

09.84.02

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1984

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

Dirección de Investigación y Desarrollo

Gerencia de Desarrollo

Departamento de Instrumentación y Control

RUIDO Y SU APLICACION A LA MEDICION DEL FLUJO NEUTRONICO

Por

Pedro SABATE PUIGMAL

Este trabajo fué realizado en la División Detectores (C.A.E.) bajo la dirección del Dr. Emilio MATATAGUI, y presentado como Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, en Agosto de 1984.

R E S U M E N

En su doble aplicación como generador de pulsos y de corriente fluctuante, se estudian los parámetros experimentales que caracterizan el dispositivo contador de fisión (CF) y se correlacionan con sus principios de funcionamiento como sensor neutrónico.

Para ello se utilizan CF con depósito de material fisible en uno y ambos electrodos, y se hace el análisis espectral de las fluctuaciones correspondientes a actividad alfa del propio CF, a exposición gamma, a exposición a campo neutrónico, y a campo mixto.

Se muestra que es posible utilizar este dispositivo detector para instrumentar una cadena de medición única, compacta y simple para el control de reactores nucleares, en un amplio rango de potencias y con excelente discriminación contra fondo gamma.

Estos resultados son la base para el diseño de un prototipo que se encara en el Departamento de Instrumentación y Control de la CNEA para su ensayo en reactores de potencia intermedia. Un resumen fué presentado en la XI Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (A.A.T.N.) en Noviembre de 1983.

I N D I C E

INTRODUCCION

CAPITULO 1 - CONCEPTOS PREVIOS

- 1 - 1.- DISPOSITIVO CONTADOR DE FISION (CF)
 - 1 - 1.1.- DETECCION DE NEUTRONES CON EL CF
 - 1 - 1.1.1.- Mecanismo de Detección
 - 1 - 1.1.2.- Interferencias
 - 1 - 1.1.2.1.- Fondo Alfa
 - 1 - 1.1.2.2.- Fondo Gamma
 - 1 - 1.2.- GENERACION DE PULSOS EN EL CF
- 1 - 2.- MODOS DE OPERACION DEL CF
 - 1 - 2.1.- MODO DE PULSOS (MODO P)
 - 1 - 2.2.- MODO DE CORRIENTE CONTINUA (MODO DC)
 - 1 - 2.3.- MODO DE FLUCTUACIONES DE CORRIENTE (MODO AC)
- 1 - 3.- FUNDAMENTO DE LA TECNICA DE FLUCTUACIONES
- 1 - 4.- EL CF EN REACTORES NUCLEARES
 - 1 - 4.1.- UTILIZACION DEL CF
 - 1 - 4.2.- INTERFERENCIAS EN EL CF
 - 1 - 4.2.1.- Operación en el Modo de Pulsos
 - 1 - 4.2.2.- Operación en el Modo DC
 - 1 - 4.2.3.- Operación en el Modo AC

CAPITULO 2 - TECNICAS EXPERIMENTALES

- 2 - 1.- FUENTES DE RADIACION
 - 2 - 1.1.- FONDO ALFA
 - 2 - 1.2.- FUENTES DE NEUTRONES
 - 2 - 1.3.- FUENTES GAMMA (γ)
 - 2 - 1.4.- FUENTE DE CAMPO MIXTO NEUTRON + GAMMA (FN γ)
- 2 - 2.- EQUIPOS DE MEDICION
 - 2 - 2.1.- CONTADORES DE FISION
 - 2 - 2.2.- MEDICION EN EL MODO DE PULSOS
 - 2 - 2.2.1.- Cadena de Espectrometría
 - 2 - 2.2.2.- Cadena de Control para Reactores

(sigue Cap.2)

(Continuación Cap. 2)

- 2 - 2.3.- MEDICIONES EN EL MODO DC
- 2 - 2.4.- MEDICIONES EN EL MODO AC
 - 2 - 2.4.1.- Cadena de Medición de Fluctuaciones
 - 2 - 2.4.2.- Metodología de Medición

CAPITULO 3 - PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL CF

- 3 - 1.- EL CF EN EL MODO DE PULSOS
 - 3 - 1.1.- GRAFICO ESPECTRAL DE ENERGIAS DE FISION
 - 3 - 1.2.- CARGA GENERADA POR NEUTRONES
 - 3 - 1.3.- FLUJO NEUTRONICO DE LA FNL
- 3 - 2.- MEDICIONES EN EL MODO AC
 - 3 - 2.1.- ESPECTRO DE POTENCIA DEL FONDO ALFA
 - 3 - 2.1.1.- Gráficos Espectrales de Potencia
 - 3 - 2.1.2.- Parámetros Característicos
 - 3 - 2.1.2.1.- Frecuencias de Corte
 - 3 - 2.1.2.2.- Carga media y Contribución Iónica
 - 3 - 2.1.2.3.- Tasa Media de Desintegraciones Alfa
 - 3 - 2.2.- ESPECTRO DE POTENCIA EN FLUJO NEUTRONICO
 - 3 - 2.2.1.- Gráficos Espectrales de Potencia
 - 3 - 2.2.1.1.- Características Generales
 - 3 - 2.2.1.2.- Carga Media y Contribución Iónica
 - 3 - 2.3.- ESPECTRO DE POTENCIA EN CAMPO GAMMA
 - 3 - 2.3.1.- Gráficos Espectrales de Potencia
 - 3 - 2.3.2.- Parámetros Característicos
 - 3 - 2.3.2.1.- Valores Obtenidos. Discusión
 - 3 - 2.4.- CORRIMIENTO DE FRECUENCIAS DE CORTE

CAPITULO 4 - DETECCION DE NEUTRONES EN RANGO AMPLIO

- 4 - 1.- ESPECTROS DE POTENCIA EN CAMPO NEUTRONICO INTENSO
 - 4 - 1.1.- GRAFICOS ESPECTRALES
 - 4 - 1.1.1.- Carga Media y Contribución Iónica
 - 4 - 1.1.2.- Cálculo de la Sensibilidad Neutrónica
 - 4 - 1.2.- LINEALIDAD

(sigue Cap.4)

(Continuación Cap. 4)

4 - 2.- ESPECTROS DE POTENCIA EN CAMPO MIXTO

4 - 2.1.- GRAFICOS ESPECTRALES

4 - 2.2.- EVOLUCION DE LA TASA DE DOSIS CON LA POTENCIA

4 - 2.3.- LINEALIDAD

4 - 2.4.- ERROR POR INTERFERENCIA GAMMA

CAPITULO 5 - CONCLUSIONES

APENDICE A - REACTOR NUCLEAR RA3

A - 1.- DESCRIPCION GENERAL

A - 2.- FACILIDADES DE IRRADIACION

A - 3.- ESTIMACION DE FLUJO

APENDICE B - EQUIPO DE MEDICION

B - 1.- CONTADORES DE FISION

B - 2.- CADENA DE ESPECTROMETRIA

B - 3.- MEDICION DE FLUCTUACIONES

B - 3.1.- ANALIZADOR DE ESPECTRO DE POTENCIA

B - 3.2.- GENERADOR DE CALIBRACION (FOT)

B - 3.2.1.- Descripción General

B - 3.2.2.- Calibración

B - 3.2.3.- Fotomultiplicador y Circuito

APENDICE C - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BIBLIOGRAFIA

TABLAS

INDICE DE TABLAS

Gráfico en fig.

CAPITULO 3

1 .- Espectros de Potencia del Fondo Alfa (PT9, + 400 V)	3-3
2 .- Espectros de Potencia del Fondo Alfa (PT9, - 400 V)	3-3
3 .- Espectros de Potencia del Fondo Alfa (CENTR, $\pm$ 400 V)	3-4
4 .- Espectros de Potencia en la FNL (PT9, + 400 V)	3-5
5 .- Espectros de Potencia en la FNL (PT9, - 400 V)	3-5
6 .- Espectros de Potencia en la FNL (CENTR, $\pm$ 400 V)	3-6
7 .- Espectros de Potencia en la F γ M y F γ I (PT9, $\pm$ 400 V)	3-7
8 .- Espectros de Potencia en la F γ M y F γ I (CENTR, $\pm$ 400 V)	3-8
9 .- Espectros de Potencia frente a Variaciones de Tensión (PT9 en la F γ I, tensiones -)	3-9
10.- Espectros de Potencia frente a Variaciones de Tensión (PT9 en la FNR, tensiones + y -)	3-10 y 3-11

CAPITULO 4

11.- Serie de Espectros de Potencia del PT9 en la FNR	4-1
12.- Serie de Espectros de Potencia del PT9 en la FN γ	4-3

APENDICE B

13.- Ganancia del Fotomultiplicador (FOT)	B-2
14.- Ancho de Banda de Ruido Equivalente del (FOT)	B-2

INDICE DE FIGURAS

Página

CAPITULO 1

1 - 1.-	a - Ionización del Gas en el CF	1-4
	b - Pulsos de Corriente en el CF	1-4
	c - Cadena de Medición en el Modo P	1-4
	d - Medición en el Modo DC	1-4
	e - Medición en el Modo AC	1-4
1 - 2.-	a - Densidad Espectral de Potencia de Pulsos Aleatorios Rectangulares	1-8
	b - Densidad Espectral de Potencia (Esquemática) de Pulsos del CF	1-8
1 - 3.-	Espectros de Energías de Fisión (de Carga Colectada) del Fondo Alfa, Neutrones y Fondo Gamma, del CF	1-11

CAPITULO 2

2 - 1.-	a - Medición en el Modo P: Cadena de Espectrometría	2-6
	b - Medición en el Modo P: Cadena de Control para Reactores	2-6
	c - Medición en el Modo AC: Cadena de Fluctuaciones	2-6

CAPITULO 3

3 - 1.-	Espectros de Pulsos del CF PT9	3-2
3 - 2.-	Espectro de Pulsos del CF CENTR	3-3
3 - 3.-	Espectros de Potencia del Fondo Alfa (PT9)	3-10
3 - 4.-	Espectros de Potencia del Fondo Alfa (CENTR)	3-11
3 - 5.-	Espectros de Potencia en FNL (PT9)	3-16
3 - 6.-	Espectros de Potencia en FNL (CENTR)	3-17
3 - 7.-	Espectros de Potencia en $F\gamma M$ y $F\gamma I$ (PT9)	3-21
3 - 8.-	Espectros de Potencia en $F\gamma M$ y $F\gamma I$ (CENTR)	3-22
3 - 9.-	Corrimiento de la Frecuencia de Corte con la Tensión (PT9 en la $F\gamma I$)	3-27
3 - 10.-	Corrimiento de la Frecuencia de Corte con la Tensión (-) (PT9 en la FNR)	3-28
3 - 11.-	Corrimiento de la Frecuencia de Corte con la Tensión (+) (PT9 en la FNR)	3-29
3 - 12.-	Característica de Saturación Gamma y Neutrónica del PT9	3-30

(Sigue Indice de Figuras)

Página

CAPITULO 4

4 - 1.- Serie de Espectros de Potencia del PT9 en FNR	4-3
4 - 2.- Linealidad de la Fluctuación vs. Potencia del RA3 (PT9 en la FNR)	4-8
4 - 3.- Serie de Espectros de Potencia del PT9 en la FN γ	4-9
4 - 4.- Evolución de la Tasa de Dosis con la Potencia del RA3 (PT9 en la FN γ)	4-13
4 - 5.- Linealidad de la Fluctuación vs. Potencia del RA3 (PT9 en FN γ)	4-14

APENDICE A

A - 1.- Tanque del RA3: Núcleo, Mesa de Cámaras, Columna Térmica	A-2
A - 2.- "Stringer" de Columna Térmica del RA3	A-4

APENDICE B

B - 1.- Generador de Calibración (FDT): Circuito	B-6
B - 2.- a - Ganancia del Fotomultiplicador (FDT)	B-7
b - Ancho de Banda de Ruido Equivalente del (FDT)	B-7

INTRODUCCION

El Contador de Fisión (CF) es un dispositivo detector de neutrones que es normalmente utilizado en el rango de baja potencia (arranque) de reactores nucleares. En estas condiciones se tiene un pequeño flujo neutrónico en presencia de un fuerte campo de radiación gamma.

A bajo nivel de flujo neutrónico (hasta $\sim 10^6$ n/cm² seg.), el CF genera pulsos resolubles en tiempo, cuya tasa media es un indicador de este flujo. En flujos neutrónicos más altos estos pulsos se superponen, no son separables, y el CF es un generador de corriente fluctuante.

Si se mide esta corriente con un instrumento de valor medio, se obtiene una lectura de DC que será más ó menos representativa del flujo neutrónico. Midiendo en AC, el valor cuadrático medio de la fluctuación de la corriente generada por el CF guarda una más estrecha relación con ese flujo, y permite ampliar el rango de utilización del dispositivo.

El objeto de este trabajo es estudiar el comportamiento del CF en el modo de operación de fluctuaciones, y en él se encaran dos aspectos claramente diferenciados:

i) El contador de fisión.

Su comportamiento frente a flujo neutrónico suele analizarse a partir de la distribución espectral de energía (de carga colectada por el CF) obtenida con cadena de espectrometría convencional, en régimen de pulsos. Este método da información parcial sobre sus características.

El análisis de la fluctuación permite complementarlo, correlacionando sus características constructivas y funcionales con el espectro de potencia obtenido frente a distintas fuentes de radiación.

Este aspecto se discute en la primera parte del trabajo. Con el equipamiento y procedimientos que se describen en el Capítulo 2 se efectuaron mediciones con dos dispositivos CF conceptualmente diferentes, y se obtuvieron espectros de potencia del fondo alfa del detector, del dispositivo frente a flujo neutrónico, y en campo gamma.

Los resultados se dan en el Capítulo 3 y se discuten las conclusiones que de ellos se desprenden.

ii) Factibilidad de una cadena de detección neutrónica para reactores nucleares por el método de fluctuación.

Esta aplicación se discute en el Capítulo 4. Naturalmente, es complementario del anterior, y usando aquellos resultados se analizan series de gráficos espectrales de potencia obtenidos con uno de los CF en el reactor RA3, en flujo neutrónico puro y en campo mixto de neutrones y gamma, a distintas potencias de trabajo.

El Capítulo 1 es ampliatorio de estos conceptos genéricos en algunos aspectos, y en él se hace un análisis teórico previo de los objetivos propuestos.

En el Capítulo 2, como se dijo, se detallan las facilidades de irradiación y equipo electrónico utilizado en este trabajo, y se describe la metodología experimental y de cálculo.

Los resultados experimentales concretos se dan en los Capítulos 3 y 4, y se discuten las correlaciones entre los parámetros obtenidos en las mediciones y los que era previsible esperar a partir de consideraciones teóricas. El acuerdo entre ellos es, en general, bueno.

Como quinta parte se dan las conclusiones generales de este trabajo, y se discuten posibles continuaciones del mismo.

Anexos a esta presentación, en los Apéndices se resume información ampliatoria que se considera necesaria.

CAPITULO 1 .- CONCEPTOS PREVIOS

1 - 1.- DISPOSITIVO CONTADOR DE FISION (CF)

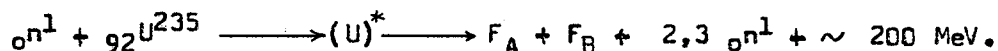
Este sensor consiste en una Cámara de Ionización con un depósito de material fisiónable a los efectos de detectar neutrones según una reacción de fisión (n,f).

1 - 1.1.- DETECCION DE NEUTRONES CON EL CF

1 - 1.1.1.- Mecanismo de Detección

En la detección de neutrones con un Contador de Fisión tienen lugar la siguiente sucesión de eventos:

a - La interacción entre un neutrón de baja energía y el ${}_{92}\text{U}^{235}$ del convertidor, según la reacción de fisión



De esta energía disponible, la mayor parte aparecerá como cinética de los fragmentos de fisión F_A y F_B .

b - La degradación de parte de esta energía de los fragmentos de fisión (F_A ó F_B) en el gas de llenado del dispositivo CF. Se generan así un gran número de pares ión - electrón a lo largo de la traza del fragmento de fisión (f.f.) en el gas.

c - Colección, debido al campo eléctrico entre los electrodos del CF, de la carga generada en el proceso b. Ello da lugar a la aparición de un pulso eléctrico cuya amplitud será proporcional a la carga colectada.

1 - 1.1.2.- Interferencias

1 - 1.1.2.1.- Fondo Alfa

Existe en el CF un fondo intrínseco debido a partículas alfa emitidas

por decaimiento radioactivo del material del convertidor, por ejemplo del $^{235}_{92}\text{U}$. Estas partículas generan pulsos eléctricos por el mecanismo del parágrafo anterior.

En la detección de neutrones, este fondo constituye una interferencia relativamente poco importante.

1 - 1.1.2.2.- Fondo Gamma

En la aplicación usual del CF, que es la medición de flujo neutrónico en un reactor nuclear, el detector está inmerso en el campo gamma existente en las cercanías del núcleo.

Esta radiación interactúa con los materiales del CF, generando electrones energéticos que podrán ionizar el gas y originan, en consecuencia, pulsos eléctricos según el mecanismo c. Cuando el fondo γ es intenso, se constituye en una interferencia importante para la detección de flujo neutrónico.

1 - 1.2.- GENERACION DE PULSOS EN EL CF

Cada proceso de interacción entre una partícula ionizante (por ejemplo un fragmento de fisión (f.f.)) con el Contador de Fisión origina una corriente instantánea $i(t)$ que está determinada por:

- i) La carga generada por ionización del gas, producida por esa partícula ionizante. Se generan así un igual número de electrones e iones positivos.
- ii) El mecanismo de transporte de esa carga a los electrodos del CF.

Supóngase un CF con geometría plana, con una separación entre electrodos d , entre los que existe un campo eléctrico E . Un portador de carga q , al moverse entre los electrodos, induce en el circuito exterior una corriente $i(t)$ tal que

$$i(t) = \begin{cases} \frac{q}{d} v(t) & \text{en } 0 < t < \tau \\ 0 & \text{fuera del intervalo} \end{cases}$$

donde τ es el tiempo de colección de ese portador y $v(t)$ es su velocidad. Se supondrá que $v(t)$ es una velocidad constante w (velocidad de migración) que resulta de los procesos de adquisición de energía del portador (debido a E) y su degradación por interacción con las moléculas del gas. Por lo tanto, w dependerá

del tipo de portador (electrón, ión positivo ó negativo), del campo eléctrico y de las características y presión del gas.

En lo que sigue, supondremos que los portadores negativos son electrones, ó sea que el gas del CF no es electronegativo, por lo que la probabilidad de formación de iones negativos es pequeña. Debido al campo eléctrico presente, los electrones se mueven en el gas con una velocidad de migración constante w_- (los iones con w_+), y contribuyen a $i(t)$ con una corriente constante $i_-(t)$ (los iones con $i_+(t)$) durante su tránsito, hasta su colección.

Si se supone que se genera una carga ($+Q_g, -Q_g$) en un punto x entre los electrodos (corresponde a la creación de $n = \frac{Q_g}{e}$ pares ión-electrón, donde e es la carga del electrón), los electrones contribuirán a $i(t)$ con un pulso de corriente rectangular de amplitud I_- y duración τ_- , y los iones con uno de amplitud I_+ y duración τ_+ . Valdrá entonces que

$$i(t) = i_-(t) + i_+(t)$$

donde es

$$i_-(t) = \begin{cases} I_- & \text{en } 0 < t < \tau_- \\ 0 & \text{fuera del interv.} \end{cases} \quad i_+(t) = \begin{cases} I_+ & \text{en } 0 < t < \tau_+ \\ 0 & \text{fuera del interv.} \end{cases}$$

La amplitud I_- , I_+ es

$$I_- = \frac{n e}{d} w_- \quad I_+ = \frac{n e}{d} w_+$$

y la duración τ_- , τ_+ es

$$\tau_- = \frac{d - x}{w_-} \quad \tau_+ = \frac{x}{w_+}$$

en las coordenadas que se indican en fig. 1 - 1 a.

Típicamente es $w_- \approx 10^{+3} w_+$, y por lo tanto $\tau_- \ll \tau_+$, con $\tau_- \approx 10^{-3} \tau_+$.

Cada pulso tiene una carga $q = \int i(t) dt$ cuyo valor es

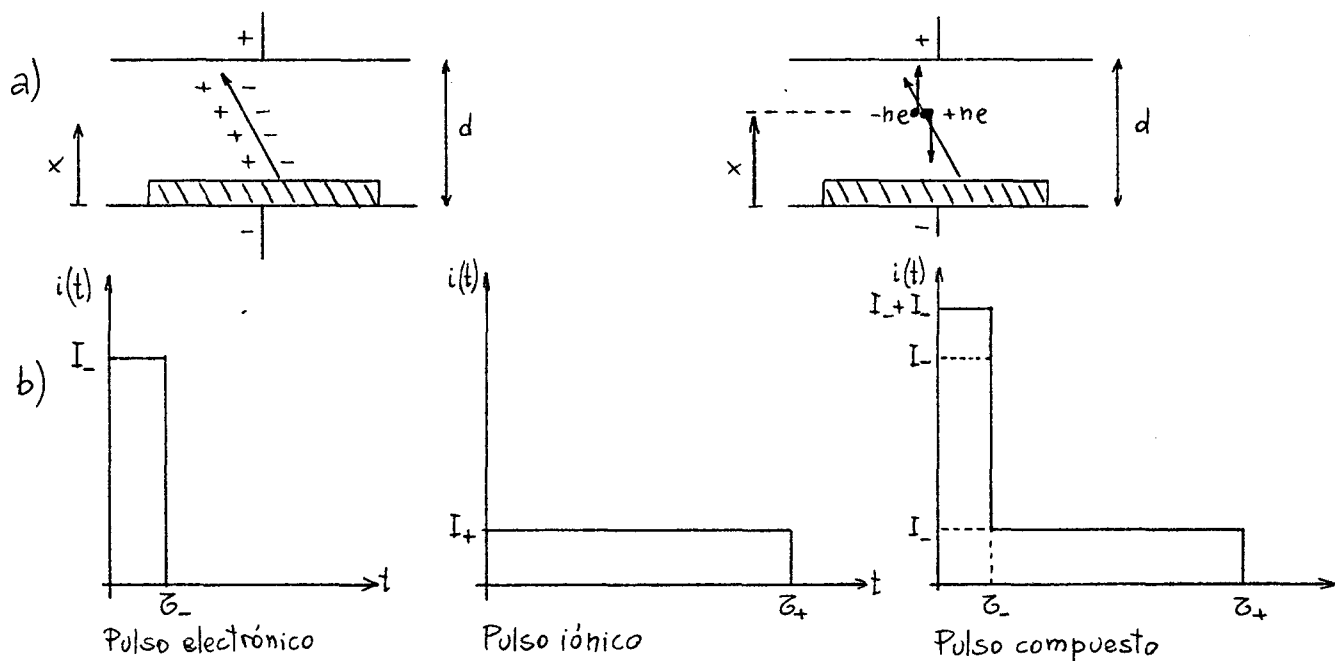
$$q_- = I_- \tau_- = n e \frac{d - x}{d} \quad q_+ = I_+ \tau_+ = n e \frac{x}{d}$$

y depende de la energía que entrega la partícula ionizante. La carga total colectada Q_c es

$$Q_c = q_- + q_+ = n e$$

igual a la carga generada Q_g .

Por supuesto, la dependencia temporal real de la corriente de colección en un CF es más compleja, pues la carga no se origina toda en un punto. Sin em-



Modo de Pulsos (P)

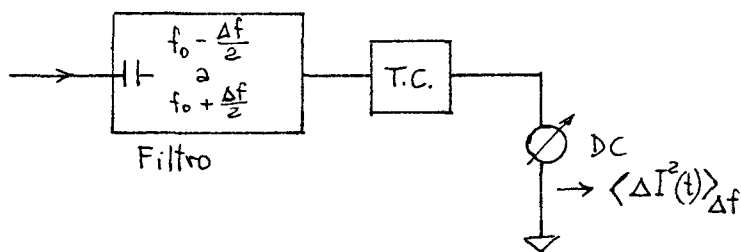
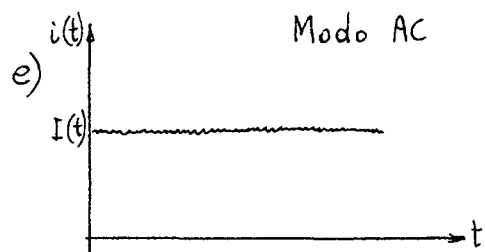
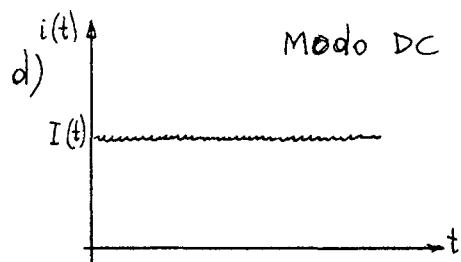
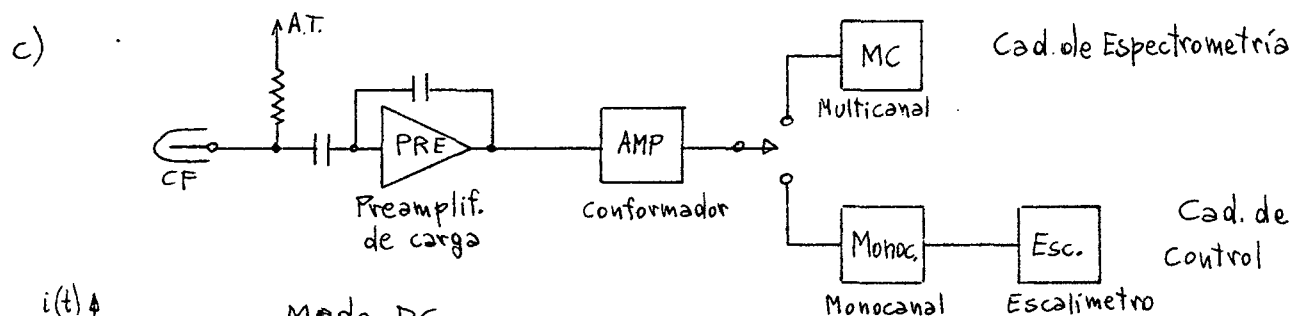


Fig. 1 - 1

- a - Ionización del Gas en el CF
- b - Pulsos de Corriente en el CF
- c - Cadena de Medición en el Modo P
- d - Medición en el Modo DC
- e - Medición en el Modo AC

bargo, este análisis simplificado es suficiente para dar una idea aproximada del mecanismo de colección.

1 - 2.- MODOS DE OPERACION DEL CF

Ya se ha visto que la radiación neutrónica origina f.f. en el CF.

Dependiendo del número de pulsos eléctricos generados por los f.f. por unidad de tiempo (tasa de pulsos) podrán ser convenientes diferentes formas de tratamiento de la señal del CF.

1 - 2.1.- MODO DE PULSOS (MODO P)

Cuando la tasa de pulsos es relativamente pequeña, será posible procesar cada pulso individualmente. Ello permitirá, por ejemplo, medir su amplitud y acumular en una memoria el número y amplitud de los eventos registrados durante un tiempo de muestreo dado.

Por lo tanto, se podría hacer espectrometría: la amplitud del pulso de salida será proporcional a la carga colectada, que a su vez es proporcional a la energía que la partícula ionizante deja en el gas del CF.

Para el control de reactores es suficiente conocer la tasa de pulsos, que tiene relación directa con el flujo neutrónico medio instantáneo, y es proporcional a la potencia media instantánea de operación del reactor. Un discriminador deja pasar todos aquellos pulsos cuya amplitud supera cierto valor, y los registra un escalímetro.

Una cadena de medición típica estaría constituida por (fig. 1-1 c):

- a - Un preamplificador sensible a carga
- b - Un amplificador conformador
- c - Un analizador monocanal
- d - Un escalímetro

Se trabaja el CF en el modo de pulsos, en el rango de baja potencia del reactor (Canal de Arranque). La máxima tasa media de cuentas suele especificarse, en este modo de operación, en $\sim 10^5$ ctas/seg.

1 - 2.2.- MODO DE CORRIENTE CONTINUA (MODO DC)

De la superposición de los pulsos individuales $i(t)$ generados por la radiación, resulta la corriente $I(t)$. Esta corriente fluctúa alrededor de su va-

lor medio $\langle I(t) \rangle$.

En el modo DC, un instrumento de corriente continua mide este valor medio $\langle I(t) \rangle$, y da una indicación que es proporcional al flujo neutrónico (fig. 1 - 1 d).

A bajos niveles de flujo, será importante la contribución a la corriente debida a la actividad alfa del convertidor del CF. En un reactor, se medirá también la corriente debida a exposición gamma, y estas interferencias (alfa y gamma) no podrán separarse de la señal debida a neutrones.

El modo DC sería útil a alta potencia, en las últimas décadas de evolución del reactor, donde la tasa de pulsos debida a neutrones es muy alta, y la corriente proveniente del fondo gamma pierde importancia relativa frente a la que corresponde al flujo neutrónico.

1 - 2.3.- MODO DE FLUCTUACIONES DE CORRIENTE (MODO AC)

En este modo de operación se mide el valor cuadrático medio $\langle \Delta I^2(t) \rangle$ de las fluctuaciones de la corriente $I(t)$, que es proporcional a la potencia de la componente alterna de la señal del CF (ver fig. 1-1 e).

Se verá como un análisis de esas fluctuaciones permite la utilización del CF a tasa de pulsos grande, y reduce notablemente los efectos de la interferencia del fondo gamma respecto a la medición en el modo DC.

1 - 3.- FUNDAMENTO DE LA TECNICA DE FLUCTUACIONES

Cada pulso del CF origina una corriente instantánea $i(t)$, con una carga colectada q . Si $\chi(t)$ representa la dependencia temporal de la corriente que corresponde a la carga unidad, será

$$i(t) = q \chi(t)$$

donde $\chi(t)$ está determinada por las características de colección del CF y las de conformación de su circuito electrónico asociado.

El conjunto de estos pulsos, que son generados aleatoriamente con una tasa media $\langle N \rangle$, da lugar a una corriente instantánea $I(t)$ cuyo valor medio y dispersión están dados por los teoremas de Campbell:*

* Ver referencia en los apéndices.

$$\begin{aligned}\langle I(t) \rangle &= \langle N \rangle \int_0^\infty \overline{i(t)} dt = \bar{q} \langle N \rangle \int_0^\infty \chi(t) dt = \bar{q} \langle N \rangle \\ \langle \Delta I^2(t) \rangle &= \langle I^2(t) \rangle - \langle I(t) \rangle^2 = \langle N \rangle \int_0^\infty \overline{i^2(t)} dt = \\ &= \bar{q}^2 \langle N \rangle \int_0^\infty \chi^2(t) dt = 2 \bar{q}^2 \langle N \rangle B\end{aligned}$$

Estas relaciones sugieren que si la señal de un CF es analizada en el modo DC, se obtendrá un valor proporcional a $\bar{q} \langle N \rangle$.

En el modo AC, si la corriente es amplificada en alterna (siendo así, $\langle I(t) \rangle$ es nulo), y a continuación medida cuadráticamente, se obtendrá un valor proporcional a $2 \bar{q}^2 \langle N \rangle$. El coeficiente de proporcionalidad B define el "ancho de banda de ruido equivalente", y depende de $\chi(t)$.

Como la corriente $I(t)$ resulta de la superposición aleatoria de pulsos individuales $i(t)$ con tasa media $\langle N \rangle$, resulta, de la aplicación del teorema de Carson: *

$$S_I(f) = 2 \langle N \rangle \overline{|F_i(f)|^2}$$

donde $F_i(f)$ es la transformada de Fourier de uno de los pulsos aleatorios $i(t)$. $S_I(f)$ es la función densidad espectral de potencia que caracteriza las fluctuaciones de $I(t)$, tal que la fluctuación cuadrática media de esta corriente, medida en un intervalo de frecuencia Δf alrededor de f , en un rango en que sea válido considerar a $S_I(f)$ constante, es

$$\langle \Delta I^2 \rangle_{\Delta f} = S_I(f) \Delta f$$

Aplicándolo a pulsos rectangulares de amplitud I_0 y duración τ_0 (carga total del pulso $q_0 = I_0 \tau_0$), se obtiene

$$S_I(f) = 2 \bar{q}_0^2 \langle N \rangle \left(\frac{\sin \frac{\omega \tau_0}{2}}{\frac{\omega \tau_0}{2}} \right)^2 = 2 \bar{q}_0^2 \langle N \rangle \left(\frac{\sin \pi f \tau_0}{\pi f \tau_0} \right)^2$$

cuya representación gráfica se da en la fig. 1-2 a.

La frecuencia de corte (potencia mitad) corresponde a $f_c = \frac{0,44}{\tau_0} \approx \frac{1}{2 \tau_0}$, y la contribución a la potencia se anula en $f = \frac{1}{\tau_0}$. A frecuencias bajas, tales que $f \ll \frac{1}{2 \tau_0}$, vale

$$S_I(f) = 2 \bar{q}_0^2 \langle N \rangle$$

En la señal del CF puede considerarse que hay dos familias de pulsos: pulsos electrónicos, cortos y de gran amplitud; y pulsos iónicos, largos y de pequeña amplitud. A cada familia le corresponde un gráfico espectral caracterizado por su frecuencia de corte (ver fig. 1-2 b). A frecuencias bajas contribuyen los pulsos electrónicos y los iónicos, mientras que a altas frecuencias sólo con-

* Ver referencia en los apéndices.

