

ESPECTROGRAFO MAGNETICO ABSOLUTO PARA MEDIDAS
PRECISAS DE ENERGIAS NUCLEARES

F. Alba*, H. del Castillo, A. Dacal, R. Roos* y M. Mazari*.

Instituto de Física, Universidad Nacional de México

(Recibido: 19 agosto 1968)

RESUMEN

Se ha diseñado y construido un espectrógrafo magnético absoluto de 180° de deflexión para la medida absoluta de valores Q de reacciones nucleares. Sus características principales son: radio de curvatura medio 100 cm, relación de energías $E_{max}/E_{min} = 1.2$, entrehierro de 19 mm, campo máximo 12000 gauss. Sin romper el vacío es posible medir el campo magnético cada 10°, así como la distancia entre el blanco y el índice de la placa fotográfica. Los errores en la medida de la energía de las partículas alfa del ^{210}Po se estiman del orden de 400 eV.

* Comisión Nacional de Energía Nuclear. México.

ABSTRACT

A 180° absolute magnetic spectrograph has been designed and built for measuring nuclear reaction Q values. Its principal features are: 100 cm mean radius of curvature; energy ratio $E_{max}/E_{min} = 1.2$; 19 mm gap; maximum field 12000 gauss. The field may be measured every 10° and the distance from the target to the plate index may be measured, all without opening the vacuum. Errors in the measurement of ^{210}Po alpha particle energies are estimates to be about 400 eV.

INTRODUCCION

Desde hace tiempo se ha desarrollado un esfuerzo considerable en aumentar la precisión de los valores de las masas nucleares, tanto por los métodos de la espectroscopía de masas, como por los calculados a partir de los valores Q de reacciones nucleares^{1,2,3}.

Las discrepancias existentes en las medidas de valores Q se deben, tanto al dispositivo experimental, como al patrón de calibración empleado. En el dispositivo experimental generalmente se emplean sectores magnéticos y las partículas tienen que pasar a través del campo disperso del sector, lo que puede introducir algún error. Por lo que respecta a los patrones de calibración, están siendo constantemente medidos, incrementando en número y en precisión⁴.

Estos son algunos de los motivos que nos impulsaron a construir un espectrógrafo magnético para las medidas absolutas de valores Q de reacciones nucleares, que tenga una alta resolución en el espectro de energías; aunque esta se limite a una parte pequeña de dicho espectro. También puede emplearse este espectrógrafo en la medida precisa de las energías de partículas alfa emitidas por sustancias radiactivas que son empleadas como patrón para la medida de valores Q en muchos laboratorios.

De las varias soluciones factibles, y considerando los equipos existentes con finalidades similares^{5,6,7}, se decidió construir un espectrógrafo de hierro con

bajo contenido de carbón, con 180° de deflexión y un radio de curvatura medio de 100 cm, que pudiera acoplarse a aceleradores tipo tandem de 12 MeV o más, sin entrar en la región de saturación del hierro.

DISEÑO

a) *Geometría*

El espectrógrafo como se mencionó anteriormente es de 180° de deflexión, por lo que las partículas en su trayectoria desde el blanco hasta la incidencia sobre la placa fotográfica se encuentran siempre dentro del campo magnético uniforme. El blanco y la placa fotográfica están localizados en los extremos del diámetro como se ve en la figura 1.

La selección del radio de 100 cm, para la trayectoria central se debió a lo siguiente: Consideramos conveniente aumentar el radio de nuestro instrumento respecto de equipos similares, y obtener la máxima precisión posible en el tallado de los polos sin sobrepasar la capacidad máxima de que disponemos en nuestros talleres.

Elegimos que el haz entre el espectrógrafo, perpendicular a la superficie de los polos, de tal manera que no es desviado por el campo magnético antes de efectuarse la reacción. Esto tiene la ventaja de que podemos conocer con precisión el lugar de incidencia del haz sobre el blanco, pero tiene la desventaja de que las partículas deflectadas salen en una dirección que forma un ángulo de 90° con la dirección del haz y la Q de la reacción depende del coseno de este ángulo, teniendo una máxima variación precisamente a 90° .

Haciendo las correcciones apropiadas y midiendo con precisión dicho ángulo, consideramos que la solución elegida es la que presenta las máximas ventajas, ya que permite además medir en forma absoluta con gran precisión y facilidad el radio de las trayectorias, y se puede conocer además con gran precisión el campo magnético a que han estado sometidas.

El ancho de las pistas es de 22 cm, con 18 cm efectivos, lo que permite cubrir en una sola placa fotográfica intervalos de energía de $E_{\max}/E_{\min} = 1.2$.

