

# Imán deflector para deuterones de 28 MeV y alfas de 56 MeV

H. J. ERRAMUSPE, M. J. SAMETBAND, S. MAYO, N. A. FAZZINI.

*Departamento de Física Nuclear, CNEA.*

Recibido el 6 de noviembre de 1969

Se informa sobre el cálculo y construcción de un imán deflector de un haz de deuterones de 28 MeV y partículas alfa de 56 MeV. Se usa un método de cálculo que elimina el proceso iterativo, abreviando los cálculos. Se comparan soluciones de alta tensión y baja corriente con las correspondientes a la hipótesis inversa. Se incluye diseño y construcción de los sistemas de excitación, refrigeración y alarma.

## Introducción

SE HA PROCEDIDO al diseño y construcción de un imán deflector para el sistema de transporte del haz del Sincrociclotrón de Buenos Aires. El mismo tiene por objeto disminuir el fondo de radiación, de neutrones y gamas especialmente, que es muy inconveniente para las mediciones de reacciones nucleares. Estas radiaciones tienen la dirección del haz externo del ciclotrón, por la conducción de las mismas por el tubo de transporte del haz; hay además un fondo intenso que pasa a través de la abertura que conecta el recinto de medición con el del ciclotrón. Este problema es común a todos los aceleradores, y la solución que se adoptó es la de colocar el imán que defleca el haz de manera tal que la cámara de dispersión queda situada fuera del cono de radiación. Ulteriormente contempla la conveniencia de disponer de dos salidas de haz externo, la directa para experiencias de radioquímica y biología, y la desviada por el imán, para física nuclear. Se pueden tener así dos experiencias montadas simultá-

neamente.

## 1 - Diseño del imán

Se eligió un imán con campo magnético uniforme y entrada y salida del haz normales. Los bordes de las piezas polares están preparados para colocar shims, a fin de variar el ángulo de entrada del haz y lograr así efectos de enfoque de segundo orden. Dadas las características del recinto de medición y de la mejor ubicación de la cámara de dispersión para facilidad de operación y para mínimo fondo de radiación, se eligió un ángulo de deflexión de  $\varphi = 37^\circ$ .

Para describir en forma matricial las trayectorias de las partículas, llamaremos  $r$  al desplazamiento radial de una trayectoria con respecto al rayo central,  $r'$  a la divergencia de  $r$ , o sea su derivada respecto del camino recorrido,  $s$ .

Además,  $y$  es el desplazamiento en la dirección vertical, perpendicular al plano medio,  $y'$  es su derivada respecto de  $s$ .

En ese caso la relación matricial radial es

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ r_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & r_0 \sin \varphi \\ -\frac{\sin \varphi}{r_0} & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_1' \end{bmatrix}$$

donde  $r_0$  es el radio del rayo central

$$r_0 = \frac{1}{z e B} (2 m E)^{1/2}$$

Los subíndices 1 y 2 indican el haz a la entrada y a la salida del imán deflector, respectivamente.

$z$  es el número de cargas de las partículas.

$e$  la carga del electrón, en Coulomb.

$B$  la inducción magnética, en  $Wb/m^2$

$m$  la masa de la partícula, en kilogramos.

$E$  la energía de la partícula, en joules.

El movimiento vertical está descrito por la relación:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ y_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \varphi i \rho \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_1' \end{bmatrix}$$

Como se ve, en el plano vertical no hay enfoques de modo que el imán, en ese sentido, se comporta como una longitud de desplazamiento  $\varphi$ .

En cambio en el plano radial hay un leve enfoque, ya que la ecuación radial equivale al producto de tres matrices que representan respectivamente espacio de desplazamiento, una lente delgada, y espacio de desplazamiento:

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ r_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_0 \tan \varphi/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\sin \varphi}{r_0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & r_0 \tan \varphi/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_1' \end{bmatrix}$$

La lente delgada equivalente, de enfoque, y de potencia  $-\sin \varphi / r_0$ , está situada en el campo magnético en la intersección de las trayectorias de entrada y salida (fig. 1).