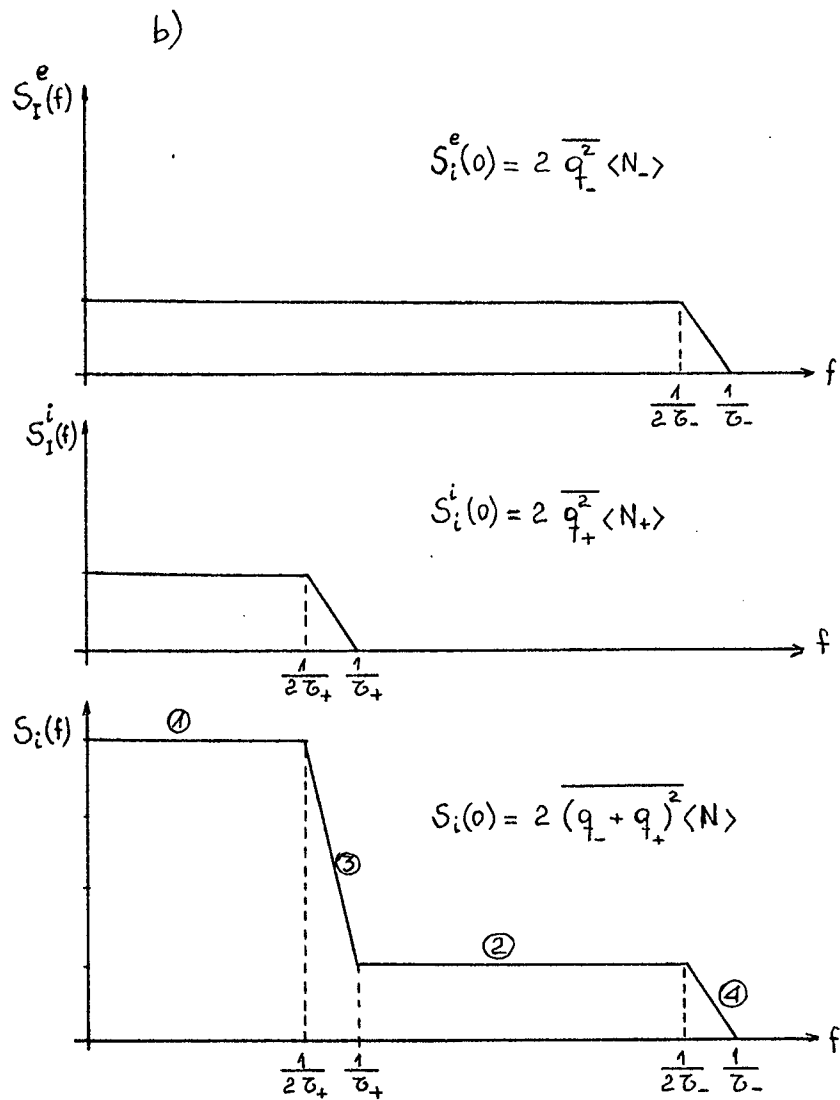
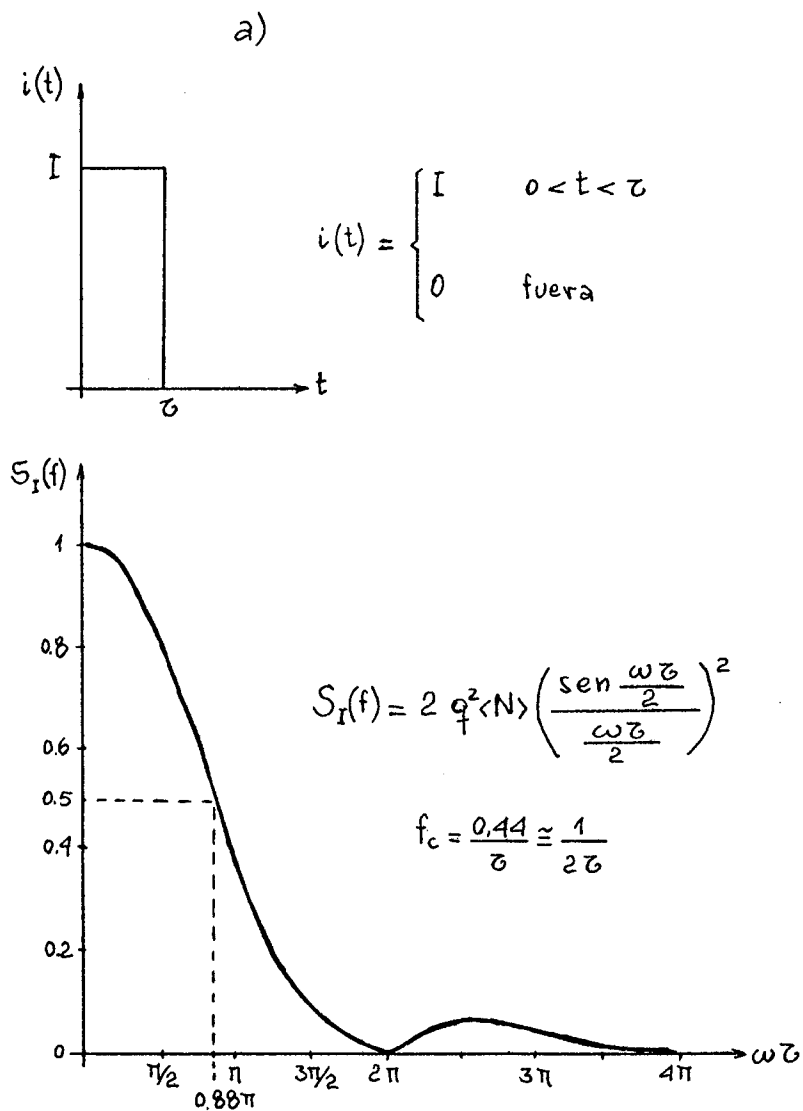


Fig. 1 - 2.- a - Densidad Espectral de Potencia de Pulsos Aleatorios Rectangulares
b - Densidad Espectral de Potencia (Esquemática) de Pulsos del CF

tribuyen los pulsos electrónicos a $S_I(f)$.

Puede esperarse, por lo tanto, que el ruido generado por el CF tenga la siguiente forma espectral:

1 - Aproximadamente constante a bajas frecuencias ($f \lesssim \frac{1}{2\tau_+}$), debido a la contribución de iones y electrones a $S_I(f)$.

2 - Aproximadamente constante (y menor) a medianas frecuencias ($\frac{1}{\tau_+} \lesssim f \lesssim \frac{1}{2\tau_-}$), puesto que la única contribución es la electrónica (ha desaparecido la iónica).

3 - Decreciente en la zona de transición ($\frac{1}{2\tau_+} \lesssim f \lesssim \frac{1}{\tau_+}$) entre las dos anteriores, donde la contribución iónica desaparece gradualmente.

4 - Decreciente también a frecuencias altas ($f \gtrsim \frac{1}{2\tau_-}$), pues la contribución electrónica va reduciéndose y el nivel de la señal disminuye.

1 - 4 .- EL CF EN REACTORES NUCLEARES

1 - 4.1.- UTILIZACION DEL CF

El parámetro más importante a medir y controlar en la operación de reactores nucleares, es la potencia instantánea $P(t)$ generada por el proceso de fisión en el núcleo. El flujo neutrónico $\phi_n(t)$ es un indicador conveniente, por ser proporcional a esta potencia y permitir una lectura prácticamente instantánea del estado del reactor.

Como ya se dijo, los sensores neutrónicos, para una medición adecuada de $\phi_n(t)$ deberán estar ubicados en posiciones relativamente cercanas al núcleo, y estarán sometidos a un intenso fondo de radiación gamma proveniente de la fisión y de la activación de materiales cercanos, que podría interferir en la medición.

Por lo tanto, se requiere del sistema de detección neutrónica la capacidad de

i - medir $\phi_n(t)$ en el rango de interés para el funcionamiento del reactor. Usualmente se lo especifica entre 10 y 11 décadas.

ii.- separar la interferencia del fondo gamma presente en la posición de medición, que a baja potencia del reactor significa una cota inferior de $I(t)$ constante sobre varias décadas.

Una solución habitual para cubrir estos dos requisitos consiste en instalar dos canales de medición independientes:

a - Un canal para el rango de baja potencia basado, por ejemplo, en un CF trabajando en el modo P; el fondo gamma se separa discriminando por altura de pulsos.

b - Un canal para potencias medias y altas, con cámara de ionización compensada (CIC); la interferencia del fondo gamma se compensa eléctricamente en la misma cámara.

Para lograr superposición de una ó dos décadas entre los dos canales, se varía la respuesta del CF, desplazándolo respecto al núcleo durante el arranque.

Existe otra posibilidad. Consiste en medir flujo neutrónico con un CF en modo de pulsos (modo P) hasta el límite de resolución en tiempo de la electrónica, y para flujos mayores medir $\phi_n(t)$ por la señal de fluctuación contenida en la corriente $I(t)$ generada por el mismo detector (método Campbelliano).

Para mayor potencia de trabajo del reactor, podría ser conveniente medir flujo neutrónico con el mismo CF en el modo de operación DC.

1 - 4.2.- INTERFERENCIAS EN EL CF

Ya se mencionó que el dispositivo Contador de Fisión puede considerarse un generador de pulsos aleatorios, que pueden tener su origen en:

- a - El flujo neutrónico $\phi_n(t)$ a sensar
- b - La actividad alfa del convertidor del CF (interferencia α)
- c - El fondo por exposición gamma presente (interferencia γ)

La importancia relativa de las interferencias alfa y gamma dependerá de los niveles de radiación a medir y del modo de operación del CF.

1 - 4.2.1.- Operación en el modo de Pulsos

En la fig.1 - 3 pueden verse dos gráficos espectrales de energías de fisión (de carga colectada) típicos, obtenidos con un CF en el reactor RA3, tal como se ven en un analizador multicanal.*

Son histogramas de energía, en que se da $\ln n$ vs. E , donde n es la cantidad de pulsos acumulada durante un tiempo de muestreo dado, y E es la energía (altura de pulsos, proporcional a la carga colectada).

* Espectros de energía de fisión se discuten con más detalle en el Cap. 3.

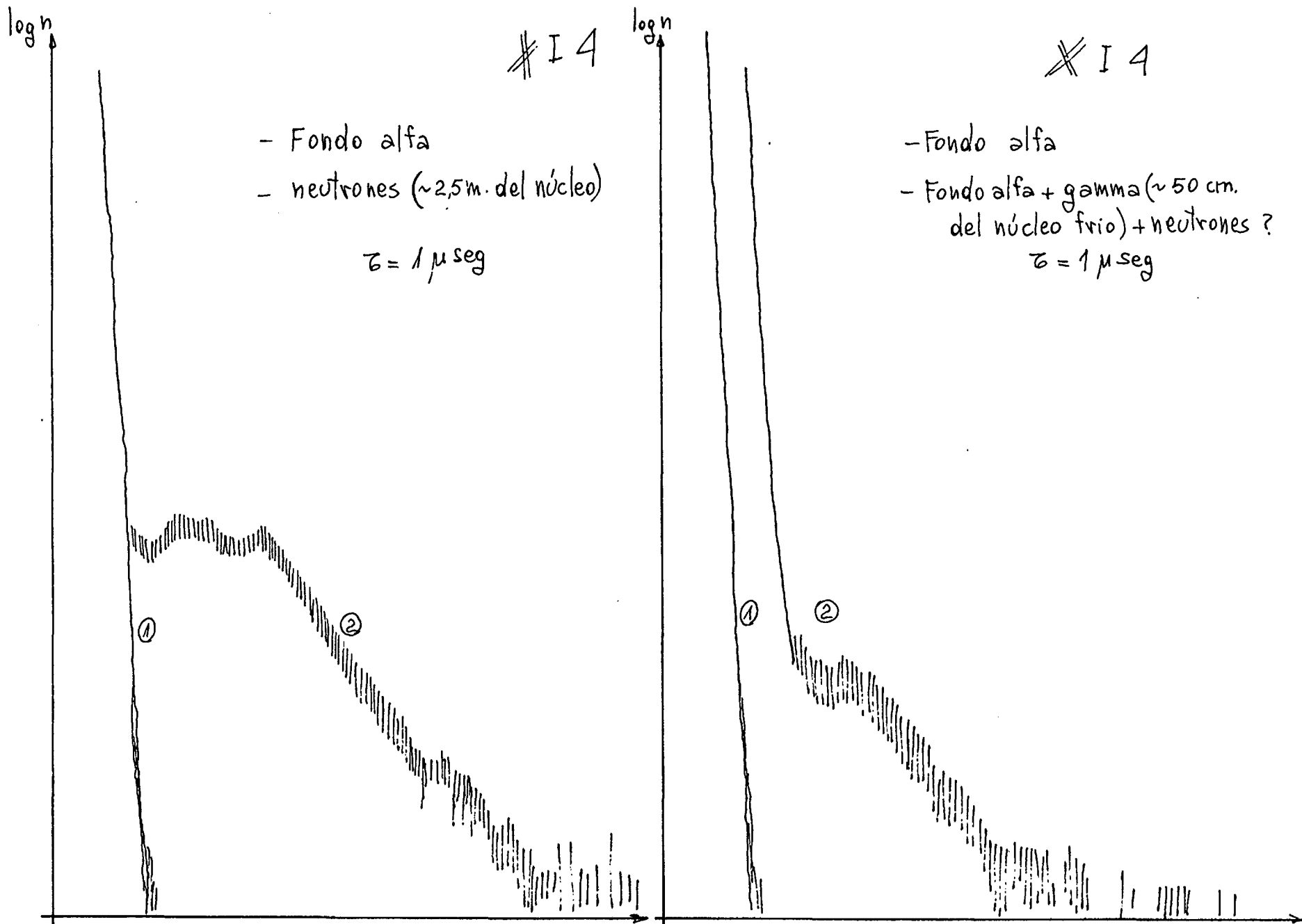


Fig.1 - 3.- Espectros de Energías de Fisión (de Carga Colectada) del Fondo Alfa, Neutrones y Fondo Gamma del CF

En a), 1 es el fondo alfa sin neutrones; 2 es el espectro de neutrones con el reactor en potencia, pero con el CF a varios metros del núcleo. El fondo coincide en ambos casos, y no se observa interferencia gamma.

En b), 1 es el mismo fondo alfa; 2 es el espectro obtenido con el reactor apagado, pero con el detector a sólo ~ 50 cm. del núcleo. Se observa que el fondo avanzó hacia energías mayores debido a la interferencia del fondo gamma presente, y enmascara parte del espectro correspondiente a neutrones.

La presencia de fondo $\alpha + \gamma$ disminuye la eficiencia relativa de detección del CF, pues el discriminador debe ajustarse para que pasen pulsos de amplitud mayor que el fondo. Pero con ajuste correcto, no afecta la linealidad en la lectura de variaciones del flujo neutrónico.

1 - 4.2.2.- Operación en el Modo DC

En un reactor, con el CF en campo mixto de neutrones y gamma, se originan pulsos aleatorios de carga media $\bar{q}_n$ a la tasa media $\langle N_n \rangle$, debidos a neutrones; esta tasa media es proporcional al flujo neutrónico, y a la potencia $P(t)$. La radiación gamma origina pulsos de carga media $\bar{q}_\gamma$ a la tasa media $\langle N_\gamma \rangle$. Además, al fondo α corresponden pulsos de carga media $\bar{q}_\alpha$ a la tasa media $\langle N_\alpha \rangle$.

La contribución de $\langle I_\alpha \rangle = \bar{q}_\alpha \langle N_\alpha \rangle$ puede despreciarse excepto a muy bajos niveles de $\phi_n(t)$ donde es comparable a $\langle I_n \rangle = \bar{q}_n \langle N_n \rangle$. Omitiendo este término, se tendrá

$$\langle I_{n+\gamma} \rangle = \bar{q}_n \langle N_n \rangle + \bar{q}_\gamma \langle N_\gamma \rangle$$

Puede expresarse en función de la potencia. Es

$$\langle N_n \rangle = S_n \phi_n(t) \propto P(t)$$

donde S_n es la sensibilidad neutrónica del CF. Llamando $k_n = S_n \frac{\phi_n(t)}{P(t)}$ una constante que depende del dispositivo y de su posición en el reactor, puede expresarse

$$\langle N_n \rangle = k_n P(t)$$

$$\langle N_\gamma \rangle = \frac{\langle N_\gamma \rangle}{\langle N_n \rangle} \langle N_n \rangle = k_n \frac{\langle N_\gamma \rangle}{\langle N_n \rangle} P(t)$$

Sustituyendo términos, resulta

$$\langle I_{n+\gamma} \rangle = k_n \bar{q}_n \left\{ 1 + \frac{\langle N_\gamma \rangle}{\langle N_n \rangle} \frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_n} \right\} P(t)$$

donde aparece explícitamente la dependencia del valor medio de la corriente $I(t)$ con la potencia.

Aceptando este valor medio como indicador aproximado de $P(t)$, el error relativo en la medición de $\phi_n(t)$ debido a la interferencia γ , es

$$\eta_{DC} = \frac{\langle I_{n+\gamma} \rangle - \langle I_n \rangle}{\langle I_n \rangle} = \frac{\langle N_\gamma \rangle}{\langle N_n \rangle} \frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_n}$$

1 - 4.2.3.- Operación en el Modo AC

Despreciando el término correspondiente al fondo $\propto$, se tiene

$$\langle \Delta I_{n+\gamma}^2 \rangle = 2 \bar{q}_n^2 \langle N_n \rangle B + 2 \bar{q}_\gamma^2 \langle N_\gamma \rangle B$$

y sustituyendo términos como en el punto anterior

$$\langle \Delta I_{n+\gamma}^2 \rangle = 2 k \bar{q}_n^2 \left\{ 1 + \frac{\langle N_\gamma \rangle \bar{q}_\gamma^2}{\langle N_n \rangle \bar{q}_n^2} \right\} P(t) \approx 2 k \bar{q}_n^2 \left\{ 1 + \frac{\langle N_\gamma \rangle}{\langle N_n \rangle} \left(\frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_n} \right)^2 \right\} P(t)$$

donde se aceptó la aproximación $\frac{\bar{q}_\gamma^2}{\bar{q}_n^2} \approx \left(\frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_n} \right)^2$ *

Si como indicador aproximado de $P(t)$ se acepta la fluctuación, el error relativo que la interferencia γ introduce en la medición de $\phi_n(t)$ es

$$\eta_{AC} = \frac{\langle \Delta I_{n+\gamma}^2 \rangle - \langle \Delta I_n^2 \rangle}{\langle \Delta I_n^2 \rangle} = \frac{\langle N_\gamma \rangle}{\langle N_n \rangle} \frac{\bar{q}_\gamma^2}{\bar{q}_n^2} \approx \frac{\langle N_\gamma \rangle}{\langle N_n \rangle} \left(\frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_n} \right)^2$$

y es menor que el η_{DC} en un factor $\frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_n}$.

El proceso intrínseco de formación de pulsos en el CF hace que resulte $\bar{q}_n \gg \bar{q}_\gamma$, con una relación $\frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_n}$ que en algunos dispositivos puede reducirse a alrededor de 10^{-4} . Por lo tanto, la medición de fluctuaciones de la corriente del CF disminuye la influencia relativa de la interferencia gamma en 10^4 veces respecto a la medición en continua. Con la ventaja adicional de que la técnica en AC es insensible a corrientes de fuga, que podrían invalidar la medición en DC.

Es posible, en un reactor, seleccionar la posición del detector respecto al núcleo de manera que resulte $\frac{\langle N_\gamma \rangle}{\langle N_n \rangle}$ del orden de 10^3 . Por lo tanto, con el método de fluctuaciones podría esperarse una indicación del flujo neutrónico (y por lo tanto de la potencia) con un error relativo de hasta 10^{-5} , sobre rangos muy amplios.

* En general, esta aproximación es válida, como se verá en Cap.3

CAPITULO 2 . - TECNICAS EXPERIMENTALES

En este capítulo se da una breve descripción de las facilidades de irradiación utilizadas, condiciones de medición, y características generales de los dispositivos CF y equipo electrónico utilizado en las mediciones. Mayores detalles se encontrarán en los apéndices.

2 - 1.- FUENTES DE RADIACION

Se realizaron experiencias usando varias fuentes de radiación, de baja y de alta intensidad, en facilidades de laboratorio y en instalaciones especiales de la CNEA.

2 - 1.1.- FONDO ALFA

El flujo neutrónico mínimo medible con un CF está determinado por la actividad alfa del material usado como convertidor (90 % ^{235}U + (algo) ^{234}U) que constituye un fondo intrínseco del propio detector, y por el modo de operación.

En el modo de Pulsos, el fondo alfa es fácilmente discriminado a expensas de cierta pérdida de sensibilidad neutrónica, ya que los pulsos generados por los fragmentos de fisión son mucho mayores que los generados por esa actividad alfa del convertidor (ver fig. 1-3 a del Cap. 1).

En los modos DC y AC, el flujo mínimo medible con el CF está fijado por el valor de la corriente continua y la componente de fluctuaciones de este fondo alfa, respectivamente.

Obviamente, para la medición del fondo alfa no se requiere fuente radioactiva externa.

2 - 1.2.- FUENTES DE NEUTRONES

Se utilizaron los dos tipos de fuentes siguientes:

a - Fuente de Neutrones en Laboratorio (FNL)

Esta fuente permite hacer mediciones de caracterización de detectores

en laboratorio, en condiciones controladas.

La FNL consiste en un bloque de parafina con un alojamiento en el que se colocan una ó dos fuentes de Am-Be de 5 Ci, y otro alojamiento cercano para colocar el dispositivo CF a medir. Debido al efecto moderador de la parafina, los neutrones que llegan al detector están mayoritariamente termalizados ($\sim 0,025$ eV).

El sistema moderador fué implementado en el laboratorio para éstas y similares mediciones. Las fuentes de neutrones son de la Gerencia de Seguridad (C.A.E., CNEA).

b - Reactor Nuclear RA3 (FNR)

Como fuente de neutrones, se usó el propio núcleo del RA3, con el reactor en funcionamiento, utilizando como facilidad de irradiación la instalación de Columna Térmica*. Se trabajó con densidades de flujo distintas, obtenidas variando la potencia de trabajo del reactor, según indicación de la Instrumentación del Canal de Marcha.

Para su medición, el dispositivo CF se instaló en una posición individualizada (puntos 10 a 15 del "stringer" de Columna Térmica*), donde una estimación confiable del flujo de neutrones térmicos es $\phi_n \approx 6,6 \times 10^9$ n/cm²seg. a 2,7 Mw (plena potencia del reactor). La dosis gamma, según datos existentes, no alcanza a $\dot{D}_\gamma = 10$ Krad/h. en el máximo, por lo que, a los efectos de la medición, puede considerarse esta facilidad como una fuente de neutrones pura (sin campo gamma).

2 - 1.3.- FUENTES GAMMA (F_γ)

En el modo de Pulsos, la interferencia gamma origina un aumento del fondo, que se suma al ya existente por actividad alfa del convertidor del CF (ver fig. 1-3 b del Cap. 1). Normalmente puede separarse este fondo corriendo hacia energías altas la posición del discriminador, lo que hace posible medir flujos relativamente elevados a costa de una disminución de la sensibilidad relativa del CF.

En los modos DC y AC, el fondo $\alpha + \gamma$ impone un límite inferior al flujo neutrónico a medir en campos mixtos.

* Se encontrará una breve descripción de ésta y otras facilidades de irradiación del RA3, en los apéndices.

Para medir la respuesta del CF a campos de radiación gamma, dado que este dispositivo es relativamente insensible a este tipo de radiación, es preciso utilizar fuentes de elevada intensidad para observar algún efecto.

Se utilizaron fuentes de Co^{60} ($E = 1,2$ y $1,3$ MeV) en dos facilidades de irradiación distintas, como se describe a continuación.

a - Fuente de Cobalto de Uso Médico (FYM)

Es una máquina para uso en Medicina Nuclear (Bomba de Cobalto) de la división Dosimetría del C.A.E., que se utiliza para calibraciones dosimétricas. (1300 Ci).

Se trabajó con dosis de exposición estimadas en 4000 y 7400 r/h, que se obtuvieron colocando el detector a 32,5 y 5 cm. respectivamente del colimador de la fuente. A estas distancias, no puede asegurarse que el campo sea totalmente homogéneo en todo el volumen sensible del CF.

b - Fuente de Cobalto Intensa (FYI)

Se usaron las instalaciones de la Planta Semi-Industrial de Irradiación por Fuentes Intensas en el C.A.E. La fuente tiene una actividad del orden de 2×10^5 Ci, y el campo es homogéneo en el volumen sensible del CF en la zona de medición.

Los detectores se instalaron en el interior del recinto de irradiación en posiciones individualizadas y dosis de exposición conocidas, de 89 Kr/h y de 8,43 Mr/h.

2 - 1.4.- FUENTE DE CAMPO MIXTO NEUTRON + GAMMA (FNX)

Se aprovechó para la medición el campo existente en las inmediaciones del núcleo del RA3, y se siguieron en condiciones similares a las reales para control del reactor, varias evoluciones hasta potencia máxima de trabajo.

Para ello se instaló un detector en un Contenedor para CF similar a los utilizados en Control, que se colocó apoyado sobre la Mesa de Cámaras a unos 15 cm. de la cara exterior de los grafitos reflectores.* El centro del volumen sensible del dispositivo detector estaba a unos 45 cm. por encima del borde superior del núcleo.

* Ver la descripción del RA3 en los apéndices.

En esta posición, por comparación con mediciones previas existentes, puede estimarse un flujo neutrónico $\phi_n(t) \cong 3,4 \times 10^9$ nv. y dosis gamma $\dot{D}_\gamma \cong \cong 2$ Mrad/h., con el reactor funcionando a 2,4 Mw de potencia.

Se midió con el CF en los modos DC y AC a distintos niveles de potencia de trabajo del reactor, tomando como referencia para el cálculo del flujo neutrónico la indicación del Canal de Marcha.

2 - 2 .- EQUIPOS DE MEDICION

En esta sección se dan algunas características de los CF y del equipo electrónico utilizado en las mediciones. Mayores detalles (por ejemplo, especificaciones del fabricante) se encontrarán en los apéndices.

2 - 2.1.- CONTADORES DE FISION

Se utilizaron dos detectores, individualizados como FC 165/1000 (CENTR) y CF PT9 (PT9).

El primero es marca CENTRONIC, producido por 20th Century Electronics Ltd., y el segundo es producido por INVAP S.E. sobre la base de diseño y desarrollo propios de CNEA.

La diferencia importante entre ambos dispositivos, aparte de algunas de importancia secundaria tales como sensibilidad, tamaño, etc., es que el PT9 tiene depósito de convertidor en ánodo y cátodo, mientras que el CENTR tiene depositado uno sólo de sus electrodos (el utilizado como cátodo).

En los apéndices, figura un detalle de las características principales de estos CF.

2 - 2.2.- MEDICION EN EL MODO DE PULSOS

Se da una descripción somera de una cadena de medición, indicando los instrumentos utilizados, y del Canal de Arranque que está instalado en RA3 para Control del reactor.

2 - 2.2.1.- Cadena de Espectrometría

Se utiliza esta cadena para estudiar el comportamiento del CF en el

modo de pulsos. En la fig. 2 - se muestra el conexionado de los distintos instrumentos que integran la cadena (básicamente es el circuito de fig. 1-1c) y un detalle de la disposición experimental usada.

Su forma de operación se describe esquemáticamente a continuación.

a - El CF origina un pulso de carga tipo escalón, debido a la colección de las cargas generadas por la radiación. Su magnitud es ΔQ por evento detectado, y su tiempo de crecimiento está relacionado fundamentalmente con el tiempo de colección, determinado por características constructivas del detector.

Este carga se distribuye, en principio, en las capacidades C_d asociadas al CF (su capacidad propia, la del cable de interconexión y de entrada al preamplificador) y genera un pulso de tensión tipo escalón de amplitud

$$\Delta V_d = \frac{\Delta Q}{C_d}$$

b - Al CF le sigue un preamplificador (pre).

De utilizarse un pre de tensión, amplificará este pulso, y la amplitud de salida dependerá de la capacidad C_d asociada al detector, lo que es inconveniente (por ejemplo, la altura de pulso variará con el largo de cable).

En el modo de Pulsos se usa habitualmente un preamplificador sensible a cargas (PRE), que se caracteriza por

i) presentar al CF una muy elevada capacidad de entrada C_i , tal que actúa como sumidero de toda la carga originada en el detector,

ii) entregar a la salida un pulso de tensión tipo escalón, de amplitud

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C_f}$$

donde C_f es una capacidad pequeña y fija, característica del PRE.*

c - La información necesaria para el análisis espectrométrico de los pulsos del CF está contenida en la amplitud y forma del pulso tipo escalón de salida del PRE.

A éste le sigue un amplificador conformador (AMP) que cumpla dos funciones principales:

* La presencia de capacidad parásita a la entrada (por ejemplo, del cable de interconexión al detector), origina pérdida de resolución, por aumentar el ruido electrónico.

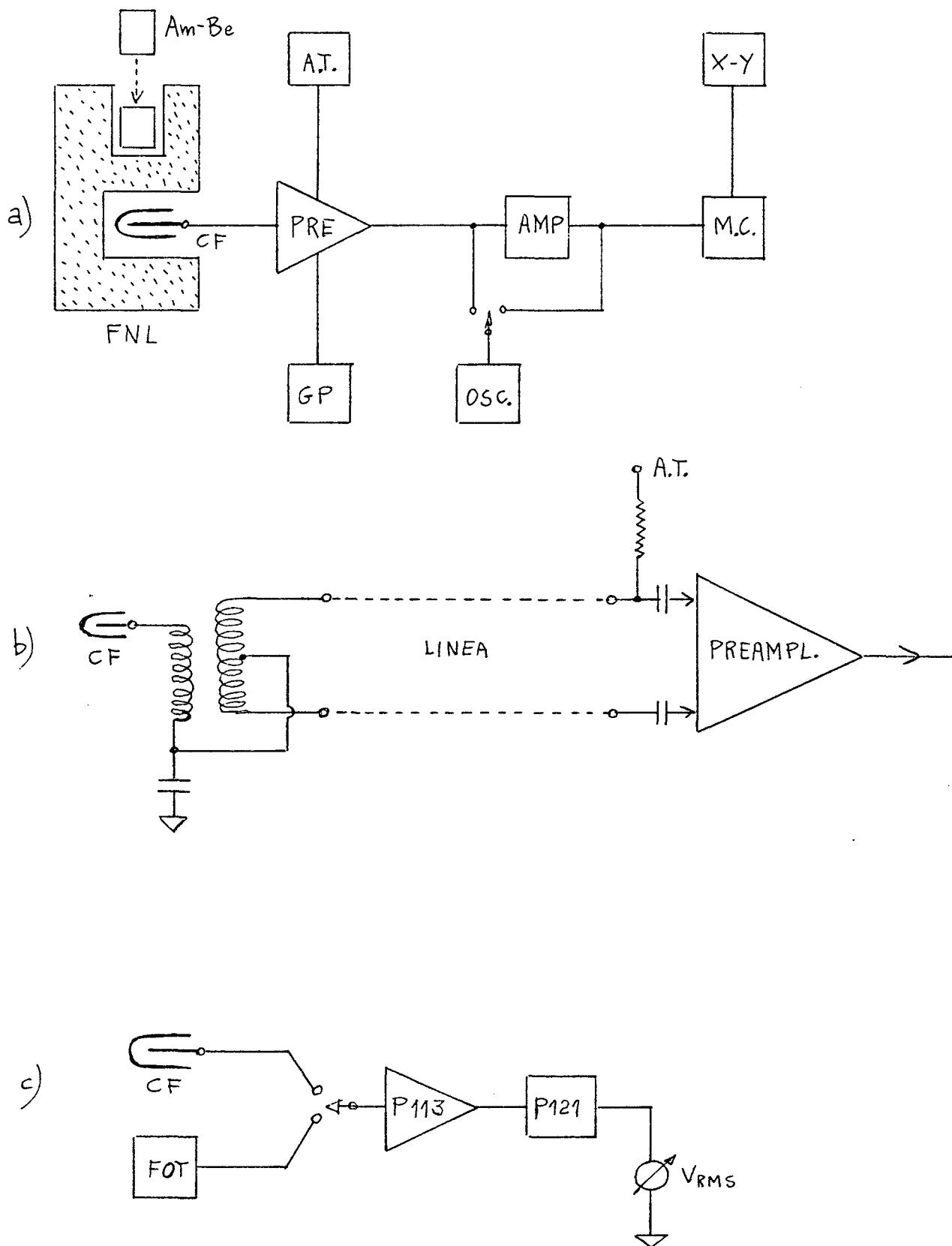


Fig. 2 - 1

a - Medición en el Modo P: Cadena de Espectrometría
 b - Medición en el Modo P: Cadena de Control para Reactores
 c - Medición en el Modo AC: Cadena de Fluctuaciones

i) Amplificar y conformar estos pulsos para obtener la información deseada con una relación señal/ruido cercana a la óptima posible.

ii) Entregar a la salida una forma de pulso más convencional, a los efectos de su tratamiento posterior.

La forma de los pulsos de salida es gaussiana (forma de campana de Gauss), con una duración típica del orden de 1 μ seg. ó menor.

d - Al AMP le sigue un analizador multicanal (MC). Es un analizador de altura de pulsos (por lo tanto del espectro de energías ó cargas); entrega información visual sobre un tubo de rayos catódicos, que consiste en el histograma n vs. E , donde n es el número de pulsos con amplitud correspondiente al intervalo de energías ΔE (canal) centrado en E .

Suelen poseer salida para graficador X-Y, registrador teletipo, etc.

La calibración en energía por canal se hace inyectando al PRE una carga conocida por medio de un Generador de Pulsos (GP), lo que da una "marca" en la escala de energías/cargas del multicanal.

Los instrumentos que se utilizaron en el modo de Pulsos son:

Preamplificador de carga ORTEC 109 A (PRE)
 Amplificador Conformador ORTEC 571 (AMP)
 Generador de Pulsos (Pulser) ORTEC 480 (GP)
 Fuente de Alta Tensión CANBERRA 3002 (AT)
 Analizador Multicanal CANBERRA serie 30 (MC)
 Registrador X-Y H. PACKARD 7035B (X-Y)

y se usaron en la disposición experimental típica de la fig. 2-1a.

2 -2.2.2.- Cadena de Control para Reactores

El esquema circuital de la fig. 2-1a es adecuado para análisis espectrométrico, pues ya se dijo que se obtienen pulsos de amplitud proporcional a la carga colectada en cada evento por el CF.

Puede usarse para el control de reactores nucleares (de hecho se usa frecuentemente) con sólo sustituir el analizador multicanal por un monocal seguido de un escalímetro, como se mencionó en 1-2.1. (fig. 1-1c). Pero lo que se requiere en un reactor es análisis temporal y no espectrométrico, por lo

que se prefiere recurrir a presamplificadores de corriente (intrínsecamente más rápidos) que a los de tensión y los sensibles a carga.