Para reducir el efecto de campo disperso en las fronteras de las pistas, seleccionamos un entrehierro de 19 mm, valor que nos asegura un campo homogéneo en los 18 cm efectivos de la pista. Además, con un entrehierro relativamente pequeño se tiene la ventaja de poder disminuir el número de ampere-vueltas necesarios para producir los campos deseados.

El imán trabaja normalmente con enfoque a primer orden, pero con una lente apropiada⁸ se logra en una pequeña región de la placa una resolución mucho mayor.

El espectrógrafo tiene un ángulo sólido de aproximadamente 4×10^{-4} estereoradianes para un ángulo de aceptación de $\pm 3^\circ$ y 1 cm de ancho en la placa.

b) *Campo magnético*

El circuito magnético se diseñó tratando de conservar el área transversal de fierro dentro de un valor que evitara la saturación. Con la finalidad de facilitar las medidas del campo magnético durante el funcionamiento, y evitar un aumento considerable en el volumen y peso de las piezas, el circuito magnético se cierra por dentro o sea hacia el centro de curvatura de la trayectoria, como se ve en la figura 1.

c) *Diseño mecánico*

Tomando en cuenta las dimensiones del instrumento y su funcionamiento asociado con aceleradores de partículas, la posición mostrada en la figura 1 se consideró como la más conveniente para operar el espectrógrafo.

Las piezas polares se soportan en una estructura, como la mostrada en la figura 1. Una de las piezas permanece fija en la estructura y la otra es móvil, con la finalidad de tener acceso a la pista. En la pieza fija hay unas guías que orientan la pieza móvil y garantizan el acoplamiento de ambas en la misma posición. Para evitar que dichas guías soporten todo el peso de la pieza móvil (4.5 toneladas), ésta se encuentra suspendida de un conjunto de resortes concéntricos, que permiten ajustar la altura y evitar flexiones en las guías. La estructura está apoyada en 4 gatos para nivelarla. La caja de vacío del instrumento, está formada por unas soleras de aluminio de fabricación especial y las mismas piezas polares como se muestra en la figura 2. En la solera de aluminio hay taladros

cada 10° que permiten introducir flúxmetros de resonancia magnética nuclear, para la planimetría en vacío del campo magnético. Las sondas van en unos tubos de acero inoxidable y latón, como se puede apreciar en la figura 3.

Cuenta el aparato con un portablancos rotatorio, figura 4, y además se cuenta con un soporte fijo para montar emisores de partículas alfa.

Existe además una caja portaplacas que contiene 8 placas fotográficas que se usan como detector de las partículas positivas, las cuales se pueden introducir sucesivamente en la pista, sin necesidad de romper el vacío. Su unión con el aparato es a través de una válvula de cortina, que permite independizar la caja portaplacas del resto del instrumento.

Las dimensiones de la placa fotográfica son de 25 cm de largo por 2 cm de ancho, se coloca de manera que su normal forme un ángulo de 27° con las trayectorias. Por medio de un haz luminoso se produce una marca en la región central de la placa, que se emplea como referencia para localizar la posición de cada uno de los trazos.

d) *Circuito eléctrico*

Las bobinas están colocadas en cada pieza polar y constan cada una de 32 vueltas de tubo de cobre electrolítico refrigerado por agua.

La alimentación de corriente es similar a la usada en otros electroimanes^{9,10} y fué adaptada para las necesidades de este espectrógrafo. El esquema de bloques se muestra en la figura 5. Consta de las siguientes partes principales:

Fuente de poder y rectificador trifásico

Amplificador y regulador de corriente

Protección

Control y medición del campo magnético

El rectificador trifásico a base de diodos de silicio enfriados por agua, se alimenta de un transformador variable, que a su vez es controlado por un servomecanismo actuado por un amplificador "Brown". Este sirve para hacer ajustes burdos a las variaciones muy lentas del voltaje de la red, en el transcurso del día.

La corriente del imán se regula con un grupo de transistores en paralelo, capaces de disipar 18 KW, que están enfriados por agua y son polarizados por un amplificador de corriente con tres circuitos básicos de retroalimentación.

Un circuito de retroalimentación rápido utiliza el voltaje de caída en una resistencia de manganín de 0.01 ohm y lo compara con el voltaje de referencia. La diferencia se aplica a la entrada del amplificador "Brown" y la tensión recortada y amplificada pasa a un discriminador de fase que a su vez polariza el amplificador de corriente y el regulador de 400 amperes. De esta manera se corrigen variaciones rápidas a consecuencia de transitorios en la red de alimentación.

Existe un circuito que provee un retorno de velocidad media, para corregir el rizo de la fuente de poder. Este circuito toma una muestra del voltaje de la fuente de poder y la amplifica con un amplificador convencional de corriente alterna y la manda al punto común de retroalimentación.