El índice fue calculado para desviar deuterones de 27.3 MeV o partículas alfas de 54.6 MeV. Se fijó la inducción magnética en 12.5 KGauss ( $1.25 Wb/m^2$ ) por consideraciones de trabajo adecuado del hierro y requerimientos razonables sobre el generador de corriente. Con estos valores, el radio  $r_0$  de la trayectoria central es, en metros:

$$r_0 = 0.85$$

Para el cálculo de la excitación eléctrica se usó la fórmula:

$$\mathcal{R} \Phi = \mathcal{F} = \mathcal{H} \cdot l_m$$

$$\mathcal{R} \Phi = \frac{l_m}{\mu s} \quad \text{reluctancia magnética}$$

$\Phi$  flujo magnético

$\mathcal{F}$  fuerza magnetomotriz

$\mathcal{H}$  campo magnético

$l_m$  longitud del circuito magnético

$\mu$  permeabilidad magnética

$s$  superficie de la sección transversal

La reluctancia magnética total es

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_h + \mathcal{R}_e$$

$\mathcal{R}_h$  corresponde al hierro,  $\mathcal{R}_e$  al entrehierro. Como para  $H = 12.5$  KG es  $\mu > 2000$  para hierro ARMCO, valor obtenido en manuales y verificado en mediciones del lazo de histéresis realizados en el laboratorio, resulta

$$\mathcal{R}_h \ll \mathcal{R}_e \quad \therefore \quad \mathcal{R} = \mathcal{R}_e = \frac{g}{\mu_0 s}$$

$g = 0.08$  m. longitud del entrehierro

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  V seg / Am' permeabilidad magnética del vacío.

Resulta así:

$$(Ni) = \frac{g B}{\mu_0} = 7.96 \times 10^4 \text{ A} \cdot v$$

Siendo  $N$  número de vueltas e  $i$  intensidad de corriente.

Por las condiciones antes dadas resulta una pieza polar de la forma de la Fig. 2, con un área  $S_p = 0.1502$  m<sup>2</sup>, con un  $l_m$  del orden de 0.55 m.

La potencia eléctrica  $U$  que se requiere es:

$$U = \frac{\rho (Ni)^2 L^2}{V}$$

$\rho$  resistividad del material de las bobinas.

$L$  longitud de la espira media.

$V$  volumen de ambas bobinas.

La aplicación directa de esta fórmula requiere un cálculo iterativo. Se puede simplificar éste si se

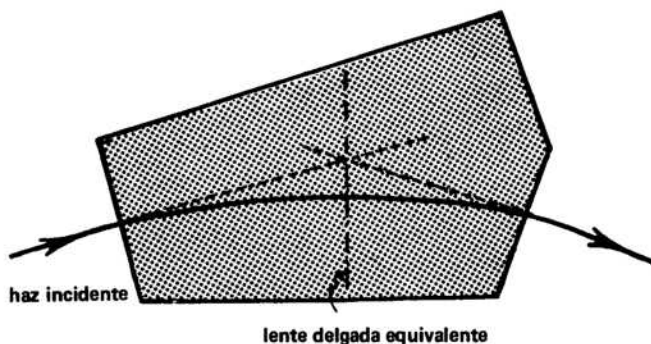


Fig. 1

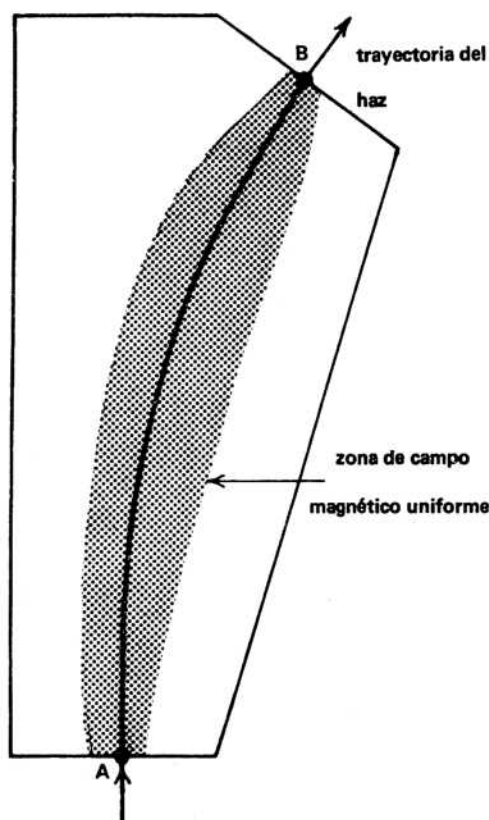


Fig. 2 Pieza polar del imán deflector y zona de campo magnético uniforme en la misma.

