

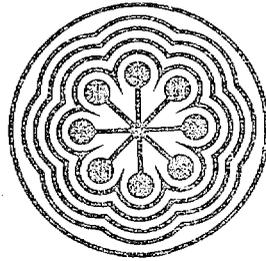


MX0600283

230
Ej. 1

14

instituto nacional de investigaciones nucleares



DISEÑO DEL SISTEMA MAGNETICO DE UNA FUENTE
DE IONES TIPO ECR

Sistema magnetico " " "

**DISEÑO DEL SISTEMA MAGNETICO DE
UNA FUENTE DE IONES TIPO ECR**

Enrique Camps C., Arturo Muñoz C.

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
División de Investigación y Desarrollo
Reporte Técnico IBA-DF-90-03
Proyecto AA-166
Mayo, 1990.

RESUMEN

Se muestra un programa de cómputo escrito con el propósito de estudiar el campo magnético producido por un sistema lineal de n bobinas. En base a éste se diseña un sistema de cuatro bobinas que se utilizará en una fuente de iones tipo *Resonancia Electrón-Ciclotrón* (REC) que se pretende construir. A su vez se discuten características de estructura de campo magnético propias para tal fin.

1 Introducción

Las fuentes de iones en la actualidad han encontrado un amplio campo de aplicación en varias ramas de la electrónica, metalurgia y otras. Debido a las exigencias de estas aplicaciones industriales, estos dispositivos han sufrido fuertes alteraciones en sus diseños y bases físicas de trabajo (en comparación con algunas de las primeras fuentes como las de tipo Kaufman, por ejemplo).

Por un lado las exigencias de efectividad y por otro las de estabilidad y largos períodos de vida de las fuentes de iones han llevado a la creación de fuentes del tipo *Resonancia Electrón-Ciclotrón* (REC o ECR por sus siglas en inglés), en las que el campo magnético axial permite aumentar la efectividad de trabajo de estas fuentes ⁽¹⁾ y la ausencia de electrodos para realizar la descarga, hace que los períodos de vida de estas fuentes sean casi ilimitados ⁽²⁾.

Este tipo de dispositivos, además de sus aplicaciones tecnológicas inmediatas, son usados comúnmente como fuentes de iones en los ciclotrones, sincrotrones y aceleradores lineales de iones pesados, así mismo en el área de la física atómica como fuentes de iones de carga múltiple y baja energía.

En la actualidad las fuentes del tipo ECR están siendo ampliamente estudiadas y existe una inmensa cantidad de diferentes variantes de las mismas ⁽³⁾. Debido a esto en el ININ se ha aprobado un proyecto para la construcción de una fuente de iones del tipo mencionada, capaz de producir haces de iones con densidades de corriente en un rango hasta de $8 \mu A/cm^2$, con energías variables en el rango de 100eV hasta 3000eV.

En el presente reporte de trabajo se muestra el perfil de campo magnético que se utilizará en esta fuente, el programa de cómputo realizado para el cálculo del mismo y el diseño de las bobinas que se utilizarán.

2 Programa CFLFOR

El programa CFLFOR es un programa escrito en lenguaje FORTRAN para el cálculo del campo magnético creado por un sistema lineal de NB bobinas formada cada una de j capas y k vueltas. El programa calcula (opcionalmente) también las líneas de campo del sistema de bobinas. El cálculo de la intensidad de campo magnético se realiza a lo largo del sistema de bobinas, tanto axial como radialmente.

El desarrollo de las bobinas se simula mediante una colección de espiras concéntricas cuyo diámetro varía para formar así las capas de las bobinas. El campo magnético creado por una espira de radio R por la que circula una corriente I está dado por las siguientes expresiones (respecto del sistema cilíndrico centrado en la bobina) ⁽⁴⁾

$$B_r = \frac{B_o \eta}{\pi \rho [(1 + \rho)^2 + \eta^2]^{\frac{1}{2}}} \left[-K + \frac{1 + \rho^2 + \eta^2}{(1 - \rho)^2 + \eta^2} E \right] \quad (1)$$

$$B_z = \frac{B_o}{\pi [(1 + \rho)^2 + \eta^2]^{\frac{1}{2}}} \left[-K + \frac{1 - \rho^2 - \eta^2}{(1 - \rho)^2 + \eta^2} E \right] \quad (2)$$

donde

$$B_o = B(0,0)$$

$$= \frac{\mu_o I}{2R}$$

$$\rho = \frac{r}{R}$$

$$\eta = \frac{z}{R}$$

$$K = \int_0^{2\pi} (1 - \kappa^2 \sin^2 m)^{-1/2} dm$$

$$E = \int_0^{2\pi} (1 - \kappa^2 \sin^2 m)^{\frac{1}{2}} dm$$

$$\kappa^2 = \frac{4\rho}{(1 + \rho)^2 + \eta^2}$$

Debido a la simetría axial la componente B_ϕ , B_r y B_z no dependen de ϕ . La disposición de los ejes se muestra en la Fig. 1.

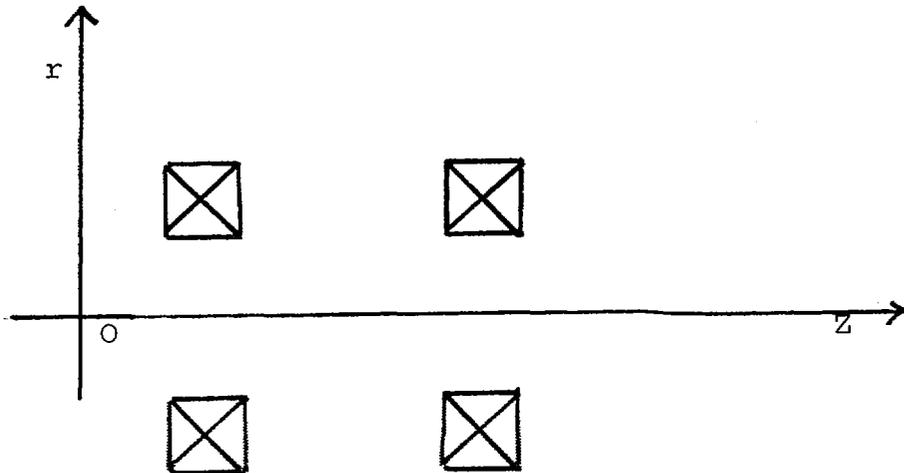


Figura 1

Para calcular el campo total en el punto $P(r_i, z_i)$ (i - número de bobina) efectuamos las

siguientes operaciones

1) Campo producido por cada una de las espiras de cada bobina en el punto P

$$\vec{B}_{ir} = \sum_{j=1}^{NT} B_{ijr}(r_i, z_i)$$

$$\vec{B}_{iz} = \sum_{j=1}^{NT} B_{ijz}(r_i, z_i)$$

donde NT es el número total de espiras, ésto es, el producto del número de capas (NC) por el número de vueltas (NV).

2) Campo producido por cada una de las bobinas en el punto P.

$$\vec{B}_{Tr} = \sum_{i=1}^{NB} \vec{B}_{ir}(r_i, z_i)$$

$$\vec{B}_{Tz} = \sum_{i=1}^{NB} \vec{B}_{iz}(r_i, z_i)$$

donde NB es número total de bobinas.

Por lo que el campo total en el punto P será

$$B = \sqrt{B_{Tr}^2 + B_{Tz}^2}$$

El cálculo de la intensidad de campo se realiza en tres etapas (ver figura 2)

En CFI.FOR se leen los datos de entrada que se localizan en el archivo CFI.IN. La subrutina CNE21.FOR ejecuta el cálculo de la intensidad de campo en el punto P debida a una bobina de NC-capas y NV-vueltas, la subrutina ELLIPTIC.FOR se utiliza para el cálculo de las integrales elípticas involucradas en las ecuaciones (1) y (2). El resultado de los cálculos se guarda en el archivo CFI.OUT.

El programa CFI.FOR puede realizar el cálculo de las líneas de campo de un sistema lineal de NB bobinas. Para ésto es necesario declarar la variable lógica "LINEAS" como verdadera (TRUE). Para el cálculo de las líneas de campo se resuelve la siguiente ecuación

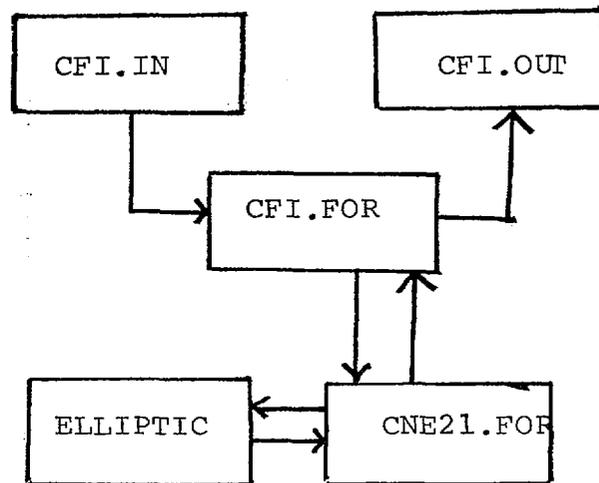


Figura 2.

$$[d\vec{r} \times \vec{B}] = 0 \quad (3)$$

donde $\vec{r} = (r, \phi, z)$ (sistema cilíndrico centrado en la bobina), por lo que nuestro caso la ecuación a resolver es

$$\frac{dr}{dz} = \frac{B_r}{B_z} \quad (4)$$

Para resolver (4) utilizamos el Método Runge-Kutta-Fehlberg ⁽⁵⁾ de cuarto orden con cinco evaluaciones de la función, expresado por las siguientes fórmulas

$$\begin{aligned} r_{n+1} &= r_n + h \sum_{j=1}^5 \gamma_j V_j \\ V_j &= f(r_n + \alpha_j h, r_n + h \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} V_i) \quad j = 2 \dots 5 \\ V_1 &= f(z_n, r_n) \end{aligned} \quad (5)$$

donde $f(z, r) = B_r/B_z$

Los valores de los coeficientes α_j , β_{ij} y γ_j se tomaron del libro ⁽⁵⁾, h es el paso con el que nos movemos de un punto a otro, que puede ser escogido como la longitud del intervalo de integración dividido entre el número de iteraciones del método. En nuestro caso h es un dato externo que toma valores en el intervalo $[0.1, 0.01]$. El grado de libertad extra (en comparación con el Método de Runge-Kutta de cuarto orden) permite obtener mayor exactitud en el cálculo, ya que para este método el error de truncación es menor.

La solución de (4) mediante (5) se hace en la subrutina SYST1.FOR, el cálculo de B_r y B_z se efectúa a través de CNE21.FOR.

Debido a que el Método de Runge-Kutta no permite obtener el dibujo de una línea cuya normal varíe más de 90° (un círculo, elipse, etc) el programa CFI.FOR en su subrutina SYST11.FOR realiza un cambio de variable haciendo a z la variable dependiente y a r la independiente, de modo que (4) se transforma en

$$\frac{dz}{dr} = \frac{B_z}{B_r} \quad (6)$$

CFI.FOR está escrito de modo que en cuanto la normal a la línea que se dibuja alcanza los 45° el comando de cálculo se pasa a la subrutina SYST11.FOR que resuelve (6) mediante las correspondientes ecuaciones similares a (5). El diagrama de flujo correspondiente para el cálculo de las líneas de campo se muestran en la figura 3.

