes externos de perturbación.



Conversión de  $V_B$  a Voltajes de Control y Etapas de Compensación.

Figura 3.4

La fuente externa de voltaje de referencia, manualmente variable, se diseñó en base al circuito integrado LM912 (Figura 3.5), usando una combinación de pre-regulación en serie en dos etapas sucesivas y una regulación final en modo paralelo. La variación manual del voltaje de referencia es en el intervalo de 0 a 10 volts, mediante un potenciómetro de 50 K $\Omega$  en 10 vueltas. Los coeficientes de regulación obtenidos con este circuito resultaron ser inferiores a 0.007% contra carga y 0.0011 %/volts contra voltaje de entrada, el cual ya era un voltaje regulado mediante elementos de la familia 78xx.



**Fuente Externa de Voltaje de Referencia.**

**Figura 3.5**

**Referencias.-**

1. Accelerator Nuclear Physics. W.D. Bygrave, P.A. Treado, J.M. Lambert. High Voltage Eng. Corp. Mass. U.S.A.

#### 4.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este Capítulo se muestran las evaluaciones y conclusiones del sistema desarrollado; ésto comprende lo siguiente:

- a).- La evaluación de la estabilidad del campo magnético producido por el analizador, contrastando la respuesta del sistema desarrollado tanto a lazo abierto (regulación original) como a lazo cerrado (segunda malla de retroalimentación adicional).
- b).- La calibración inicial del conjunto acelerador, en la forma tradicional.
- c).- La calibración del sistema desarrollado, mediante la obtención de la curva de excitación  ${}^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma){}^{16}\text{O}$ .

#### 4.1.- Estabilidad de Campo Magnético.

Cuando los módulos del sistema organizados estuvieron ensamblados, calibrados y funcionando en conjunto, se anexaron a la fuente de control; agregando el interruptor S (Figura 3.3) que permitiera pasar de una modalidad a otra (lazo abierto y lazo cerrado) sin que hubiera interacción entre los dos sistemas.

En esta parte, la obtención de los datos se realizó, sin utilizar el acelerador, de la manera siguiente:

Con el interruptor S en la posición de lazo abierto, se encendió el sistema implementado y la fuente de control que gobierna al electroimán; cuando estuvieron en condiciones de operación, los diales de la fuente se ubicaron manualmente a posiciones predeterminadas, confirmando el valor de campo magnético establecido ( $B_{lab}$ ), tanto por la técnica N.M.R., como a través de un gáussmetro de patente marca Group modelo DTM-141, cuyas lecturas no alcanzaron el 1% de diferencia. Se reportan los datos del método N.M.R.. Los valores del campo magnético obtenidos a través del sistema desarrollado ( $B_{LA}$ ), se lograron mediante un voltímetro digital HP 3490A de 7 dígitos. Lo anterior dió origen a las tres primeras columnas de la Tabla 4.1, donde se indican los valores correspondientes de energía para iones  $H^+$  según la Tabla E.1 Apéndice E.

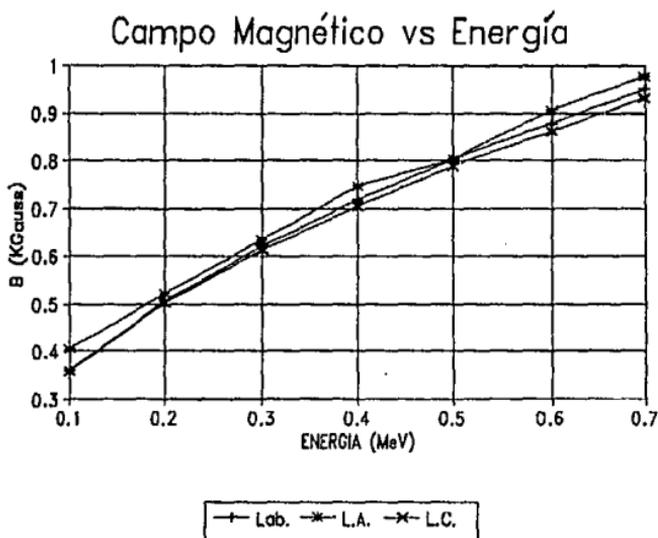
Posteriormente, el interruptor S, se movió a la posición de lazo cerrado, los diales de la fuente se mantuvieron fijos

y asegurados en posiciones calibradas para 300 gauss de inicio. Se procedió a mover el voltaje de control del sistema desarrollado mediante la fuente externa de referencia descrita en la Sección 3.5, a los valores adecuados para producir los mismos valores anteriores de  $B_{Lab.}$ , dando como resultado las lecturas del campo magnético  $B_{L.C.}$ , que se presentan en la cuarta columna de la Tabla 4.1, las cuales fueron tomados del sistema desarrollado con el mismo voltímetro del caso anterior. Al finalizar este proceso, se calcularon los errores absoluto y porcentual de  $B_{L.C.}$  contra  $B_{Lab.}$ , mismos que se incluyen en las últimas columnas de la Tabla 4.1, cuya Gráfica es la 4.1, donde se encuentran las curvas tanto del campo usado como referencia ( $B_{Lab.}$ ), como las de los valores  $B_{L.A.}$  y  $B_{L.C.}$ , todos ellos relacionados con la energía en MeV.

Energía	B Lab.	B L.A.	B L.C.	Error	Error
MeV	Kgauss	Kgauss	Kgauss	Absoluto	%
0.1	0.3592	0.4045	0.3574	0.001836	0.5
0.2	0.5080	0.5218	0.5031	0.004856	0.9
0.3	0.6222	0.6347	0.6132	0.009014	1.4
0.4	0.7184	0.7489	0.7065	0.011971	1.6
0.5	0.8032	0.8032	0.7888	0.014475	1.8
0.6	0.8799	0.9055	0.8626	0.017344	1.9
0.7	0.9504	0.9778	0.9312	0.019248	2.0

Tabla 4.1

Estabilidad del Campo Magnético del Analizador de Energías.



**Gráfica 4.1**  
**Comparación entre los Comportamientos del Analizador de Energías**

En la Gráfica 4.1 se puede ver que el sistema desarrollado se comporta menos estable a lazo abierto que a lazo cerrado; de hecho, fué notable que los valores de  $B_{Lab.}$ , -obtenidas por lectura de la frecuencia involucrada en la técnica N.M.R.-, fueron más estables cuando el analizador se operaba con el segundo lazo de retroalimentación adicional (lazo cerrado), que en forma tradicional (lazo abierto).

Por otra parte, es claro que la Gráfica correspondiente a

la modalidad de lazo cerrado, se aproxima más a la curva obtenida por la técnica N.M.R.; la cual, como ya se ha mencionado, es difícilmente mejorable; lo que conduce a suponer la existencia de descalibración en el sistema implementado, con magnitud inferior o igual al 2% de error, siendo este último más notable a valores de campo magnético cada vez mayores.

Dado que el propósito de esta sección fué la de evaluar estabilidad (precisión) de campo magnético más que exactitud, se puede concluir que el sistema a lazo cerrado mejora notablemente dicha estabilidad; dejando para la evaluación siguiente el análisis de la exactitud, dada la magnitud del error encontrado.

#### **4.2.- Calibración Inicial del Acelerador.**

Dados los resultados obtenidos en la Sección anterior, para efectos de la calibración en la exactitud de las lecturas de campo magnético, fué necesario utilizar un patrón más confiable. Para esto se utilizó una reacción nuclear a baja energía perfectamente conocida. Se escogió la reacción  $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{16}\text{O}$  y específicamente la resonancia a 340 keV.

Se preparó una muestra de flúor sobre una placa de aluminio, que se colocó en la cámara azul a 22.5° grados de la dirección original del haz. Se bombardeó con iones positivos de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) mediante el acelerador Van der Graaff de 700

keV.

Estas evaluaciones se hicieron con el interruptor S, en la posición lazo abierto, a fin de operar al sistema en su forma tradicional, por lo que los diales de la fuente se posicionaron para un valor inicial de campo magnético establecido por la técnica N.M.R. y confirmado por el gáussmetro de patente mencionado en la sección anterior, a fin de lograr la desviación del haz hacia la cámara y hacerlo incidir en la muestra de flúor. Cuando el haz bombardeó la muestra, se produjo la reacción nuclear del  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ , que según lo visto en el capítulo 2, provocó radiaciones gamma en todas direcciones, de las que algunas incidieron en el detector de NaI(TL) (Sección 2.5), dando como resultado a la salida de éste, pulsos eléctricos que fueron almacenados en un multicanal ortec 775/771. Las lecturas registradas en el multicanal se conocen como cuentas, y representan las radiaciones gamma totales, acumuladas, debido a la energía pre-establecida. En el espectro obtenido aparecen las  $\gamma$ 's de 6.14 MeV más los picos de escape producidos en el detector (Figura 2.6). Como estos tres picos se producen por las  $\gamma$ 's de la reacción nuclear en cuestión toda esta información se selecciona por medio de una ventana y se manda a un contador para obtener el número de cuentas totales producidas por los eventos de la reacción. Posteriormente los diales de la unidad de control se movieron hasta recorrer energías por debajo de los 340 keV a mayores, - según la técnica N.M.R. y los valores de campo magnético

registrados por el equipo marca Group.-, para obtener la curva de excitación que se muestra en la Gráfica 4.2, cuyos datos se encuentran en la Tabla 4.2, donde aparecen adicionalmente las columnas "energía recorrida" y " $R_{lab}$ , obtenido" las cuales obedecen al proceso de calibración mismo, que se describe a continuación.

B [KG] Lab.	Energía [keV] Lab. RLab.	Energía [keV] Recorrida a 340 keV.	Cuentas Lab.	R Lab. [Cm] obtenida
0.628	305	292	800	124.523
0.632	309	296	917	124.558
0.636	314	301	1171	124.593
0.641	318	305	1091	124.634
0.645	322	309	1199	124.667
0.649	327	314	1484	124.699
0.651	329	316	1588	124.715
0.654	331	318	1693	124.739
0.656	333	320	2002	124.754
0.658	335	322	2298	124.770
0.660	338	325	2593	124.785
0.662	340	327	3133	124.800
0.664	342	329	3917	124.815
0.666	344	331	5079	124.830
0.669	346	333	6690	124.852
0.671	349	336	11388	124.866
0.672	350	337	20547	124.873
0.673	351	338	33393	124.880
0.674	352	339	37473	124.888
0.675	353	340	77610	124.895
0.676	354	341	108991	124.902
0.677	355	342	121974	124.909
0.678	357	344	133421	124.916
0.679	358	345	138863	124.923
0.681	359	346	143185	124.937
0.682	360	347	145140	124.943
0.683	361	348	146193	124.950
0.684	362	349	147727	124.957
0.685	363	350	147602	124.964
0.686	365	352	147360	124.971
0.687	366	353	147102	124.977
0.688	367	354	146705	124.984
0.689	368	355	145671	124.991
0.690	369	356	145881	124.997
0.691	370	357	145663	125.004
0.692	372	359	145474	125.011
0.694	373	360	146370	125.024
0.695	374	361	145469	125.030
0.696	375	362	144928	125.036
0.697	376	363	143993	125.043

Tabla 4.2  
 Datos de Calibración del Analizador de 700 keV mediante la  
 reacción Nuclear  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$