define el área neta de bobina  $S_{bn}$  y el área neta de bobina por unidad de longitud.

$$s_{bn} = \frac{S_{bn}}{L} \quad \text{Así:} \quad s_{bn} = \frac{\rho (Ni)^2}{U}$$

Se decidió usar aluminio en lugar de cobre por razones económicas, tomándose  $\rho = 3.25 \mu\Omega\text{cm}$  a  $20^\circ\text{C}$  y un coeficiente de  $0.00353 \mu\Omega\text{cm}/^\circ\text{C}$ , resultando para  $80^\circ\text{C}$ :  $\rho_{80} = 3.46 \mu\Omega\text{cm}$

Como el grupo generador implica una parte sustancial del costo del imán se realizó un estudio económico para las potencias posibles de 15, 20, 25 y 30 KW. En cada caso se estudió la alternativa de alta corriente y baja tensión (450 A,  $\sim 60\text{V}$ ) o baja corriente y alta tensión ( $\sim 60\text{A}$ , 440 V)

En los nueve casos estudiados (3 alternativas para 20 KW), resultaron bobinas un poco más voluminosas para la alimentación con alta tensión, lo que se agravaba por la circunstancia de requerir éstas una refrigeración adicional, situación que no ocurre en el caso de alta corriente, en que se usa bobina

con orificio central. La relación de superficies de los correspondientes conductores es de aproximadamente 10:1 (Ver Cuadro 1).

Finalmente, por los precios obtenidos y las posibilidades de plaza se adquirió un grupogenerador de 20 KW y corriente nominal máxima de 408A.

Se tomó  $i_{adm} = 0.9$ ,  $i_{max} = 370\text{A}$ , resultando  $N = 216$  vueltas, que se formaron con dos bobinas de 10 capas de 11 vueltas.

Resulta así:

$$s_{bn} = \frac{\rho (Ni)^2}{U} = 1096\text{ cm}$$

Tomando  $L = 2.28\text{ m}$  resulta

$S_{bn} = 250\text{ cm}^2$ ; sección orificio central  $0.1964\text{ cm}^2$ , para el diámetro de  $0.5\text{ cm}$ .

Por lo tanto  $S_b = 293\text{ cm}^2$ ;  $a_e = 133\text{ cm}^2$ ,  $a_{en} = 1.13\text{ cm}^2$  siendo  $S_b$  el área total de bobina,  $a_e$  área necesaria de espira de bobina,  $a_{en}$  área neta de espira. Se tomó como sección de espira  $(1.2 \times 1.2)\text{ cm}^2$  con agujero central de refrigeración de  $0.5\text{ cm}$  de diámetro.

Resultó una densidad de corriente  $j = i/a_{en} = 3.3\text{ A/mm}^2$ , valor perfectamente aceptable. La resistencia total resultó ser

$$R_b = \frac{\rho N L}{a_{en}} = 0.154\ \Omega$$

Como aislante se usó cinta hilera de  $2.5\text{ cm}$  de ancho, dada la baja tensión entre espiras ( $0.26\text{ V}$ ), otra ventaja de la solución de alta corriente. El lado de espira subió así a  $1.3\text{ cm}$ , por lo que la fracción de empaquetamiento resultó ser  $f = 0.67$ , bien superior a  $0.5$ , condición mínima a cumplir para una

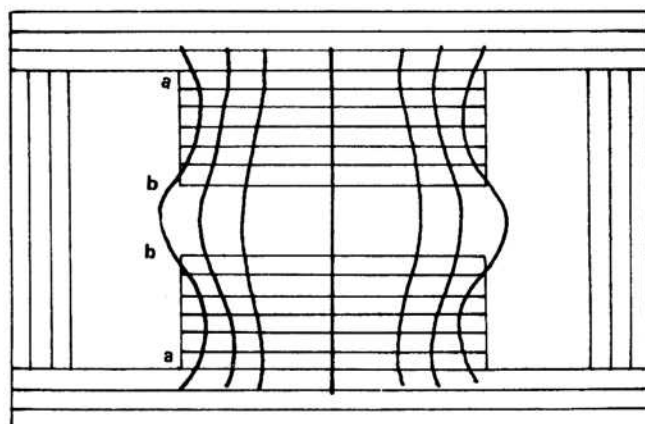


Fig. 3 Diagrama de flujo magnético en el yugo del electroimán.