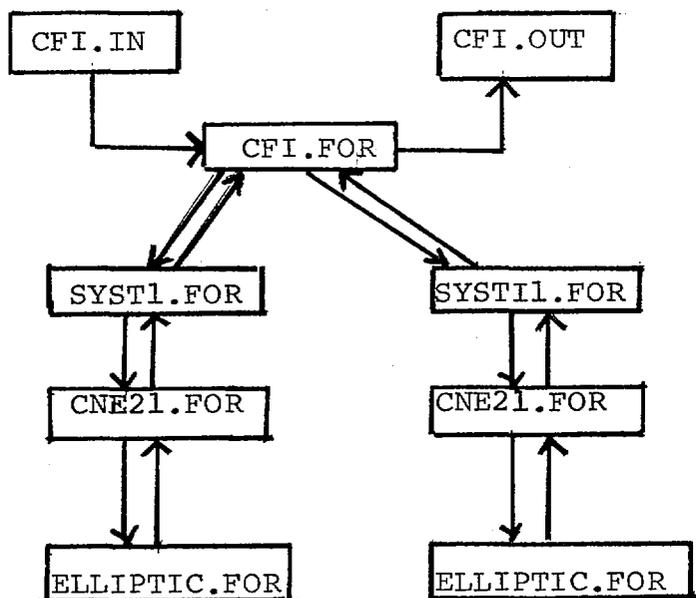


Figura 3

De este modo, con el cambio de variables que se hace en SYST11.FOR es posible dibujar cualquier línea de campo sin importar su comportamiento.

3 Sistema de tres bobinas

Con el propósito de diseñar una configuración magnética para una fuente de iones tipo (REC) se intentó obtener dicha configuración con un sistema de tres bobinas. Este sistema de tres bobinas se presenta como ilustración del programa ya que no cumple con todos los requerimientos para utilizarse en la fuente de iones (como se verá más adelante).

En la figura 4 se muestra la configuración de arranque (inicialización de la descarga) donde en el centro del resonador (a 40 cm del centro de la primera bobina) se obtiene un campo magnético axial del orden de 830 gauss para una corriente en la primera bobina igual a 32.7 amperes y 40 amperes para la segunda y tercer bobinas.

En la figura 4 se ilustra el campo magnético axial de trabajo para una corriente de 32.7 amperes en la primer bobina y de 20 amperes para la segunda y tercer bobinas. En este caso se consigue un campo homogéneo entre 16 y 31 cm (región de "bombeo") y un campo de alrededor de 425 gauss en el centro del resonador, sin embargo, en la región del resonador, presenta una barrera magnética lo que puede dificultar el "bombeo" al otro extremo de la cámara de vacío de las partículas del plasma.

En las figuras 5 y 6 se se dibujan las variaciones del campo magnético radial en los intervalos 0—5cm y 8—13cm respectivamente.

En las figuras 7 y 8 se muestra la variación radial del campo magnético en los intervalos 16—21cm y 26—31cm respectivamente obteniéndose uniformidad en el intervalo 16—30cm y en el intervalo radial de interés que va de -3cm a 3cm.

Por último, en la figura 9 se muestra la variación radial en el seno del resonador apreciándose una variación de 170 gauss en el intervalo radial de -3 a 3 cm (región ocupada

por el plasma).

4 Sistema magnético de la fuente de iones

El perfil de campo magnético a lo largo del sistema de bobinas se escogió de modo que en la región de la parte central del resonador fuera posible obtener un campo magnético correspondiente a la resonancia electrón-ciclotrón, que para el caso de la frecuencia que se planea utilizar en este dispositivo es de 850 gauss, lo cual se obtiene fácilmente de la relación

$$B = \frac{mc\omega_0}{e}$$

donde e , m es la carga y la masa del electrón respectivamente, c la velocidad de la luz, ω_0 la frecuencia del magnetrón (igual a 15.4 GHz).

Este campo será utilizado para inicializar la descarga en el resonador. Posteriormente el campo magnético en la región del resonador deberá ser disminuido hasta valores cercanos a la mitad de la resonancia, esto con el objeto de lograr un incremento de la densidad de plasma, debido al surgimiento de fenómenos no lineales de transformación de ondas en la capa de resonancia correspondiente al híbrido superior. Este esquema de alimentación de energía ha probado ser uno de los más eficientes ^(6,7) para el intercambio de la energía de la onda electromagnética a las partículas del plasma.

Una vez formado el plasma es necesario transportarlo de la región del resonador hacia la parte de reacción de la cámara ($z=0$ fig.10), lo cual se lleva a cabo creando un campo que disminuya en la dirección de la cámara, ya que los electrones tenderán a moverse hacia la región de menor campo, atrayendo tras de si a los iones debido al campo electrostático que se forma.

Cuando el plasma se localiza ya en la región de la cámara de reacción, se le comprime con un campo magnético fuerte lo que permite aumentar ligeramente la densidad del plasma, compensando así levemente las pérdidas por el transporte del mismo.

Para los fines primarios que se desea utilizar esta fuente (formación de películas delgadas, tratamiento de semiconductores) es necesario sacar al plasma formado del resonador ya que su temperatura en esta región es del orden de los 40eV, lo que resulta muy alto para los fines mencionados.

En vista de lo anterior, con ayuda del programa CFL.FOR se probaron varios tipos de bobinas y posiciones de las mismas a lo largo del sistema hasta lograr un perfil que satisface los requerimientos del experimento. En la fig. 10 se muestra la configuración magnética final con sus respectivas bobinas, cuyos parámetros resultaron ser

Primera bobina	NC=42	NV=15	I=29	Z=0
Segunda y tercer bobinas	NC=21	NV=15	I=12	Z=21.5, 34
Cuarta bobina	NC=21	NV=15	I=29	Z=49
Radio interno	$R_1 = 8$			
Calibre del alambre	AWG/4			

donde Z es la coordenada axial (en cm) medida desde el centro de la primera bobina y R_1 es el radio interno de las bobinas (en cm) e I la corriente (en amperes).

En las figuras 11 y 12 se muestra además una configuración magnética de arranque y una configuración típica respectivamente. En la figura 13 se muestra la variación axial del campo magnético de trabajo. En las figuras 14—20 se muestran variaciones del campo magnético radial de la configuración magnética elegida.

Con el objeto de diseñar posteriormente un sistema de enfriamiento para las bobinas se realizó un cálculo de la potencia disipada (en watts) en ellas. Para tal fin se utilizaron las siguientes expresiones

$$L = 2\pi NV \cdot NC [R_1 + \Delta(NC - 1)]$$

$$R = \sigma \frac{L}{A}$$

$$P = I^2 R$$

donde L es la longitud del cable de la bobina; NV y NC son el número de vueltas y capas de la bobina respectivamente; R_1 es el radio interno de las bobinas considerando la primera capa; Δ el diámetro del alambre; R la resistencia eléctrica; σ la resistividad (del cobre en nuestro caso); A el área de la sección transversal del alambre; P la potencia e I la corriente eléctrica.

De lo anterior resulta que para la primera bobina se disipan alrededor de 1098 watts; para la segunda y tercera la potencia resultante es de 62 watts y en el caso de de la cuarta se disipan 360 watts. De estos datos se puede inferir *a priori* que un enfriamiento lateral con agua sería suficiente en períodos prolongados de trabajo.

Conclusiones

El diseño y construcción de un sistema de bobinas que reproduzca una configuración magnética de antemano conocida involucra un cuantioso trabajo manual, por lo que es importante, antes de comenzar su construcción física, realizar un cálculo numérico que permita determinar el tipo más óptimo de bobinas en función de las necesidades de campo que el experimento tenga.

Se codificó y probó el programa CFI.FOR para un sistema lineal de solenoides de sección longitudinal cuadrada.

El cambio de variables realizado en SYSTII.FOR permitió resolver el problema del graficado de líneas cuando la variación de la normal a éstas excedía los 90°. En base a lo anterior, se propuso un sistema magnético de cuatro bobinas que cumple con los requerimientos de una fuente tipo REC: sin barrera magnética en el seno del resonador, campo magnético uniforme en la región de "bombeo" y campo de compresión en la cámara de reacción.

Agradecimientos

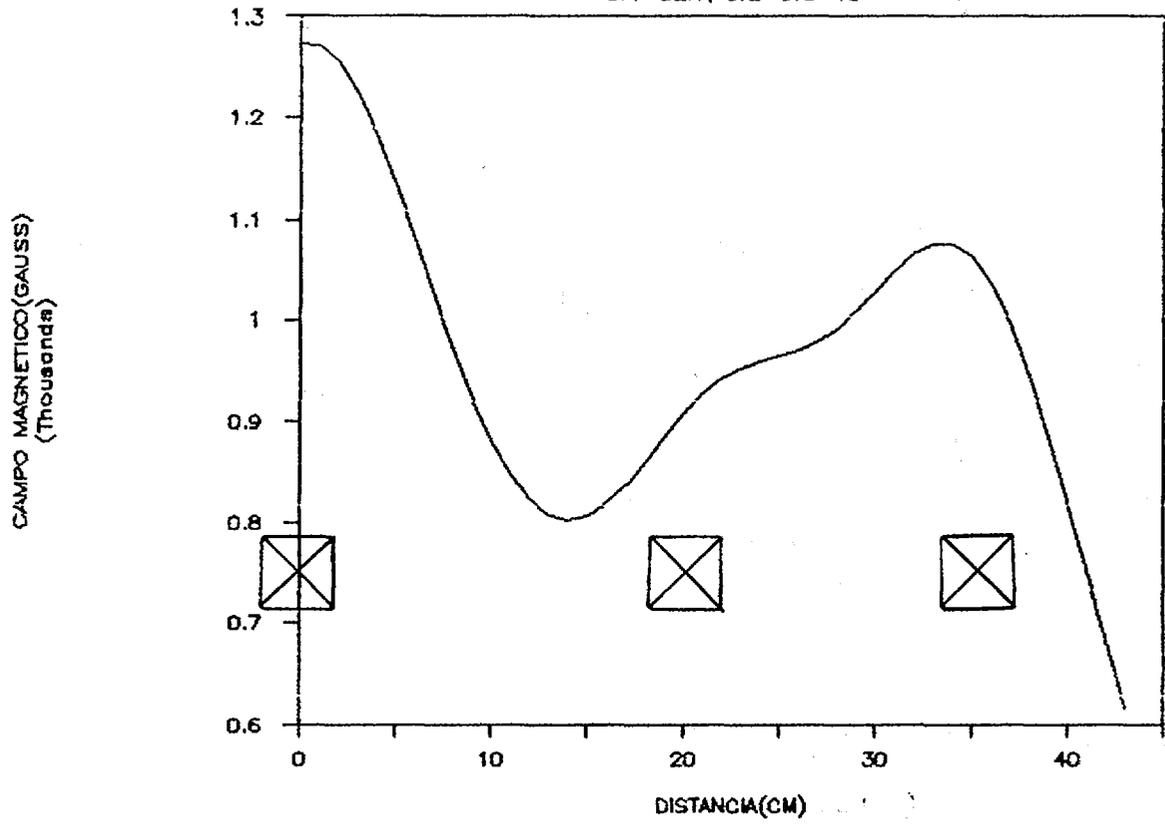
Los autores agradecen al Dr. Eduardo Piña su valiosa colaboración en la implementación de la subrutina SYSTII.FOR.

Bibliografía

1. V.L. Miljevic. J. Appl. Phys. V.63 p.2237, 1988.
2. J. Asmussen, M. Dahime. J. Vac. Sci. Technol. B5, V. 328, 1987.
3. Proc. Int. Conf. on Ion Sources. July 10-14 1989. Berkeley Calif. U.S.A.
4. R. J. Thome, J.M. Tarrh. *MHD and Fusion Magnets*. John Wiley & sons 1982.
5. Kendall E. Atkinson. *An Introduction to Numerical Analysis*. John Wiley & sons 1978.
6. Balmashnov A.A., Golovanivski K.S., Camps E. Proc. Int. Conf. on Plasma Phys. Kiev, URSS, 1978, T.2 p 239-242.
7. M. Shoucri, H.H. Kuehl. Pys. Fluids Vol. 23, N.12, 1980.