B [KG] Lab.	Energía [keV] Lab. RLab.	Energía [keV] Recorrida a 340 keV.	Cuentas Lab.	R Lab. [Cm] obtenida
0.698	377	364	142906	125.049
0.699	379	366	143102	125.056
0.700	380	367	142828	125.062
0.701	381	368	140903	125.068
0.702	382	369	140496	125.075
0.703	383	370	142681	125.081
0.704	384	371	137896	125.087
0.705	386	373	139175	125.093
0.707	387	374	138738	125.106
0.708	388	375	137068	125.112
0.709	389	376	135771	125.118
0.710	390	377	134793	125.124
0.711	392	379	133786	125.130
0.712	393	380	133489	125.136
0.713	394	381	133361	125.142
0.714	395	382	132280	125.148
0.715	396	383	131151	125.154
0.716	398	385	129035	125.160
0.717	399	386	128455	125.166
0.718	400	387	127782	125.172
0.720	401	388	127757	125.183
0.721	402	389	125744	125.189
0.722	404	391	124426	125.195
0.723	405	392	123046	125.201
0.724	406	393	122080	125.206
0.725	407	394	121908	125.121
0.729	412	399	117532	125.235
0.734	417	404	114453	125.262

Tabla 4.2 Continuación

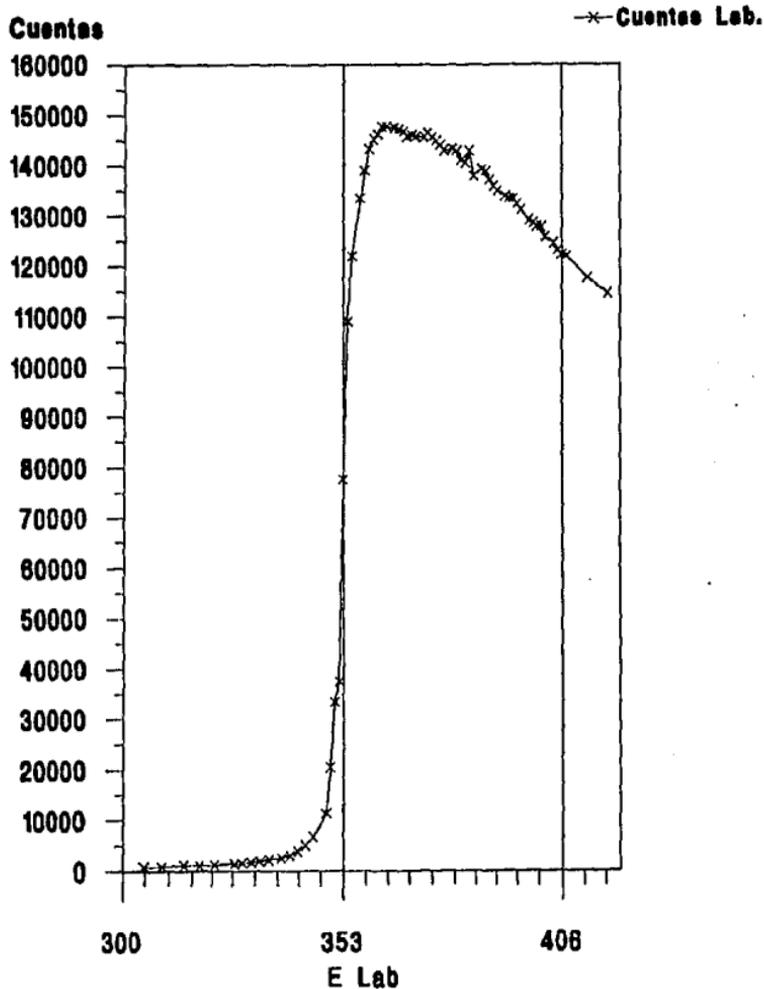


Figura 4.2

Curva de resonancia  $^{19}\text{F}$  para calibración inicial del acelerador.

Ya se ha mencionado que el punto de referencia absoluto sobre el cual descansa la calibración del conjunto, es el hecho indiscutible de que existe una resonancia en la reacción  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  que debe ocurrir exactamente a los 340 keV con una anchura  $\Gamma=2.4$  keV. Esta energía se determina por el punto medio de la región de máxima rapidez de aumento en el número de cuentas de la curva de excitación, el cual para los datos anteriores ocurrió a 77,610 cuentas, para 353 keV de energía; es decir 13 keV en exceso del valor real.

Tan notable diferencia en la energía fué adjudicable a la existencia de incertidumbre en alguno(s) de los parámetros constantes que se encuentran involucrados en la ecuación de rigidez magnética; a saber:

$$B = \frac{144}{R Z} \sqrt{m T} \quad (3.1)$$

La veracidad de las constantes involucradas en dicha expresión, inducen a pensar particularmente sobre el valor de radio de curvatura del analizador de energía (R) proporcionado por la técnica N.M.R, en el análisis efectuado en febrero de 1990, descrito en el Apéndice E; ya que las magnitudes de  $Z$ , y  $m$  son conocidas con bastante precisión desde antaño, además de que los valores de campo magnético asociado fueron confirmados por el gaussmetro de patente mencionado, bajo incertidumbre máxima de  $\pm 0.5\%$ .

Bajo tal hipótesis, la calibración consistió en disminuir en 13 keV a cada uno de los valores obtenidos de energía, -los cuales aparecen en la columna de "Energía recorrida"-; y calcular para cada caso el radio de curvatura del analizador (columna  $R_{Lab.}$  de la Tabla 4.2), el cual resultó con valores entre 124.523 cm y 125.262 cm para energías entre 292 y 404 keV, con un comportamiento monótonamente creciente atribuible a la aproximación por segmentación lineal (Gráfica E.1 Apéndice E) que relaciona  $B_{Lab.}$  vs  $E_{Lab.}$ . Se puede afirmar que el resultado de esta calibración, fué el de obtener un radio de curvatura actualizado, con valor de 124.895 cm.

#### 4.3.- Calibración del Sistema Desarrollado.

La evaluación y calibración del conjunto de etapas implementadas, se efectuó con la misma metodología descrita en la sección anterior, usando la misma muestra de  $^{19}F(p, \alpha \gamma)^{16}O$ , con la excepción de que en esta parte el selector S se conmutó a la posición lazo cerrado, -dados los resultados mostrados en la Sección 4.1-; además de que los valores de campo magnético se lograron por lectura directa del voltaje análogo a B, mediante el voltímetro HP 34904 ya mencionado. Los resultados obtenidos se muestran en la Gráfica 4.3, elaborada a partir de la Tabla 4.3, donde la primera columna contiene dichos valores de campo magnético; en la segunda columna se incluyen los

valores de energía correspondientes, calculados por medio de la expresión de rigidez magnética, usando el valor de 124.895 cm en el radio de curvatura.

En la cuarta columna se muestran los números de cuentas registrados en el multicanal, para cada valor de campo magnético y energía. Nótese que la transición de la curva de excitación ocurrió al valor estimado de 344 keV de energía; por lo que en la tercera columna de la Tabla 4.3 se encuentran todos los valores de energía normalizados por un corrimiento de 4 keV, de acuerdo a la premisa de calibración descrita en la Sección anterior, que es observable en la Gráfica 4.4 donde se presentan tanto la curva de excitación obtenida en la Sección 4.2, ya normalizada; como la lograda en esta parte sin normalizar. En la Gráfica 4.5 se muestran ambas curvas normalizadas a 340 keV.

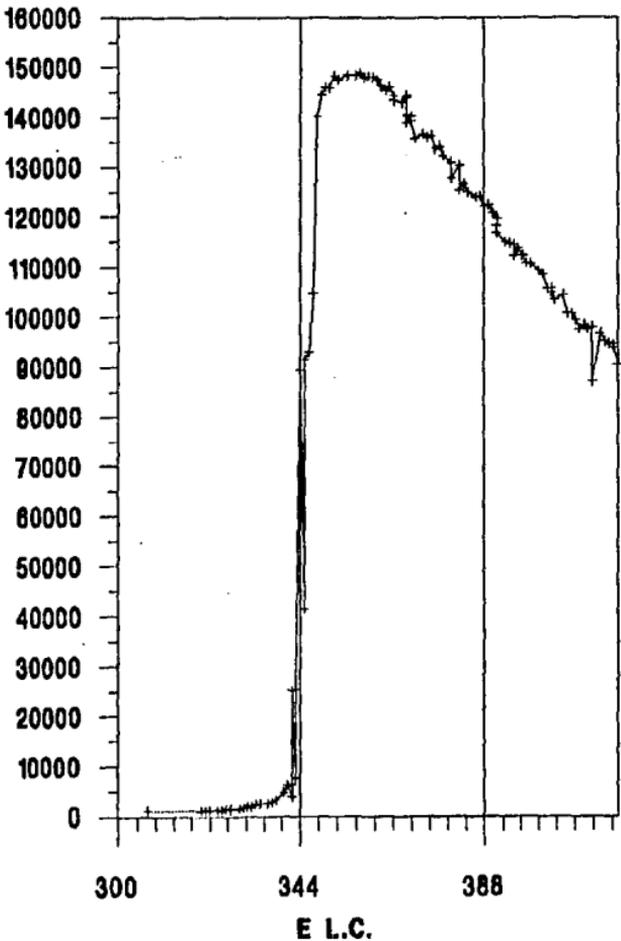
Para concluir la descripción de esta evaluación, - volviendo a la Tabla 4.3-, en la quinta y sexta columnas se muestran respectivamente los errores absoluto y porcentual del campo magnético obtenido, con respecto al que debería ser, de acuerdo a la resonancia del  $^{19}\text{F}(p, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ . El hecho de que tal error haya fluctuado entre 0.51% y 0.7% ( $\pm 0.35\%$  como máximo), para el interalo de energías entre 304 y 416 keV, confirma la descalibración, de ese orden, en el sistema implementado.

Cabe mencionar que el error de calibración encontrado, puede suponerse formado por un error constante (0.6%), - atribuible al sistema desarrollado-, en adición a una

inestabilidad ( $\pm 0.1\%$ ) no totalmente adjudicable a dichas etapas, según las conclusiones generales del trabajo, que se discuten a continuación.

Cuentas

---+--- Cuentas L.C.



Gráfica 4.3

Curva de Resonancia  $^{19}\text{F}$  para la Calibración del Sistema Desarrollado.