CUADRO 1

|                                                 | 30 KW   |        | 25 KW   |         | 20 KW    |         |         | 15 KW     |           |
|-------------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|----------|---------|---------|-----------|-----------|
|                                                 | (1)     | (2)    | (1)     | (2)     | (1)      | (1)     | (2)     | (1)       | (2)       |
| <i>i</i> (A)                                    | 450     | 68.2   | 450     | 56.82   | 450      | 371     | 45.45   | 350       | 34.1      |
| <i>V</i> (volts)                                | 66.7    | 440    | 55.6    | 440     | 44.4     | 53.9    | 440     | 42.9      | 440       |
| <i>N</i> (total)                                | 180     | 1200   | 180     | 1440    | 180      | 216     | 1800    | 230       | 2400      |
| <i>S<sub>bn</sub></i> (cm <sup>2</sup> )        | 151.5   | 151.5  | 181.85  | 181.85  | 233.3    | 227.3   | 233.3   | 311.1     | 323.02    |
|                                                 | 10x11.6 | 10x154 | 10x13.4 | 10x18.5 | 12x13.9  | 10x16.7 | 13x18.7 | 12.5x18   | 15.9x21.2 |
| <i>S<sub>conductor</sub></i> (cm <sup>2</sup> ) | 1.035   | 0.1263 | 1.207   | 0.1263  | 1.493    | 1.251   | 0.1296  | 1.544     | 0.1346    |
| Dimensiones del conductor:                      |         |        |         |         |          |         |         |           |           |
| lado (cm)                                       | 1x1.04  |        | 1x1.21  |         | 1,2x1,25 | 1x1.25  |         | 1,25x1,25 |           |
| diámetro (cm)                                   |         | 0.401  |         | 0.401   |          |         | 0.406   |           | 0.414     |
| <i>R</i> (Ω)                                    | 0.152   | 6.714  | 0.126   | 8.059   | 0.1007   | 0.14    | 10.075  | 0.123     | 13.432    |
| <i>L</i> (cm)                                   | 228     | 228    | 228     | 228     | 234      | 228     | 234     | 234       | 243       |
| Volumen (cm <sup>3</sup> )                      | 34428   | 34428  | 41462   | 41462   | 54592    | 51824   | 54592   | 72797     | 78494     |
| Peso (Kg) (3)                                   | 93.3    | 93.3   | 112.4   | 112.4   | 147.9    | 140.4   | 147.9   | 197.3     | 212.7     |

*S<sub>bn</sub>* : Sección total de bobina neta (descontada refrigeración), ambas bobinas  
*δ* : 7.86 g/cm<sup>3</sup>  
*S<sub>conductor</sub>* : Sección del conductor bruta  
(1) : Fracción de empaquetamiento tomada = 0.80 ( ~ 0.9x0.9) Solamente para aislación  
(2) : Fracción de empaquetamiento total tomada = 0.6 ( ~ 0.78x0.78) *S<sub>bn</sub>* es bruta en este caso  
(3) : Material *Al*, *δ* = 2,71 g/cm<sup>3</sup>, peso en Kg

buena construcción de bobinas.\*  
Los datos principales del imán deflector pueden verse en el cuadro 2.

2 - Construcción del imán

Se utilizaron 2.5 toneladas de hierro ARMCO; cada polo está constituido por cuatro placas de 4,6cm de espesor, unidas por bulones del mismo material. Aunque los polos se atraen mutuamente con una fuerza de 10 toneladas, los bulones se calcularon para soportar únicamente el peso del polo, ya que, como muestra la Fig. 1, el flujo magnético en la sección a es mucho mayor que en el entrehierro (sección b).