CAMPO ARRANQUE FUENTE DE IONES

Cr1=32.7, Cr2=Cr3=40



VARIACION AXIAL CAMP MAG 3BOBINAS

Cr1=32.7 Cr2=Cr3=20

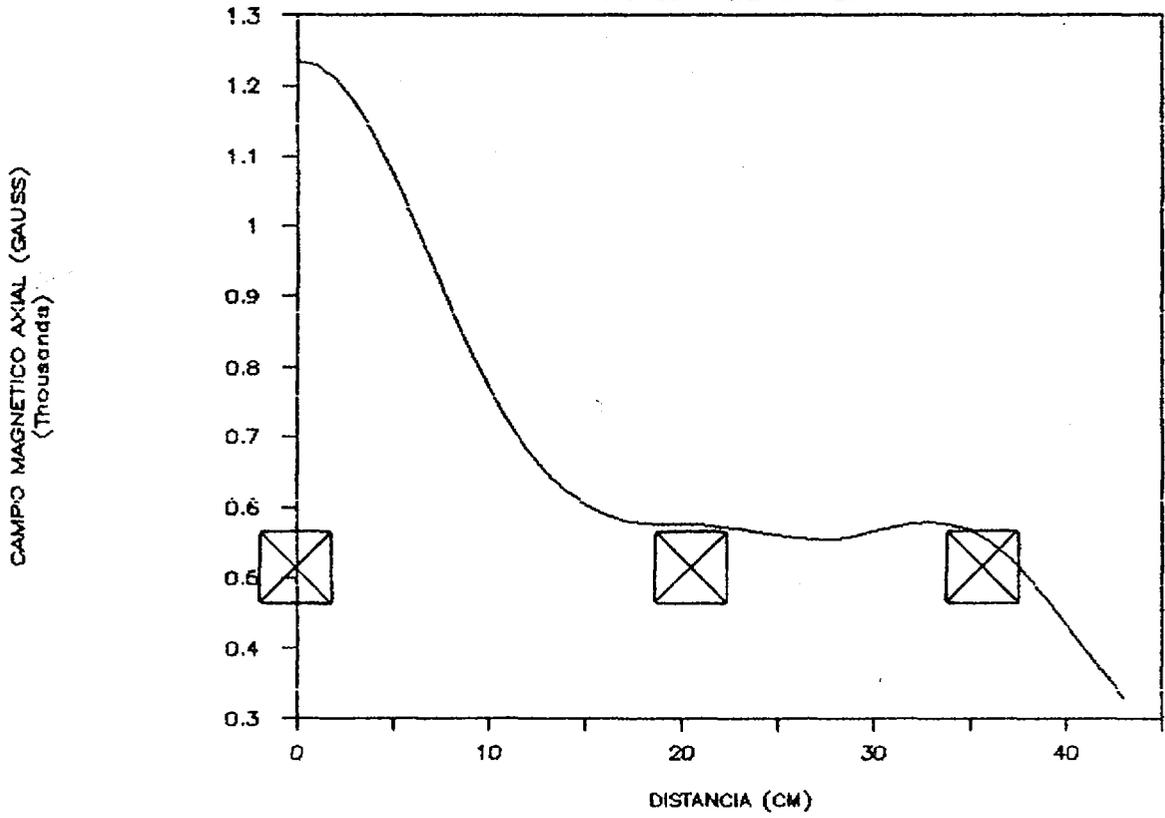


FIGURA 4

VARIACION RADIAL DEL CAMPO MAGNETICO

Cr1=32.7 Cr2=Cr3=20

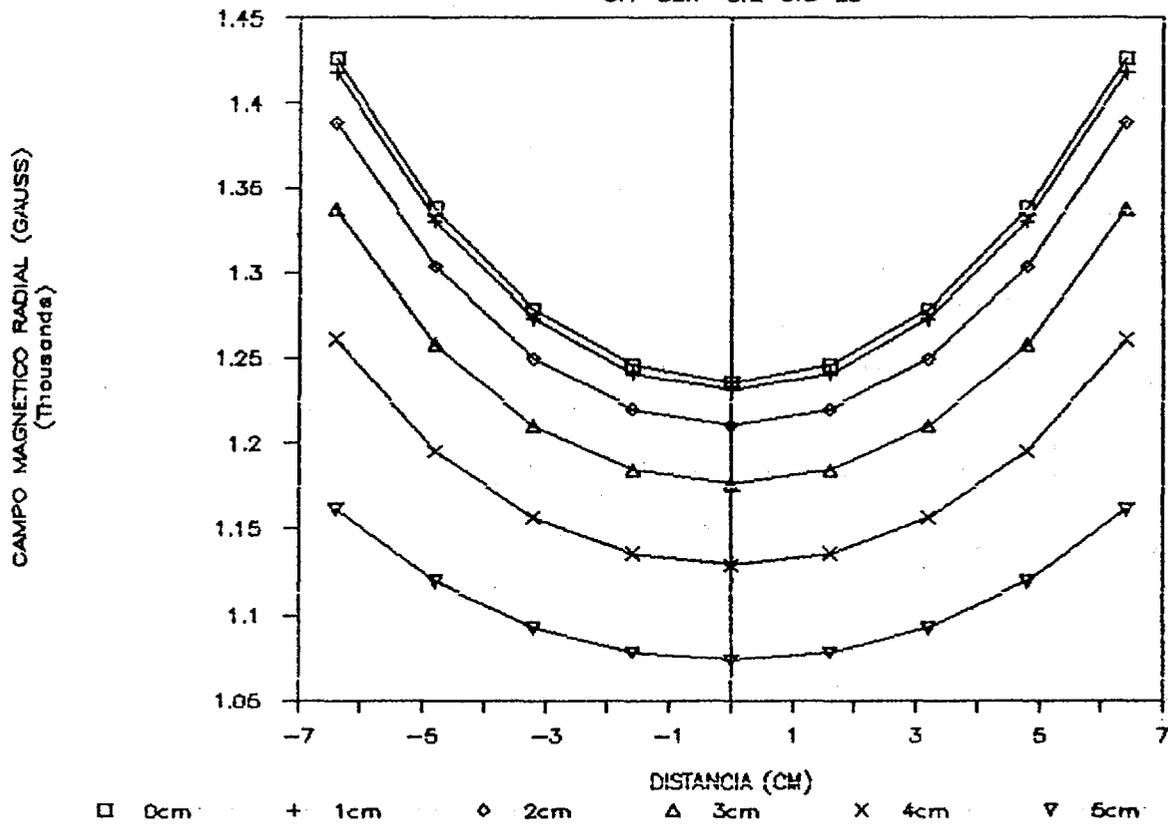


FIGURA 5.