La retroalimentación lenta se efectúa por medio de un integrador electromecánico operado por el amplificador "Brown". El voltaje del integrador se obtiene de los extremos del imán y se aplica al punto común del amplificador de corriente. Con este circuito se corrigen las variaciones lentas de la tensión de la red.

Un relevador protege el regulador de corriente cuando el voltaje entre emisores y colectores excede de 15 volts. Un termostato calibrado a 75°C los protege en caso de fallar la circulación del refrigerante.

CONSTRUCCION

Las piezas polares se maquinaron en las superficies mostradas en la figura 6, con un torno radial, al cual se adaptó posteriormente un rectificador para garantizar un error no mayor de 0.03 mm en la cara de las piezas. El paralelismo entre las piezas que forman el entrehierro del imán fué comprobado cuidadosamente cada 5° con un medidor mecánico y posteriormente se midió la uniformidad del campo con flúxmetros de resonancia magnética nuclear en seis puntos a lo ancho de la pista.

Las bobinas se construyeron sobre las piezas polares.

VACIO

El vacío del instrumento se logra por medio de una bomba de difusión de aceite de 500 litros/seg. Se emplean bombas mecánicas para el bombeo previo de la caja del portaplaques y para el bombeo diferencial entre los anillos de hule que se encuentran en las diferentes partes del sistema de vacío. El tener un sistema independiente para la caja que contiene las placas fotográficas permite el cambio de las mismas y su secado sin afectar notablemente el vacío al que trabaja el aparato y que es del orden de 1×10^{-5} mm de Hg en el punto más alejado a la bomba de difusión.

Como ya se mencionó, el sello de vacío se logra con la solera de aluminio y las dos piezas polares. En cada pieza polar se comprimen dos anillos de hule cuyas cajas van a lo largo de toda la solera de aluminio.

MEDIDAS DE CAMPO

Cada 10° a lo largo de la solera de aluminio, se encuentran distribuidos 18 flúxmetros de resonancia magnética nuclear que se introducen en dirección radial permitiendo medir el campo magnético en cualquier instante sin romper el vacío. Un flúxmetro colocado en la posición 5° es el que sirve para controlar el campo magnético durante los experimentos, en esta pequeña región el entrehierro se dejó un poco menor durante el pulido para aumentar ligeramente el campo y evitar interferencias de este flúxmetro con los otros. La medición del campo magnético se puede hacer para diferentes valores del radio de la pista de una manera continua.

La frecuencia de los flúxmetros se mide con un frecuencímetro que nos permite controlar variaciones menores de ± 0.25 Kc/seg durante los experimentos.

Se corrigió el campo tallando cuidadosamente las pistas después de planimetrías sucesivas. Cabe mencionar que el imán se homogeneizó a un campo correspondiente a 3300 gauss aproximadamente. Las medidas del campo magnético antes y después del tallado se muestran en la figura 7. En la figura 8 se muestran las planimetrías del campo que se obtienen para valores mayores y menores al anterior.

Se aplica la corrección de Hartree¹¹ para encontrar el campo efectivo a partir de las medidas experimentales en los diferentes puntos de la pista y tomada a partir del valor medio del campo, se encontró que siempre es menor que 2.3×10^{-4} del campo promedio. La reproducibilidad del imán fué verificada con planimetrías sucesivas y se logra con un método de reciclado apropiado consistente en la desmagnetización del imán seguida de la elevación del campo al máximo permitido de 12000 gauss y regreso al campo de trabajo.

MEDIDA DEL RADIO

La distancia de la marca luminosa a la rejilla limitadora del emisor de alfas, o a la región de incidencia del haz en el blanco, según el caso, se mide por medio de un anteojo montado en un banco óptico que emplea barras patrón y tornillos micrométricos. La observación se hace a través de ventanas de vidrio con superficies paralelas y ópticamente planas, y orificios practicados en las piezas polares, como se indica en la figura 1.

Se midió el ángulo que forma la normal a la ventana con el eje óptico del anteojo, siendo este menor de 3 minutos en cada caso.

El ángulo que forman los ejes del anteojo en las dos posiciones que ocupa en el banco óptico, debido a defectos de dicho banco, se determinó empleando dos barras idénticas de 200 cms, una colocada en el banco óptico y la otra colocada paralela a esta a 102 cms de distancia.

ERRORES

Dadas las características del instrumento, se puede decir que los errores que más van a influir son los mencionados en la Tabla 1.