El inconveniente es que en un pre de corriente los pulsos de entrada son de bajo nivel (porque la R de carga del CF es de bajo valor), y por lo tanto el sistema es muy susceptible a ruido exterior e interferencias. Tanto más cuanto que en una instalación común para control, el cable de interconexión con el CF pueda llegar a ser de unos 20 a 30 metros de largo.

Una disposición más conveniente para utilizar el CF en un reactor es el esquema de la fig. 2-1b. Consiste en un transformador instalado cerca del CF, que a la vez que adapta impedancias provee salida balanceada de señal del detector, con lo cual el sistema tiende a hacerse inmune a interferencias. Ello permite un pre de corriente, con todas sus ventajas.

Es la opción que se eligió para la instrumentación en RA3 y RA6.

2 - 2.3.- MEDICIONES EN EL MODO DC

Se mide el valor medio $\langle I(t) \rangle$ de la corriente $I(t)$ del detector (componente continua). Para ello, se usa un amplificador de continua seguido por un instrumento de medición adecuado.

En las experiencias, se utilizó un Electrómetro (Multímetro Electrométrico) modelo Keithley 610 C (K)*, de sensibilidad suficiente para medir corrientes pequeñas correspondientes al fondo alfa y al flujo neutrónico relativamente bajo de la FNL, con rango para corrientes más grandes hasta las correspondientes al $\phi_n(t)$ del reactor a plena potencia.

2 - 2.4.- MEDICIONES EN EL MODO AC

2 - 2.4.1.- Cadena de Medición de Fluctuaciones

a - Circuito de Medición

Un circuito básico capaz de medir las fluctuaciones de la corriente $I(t)$ se dió en fig. 1-1e.

* Sus características principales, así como los de otros instrumentos utilizados, aparecen en los apéndices.

Por medio de un filtro de ancho de banda Δf y frecuencia central f_0 se seleccionan, entre las componentes de alterna de la señal $I(t)$ del CF, las de frecuencia comprendida entre $f_0 - \frac{\Delta f}{2}$ y $f_0 + \frac{\Delta f}{2}$; estas componentes se llevan a un instrumento adecuado que mide potencia. El resultado de esta medición es proporcional al valor medio cuadrático de la fluctuación $\langle \Delta I^2 \rangle_{\Delta f}$ sobre el ancho de banda Δf .

El instrumento de medición puede ser un elemento que responda cuadráticamente a la corriente (por ejemplo una termocupla), ó uno donde se lea valor eficaz verdadero ($I_{RMS} = \sqrt{\langle \Delta I^2 \rangle_{\Delta f}}$).

Para realizar un análisis espectral de potencia se requiere que la frecuencia central del filtro f_0 , pueda variarse sobre el rango de interés, lo que constituye en esencia un receptor sintonizable.

En la práctica, dado el bajo nivel de la señal del CF, se usará un preamplificador de bajo ruido y ancho de banda relativamente amplio, y el filtro sintonizable. El elemento cuadrático e indicador de salida lo constituirá directamente un Voltímetro de Valor Eficaz Verdadero (V_{RMS}), y de su indicación se deducirá por cálculo el del valor cuadrático medio de la fluctuación.

Para las mediciones se utilizó un Preamplificador PAR 113* (P113), y un Amplificador Lock-in PAR 121* (P121) trabajando como voltímetro de V_{RMS} continuamente sintonizable entre 150 Hz. y 150 KHz.

b - Calibración del sistema.

Capacidades tales como la del propio detector, la del cable de interconexión al pre, etc., limitan la respuesta a frecuencias del preamplificador, y originan una medición errónea del espectro de potencia propio del detector frente a la radiación, que aparece modificado por aquellas capacidades parásitas.

Será indispensable, por lo tanto, calibrar el sistema de medición con un generador de señal de fluctuación cuya amplitud sea constante sobre el rango de frecuencias a analizar (Generador de Ruido Blanco). De la comparación del espectro obtenido de este generador de calibración con el sistema analizador, y el que se obtuvo del detector, se podrá calcular el valor correcto de $\langle \Delta I^2(t) \rangle_{\Delta f}$ del espectro propio del CF, puesto que las modificaciones introducidas por las capacidades parásitas son comunes a las dos mediciones.

* Sus características principales, así como las de otros instrumentos utilizados, aparecen en los apéndices.

Se utilizó un Generador de Ruido Blanco a Fotomultiplicador* (FOT) construido al efecto, que en cada medición se conectó al P113 con el mismo cable de interconexión del CF (ú otro cable idéntico).

El esquema circuital básico del sistema de medición y calibración se da en la fig. 2-1c. La metodología de medición y cálculo se describe en el punto siguiente.

2 - 2.4.2.- Metodología de Medición

En esta sección se describe la forma en que se hicieron las mediciones y el método de cálculo utilizado.

Con el detector conectado al preamplificador, sin AT aplicada, el ruido de fondo del sistema genera una tensión de fluctuación sobre la resistencia R_L de carga del CF, que es amplificada por el P113. El P121 mide la potencia de esta señal de ruido en un ancho de banda Δf centrado en la frecuencia de sintonía f_0 , y da por lectura directa su valor V_{rms} . Este valor es la Tensión Eficaz a la Salida del Ruido de Fondo V_r .

En las mismas condiciones se repite la medición con AT aplicada al CF. Se obtiene la Tensión Eficaz a la Salida de la Señal + Ruido de Fondo V_{s+r} .

El valor cuadrático medio de la Tensión de Señal se calcula por

$$V_{eff}^2 = V_{s+r}^2 - V_r^2$$

que a su vez vale

$$V_{eff}^2 = \langle \Delta I^2(t) \rangle_{\Delta f} R_L^2 G^2$$

donde R_L es la resistencia de carga del CF y G la ganancia del P113, influida por la capacidad del cable, etc.

La Fluctuación a la Entrada

$$\langle \Delta I^2(t) \rangle_{\Delta f} = S_I(f) \Delta f$$

es el valor cuadrático medio de la corriente del CF medido en el intervalo de frecuencias Δf alrededor de f , donde Δf está fijado por el Q del voltímetro sintonizado del P121.

La fluctuación que genera el FOT (Señal de Calibración a la Entrada) es

* Sus características principales, así como las de otros instrumentos utilizados, aparecen en los apéndices.

$$\langle \Delta I^2(t) \rangle_{\Delta f}^F = S_I(f)^F \Delta f = 2 e I_A G_F \Delta f$$

donde e es la carga del electrón, I_A es la corriente de ánodo del fototubo que se midió cada vez con el (K), G_F su ganancia de multiplicación (es una constante característica del fotomultiplicador) y Δf el mismo intervalo pequeño de frecuencias en que se está midiendo.

Cuando el FOT se conecta al P113 en las mismas condiciones que el CF, la lectura del P121 es la Tensión Eficaz de la Señal de Calibración a la Salida V_F . Este valor es

$$V_F^2 = \langle \Delta I^2(t) \rangle_{\Delta f} R_F^2 G^2 = 2 e I_A G_F R_F^2 G^2 \Delta f$$

donde R_F es la resistencia de carga del FOT, G la ganancia del P113 (la misma que antes), y Δf es el mismo.

Si por construcción las dos resistencias de carga son iguales ($R_L = R_F = 1 \text{ K}\Omega$), resulta

$$\frac{V_{\text{eff}}^2}{V_F^2} = \frac{\langle \Delta I^2(t) \rangle_{\Delta f}}{2 e I_A G_F \Delta f} \therefore \frac{\langle \Delta I^2(t) \rangle_{\Delta f}}{\Delta f} = 2 e I_A G_F \left(\frac{V_{\text{eff}}}{V_F} \right)^2$$

que coincide con la densidad espectral de potencia $S_I(f)$ si la señal que entrega el CF es ruido blanco en todo el intervalo de frecuencias Δf .

En este trabajo se lo denomina, por brevedad

$$\frac{\langle \Delta I^2(t) \rangle_{\Delta f}}{\Delta f} = \langle i^2 \rangle$$

y se calcula, sustituyendo el valor de los parámetros de operación del FOT, por

$$\langle i^2 \rangle \left[\text{pA}^2 / \text{Hz} \right] = 179200 I_A \left[\mu\text{A} \right] \frac{V_{\text{eff}}^2}{V_F^2}$$

con V_{eff} y V_F en las mismas unidades.

Este es el valor que se da en las Tablas con el listado de valores medidos, y es la fluctuación que figura en los gráficos espectrales de potencia que se dan en los Capítulos siguientes.

CAPITULO 3 - PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL CF

En este capítulo se da una breve descripción de las características del CF en el modo de pulsos, que es el modo de operación más común para estos detectores. Del análisis de los espectros de pulsos se obtiene una buena cantidad de información.

Con más detalle se consideran las características del CF como generador de fluctuaciones. Se verá que de este modo de operación (modo AC) puede obtenerse una interesante cantidad de información adicional con respecto a la magnitud promedio de las cargas que se originan por evento detectado y a las características de transporte y colección de esas cargas en el CF.

3 - 1.- EL CF EN EL MODO DE PULSOS

Se trabajó con los dos detectores, PT9 y CENTR, en conexión convencional para este modo de operación, según el esquema ya indicado en fig. 2-1a, irradiándolos con la Fuente de Neutrones de Laboratorio (FNL).

3 - 1.1.- GRAFICO ESPECTRAL DE ENERGIAS DE FISION

Los espectros de pulsos obtenidos se dan en fig. 3-1 y 3-2. Los de 3-1, son dos gráficos espectrales distintos del PT9, con el mismo valor de AT pero con polaridad invertida. En 3-2 se da el espectro del CENTR.

Como ya se dijo, son histogramas de energía (de carga colectada por el CF) tal como se observan en la pantalla del Analizador Multicanal, graficados por medio del Registrador X-Y. Dan n vs. E , donde n es la cantidad de pulsos acumulada durante un cierto tiempo de muestreo, y E es la energía. En los gráficos, n está en escala lineal no cuantificada, y la escala de E ha sido calibrada con el Generador de Pulsos (GP).

En los espectros se distinguen claramente dos zonas, que responden a dos procesos diferentes.

En el extremo de energías bajas se observa una gran acumulación de pulsos de baja amplitud, que llamaremos "fondo". Corresponde a la contribución superpuesta de ruido electrónico y epilado (por falta de resolución en tiempo de

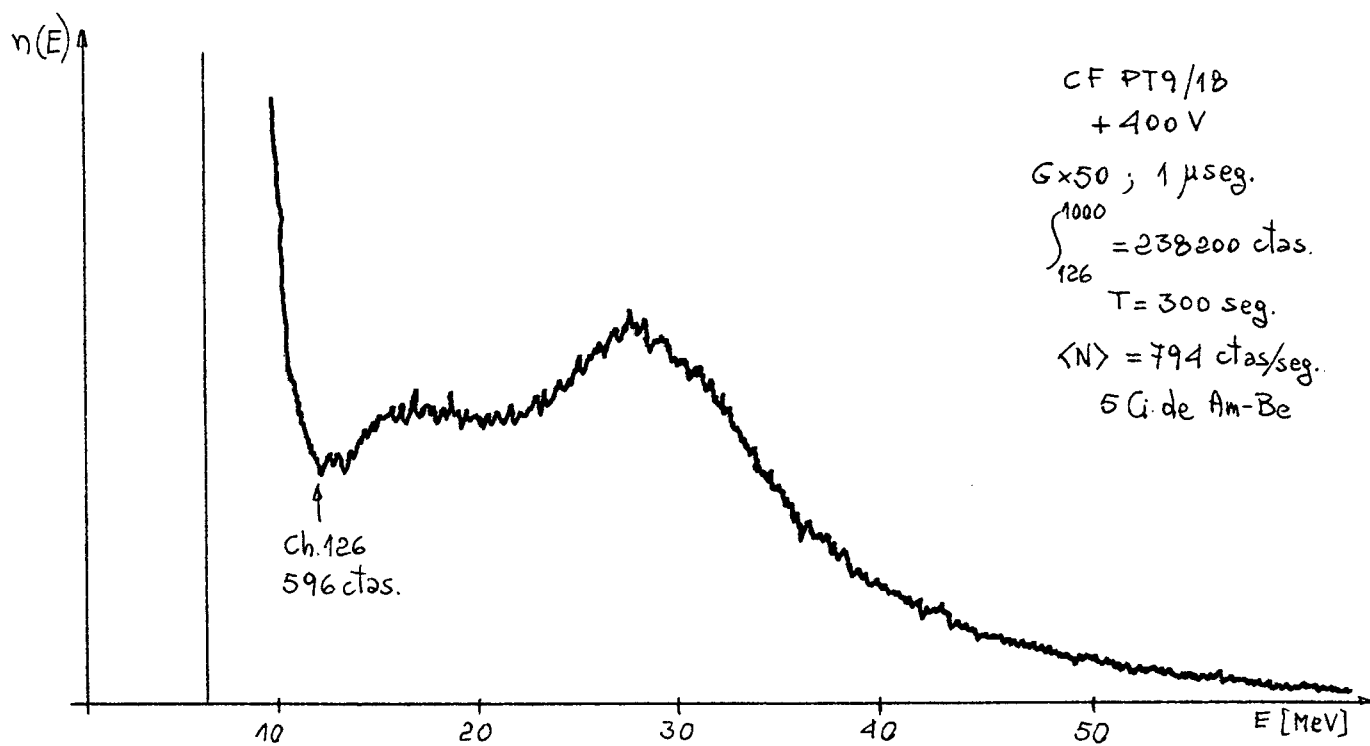
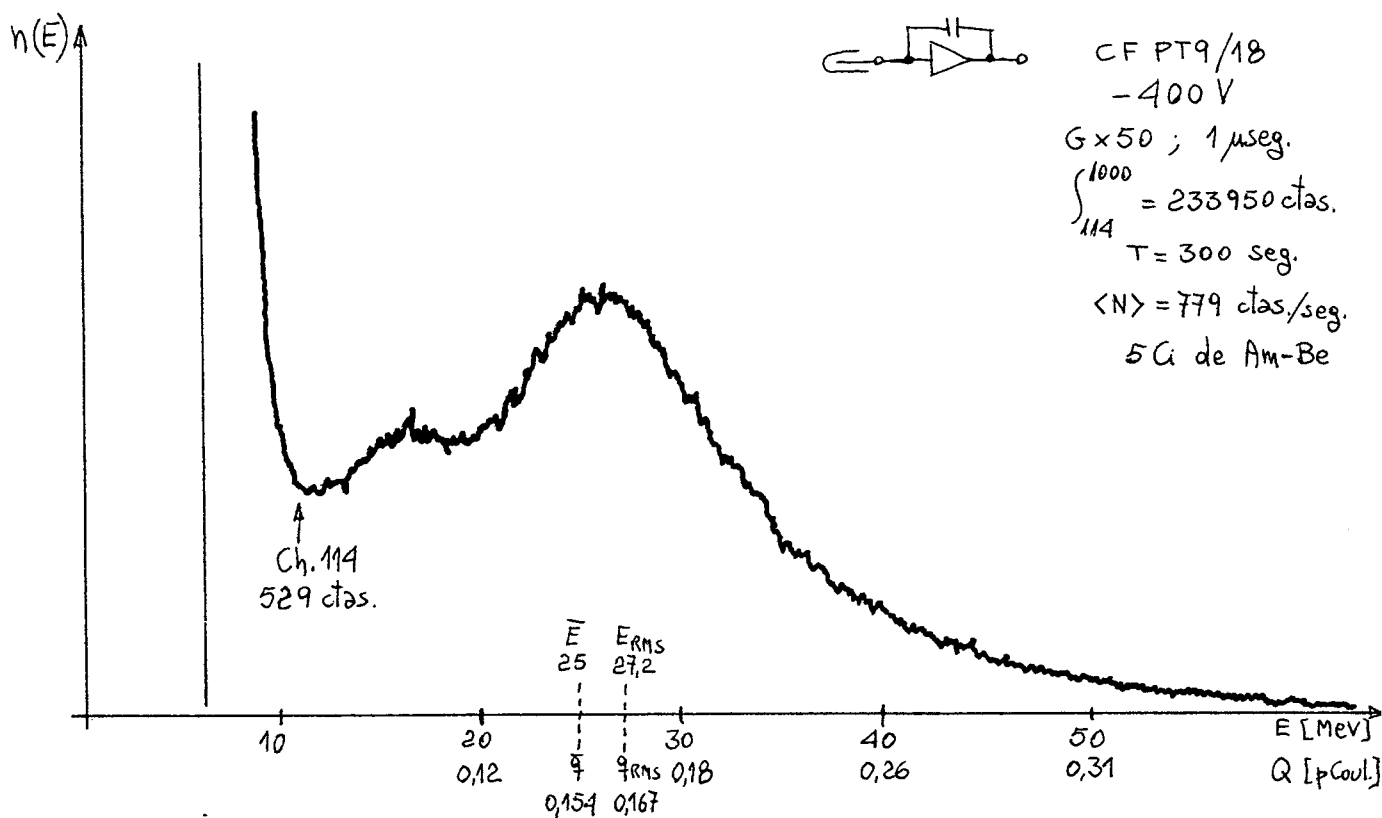
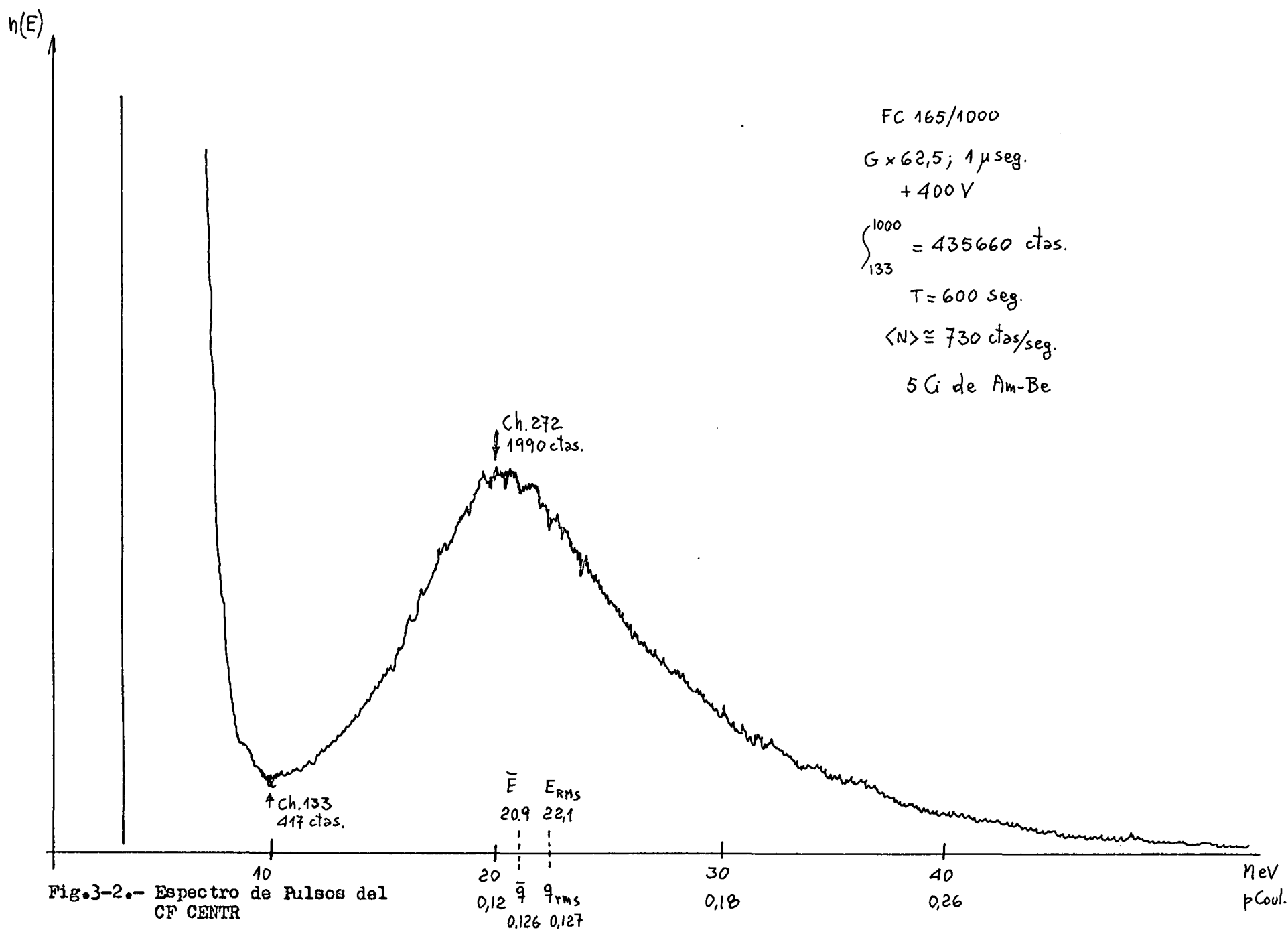


Fig. 3 - 1.- Espectros de Pulsos del CF PT9



la electrónica) de pulsos del fondo alfa; disminuye rápidamente entre los 5 y 10 MeV.

El "espectro de neutrones" que se observa en la zona de energías superiores a ~ 10 MeV. Son pulsos de gran amplitud (~ 20 MeV y más) correspondientes a una parte de la energía de los fragmentos de fisión (generados por interacción con los neutrones térmicos de la FNL), que aquéllos entregan al gas de llenado del CF, ionizándolo.

Hay tres puntos notables en el gráfico espectral de energías. El que llamaremos "pico neutrónico", que es el canal del máximo de cuentas del espectro de neutrones; el "valle", que es el canal con un mínimo de cuentas que aparece por superposición del fondo con la cola de baja energía del espectro de neutrones; y el canal máximo de cuentas, que indica la energía máxima que los fragmentos de fisión transfieren al gas.

La relación entre canal del pico y canal del valle (relación pico/valle en energías) es un parámetro importante que permite cuantificar el poder de separación del CF entre señal neutrónica y ruido de fondo.

La relación entre cantidad de cuentas en el pico y cantidad de cuentas en el valle (relación pico/valle en cuentas) es otro parámetro que tiene que ver con la extensión del plateau de discriminación en la curva de cuentas integradas.

Cuando hay radiación gamma presente, como sería el caso en un reactor, el fondo avanza hacia energías crecientes y se solapa con los canales inferiores del espectro de neutrones. El valle aparece corrido a energías mayores y aumenta en cuentas, empeorando la relación pico/valle en energías y en cuentas.

La relación $\frac{\Delta E_v}{E_p \dot{D}_\gamma}$ (avance relativo del fondo por dosis gamma), donde ΔE_v es el corrimiento de canal del valle producido por la presencia de la exposición $\dot{D}_\gamma$ y E_p es la energía del pico, es un coeficiente que cuantifica este empeoramiento, y es otro parámetro indicativo de calidad del CF.

Los gráficos espectrales del PT9 presentan un doble pico neutrónico característico debido a la doble película de convertidor (en ánodo y cátodo), y un valle poco pronunciado por solaparse con el pico de menor energía. Puede observarse que los dos espectros de fig. 3-1 son similares, lo que evidencia buena simetría de campo eléctrico, aunque el doble pico es algo más notable polarizando el ánodo con $+A\bar{I}$.

El del CENTR presenta un aspecto más convencional, con un solo pico neutrónico y mejor relación pico/valle en cuentas, a expensas de menor sensibilidad y energías menores en el pico.

3 - 1.2.- CARGA GENERADA POR NEUTRONES

En el eje de abscisas de los gráficos, está indicada la calibración en energías y cargas.*

A partir de los histogramas se calculó energía media $\bar{E}_n = \frac{1}{N} \sum E_i n_i$ y carga media $\bar{q}_n$; y el valor medio cuadrático de la energía $\bar{E}^2 = \frac{1}{N} \sum E_i^2 n_i$ y carga $\bar{q}_n^2$, para obtener $E_{RMS} = \sqrt{\bar{E}^2}$ y q_{RMS} . Se usó el gráfico de - 400 V para el PT9, y el de fig. 3-2 para el CENTR.

Los resultados obtenidos son los del cuadro siguiente

	PT9	CENTR	
$\bar{E}$	25	20,5	MeV
E_{RMS}	27,2	20,7	MeV
$\bar{q}_n$	0,15	0,13	pCoul.
q_{RMS}	0,17	0,13	pCoul.

Debe notarse que el tiempo de crecimiento de los pulsos, medido en osciloscopio a la salida del PRE, puede estimarse mayoritariamente entre los 50 y 100 nseg.(pulsos rápidos, electrónicos). Se trabajó con tiempo de conformación de 1 μ seg., por lo que la contribución a la carga colectada es debida fundamentalmente a los electrones, con solamente algo de contribución de los iones (los pulsos iónicos son del orden del milisegundo ó más). Por lo tanto la carga calculada según el cuadro es inferior a la real generada por evento detectado.

* Se hizo calibración en energías con el GP, calculada en paras equivalentes en Ar (26 eV/par). La carga correspondiente a 40 MeV es

$$\frac{40 \text{ MeV}}{26 \text{ eV/par}} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ Coul/par} = 0,246 \text{ pCoul.}$$

y la tensión de pico del GP, para que el capacitor calibrado de 2 pF inyecte esta carga al PRE, debe ser

$$V = \frac{q}{C} = \frac{0,246 \text{ pCoul.}}{2 \text{ pF}} = 123 \text{ mV.}$$

Con señal escalón del GP de 123 mV se marcó la energía de 40 MeV en el Multicanal, y a partir de esta marca se generó el resto de la escala por relación lineal.

3 - 1.3.- FLUJO NEUTRÓNICO DE LA FNL

Se midió estimativamente el flujo neutrónico en el alojamiento para CF de la FNL, con una y con dos fuentes de 5 Ci (totalizando 5 Ci y 10 Ci) de Am-Be, para usar ese dato posteriormente.

Para ello se integraron cuentas desde el valle, en el espectro de - 400 V del PT9; este total de cuentas dividido por el tiempo de acumulación, da la tasa media $\langle N \rangle$ en cuentas por segundo. Se calculó el flujo por $\phi_n = \frac{\langle N \rangle}{S_n}$ donde S_n es la sensibilidad neutrónica del PT9, que según especificaciones del fabricante es $S_n = 0,5$ ctas/nv.

El resultado de varias mediciones dió los valores estimativos del cuadro siguiente:

Fuente Am-Be	5 Ci	10 Ci	
Tasa media de pulsos N	2850	5900	ctas/seg.
Flujo medio ϕ_n , 1,2	$5,7 \times 10^3$	$1,2 \times 10^4$	n/cm ² seg.

Estos resultados son de interés para mediciones que se discutirán más adelante.

3 - 2 .- MEDICIONES EN EL MODO AC

Con el equipo electrónico descrito en 2-2.4.1. (ver descripción con más detalle en los apéndices), se midieron fluctuaciones en los CF. En laboratorio, la generada por el fondo α propio del detector, y por el flujo neutrónico de la FNL. En instalaciones especiales, la fluctuación originada por exposición γ , en las fuentes $F\gamma M$ y $F\gamma I$.*

Los gráficos espectrales de potencia obtenidos presentan el aspecto general que se señalaba en la fig.1-2. Se observa claramente la zona correspondiente a contribución iónica + electrónica en bajas frecuencias (BF); la de contribución exclusivamente electrónica, de amplitud menor, en la zona de altas frecuencias (AF); y la zona de relajación iónica entre ambas. La relajación elec-

* En el capítulo siguiente se describen las mediciones en el reactor RA3, con las fuentes FNR (campo neutrónico) y la FN γ (campo mixto).

trónica no se observe en los gráficos, pues corresponde a frecuencias superiores al rango de medición.

De las mediciones en el modo AC pueden deducirse varios parámetros característicos, según se enuncian a continuación.

a- Frecuencia de corte iónica

Da una idea de la duración del pulso iónico, a través de la transformada de Fourier (por aplicación del teorema de Carson, según se describe en 1 -3) la frecuencia de corte electrónica, que a través del mismo análisis daría información sobre la duración del pulso electrónico, no es asequible, pues como ya se dijo corresponde a frecuencias superiores al rango explorado.

Conocer las frecuencias de corte permite estimar movilidad de los iones y de los electrones en el gas, por lo menos comparativamente.

b - Carga media por evento detectado.

Partiendo del valor de la fluctuación y del de corriente continua, pueda calcularse la carga media generada por la partícula ionizante (partícula alfa, fragmento de fisión ó fotón gamma).

A bajas frecuencias, contribuyen a la fluctuación los iones y los electrones. Por lo tanto es válido

$$\langle i^2 \rangle_{BF} = 2 \bar{q}^2 \langle N \rangle$$

donde q es la carga total colectada por el CF debido a la partícula ionizante.

El valor de la corriente continua es

$$I_{DC} = \langle I \rangle = \bar{q} \langle N \rangle$$

Será pues

$$\frac{\bar{q}^2}{\bar{q}} = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 \langle I \rangle}$$

de donde puede obtenerse una cota superior para $\bar{q}$, usando la aproximación $\sqrt{q^2} \cong \bar{q}$; esta cota superior será

$$\bar{q} \leq \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 I_{DC}}$$

c - Contribución iónica y electrónica a la carga total

También permite estimar en cuánto contribuyen los iones (y los electrones) a la carga total colectada en el CF. Como ya se dijo anteriormente, la

carga colectada es

$$Q_c = q_+ + q_- = n a$$

que es igual a Q_g , carga total generada en el gas por cada evento.

Por lo tanto, a frecuencias bajas donde contribuyen a la fluctuación la carga iónica y la electrónica, se cumple

$$\begin{aligned} \langle i^2 \rangle_{BF} &= 2 \overline{q^2} \langle N \rangle = 2 (\overline{q_+^2} + \overline{q_-^2} + 2 \overline{q_+ q_-}) \langle N \rangle = \\ &= 2 \overline{q_+^2} \langle N \rangle + 2 \overline{q_-^2} \langle N \rangle + 4 \overline{q_+ q_-} \langle N \rangle \end{aligned}$$

En el rango de frecuencias altas la contribución es sólo electrónica, y vale

$$\langle i^2 \rangle_{AF} = 2 \overline{q_-^2} \langle N \rangle$$

Para eventos en que la carga iónica media y la electrónica media contribuyen por igual a la carga media total colectada, es decir, eventos en que se cumple

$$\overline{Q_c} = \overline{q_+} + \overline{q_-} \quad \text{con} \quad \overline{q_+} = \overline{q_-}$$

el coeficiente de contribución iónica (relación escalón) definido por

$$\mathcal{E} = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{\langle i^2 \rangle_{AF}}$$

vale

$$\mathcal{E} = \frac{\overline{q_+^2} + \overline{q_-^2} + 2 \overline{q_+ q_-}}{\overline{q_-^2}} = 4$$

aceptando la aproximación $q_{RMS} = \sqrt{\overline{q^2}} \approx \overline{q}$

Cuanto mayor sea este coeficiente $\mathcal{E}$, tanto mayor es la contribución de los iones a la carga total Q_c . Un CF en que $\mathcal{E} < 4$, es un dispositivo en que la contribución electrónica a la carga total es preponderante.

3 - 2.1.- ESPECTRO DE POTENCIA DEL FONDO ALFA

Se midió la fluctuación del fondo alfa en laboratorio, con el CF conectado al P113 con ~ 1 metro de cable coaxial RG58, y protegido de interferencia exterior por un blindaje electrostático. En el caso del PT9 se tomaron varios registros con fines de verificación cuando el detector se iba a usar en instalaciones especiales, como más adelante se indica.

A partir del valor de tensión eficaz leído $V_s + r$ (fluctuación alfa más ruido de fondo) en cada una de las frecuencias elegidas, y del correspondien-

te V_r (fondo de ruido del sistema, medido sin conectar AT al CF), se calculó $\langle i^2 \rangle$ $\mu A^2/Hz$. como se describe en 2 - 2.4.2. Este fondo de ruido propio del sistema de medición resultó ser comparable al fondo $\propto$ medido, ó ligeramente superior en el caso del CENTR.

3 - 2.1.1.- Gráficos Espectrales de Potencia

a - CF PT9

En las Tablas 1 y 2 que se incluyen al final, se dan los valores de $\langle i^2 \rangle$ obtenidos en cinco series de mediciones, y los valores promedio. En la fig. 3-3 se da la representación gráfica del promedio, y se indican los apartamientos máximos.

Presenta el aspecto general que se señalaba en fig. 1 - 2. Se observa mucha similitud frente a la inversión de polaridad, lo que está de acuerdo con la simetría que se hizo notar al comentar los espectros de energía de fig. 3 - 1 para neutrones.

b - CF CENTR

Los valores medidos y los calculados según 2 - 2.4.2., se dan en la Tabla 3. Su representación gráfica, en fig. 3 - 4.

Vale el mismo comentario que para el PT9, salvo el cambio de aspecto que presenta frente a inversión de polaridad.

3 - 2.1.2.- Parámetros Característicos

3 - 2.1.2.1.- Frecuencias de Corte

a - CF PT9

A partir de características dadas por el fabricante, puede calcularse la frecuencia mínima de corte iónica, correspondiente a iones generados cerca del convertidor y que recorren toda la distancia interelectródica. No obstante, puesto que una partícula alfa ioniza a lo largo de todo su recorrido en forma aproximadamente uniforme, la verdadera frecuencia de corte (experimental) será superior.