VARIACION RADIAL DEL CAMPO MAGNETICO

Cr1=32.7 Cr2=Cr3=20

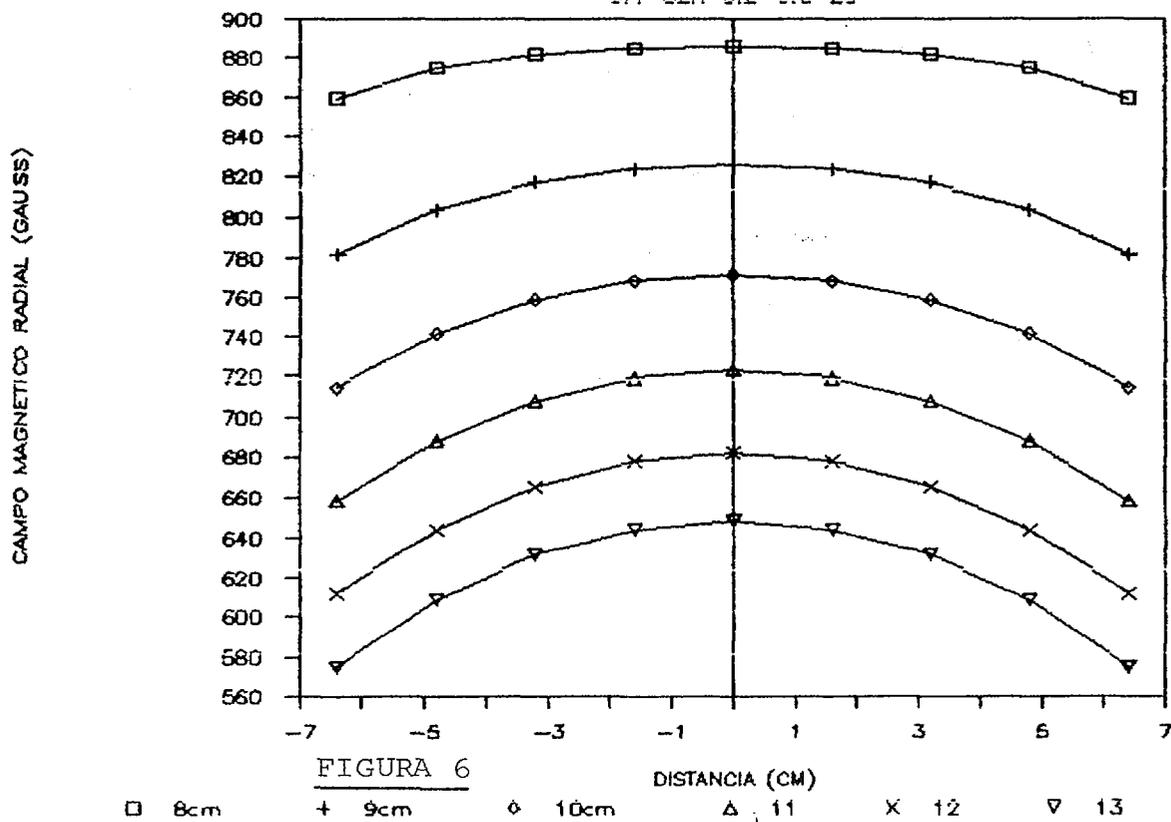


FIGURA 6

VARIACION RADIAL DEL CAMPO MAGNETICO

Cr1=32.7 Cr2=Cr3=20

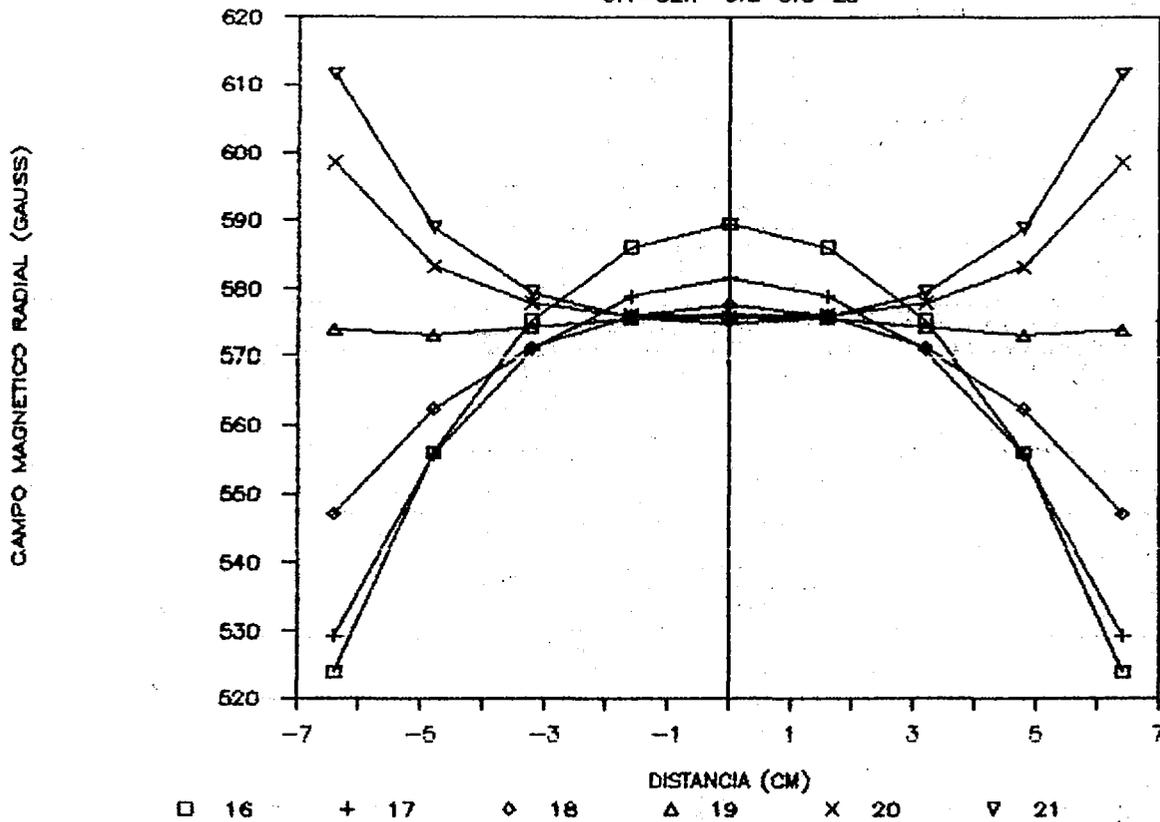


FIGURA 7

VARIACION RADIAL CAMPO MAGNETICO

Cr1=32.7 Cr2=Cr3=20

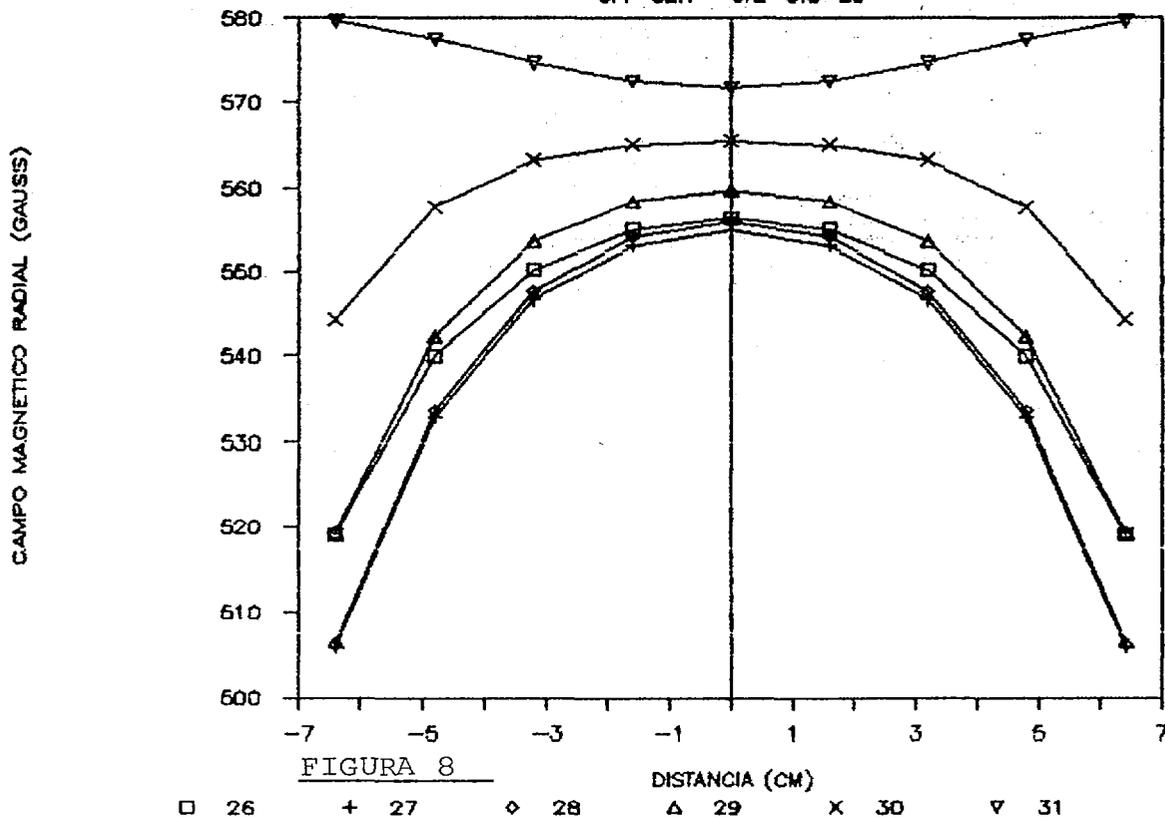


FIGURA 8

VARIACION RADIAL DEL CAMPO MAGNETIC

Cr1=32.7 Cr2=Cr3=20

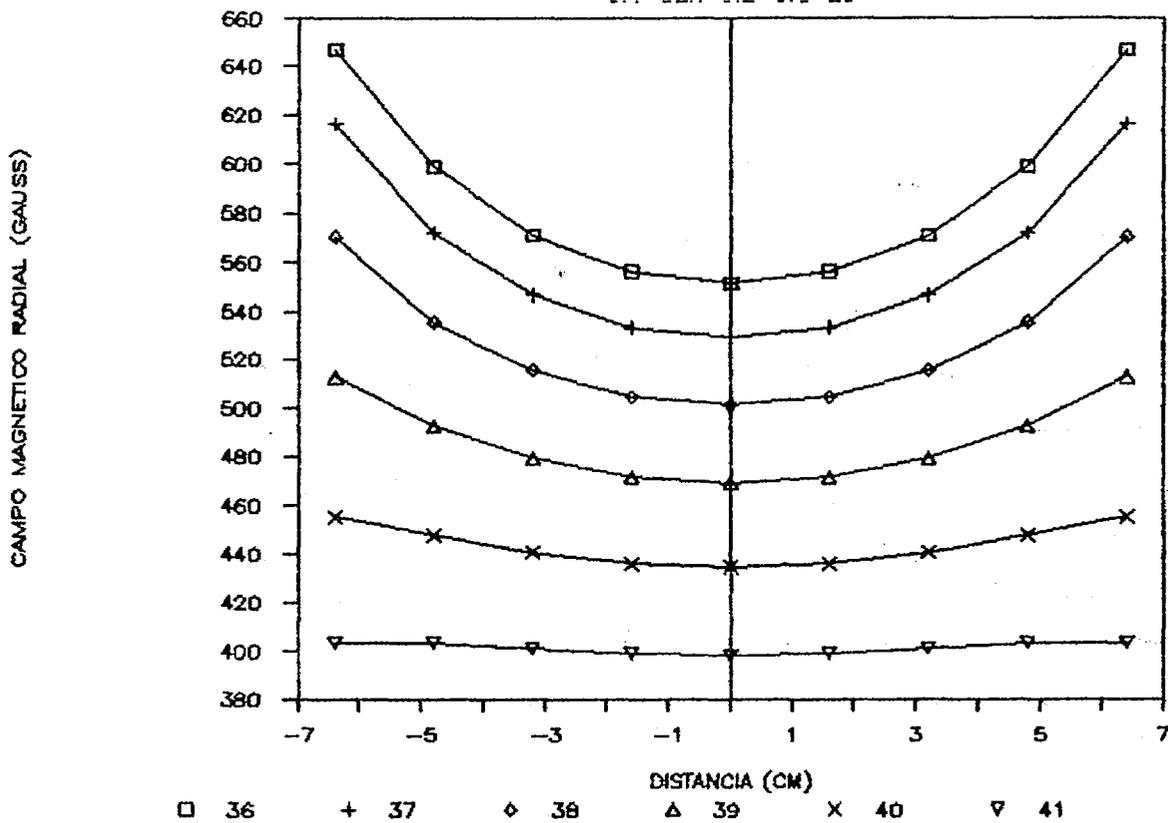
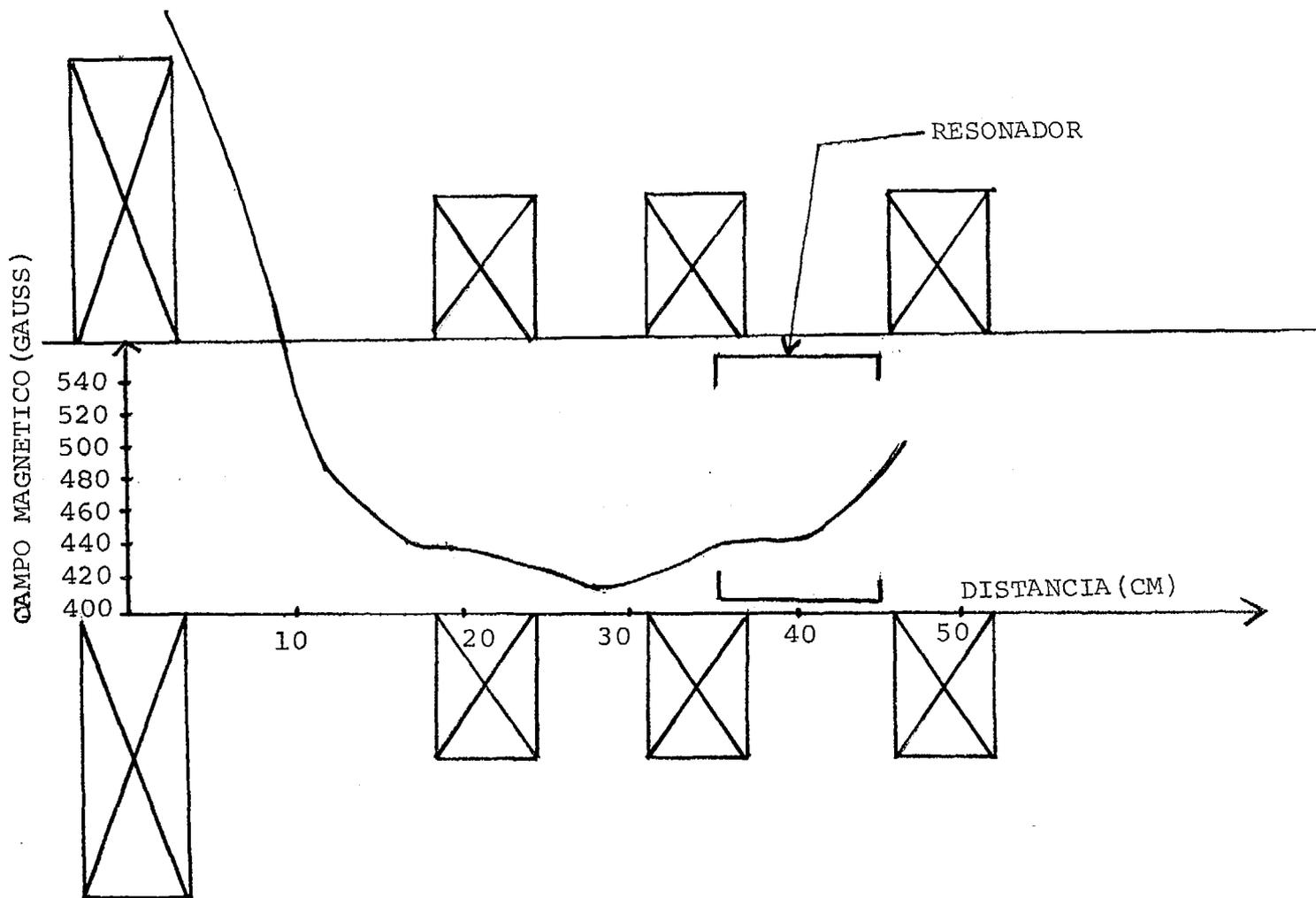