T A B L A 1

	Error KeV	Error $B \cdot \rho$ (gauss · cm)
Medida del campo magnético	0.200	6.5
Asimetría en la fuente y en la placa	0.200	6.5
Corrección de Hartree	0.080	2.2
Apreciación de la señal en el flúxmetro	0.150	4.7
Distancia entre el índice y el blanco o rejillas limitadoras	0.060	1.7
Constantes usadas	0.060	1.7
Lectura de las placas fotográficas al microscopio	0.060	1.7
Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores	0.350	11.0

También es posible hacer correcciones a los resultados, debidas al ángulo de aceptación de las partículas en una reacción, y al error en el paralelismo entre los ejes del anteojo en sus dos posiciones.

Se puede decir que el instrumento tiene la posibilidad de medir energías de fuentes de calibración, valores "Q" de reacciones nucleares, umbrales, resonancias, etc., con errores menores en muchos casos a 500 eV. Los resultados preliminares para probar la calidad del instrumento fueron presentados en la tercera Conferencia Internacional de Masas Atómicas¹².

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer al Sr. José Manuel Ramos su colaboración en el diseño y dibujos; y al Sr. Jorge Dorantes por su ayuda en la parte de electrónica.

REFERENCIAS

1. *Nuclear Masses and Their Determination*, Ed. por H. Hitenberger, Pergamon Press, (1957).
2. *Proceedings of the International Conference on Nuclidic Masses*, Ed. por H.E. Duckworth, University of Toronto Press. (1960).
3. *Proceedings of the Second International Conference on Nuclidic Masses*, Ed. por W.H. Johnson, Jr., Vienna Austria, Springer-Verlag Wien, New York, (1963).
4. Jerry B. Marion, *Review of Modern Physics* **38**, 660 (1966).
5. Buechner, Strait Stergiopoulos y Sperduto, *Phys.Rev.* **74**, 1569 (1948); Snyder, Ruben, Fowler y Lauritsen, *Rev.Sci. Instr.* **21**, 852 (1950); Brown, Craig y Williamson, *Rev.Sci. Instr.* **22**, 952 (1951).
6. K.F. Famularo y G.C. Phillips, *Physical Review*, **91**, 1195, (1953).
7. Von H. Winkler y W. Zych, *Helv. Phys. Acta* **34**, 449, (1961).
8. G. López, M. Jiménez, C. Vergara y F. Alba, *Bull. Am. Phys. Soc.* **12**, 636 (1967).
9. Richard L. Garwin, *Rev.Sci. Instr.* **29**, 223, (1958).
10. R. L. Garwin, D. Hutchinson, S. Penman y G. Shapiro, *Rev.Sci. Instr.* **30**, 105 (1959).
11. D.R. Hartree, *Proc. Cambridge Phil. Soc.* **21**, 746, (1923).
12. F. Alba, A. Dacal, H. del Castillo, R. Roos, A. Tejera y M. Mazari, *Proceedings of the Third International Conference on Atomic Masses*, Winnipeg, Canadá. Ed. por R.C. Barber, University of Manitoba Press, 569, (1967).

ESPECTROGRAFO ABSOLUTO PARA MEDIDA DE VALORES Q, U.N.A.M.