CUADRO 2

|                                                   |
|---------------------------------------------------|
| Peso del hierro : 2,5 toneladas                   |
| Peso de las bobinas : 167 kg                      |
| <i>Ni</i> = 7.96 x 10 <sup>4</sup> A.v            |
| Corriente = 370 A                                 |
| Campo magnético = 12.5 k Gauss                    |
| Entrehierro = 0.08 m                              |
| Area del entrehierro : 1502 cm <sup>2</sup>       |
| Potencia disipada = 18 kW                         |
| Longitud total de las bobinas de aluminio = 502 m |
| Fracción de empaquetamiento = 0.67                |

\* Livingston and Blewett, Particle Accelerators, McGraw-Hill, 1962

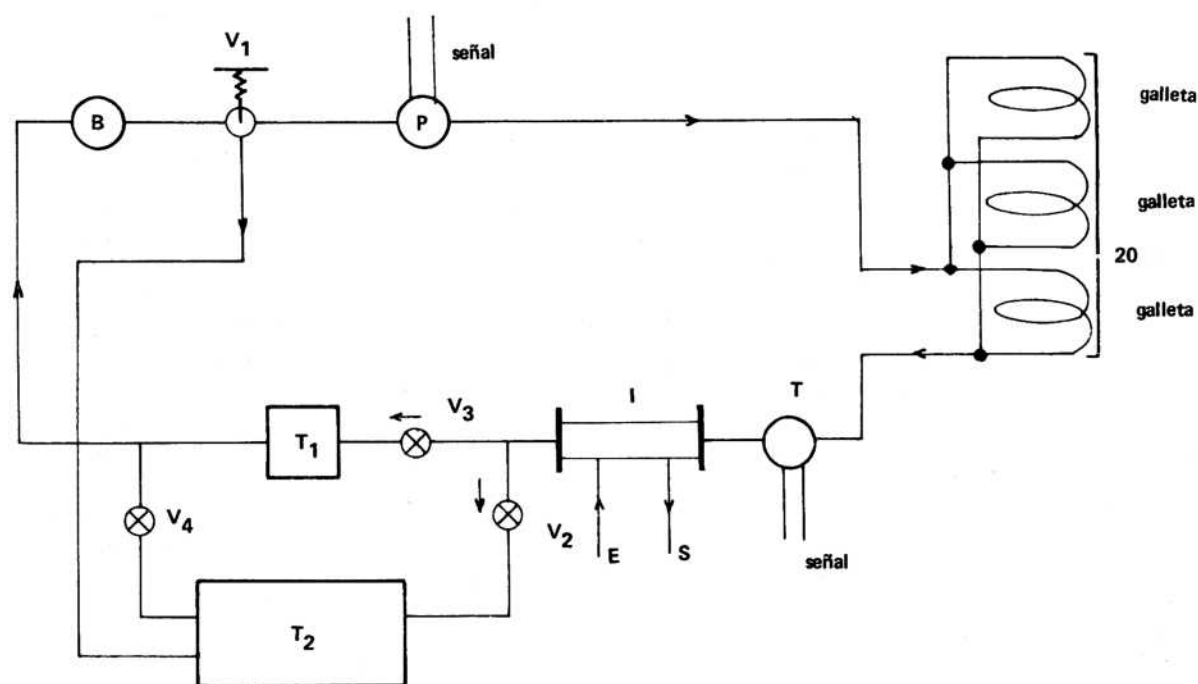


Fig. 4 Diagrama del circuito de refrigeración.

Por lo tanto, la fuerza con que el yugo atrae al polo en a es mucho mayor que 10 toneladas.

Las bobinas se construyeron con aluminio 99.99 %. Se colocaron 10 capas de 11 vueltas cada una en cada polo : la continuidad entre capas se logró uniendo los extremos con bulones, de modo de poder reemplazar fácilmente cualquiera que sufra desperfectos.