El cálculo, para tiempo de colección $\tau = \frac{d}{\mu E/P}$, donde d es la distancia entre los electrodos, μ la movilidad de los iones en el gas, E el campo eléctrico y P la presión del gas de llenado, da la frecuencia de corte mínima:

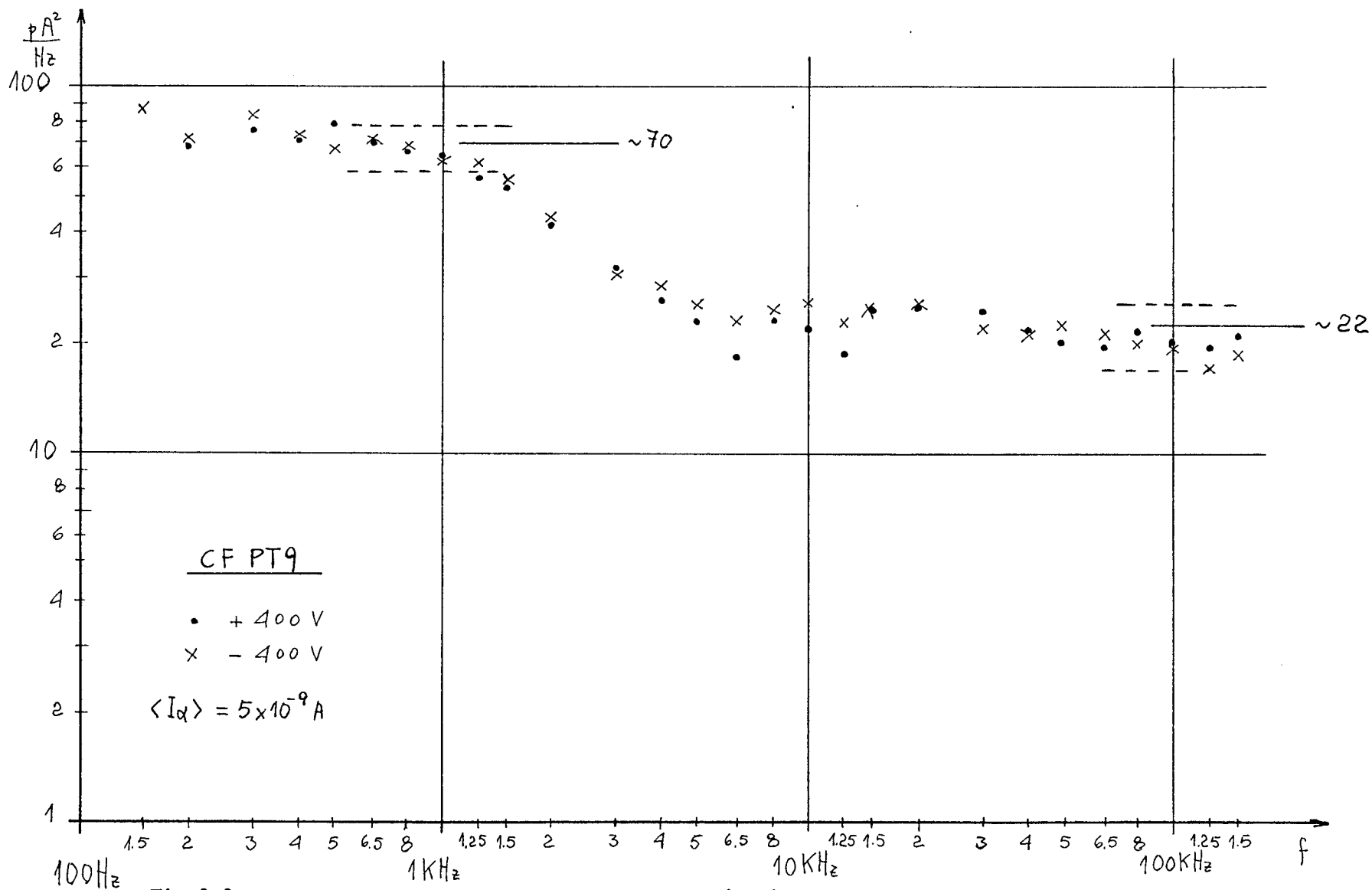


Fig.3-3.- Espectros de Potencia del Fondo Alfa (PT9)

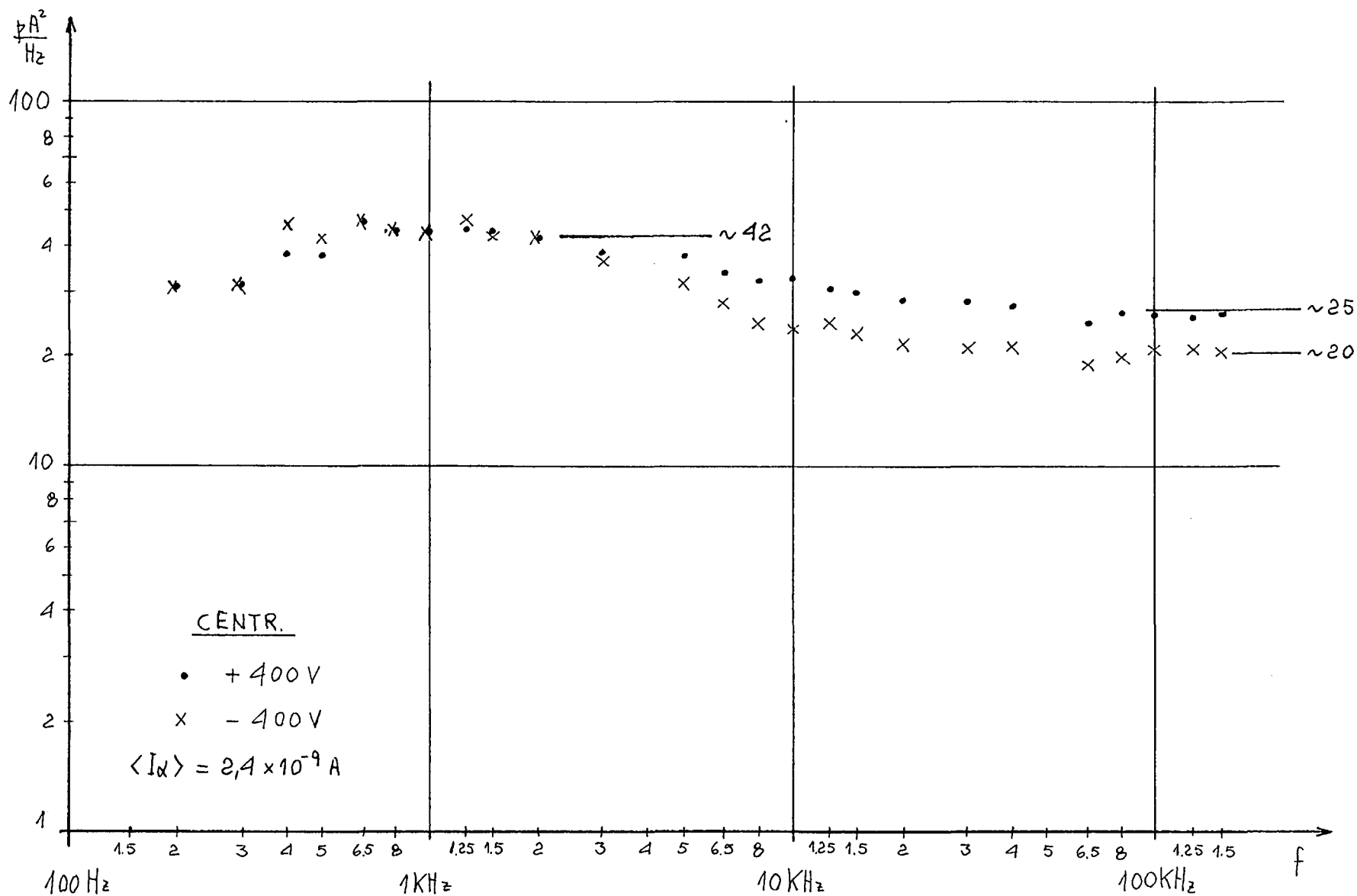


Fig.3-4.- Espectros de Potencia del Fondo Alfa (CENTR)

E [Volt/cm]	$P(\text{abs.})$ [atm.]	μ_+ (en Ar+2% N ₂) [cm ² mmHg/Volt seg]	τ_+	$f_c^i = \frac{1}{2\tau_+}$
1333	4	1040 (Ref.)	1,1 mseg.	456 Hz

En los gráficos de fig.3 - 3 la frecuencia de corte (experimental) puede estimarse en alrededor de 800 Hz a 1 KHz. Este valor difiere del previsto por teoría, aunque es del mismo orden.

La frecuencia de corte electrónica mínima, que corresponde a electrones que se generan cerca del convertidor y recorren toda la distancia entre los electrodos, se calcula a partir de $\tau_- = \frac{d}{w_-}$ (w_- es la velocidad de migración de electrones en Ar, que es la Ref. tomada de tablas); así:

$\frac{E}{P}$ [Volt/cm/mmHg]	w_- (en Ar)* [cm/μseg.]	τ_-	$f_c^e = \frac{1}{2\tau_-}$
0,44	0,67	0,45 μseg.	1,1 MHz

El fondo electrónico sigue hasta más allá de la frecuencia máxima explorada.

b - CF CENTR

No se tienen suficientes características del CENTR para una estimación por cálculo. Pero se observa en el gráfico una frecuencia de corte iónica que está en 2 a 3 KHz, mayor que en el PT9. Sugiere separación entre electrodos varias veces menor, y/o menos presión de gas; pues frecuencia de corte mayor, implica pulsos iónicos más cortos.

La frecuencia de corte electrónica está también más allá del rango explorado.

3 - 2.1.2.2.- Carga Media y Contribución Iónica

En el cuadro siguiente se dan los valores de $\langle i_{\alpha}^2 \rangle_{BF}$, $\langle i_{\alpha}^2 \rangle_{AF}$ y $\langle I_{\alpha} \rangle = I_{DC}$ medidos para el PT9 y el CENTR, según se indique en fig. 3 - 3 y 3 - 4. Los parámetros de interés fueron calculados como se indica en 3 - 2.

La tasa media de desintegraciones alfa dada en el cuadro, se calculó a partir del valor de corriente continua por

* La Ref. de tablas es $w_- = 0,9$ cm/seg. para $E/P = 0,35$ en Ar + 0,2 % N₂

$$\langle N_{\alpha} \rangle = \frac{\langle I_{\alpha} \rangle}{\bar{q}_{\alpha}} = \frac{2 \langle I_{\alpha} \rangle^2}{\langle i^2 \rangle_{BF}}$$

y es una cota mínima, pues se usó la cota máxima de carga media $\bar{q}_{\alpha}$.

	PT9	CENTR	
<u>Mediciones:</u>			
$\langle i^2 \rangle_{BF}$	70	42	pA ² /Hz
$\langle i^2 \rangle_{AF}$	22	{ 25 polar. + 20 " -	"
$\langle I_{\alpha} \rangle$	5×10^{-9}	$2,4 \times 10^{-9}$	A
<u>Cálculo:</u>			
$\bar{q}_{\alpha}$ (máx.)	0,007	0,009	pCoul.
$\mathcal{E} = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{\langle i^2 \rangle_{AF}}$	3,2	{ 1,7 polar. + 2,1 " -	
$\langle N_{\alpha} \rangle$	$7,1 \times 10^5$	$2,7 \times 10^5$	desint. α /seg.

A continuación se comparan estos parámetros para los dos CF medidos.

a - Carga Media.

Puede observarse en el cuadro que la cota superior de la carga media originada por las partículas alfa, es del mismo orden en los dos CF (algo mayor en el CENTR).

Nótese que 0,007 pCoul. corresponde a una energía de $\sim 1,15$ MeV (0,009 pCoul. a $\sim 1,46$ MeV). Estos valores se consideran coherentes con la energía de generación de las partículas alfa ($E_{\alpha} = 4$ a 5 MeV), si se tiene en cuenta que la energía con que emergen del convertidor puede estimarse en aproximadamente la mitad, y sólo transfieren al gas por ionización, una parte de esta energía emergente.

En efecto, el rango R_{α} (en Ar) es del orden de ~ 2 cm., mayor que la separación entre electrodos en ambos dispositivos.

b - Contribución iónica a la Carga.

Comparando la relación escalón en los dos CF con la deducción del 3-2c, se concluye que en ambos la contribución de los electrones a la carga total es mayor que la contribución de los iones (la relación $\mathcal{E}$ es menor que 4).

Esta contribución electrónica es aún menor en el PT9.

3 - 2.1.2.3.- Tasa Media de Desintegraciones Alfa:

A partir de las características dadas por el fabricante puede calcularse la tasa media de desintegraciones alfa en el convertidor. La diferencia con el valor experimental (ver cuadro anterior) puede atribuirse a pequeñas cantidades de ${}^{92}\text{U}^{234}$ mezcladas al ${}^{92}\text{U}^{235}$.

El resultado del cálculo se da en el cuadro siguiente:

	PT9	CENTR	
<u>Características:</u>			
Area activa	814	165	cm ²
Espesor de convertidor	1	1	mg/cm ²
Enriquecimiento en ${}^{92}\text{U}^{235}$	90	90	%
<u>Cálculo:</u>			
N_T , cant. total de átomos de ${}^{92}\text{U}^{235}$	$3,3 \times 10^{21}$	$6,6 \times 10^{20}$	átomos *
$\langle N_\alpha \rangle$, tasa media de desint. α	1×10^5	$2,1 \times 10^4$	desint. α /seg. **
<u>Comparación:</u>			
Diferencia con valor experim.	$6,1 \times 10^5$	$2,5 \times 10^5$	desint. α /seg.
N_T % de ${}^{92}\text{U}^{234}$	0,21	0,42	% ***

Nótese que la mayor parte de la actividad α de los dos CF pueda atribuirse a la "impureza" ${}^{92}\text{U}^{234}$.

En el modo AC, un exceso de fondo α no es limitativo dados los niveles de flujo neutrónico en que se usa el CF.

$$* N_T = \frac{\text{Masa } \text{U}_3\text{O}_8}{\text{PM}(\text{U}_3\text{O}_8) (\text{g/mol})} \times N_A \left[\frac{\text{moléc.}}{\text{mol}} \right] \times 3 \left[\frac{\text{átomos } {}^{92}\text{U}}{\text{moléc. } \text{U}_3\text{O}_8} \right] \times \text{enriq.} \left[\frac{\text{átom. } {}^{92}\text{U}^{235}}{\text{átom. } {}^{92}\text{U}} \right] =$$

$$= 4,47 \times 10^{18} \times \text{área} \times \text{espesor} \times \text{enriquec.} (\text{área en cm}^2, \text{espesor en mg/cm}^2, \text{enriquec. en fracción decimal}).$$

** La vida media del ${}^{92}\text{U}^{235}$ es $T_m = 7,13 \times 10^8$ años $= 2,2 \times 10^{16}$ seg.; de donde la constante de desintegración es $\lambda = 3,15 \times 10^{-17}$ seg.⁻¹. La tasa media de desintegraciones es $\langle N_\alpha \rangle = \lambda N_T$ donde $\lambda = 1 / 1,44 T_m$.

*** Para el ${}^{92}\text{U}^{234}$ es $T_m = 2,5 \times 10^5$ años $= 7,8 \times 10^{12}$ seg.; $\lambda = 8,9 \times 10^{-14}$ seg.⁻¹. Con 0,21 % de ${}^{92}\text{U}^{234}$ en el PT9, es $N_T^{234} = 6,9 \times 10^{18}$, $\langle N_\alpha^{234} \rangle = 6,1 \times 10^5$. Con 0,42 % en el CENTR es $N_T^{234} = 2,8 \times 10^{18}$, $\langle N_\alpha^{234} \rangle = 2,5 \times 10^5$.

3 - 2.2.- ESPECTRO DE POTENCIA EN FLUJO NEUTRONICO

Se trabajó con los dos CF en las mismas condiciones del punto anterior, en la Fuente de Neutrones Térmicos de Laboratorio (FNL).

Con la misma metodología (ver 2-2.4.2.), en cada de las frecuencias se midió V_{s+r} con AT conectada (en este caso es fluctuación por neutrones más fluctuación por actividad α y ruido de fondo); y V_r sin conectar AT (ahora es fluctuación α más ruido de fondo). A partir de estos valores, se calculó $V_{\text{eff}}^2 = V_{s+r}^2 - V_r^2$ y $\langle i^2 \rangle [\text{pA}^2/\text{Hz}]$ (fluctuación por flujo neutrónico).

3 - 2.2.1.- Gráficos Espectrales de Potencia

a - CF PT9

En las Tablas 4 y 5 que se incluyen al final, se dan los valores de $\langle i^2 \rangle [\text{pA}^2/\text{Hz}]$ obtenidos como promedio de varias mediciones. Su representación gráfica se da en la fig. 3-5, y corresponden al PT9 en la FNL a flujos $\phi_1 \cong \cong 5,7 \times 10^3 \text{ nv.}$ y $\phi_2 \cong 1,2 \times 10^4 \text{ nv.}$ según estimación del 3 - 1.3.

Otras mediciones en campo neutrónico usando la fuente FNR (reactor RA3) se describen más adelante (capítulo 4) y sus resultados se discuten comparativamente.

b - CF CENTR

Los valores de la fluctuación se dan en Tabla 6; su representación gráfica en fig. 3-6, y corresponden a los espectros de potencia con ϕ_1 y ϕ_2 .

3 - 2.2.1.1.- Características Generales

Si se comparan los espectros de neutrones de los dos CF con los obtenidos del fondo α , puede observarse que son esencialmente similares, salvo un factor de escala. En efecto, puede verse la "meseta" de contribución electrónica más iónica, y es bien visible la zona de relajación iónica y la del fondo electrónico. La frecuencia de corte iónica puede estimarse coincidente.

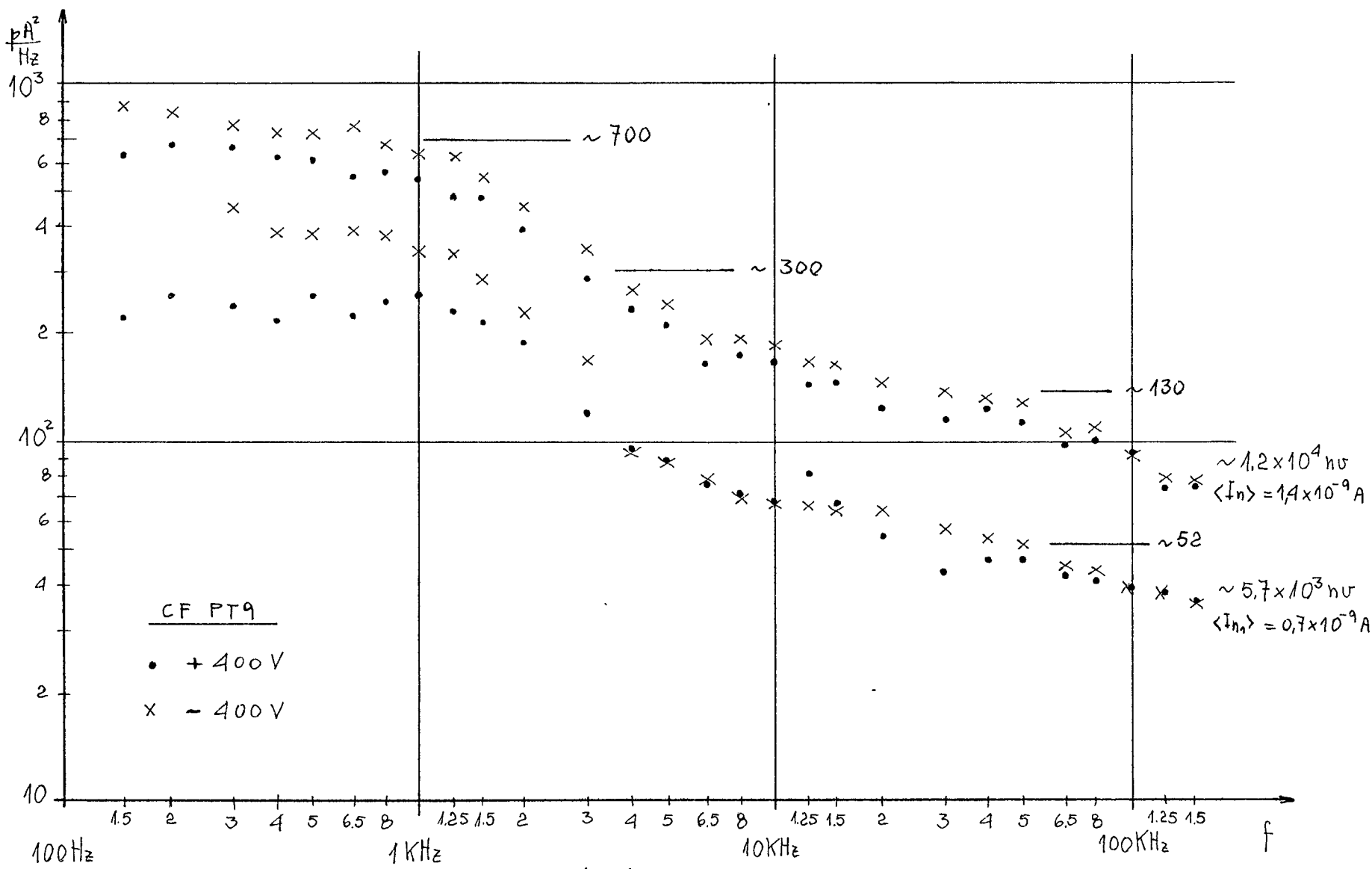


Fig.3-5.- Espectros de Potencia en FNL (PT9)

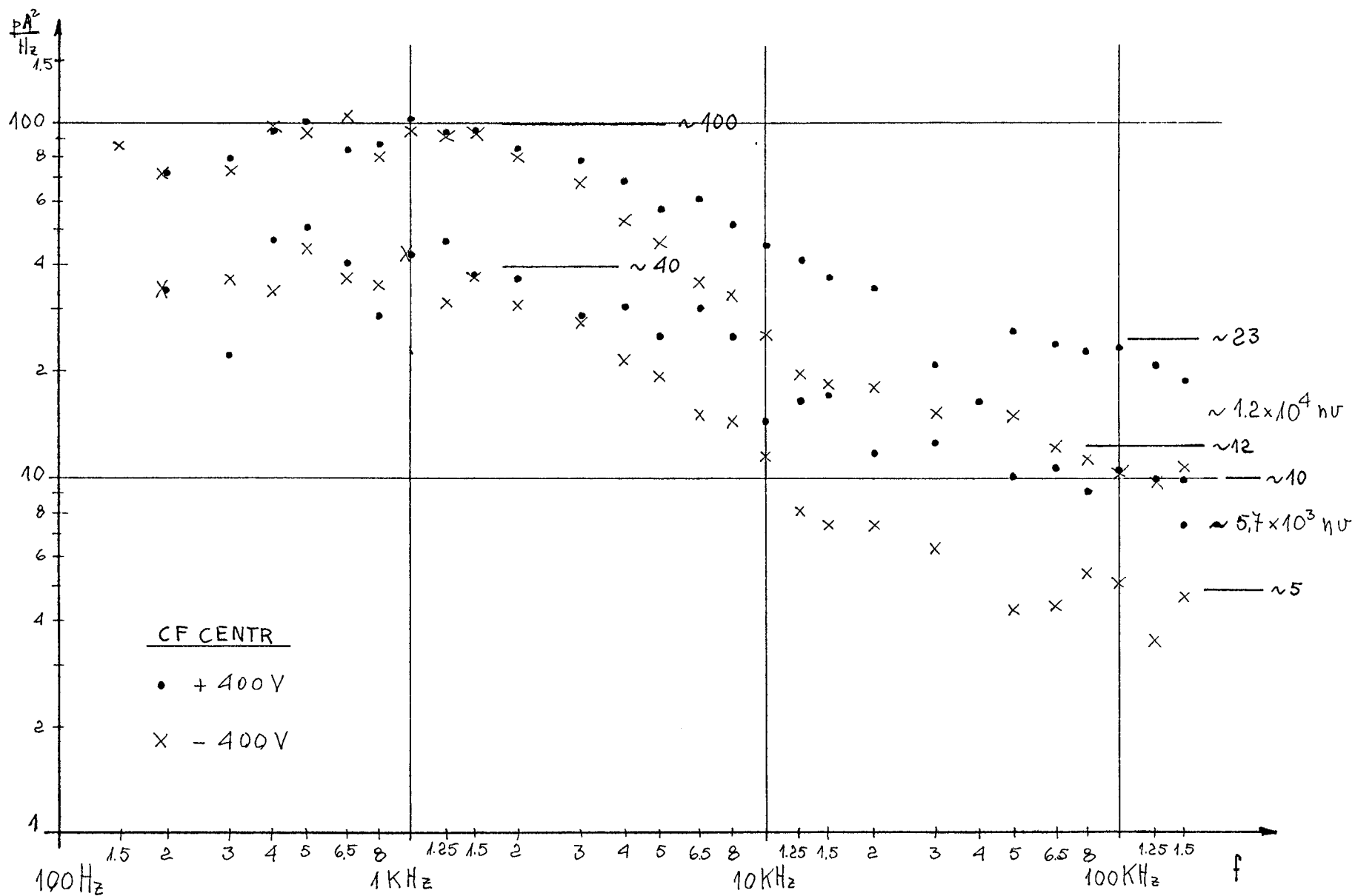


Fig.3-6.- Espectros de Potencia en FNL (CENTR)

Los niveles de la fluctuación son, en el PT9 superiores a los del fondo α (aproximadamente un orden más), y de orden comparable en el CENTR.

No obstante, una diferencia importante consiste en que el fondo electrónico en los espectros alfa es esencialmente plano en el rango de frecuencias explorado (también en los espectros γ que se discuten en el punto siguiente). En cambio, en los espectros neutrónicos este fondo disminuye en forma continua, y la potencia de ruido cae a la mitad en aproximadamente una década en frecuencia.

Tendría que ver con que en el caso de partículas α y fotones γ la ionización es esencialmente uniforme a lo largo de la traza; en cambio los fragmentos de fisión ionizan más al principio de su recorrido.

3 - 2.2.1.2.- Carga Media y Contribución Iónica

En los dos cuadros siguientes se dan, en condiciones de flujo y tasa media de cuentas en la FNL conocidos, la fluctuación medida ($\langle i^2 \rangle_{BF}$, $\langle i^2 \rangle_{AF}$, ambas linealizadas gráficamente), y la corriente continua $\langle I_n \rangle = I_{DC}$; este valor I_{DC} se obtuvo restando del total medido con el (K) con el CF en la FNL $\langle I_{n+\alpha} \rangle$ el valor de continua del α , $\langle I_\alpha \rangle$, medido antes (en 3-2.1.2.2.).

A partir de estos parámetros se calcularon

- i) cota máxima de $\bar{q}_n$, por

$$\langle i^2 \rangle_{BF} = 2 \bar{q}^2 \langle N \rangle \therefore \bar{q}_n (\text{máx.}) \leq q_{RMS} = \sqrt{\bar{q}^2} = \sqrt{\frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 \langle N \rangle}}$$

que puede compararse con la carga media calculada a partir del espectro de energías de fisión.

- ii) corriente continua (máx.) por

$$I_{DC} (\text{calc.}) = \bar{q}_n \langle N_n \rangle$$

donde $\langle N_n \rangle$ es la tasa media de cuentas según la medición en el modo P; este valor calculado puede compararse con el I_{DC} medido.

- iii) relación escalón $\mathcal{E} = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{\langle i^2 \rangle_{AF}}$ que da la contribución iónica a la carga total, y es un dato indicativo.

a - CF PT9

Se obtuvieron los valores del cuadro siguiente

	5 Ci	10 Ci	
<u>Condiciones Experimentales:</u>			
Flujo medio $\phi_n(t)$	$\phi_1 = 5,7 \times 10^3$	$\phi_2 = 1,2 \times 10^4$	n/cm ² seg.
Tasa media $\langle N_n \rangle$	2850	5900	ctas/seg.
<u>Mediciones:</u>			
$\langle i^2 \rangle_{BF}$	300	700	pA ² /Hz
$\langle i^2 \rangle_{AF}$	52	130	pA ² /Hz
$\langle I_n \rangle = I_{DC}$	$0,7 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$	A
<u>Parámetros calculados:</u>			
$\bar{q}_n \leq q_{RMS}$	0,23	0,24	pCoul.
$I_{DC}(calc) = \bar{q}_n \langle N_n \rangle$	$0,66 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$	A
$\mathcal{G} = \langle i^2 \rangle_{BF} / \langle i^2 \rangle_{AF}$	5,8	5,4	

La carga media generada por evento detectado, es mayor que la calculada a partir del espectro de energías de fisión (0,15 a 0,17 pCoul. como se encontró en 3 - 1.2.); ya se dijo que ésto ocurriría por haber usado tiempo de conformación de 1 μ seg.

El valor de la corriente continua medida, está en buen acuerdo con el valor calculado.

La relación escalón (coeficiente de contribución iónica que se definió en 3 - 2), es mayor que la obtenida para partículas alfa. La contribución de los iones a la carga total es preponderante en este caso.

b - CF CENTR

Los valores obtenidos para este dispositivo son los siguientes

	5 Ci	10 Ci	
<u>Condiciones Experimentales:</u>			
Flujo medio $\phi_n(t)$	$\phi_1 \approx 5,7 \times 10^3$	$\phi_2 \approx 1,2 \times 10^4$	n/cm ² seg.
Tasa media $\langle N_n \rangle$	2850	5900	ctas/seg.
<u>Mediciones:</u>			
$\langle i^2 \rangle_{BF}$	40	100	pA ² /Hz
$\langle i^2 \rangle_{AF}$	{ polar. + 10 " - 5	23 12	"
<u>Parámetros calculados:</u>			
$\bar{q}_n \leq q_{RMS}$	0,084	0,092	pCoul.
$I_{DC}(calc.) = \bar{q}_n \langle N_n \rangle$	$0,24 \times 10^{-9}$	$0,54 \times 10^{-9}$	Amp.
$\mathcal{G} = \langle i^2 \rangle_{BF} / \langle i^2 \rangle_{AF}$	{ polar. + 4 " - 8	4,3 8,3	

Se observan valores de la carga media que son inferiores a los calculados a partir del espectro de fisión (punto 3 - 1.2.)

La contribución iónica a la carga total es del mismo orden que la contribución electrónica en el caso de polaridad (+), y mucho mayor para polaridad (-).

3 - 2.3.- ESPECTRO DE POTENCIA EN CAMPO GAMMA

Se trabajó con los dos CF usando las instalaciones de la FxM y FxI descritas en el 2 - 1.3.

Por motivos de seguridad radiológica hubo que usar ~ 6 metros de cable RG58 para la conexión del CF al P113 en la FxM, y ~ 25 metros en la FxI. En ambos casos se efectuó la calibración del sistema según se indicó en 2-2.4.1. y se verificó levantando espectro alfa.

3 - 2.3.1.- Gráficos Espectrales de Potencia

a - CF PT9

Los valores de fluctuación obtenidos, se dan en la Tabla 7. Su representación gráfica en fig. 3-7 y corresponden al PT9 en la FxM con dosis de exposición de 4000 y 7400 rad/h., y en la FxI a 89 Krad/h. y 0,43 Mrad/h. Se usó polarización negativa (- 400 V. en ánodo).

b - CF CENTR

Los valores de la fluctuación se dan en la Tabla 8, y su representación gráfica en la fig. 3-8. Corresponden al CENTR en la FxM a 7400 rad/h. y en la FxI a 0,43 Mrad/h. Se indican los espectros con polarización positiva y negativa.

Puede observarse que los espectros obtenidos para ambos dispositivos presentan un aspecto muy similar a los de mediciones anteriores; especialmente a los del fondo alfa, como ya se había señalado. Las frecuencias de corte iónicas pueden estimarse coincidentes con los casos anteriores.