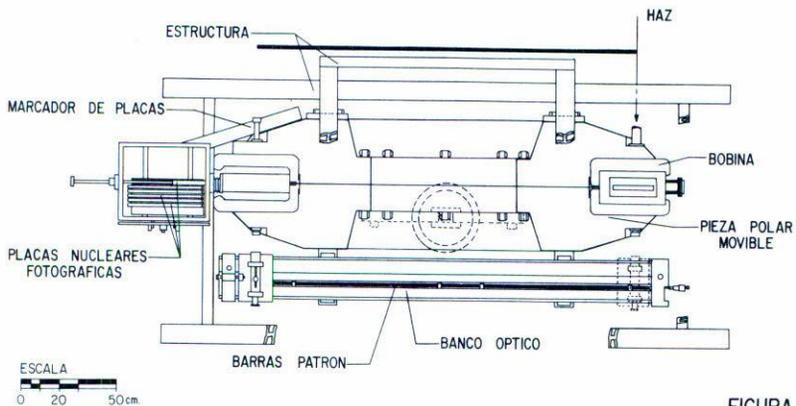
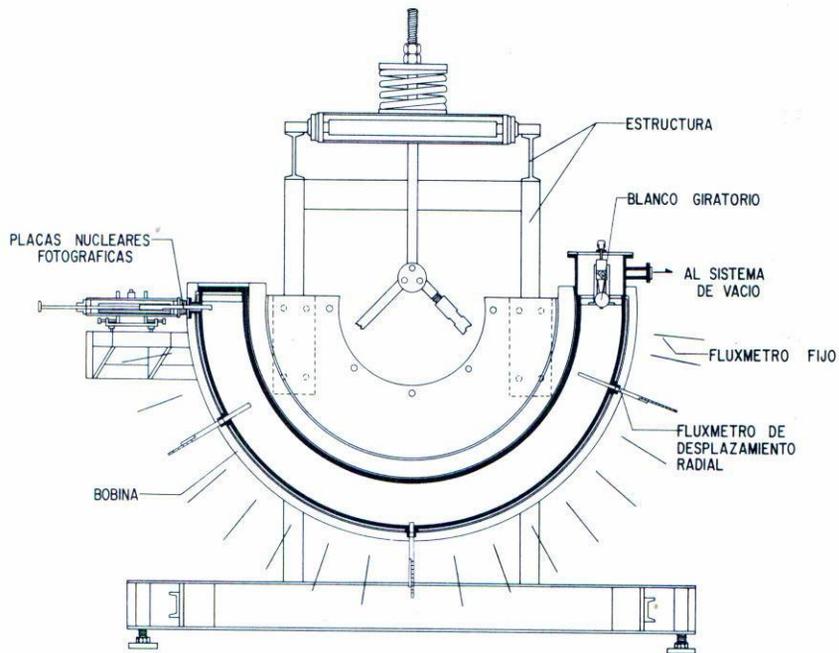
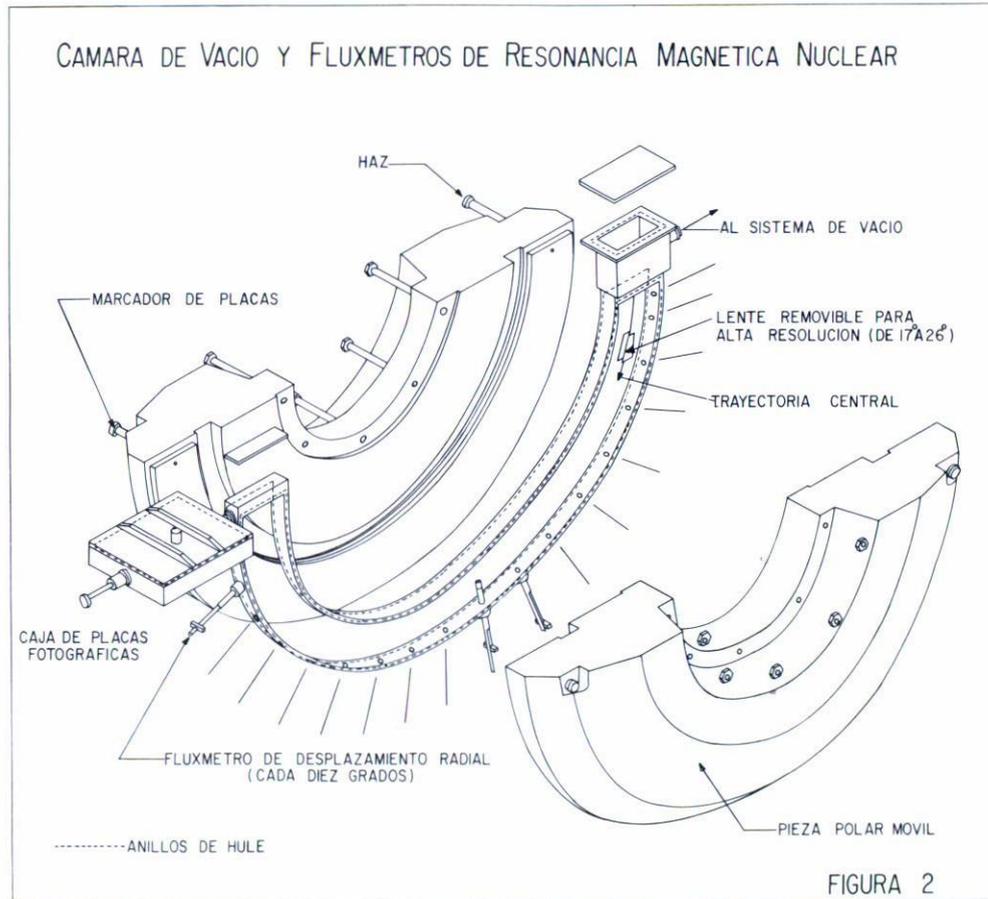