En las bobinas se disipa una potencia de 18 KW, y para refrigerarlas se construyó un circuito cuyo diagrama es el de la Fig. 4, donde :

- B bomba regenerativa de 1200 l/h, potencia 0.8 HP, presión 5 Kg./cm<sup>2</sup>.
- V<sub>1</sub> Válvula reguladora de presión.
- P Dispositivo de seguridad para falta de agua.
- T Dispositivo de seguridad para elevación de temperatura.
- I Intercambiador de calor.
- V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub>, V<sub>4</sub>. Válvulas.
- T<sub>1</sub> Tanque de reserva del circuito cerrado.
- T<sub>2</sub> Tanque de depósito del agua.

El circuito primario es cerrado, y está formado por las bobinas, la bomba B, la válvula V, el intercambiador I y el tanque T<sub>1</sub>. Para reemplazar el agua destilada contenida en dicho circuito, se utiliza el tanque T<sub>2</sub> con sus válvulas V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub>, V<sub>4</sub>.

El intercambiador está constituido por un casco con el agua del circuito secundario, y un conjunto de tubos en paralelo que forman parte del circuito primario. (Fig. 5).

Su diseño se realizó en base a los siguientes cálculos :

La potencia a disipar W es de 18 kW. Una vez fijadas la temperatura T<sub>e</sub> de entrada del agua primaria a los tubos (45°C), la temperatura T<sub>s</sub> de salida (25°C), la temperatura T<sub>e</sub> de entrada del agua secundaria al casco (20°C) y la T<sub>s</sub> de salida (35°C) como muestra la fig.6, donde L es la longitud del intercambiador, se procedió a calcular los caudales G' en los tubos y G'' en el casco :