3 - 2.3.2.- Parámetros Característicos

En los cuadros de valores del punto siguiente se dan, para dosis γ co-

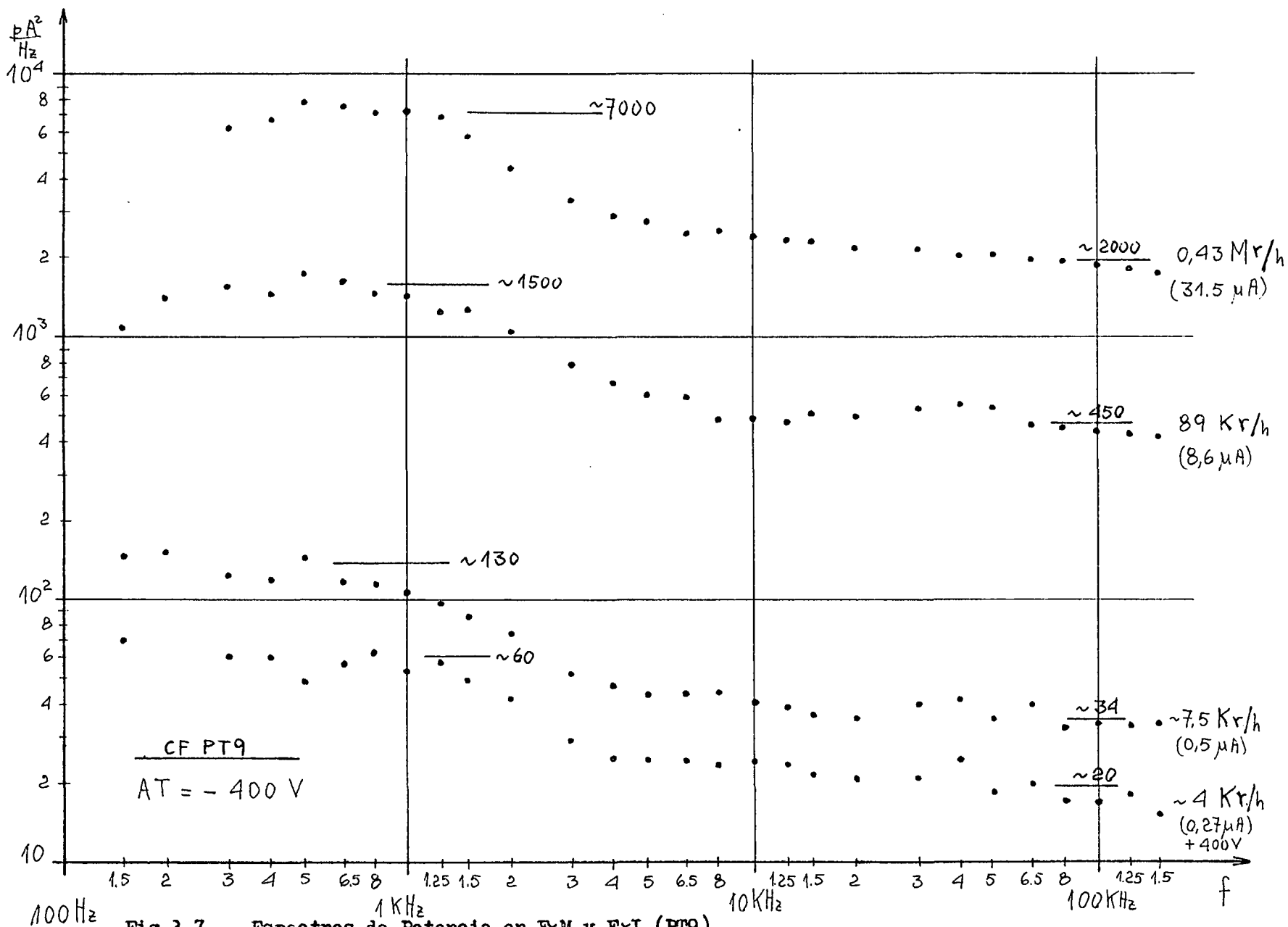


Fig.3-7.- Espectros de Potencia en F₈M y F₈I (PT9)

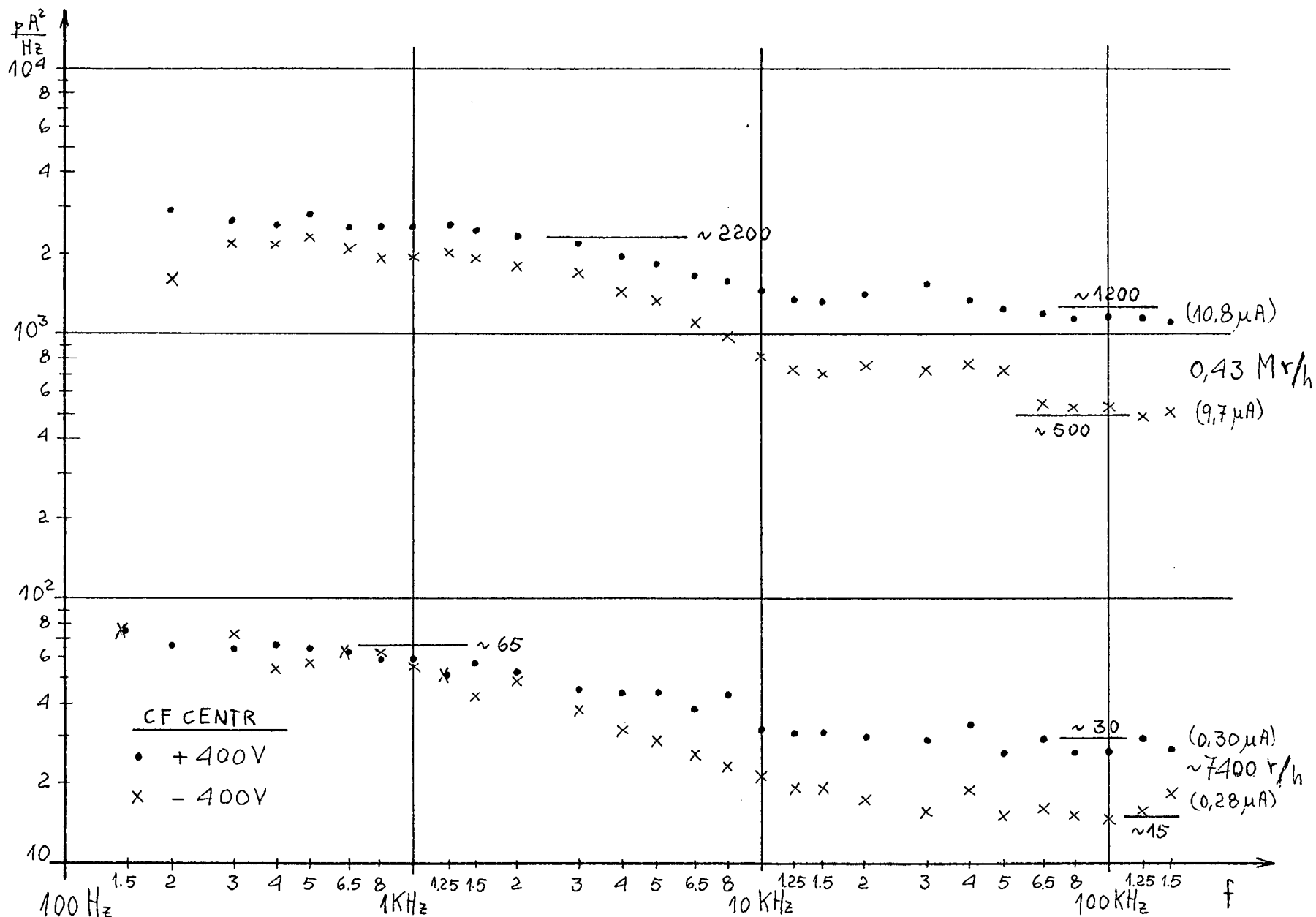


Fig.3-8.- Espectros de Potencia en F₈M y F₈I (CENTR)

nocidas, los resultados de las mediciones: $\langle i^2 \rangle_{BF}$, $\langle i^2 \rangle_{AF}$, ambos linealizados gráficamente, y corriente continua $\langle I_\gamma \rangle = I_{DC}$.

De estas series de valores se calcularon carga media $\bar{q}_\gamma$ y tasa media de cuentas $\langle N_\gamma \rangle$. La carga media $\bar{q}_\gamma$ se dedujo del par de ecuaciones para continua y fluctuación en bajas frecuencias

$$\left. \begin{aligned} \langle I_\gamma \rangle &= \bar{q}_\gamma \langle N_\gamma \rangle \\ \langle i^2 \rangle_{BF} &= 2 \bar{q}_\gamma^2 \langle N_\gamma \rangle \end{aligned} \right\} \therefore \bar{q}_\gamma = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 \langle I_\gamma \rangle}$$

donde se aceptó la aproximación $q_{RMS} \cong \bar{q}_\gamma$; por lo tanto, el valor de $\bar{q}_\gamma$ obtenido es una cota máxima de carga media.

La tasa media de cuentas se calculó a partir del valor de la corriente continua, por

$$\langle N_\gamma \rangle = \frac{\langle I_\gamma \rangle}{\bar{q}_\gamma}$$

Se da el coeficiente de contribución iónica $\mathcal{E}$ (relación de escalón), y se calculó la sensibilidad a dosis γ por

$$S_\gamma = \frac{\langle I_\gamma \rangle}{\dot{D}_\gamma}$$

Puede hacerse una estimación de la sensibilidad teórica a esperar, a partir de

$$S_\gamma (\text{teór.}) = 1.88 \times 10^{-10} P V_{(\text{stp})} \left[\frac{A}{\text{rad/h.}} \right]$$

que es válida para Ar como gas de llenado del CF, donde P está en atmósferas absolutas y V en litros, a temperatura ambiente*. Esta fórmula se deduce en los apéndices.

Se consideró cuál sería la carga máxima posible colectada por el CF si los fotones llegaran a transferir toda su energía al gas a través de los mecanismos conocidos. Puesto que la fuente es Co^{60} ($E = 1.2$ y 1.3 MeV), el cálculo da:

$$q_\gamma (\text{máx. posib.}) = \frac{1.2 \text{ MeV}}{26 \text{ eV/par}} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Coul/par} = 7.4 \times 10^{-15} \text{ Coul.}$$

La comparación de este valor con el de $\bar{q}_\gamma$ calculado antes, permita establecer cuál es la proporción de la energía del fotón efectivamente transfe-

* Para el PT9, con volumen sensible calculado como un cilindro de gas de ~ 20 cm de largo, ~ 3 cm. de diámetro, y con $P = 4$ atm., se obtuvo $S_\gamma (\text{teór.}) = 1.1 \times 10^{-4} \mu\text{A/rad/h.}$ Para el CENTR, largo ~ 10 cm., diámetro ~ 3 cm., y presión estimada en ~ 2 atm., se obtuvo $S_\gamma (\text{teór.}) = 2.7 \times 10^{-5} \mu\text{A/rad/h.}$

rida al gas (se desprecia efecto en paredes). Un coeficiente que la cuantifica, puede definirse como fracción de carga por captura fotónica, y estaría dado por

$$F_{c.f.} = \frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_\gamma(\text{máx.})}$$

3 - 2.3.2.1.- Valores Obtenidos. Discusión

a - CF PT9

Se da el siguiente cuadro de valores

	0,43 Mr/h	89 Kr/h	7400 r/h	4000 r/h	
<u>Mediciones:</u>					
$\langle i^2 \rangle_{BF}$	7000	1500	130	60	pA ² /Hz
$\langle i^2 \rangle_{AF}$	2000	450	34	20	pA ² /Hz
$\langle I_\gamma \rangle = I_{DC}$	31,5	8,6	0,5	0,27	μA
<u>Parámetros calculados:</u>					
$\bar{q}_\gamma \leq q_{RMS}$	$1,1 \times 10^{-16}$	$0,87 \times 10^{-16}$	$1,3 \times 10^{-16}$	$1,1 \times 10^{-16}$	Coul.
$\langle N_\gamma \rangle$	$2,8 \times 10^{11}$	$9,9 \times 10^{10}$	$3,8 \times 10^9$	$2,4 \times 10^9$	ctas/seg.
$\xi = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{\langle i^2 \rangle_{AF}}$	3,5	3,3	3,8	3,0	
S_γ	$7,3 \times 10^{-5}$	$9,7 \times 10^{-5}$	$6,8 \times 10^{-5}$	$6,8 \times 10^{-5}$	μA/ rad/h
S_γ (teór.)		$1,1 \times 10^{-4}$			"
$F_{c.f.}$	1,5	1,2	1,8	1,5	%

La carga media por evento detectado se considera compatible con el coeficiente $F_{c.f.}$ (estos porcentuales son previsibles dado el pequeño tamaño del CF), y puede promediarse en el orden de 1×10^{-16} Coul. (0,0001 pCoul.). A la vez se tiene una idea de la tasa media de cuentas en ese campo de radiación gamma.

La diferencia entre la sensibilidad a dosis gamma medida y la calculada, puede aceptarse también como coherente, dada la imprecisión del volumen sensible real de gas en el CF.

Comentario especial merece el coeficiente de contribución iónica ξ . Nuevamente es inferior a 4, como en el caso del fondo α ; la contribución a la carga total es más electrónica que iónica. Sugiere cierta correlación, como ya se dijo, con que el fondo electrónico es también, en este caso, relativamente plano.

b - CF CENTR

Se da el correspondiente cuadro de valores para este dispositivo

	0,43 Mr/h.		7400 r/h.		
	(+)	(-)	(+)	(-)	
<u>Mediciones:</u>					
$\langle i^2 \rangle_{BF}$	2200		65		$\mu A^2/Hz$
$\langle i^2 \rangle_{AF}$	1200	500	30	15	$\mu A^2/Hz$
$\langle I_g \rangle = I_{DC}$	10,8	9,7	0,30	0,28	μA
<u>Parámetros calculados:</u>					
$\bar{q}_g \leq q_{RMS}$	$1,0 \times 10^{-16}$	$1,1 \times 10^{-16}$	$1,1 \times 10^{-16}$	$1,2 \times 10^{-16}$	Coul.
$\langle N_g \rangle$	$1,1 \times 10^{11}$	$8,8 \times 10^{10}$	$2,7 \times 10^9$	$2,3 \times 10^9$	ctas/seg.
$\mathcal{E} = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{\langle i^2 \rangle_{AF}}$	1,8	4,4	2,2	4,3	
S_g	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$4,1 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-5}$	$\frac{\mu A}{Mrad/h.}$
$S_g(\text{teór.})$		$2,7 \times 10^{-5}$			$\frac{\mu A}{Mrad/h.}$
F.c.f.	1,4	1,5	1,5	1,6	%

La carga media por evento está muy de acuerdo con la calculada para el PT9, y es coincidente también el percentual de F c.f. La tasa media de cuentas que genera el campo gamma es también del mismo orden.

La sensibilidad a dosis gamma es menor que al del PT9, pero comparable a la teórica.

El coeficiente $\mathcal{E}$ es de ~ 4 y menor para polaridad (+); en general, puede aceptarse que la contribución a la carga total en este dispositivo, comparando con valores anteriores, es electrónica (los únicos $\mathcal{E} > 4$ aparecen en fuente de neutrones con el CF polarizado (-)).

3 - 2.4.- CORRIMIENTO DE FRECUENCIAS DE CORTE

Se buscó verificar experimentalmente el corrimiento de la frecuencia de corte iónica variando la AT de alimentación al CF. Para ello se usó el PT9 irradiándolo en campos intensos.

a - En la $F_{\gamma I}$

La dosis de exposición gamma fué de 0,43 Mrad/h., y se levantaron espectros de potencia con -600 V, -400 V y -50 V. Los resultados de la medición

se dan en la Tabla 9 y se representan gráficamente en la fig.3 - 9.

En el cuadro siguiente se da el listado de los parámetros de interés. Además de la f_c , se dan la sensibilidad S_γ y la carga $\bar{q}_\gamma$ que se calcularon para verificación de valores anteriores.

	-600 V	-400 V	-50 V	
f_c	1500	1000	500	Hz.
$\langle i^2 \rangle_{BF}$	8000	6000	2100	$\mu A^2/Hz$
$\langle I_\gamma \rangle = I_{DC}$	31	30,9	24,2	μA
S_γ	$7,2 \times 10^{-5}$	$7,2 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{-5}$	$\frac{\mu A}{Mrad/h.}$
$\bar{q}_\gamma$	$1,3 \times 10^{-16}$	$0,97 \times 10^{-16}$	$0,43 \times 10^{-16}$	Coul.

Puede observarse que la frecuencia de corte es proporcional a la AT aplicada, para -600 V y -400 V; no así para -50 V. Los valores de S_γ y $\bar{q}_\gamma$ confirman mediciones anteriores, excepto también para -50 V.

b - En la FNR

El flujo neutrónico fué estimado en $\phi_n \approx 2,2 \times 10^8$ nv. El valor de la AT fué variado desde -600 V hasta + 600 V.

Los valores medidos se dan en la Tabla 10 y la representación gráfica de los espectros obtenidos en fig. 3-10 y 3-11.

En el siguiente cuadro se dan los parámetros de interés

	-600	-400	-100	-50	+100	+400	+600	volt
f_c	1100	850	400	400	400	800	1200	Hz
$\langle i^2 \rangle_{BF}$	6,1	5,5	2,3	1,3	2,2	5,5	5,9	$\times 10^6 \mu A^2/Hz$
$\langle I_n \rangle = I_{DC}$	16	15,4	12,6	10,6	12,5	15,7	17	μA
$\bar{q}_n$	0,19	0,18	0,09	0,06	0,09	0,18	0,17	pCoul.

Se observa que nuevamente se mantiene la relación entre la f_c y la AT para ± 600 V y ± 400 V; no así para ± 100 V, - 50 V.

$\langle I_n \rangle$ y $\bar{q}_n$ confirman resultados anteriores, excepto para - 50 V.

Ante esta falta de linealidad en la f_c , se usaron los valores medidos para levantar curvas de saturación del CF PT9. Se dan en la fig.3 - 12 para dosis gamma y para flujo neutrónico.

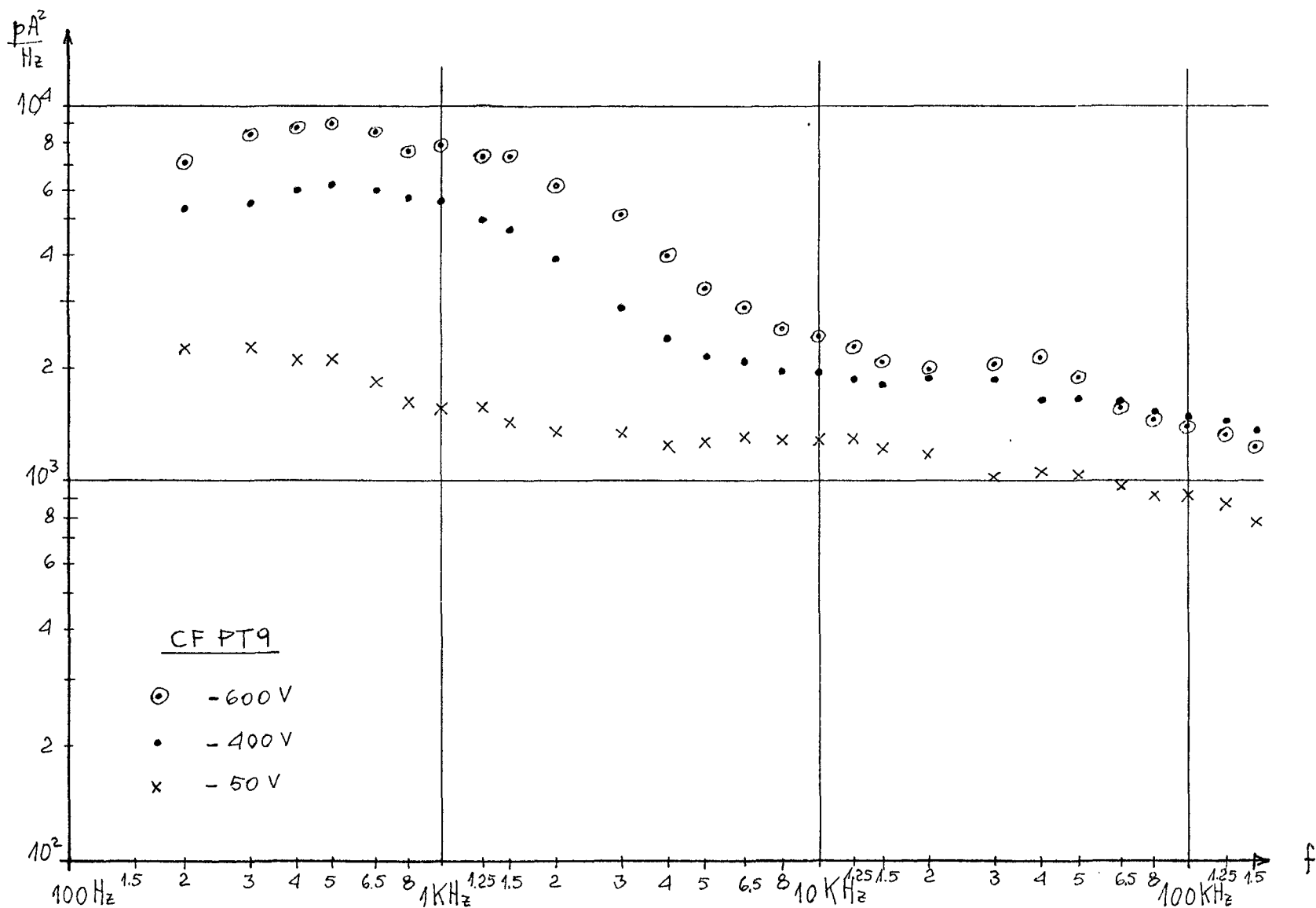


Fig.3-9.- Corrimiento de la Frecuencia de Corte con la Tensión
(PT9 en la F₈I)

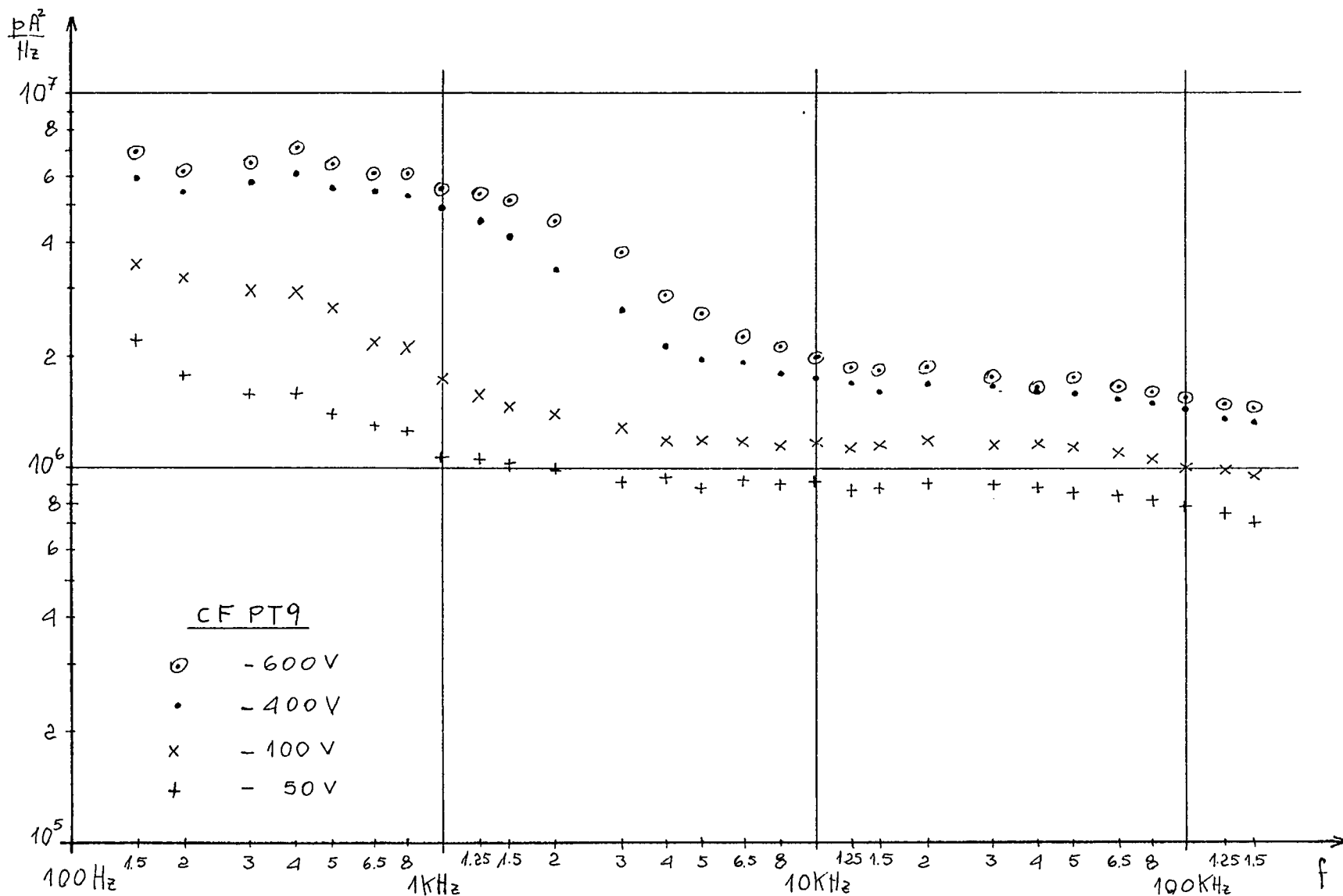


Fig.3-10.- Corrimiento de la Frecuencia de Corte con la Tensión (-)
(PT9 en la FNR)

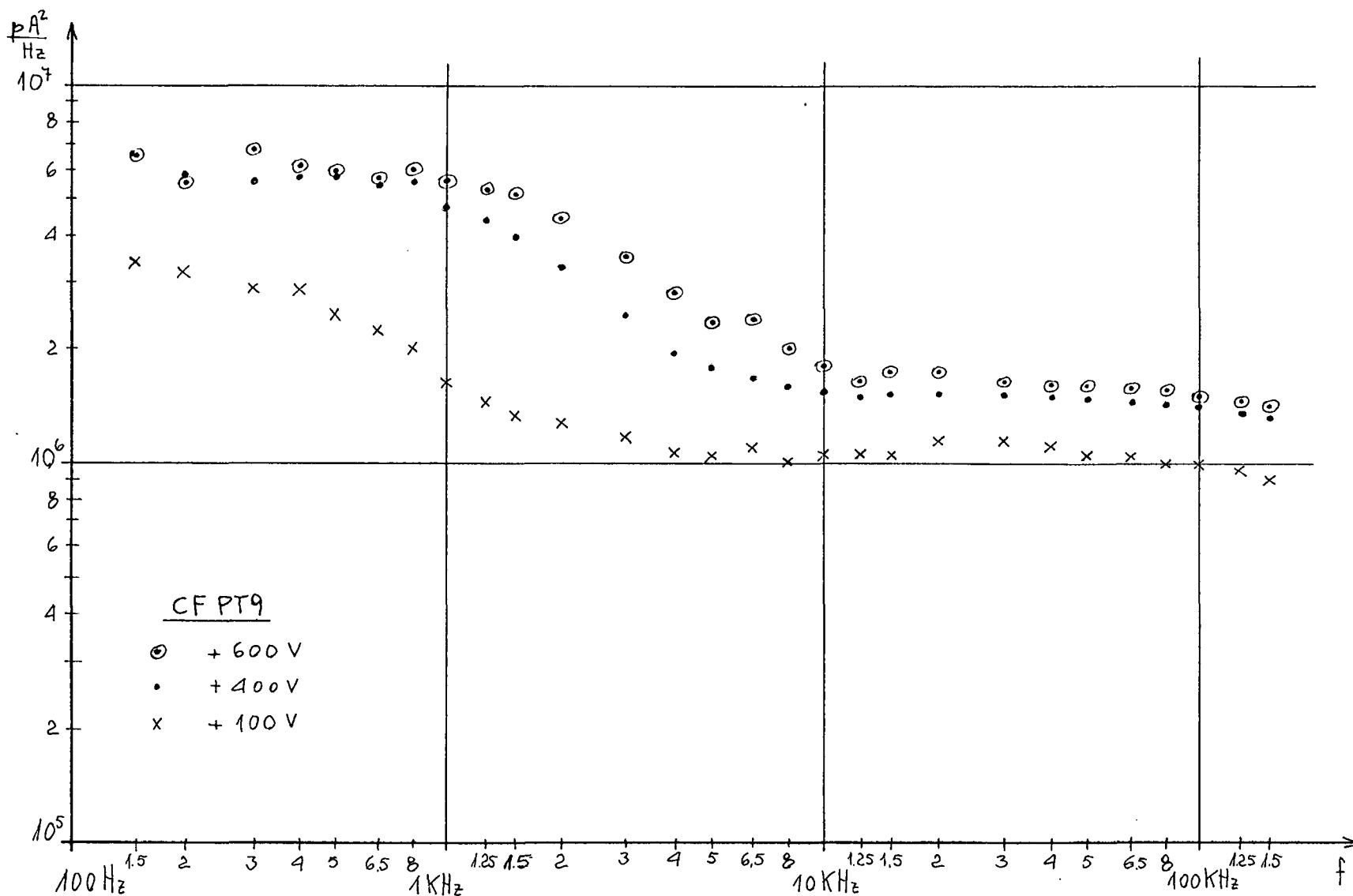


Fig.3-11.- Corrimiento de la Frecuencia de Corte con la Tensión (+)
(PT9 en la FNR)

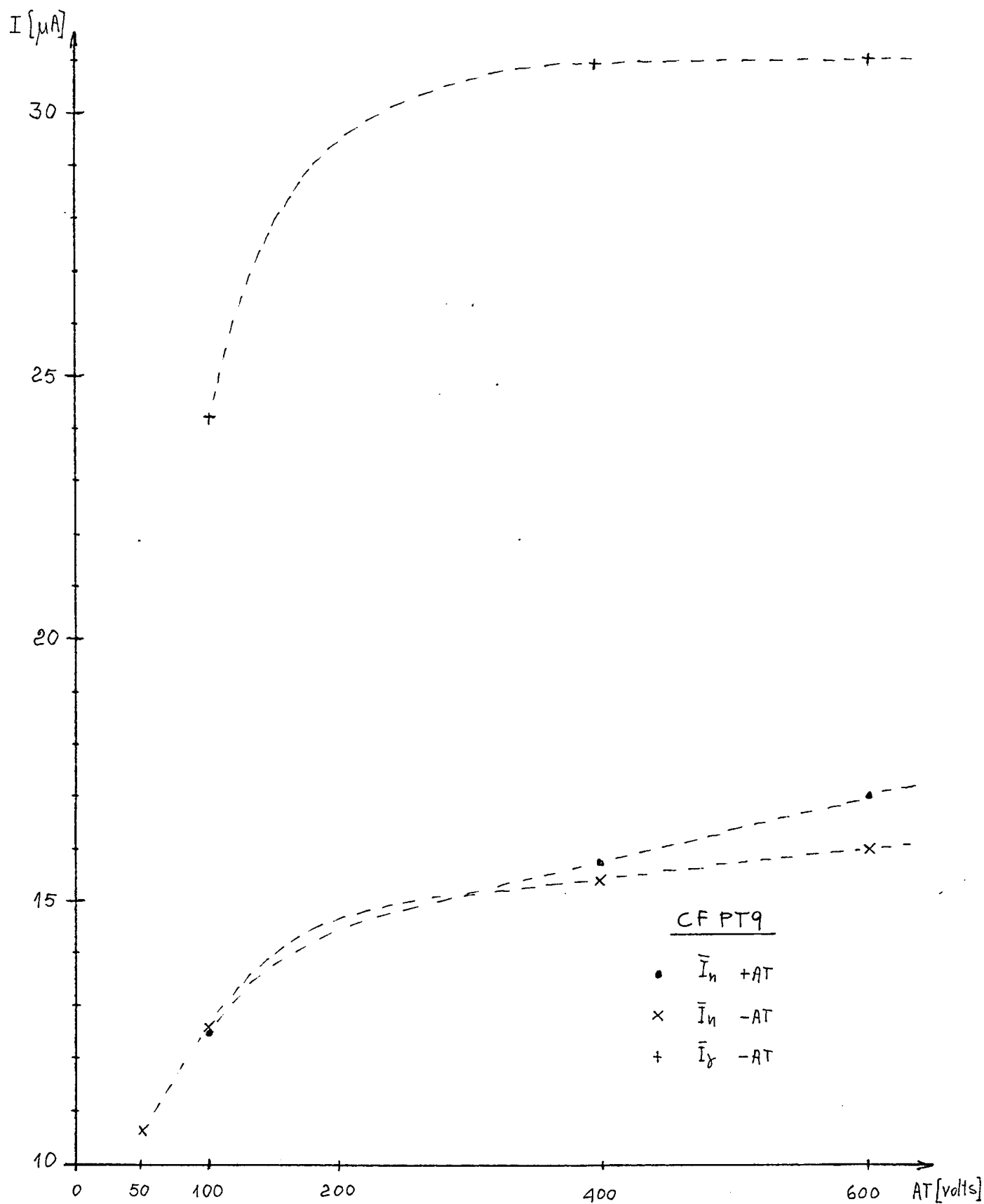


Fig. 3 - 12.- Característica de Saturación Gamma y Neutrónica del PT9

Puede observarse que en todos los casos 100 V ya está fuera del plateau de saturación, y decididamente lo está la tensión de - 50 V.

Esto explica la no proporcionalidad entre f_c y AI para tensiones bajas, y los valores anómalos de sensibilidad y carga media hallados en este caso.

CAPÍTULO 4 - DETECCIÓN DE NEUTRONES EN RANGO AMPLIO

En este capítulo se discute el CF como generador de fluctuaciones, en su aplicación al control de reactores nucleares.

Desde este punto de vista, el interés del CF estaría centrado en su comportamiento en cuanto a dispositivo que integra un sistema de instrumentación nuclear para uso específico; no tanto en la física del detector en sí (aunque sin excluirla), como fué el objeto del capítulo anterior.

Los dos aspectos fundamentales serían ahora:

i) la linealidad en la indicación de la potencia de trabajo del reactor en todo su rango de evolución

ii) verificación experimental de que la interferencia del fondo gamma tiene influencia despreciable en la medición de flujo neutrónico cuando el CF es operado en el modo AC.

Para ello se hicieron mediciones con el CF PT9 en campo neutrónico intenso (en la FNR) y en campo mixto de neutrones y gamma (FN γ), en el reactor RA3 del C.A.E.

4 - 1.- ESPECTROS DE POTENCIA EN CAMPO NEUTRONICO INTENSO

Se trabajó en Columna Térmica del RA3, con el equipo y en las condiciones de medición que se describen en el Capítulo 2.

El PT9, protegido de interferencia exterior por un blindaje electrostático, se instaló en las posiciones 10 a 15 del "stringer"*, y se conectó al P113 con ~ 9 metros de cable coaxial RG58 (este largo de cable es impuesto por la instalación y por motivos de seguridad radiológica). El CF se polarizó con $AT = -400$ V.

En esta posición, los valores conocidos de flujo a plena potencia son:

$$\begin{aligned}\phi_n &= 6,6 \times 10^9 \text{ nv. con el reactor a } 2,7 \text{ Mw} \\ \dot{D}_\gamma &< 10 \text{ Krad/h. a máxima potencia}\end{aligned}$$

* En los apéndices se describen ésta y otras facilidades de irradiación del RA3

Según mediciones en la FxM, esta dosis γ generará en el CF una corriente continua $I_{DC} = \langle I_\gamma \rangle \cong 1 \mu A$ y una fluctuación $\langle i^2 \rangle_{BF} \cong 200 \text{ pA}^2/\text{Hz}$. Estos valores están varios órdenes de magnitud por debajo de los medidos en Columna Térmica, y por lo tanto se aceptará que el campo en la FNR es neutrónico "puro".

4 - 1.1.- GRAFICOS ESPECTRALES

Se levantaron espectros de potencia con el reactor a distintos niveles de su potencia de trabajo. El listado de los valores medidos se da en la Tabla 11, y su representación gráfica en la fig. 4-1. Se repiten además, para su comparación, el espectro obtenido con el CF en la FNL para $\phi_2 = 1,2 \times 10^4 \text{ nv.}$, y el de exposición γ a $0,43 \text{ Mrad/h.}$ en la FxI.

En esta serie de gráficos espectrales se indica:

- i) I_μ , corriente del "microamperímetro" de la Instrumentación del Canal de Marcha del RA3, correspondiente a la corriente de las CIC de control del reactor.
- ii) $P(t)$, potencia media instantánea de trabajo del reactor. La potencia máxima es $2,4 \text{ Mw}^*$ y corresponde a $I_\mu = 24 \mu A$.
- iii) $\phi_n(t)$, flujo neutrónico medio instantáneo.**
- iv) $I_{DC} = \langle I_n \rangle$, corriente continua del PT9.

El aspecto general de la serie de gráficos espectrales obtenidos es similar, y las frecuencias de corte iónicas son coincidentes.

La pendiente del fondo electrónico no es la misma en todos los casos. Es máxima en el espectro con la FNL y parece disminuir al aumentar el flujo. A flujos altos es semejante a la del espectro γ con el CF en la FxI.

Puede notarse también que la relación escalón ξ disminuye al aumentar el flujo neutrónico.

En el cuadro 4 - 1 que se da a continuación aparece un listado de las mediciones de I_μ , I_{DC} , $\langle i^2 \rangle_{BF}$ a 650 Hz. y $\langle i^2 \rangle_{AF}$ a 80 KHz. donde los valores de la fluctuación han sido promediados gráficamente en un entorno de las frecuencias citadas; los de $P(t)$ y $\phi_n(t)$ calculados por relación lineal con I_μ a partir

* Esta potencia ha sido medida por ΔT de la temperatura de entrada y salida del núcleo.