FIGURA 9



14

Figura 10.- Variación axial del campo magnético de la fuente de iones

escala 4:1

VARIACION AXIAL CAMP MAG INT ARRANQUE

Cr1-Cr2-Cr3-Cr4-35

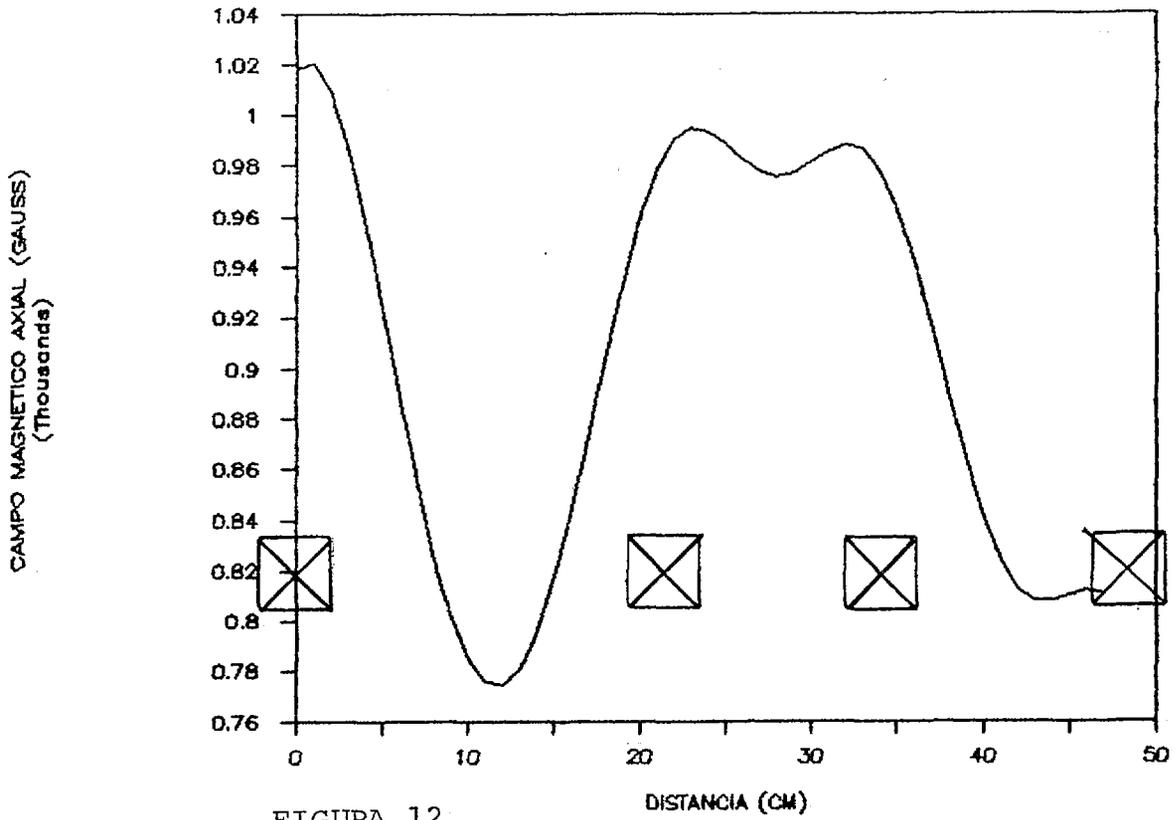


FIGURA 12

VARIACION AXIAL CAMP MAG DE ARRANQUE

Cr1-Cr2-Cr3-Cr4-37

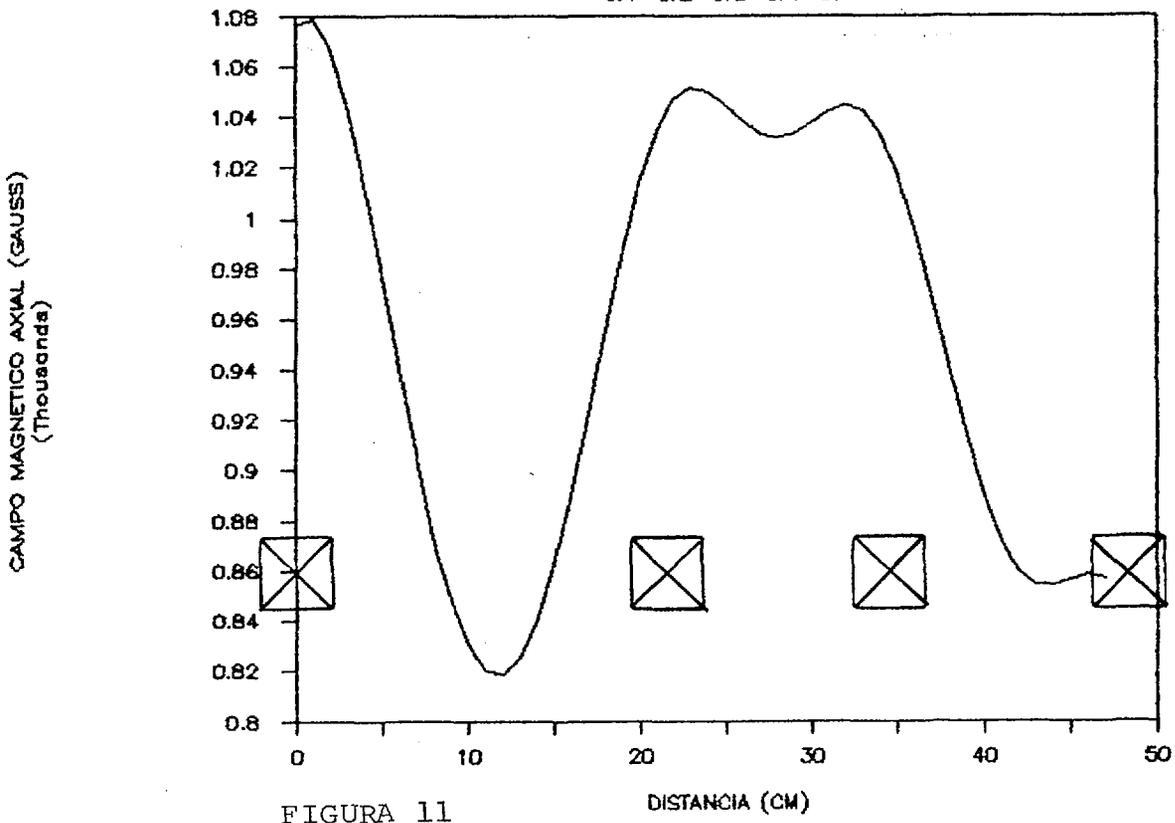


FIGURA 11

VARIACION AXIAL CAMP MAG DE TRABAJO

Cr1-29 Cr2-12 Cr3-12 Cr4-29

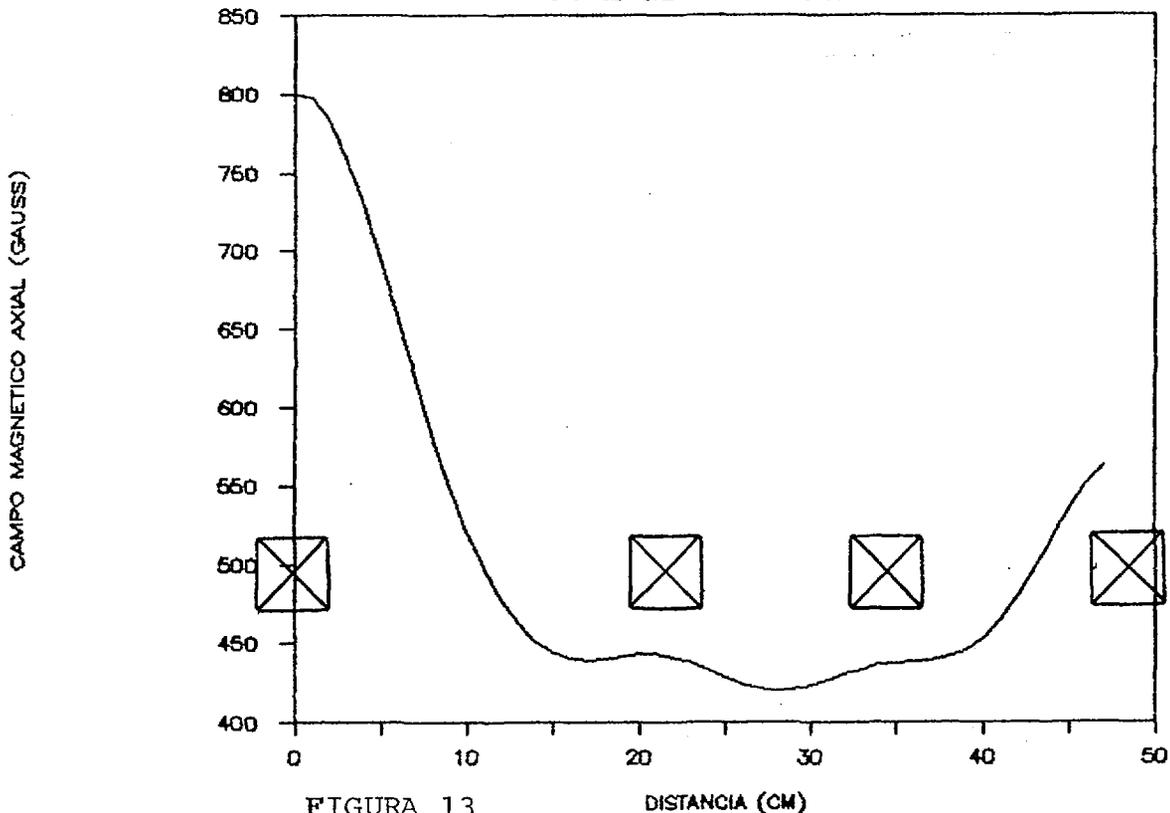


FIGURA 13

VARIACION RADIAL CAMP MAG DE TRABAJO