B [KG] Sist. L.C.	Energía [keV] Sist. L.C.	Energía [keV] Recorrida a 340 keV	Cuentas L.C.	Error Absoluto en B[kg]	Error % en B
0.6431	308	304	1041	0.004501	0.699
0.6552	320	316	1052	0.004417	0.674
0.6569	322	317	1124	0.004405	0.670
0.6573	322	318	1084	0.004403	0.669
0.6599	324	320	1091	0.004387	0.665
0.6600	325	320	1188	0.004385	0.664
0.6606	325	320	1209	0.004381	0.663
0.6606	325	320	1200	0.004381	0.663
0.6615	326	322	1329	0.004375	0.661
0.6621	327	322	1459	0.004371	0.660
0.6626	327	323	1367	0.004367	0.659
0.6639	328	324	1427	0.004359	0.656
0.6648	329	325	1481	0.004353	0.654
0.6656	330	326	1729	0.004347	0.653
0.6658	330	326	1827	0.004346	0.652
0.6667	331	327	1827	0.004340	0.650
0.6669	331	327	2137	0.004339	0.650
0.6671	332	327	2096	0.004338	0.650
0.6682	333	328	2429	0.004330	0.648
0.6690	334	329	2524	0.004325	0.646
0.6708	335	331	2709	0.004314	0.643
0.6720	337	332	2847	0.004306	0.640
0.6730	338	333	3163	0.004299	0.638
0.6750	340	335	3966	0.004286	0.635
0.6760	341	336	4829	0.004280	0.633
0.6770	342	337	6237	0.004274	0.631
0.6770	342	337	6512	0.004274	0.631
0.6773	342	338	7726	0.004272	0.630
0.6776	342	338	25265	0.004270	0.630
0.6778	342	338	25523	0.004269	0.629
0.6792	344	340	41457	0.004260	0.627
0.6800	345	340	89525	0.004255	0.625
0.6800	345	340	91548	0.004255	0.625
0.6810	346	341	92930	0.004248	0.623
0.6820	347	342	104741	0.004242	0.622
0.6830	348	343	140132	0.004236	0.620
0.6840	349	344	144369	0.004230	0.618
0.6850	350	345	145921	0.004224	0.616
0.6860	351	346	145852	0.004217	0.614
0.6870	352	347	148238	0.004211	0.612
0.6880	353	348	147536	0.004205	0.611

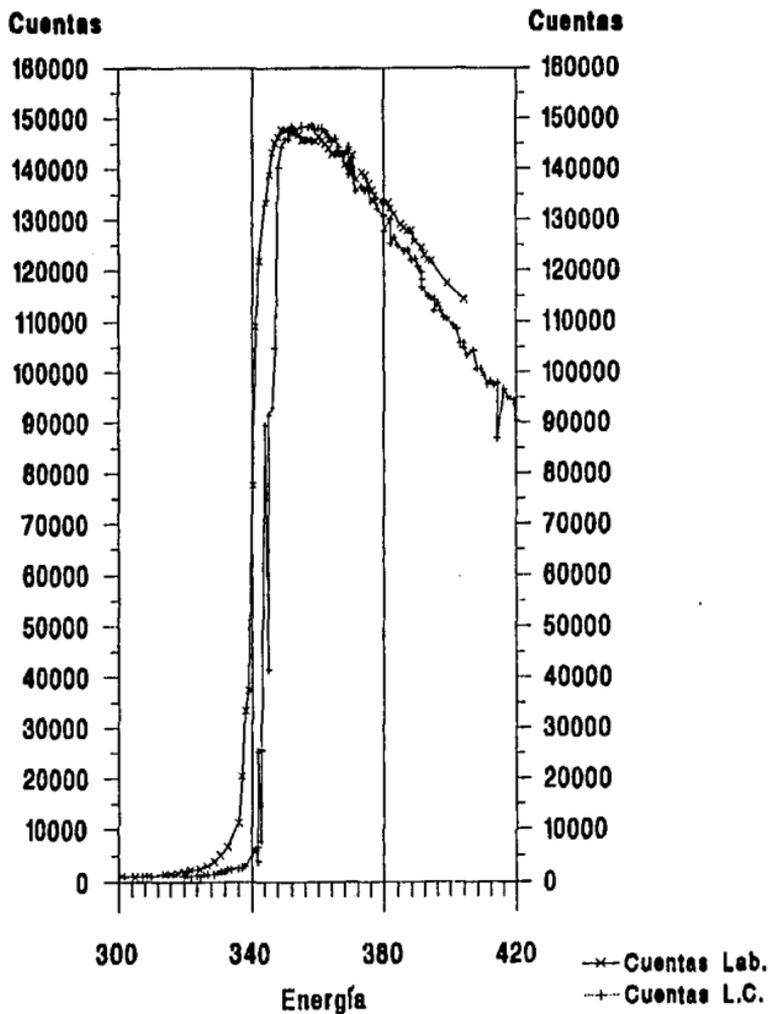
Tabla 4.3  
 Datos de calibración del sistema desarrollado mediante la  
 reacción Nuclear  $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$

B [KG] Sist. L.C.	Energía [keV] Sist. L.C.	Energía [keV] Recorrida a 340 keV	Cuentas L.C.	Error Absoluto en B[kg]	Error % en B
0.6892	354	350	148387	0.004198	0.609
0.6914	356	352	148278	0.004184	0.605
0.6920	357	353	148696	0.004181	0.604
0.6920	357	353	148589	0.004181	0.604
0.6923	357	353	148691	0.004179	0.603
0.6929	358	354	147857	0.004175	0.602
0.6936	359	354	148073	0.004171	0.601
0.6943	359	355	147967	0.004167	0.600
0.6952	360	356	147399	0.004161	0.598
0.6969	362	358	146307	0.004151	0.595
0.6978	363	359	145317	0.004146	0.594
0.6986	364	359	145985	0.004141	0.592
0.6992	364	360	144236	0.004137	0.591
0.6996	365	360	143345	0.004135	0.591
0.7016	367	363	143800	0.004123	0.587
0.7017	367	363	144359	0.004122	0.587
0.7021	367	363	142913	0.004120	0.586
0.7025	368	364	140365	0.004118	0.586
0.7025	368	364	140175	0.004118	0.586
0.7028	368	364	138929	0.004116	0.585
0.7032	369	364	139234	0.004114	0.584
0.7037	369	365	135710	0.004111	0.584
0.7058	371	367	136560	0.004098	0.580
0.7068	372	368	135855	0.004092	0.579
0.7079	374	369	136142	0.004086	0.577
0.7088	374	370	133617	0.004081	0.575
0.7096	375	371	134025	0.004076	0.574
0.7104	376	372	132179	0.004072	0.573
0.7119	378	373	130872	0.004063	0.570
0.7123	378	374	130636	0.004061	0.570
0.7125	378	374	130161	0.004060	0.569
0.7136	380	375	127687	0.004053	0.568
0.7138	380	375	125346	0.004052	0.567
0.7150	381	377	126529	0.004045	0.565
0.7160	382	378	124912	0.004040	0.564
0.7176	384	380	123894	0.004031	0.561
0.7187	384	381	124005	0.004024	0.559
0.7195	386	382	122084	0.004020	0.558
0.7206	387	383	122304	0.004014	0.556
0.7212	388	383	120737	0.004010	0.556
0.7217	388	384	119577	0.004008	0.555

Tabla 4.3 (Continuación)

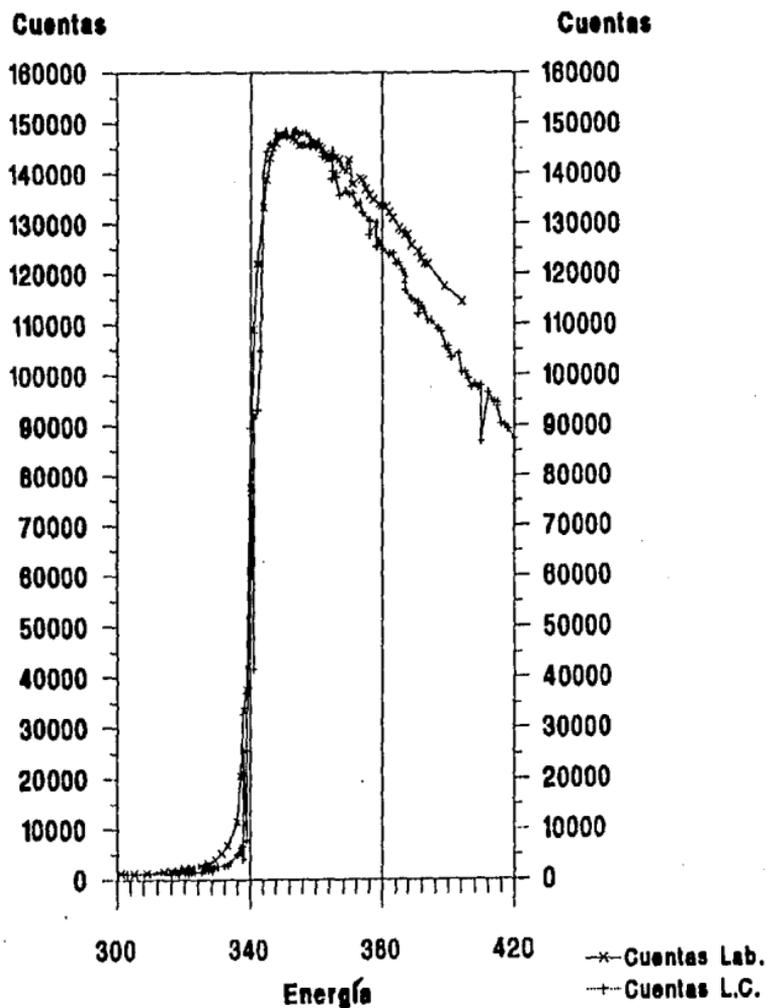
B [KG] Sist. L.C.	Energía [keV] Sist. L.C.	Energía [keV] Recorrida a 340 keV	Cuentas L.C.	Error Absoluto en B[kg]	Error % en B
0.7221	389	384	118235	0.004005	0.554
0.7223	389	385	116696	0.004004	0.554
0.7235	390	386	114985	0.003997	0.552
0.7245	391	387	114603	0.003992	0.550
0.7255	392	388	114400	0.003986	0.549
0.7257	393	388	112134	0.003985	0.549
0.7269	394	390	113588	0.003979	0.547
0.7275	395	390	112215	0.003975	0.546
0.7285	396	391	110801	0.003970	0.544
0.7295	397	392	110560	0.003964	0.543
0.7307	398	394	109177	0.003958	0.541
0.7315	399	395	108494	0.003954	0.540
0.7325	400	396	105607	0.003948	0.538
0.7335	401	397	105660	0.003943	0.537
0.7340	402	397	104807	0.003940	0.536
0.7347	402	398	103370	0.003936	0.535
0.7358	404	399	104234	0.003930	0.534
0.7367	405	400	100576	0.003925	0.532
0.7377	406	401	100552	0.003920	0.531
0.7385	407	402	99296	0.003916	0.530
0.7395	408	403	97537	0.003911	0.528
0.7405	409	404	98230	0.003905	0.527
0.7413	410	405	97491	0.003901	0.526
0.7421	411	406	97853	0.003897	0.525
0.7438	412	408	96540	0.003888	0.522
0.7447	413	409	95047	0.003883	0.521
0.7455	414	410	94704	0.003879	0.520
0.7465	415	411	94414	0.003874	0.518
0.7469	416	412	93817	0.003872	0.518
0.7471	416	412	90367	0.003871	0.518
0.7484	418	413	90046	0.003864	0.516
0.7486	418	413	89337	0.003863	0.515
0.7494	419	414	86920	0.003859	0.514
0.7506	420	416	87504	0.003852	0.513

Tabla 4.3 (Continuación)



Gráfica 4.4

Curva de resonancia  $^{19}\text{F}$  del sistema desarrollado, en comparación con la curva normalizada obtenida para el acelerador en forma tradicional.



Gráfica 4.5

Curvas de Resonancia  $^{19}\text{F}$  normalizadas, obtenidas tanto en forma tradicional, como a través del sistema desarrollado.

#### 4.4.- Conclusiones Generales.

En resumen, de las evaluaciones anteriores, se encontró lo siguiente:

El segundo lazo de retroalimentación adicional al conjunto acelerador, mejora notablemente la estabilidad del analizador de energías, donde la medición del campo magnético producido por éste, -a través del sistema desarrollado-, presentó un error máximo del 2% para la energía más alta (700 keV) en iones  $H^+$ .