** Estos valores se calcularon por relación lineal con I_μ , a partir de la referencia: $\phi_n(t) = 6,6 \times 10^9 \text{ nv.}$ para una potencia de $2,7 \text{ Mw.}$

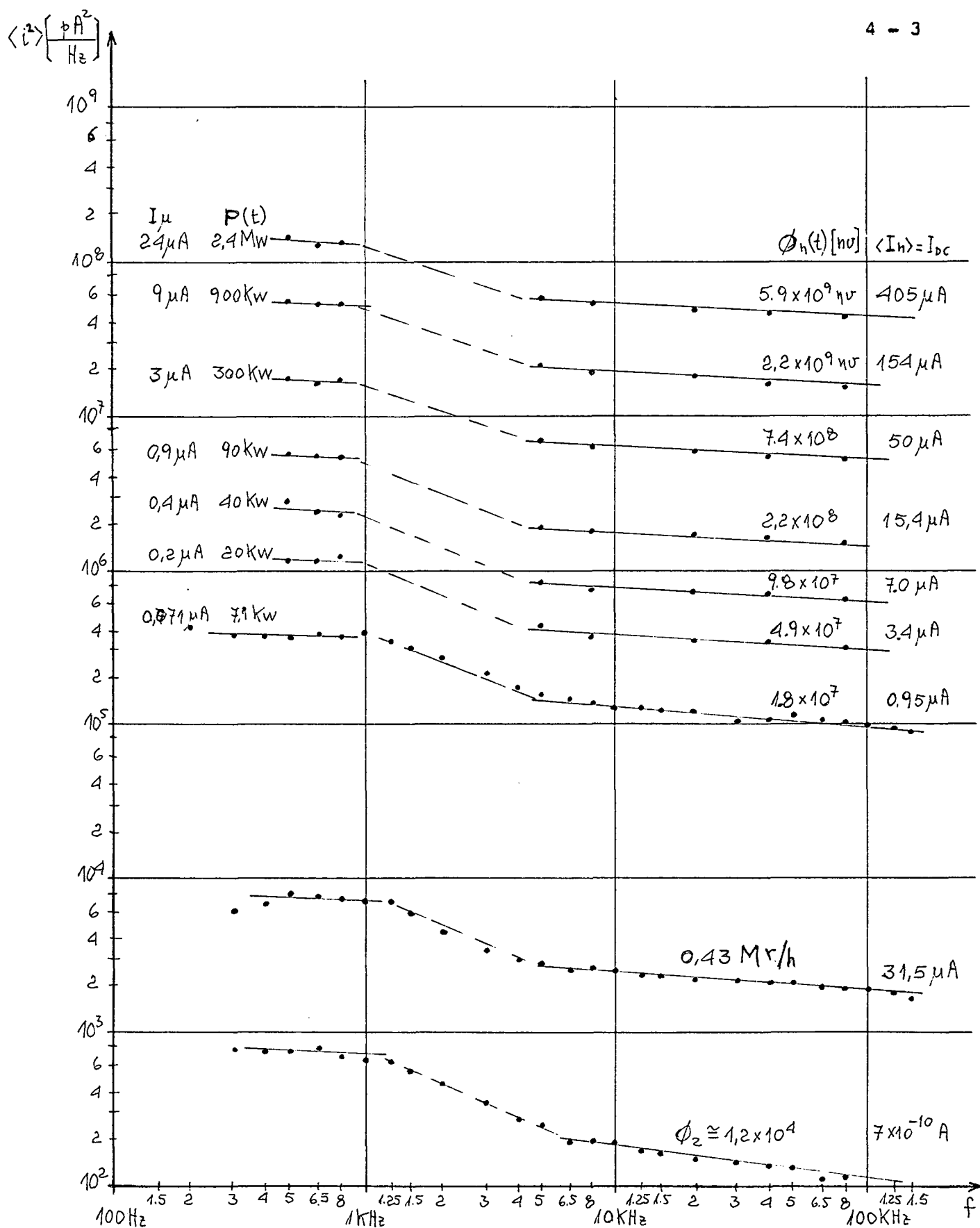


Fig. 4 - 1.- Serie de Espectros de Potencia del PT9 en la FNR

de la referencia 2,4 Mw para $I_{\mu} = 24 \mu A$ y $6,64 \times 10^9$ nv. para $P(t) = 2,7$ Mw, y los de tasa media de cuentas calculadas por $\langle N_n \rangle = S_n \phi_n(t)$ a partir de la sensibilidad nominal $S_n = 0,5 \left[\frac{\text{ctas/seg.}}{\text{nv}} \right]$. Se incluyen los correspondientes a la FNL.

Estos valores se tomarán como base para el cálculo y discusión en los puntos que siguen.

Cuadro 4 - 1

I_{μ}	$\langle I_n \rangle = I_{DC}$	$\langle i^2 \rangle_{BF} \left[\frac{\text{pA}^2}{\text{Hz}} \right]$ (650 Hz)	$\langle i^2 \rangle_{AF} \left[\frac{\text{pA}^2}{\text{Hz}} \right]$ (80 KHz)	$P(t)$	$\phi_n(t)$ $\left[\frac{n}{\text{cm}^2 \text{ seg.}} \right]$	$\langle N_n \rangle$ (ctas/seg.)
<u>FNR</u>				2,7 Mw	$6,64 \times 10^9$	
24 μA	405 μA	$1,3 \times 10^8$	$4,2 \times 10^8$	2,4	$5,9 \times 10^9$	$3,0 \times 10^9$
9	154	$5,3 \times 10^7$	$1,5 \times 10^7$	900 Kw	$2,2 \times 10^9$	$1,1 \times 10^9$
3	50	$1,7 \times 10^7$	$5,0 \times 10^6$	300	$7,4 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$
0,9	15,4	$5,5 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$	90	$2,2 \times 10^8$	$1,1 \times 10^8$
0,4	7,0	$2,4 \times 10^6$	$6,4 \times 10^5$	40	$9,8 \times 10^7$	$4,9 \times 10^7$
0,2	3,4	$1,1 \times 10^6$	$3,2 \times 10^5$	20	$4,9 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$
$7,1 \times 10^{-8} A$	0,95	$3,8 \times 10^5$	$1,1 \times 10^5$	7,1	$1,8 \times 10^7$	$9,0 \times 10^6$
<u>FNL</u>				-	11800	5900
10 Ci	$1,4 \times 10^{-9} A$	$7,0 \times 10^2$	$1,1 \times 10^2$	-	5700	2850
5 Ci	$0,7 \times 10^{-9}$	$3,5 \times 10^2$	$4,2 \times 10^1$	-		

4 - 1.1.1.- Carga Media y Contribución Iónica

Se usaron los valores del cuadro 4-1 para el cálculo de carga media por evento detectado.

Como se vió en el capítulo anterior, esta carga puede calcularse por $\bar{q}_n = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 I_{DC}}$ independientemente de la tasa media de cuentas $\langle N_n \rangle$, por medición de corriente continua con $\bar{q}_n = \frac{I_{DC}}{\langle N_n \rangle}$, y también con $\bar{q}_n \leq q_{RMS} = \sqrt{\frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 \langle N_n \rangle}}$. En los dos últimos casos interviene en el cálculo la tasa media $\langle N_n \rangle$, que es un dato obtenido en forma indirecta.

Los valores de $\bar{q}_n$ calculados por estos tres criterios se dan en el Cuadro 4 - 2 a continuación, donde se incluyen los espectros obtenidos con la FNL. En las columnas (1) y (3) la carga es una cota máxima por haberse adoptado la aproximación $\bar{q}_n \approx q_{RMS}$.

Se da también el coeficiente de contribución iónica (ó relación de escalón) $\mathcal{E} = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{\langle i^2 \rangle_{AF}} *$.

Cuadro 4 - 2				
P(t)	(1) $\bar{q}_n = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 I_{DC}}$	(2) $\bar{q}_n = \frac{I_{DC}}{\langle N_n \rangle}$	(3) $\bar{q}_n = \sqrt{\frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 \langle N_n \rangle}}$	$\mathcal{E} = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{\langle i^2 \rangle_{AF}}$
<u>F N R</u>				
2,4 Mw	0,16 pCoul.	0,14 pCoul.	0,15 pCoul.	3,1
900 Kw	0,17	0,14	0,16	3,5
300	0,17	0,14	0,15	3,4
90	0,18	0,14	0,16	3,7
40	0,17	0,14	0,16	3,8
20	0,16	0,14	0,15	3,4
7,1	0,20	0,11	0,15	3,5
<u>F N L</u>				
10 Ci	0,25	0,24	0,24	6,4
5 Ci	0,25	0,25	0,25	8,3

Nótese que $\bar{q}_n$ y $\mathcal{E}$ difieren para las mediciones en la FNL y en la FNR, sin que el error de medición alcance a justificarlo^{**}. Sería prematuro, no obstante, afirmar que exista en $\bar{q}_n$ y $\mathcal{E}$ una tendencia a disminuir al crecer el flujo.

4 - 1.1.2.- Cálculo de la Sensibilidad Neutrónica

La importancia de este punto radica en que permite establecer un nuevo e interesante método para medir sensibilidad del CF, con el dispositivo detector a flujos altos.

La sensibilidad del PT9 dada por el fabricante ($S_n = 0,5 \frac{\text{ctas/seg.}}{\text{nv}}$), corresponde al detector trabajando en el modo de Pulsos, y se calcula por

$$S_n(P) = \frac{\langle N_n \rangle}{\phi_n(t)} \left[\frac{\text{ctas/seg.}}{\text{nv.}} \right]$$

La sensibilidad en corriente puede definirse por

$$S_n(I) = \frac{I_{DC}}{\phi_n(t)} \left[\text{Amp/nv.} \right]$$

Ambos coeficientes están relacionados, pues

* Nótese que para las FNL el resultado difiere ligeramente del obtenido en 3-2212 porque ahora se tomó $\langle i^2 \rangle_{AF}$ a 80 KHz.

** El error de medición puede estimarse en $\sim 10\%$ para $\bar{q}_n$ en la FNL, y algo menos de la mitad en la FNR.

$$S_n(I) = \frac{\langle I_n \rangle}{\phi_n(t)} = \frac{\bar{q}_n \langle N_n \rangle}{\phi_n(t)} = \bar{q}_n S_n(P)$$

y puedan calcularse por mediciones de la fluctuación, puesto que se cumple

$$\frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{\phi_n(t)} \approx 2 \bar{q}_n \frac{\bar{q}_n \langle N_n \rangle}{\phi_n(t)} = 2 \bar{q}_n S_n(I) = 2 \bar{q}_n^2 S_n(P)$$

Se calcularon ambos coeficientes a partir de la serie de mediciones realizadas en la FNR, por

$$\begin{aligned} S_n(I)_{DC} &= \frac{I_{DC}}{\phi_n(t)} & S_n(P)_{DC} &= \frac{I_{DC}}{\bar{q}_n \phi_n(t)} \\ S_n(I)_{AC} &= \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 \bar{q}_n \phi_n(t)} & S_n(P)_{AC} &= \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 \bar{q}_n^2 \phi_n(t)} \end{aligned}$$

donde el subíndice (DC ó AC) indica que el cálculo se hace a partir de mediciones en continua ó en fluctuación a baja frecuencia (650 Hz) respectivamente; y se usaron los valores de carga media $\bar{q}_n = \frac{\langle i^2 \rangle_{BF}}{2 I_{DC}}$ del cuadro 4-2 para cada nivel de potencia del reactor.

Los resultados se dan en el cuadro 4 - 3 a continuación, incluyendo las mediciones realizadas en la FNL.

Cuadro 4. - 3

P(t)	$S_n(I)_{DC} \left[\frac{A}{nv} \right]$	$S_n(P)_{DC} \left[\frac{ctas/seg}{nv} \right]$	$S_n(I)_{BF} \left[\frac{A}{nv} \right]$	$S_n(P)_{BF} \left[\frac{ctas/seg}{nv} \right]$
<u>F N R</u>				
2,4 Mw	$6,9 \times 10^{-14}$	0,43	$6,9 \times 10^{-14}$	0,43
900 Kw	$7,0 \times 10^{-14}$	0,41	$7,1 \times 10^{-14}$	0,42
300	$6,8 \times 10^{-14}$	0,40	$6,8 \times 10^{-14}$	0,40
90	$7,0 \times 10^{-14}$	0,39	$6,9 \times 10^{-14}$	0,39
40	$7,1 \times 10^{-14}$	0,42	$7,2 \times 10^{-14}$	0,42
20	$6,9 \times 10^{-14}$	0,43	$7,0 \times 10^{-14}$	0,44
7,1	$5,3 \times 10^{-14}$	0,27	$5,3 \times 10^{-14}$	0,26
<u>FNL</u>				
10 Ci	$11,9 \times 10^{-14}$	0,48	$11,9 \times 10^{-14}$	0,47
5 Ci	$12,3 \times 10^{-14}$	0,49	$12,3 \times 10^{-14}$	0,49

Puede verse que la sensibilidad en continua es similar para las mediciones en la FNR (salvo para 7,1 Kw de potencia) y difiere de la calculada para

la FNL, pero están en el mismo orden. La sensibilidad en cuentas da valores muy similares en todos los casos, y concuerda bien con el valor dado por el fabricante.

4 - 1.2.- LINEALIDAD

La linealidad del sistema puede discutirse a partir del gráfico de la fig. 4 - 2. Se representan los valores de la corriente continua $\langle I_n \rangle = I_{DC}$ y los de la fluctuación $\langle i^2 \rangle$ medidos a diferentes frecuencias vs. la lectura de las CIC de la Instrumentación del Canal de Marcha (se indica también la potencia y flujo equivalente). Las rectas corresponden a relación lineal en el gráfico log-log.

Las lecturas de corriente continua del CF pueden aceptarse como lineales con la potencia. La señal de fluctuación a baja frecuencia ($\langle i^2 \rangle_{BF}$ a 650 Hz) presenta linealidad aceptable. La de fluctuación a frecuencias altas ($\langle i^2 \rangle_{AF}$ a 20 y 80 KHz), parecerían tender a aumentar en exceso al crecer la potencia; tendría que ver con la disminución de la relación de escalón a flujos altos, con aumento del fondo electrónico.

4 - 2.- ESPECTROS DE POTENCIA EN CAMPO MIXTO

Se trabajó con el CF PT9 en el tanque del RA3 en las condiciones descritas en 2-1.4., en campo mixto de neutrones y gamma.*

4 - 2.1.- GRAFICOS ESPECTRALES

Los resultados obtenidos en la medición se dan en la tabla 12, y su representación gráfica se da en la fig. 4 - 3. En ella se indican, para cada gráfico espectral, los valores de I_p , $P(t)$ del reactor, y los de I_{DC} ; además, se indica el flujo neutrónico $\phi_n(t)$ y la tasa de dosis gamma $\dot{D}_\gamma$ calculados en el punto 4-2.2.

Son varios gráficos espectrales a distinta potencia de trabajo del reactor, de los cuales el último corresponde al fondo de neutrones + gamma con el reactor frío, antes de empezar a mover barras.* *

* Esta posición del CF puede considerarse aproximadamente equivalente al punto (3) en mesa de cámaras del RA3 (ver Apéndice A), donde el flujo neutrónico se estima en $3,4 \times 10^9$ nv. La tasa de dosis γ que se midió en (3) es de 1,7 Mrad/h.

** La tasa de dosis gamma medida en su oportunidad en el punto (3) de la mesa de cámaras fué de $\dot{D}_\gamma \approx 4000$ rad/h con reactor frío (26 horas después de apagado)

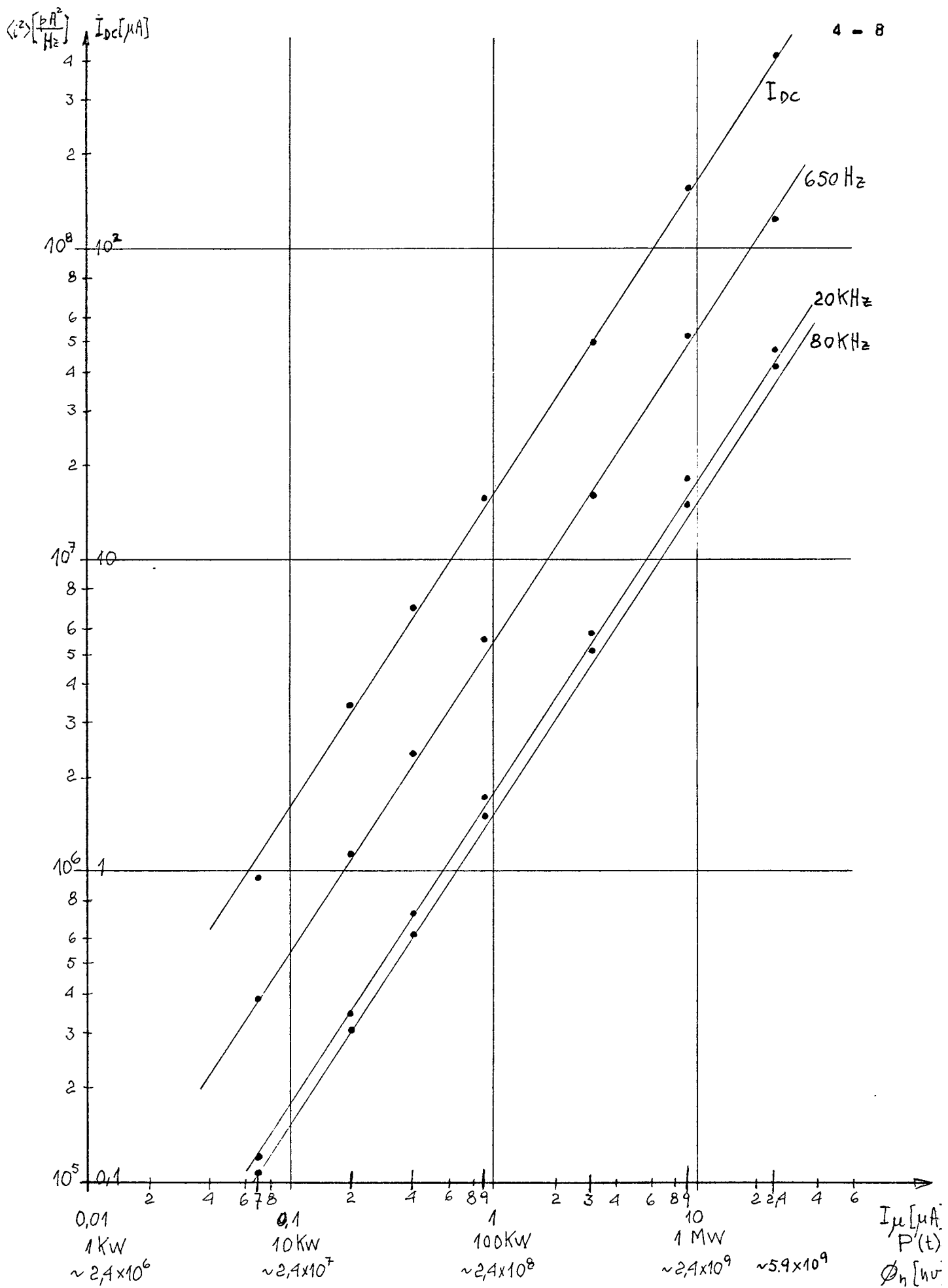


Fig. 4 - 2.- Linealidad de la Fluctuación vs. Potencia del RA3 (PT9 en la FNR)

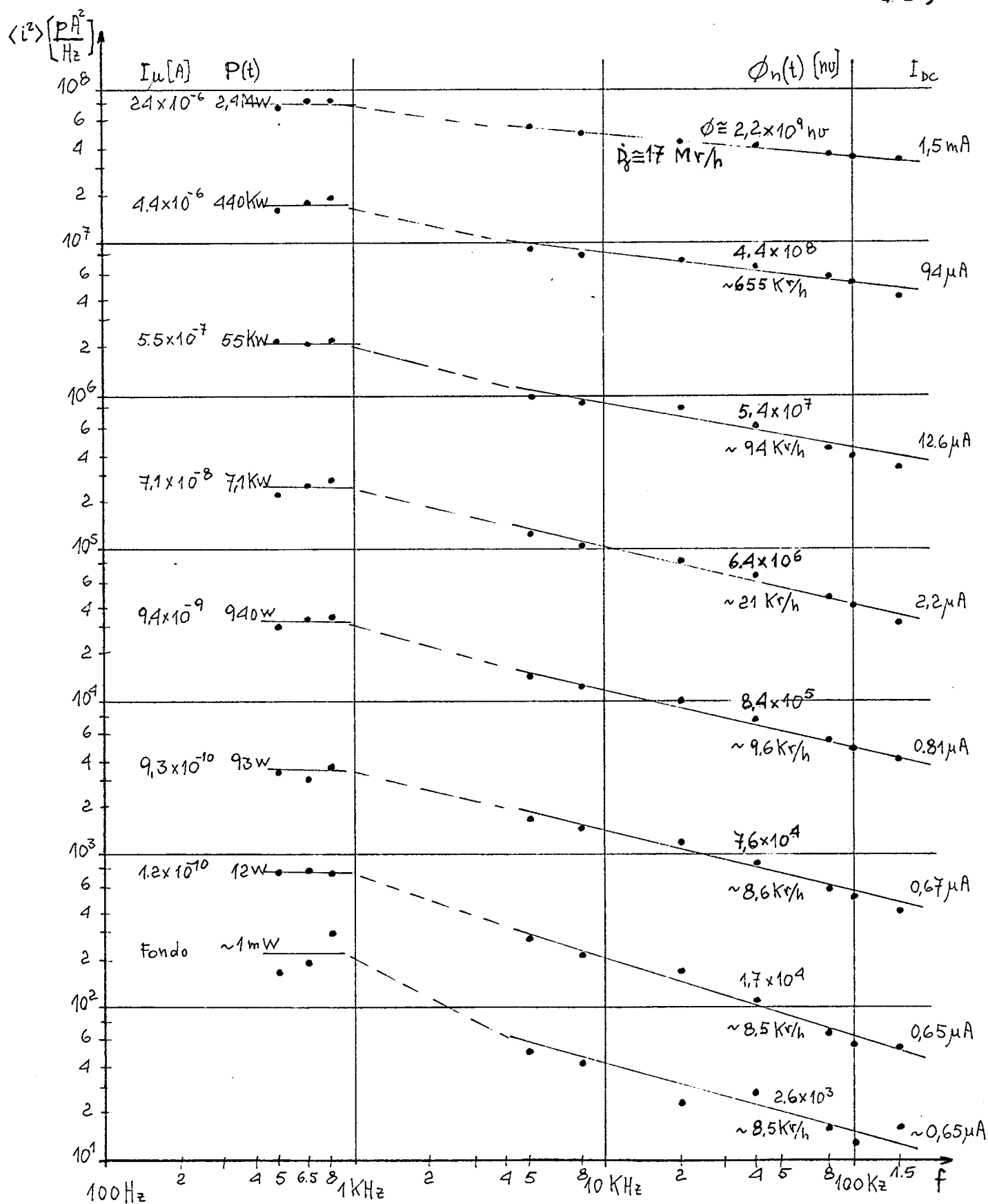


Fig. 4 - 3.- Serie de Espectros de Potencia del PT9 en la FNY

El aspecto general de estos gráficos es comparable a los de fig.4-1 (en Columna Térmica, FNR). Se observa que las frecuencias de corte en general coinciden, y no están ahora tan netamente diferenciadas la zona de relajación iónica y el fondo electrónico. La pendiente de este fondo es ahora también mayor.

Para el cálculo y discusión en los puntos que siguen, se da en el Cuadro 4 - 4 a continuación un listado de los valores I_{μ} , $\langle I_{n+\gamma} \rangle = I_{DC}$, $\langle i^2 \rangle_{BF}$ a 650 Hz. y $\langle i^2 \rangle_{AF}$ a 150 KHz., donde los valores de la fluctuación se promediaron gráficamente en un entorno de estas frecuencias. Se dan también los valores de $P(t)$, potencia de trabajo del reactor RA3, que se calcularon a partir de la referencia 2,4 Mw para $I_{\mu} = 24 \mu A$, linealmente con I_{μ} .

Cuadro 4 - 4

I_{μ}	I_{DC}	$\langle i^2 \rangle_{BF} \left[\frac{pA^2}{Hz} \right]$ (650 Hz)	$\langle i^2 \rangle_{AF} \left[\frac{pA^2}{Hz} \right]$ (150 KHz)	$P(t)$
24 μA	1,5 mA	$8,5 \times 10^7$	$3,4 \times 10^7$	2,4 Mw
4,4	94 μA	$1,8 \times 10^7$	$4,5 \times 10^6$	440 Kw
0,55	12,6	$2,2 \times 10^6$	$3,4 \times 10^5$	55
$7,1 \times 10^{-8} A$	2,2	$2,6 \times 10^5$	$3,4 \times 10^4$	7,1
$9,4 \times 10^{-9}$	0,81	$3,4 \times 10^4$	$4,1 \times 10^3$	940 w
$9,3 \times 10^{-10}$	0,67	$3,1 \times 10^3$	$4,1 \times 10^2$	93
$1,2 \times 10^{-10}$	0,65	$7,8 \times 10^2$	52	12
fondo	0,65	195	16	-

4 - 2.2.- EVOLUCION DE LA TASA DE DOSIS CON LA POTENCIA

a - Tasa de pulsos debida a neutrones

En campo mixto de neutrones y gamma, la fluctuación es

$$\langle i^2_{n+\gamma} \rangle_{BF} = 2 \bar{q}_n^2 \langle N_n \rangle + 2 \bar{q}_\gamma^2 \langle N_\gamma \rangle$$

y la corriente continua.

$$I_{DC} = \langle I_{n+\gamma} \rangle = \bar{q}_n \langle N_n \rangle + \bar{q}_\gamma \langle N_\gamma \rangle$$

A partir de estas dos ecuaciones, con la aproximación $\bar{q}_n \approx q_{RMS}$ y por ser $\bar{q}_\gamma \ll \bar{q}_n$, la tasa media de pulsos, correspondiente a neutrones, puede calcularse por

$$\langle N_n \rangle = \frac{1}{2 \bar{q}_n} \langle i^2 \rangle_{BF} - \frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_n} I_{DC}$$

b - Tasa de pulsos gamma:

Puede calcularse $\langle N_\gamma \rangle$ a partir de la fluctuación y la corriente I_{DC} como se hizo en el punto anterior. O bien, lo que es equivalente y más simple, a partir de $\langle N_n \rangle$, calculando la contribución del fondo gamma a la corriente continua por

$$I_{DC}(\gamma) = I_{DC} - I_{DC}(n) = I_{DC} - \bar{q}_n \langle N_n \rangle$$

y la tasa media de pulsos debida a gamma por

$$\langle N_\gamma \rangle = \frac{I_{DC}(\gamma)}{\bar{q}_\gamma}$$

c - Cálculo del flujo neutrónico y tasa de dosis

Se calculó $\langle N_n \rangle$ y $\langle N_\gamma \rangle$ según los dos puntos anteriores, tomando: $\bar{q}_n = 0,20$ pCoul. (carga promedio del cuadro 4-2), y $\bar{q}_\gamma = 1 \times 10^{-16}$ Coul., valor medido en fuente monoenergética de Co^{60} según 3-2.3.2.1.*

Con estos valores de las constantes e introduciendo factores de conversión para las unidades, es

$$\langle N_n \rangle \cong 12,5 \langle i^2 \rangle_{BF} - 1700 I_{DC} \quad (\langle i^2 \rangle_{BF} \text{ en } \frac{\mu A^2}{Hz}, I_{DC} \text{ en } \mu A)$$

$$\langle N_\gamma \rangle \cong 10^{10} I_{DC}(\gamma) \quad (I_{DC}(\gamma) \text{ en } \mu A)$$

A partir de estas tasas de pulsos, el flujo neutrónico y la tasa de dosis de exposición gamma puede calcularse por

$$\phi_n(t) = \frac{\langle N_n \rangle}{S_n} = 2 \langle N_n \rangle \quad (S_n = 0,5 \frac{ctas/seg.}{nv})$$

$$\dot{D}_\gamma(t) = \frac{\bar{q}_\gamma}{S_\gamma} \langle N_\gamma \rangle = 1,31 \times 10^{-12} \langle N_\gamma \rangle \quad (\dot{D}_\gamma \text{ en Mrad/h.})$$

El resultado del cálculo se da en Cuadro 4 - 5 a continuación.

* En un reactor, la fuente gamma no es monoenergética, y la carga colectada por cada pulso en el CF es mayor; puede estimarse en un factor ~ 4 , con lo que $\bar{q}_\gamma^R = 4 \times 10^{-16}$ Coul. No obstante, tomar en cuenta esta corrección modificaría sólo la tasa de pulsos $\langle N_\gamma \rangle = \frac{I_{DC}(\gamma)}{\bar{q}_\gamma^R}$, pero no la tasa de dosis $\dot{D}_\gamma = \frac{\bar{q}_\gamma^R \langle N_\gamma \rangle}{S_\gamma} = \frac{I_{DC}(\gamma)}{S_\gamma}$; también se obtendría $\langle N_n \rangle$ ligeramente menor a muy bajas potencias (~ 90 w y menores).

Cuadro 4 - 5

P(t)	$\langle N_n \rangle$ [ctas/seg.]	$\phi_n(t)$	$\phi_n(t)$ (por I_μ)	$\langle N_\gamma \rangle$ [ctas/seg.]	$\dot{D}_\gamma(t)$
2,4 Mw	$1,1 \times 10^9$	$2,2 \times 10^9$	$2,2 \times 10^9$	$1,3 \times 10^{13}$	17,0 Mrad/h *
440 Kw	$2,2 \times 10^8$	$4,4 \times 10^8$	$4,0 \times 10^8$	$5,0 \times 10^{11}$	655 Krad/h
55	$2,7 \times 10^7$	$5,4 \times 10^7$	$5,0 \times 10^7$	$7,2 \times 10^{10}$	94,3
7,1	$3,2 \times 10^6$	$6,4 \times 10^6$	$6,5 \times 10^6$	$1,6 \times 10^{10}$	21,0
940 w	$4,2 \times 10^5$	$8,4 \times 10^5$	$8,6 \times 10^5$	$7,3 \times 10^9$	9,6
93	$3,8 \times 10^4$	$7,6 \times 10^4$	$8,5 \times 10^4$	$6,6 \times 10^9$	8,6
12	$8,6 \times 10^3$	$1,7 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$	$6,5 \times 10^9$	8,5
fondo	$1,3 \times 10^3$	$2,6 \times 10^3$	-	$6,5 \times 10^9$	8,5

Nótese que el flujo neutrónico calculado está bastante de acuerdo con el de evolución por potencia del reactor (compárese con la columna $\phi_n(t)$ por I_μ).

En la fig. 4 - 4 se representa la evolución de $\dot{D}_\gamma$ con el flujo $\phi_n(t)$ (y la potencia de trabajo del reactor).

Se esperaría un fondo de activación γ constante a baja potencia (lo que se cumple), y una relación lineal de la tasa de dosis $\dot{D}_\gamma$ con el flujo $\phi_n(t)$ a potencias altas.

Esta segunda condición no se cumple, lo que podría deberse al cambio de configuración del campo gamma a altas potencias. En efecto, el CF está tan cercano al núcleo del reactor, que éste aparecería como una fuente de radiación gamma extensa en la que prácticamente está inmerso el detector.

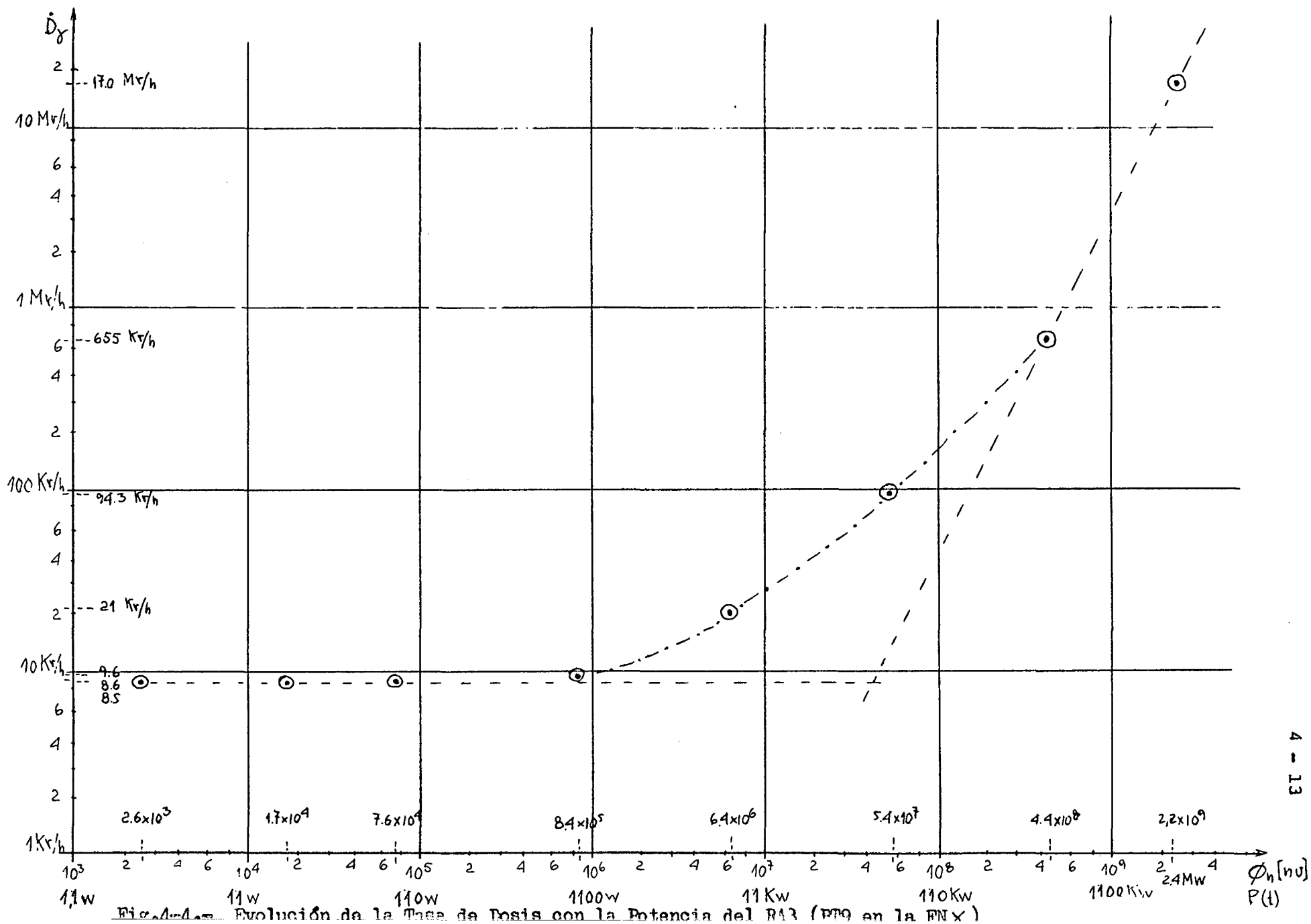
No obstante, el gráfico de la fig. 4-4 da una idea suficientemente aproximada de la evolución de $\dot{D}_\gamma(t)$.