Cr1-Cr4-29 Cr2-Cr3-12

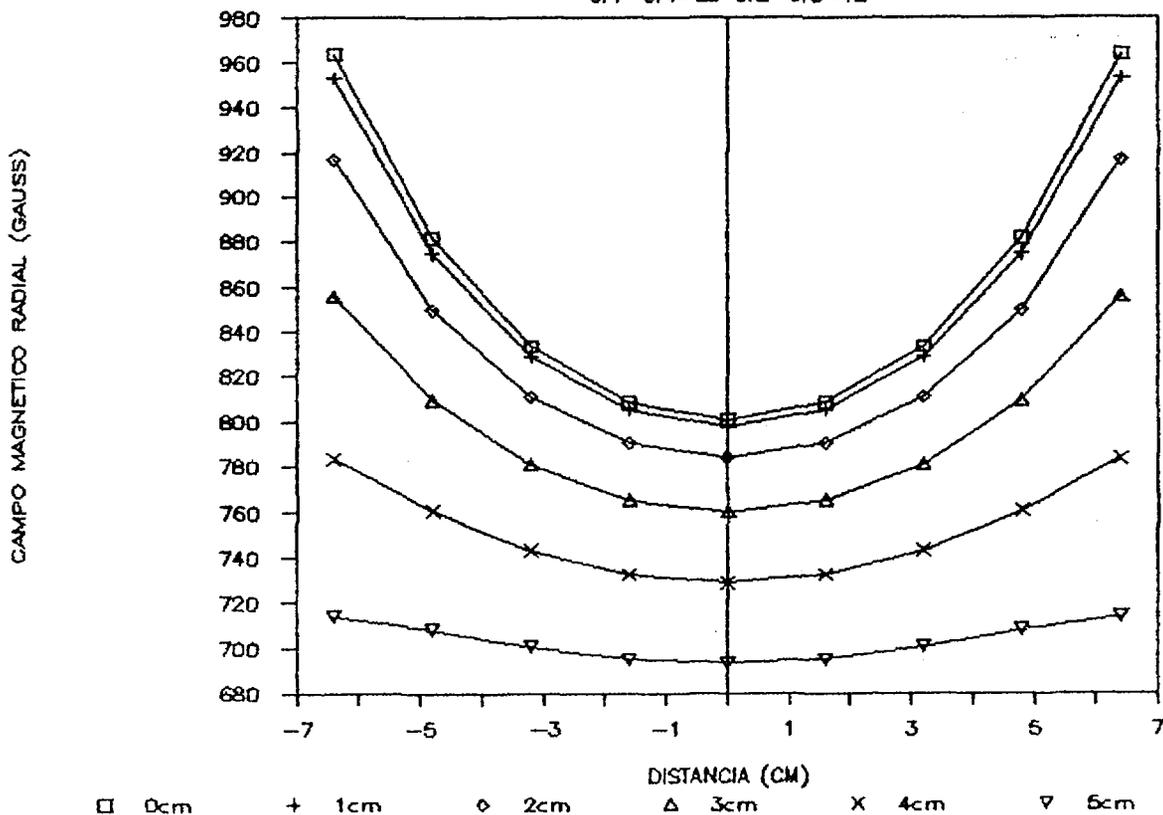


FIGURA 14

VARIACION RADIAL CAMP MAG DE TRABAJO

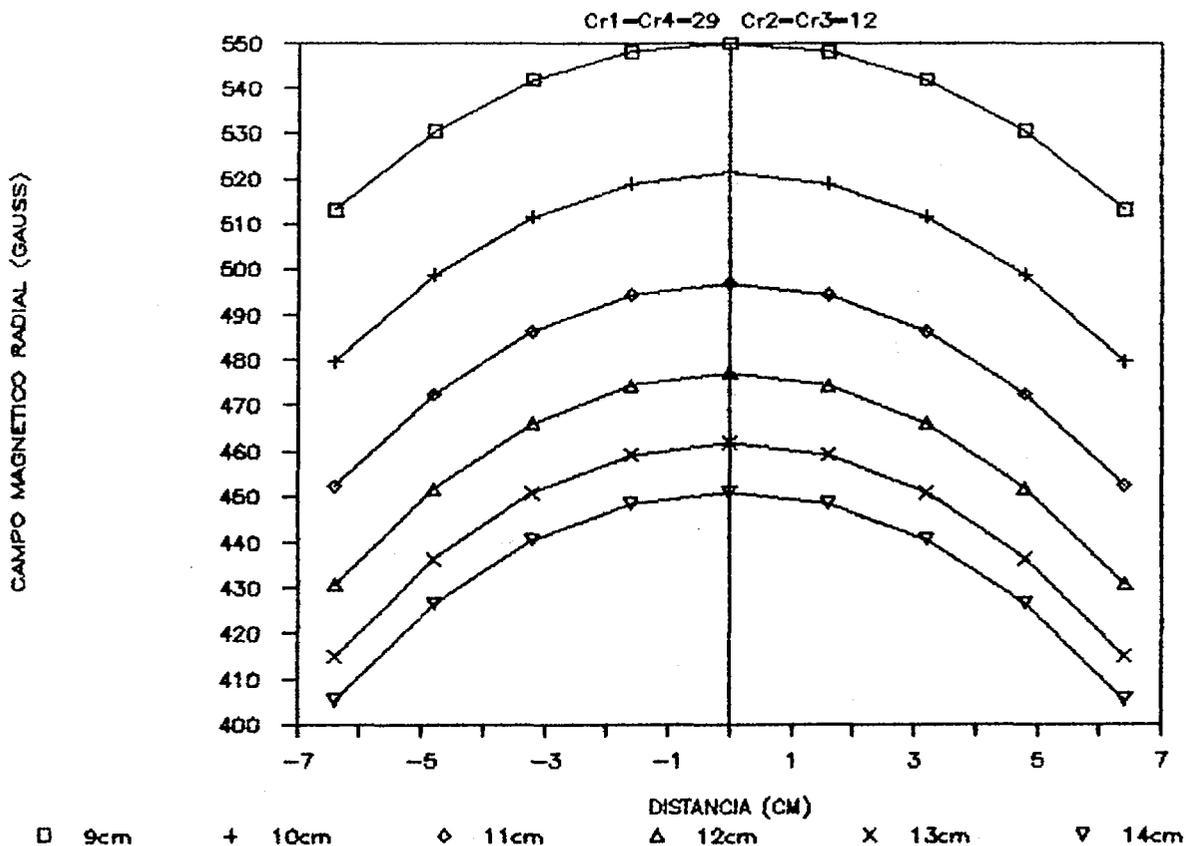


FIGURA 15
VARIACION RADIAL CAMP MAG DE TRABAJO

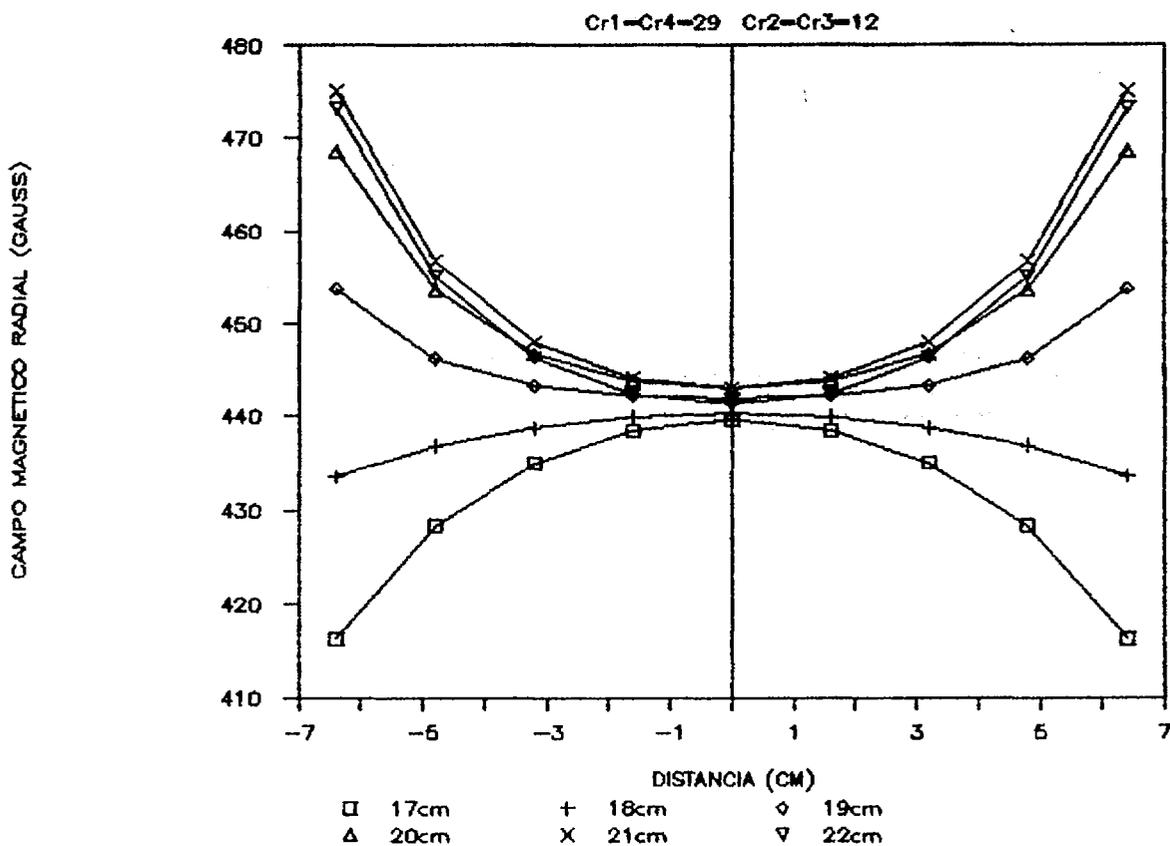


FIGURA 16

VARIACION RADIAL CAMP MAG DE TRABAJO

Cr1-Cr4=29 Cr2-Cr3=12

CAMPO MAGNETICO RADIAL (GAUSS)

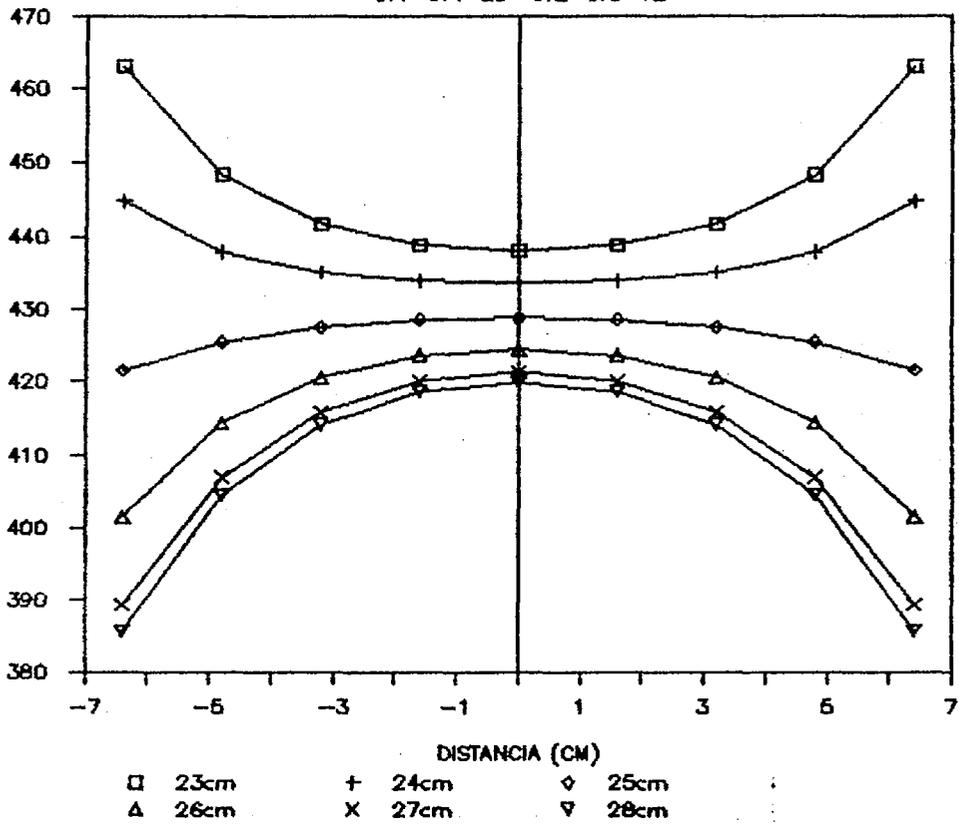


FIGURA 17

VARIACION RADIAL CAMP MAG DE TRABAJO

Cr1-Cr4=29 Cr2-Cr3=12

CAMPO MAGNETICO RADIAL (GAUSS)