En la calibración del acelerador en forma tradicional (sin usar las etapas construidas), se detectó una diferencia de 1.85% en el radio de curvatura del analizador de energías, contra una evaluación al respecto realizada en febrero de 1990; ésto, desde luego no permite asegurar que una u otra evaluación haya sido la correcta, ya que por una parte, en el tiempo que transcurrió entre ellas, dicho radio pudo haberse modificado por mantenimiento del acelerador; o bien, por la otra, la discrepancia puede ser debida a la técnica misma (N.M.R.) con que indirectamente se midieron los campos magnéticos; -recuérdese la aproximación por segmentación lineal discutida en el Apéndice E-.

De la calibración de los circuitos agregados al conjunto, en los errores encontrados (0.6% constantes,  $\pm 0.1\%$  variables), la parte constante exige un reajuste fino en los parámetros de transformación de la ecuación C.2 (Apéndice C), -que gobierna

la obtención del voltaje análogo a campo magnético-, además de las señales de control obtenidas a partir de éste.

La parte variable del error, se hizo presente en todas las evaluaciones efectuadas, en forma de crecimientos monótonos, tanto de los valores de campo magnético, como en los del radio de curvatura. Esto permite suponer que tal error es implícito a la metodología misma de evaluación; ya que en ésta, los valores de campo magnético usados como referencia, fueron realmente obtenidos a partir de una frecuencia (N.M.R.) de absorción nuclear, donde en las lecturas de ésta, existió una incertidumbre comparable a la magnitud del error obtenido.

Por otra parte, en las calibraciones efectuadas, sólo se usó el punto de referencia correspondiente a la resonancia de los 340 keV de energía; realmente para una calibración más completa, deben usarse conjuntamente las resonancias a 340, 480, 620 y 672 keV de energía, sin aproximaciones por segmentación lineal; es decir, operando en pleno con la expresión de rigidez magnética.

También es posible mejorar el sistema desarrollado, con la automatización proyectada para el conjunto acelerador, mediante la incorporación de la microcomputadora e interfaces mencionadas.

Para concluir, el objetivo perseguido en este trabajo, no fué implementar un sustituto de la técnica N.M.R. en la medición de campos magnéticos, sino más bien una alternativa adicional con las ventajas de rapidez de respuesta e intervalo

adicional con las ventajas de rapidez de respuesta e intervalo amplio de medición.

De hecho, se considera que los resultados obtenidos, -aun con los errores reportados-, son aceptables para el uso que actualmente se le da al conjunto acelerador.

## APENDICE A.

Partiendo de una expresión de la forma  $V_1 = MB+b$ , se quiere obtener una relación del tipo:

$$V = K B.$$

La transformación consiste en proponer una función de la forma:

$$A(V) = \alpha V + \beta$$

tal que

$$A(V_1) = K B$$

o sea

$$V = A(V_1) = \alpha V_1 + \beta = K B$$

sustituyendo  $V_1$  en  $A(V)$  se obtiene

$$\alpha (M B + b) + \beta = K B$$

$$\alpha M B + \alpha b + \beta = K B$$

para que la igualdad anterior se verifique, es necesario que

$$\alpha = K/M \quad \text{y} \quad \alpha b + \beta = 0$$

por tanto

$$\beta = -\alpha b = (K/M) b$$

sustituyendo los valores de  $M$ ,  $b$  y  $K$  en las condiciones de la Sección 3.4 se obtiene para  $\alpha$  y  $\beta$

$$\alpha = -119.3317422$$

$$\beta = 0.055261336 \text{ Volts}$$

Donde  $\alpha$  es el factor de amplificación para el voltaje proveniente del transductor ( $V$ ), y que deberá ser sumado a la constante de voltaje  $\beta$  (Voltaje de C.D.).

## APENDICE B.

### Medición del Campo Magnético por Efecto Hall.

El efecto Hall fue descubierto en 1879 por E. H. Hall, dando un gran impulso a las investigaciones modernas sobre la conducción eléctrica, especialmente en los semiconductores. Actualmente las mediciones por efecto Hall son indispensables en muchos fenómenos físicos.

Este efecto se observa al drenar una corriente en un conductor en presencia de un campo magnético ( $B$ ). La fuerza de Lorentz:  $F=(q/c)v \times B$  aún cuando actúa directamente sobre los portadores de carga móviles, da lugar a una fuerza en el conductor como un todo.

Este fenómeno se explica de la forma siguiente. Si se tiene una barra metálica en la que circula una corriente estacionaria debido a un campo eléctrico  $E$ , los electrones son arrastrados de un extremo a otro en la barra (eje  $X$ ) con velocidad media  $v$ . La densidad de corriente  $J$  y el campo eléctrico están relacionados mediante la ley de OHM:  $J=\sigma E$ , donde  $\sigma$  es la conductividad del metal. Sabiendo que no hay campo magnético (excepto el generado por la propia corriente, que puede ser ignorado); al aplicar un campo externo  $B$  en la dirección  $Z$  perpendicular a  $J$ , se tiene un cambio inmediato en el movimiento de los electrones; éstos se desvían en la dirección  $Y$  perpendicular a  $J$  y  $B$  (Figura B.1).

Debido a que los electrones no pueden escapar de la barra, se acumulan en un extremo hasta que la barra adquiera un exceso de

carga negativa en un lado y el correspondiente exceso de carga positiva en el otro, por lo que se crea un campo eléctrico transversal  $E_x$  entre los excesos de carga (Figura B.2). La fuerza de módulo  $eE_x$  equilibra la fuerza de carga positiva  $(e/c)v_xB$ , por lo que el movimiento medio en  $X$  es horizontal de nuevo, y existe en el interior del metal dicho campo eléctrico transversal  $E_x$ . Este campo origina una fuerza en la dirección  $Y$  sobre los iones positivos. Es así como la fuerza de Lorentz  $F = -(e/c)v_xB$  sobre los electrones, pasa a la barra sólida. La existencia del campo transversal  $E_x$  puede demostrarse eléctricamente de una manera directa.

Se conectan alambres a los puntos  $P_1$  y  $P_2$  en las caras opuestas de la barra (eje  $Y$ ), de tal forma que estén al mismo potencial cuando circula corriente en la barra y el campo  $B$  externo es nulo. Los otros extremos de los alambres se conectan a un voltímetro. Después de aplicar el campo magnético externo  $B$ , fluye una corriente en este circuito, demostrando que  $P_1$  y  $P_2$  no están al mismo potencial. De hecho,  $P_1$  es positivo, respecto a  $P_2$ , en el sistema descrito.

El efecto Hall también revela algo acerca de los portadores de carga. Si la corriente de la barra (Figura B.3) hubiese sido debida a cargas positivas moviéndose hacia la derecha, habría ocurrido un campo transversal  $E_x$  de sentido contrario. Así, el signo de la <<diferencia de potencial Hall>>, entre  $P_1$  y  $P_2$ , indica si los portadores de carga son positivos o negativos.

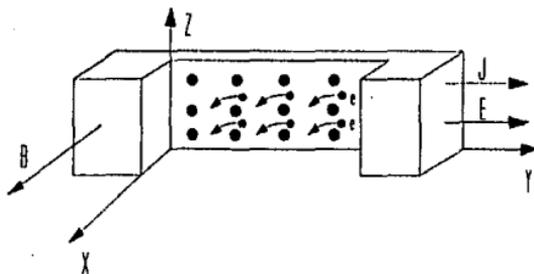


Figura B.1

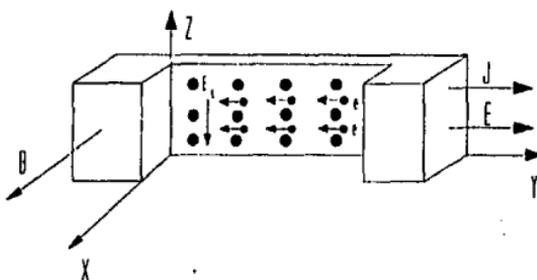


Figura B.2

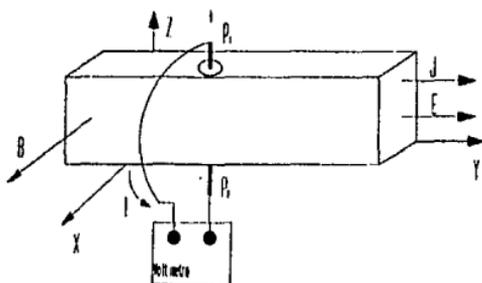


Figura B.3

Cuantitativamente, el módulo de campo transversal  $E_x$  se determina por la igualdad

$$E_x = \frac{v}{c} B \quad (\text{B.1})$$

Por otro lado, la velocidad media  $v$  del portador está relacionada a la densidad de corriente  $J$  por

$$J = n q v \quad (\text{B.2})$$

donde  $n$  es el número de portadores de carga por unidad de volumen, con carga  $q$  en cada uno. Combinando las ecuaciones B.1 y B.2, se puede eliminar  $v$ :

$$E_x = \frac{1}{nqc} J B \quad (\text{B.3})$$

$E_x$ ,  $J$  y  $B$  pueden medirse en un arreglo como el mostrado en la Figura B.3.  $E_x$  se obtiene por el cociente de la diferencia de potencial entre  $P_1$  y  $P_2$  y espesor de la barra;  $J$  equivale a la corriente total por unidad de área de la sección recta. Así, es posible deducir  $(1/nqc)$ . Este factor se conoce como el <<coeficiente Hall>> del material. Para algunos metales, el coeficiente Hall tiene valores que se esperan por la existencia de un electrón de conducción por átomo, con el signo correspondiente del efecto que indica que los portadores de carga son en realidad negativos. Sin embargo, existen algunos metales con coeficientes Hall de signo contrario. Esto era una desconcertante paradoja, hasta que fue explicada por la teoría de los electrones en los metales.

## APENDICE C

### Transductor de Campo Magnético por Efecto Hall.

En base a lo descrito en el Apéndice B, se dispuso de un transductor F.W.Bell modelo F.H.301; que es una punta Hall con sensibilidad de 10 mV/KG, corriente nominal de polarización ( $I_{cn}$ ) de 1 a 25 mA y coeficiente de temperatura de (0.1 %/°C).

Para caracterizar dicho transductor se utilizó un campo magnético B conocido y variable, obteniendo la respuesta de voltaje contra campo magnético para diferentes corrientes de polarización a la temperatura ambiente de 19°C. Para la generación de dicho campo, se usó el electroimán de un espectrómetro de masas 130-56 alimentado por una fuente de corriente constante HP 6268B, la que a su vez era gobernada por un gáussmetro controlador marca varian Mod FR-40, a fin de asegurar estabilidad y precisión en el parámetro B mediante equipos de medición a lazo cerrado.

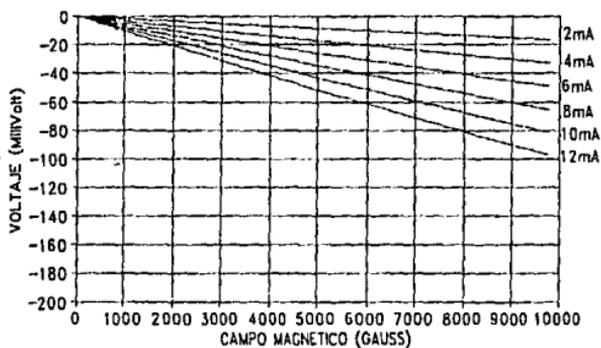
Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla C.1, las Gráficas correspondientes son C.1 y C.2. Una regresión lineal a la Tabla C.1, permitió obtener ecuaciones de la forma  $V = M_{amb} B + b_{amb}$ , para las diferentes corrientes de polarización. Nótese que los subíndices "amb" significan evaluaciones hechas a la temperatura ambiente de 19°C. Dichas expresiones, se resumen en la Tabla C.2.