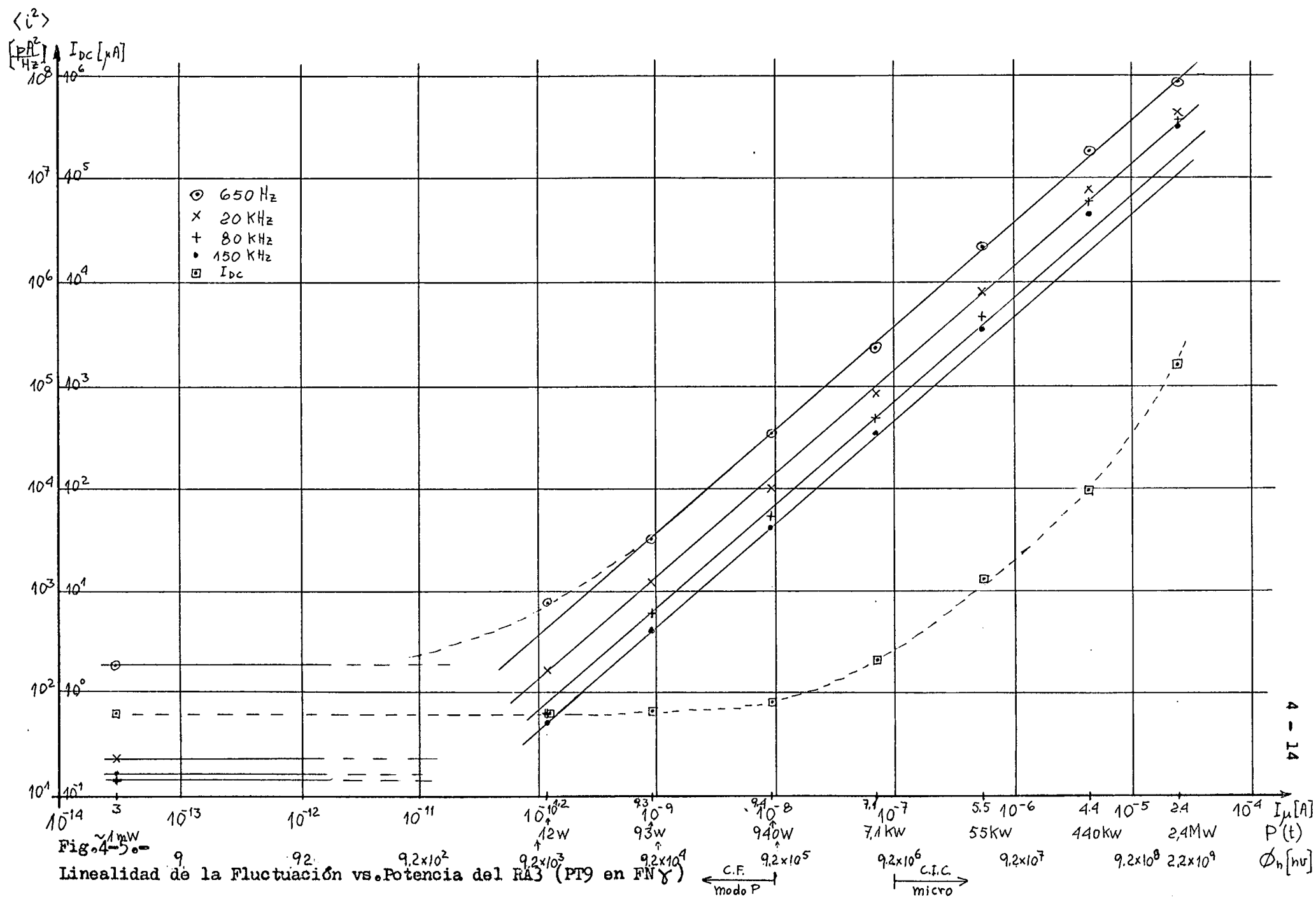
4 - 2.3.- LINEALIDAD

En la fig. 4 - 5 se representan los valores medidos de corriente continua $\langle I_{n+\gamma} \rangle = I_{DC}$ y los de fluctuación a varias frecuencias, vs. I_μ de la Instrumentación de Control (se indica también la potencia P(t) y el flujo neutrónico $\phi_n(t)$ correspondiente).

Como era de esperar en campo mixto, se observa fuerte alinealidad en las lecturas de corriente continua (modo DC) debido a la interferencia del fondo

* Este flujo a potencia máxima se compara bien con el valor medido en la posición (3) de mesa de cámaras (es menor en un factor 1,5). La tasa de dosis gamma es un orden mayor.





gamma. Y un fondo prácticamente constante en las primeras cinco décadas de la evolución de potencia del reactor.

En la señal de fluctuación el fondo es menor cuanto más alta es la frecuencia, y es constante en las primeras dos ó tres décadas. En las últimas décadas, comparando los valores medidos con las rectas de pendiente unitaria, se observa cierta falta de linealidad; en particular, a 150 KHz la señal medida supera a la esperada en un factor ~ 3 , para plena potencia del reactor.

Este comportamiento puede resumirse como sigue:

i) Características a baja frecuencia (BF)

fondo	~ 1 orden mayor que a (AF)
linealidad	buenas
rango dinámico	$\sim 4 \frac{1}{2}$ décadas

ii) Características a alta frecuencia (AF)

fondo	menor a frecuencias más altas
linealidad	alineal a potencias grandes; la fluctuación medida es mayor que la esperada. *
rango dinámico	$\sim 5 \frac{1}{2}$ décadas (se amplía en una década más abajo respecto al de baja frecuencia)

Como se indica en el gráfico, el CF operando en el modo de pulsos sin desplazamientos mecánicos, podría seguir la evolución del reactor hasta los ~ 90 w de potencia, y aún solapar con otro modo de operación hasta ~ 940 w ($\phi_n(t) = 8,4 \times 10^5$ nv., $\langle N_n \rangle = 4,2 \times 10^5$ ctas/seg.) El modo AC debería empezar a operar, por lo tanto, en ~ 90 w ó menos.

Nótese que la evolución total del RA3 es de $\sim 9 \frac{1}{2}$ décadas (se verificó en varios seguimientos de arranque), y el actual Canal de Marcha con las CIC está en condiciones de control desde algo más de 10^{-7} A ($\sim 7,1$ Kw).

4 - 2.4.- ERROR POR INTERFERENCIA GAMMA

Como se vió en 1-4.2., el error relativo que la interferencia gamma introduce en la medición del flujo neutrónico en los modos de operación DC y AC está dado por

$$\eta_{DC} = \frac{\langle N_X \rangle}{\langle N_n \rangle} \frac{\bar{q}_X}{\bar{q}_n} \quad \eta_{AC} \approx \frac{\langle N_X \rangle}{\langle N_n \rangle} \left(\frac{\bar{q}_X}{\bar{q}_n} \right)^2$$

* De confirmarse por mediciones futuras, en una instrumentación Campbelliana la electrónica debería corregir esta lectura en exceso.

Para calcularlos, se usarán los $\langle N \rangle$ del cuadro 4 - 5, y para las cargas, $\bar{q}_n = 0,20$ pCoul., $\bar{q}_\gamma = 1 \times 10^{-16}$ Coul.* ($\bar{q}_\gamma / \bar{q}_n = 5 \times 10^{-4}$, $(\bar{q}_\gamma / \bar{q}_n)^2 = 2,5 \times 10^{-7}$). Los resultados se dan a continuación en el Cuadro 4 - 6.

Cuadro 4 - 6:

$P(t)$	η_{DC}	%	η_{AC}	%
2,4 Mw	6,0	600	0,003	0,3
440 Kw	1,15	115	0,0006	0,06
55	1,35	135	0,0007	0,07
7,1	2,5	250	0,0013	0,13
940 w	8,5	850	0,0043	0,43
93	85	$8,5 \times 10^3$	0,043	4,3
12	380	$3,8 \times 10^4$	0,19	19
fondo	2500	$2,5 \times 10^5$	1,25	125

Nótese la diferencia a favor del modo AC que confirma lo discutido en 1-4.2.3. La ventaja del modo de operación en fluctuaciones es indiscutible.

* El error relativo no varía fundamentalmente si se toma $\bar{q}_\gamma = 4 \times 10^{-16}$ Coul.

CAPITULO 5 - CONCLUSIONES

Al nivel actual de desarrollo de este trabajo, descrito en los capítulos anteriores, pueden establecerse varias conclusiones, referidas a los dos aspectos que se comentaban en la Introducción.

- a - El detector CF en sí, en cuanto a la física del proceso de detección.
- b - Comportamiento del CF como sensor en un sistema de instrumentación campbelliano para control de reactores nucleares.

Sobre estos dos aspectos, pueden hacerse los comentarios que siguen.

Del Dispositivo Detector CF

Los resultados de las mediciones descritas en el Capítulo 3 demuestran que el método de análisis espectral de ruido es un importante complemento al de análisis del espectro de energías (de los fragmentos de fisión), para mejorar la comprensión de los procesos físicos involucrados en la detección de radiaciones con el dispositivo CF, permitiendo estimar cargas y tiempos de tránsito de portadores.

Desde un punto de vista práctico, el método permite mejores criterios de caracterización del detector; por ejemplo, en los aspectos que se citan a continuación:

- a - Control del depósito de convertidor y de su calidad por análisis del espectro de ruido del fondo alfa.
- b - Encontrar correlaciones entre los parámetros de diseño del CF, y magnitud de la carga colectada por evento detectado y tiempos de transporte.
- c - Medición de sensibilidad neutrónica del dispositivo utilizando flujos neutrónicos relativamente altos. Parecería prometedor el uso de la Columna Térmica del reactor, combinado con algún método por activación.

Al nivel actual quedan algunos puntos no bien aclarados todavía. Por

ejemplo, que el CF presente:

- i) mayor pendiente del fondo electrónico al detectar neutrones
- ii) aumento relativo de este fondo electrónico (a frecuencias altas) con el flujo neutrónico, que puede ser mayor a mayor frecuencia
- iii) pérdida de la diferenciación entre la zona de relajación iónica y el fondo electrónico, que aparentemente se da en campo mixto

Sería deseable, con equipo que permita analizar frecuencias más altas, verificar la frecuencia de corte electrónica experimental frente a distintas radiaciones, con dispositivos CF comerciales ó experimentales.

De la Instrumentación de Control en Rango Amplio

El rango dinámico del CF PT9 ensayado en el modo de fluctuaciones, no parece superar las 4 décadas con aceptable linealidad. Para un sistema Campbelliano para control de reactores, podrían recomendarse los siguientes criterios:

Rango de Frecuencias.— La banda pasante se elegiría de 100 KHz de frecuencia de corte inferior a 200 KHz de frecuencia de corte superior, para un buen solapamiento con el Canal de Arranque. Puede ser preferible elegirla más alta, pero no se dispone de información concreta más allá de los 150 KHz.

Rango Dinámico.— A las frecuencias recomendadas, en el modo de fluctuaciones se cubrirían 5 a 6 décadas de la potencia.

Linealidad.— La electrónica debería corregir cierta alinealidad que se observa con el PT9 a frecuencias altas. La verificación y ajuste sería experimental en el reactor. Pero deben realizarse experiencias más detalladas para confirmarlo.

Nivel de Señal.— Puede calcularse a partir del nivel de la señal de fluctuación medida en el RA3 a alta y baja potencia; lo determina el ancho de banda. Un Δf de ~ 100 KHz significa manejar señales provenientes del fondo gamma, al inicio del arranque, de ~ 3 nA en valor eficaz; hasta ~ 3 μ A a plena potencia, en la posición ensayada para el PT9 con $\phi_n(t) = 2,2 \times 10^9$ nv como flujo máximo. Un aspecto a tener en cuenta es, a bajos niveles de potencia, el ruido propio del preamplificador.

Posición del CF. - No puede suponerse que la posición ensayada sea la óptima. Podría ser conveniente ubicar el CF más cerca del núcleo, con lo que mejoraría la relación n/γ , pero el CF podría ver aspectos locales del comportamiento del núcleo lo que es inconveniente a los efectos del control del reactor.

Correlación Cruzada. - Esta técnica no puede ampliar el rango dinámico por debajo del fondo gamma inherente a la posición del CF en el reactor. Sólo puede reducir ruido por interferencia exterior que entrara al sistema, por ejemplo por la línea de conexión del CF, y ruido del preamplificador.

Estos son, solamente, criterios de orientación básica que permiten ensayar, con criterios más firmes, el diseño de los dispositivos CF y electrónica asociada.

APENDICE A - REACTOR NUCLEAR RA3

A - 1 .- DESCRIPCION GENERAL

RA 3 es un reactor de uranio enriquecido (90 % de U^{235}) y agua liviana como moderador y refrigerante, del tipo de pileta abierta, para producción de radioisótopos. Está instalado en el C.A.E., y su potencia nominal es de 3 Mw térmicos.

El tanque del reactor es un recipiente de sección circular de 3 metros de diámetro y 10 de altura, de acero inoxidable. Está rodeado por un blindaje de hormigón de algo más de 1 metro de espesor en todo su desarrollo, y algo mayor en su parte inferior.

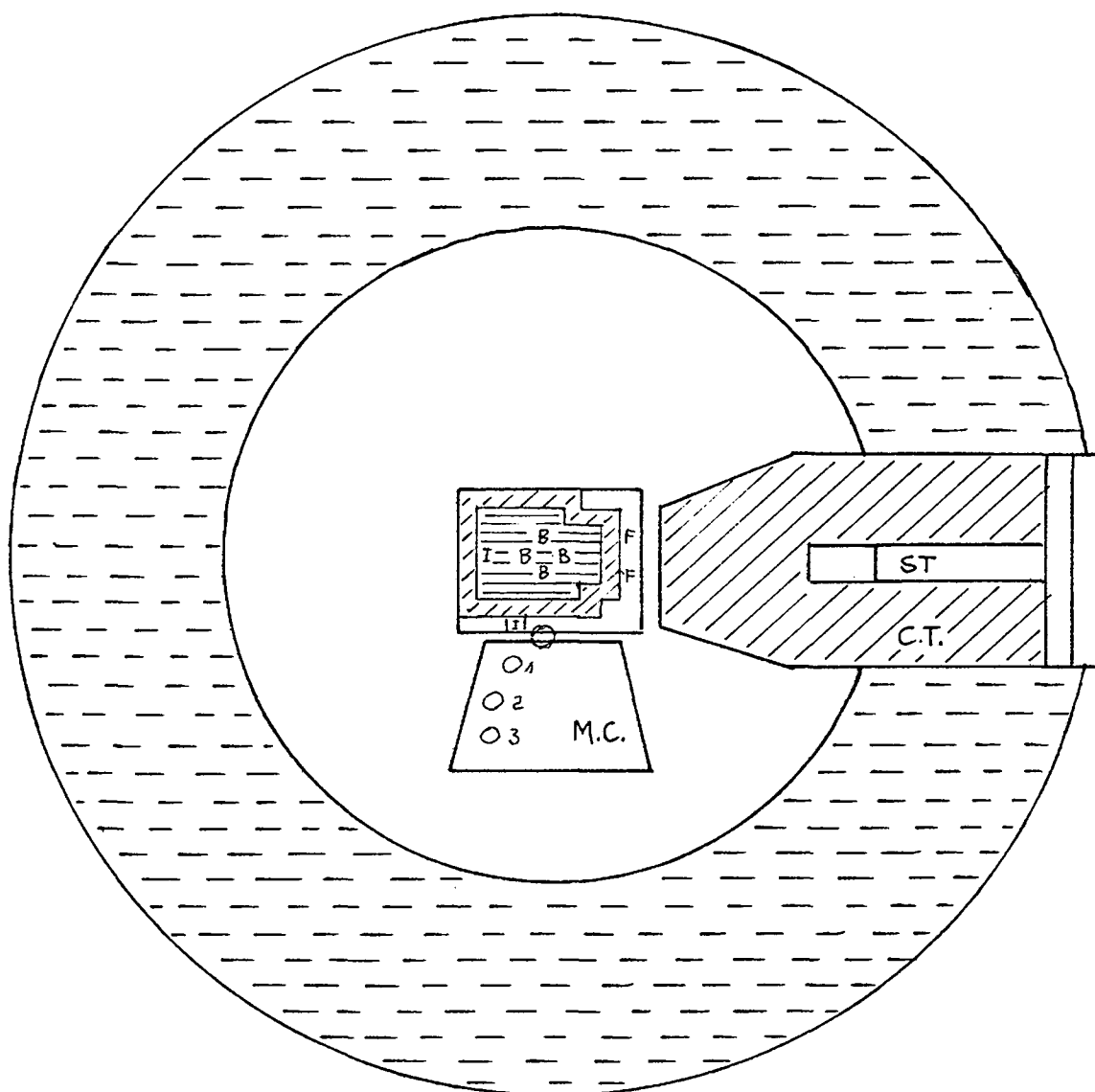
Cerca del fondo está ubicado el núcleo del reactor, bajo unos 8 metros de agua que actúan como blindaje biológico.

Un corte indicativo puede observarse en la figl. A - 1, con algún detalle del núcleo, mesa de cámaras y columna térmica.

El núcleo es una configuración aproximadamente rectangular de $\sim 6 \times 5$ cajas de elementos combustibles, reflejado con grafito en las cuatro caras. El control se efectúa por cuatro barras de control (dos de ellas de seguridad) constituidas por doble lámina de cedmio enfundado en acero inoxidable, que se introducen en las respectivas cajas de elementos combustibles de diseño especial para control.

Constituyen la Instrumentación de Control, en arranque, dos detectores CF (por redundancia) ubicados del lado exterior de los grafitos, que pueden ser alejados del núcleo en sentido vertical; en el canal de Marcha, dos CIC fijas a unos 60 cm. del borde exterior de los grafitos, con blindaje de plomo. Además, varias CI para seguridad.

Toda la electrónica nuclear está en la sala de comando. La conexión a los detectores es remota (30 a 35 metros de cable coaxial), con acoplamiento a transformador en los CF.



Grafito

Elementos Combustibles

B Barras de Control

F Contadores de Fisión

I Cajas de Irradiación

M.C. Mesa de cámaras

C.T. Columna Térmica

ST "Stringer"

Fig. A - 1.- Tanque del RA3: Núcleo, Mesa de Cámaras, Columna Térmica

A - 2 .- FACILIDADES DE IRRADIACION

RA3 posee, por diseño:

a - Conductos de irradiación tangenciales y radiales. Son conductos estancos que llegan a las cercanías del núcleo, y tienen acceso desde el exterior atravesando el blindaje de hormigón. Son inundables cuando están fuera de uso, y tienen tapones de blindaje en sus bocas de acceso.

b - Cajas de irradiación para muestras (y para producción), de pequeño tamaño. Dos de ellas están dentro del núcleo, y una está del lado exterior a los grafitos reflectores. Se manejan desde boca de tanque, con herramientas especiales.

c - Columna Térmica. Es una facilidad de irradiación con neutrones termalizados, y está constituida por un conglomerado de ladrillos de grafito que llegan hasta cerca del núcleo.

Se accede desde el exterior, removiendo una puerta blindada con parafina borada. La irradiación de muestras se hace colocándolas en lugares identificados en un cajón de $\sim 9 \times 9$ cm. de sección ("stringer" de la Columna Térmica) que puede deslizar por un alojamiento longitudinal practicado en la pared de grafito, y ser acercado hasta ~ 1 metro del borde del núcleo.

Un detalle del "stringer" puede verse en fig. A - 2. Está lleno con grafito en ladrillos removibles, donde existen puntos de medición identificados, de flujo conocido.

Es la facilidad que en este trabajo se denomina FNR.

d - Otra posibilidad obvia para irradiación en campo mixto (neutrónico más gamma), es alojar la muestra a irradiar en un contenedor hermético lastrado, y colgado de una soga desde boca de tanque acercarlo más ó menos al núcleo, según el flujo que se necesite.

Esta facilidad es la llamada FN γ en este trabajo.

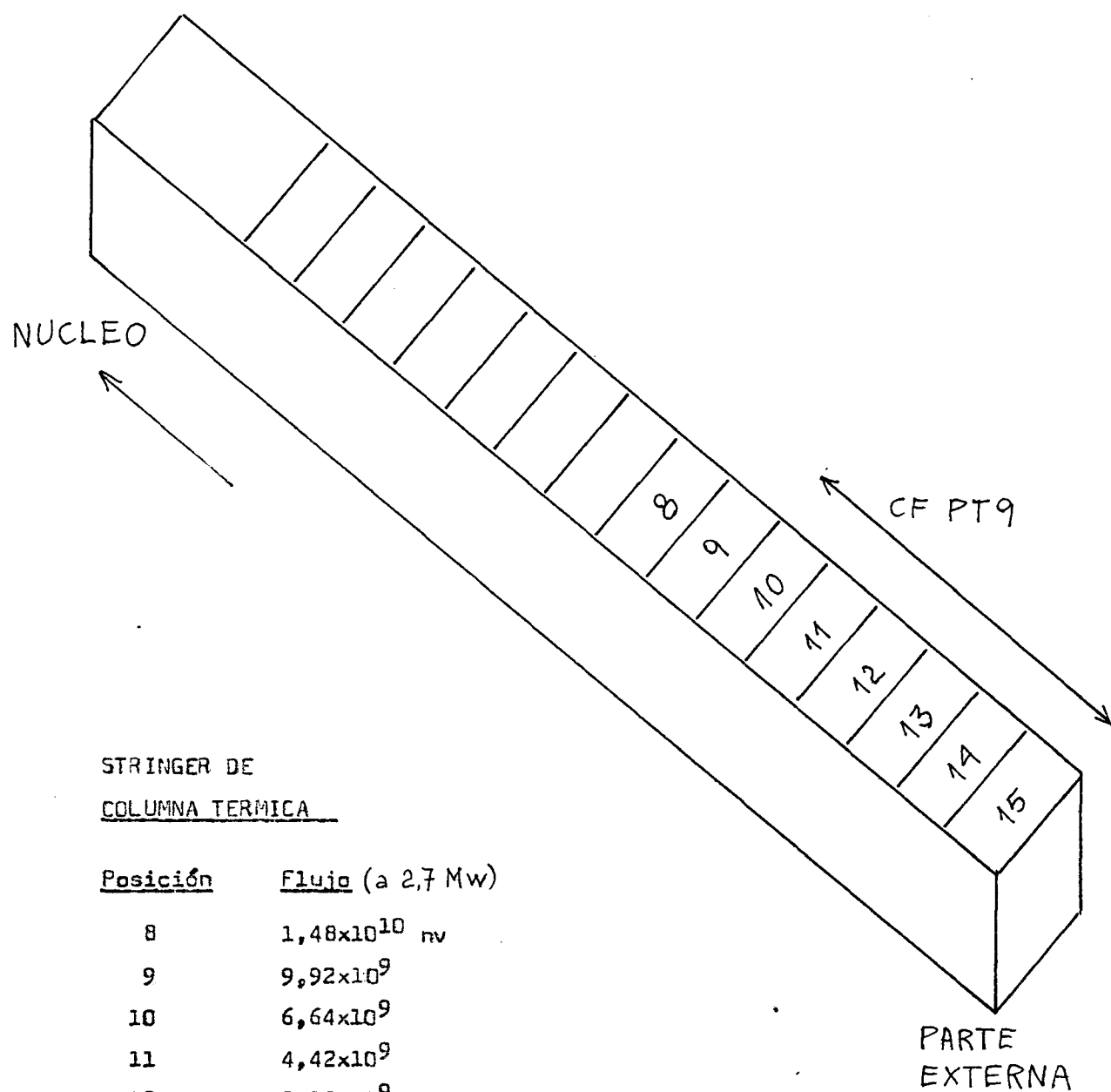


Fig. A - 2.- "Stringer" de Columna Térmica del RA3

A - 3 .- ESTIMACION DE FLUJO

A plena potencia, el flujo neutrónico en el núcleo se puede estimar en $\sim 10^{13}$ n/ cm² seg. En masa de cámaras, en los puntos identificados en la fig.A-1 a unos 15 cm. por encima del borde superior del núcleo, con el reactor trabajando a 2,4 Mw de potencia, se puede estimar

Puntos	Dist.el grafito	$\phi_n(t)$	$\dot{D}_g$
(1)	19 cm.	$1,6 \times 10^{11}$ nv.	$4,5 \times 10^6$ rad/h.
(2)	33	$2,2 \times 10^{10}$	3×10^6
(3)	48	$3,4 \times 10^9$	$1,7 \times 10^6$

APENDICE B - EQUIPO DE MEDICION

En esta parte se dan características según manual de

- i) los dos contadores de fisión usados en las mediciones
- ii) equipos utilizados en la cadena de espectrometría (modo P)
- iii) equipos utilizados para el análisis espectral de potencia (modo AC)

Formando parte del tercer punto se describe la fuente de ruido blanco usada para calibración del Sistema Analizador de Potencia (generador FOT).

B - 1 . - CONTADORES DE FISION

Como ya se comentó en 2-2.1., se usaron dos dispositivos: un FC 165/1000 CENTRONIC, fabricado por 20th. Century Electronics Ltd., y un CF PT9 construido por INVAP S.E.

El PT9 es un modelo construido por el fabricante en base a diseño y desarrollo propios de CNEA. Tiene mayor tamaño físico y más superficie de convertidor que el CENTR, con depósito en ánodo y cátodo; es un modelo de gran sensibilidad.

Se transcriben características de manual.

<u>Características constructivas</u>	<u>FC 165/1000</u>	<u>CF PT9</u>
Geometría	cilíndrica	cilíndrica
Diámetro	30	38 mm.
Longitud	203	410 mm.
Peso	0,4	0,85 Kgr.
Material estructural	inoxidable	inoxidable
Aislador pasante	metal-vidrio	metal-alúmina (Al ₂ O ₃ , SiO ₂)
Convertidor:		
tipo	U ₃ O ₈ (90% U ²³⁵)	U ₃ O ₈ (90% U ²³⁵)
área útil a la reacción nuclear	165	814 cm ² .
espesor del film de U ₃ O ₈	1	1 mg/cm ²
Gas de llenado	Ar + N ₂	97% Ar + 3% N ₂
Presión de llenado	2 (estim.)	3 (relat. a 20°C) Kgr/cm ²
Separación entre electrodos	-	3 mm.

<u>Características funcionales</u>	<u>FC 165/1000</u>	<u>CFPT9</u>	
Sensibilidad neutrónica	0,12	0,5	$\frac{\text{ctas/seg.}}{\text{n cm}^{-2}\text{seg}^{-1}}$
Corriente alfa	10^{-9}	3×10^{-9}	Amp.
Resistencia de aislación	10^{10}	10^{10}	Ohms
Plateau de polarización	300 - 800	300 - 1000	Volts
Capacidad	-	170	pF.
Queimado de convertidor (estimado por cálculo para reducción del 10 %)	-	3×10^{20}	n/cm ²
<u>Condiciones de Operación</u>			
Polarización	+400 (recom.)	+400 (recom.)	Volts
	+800 (máx.)	+800 (máx.)	Volts
Tiempo crecim.pulso(10% a 90%)	100	100	nseg.
Constante de tiempo (recomend.)	-	0,25	µseg.
Temperatura	-	+ 100(máx.)	°C
Humedad	-	40% (máx.recom.)	
Flujo neutrónico	10^6	10^6	n/cm ² seg.
Flujo gamma	-	10^6 (máx.recom.)	R/h.

B - 2 . - CADENA DE ESPECTROMETRIA

A continuación se da un listado de los equipos que integran la cadena de medición del CF operado en el modo de pulsos, y algunas de sus características.

I Preamplificador Sensible a Carga (PRE)

Modelo ORTEC 109 A

La forma del pulso de salida es tipo escalón, con tiempo de crecimiento (10% a 90%) de 20 nseg. en G x 1, y tiempo de decaimiento 50 µseg.constante.

Polaridad del pulso de salida: positivo con entrada negativa y viceversa.

Ganancia: x1 y x10 (típico en x1)

Carga sobre el detector: 22 MΩ

Impedancia de salida: ~100 Ω ajustable

Sensibilidad a carga: $3,38 \times 10^{12}$ V/Coul.($0,54 \times 10^{-6}$ V/electrón) en G x10

II Amplificador Conformador (AMP)

Modelo ORTEC 571

Forma del pulso de salida: gaussiana en todos los rangos.

Ganancia: continuamente variable desde x1 hasta x1500 (típico en G x50)

Tiempo de Conformación: 0,5 - 1 - 2 - 3 - 6 - 10 μ seg. (típico 1 μ seg.)
 Entrada: positiva ó negativa; máxima para buena linealidad 1 V. (típico +)
 Impedancia de entrada: $\sim 1000 \Omega$ acoplamiento DC
 Salidas: unipolar y bipolar, con $Z_o < 1$ y $Z_o = 93$ ohms (típico, unipolar)

III Generador de Pulsos (GP)

Pulser modelo ORTEC 480

Entrega señal tipo escalón de amplitud seleccionable.

Control de Calibración de altura de pulso

Atenuadores Calibrados: x2, x5, x10, x10

Polaridad del pulso: positiva ó negativa.

Salida: equivalente al rango 0 a 200 Mev. referida a detector de silicio.

IV Fuente de Alta Tensión (AT)

Modelo CANBERRA 3002

Suministra tensión continua entre 0 y 5000 Volts continuamente variable,
 a 40 mA. Polaridad positiva ó negativa.

V Analizador Multicanal (MC)

Modelo CANBERRA serie 30

Entradas: positiva, 0 a 8 Volts.

Frecuencia de reloj: 50 MHz.

Canales: 512, 1024 y 2048 seleccionables.

Uso típico en PHA (análisis por altura de pulso), en 1024 canales. Con salida a Registrador X - Y.

VI Registrador X - Y

Modelo HEWLETT PACKARD 7035 B

VII Equipo auxiliar: osciloscopio, tester, cables, etc.

B - 3 . - MEDICION DE FLUCTUACIONES

B - 3.1.- ANALIZADOR DE ESPECTRO DE POTENCIA

Para las mediciones del CF en el modo AC se usaron los equipos que se detallan a continuación.

I Preamplificador de Bajo Ruido (P113)

Modelo PAR 113 (Princeton Applied Research)

Es un amplificador de tensión. Alta impedancia de entrada con acoplamiento AC y DC. Ganancia $\times 10$ a $\times 10^4$ seleccionables, por puntos calibrados.

Respuesta a frecuencias:

a) corte en baja frecuencia (LF Roll off): 0,03 Hz a 1 KHz. en secuencia 1 - 3 - 10

b) corte en alta frecuencia (HF Roll off): 3 Hz. a 300 KHz. en secuencia 1 - 3 - 10

Uso típico en:

G x 50 (calibrado)

LF Roll off 30 Hz

HF Roll off 300 KHz.

Entrada AC

II Analizador de Frecuencia (P121)

Amplificador Lock-in/Detector de Fase PAR modelo 121

Fuó operado como Voltímetro Sintonizado en el rango de 150 Hz. a 150 KHz. (máximo), por puntos, con $Q = 6$.

Da indicación de Valor Eficaz Verdadero por lectura directa sobre instrumento en el panel frontal, desde $10 \mu V$ a 500 mV. a plena escala en secuencia 1 - 2 - 5. Constante de tiempo del filtro seleccionable entre 1 μ seg. y 100 seg., en secuencia 1 - 3 - 10.

Uso típico en la posición de controles:

Mode: Sel. Ext.

Meter/Monitor: Sig.

Cte. de tiempo: 1 seg. (típico)

Q : 6

Entrada: Sig. In.

Como equipos auxiliares, se usaron los siguientes:

III Electrómetro (multímetro electrométrico) (K)

Modelo KEITHLEY 610 C

IV Voltímetro de Valor Eficaz Verdadero (HP RMS)

Voltímetro Analógico HEWLETT PACKARD modelo 3400 A

Mide valor RMS(calor) para cualquier forma de onda. Respuesta 10 Hz a 10 MHz
Impedancia de entrada: alta ($10 M\Omega$ shuntado por $\sim 50 pF$)

B 3 - 2.- GENERADOR DE CALIBRACION (FOT)

B -3.2.1.- Descripción General

Se diseñó un generador de ruido aleatorio con un tubo fotomultiplicador excitado por una lamparita de linterna cuya iluminación era controlable.

En el Apéndice E se encontrará una discusión teórica del principio de funcionamiento de estos generadores. Por ahora basta decir que la salida en el ánodo de un fotomultiplicador que opere en esta forma, es una corriente continua a la que se superpone una fluctuación. Esta se debe a que el transporte de carga desde el fotocátodo y los dinodos es discreta puesto que lo son los electrones, generando ruido "shot" (ó de granalla).

Hasta frecuencias relativamente altas (varios MHz.), la densidad espectral de potencia es una constante (cuando se cumple esta condición se llama ruido blanca), y la fluctuación puede expresarse por

$$\langle i^2 \rangle = 2 e^2 \langle N_k \rangle G_F^2 = 2 e I_k G_F^2 = 2 e I_A G_F$$

donde e es la carga del electrón, $\langle N_k \rangle$ es la tasa media de electrones emitidos por el fotocátodo, I_k e I_A son la corriente continua de cátodo y de ánodo respectivamente, y G_F la ganancia de multiplicación del fotomultiplicador.