FIGURA I



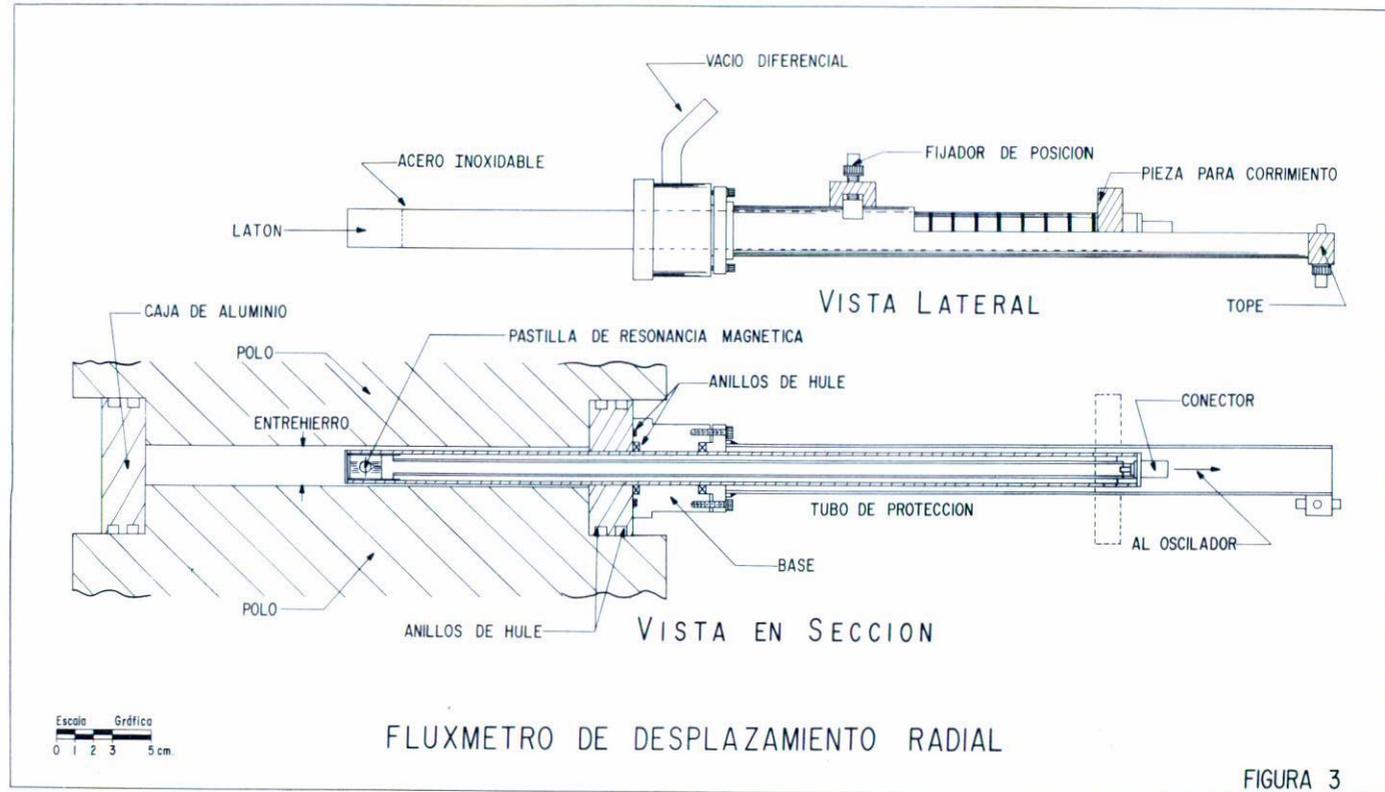