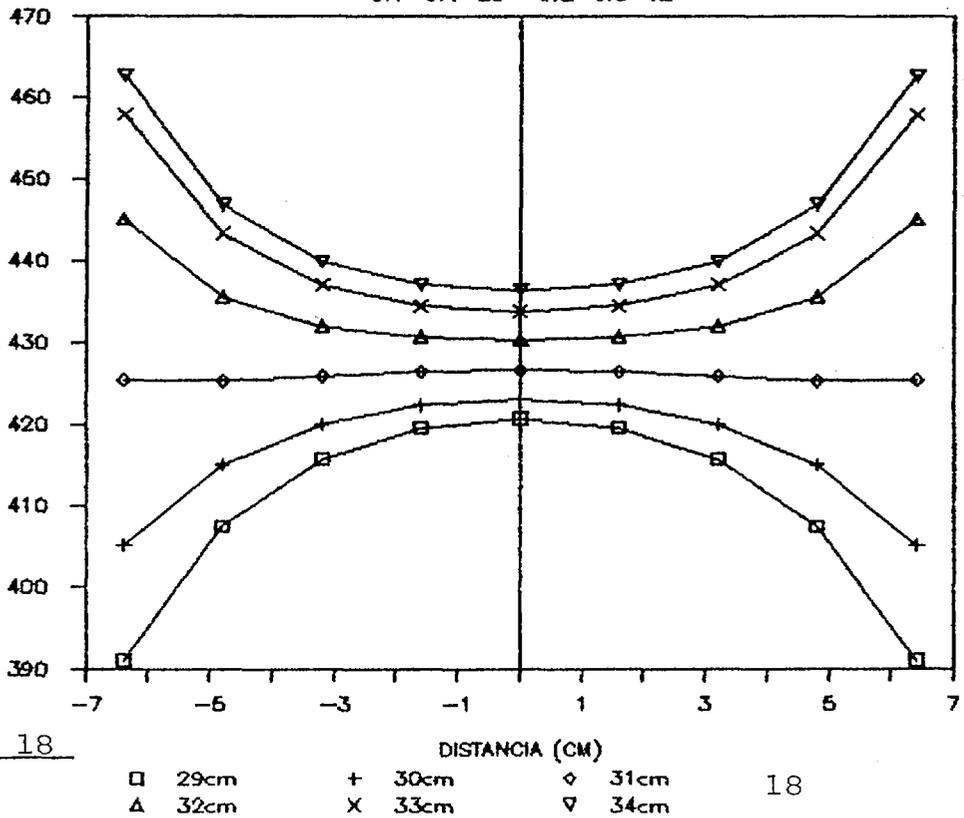


FIGURA 18

VARIACION RADIAL CAMP MAG DE TRABAJO

Cr1-Cr4=29 Cr2-Cr3=12

CAMPO MAGNETICO RADIAL (GAUSS)

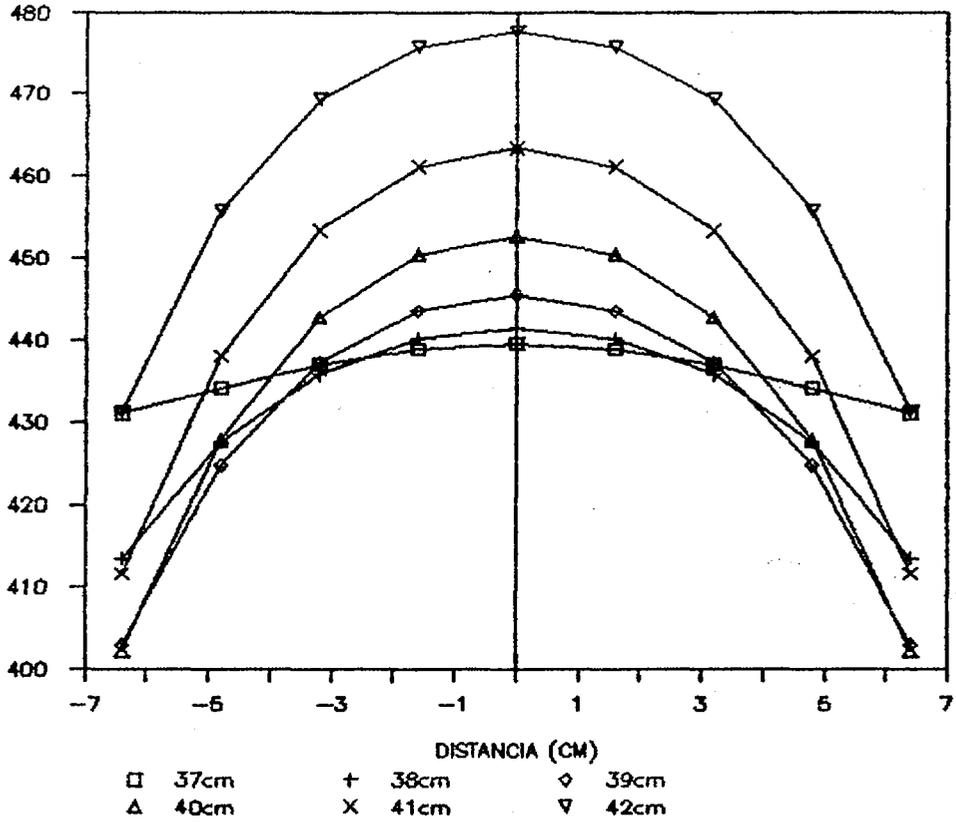


FIGURA 19

VARIACION RADIAL CAMP MAG DE TRABAJO

Cr1-Cr4=29 Cr2-Cr3=12

CAMPO MAGNETICO RADIAL (GAUSS)

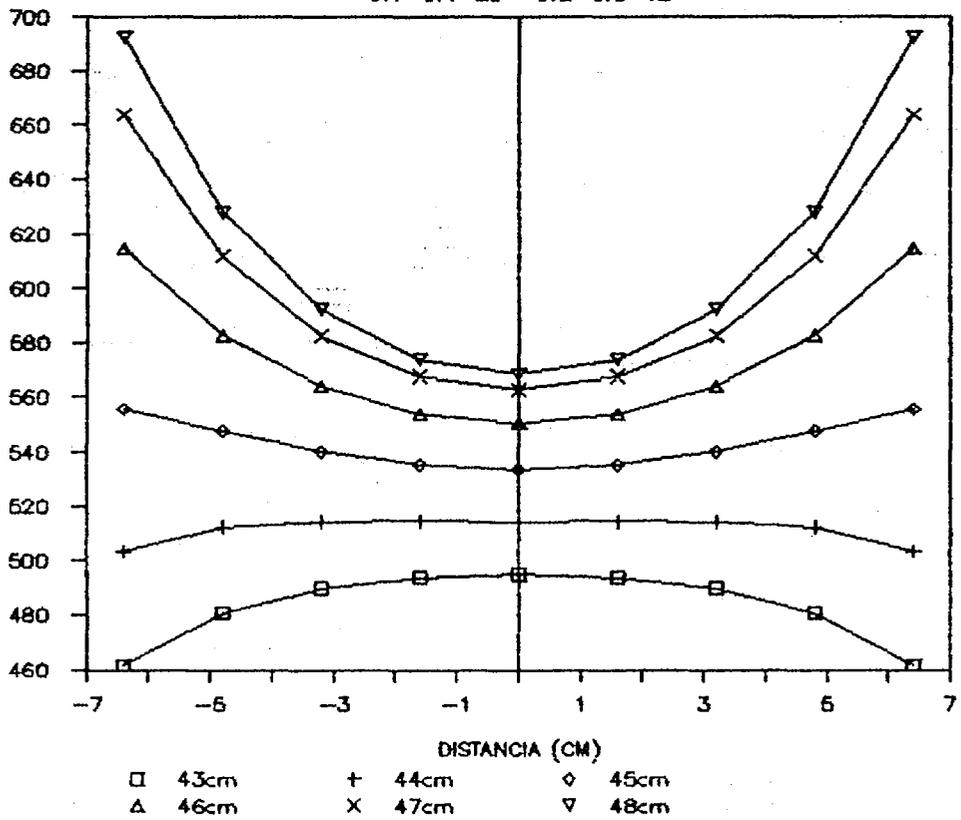


FIGURA 20

```

C.....
c   PROGRAM CFI.FOR
C.....

LOGICAL WATCH, LINEAS, CAMPO, RADIAL
DIMENSION ZI(10), NCB(10), NVB(10),
.IDAT(3), DAT(3), COR(10), TAB(60,10,3), GAM(200,10),
.RADIO(200,10)
EQUIVALENCE (IDAT(1),NB), (IDAT(2),NC), (IDAT(3),NV),
.(DAT(1),RI), (DAT(2),DC), (DAT(3),T)
EXTERNAL CNE21, SYST1, SYST11

```

```

C.....
c   Formatos de lectura y escritura
C.....

```

```

1000 FORMAT(//,4L8,///,3I6,6F6.2)
1010 FORMAT(//,10I6)
1020 FORMAT(//,10I6)
1030 FORMAT(//,10F6.1)
1040 FORMAT(//,10F6.2)
2000 FORMAT(5X,F7.2,40(2X,F6.1))
2080 FORMAT(2X,16(2X,F7.3))

```

```

C.....
c   datos de entrada
C.....

```

```

OPEN(UNIT=2, FILE='CFI.IN', STATUS='OLD')
READ(2,1000)WATCH, LINEAS, CAMPO, RADIAL, NB, NX, NR, DC, ZI, ZF,
.DELZ, RI, H3
READ(2,1010)(NCB(I), I=1, NB)
READ(2,1020)(NVB(I), I=1, NB)
READ(2,1030)(COR(I), I=1, NB)
READ(2,1040)(ZI(I), I=1, NB)

```

```

C.....

```

```

IF(WATCH)THEN
IFILE=0
ELSE
IFILE=3
OPEN(UNIT=3, FILE='CFI.OUT', STATUS='NEW')
ENDIF

```

```

C.....
NZ=(ZF-ZI)/DELZ
H=1.6*RI/NX

```

```

C.....
DO 90 I=1,3
DO 90 K=1, NB
DO 90 J=1, NZ+1
90 TAB(J,K,I)=0.

```

```

C.....
IF(CAMPO)THEN
DO 200 K=1, NX+1
X=RI*0.8-(K-1)*H
DO 200 J=1, NZ+1
CTR=0
CTZ=0
Z=ZI+(J-1)*DELZ

```

```

c   print 10,J
10  FORMAT(10X,'J= ',I3)
    DO 100 L=1,NB
      RB=ABS(X)
      ZB=Z-Z1(L)
      IDAT(2)=WCB(L)
      IDAT(3)=WVB(L)
      DAT(3)=COR(L)

      CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
      CTR=CTR+SBR
      CTZ=CTZ+SBZ
100  CONTINUE
      CT=SQRT(CTR*CTR+CTZ*CTZ)
      TAB(J,K,1)=X
      TAB(J,K,2)=Z
      TAB(J,K,3)=CT
200  CONTINUE

      DO 300 IK=1,NZ+1
300  WRITE(IFILE,2000)TAB(IK,1,2),(TAB(IK,K,3),K=1,NX+1)
c   .....
      IF(RADIAL)THEN
c   .....
      DO 400 IJ=1,NX+1
400  WRITE(IFILE,2000)TAB(1,IJ,1),(TAB(K,IJ,3),K=1,NZ+1)
      ENDIF

c.....
c   Calculo de las lineas de campo del sistema
c   de bobinas anteriormente definido
c.....
      ELSE
      IF(LINEAS)THEN
c   .....
c   Inicializamos el arreglo de salida
c   .....
      DO 320 K=1,NX+1
      DO 320 J=1,NR+1
      GAM(J,K)=0.
      RADIO(J,K)=0.
320  CONTINUE

c.....
c   Fijamos las condiciones iniciales para
c   realizar el calculo por Runge-Kuta
c   que se realiza en la subrutina SYST1
c.....
      H=1.6*RI/NX
      DO 500 KM=1,NX+1
      X=RI*0.8 - (KM-1)*H
      Z=ZI
      GAM(1,KM)=Z
      RADIO(1,KM)=ABS(X)
      DO 410 J=2,NR+1
      IF(J.GE.3)THEN
      RES=GAM(J-1,KM)-GAM(J-2,KM)
      IF(RES.LT.0)THEN
      IF(H3.GT.0.)H3=-H3