B	I →											
	2mA	4mA	6mA	8mA	10mA	12mA	14mA	16mA	18mA	20mA	22mA	24mA
Gauss	mV	mV	mV	mV	mV	mV						
0100	-00.14	-00.27	-00.41	-00.55	-00.68	-00.82	-000.96	-001.11	-001.25	-001.40	-001.54	-001.69
0200	-00.32	-00.62	-00.93	-01.24	-01.56	-01.86	-002.19	-002.50	-002.82	-003.14	-003.46	-003.78
0300	-00.49	-00.97	-01.46	-01.94	-02.43	-02.91	-003.40	-003.89	-004.38	-004.87	-005.36	-005.85
0400	-00.66	-01.32	-01.98	-02.64	-03.30	-03.96	-004.62	-005.19	-005.96	-006.62	-007.29	-007.95
0500	-00.84	-01.67	-02.50	-03.33	-04.16	-05.00	-005.83	-006.67	-007.51	-008.34	-009.18	-010.02
0600	-01.02	-02.02	-03.03	-04.04	-05.05	-06.06	-007.08	-008.09	-009.11	-010.12	-011.13	-012.14
0700	-01.19	-02.37	-03.55	-04.73	-05.91	-07.10	-008.29	-009.47	-010.66	-011.84	-013.02	-014.21
0800	-01.37	-02.72	-04.08	-05.43	-06.79	-08.15	-009.51	-010.87	-012.23	-013.59	-014.95	-016.31
0900	-01.54	-03.07	-04.60	-06.14	-07.67	-09.21	-010.75	-012.29	-013.82	-015.35	-016.89	-018.43
1000	-01.72	-03.42	-05.13	-06.84	-08.55	-10.26	-011.97	-013.68	-015.40	-017.09	-018.80	-020.51
1200	-02.06	-04.11	-06.17	-08.22	-10.28	-12.23	-014.39	-016.44	-018.50	-020.54	-022.59	-024.65
1400	-02.41	-04.81	-07.21	-09.61	-12.02	-14.42	-016.83	-019.23	-021.64	-024.02	-026.42	-028.82
1600	-02.76	-05.51	-08.26	-11.01	-13.76	-16.52	-019.27	-022.02	-024.77	-027.50	-030.25	-033.00
1800	-03.11	-06.21	-09.31	-12.41	-15.51	-18.62	-021.72	-024.82	-027.97	-031.00	-034.10	-037.19
2000	-03.46	-06.90	-10.36	-13.80	-17.25	-20.70	024.15	-027.61	-031.05	-034.47	-037.92	-041.36
2200	-03.80	-07.59	-11.38	-15.17	-18.96	-22.76	-026.55	-030.35	-034.14	-037.89	-041.68	-045.47
2400	-04.15	-08.29	-12.44	-16.58	-20.72	-24.87	-029.01	-033.16	-037.30	-041.40	-045.53	-049.67
2600	-04.50	-08.98	-13.47	-17.95	-22.44	-26.93	-031.42	-035.91	-040.39	-044.84	-049.32	-053.79
2800	-04.84	-09.67	-14.51	-19.34	-24.17	-29.01	-033.84	-038.67	-043.50	-048.29	-053.11	-057.94
3000	-05.19	-10.37	-15.54	-20.72	-25.90	-31.08	-036.26	-041.44	-046.62	-051.74	-056.90	-062.07
3200	-05.53	-11.06	-16.58	-22.10	-27.63	-33.16	-038.68	-044.26	-049.72	-055.19	-060.70	-066.21
3400	-05.88	-11.75	-17.63	-23.50	-29.38	-35.25	-041.12	-046.99	-052.86	-058.67	-064.54	-070.39
3600	-06.22	-12.43	-18.65	-24.85	-31.06	-37.27	-043.48	-049.69	-055.89	-062.04	-068.23	-074.23
3800	-06.57	-13.12	-19.67	-26.23	-32.78	-39.94	-045.89	-052.65	-058.99	-065.47	-072.01	-078.55
4000	-06.91	-13.80	-20.70	-27.59	-34.49	-41.38	-048.28	-055.17	-062.06	-068.87	-075.75	-082.64
4200	-07.25	-14.48	-21.73	-28.98	-36.20	-43.45	-050.68	-057.92	-065.14	-072.30	-079.52	-086.74
4400	-07.59	-15.16	-22.75	-30.32	-37.90	-45.48	-053.06	-060.64	-068.21	-075.65	-083.25	-090.80
4600	-07.93	-15.85	-23.73	-31.69	-39.60	-47.52	-055.44	-063.36	-071.26	-079.09	-086.95	-094.85
4800	-08.27	-16.52	-24.78	-33.04	-41.29	-49.55	-057.80	-066.05	-074.30	-082.46	-090.68	-098.61
5000	-08.60	-17.69	-25.78	-34.37	-42.96	-51.55	-060.13	-068.72	-077.30	-085.78	-094.35	-102.90
5200	-08.94	-17.86	-26.79	-35.71	-44.63	-53.55	-062.47	-071.40	-080.31	-089.12	-098.02	-106.91
5400	-09.27	-18.53	-27.80	-37.06	-46.32	-55.58	-064.83	-074.09	-083.34	-092.48	-101.71	-110.93
5600	-09.60	-19.20	-28.79	-38.39	-47.98	-57.58	-067.16	-076.76	-086.34	-095.86	-105.36	-114.91
5800	-09.94	-19.86	-29.79	-39.71	-49.63	-59.56	-069.48	-079.40	-089.31	-099.11	-108.99	-118.88
6000	-10.26	-20.51	-30.77	-41.02	-51.27	-61.52	-071.77	-082.02	-092.25	-102.37	-112.58	-122.80
6200	-10.59	-21.17	-31.75	-42.33	-52.91	-63.50	-074.07	-084.65	-095.22	-105.64	-116.18	-126.72
6400	-10.92	-21.82	-32.73	-43.64	-54.55	-65.46	-076.36	-087.19	-098.08	-108.82	-119.67	-130.53
6600	-11.24	-22.47	-33.70	-44.92	-56.15	-67.38	-078.60	-089.81	-101.02	-112.08	-123.27	-134.45
6800	-11.56	-23.11	-34.66	-46.21	-57.76	-69.31	-080.85	-092.39	-103.92	-115.30	-126.81	-138.31
7000	-11.89	-23.76	-35.64	-47.51	-59.34	-71.26	-083.12	-095.00	-106.85	-118.56	-130.39	-142.21
7200	-12.21	-24.40	-36.60	-48.80	-60.99	-73.20	-085.38	-097.56	-109.73	-121.76	-133.90	-146.05
7400	-12.53	-25.05	-37.58	-50.09	-62.61	-75.13	-087.64	-100.16	-112.66	-125.00	-137.47	-149.92
7600	-12.85	-26.69	-38.54	-51.37	-64.21	-77.05	-089.88	-102.71	-115.53	-128.18	-140.96	-153.75
7800	-13.17	-26.33	-39.49	-52.65	-65.81	-78.97	-092.15	-105.27	-118.40	-131.37	-144.48	-157.56
8000	-13.49	-26.97	-40.45	-53.93	-67.41	-80.89	-094.36	-107.84	-121.30	-134.57	-147.99	-161.40
8200	-13.81	-27.60	-41.41	-55.20	-69.00	-82.80	-096.59	-110.38	-124.15	-137.75	-151.50	-165.23
8400	-14.13	-28.24	-42.36	-56.57	-70.58	-84.70	-098.80	-112.92	-127.00	-140.91	-154.97	-169.01
8600	-14.54	-28.87	-43.41	-57.74	-72.17	-86.53	-100.93	-115.33	-129.73	-143.94	-158.29	-172.64
8800	-14.74	-29.47	-44.22	-58.95	-73.68	-88.42	-103.13	-117.86	-132.57	-147.09	-161.74	-176.41
9000	-15.06	-30.11	-45.17	-60.22	-75.27	-90.32	-105.36	-120.41	-135.43	-150.24	-165.22	-180.20
9200	-15.38	-30.73	-46.10	-61.46	-76.82	-92.19	-107.53	-122.89	-138.22	-153.34	-168.62	-183.91
9400	-15.69	-31.36	-47.04	-62.71	-78.39	-94.06	-109.73	-125.39	-141.04	-156.46	-172.08	-187.66
9600	-16.00	-31.99	-47.98	-63.97	-79.95	-95.94	-111.92	-127.89	-143.84	-159.59	-175.50	-191.42
9800	-16.81	-32.60	-48.90	-65.49	-81.48	-97.77	-114.04	-130.32	-146.60	-162.62	-178.84	-195.05

Table C.1

## CAMPO MAGNETICO VS VOLTAJE

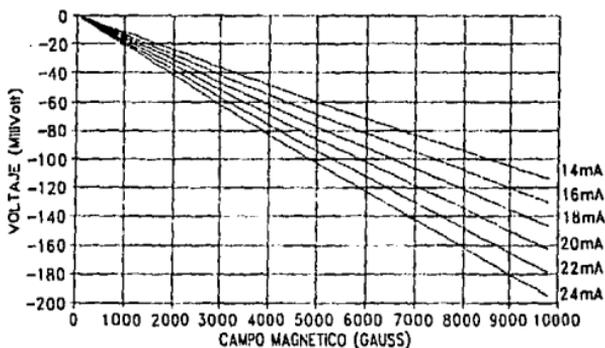
a 19 grados Centigrados



Gráfica C.1

## CAMPO MAGNETICO VS VOLTAJE

a 19 grados Centigrados



Gráfica C.2

Icn (mA)	Temp. 19 ± 1°C	Coef. de Corr.
2	V=-0.00168 B - 0.08695	0.999645
4	V=-0.00335 B - 0.19684	0.999644
6	V=-0.00503 B - 0.29327	0.999648
8	V=-0.00671 B - 0.37826	0.999669
10	V=-0.00838 B - 0.48709	0.999648
12	V=-0.01005 B - 0.58770	0.999646
14	V=-0.01172 B - 0.69110	0.999646
16	V=-0.01340 B - 0.78945	0.999644
18	V=-0.01507 B - 0.89780	0.999647
20	V=-0.01671 B - 1.01779	0.999642
22	V=-0.01838 B - 1.12674	0.999641
24	V=-0.02005 B - 1.23812	0.999640

**Tabla C.2**

De la Tabla anterior, la selección de la óptima corriente de polarización para la punta Hall, se hizo en base a criterios de linealidad de la respuesta, sensibilidad de V vs B y estabilidad térmica. En lo primero, no hubo diferencias apreciables entre las distintas corrientes de operación ya que los coeficientes de correlación resultaron ser prácticamente los mismos; de ahí que la selección se redujo a escoger un valor de Icn lo suficientemente elevado para proporcionar sensibilidad aceptable, pero sin llegar

al extremo de que la misma corriente de polarización produjera elevaciones de temperatura indeseables en el transductor, por efecto Joule. En base a ello, se optó por la gráfica correspondiente de 10 mA, cuya recta de la forma:

$$V_1 = M B + b \quad (C.1)$$

presenta los valores:

$$M = -8.38 \times 10^{-6} \text{ (Volts/Gauss)}$$

$$b = -487.09 \times 10^{-6} \text{ Volts}$$

donde la sensibilidad ( $dV_1/dB$ ) = M resulta ser de aproximadamente 8 microvolts/gauss, razón de cambio procesable por amplificadores de bajo ruido existentes en el mercado nacional.