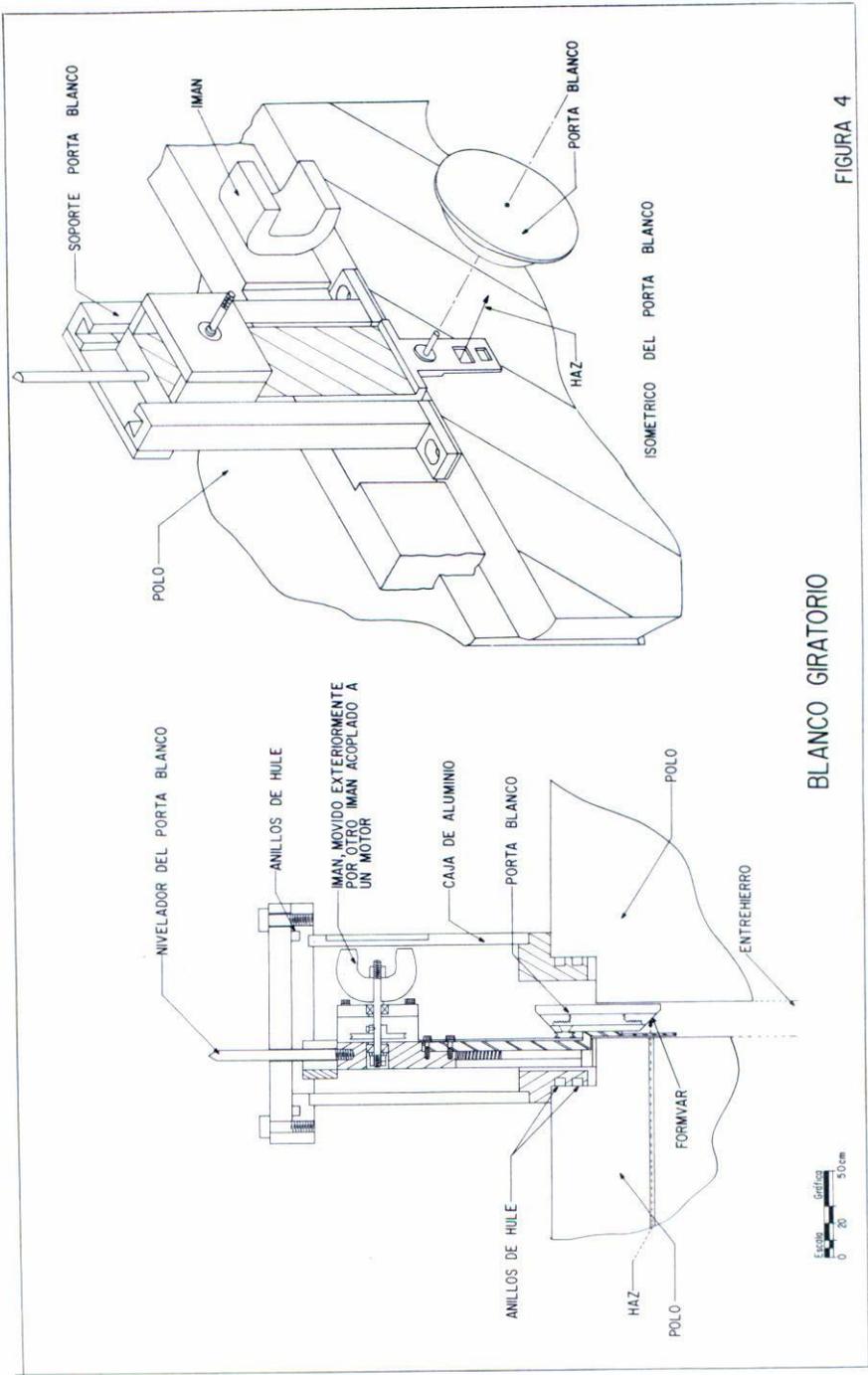