$$G' = \frac{z W}{C (T'_e - T'_s)} \quad G'' = \frac{z W}{C (T_s - T_e)}$$

donde  $z = \frac{0.24 \text{ kcal}}{\text{Seg, KW}}$

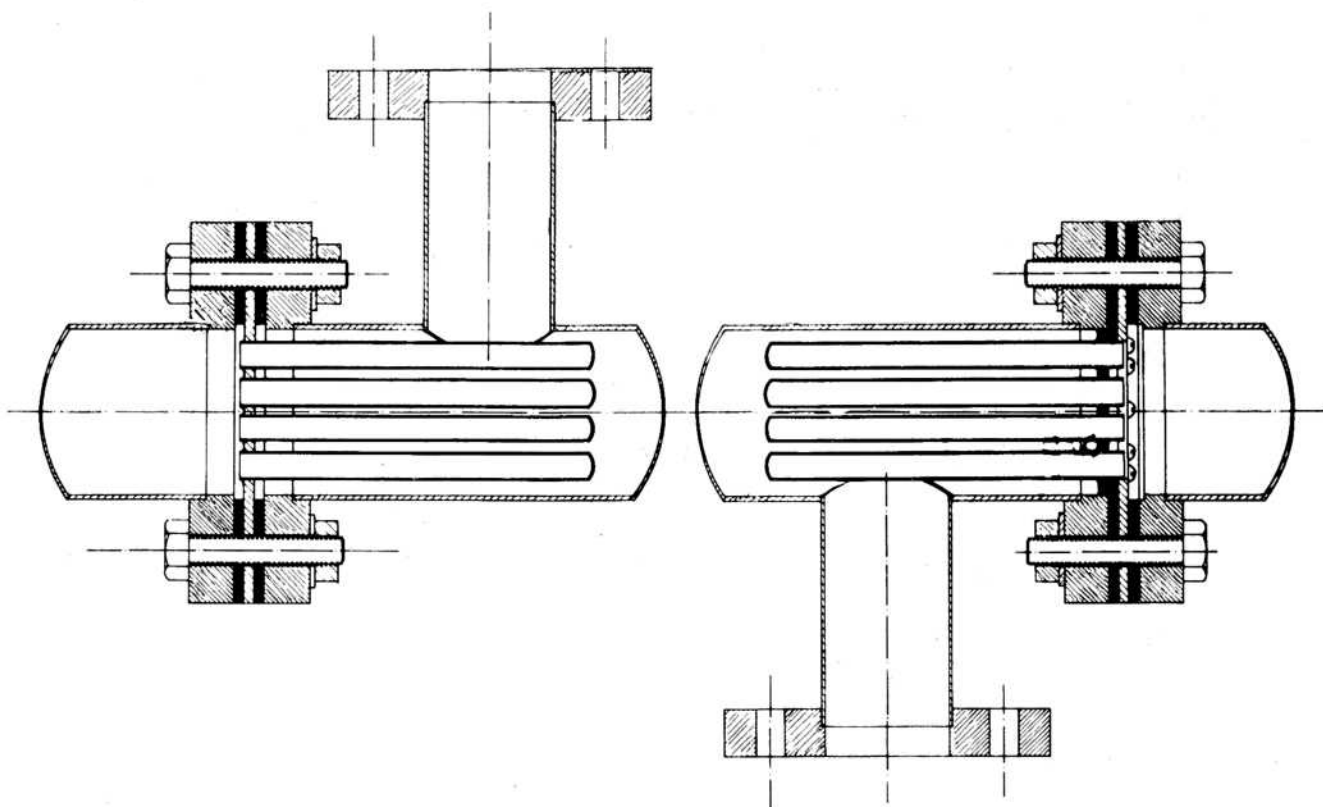


Fig. 5 Intercambiador de calor.

el calor específico  $\left( \frac{\text{k. cal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right)$

El número de tubos,  $N_t$ , es:

$$N_t = \frac{4 G'}{\pi d_i^2 V'}$$

donde  $d_i$  es diámetro interno del caño de refrigeración,  $V'$  es la velocidad del agua en los caños (m/seg). La sección de agua  $S_{H_2O}$  que presenta el casco, cuyo diámetro interior es  $D_i$  es:

$$S_{H_2O} = \frac{\pi}{4} (D_i^2 - N_t d_i^2)$$

El número de Reynolds,  $Re$ , y el de Prandtl,  $Pr$  son

$$Re = \frac{V' \gamma d_i}{\eta g}, \quad Pr = \frac{c \eta g}{\lambda}$$

donde  $\gamma$  es la masa específica del líquido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\eta$  la viscosidad dinámica (centipoises)  $g$  la aceleración de la gravedad ( $\text{m/seg}^2$ ) y  $\lambda$  coeficiente de conductividad térmica ( $\text{k cal/m h}^\circ\text{C}$ ).

La velocidad del agua en el casco del intercambiador  $V''$  es

$$V'' = \frac{6''}{S_{H_2O}}$$

y el diámetro equivalente,  $D$  es

$$D = \frac{4 S_{H_2O}}{N_t \pi d_e}$$

donde  $d_e$  diámetro exterior de los tubos (m).

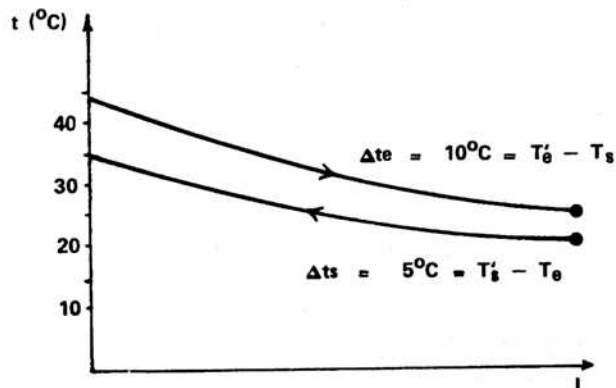


Fig. 6

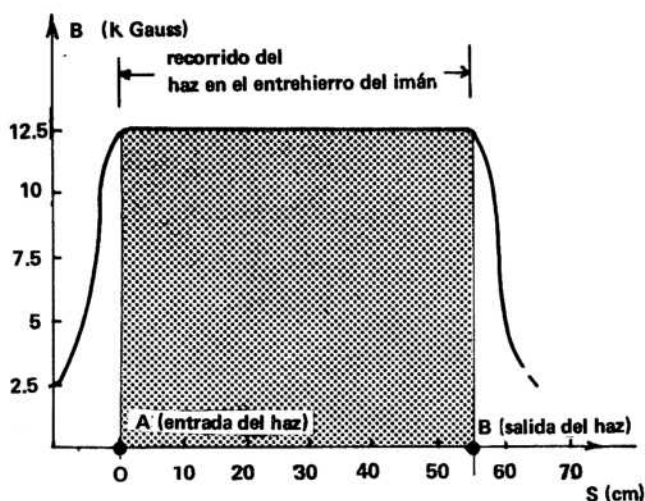


Fig. 7 Campo magnético a lo largo de la trayectoria del haz.