Con los resultados anteriores de M y b, el paso siguiente consistió en lograr un voltaje análogo al campo magnético; es decir de la forma:

$$V = K B$$

donde K es una constante submúltiplo de la unidad, (por comodidad de lectura), habiendo escogido el valor 0.001, a fin de que 1000 Gauss correspondan a 1 volt; es decir:

$$K = \frac{V}{B} = \frac{1mV}{1G} = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ Volts}}{1 \text{ Gauss}} = 1 \times 10^{-3} \frac{\text{Volts}}{\text{Gauss}}$$

Para lograr lo anterior, se debe aplicar a la ecuación C.1 la misma transformación<sup>1</sup> incluida como ejemplo en la Sección 1.2 (ver Apéndice A).

Con los datos de la ecuación C.1, la expresión final de dicha transformación es:

$$V = -119.3317422 B + 0.055261336 \text{ Volts}$$

(C.2)

El circuito electrónico de proceso de la señal proveniente del transductor, se diseñó, para efectuar justamente las operaciones involucradas con los parámetros correspondientes a la ecuación anterior. Tal circuito se muestra en la Figura C.1, en el que para su mejor comprensión, se señalan tres etapas: FUENTE DE CORRIENTE (I), AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACION Y VOLTAJE DE C.D. CON AJUSTE FINAL; los cuales se describen a continuación.

**FUENTE DE CORRIENTE:** Tiene como objetivo alimentar la punta Hall con la corriente constante de 10 mA seleccionada.

**AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACION<sup>2</sup>:** Es uno de los amplificadores más útiles, precisos y versátiles disponibles en la actualidad. Consta de una configuración diferencial de amplificadores operacionales (1 y 2) como frente de entrada, lo cual proporciona un alto grado de rechazo al ruido electrónico, además de amplificar 10 veces la señal del transductor. La etapa siguiente (amplificador 3) es una configuración de comparador que aumenta la señal proveniente de la etapa anterior en un factor de 12, dando una amplificación total de 120, además de referir a tierra dicha señal. cabe mencionar que el voltaje de salida de esta etapa ( $V_o$ ), es proporcional a la diferencia entre los dos voltajes de entrada. Y fué realizada mediante amplificadores operacionales de muy baja deriva térmica y alta inmunidad al ruido (LF411).

Las características del amplificador de instrumentación se resumen como sigue:

- 1.- La ganancia de voltaje, desde el frente de entrada a la salida del extremo único, se establece por el cociente de dos resistencias, a saber:  $10k/1k=10$  y  $12k/1k=12$ .
- 2.- La impedancia de entrada entre ambas terminales es del orden de  $10^{12}$  Ohms y es independiente del factor de ganancia.
- 3.-  $V_o$  no depende de los voltajes comunes  $V_1$  y  $V_2$  (entrada en modo común), sólo de su diferencia.

**NIVEL DE C.D. Y AJUSTE FINAL:** Tiene como finalidad establecer la constante  $\beta=0.55261336$  volts de C.D., además de permitir el ajuste fino de la señal; ya que como se vió en la etapa anterior, el amplificador de instrumentación proporciona una amplificación de 120; esta tercera etapa permitió ajustar la amplificación deseada (119.3317422). Se usa un potenciómetro de 1k en 20 vueltas para tal efecto.

# Aplificador de Instrumentación

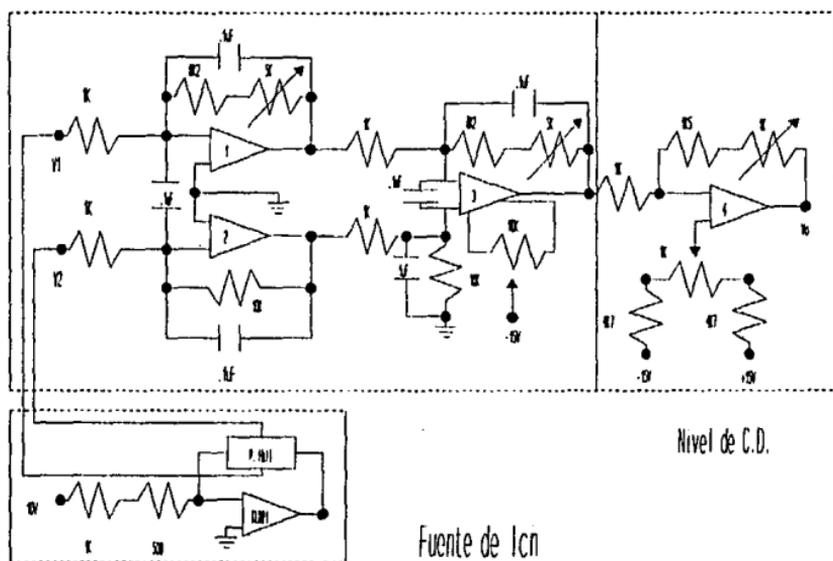


Figura C.1

## APENDICE D

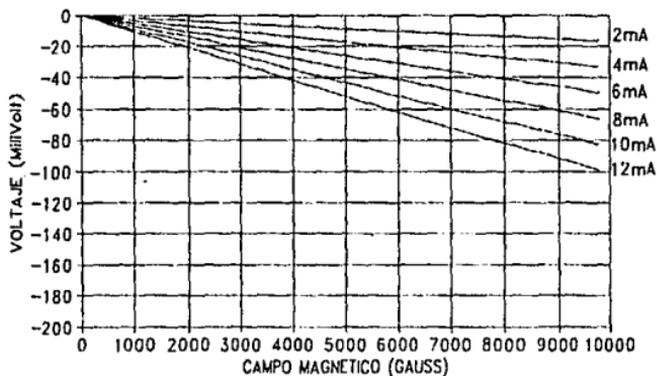
### Análisis del Medidor Contra Variaciones Térmicas Ambientales

Para comparar la respuesta del transductor ante cambios ambientales de temperatura, se utilizó el procedimiento descrito en el Apéndice C y se caracterizó al transductor a una temperatura de 39°C, usando una cámara de paredes adiabáticas, en la que se introdujo aire caliente en forma controlada, obteniéndose así la Tabla D.1 y sus respectivas Gráficas D.1 y D.2. Una regresión a la Tabla D.1, produce las ecuaciones de la forma:  $V = M_T B + b_T$ , a diferentes  $I_{cn}$  (tabla D.2).

B	I →											
	2mA	4mA	6mA	8mA	10mA	12mA	14mA	16mA	18mA	20mA	22mA	24mA
Gauss	mV	mV	mV	mV	mV	mV						
0100	-00.14	-00.27	-00.41	-00.54	-00.68	-00.82	-000.96	-001.11	-001.25	-001.39	-001.54	-001.69
0200	-00.31	-00.63	-00.94	-01.26	-01.58	-01.90	-002.22	-002.54	-002.87	-003.19	-003.52	-003.85
0300	-00.49	-00.97	-01.46	-01.95	-02.44	-02.93	-003.43	-003.92	-004.42	-004.91	-005.41	-005.91
0400	-00.66	-01.33	-01.99	-02.66	-03.33	-04.00	-004.67	-005.35	-006.02	-006.69	-007.37	-008.04
0500	-00.84	-01.68	-02.52	-03.36	-04.21	-05.06	-005.91	-006.75	-007.60	-008.45	-009.30	-010.15
0600	-01.02	-02.04	-03.06	-04.08	-05.10	-06.13	-007.15	-008.18	-009.21	-010.23	-011.25	-012.28
0700	-01.19	-02.39	-03.59	-04.79	-05.99	-07.19	-008.40	-009.61	-010.81	-012.01	-013.21	-014.42
0800	-01.38	-02.76	-04.12	-05.50	-06.88	-08.26	-009.64	-011.02	-012.40	-013.78	-015.16	-016.54
0900	-01.55	-03.10	-04.65	-06.02	-07.76	-09.31	-010.87	-012.43	-013.98	-015.53	-017.08	-018.64
1000	-01.72	-03.45	-05.18	-06.91	-08.64	-10.37	-012.10	-013.84	-015.57	-017.29	-019.02	-020.76
1200	-02.09	-04.16	-06.25	-08.33	-10.42	-12.51	-014.60	-016.68	-018.77	-020.84	-022.93	-025.02
1400	-02.43	-04.87	-07.31	-09.75	-12.19	-14.64	-017.08	-019.52	-021.97	-024.39	-026.82	-029.26
1600	-02.79	-05.57	-08.37	-11.16	-13.95	-16.75	-019.54	-022.33	-025.13	-027.90	-030.68	-033.48
1800	-03.12	-06.25	-09.37	-12.49	-15.62	-18.75	-021.87	-025.00	-028.11	-031.21	-034.33	-037.44
2000	-03.47	-06.94	-10.42	-13.89	-17.37	-20.84	-024.31	-027.79	-031.26	-034.70	-038.17	-041.64
2200	-03.80	-07.63	-11.45	-15.16	-19.08	-22.90	-026.71	-030.53	-034.34	-038.12	-041.93	-045.74
2400	-04.16	-08.33	-12.49	-16.66	-20.82	-24.99	-029.15	-033.32	-037.48	-041.59	-045.75	-049.96
2600	-04.51	-09.02	-13.53	-18.04	-22.53	-27.06	-031.57	-036.09	-040.60	-045.06	-049.55	-054.03
2800	-04.86	-09.72	-14.58	-19.44	-24.30	-29.17	-034.03	-038.89	-043.74	-048.55	-053.39	-058.24
3000	-05.21	-10.41	-15.26	-20.83	-26.04	-31.25	-036.46	-041.67	-046.87	-052.02	-057.21	-062.41
3200	-05.56	-11.11	-16.67	-22.23	-27.79	-33.35	-038.91	-044.46	-050.02	-055.50	-061.04	-066.59
3400	-05.91	-11.81	-17.72	-23.63	-29.53	-35.44	-041.35	-047.25	-053.15	-058.98	-064.87	-070.76
3600	-06.25	-12.50	-18.75	-24.99	-31.24	-37.49	-043.74	-049.99	-056.22	-062.39	-068.61	-074.84
3800	-06.59	-13.18	-19.77	-26.33	-32.95	-39.54	-046.13	-052.71	-059.30	-065.90	-072.35	-078.92
4000	-06.96	-13.92	-20.89	-27.85	-34.81	-41.78	-048.74	-055.70	-062.65	-069.52	-076.45	-083.39
4200	-07.31	-14.61	-21.91	-29.21	-36.51	-43.82	-051.11	-058.41	-065.70	-072.90	-080.18	-087.45
4400	-07.65	-15.28	-22.92	-30.56	-38.20	-45.85	-053.48	-061.12	-068.75	-076.29	-083.90	-091.52
4600	-08.00	-16.00	-23.99	-31.98	-39.97	-47.95	-055.93	-063.92	-071.89	-079.76	-087.71	-095.67
4800	-08.33	-16.66	-25.00	-33.33	-41.66	-49.99	-058.32	-066.65	-074.96	-083.17	-091.47	-099.77
5000	-08.67	-17.33	-26.00	-34.68	-43.33	-52.01	-060.67	-069.33	-077.99	-086.52	-095.15	-103.78
5200	-09.02	-18.02	-27.03	-36.04	-45.04	-54.06	-063.06	-072.06	-081.06	-089.93	-098.91	-107.88
5400	-09.34	-18.69	-28.03	-37.37	-46.72	-56.06	-065.40	-074.74	-084.06	-093.64	-102.56	-111.87
5600	-09.68	-19.36	-29.05	-38.73	-48.41	-58.09	-067.77	-076.44	-087.11	-096.64	-106.27	-115.90
5800	-10.02	-20.03	-30.06	-40.07	-50.09	-60.10	-070.12	-080.13	-090.13	-099.98	-109.96	-119.92
6000	-10.35	-20.70	-31.06	-41.41	-51.76	-62.11	-072.46	-082.81	-093.14	-103.34	-113.69	-123.95
6200	-10.69	-21.37	-32.06	-42.74	-53.43	-64.12	-074.79	-085.47	-096.14	-106.66	-117.30	-127.94
6400	-11.02	-22.03	-33.05	-44.06	-55.07	-66.09	-077.10	-088.11	-099.10	-109.94	-120.90	-131.88
6600	-11.35	-22.69	-34.04	-45.38	-56.72	-68.08	-079.42	-090.75	-102.08	-113.25	-124.54	-135.85
6800	-11.69	-23.35	-35.03	-46.70	-58.38	-70.06	-081.79	-093.40	-105.50	-116.53	-128.16	-139.78
7000	-12.00	-24.00	-36.01	-48.01	-60.01	-72.01	-084.00	-095.99	-107.98	-119.78	-131.72	-143.66
7200	-12.36	-24.70	-37.04	-49.38	-61.72	-74.06	-086.39	-098.72	-111.03	-123.27	-135.45	-147.73
7400	-12.67	-25.33	-38.00	-50.66	-63.33	-75.99	-088.66	-101.32	-113.96	-126.43	-139.04	-151.66
7600	-12.99	-25.97	-38.97	-51.96	-64.95	-77.93	-090.91	-103.89	-116.86	-129.64	-142.57	-155.51
7800	-13.32	-26.64	-39.96	-53.27	-66.59	-79.91	-093.22	-106.52	-119.81	-132.97	-146.16	-159.43
8000	-13.69	-27.38	-40.92	-54.56	-68.19	-81.83	-095.46	-109.09	-122.72	-136.11	-149.68	-163.25
8200	-13.96	-27.93	-41.89	-55.85	-69.81	-83.78	-097.73	-111.68	-125.62	-139.33	-153.23	-167.18
8400	-14.29	-28.87	-42.86	-57.14	-71.42	-85.72	-099.97	-114.25	-128.50	-142.53	-156.74	-170.96
8600	-14.61	-29.21	-43.81	-58.41	-73.01	-87.62	-102.21	-116.86	-131.38	-145.72	-160.26	-174.80
8800	-14.93	-29.85	-44.78	-59.70	-74.62	-89.55	-104.45	-119.37	-134.26	-148.91	-163.76	-178.60
9000	-15.25	-30.49	-45.74	-60.99	-76.22	-91.48	-106.71	-121.93	-137.14	-152.11	-167.29	-182.49
9200	-15.56	-31.12	-46.10	-62.24	-77.81	-93.36	-108.91	-124.47	-140.00	-155.29	-170.76	-186.27
9400	-15.91	-31.81	-47.70	-63.58	-79.45	-95.32	-111.17	-127.01	-142.84	-158.43	-174.11	-189.94
9600	-16.22	-32.42	-48.63	-64.81	-81.00	-97.18	-113.34	-129.51	-145.66	-161.55	-177.65	-193.74
9800	-16.53	-33.04	-49.59	-66.09	-82.58	-99.08	-115.53	-132.02	-148.47	-164.69	-181.08	-197.51