FIGURA 3



BLANCO GIRATORIO

FIGURA 4

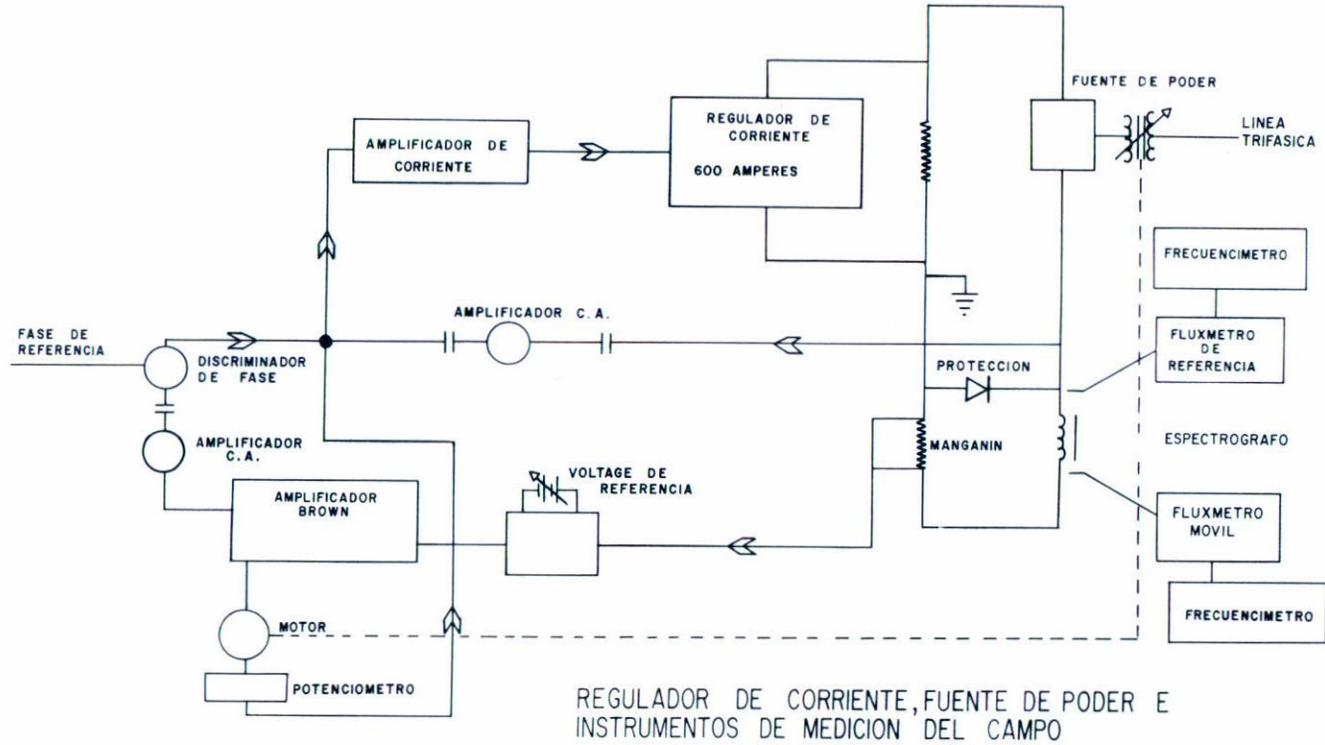
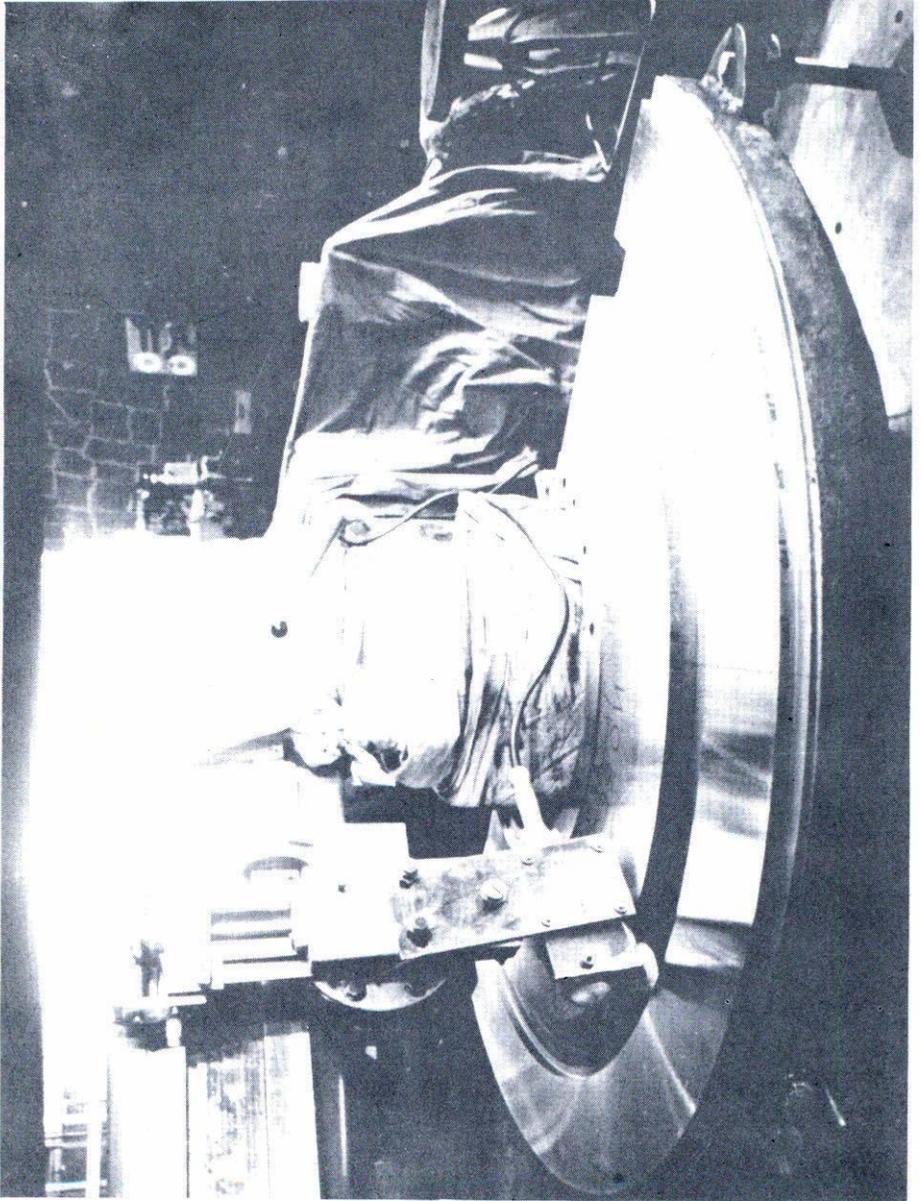


FIGURA 5



Planimetria antes y despues del pulido de las piezas polares

ΔB gauss

antes (a) $B = 3314.38$
despues (b) $B = 3298.02$