Se puede calcular así el  $Re$  y el número de Prandtl  $Pr$

$$Re = \frac{V'' \gamma D}{\eta g}, \quad Pr = \frac{c \eta g}{\lambda}$$

El coeficiente de convección del agua de los caños,  $\alpha'$ , y del agua del casco,  $\alpha''$ , medidos en  $kcal/h m^2 ^\circ C$ , se determinan mediante las ecuaciones:

$$\alpha' = \frac{\lambda}{d} 225 \cdot 10^{-4} (Re)^{0.8} (Pr)^{0.3}$$

$$\alpha'' = \frac{\lambda}{D} 225 \cdot 10^{-4} (Re)^{0.8} (Pr)^{0.3}$$

Se calculan así:  $S$  (superficie de intercambio, en  $m^2$ ) y  $L$  (longitud del intercambiador, en  $m$ ):

$$S = \frac{Z W}{K \Delta t_m}$$

$$L = \frac{S}{\pi N_t d_e}$$

donde:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha'} + \frac{1}{\alpha''}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_e - \Delta t_s}{\ln \frac{\Delta t_e}{\Delta t_s}}$$

El intercambiador tiene una temperatura de entrada de  $45^\circ C$  y de salida de  $25^\circ C$  para el agua del circuito primario, y para el secundario de  $20^\circ C$  y  $35^\circ C$  respectivamente. Los caudales de agua son de 15 l/min. para el primario y 57 l/min. para el secundario.

### 3 - Mediciones efectuadas

Una vez instalado el imán se realizaron mediciones del campo magnético en el entrehierro, utilizando una sonda de efecto Hall, que incorpora una pastilla Siemens FC 33, y un fluxímetro de resonancia magnética nuclear. Los resultados de la medición se muestran en las Figs. 2, 7, 8. El campo se mantiene constante dentro del 99,9% en la zona por la que pasa el haz, de modo que las ecuaciones planteadas para un campo uniforme son válidas. La curva de excitación del electroimán puede verse en la Fig. 8, como puede observarse es lineal en toda la región de trabajo.

Una vez colocada la cámara de vacío, se hizo circular el haz de deuterones de 28 MeV del ciclotrón, el que tenía en la entrada al imán deflector una sección transversal de forma triangular de aproximadamente 1 cm de lado, comprobándose en la salida que el imán desviaba el haz a la posición deseada para un campo magnético de  $1.25 Wb/m^2$ , y que no había deformación alguna de dicha sección.

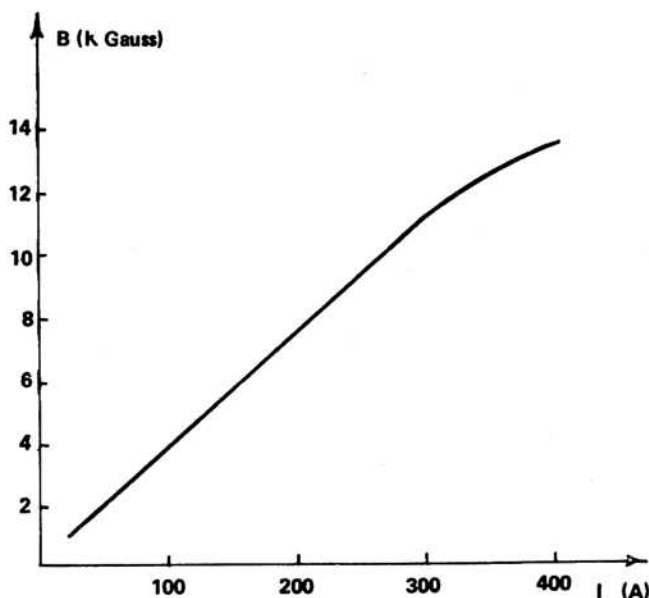


Fig. 8 Curva de excitación del electroimán.