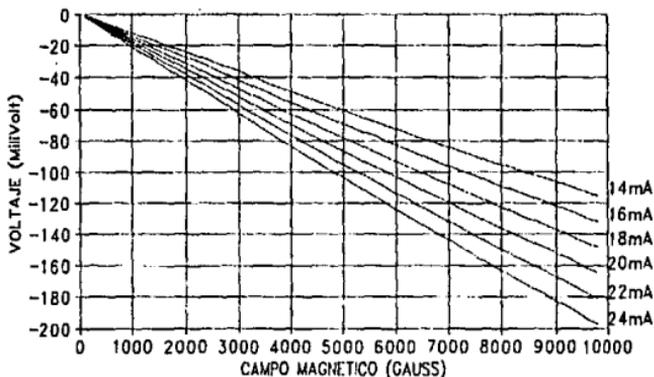
Tabla D.1

## CAMPO MAGNETICO VS VOLTAJE a 39 grados Centigrados



Gráfica D.1

## CAMPO MAGNETICO VS VOLTAJE a 39 grados Centigrados



Gráfica D.2

Icon (mA)	Temp. $39 \pm 1^\circ\text{C}$	Coef. de Corr.
2	$V = -0.00170 B - 0.07639$	0.999750
4	$V = -0.00340 B - 0.15156$	0.999748
6	$V = -0.00509 B - 0.22436$	0.999748
8	$V = -0.00679 B - 0.31471$	0.999747
10	$V = -0.00848 B - 0.40362$	0.999747
12	$V = -0.01018 B - 0.49143$	0.999746
14	$V = -0.01187 B - 0.58116$	0.999741
16	$V = -0.01356 B - 0.66077$	0.999749
18	$V = -0.01526 B - 0.76106$	0.999734
20	$V = -0.01692 B - 0.87405$	0.999734
22	$V = -0.01861 B - 0.96996$	0.999732
24	$V = -0.02029 B - 1.06619$	0.999734

Tabla D.2

De comparar las Tablas C.2 y D.2, es observable que las expresiones  $V$  vs  $B$  muestran una dependencia con la temperatura, - aunque es mínima- existe.

De los resultados a temperatura ambiente, fué posible seleccionar la óptima corriente de polarización de 10 mA. De la nueva evaluación (a  $39^\circ\text{C}$ , Tabla D.4) fué posible determinar el coeficiente de corrimiento térmico en cada una de las pendientes, de las expresiones mostradas en la Tabla C.2, el cual resultó ser

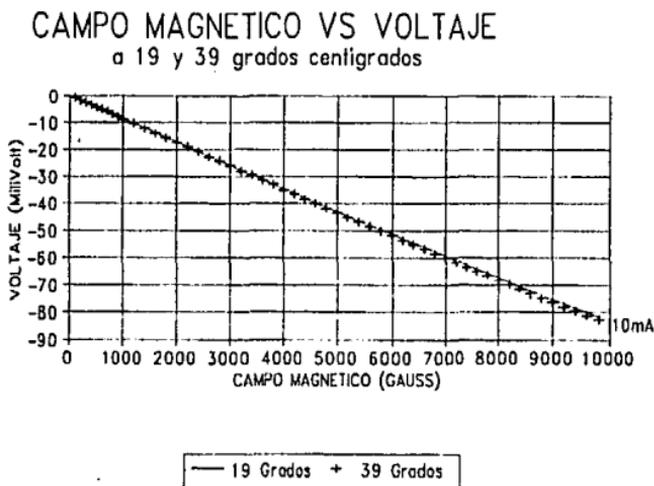
de 0.05411 %/°C; es decir:

$$M(T) = [1 + (T-19) (541.1 \times 10^{-6})] M_{amb} \quad (D.1)$$

Por otra parte, las pendientes en cada una de las expresiones de la Tabla C.2, presentan una razón de cambio constante con respecto a la corriente de polarización la cual fué de  $838 \times 10^{-6}$  (V mA)/gauss a 19°C; es decir:

$$M_{amb} = (838 \times 10^{-6}) I_{cn} \text{ [mA]} \quad (D.2)$$

En la Gráfica D.3, se muestran las Gráficas de V vs B, ambas para la corriente de polarización de 10 mA, pero para diferentes temperaturas (19 y 39 °C).



Gráfica D.3

Con base en los análisis anteriores y con valores de los coeficientes encontrados, se compensó el corrimiento térmico en la respuesta del transductor Hall, utilizando la dependencia del mismo con la corriente de polarización; es decir, fue necesario rediseñar la fuente de corriente de tal forma que la corriente de polarización de la punta Hall, -centrada en 10 mA a 19°C-, aumentara o disminuyera con las variaciones ambientales de temperatura en la proporción adecuada para contrarrestar dicho corrimiento térmico, logrando así una independencia con la temperatura en el intervalo de [5,50] °C.

Los cálculos de las proporciones de compensación se muestran a continuación para una elevación de temperatura de 10°C, a partir de los 19°C tomados como temperatura ambiente.

Partiendo del valor  $M_{amb} = 838 \times 10^5$  (volts/gauss) a  $I_{cn} = 10\text{mA}$  (Tabla C.2), la ecuación (D.1) predice que el valor de M a 29°C, para  $I_{cn} = 10\text{mA}$ , será de:

$$M(29^\circ) = [1 + 10(541.1 \times 10^{-6})] 838 \times 10^5 = 842.5 \times 10^5 \frac{\text{Volts}}{\text{gauss}}$$

Por otra parte, de la dependencia de  $M_{amb}$  con la corriente de polarización  $I_{cn}$ , a la temperatura constante de 19°C, (ecuación D.2), el valor  $M(29^\circ\text{C})$  corresponde al de  $M_{amb}$  cuando se usa el valor de  $I_{cn} = M(29^\circ\text{C}) / 838 \times 10^5 = 10.054 \text{ mA}$ .

De lo anterior se deduce que el incremento de  $4.5 \times 10^{-5} \text{ V/gauss}$  para  $M_{amb}$ , a  $I_{cn} = 10 \text{ mA}$  constantes, cuando la temperatura se eleva 10°C; corresponde el valor de  $M_{amb}$ , a  $T = 19^\circ\text{C}$  constantes, cuando el valor de  $I_{cn}$  se incrementa en  $54 \mu\text{A}$ . De acuerdo a esto, la



## APENDICE E

### Medición del Campo Magnético por el Método N.M.R.

A la fecha, la evaluación de  $B$  [kGauss] se ha hecho hasta con 6 cifras significativas utilizando el método de Resonancia Magnética Nuclear (NMR)<sup>3</sup>, por sus siglas en inglés (Nuclear Magnetic Resonance)-; es una técnica relativamente nueva que fue descubierta en 1945 y usada para el estudio de daños radiactivos, en 1949. Posteriormente se utilizó en muchos problemas fundamentales de Física, Química, y Biología con éxito, resultando una herramienta poderosa. Tal técnica consiste a grandes rasgos, en cambiar la energía de un sistema en movimiento periódico si una influencia externa, de la misma frecuencia, actúa sobre el mismo produciendo lo que se llama una resonancia.

En el caso particular de la técnica N.M.R., a un campo magnético permanente se le superpone otro perpendicular mucho más débil y oscilante, de tal manera que, un material con momento magnético nuclear bajo la influencia de dichos campos absorberá energía del sistema cuando la frecuencia del campo oscilante es igual a la frecuencia de precesión angular del núcleo.

Por ejemplo, considerando el núcleo de  $^1\text{H}$  (con un protón), éste tiene dos orientaciones en un campo magnético uniforme  $B$  (Figura E.1); uno paralelo al campo y otro antiparalelo al mismo. El primero es un estado de baja energía mientras que el otro es un estado de alta energía.

Frecuentemente, en la práctica, la frecuencia del oscilador se mantiene constante y B se hace variar dentro de un intervalo limitado.