```

```

ELSE
IF(H3.LT.0.)H3=-H3
ENDIF
ENDIF
PRINT 80,J
80 FORMAT(20X,'J= ',I3)
C.....
CALL SYST1(IDAT,DAT,Z,X,H3,IFLAG,NCB,NVB,COR,Z1,NB)
C.....
IF(IFLAG.EQ.1)THEN
IFLAG=0
IF(J.GT.3)THEN
RES=RADIO(J-1,KM)-RADIO(J-2,KM)
IF(RES.LT.0)THEN
IF(H3.GT.0.)H3=-H3
ELSE
IF(H3.LT.0.)H3=-H3
ENDIF
ENDIF
C.....
CALL SYST11(IDAT,DAT,Z,X,H3,NCB,NVB,COR,Z1,NB)
C.....
ENDIF
GAM(J,KM)=Z
RADIO(J,KM)=X
IF(J.GE.NR+1)THEN
PRINT 30
30 FORMAT(5X,'ITERACIONES INSUFICIENTES',/)
GO TO 450
ELSE
IF(Z.GE.ZF)THEN
PRINT 40
40 FORMAT(5X,'INTERVALO INSUFICIENTE',/)
GO TO 450
ENDIF
ENDIF
410 CONTINUE
450 IF(H3.LT.0.)H3=-H3
500 CONTINUE
DO 581 I=1,NR+1
581 WRITE(IFILE,2080)(GAM(I,KM),RADIO(I,KM),KM=1,NR+1)
ENDIF
ENDIF
STOP
END

```

```

C.....
SUBROUTINE SYST1(IDAT,DAT,Z1,R0,H3,IFLAG,
.NL,WR,COR,HS,WB)
C.....
c Subrutina para el calculo de dr/dZ con el metodo
c de Runge-Kuta con cinco evaluaciones de la
c funcion. La funcion se define en la subrutina
c CNE21.
c * * * * *
EXTERNAL CNE21
DIMENSION IDAT(3),DAT(5),NL(WB),WR(WB),COR(WB),HS(WB)

C.....
c Inicio de calculos. Condiciones iniciales
c Z1,R0.
c IFLAG=1 no se puede calcular el nuevo punto
c a partir de dr/dZ, por lo tanto es necesario
c cambiar de variables, este cambio se hace en
c la subrutina SYST11.
C.....
BPRIMR=0
BPRIMZ=0
DO 30 J=1,WB
IDAT(2)=NL(J)
IDAT(3)=WR(J)
DAT(3)=COR(J)
ZB=Z1-HS(J)
RB=ABS(R0)
CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
BPRIMR=BPRIMR + SBR
BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
30 CONTINUE
RM1=H3*BPRIMR/BPRIMZ
IF(ABS(RM1).GE..9)THEN
IFLAG=1
GO TO 571
ENDIF

c PRINT 10,H3
c 10 FORMAT(5X,'ENTRE A SYST1',2X,'H3=',F5.2)

C.....
BPRIMR=0
BPRIMZ=0
DO 31 J=1,WB
IDAT(2)=NL(J)
IDAT(3)=WR(J)
DAT(3)=COR(J)
ZB=Z1+H3/4.-HS(J)
RB=ABS(R0)+RM1/4.
C .....
CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
C .....
BPRIMR=BPRIMR + SBR
BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
31 CONTINUE
RM2=H3*BPRIME/BPRIMZ
IF(ABS(RM2).GE..9)THEN

```

```

      IFLAG=1
      GO TO 571
      ENDIF
      ARM2=3.*RM1/32.+9.*RM2/32.
C.....
      BPRIMR=0
      BPRIMZ=0
      DO 32 J=1,NB
      IDAT(2)=WL(J)
      IDAT(3)=WR(J)
      DAT(3)=COR(J)
      ZB=Z1+3.*H3/8.-HS(J)
      RB=ABS(R0)+ARM2
C .....
      CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
C .....
      BPRIMR=BPRIMR + SBR
      BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
32 CONTINUE
      RM3=H3*BPRIMR/BPRIMZ
      IF(ABS(RM3).GE..9)THEN
      IFLAG=1
      GO TO 571
      ENDIF
      ARM3=0.879*RM1-3.277*RM2+3.321*RM3
C.....
      BPRIMR=0
      BPRIMZ=0
      DO 33 J=1,NB
      IDAT(2)=WL(J)
      IDAT(3)=WR(J)
      DAT(3)=COR(J)
      ZB=Z1+0.923*H3-HS(J)
      RB=ABS(R0)+ARM3
      CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
      BPRIMR=BPRIMR + SBR
      BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
33 CONTINUE
      RM4=H3*BPRIMR/BPRIMZ
      IF(ABS(RM4).GE..9)THEN
      IFLAG=1
      GO TO 571
      ENDIF
      ARM4=2.032*RM1-8.*RM2+7.173*RM3-0.206*RM4
C.....
      BPRIMR=0
      BPRIMZ=0
      DO 34 J=1,NB
      IDAT(2)=WL(J)
      IDAT(3)=WR(J)
      DAT(3)=COR(J)
      ZB=Z1+H3-HS(J)
      RB=ABS(R0)+ARM4
      CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
      BPRIMR=BPRIMR + SBR
      BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
34 CONTINUE
      RM5=H3*BPRIMR/BPRIMZ

```

```
IF(ABS(RM5).GE..9)THEN
IFLAG=1
GO TO 571
ENDIF

c PRINT 20,RM1,RM2,RM3,RM4,RM5
c 20 FORMAT(2X,5(2X,F6.3))

R0=ABS(R0)+(0.116*RM1+0.549*RM3+0.535*RM4-0.2*RM5)
Z1=Z1+H3

571 CONTINUE

RETURN
END
```

```

C.....
SUBROUTINE SYSTI1(IDAT,DAT,A,R0,H3,WL,WR,COR,HS,NB)
C.....
C Subrutina para el calculo de dA/dR con el metodo
C de Runge-Kuta con cinco evaluaciones de la funcion.
C La funcion se define en la subrutina CNE21.
C * * * * *

EXTERNAL CNE21
DIMENSION IDAT(3),DAT(5),WL(NB),WR(NB),COR(NB),HS(NB)

PRINT 40
40 FORMAT(5X,'***CUIDADO*** ESTOY EN SYSTI.',/)
C.....
BPRIMR=0
BPRIMZ=0
DO 30 J=1,NB
IDAT(2)=WL(J)
IDAT(3)=WR(J)
DAT(3)=COR(J)
ZB=A-HS(J)
RB=ABS(R0)
CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
BPRIMR=BPRIMR + SBR
BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
30 CONTINUE
RM1=H3*BPRIMZ/BPRIMR
C.....
BPRIMR=0
BPRIMZ=0
DO 31 J=1,NB
IDAT(2)=WL(J)
IDAT(3)=WR(J)
DAT(3)=COR(J)
ZB=A+RM1/4.-HS(J)
RB=ABS(R0)+H3/4.
CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
BPRIMR=BPRIMR + SBR
BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
31 CONTINUE
RM2=H3*BPRIMZ/BPRIMR
ARM2=3.*RM1/32.+9.*RM2/32.
C.....
BPRIMR=0
BPRIMZ=0
DO 32 J=1,NB
IDAT(2)=WL(J)
IDAT(3)=WR(J)
DAT(3)=COR(J)
ZB=A+ARM2-HS(J)
RB=ABS(R0)+3.*H3/8.
CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
BPRIMR=BPRIMR + SBR
BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
32 CONTINUE
RM3=H3*BPRIMZ/BPRIMR
ARM3=0.879*RM1-3.277*RM2+3.321*RM3
C.....

```

```

BPRIMR=0
BPRIMZ=0
DO 33 J=1,NB
  IDAT(2)=WL(J)
  IDAT(3)=WR(J)
  DAT(3)=COR(J)
  ZB=A+ARM3-HS(J)
  RB=ABS(R0)+0.923*H3
  CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
  BPRIMR=BPRIMR + SBR
  BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
33 CONTINUE
  RM4=H3*BPRIMZ/BPRIMR
  ARM4=2.033*RM1-8.*RM2+7.173*RM3-0.206*RM4
C.....
  BPRIMR=0
  BPRIMZ=0
  DO 34 J=1,NB
    IDAT(2)=WL(J)
    IDAT(3)=WR(J)
    DAT(3)=COR(J)
    ZB=A+ARM4-HS(J)
    RB=ABS(R0)+H3
    CALL CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
    BPRIMR=BPRIMR + SBR
    BPRIMZ=BPRIMZ + SBZ
34 CONTINUE
  RM5=H3*BPRIMZ/BPRIMR
C .....
C   Obtencion del nuevo punto
C .....
  A=A+(0.116*RM1+0.549*RM3+0.535*RM4-0.2*RM5)
  R0=ABS(R0)+H3

  RETURN
  END

```

```

C.....
SUBROUTINE CNE21(IDAT,DAT,RB,ZB,SBR,SBZ)
C.....
C  Subrutina para el calculo del campo magnetico
C  creado por una bobina.
C  .....

DIMENSION A1(50),ZB1(50),BO(50),DAT(5),IDAT(3)
EXTERNAL ELLIPTIC
DATA P1/3.14159265358979E0/

NC=IDAT(2)
NV=IDAT(3)
T=DAT(3)

SBR=0
SBZ=0
DO 6 J=1,NC
A1(J)=DAT(1)+(J-1)*DAT(2)
BO(J)=(0.2*PI*T)/A1(J)
R1=RB/A1(J)

DO 6 L=1,NV
ZB1(L)=ZB+((NV-1)/2 -(L-1))*DAT(2)
ET=ZB1(L)/A1(J)
IF(R1.LT.0.00001)THEN
BR=0
BZ=BO(J)/(1+ET*ET)**1.5
ELSE
ARG=4*R1/((1+R1)*(1+R1)+ET*ET)
CALL ELLIPTIC(ARG,R11,R12)
U1=SQRT((1+R1)*(1+R1)+ET*ET)
U2=(1-R1)*(1-R1)+ET*ET
BR=(BO(J)*ET/PI/R1/U1)*(-R11+(1+R1*R1+ET*ET)*R12/U2)
BZ=(BO(J)/PI/U1)*(R11+(1-R1*R1-ET*ET)*R12/U2)
ENDIF

SBR=SBR+BR
SBZ=SBZ+BZ

CONTINUE

RETURN
END

```

```

C=====
c   Module 4. ELLIPTIC.
c
c   This subroutine computes the complete elliptic integral of the
c   first and second kind, following the algorithm presented in
c   Abramowitz and Stegun.
c
c   Date : February 28, 1989.   Author : Armando Bravo-Ortega.
C=====
      subroutine elliptic(arg,valuek,valuee)
C-----
c   declarations.
C-----
      data pi,twopi/3.14159265358979e0,6.28318530717959e0/
      data a0,a1,a2,a3,a4/1.38629436112e0,0.09666344259e0,
      . 0.03590092383e0,0.03742563713e0,0.01451196212e0/
      data b0,b1,b2,b3,b4/0.5000000000e0,0.12498593597e0,
      . 0.06880248576e0,0.03328355346e0,0.00441787012e0/
      data c0,c1,c2,c3,c4/1.0000000000e0,0.44325141463e0,
      . 0.06260601220e0,0.04757383546e0,0.01736506451e0/
      data d0,d1,d2,d3,d4/0.0000000000e0,0.24998368310e0,
      . 0.09200180037e0,0.04069697526e0,0.00526449639e0/
      data e0,e1,e2,e3,e4/1.0000000000e0,0.2500000000e0,
      . 0.1406250000e0,0.0976562500e0,0.07476806600e0/
      data f0,f1,f2,f3,f4/1.0000000000e0,0.2500000000e0,
      . 0.0468750000e0,0.0195312500e0,0.01068115200e0/
C-----
c   computations.
C-----
      if(arg.gt.1.0e-2)then
      arg=1.0-arg
      coeflg=log(1.0/arg)
      valuek=a0+arg*(a1+arg*(a2+arg*(a3+a4*arg)))+
      . (b0+arg*(b1+arg*(b2+arg*(b3+b4*arg)))*coeflg
      valuee=c0+arg*(c1+arg*(c2+arg*(c3+c4*arg)))+
      . (d0+arg*(d1+arg*(d2+arg*(d3+d4*arg)))*coeflg
      else
      valuek=pi*(e0+arg*(e1+arg*(e2+arg*(e3+e4*arg)))/2.0
      valuee=pi*(f0-arg*(f1+arg*(f2+arg*(f3+f4*arg)))/2.0
      endif
      return
      end

```