La ecuación fundamental de dicha técnica, que relaciona la frecuencia electromagnética  $\nu$  con la intensidad del campo magnético B, es:

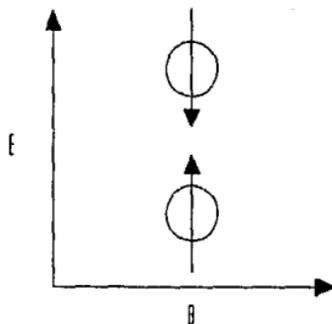


Figura E.1

$$\nu = \frac{\gamma B}{2\pi} \quad (E.1)$$

donde  $\gamma$  es la constante giromagnética nuclear.

La relación entre el campo magnético B y la frecuencia que se proporciona a  $B_{osc}$  es tal que, a manera de ejemplo, la absorción ocurre cuando la frecuencia es de 15 Mc/s para un campo 3000 gauss, en el caso del núcleo  $^1H$

En la (Figura E.2) se muestra un diagrama esquemático de un sistema N.M.R.

Una de las aplicaciones de lo anterior, es la de detectar cualquier inhomogeneidad entre los polos de un imán, en este caso el instrumento se conoce como fluxómetro magnético, el cual a través del principio N.M.R. proporciona el valor campo magnético B desconocido.

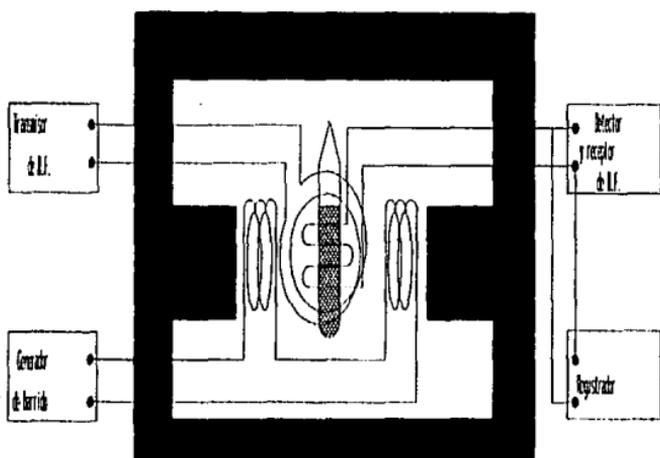


Figura E.2

El medidor posee una punta, en la cual hay dos bobinas inmersas en una resina (glicerina). Una de las bobinas es emisora de campo magnético  $B_{osc}$ , por lo que se conecta a un oscilador. La otra hace las funciones de detector (Figura E.3). La punta de prueba, al ser insertada exactamente entre los polos del imán; y variar la frecuencia del oscilador permite detectar en un osciloscopio cuando la absorción ocurre (Figura E.2). La frecuencia es entonces medida y puesto que la relación entre ésta y el campo  $B$  está dada por la ecuación (E.1), es posible obtener el campo magnético  $B$ ; a saber:

$$B \text{ (Kgauss)} = \text{Frecuencia (MHz)} \times (0.235) \text{ Kgauss/MHz} \quad (\text{E.2})$$

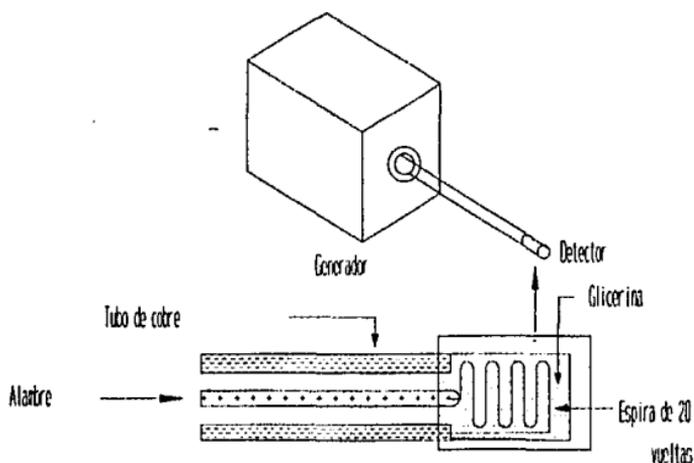


Figura E.3

Hasta la fecha, el acelerador de 700 keV del IFUNAM, posee un fluxómetro magnético para la determinación del campo producido por el analizador de energías, por lo que la rutina de operación del acelerador (en esta parte), ha consistido en que a cada valor de campo magnético aplicado, se le asocia una frecuencia de NMR, que a través de la ecuaciones (E.2) y (3.1), se obtienen los valores de energía utilizados en el haz. En la Tabla E.1 se muestran valores encontrados (en febrero de 1990), de energía en keV contra las frecuencias respectivas (kHz). En la elaboración de esta Tabla, dada la baja energía del acelerador, se utilizaron las resonancias

a 340, 480, 620 y 672 keV, de la reacción nuclear  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ , de acuerdo a la metodología siguiente:

Partiendo de la premisa que la energía cinética de las partículas aceleradas presenta un comportamiento parabólico con la rigidez magnética (ecuación 3.1); y además se conocen con certeza las frecuencias de N.M.R. asociadas a las resonancias anteriores, al graficar estos 4 pares de coordenadas en los ejes B (Kgauss) vs E (KeV) se encuentra que prácticamente estos 4 puntos están alineados en una recta y forman parte de la región menos curva de la ecuación de rigidez magnética; permitiendo efectuarse con muy buena aproximación la segmentación lineal de la ecuación 3.1 en el intervalo de 300 a 800 keV. Conocida la ecuación correspondiente a este único segmento en esa región de energía, los valores de la Tabla E.1 son reproducibles.

El método, también permitió el conocimiento del radio de curvatura del haz desviado  $22.5^\circ$  por el analizador, hacia la cámara azul, dato constante de valor 127.26 cm, de gran interés según lo mencionado en la Sección 3.1.

Para ilustrar la metodología descrita, se presentan en la Gráfica E.1, tanto la recta correspondiente a la Tabla E.1 (a partir de la cual se dedujo el valor del radio de curvatura del analizador), como la curva real de la ecuación de rigidez magnética obtenida con el dato más confiable de dicho radio de curvatura. Esta última es de gran relevancia a los propósitos de este trabajo, ya que es la gráfica patrón de la dependencia de la energía de las partículas con el campo magnético del analizador, contra la cual se

compararon los resultados obtenidos en esta tesis.

Como comentario final a la medición de campos magnéticos por la técnica de N.M.R., se puede asegurar que si bien ésta no es una forma directa para conocer la energía del haz existente, sí lo cuantifica con una mayor precisión.

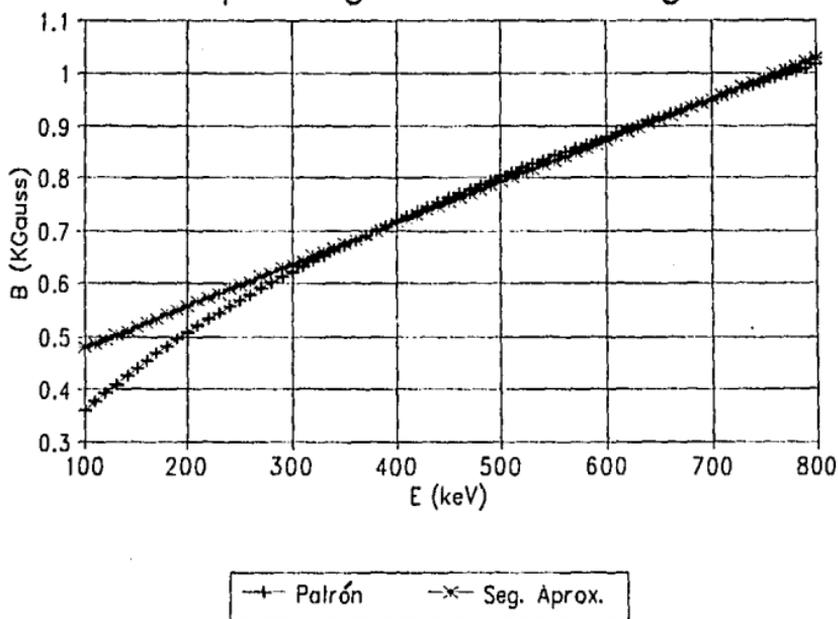
Energía de haz de protones

Energía keV	Frec. kHz	B kgauss	Energía keV	Frec. kHz	B kgauss
100	2038.3	0.478721	460	3243.2	0.761707
110	2071.7	0.486565	470	3276.7	0.769575
120	2105.2	0.494433	480	3310.2	0.777443
130	2138.7	0.502301	490	3343.6	0.785288
140	2172.2	0.510169	500	3377.1	0.793156
150	2205.6	0.518014	510	3410.6	0.801024
160	2239.1	0.525881	520	3444.1	0.808891
170	2272.6	0.533749	530	3477.5	0.816736
180	2306.0	0.541594	540	3511.0	0.824604
190	2339.5	0.549462	550	3544.5	0.832472
200	2373.0	0.557330	560	3577.9	0.840316
210	2406.5	0.565198	570	3611.4	0.848184
220	2439.9	0.573042	580	3644.9	0.856052
230	2473.4	0.580910	590	3678.4	0.863920
240	2506.9	0.588778	600	3711.8	0.871764
250	2540.3	0.596622	610	3745.3	0.879632
260	2573.8	0.604490	620	3778.8	0.887500
270	2607.3	0.612358	630	3812.2	0.895345
280	2640.8	0.620226	640	3845.7	0.903212
290	2674.2	0.628070	650	3879.2	0.911080
300	2707.7	0.635938	660	3912.7	0.918948
310	2741.2	0.643806	670	3946.1	0.926793
320	2774.6	0.651511	680	3979.6	0.934661
330	2808.1	0.659519	690	4013.1	0.942529
340	2841.6	0.667386	700	4046.5	0.950373
350	2875.1	0.675254	710	4080.0	0.958241
360	2908.5	0.683099	720	4113.5	0.966109
370	2942.0	0.690967	730	4147.0	0.973977
380	2975.5	0.698835	740	4180.4	0.981821
390	3008.9	0.706679	750	4213.9	0.989689
400	3042.4	0.714547	760	4247.4	0.997557
410	3075.9	0.722415	770	4280.8	1.005401
420	3109.3	0.730259	780	4314.3	1.013269
430	3142.8	0.738312	790	4347.8	1.021137
440	3176.3	0.745995	800	4381.2	1.028982
450	3209.8	0.753863			

Tabla E.1

Energías de un haz de protones desviados 22.5° contra frecuencias de NMR y campos magnéticos asociados en el analizador.

## Campo Magnético vs Energía



Gráfica E.1

## Referencias.-

1. Rivera H.M., Fernández E.F. y Morales P.P "Instrumentación Asociada a una Balanza Termomagnética" Vol. La instrumentación en la Física, No. 1, pp. 171-184, Julio de 1992; Ed. Universitaria Potosina, J. Urias-IICO, U.A.S.L.P.
2. Electronics Circuits and Applications. S.D Senturia, B.D. Wedlock, Mass. Institute Of Tecnology. John Wiley & Sons, Inc. 1975
3. An Introduction to Electron Spin Resonance, Terence L. Squires. Academics Press, N.Y. 1964.
4. Identificación Espectrométrica de Compuestos Orgánicos. Robert M. Silverstein, G. Clayton Bassler y Terence C. Morrill. Edit. Diana México, Enero 1980, Sec. 4.