Esta ganancia G_F se debe a que al incidir cada electrón a un dinodo, tiene una probabilidad finita de "arrencar" electrones secundarios que se incorporan al haz de electrones que viajan hacia el siguiente dinodo ó al ánodo. Su valor es

$$G_F = \langle S \rangle^n$$

donde $\langle S \rangle$ es el valor medio de electrones secundarios emitidos por dinodo por cada electrón incidente, y n es el número de dinodos del fotomultiplicador.

Puede calcularse por

$$G_F = \frac{I_A}{I_k}$$

midiendo con un instrumento de continua la corriente de ánodo y cátodo.

Variar la iluminación de la lamparita significa excitar más ó menos el fotocátodo y modificar el valor medio $\langle N_k \rangle$ de electrones primarios; por lo tanto, cambia I_k . Esta variación controlada en la corriente de cátodo I_k puede

llegar a ser muy grande, y por este motivo la amplitud de ruido puede tener un rango de variación de varias décadas.

Se usó el fotomultiplicador EMI 9656 KB de diez dinodos. Se armó el circuito de fig. B-1, donde puede verse que se intercalaron dos conectores BNC a la salida del primer dinodo D_1 . En funcionamiento normal estos conectores están puenteados exteriormente por un cable coaxial corto; para medir corriente del cátodo I_K se levanta el puente y se mide corriente del primer dinodo a masa (sobre el BNC del D_1), con la fuente de AT a tensión reducida ($\cong 166$ V.)

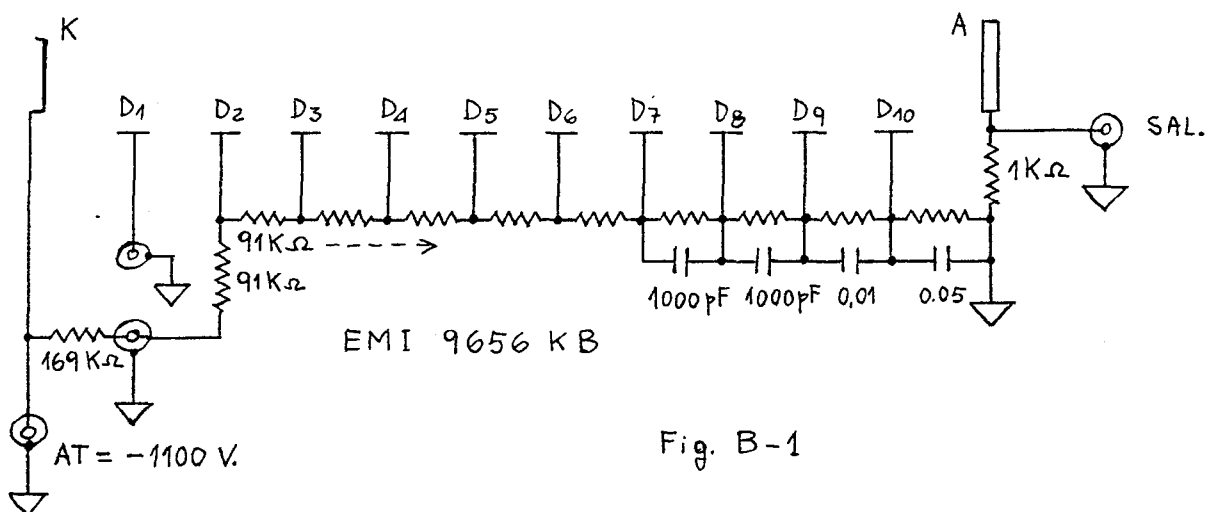


Fig. B-1

B - 3.2.2.- Calibración

Se midieron I_A e I_K con el Electrómetro (K) para distintos niveles de excitación luminosa, según gráfico de fig. B - 2a. Por cuadrados mínimos se calculó la pendiente $G_f = I_A/I_K$ de error cuadrático mínimo, resultando

$$G_f = (5.6 \pm 0.2) \times 10^5$$

(en la Tabla 13 se da el listado de valores medidos y detalles del cálculo).

Para determinar el ancho de banda se midió la tensión eficaz de ruido desarrollada sobre la resistencia de carga R_L con el Voltímetro de Valor Eficaz Verdadero (HP RMS) para cada valor de la corriente de ánodo I_A . Esta tensión eficaz medida sobre un ancho de banda de ruido equivalente B que determina el HP RMS, es la tensión V_{RMS} .

La tensión cuadrática media de ruido medida, es

$$V_{RMS}^2 = 2 e I_A G_f B R_L^2$$

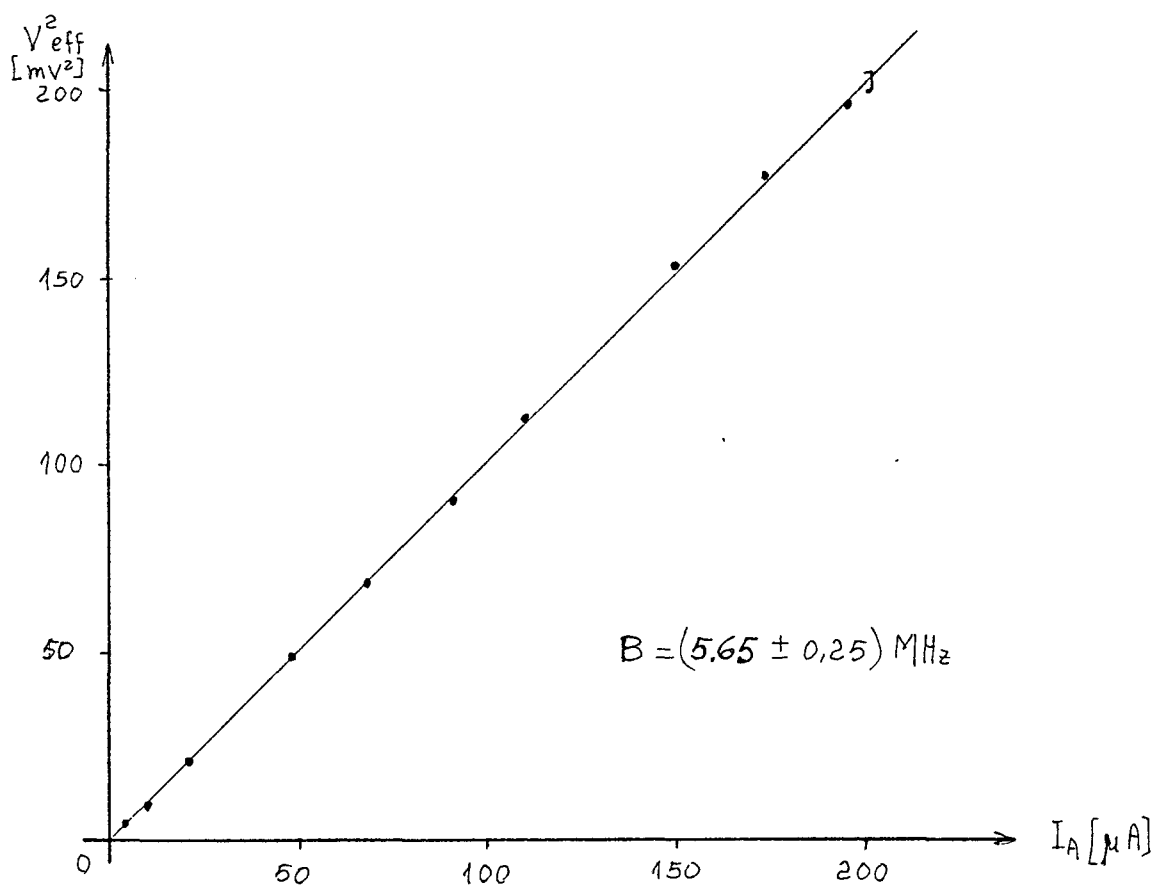
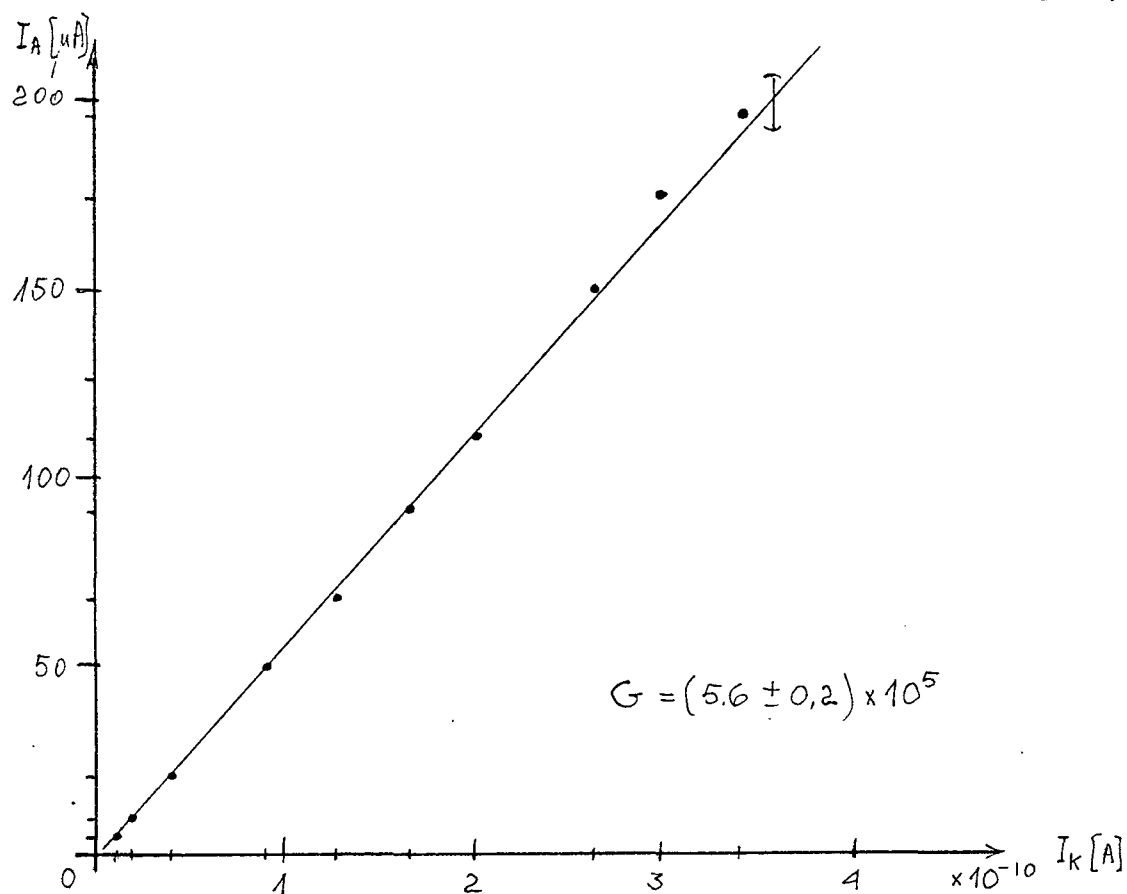


Fig. B - 2.- a - Ganancia del Fotomultiplicador (FOT)
b - Ancho de Banda de Ruido Equivalente del (FOT)

En el gráfico de fig. B - 2b se representan V_{RMS}^2 vs. I_A . Por cuadrados mínimos se calculó la pendiente $\frac{V_{RMS}^2}{I_A} = 2 \text{ a } I_A \text{ Gf B } R_L^2$ de error cuadrático mínimo, y sustituyendo valores de las constantes en la expresión se obtuvo

$$B = (5,65 \pm 0,25) \text{ MHz.}$$

El listado de valores y detalles del cálculo se encontrarán en la Tabla 14.

Este ancho de banda equivalente es sobradamente grande como para que en el rango de frecuencias explorado con el Analizador de Espectro de Potencias (hasta 150 KHz.), pueda aceptarse como generador de ruido perfectamente blanco.

La máxima tensión eficaz de ruido que se obtuvo es $V_{eff} = \frac{V_{RMS}}{\sqrt{B}} = \frac{14 \times 10^{-3}}{\sqrt{5,6 \times 10^6}} = 5,9 \text{ } \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$, para una corriente anódica $I_A = 196 \text{ } \mu\text{A}$ cercana al valor máximo permitido para el fototubo, que corresponde a una corriente de ruido $i_{eff} = \frac{V_{eff}}{R_L} = 5,9 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$. *

El rango dinámico (entre máxima y mínima amplitud de ruido) es del orden del que se previó teóricamente (4 a 5 décadas).

B - 3.2.3.- Fotomultiplicador y circuito

El fototubo de uso general EMI 9656 KB es de la serie de 2" de diámetro; algunas de sus características se detallan a continuación:

Dínodos	10 en persiana veneciana; Ca Sb en las superficies de emisión secundaria.		
Sensibilidad cátodo	mínima 50	típica 80	$\mu\text{A}/\text{lm.}$
id. ánodo	(Para $V_{K-A} = 1100 \text{ V}$)	típica 50	$\text{A}/\text{lm.}$
Tiempo de tránsito		típico 65	nseg.
<u>Tensiones y corrientes</u>	<u>máx.</u>	<u>típico</u>	
V ánodo-cátodo	2000	1100	Volts.
V cátodo-1er.dínodo	300	150	Volts.
V entre dínodos	300	100	Volts.
I de cátodo (pico)	0,3		μA
I de ánodo (media)	0,2		mA
I de ánodo (corriente oscura)	15	2	nA

* El flujo equivalente de neutrones que produce este mismo valor de corriente de ruido es de $\phi_n = \langle N \rangle / S_n \cong 2 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$, como puede calcularse por $\langle i^2 \rangle \cong 2 \bar{q}^2 \langle N \rangle B$ para una carga media $\bar{q} = 0,24 \text{ pCoul.}$

La alimentación $V_{K-A} = -1100$ volts es por fuente regulada de AT exterior. Las tensiones en los dinodos (las determina el divisor de tensión) fueron: $V_{K-D_1} = 166$ volts ($V_{D_1} = -934$ V.), y entre dinodos $V = 100$ volts.

Como carga de ánodo, una resistencia $R_A = 1\text{ K}\Omega$ con salida de señal por un conector BNC, sobre el que puede medirse directamente la caída de tensión y conocer por lo tanto la corriente de ánodo I_A .

APENDICE C.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

En este trabajo no se han incluido explícitamente ciertos puntos, no obstante haberse usado constantemente. Por ejemplo, demostraciones de teoremas (de Campbell, de Burgess, de Carson), y otros temas básicos. Pueden encontrarse en las referencias bibliográficas que en esta parte se detallan.

Teoremas de Campbell.- Su demostración se puede encontrar en las referencias (14) y (15). Una aplicación directa del teorema de la varianza puede encontrarse en (3) (pág.66/67 de la 2da.edición).

Teoremas de Burgess y de Carson.- Su demostración puede encontrarse en la referencia (14). Una aplicación del primero a emisión secundaria se encontrará en (11), y resulta inmediato deducir el caso especial de un tubo fotomultiplicador.

Densidad Espectral de Potencia.- Una introducción conceptual puede verse en (16). En (12) se encuentra una discusión específica para el caso de pulsos aleatorios de un diodo.

Instrumentación Campbelliana.- La referencia (18) describe un método usado en Gran Bretaña. Una discusión más amplia es la referencia (19); el autor ha desarrollado un sistema de Medición de Neutrones en Rango Amplio para la Cia. General Electric (USA) basado en estas ideas (GEAP 11094 y otros).

Detectores de Neutrones.- Sobre Contadores de Fisión, son útiles las referencias (6) y (7).

B I B L I O G R A F I A

Sobre Reactores Nucleares

- (1) A.Klimov: "Nuclear Physics and Nuclear Reactors" (MIR Publishers, 1975)
- (2) S. Glasstone: "Ingeniería de Reactores Nucleares" (Edit.Reverté, 1978)

Sobre Detectores de Radiación

- (3) W.J.Price: "Nuclear Radiation Detection" (McGraw-Hill, 1964)
- (4) G.F.Knoll: "Radiation Detection and Measurement" (John Wiley & Sons)
- (5) J.Duchene: "Contribution a l'Etude et a l'Utilisation des Chambres d'Ionisation pour le Controle des Reateurs Nucleaires" (CEA - R 2373, 1955; Tesis de Doctorado)
- (6) W.Abson, P.G.Salmon, S.Pyrah: "The Design, Performance, and Use of Fission Counters" (Proc. IEE, Vol.105, Part.B, 349-56, July 1958)
- (7) H.Böck: "Miniature Detectors for Reactor Incore Neutron Flux Monitoring" (Atomic Energy Review 14 1, 1976)
- (8) E.Matatagui, P.Mendoza, P.Sabaté Puigmal: "Detectores para Control de Reactores-Construcción y Ensayos" (IX Reunión Científica AATN, 1980)
- (9) E.Matatagui, P.Sabaté Puigmal, H.Giraut: "Ensayo sobre Detectores de Neutrones" (CNEA-INVAP SE, 1982)

Sobre Instrumentación Nuclear

- (10) P.W.Nicholson: "Nuclear Electronics" (J.Wiley, 1974)

Sobre Ruido Aleatorio

- (11) Van der Ziel: "Noise" (Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1954)
- (12) Davenport-Root: "An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise" (McGraw-Hill, 1958)
- (13) W.R.Bennett: "Electrical Noise" (McGraw-Hill, N.Y., 1960)
- (14) Van der Ziel: "Noise: Sources, Characterization, Measurement" (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1970)
- (15) M.R.Campbell, V.J.Francis: "A Theory of Valve and Circuit Noise" (JIEE, Vol.93, Part.III, (21), pp.45-52, January 1946)
- (16) W.R.Bennett: "Methods of Solving Noise Problems" (Proc. IRE, 44, 609-38, May. 1956)
- (17) B.M.Oliver: "Thermal and Quantum Noise" (Proc. IEEE, Vol.53, pp.436-54, May. 1965)

(sigue Bibliografía)

Sobre Instrumentación Campbelliana para Reactores

- (18) E.P.Fowler, R.M.Lewell: "The Use of the Current Fluctuations from a Neutron Detector with Logarithmic Amplifiers as a Measure of Neutron Flux Levels" (AEEW - R375, June 1964)
- (19) R.A.DuBridge: "Campbell Theorem - System Concepts" (IEEE Transactions on Nuclear Science, P.241-46, February 1967)
- (20) H.Weiß: "A Correlation Method for Neutron Flux Measurement in Nuclear Reactors" (ATKE 14, 72 (375-80), 1969)
- (21) P.Sabaté Puigmal, E.Matategui: "Técnica de Fluctuaciones para Medición de Flujo Neutrónico" (XI Reunión Científica AATN, 1983)

TABLA 1.-

Espectros de Potencia del Fondo Alfa (PT9, + 400 V)

Frec.	$\langle i^2 \rangle_{\alpha}$ [pA ² /Hz] (cinco determinaciones)					Promedios
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
200 Hz.	-	62,4	52,0	90,0	-	68,1
300	75,7	79,2	62,2	87,8	-	76,2
400	68,9	77,4	67,4	68,7	-	70,6
500	72,3	82,8	70,2	91,8	-	79,3
650	-	-	55,5	72,4	82,5	70,1
800	62,4	68,9	63,1	73,1	63,9	66,3
1 KHz	65,6	-	53,2	70,1	68,9	64,5
1,25	-	-	47,8	65,3	54,9	56,0
1,5	58,6	57,0	45,3	53,8	48,7	52,7
2	41,0	44,9	41,9	47,2	33,8	41,8
3	39,7	27,0	27,8	35,6	28,8	31,8
4	30,3	33,6	18,0	27,8	20,3	26,0
5	27,0	27,0	18,5	26,7	15,0	22,8
6,5	-	-	17,1	23,4	14,1	18,2
8	29,2	29,2	16,9	22,6	17,3	23,0
10	24,0	27,0	18,0	21,7	19,1	22,0
12,5	-	-	17,6	22,8	14,9	18,4
15	27,1	31,4	18,0	22,4	-	24,7
20	33,6	34,8	17,4	23,7	14,8	24,9
30	26,0	37,2	21,3	21,3	16,7	24,5
40	24,0	24,0	23,2	23,2	14,0	21,7
50	-	22,1	19,1	19,1	19,6	20,0
65	-	-	18,9	18,9	20,3	19,4
80	26,0	-	19,9	19,9	20,2	21,5
100	23,0	-	18,6	18,9	20,0	20,1
125	-	-	19,5	19,4	19,1	19,3
150	28,1	-	17,8	18,0	20,0	21,0

$I_{DC} \cong 5,0 \times 10^{-9}$ Amp.

(1), (2) y (5) fueron mediciones en Laboratorio

(3) y (4) fueron verificaciones del sistema de medición, en la FYM

TABLA 2 .-

Espectros de Potencia del Fondo Alfa (PT9, - 400 V)

Frec.	$\langle i^2 \rangle_{\alpha} [\text{pA}^2/\text{Hz}]$ (cinco determinaciones)					Promedios
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
150 Hz.	-	72,3	100,9	-	-	86,6
200	108,1	77,3	47,6	52,0	-	71,3
300	97,1	93,8	43,0	97,5	-	82,9
400	77,3	71,0	54,8	84,8	-	72,0
500	81,9	56,8	56,7	74,8	-	67,6
650	-	61,3	63,4	86,2	-	70,3
800	76,4	65,5	59,3	70,5	-	67,9
1 KHz	65,9	59,6	62,4	68,9	59,2	63,2
1,25	-	65,1	44,5	62,3	76,0	62,0
1,5	62,5	60,1	45,3	53,8	56,8	55,7
2	48,0	50,0	34,5	42,3	44,8	43,9
3	30,0	37,5	28,7	27,5	29,4	30,6
4	34,0	30,6	26,9	-	23,8	28,8
5	27,4	27,4	25,6	-	21,5	25,5
6,5	-	27,6	23,1	-	17,6	22,8
8	29,3	23,1	23,3	-	22,7	24,6
10	33,0	25,6	23,0	-	20,4	25,5
12,5	-	26,0	20,2	-	21,2	22,5
15	32,6	25,1	20,9	-	20,2	24,7
20	34,3	24,2	20,0	26,3	20,8	25,1
30	-	23,5	20,2	21,7	21,6	21,8
40	23,5	27,1	19,4	21,4	14,8	21,2
50	24,9	22,3	21,5	24,9	17,6	22,2
65	-	22,9	18,4	25,0	17,5	21,0
80	-	20,7	18,7	23,1	16,9	19,9
100	-	20,0	18,8	22,7	16,1	19,4
125	-	20,4	11,2	20,3	15,9	17,0
150	-	20,4	17,3	21,3	14,4	18,4

$I_{DC} \approx 5,0 \times 10^{-9}$ Amp.

(1) y (4) fueron mediciones en Laboratorio

(2) fué verificación del sistema de medición, en la FxM

(3) y (4) fueron verificación del sistema de medición, en la FNR

TABLA 3

Espectros de Potencia del Fondo Alfa (CENTR, $\pm$ 400 V)

Frecuencia:	$\langle i^2 \rangle_{\alpha}$ [pA ² /Hz]		
	Fondo	+ 400 V	- 400 V
200 Hz	112,7	31,0	31,0
300	63,1	31,3	31,3
400	38,1	38,1	45,5
500	35,6	37,7	41,7
650	36,7	46,6	46,6
800	36,1	44,5	44,5
1 KHz	40,9	44,2	44,2
1,25	43,6	45,1	46,7
1,5	46,2	44,8	42,8
2	44,8	42,6	42,6
3	50,7	38,7	36,2
5	50,2	38,1	31,2
6,5	56,4	33,5	28,1
8	57,2	31,9	24,4
10	58,2	32,5	23,6
12,5	57,3	30,4	24,4
15	57,6	30,1	23,0
20	59,2	28,2	21,3
30	62,7	28,3	20,9
40	66,7	27,2	21,1
50	63,3	18,3	13,4
65	60,0	24,5	18,8
80	59,8	26,0	19,8
100	59,6	25,7	20,7
125	60,8	25,5	20,8
150	61,6	26,1	20,3

$I_{DC} = 2,4 \times 10^{-9}$ Amp.

Fueron mediciones en Laboratorio

TABLA 4

Espectros de Potencia en la FNL (PT9, + 400 V)

Frec.	$\langle i^2 \rangle_n$ [pA ² /Hz]						
	$\phi_1(t) = 5,7 \times 10^3$ nv			$\phi_2(t) = 1,2 \times 10^4$ nv			
	(1)	(2)	Prom.	(1)	(2)	(3)	Prom.
150 Hz	249,0	182,4	216,0	713	540	-	627
200	386,0	114,2	250,0	790	618	614	674
300	225,0	251	238	655	538	799	664
400	233	204	219	666	485	686	612
500	273	235	254	620	575	649	615
650	207	248	228	-	532	572	552
800	223	270	247	620	525	536	560
1 KHz	243	265	254	615	532	476	541
1,25	222	241	232	-	458	512	485
1,5	205	224	215	538	414	492	481
2	157,3	223	190	437	335	417	396
3	111	128	119,5	328	261	275	288
4	91,3	99,6	95,5	299	196	207	234
5	90,2	86,3	88,3	259	194	182	212
6,5	74,8	76,0	75,4	-	170	160	165
8	75,1	68,5	71,8	213	160	156	176
10	73,2	61,7	67,5	207	151	146	168
12,5	66,5	96,7	81,6	-	150	136	143
15	60,1	73,6	66,9	170	126	135	144
20	57,6	50,3	54,0	139	112	120	124
30	43,0	43,7	43,4	137	105	109	115
40	47,4	46,6	47,0	142	110	113	122
50	46,9	46,0	46,5	137	98,5	106	114
65	42,0	42,3	42,2	-	93,9	96,7	95,3
80	40,5	40,8	40,7	125	90,0	88,7	101
100	42,7	35,9	39,3	102	96,7	81,2	93,3
125	42,4	34,0	38,2	-	78,2	69,9	74,1
150	39,8	32,2	36,0	88,4	67,4	67,3	74,4

$$I_{DC}(1) = 0,7 \times 10^{-9} \text{ Amp.}$$

$$I_{DC}(2) = 1,4 \times 10^{-9} \text{ Amp.}$$

TABLA 5

Espectros de Potencia en la FNL (PT9, - 400 V)

Frec.	$\langle i^2 \rangle_n [\text{pA}^2/\text{Hz}]$						
	$\phi_1(t) = 5,7 \times 10^3 \text{ nv}$			$\phi_2(t) = 1,2 \times 10^4 \text{ nv}$			
	(1)	(2)	Prom.	(1)	(2)	(3)	Prom.
150 Hz	-	-	-	712	522	1360	865
200	-	-	-	743	529	1180	819
300	249	655	452	703	597	975	758
400	231	524	378	666	572	955	731
500	246	513	380	624	646	897	722
650	274	493	384	-	599	918	759
800	259	494	377	610	570	833	671
1 KHz	234	447	341	649	529	730	636
1,25	241	426	337	-	496	738	617
1,5	196	366	281	555	438	645	546
2	163	299	231	466	354	541	454
3	123	216	169	356	283	398	346
4	84,3	99,6	92,0	328	212	256	265
5	73,1	101	87,0	298	190	234	241
6,5	77,4	76,2	76,8	-	185	199	192
8	65,7	72,1	68,9	242	161	178	193
10	76,5	57,9	67,2	229	163	161	185
12,5	71,3	58,4	64,9	-	161	167	164
15,	67,4	60,5	64,0	192	138	155	162
20	63,5	63,9	63,7	159	129	147	145
30	53,4	59,2	56,3	158	123	129	137
40	52,0	52,9	52,5	155	118	117	130
50	50,2	52,3	51,3	149	112	121	128
65	43,5	45,1	44,3	-	103	105	104
80	40,9	44,8	42,9	130	95,9	102	109
100	39,1	39,6	39,4	108	81,2	85,8	91,7
125	37,7	38,7	38,2	-	79,2	78,7	79,0
150	35,6	35,3	35,5	89,0	71,1	69,3	76,5

TABLA 6

Espectros de Potencia en la FNL (CENTR. ± 400 V)

Frecuencia	$\langle i^2 \rangle_n$ [pA ² /Hz]			
	AT = + 400 V		AT = - 400 V	
	$\phi_1(t)$	$\phi_2(t)$	$\phi_1(t)$	$\phi_2(t)$
150 Hz	-	-	-	85,7
200	33,8	71,9	33,8	71,9
300	22,1	89,4	35,9	73,7
400	47,9	94,4	33,6	98,3
500	51,0	101	44,0	94,2
650	40,4	82,6	36,7	103
800	28,5	87,2	34,5	79,9
1 KHz	42,5	102	42,5	94,5
1,25	46,7	94,8	30,9	92,5
1,5	37,6	95,3	37,0	93,3
2	36,3	84,7	30,5	80,2
3	28,3	79,5	27,6	67,7
4	30,2	69,0	21,2	53,2
5	24,9	57,2	19,3	45,7
6,5	30,2	60,9	15,0	35,3
8	24,8	51,8	14,3	32,4
10	14,2	44,9	11,4	24,8
12,5	16,3	41,2	7,9	19,3
15	17,0	36,4	7,3	18,0
20	11,7	34,1	7,3	17,6
30	12,4	20,3	6,3	15,1
40	-	17,1	-	-
50	10,0	26,0	4,2	14,8
65	10,7	23,7	4,3	11,9
80	9,0	22,5	5,4	11,0
100	10,5	23,0	5,0	10,2
125	9,9	20,4	3,5	9,6
150	7,3	18,7	4,6	10,7

$$\phi_1(t) = 5,7 \times 10^3 \text{ nv.}; \quad \phi_2(t) = 1,2 \times 10^4 \text{ nv.}$$

TABLA 7

Espectros de Potencia en la FxM y FxI (PT9, ± 400 V)

Frecuencia	$\langle i^2 \rangle_f$ [$\mu A^2/Hz$]			
	+ 400 V	- 400 V	- 400 V	- 400 V
	4000 rad/h.	7400 rad/h.	89 Krad/h.	0,43 Mrad/h.
150 Hz.	70,3	147	1080	-
200	31,7	151	1410	-
300	59,9	124	1550	6020
400	59,7	121	1480	6780
500	47,5	144	1730	7920
650	57,1	118	1620	7640
800	62,6	114	1460	7270
1 KHz	53,4	106	1450	7160
1,25	57,8	96,4	1230	6910
1,5	49,1	84,7	1240	5820
2	41,9	72,6	1030	4410
3	28,7	50,9	783	3320
4	24,5	47,1	661	2900
5	24,0	42,9	598	2770
6,5	23,8	43,0	580	2480
8	23,1	43,4	489	2520
10	23,9	40,0	491	2440
12,5	23,1	38,8	478	2370
15	21,2	36,5	512	2310
20	20,4	35,3	504	2180
30	20,2	39,9	543	2160
40	23,9	40,9	557	2030
50	18,1	34,7	543	2030
65	19,6	39,6	454	1960
80	16,6	32,4	440	1930
100	17,0	33,0	434	1870
125	18,0	32,8	428	1800
150	15,2	32,8	420	1680

 I_{DC} 0,27 μA 0,5 μA 8,6 μA 31,5 μA

TABLA 8

Espectros de Potencia en la FyM y FyI (CENTR, ± 400 V)

Frecuencia	$\langle i^2 \rangle_g$ [$\mu A^2/Hz$]			
	AT = + 400 V		AT = - 400 V	
	7400 rad/h	0,43 Mrad/h	7400 rad/h	0,43 Mrad/h
150 Hz	75,3	-	75,3	-
200	65,9	2900	-	1590
300	64,1	2680	71,5	2150
400	67,4	2550	52,6	2150
500	64,7	2850	56,5	2310
650	63,1	2530	63,1	2090
800	58,1	2520	61,0	1900
1 KHz	58,9	2520	55,2	1940
1,25	51,2	2550	51,2	2010
1,5	56,6	2470	42,2	1920
2	52,8	2320	47,8	1800
3	44,8	2170	38,0	1700
4	44,1	1980	32,0	1450
5	43,8	1850	28,6	1350
6,5	38,5	1680	25,5	1090
8	43,4	1600	23,2	974
10	32,0	1440	21,4	805
12,5	31,1	1360	18,9	740
15	30,9	1350	18,6	699
20	30,1	1400	16,8	750
30	28,8	1510	15,4	719
40	32,8	1350	18,4	767
50	26,0	1260	15,2	731
65	29,0	1190	16,0	539
80	26,1	1140	15,0	517
100	26,4	1150	14,3	521
125	29,6	1140	15,8	490
150	27,2	1100	18,2	501
I_{DC}	0,30 μA	10,8 μA	0,28 μA	9,7 μA

TABLA 9

Espectros de Potencia frente a Variaciones de Tensión (PT9 en la FYI, tensión
($\dot{\theta}_y = 0,43$ Mrad/h.)

Frecuencia	$\langle i^2 \rangle_x$ [$\mu A^2/Hz$]		
	- 600 V	- 400 V	- 50 V
200 Hz	6980	5260	2210
300	8290	5510	2240
400	8650	5920	2090
500	8840	6140	2090
650	8380	5950	1820
800	7510	5630	1620
1 KHz	7780	5510	1540
1,25	7200	4980	1570
1,5	7210	4630	1420
2	6130	3860	1360
3	5010	2890	1360
4	3950	2370	1250
5	3270	2150	1270
6,5	2910	2070	1310
8	2520	1940	1290
10	2420	1920	1290
12,5	2270	1830	1290
15	2080	1800	1210
20	1990	1880	1180
30	2040	1850	1020
40	2130	1630	1060
50	1890	1630	1050
65	1550	1580	966
80	1440	1520	905
100	1400	1500	907
125	1310	1450	875
150	1220	1370	777

TABLA 10

Espectros de Potencia frente a Variaciones de Tensión (PT9 en la FNR,
tensiones + y -)

($P(t) \approx 90 \text{ Kw.}$, $\phi_n(t) = 2,2 \times 10^8 \text{ nv.}$)

Frec.	$\langle i^2 \rangle_n [\mu A^2/Hz]$						
	-600 V	-400 V	-100 V	-50 V	+100 V	+400 V	+600 V
	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$
150 Hz.	6,97	5,88	3,48	2,17	3,56	6,66	6,66
200	6,19	5,43	3,20	1,74	3,20	5,65	5,43
300	6,57	5,79	3,00	1,56	2,86	5,53	6,75
400	7,16	6,09	2,98	1,58	2,86	5,67	6,09
500	6,43	5,60	2,63	1,41	2,44	5,76	5,90
650	6,10	5,46	2,16	1,28	2,23	5,46	5,59
800	6,12	5,35	2,10	1,24	2,02	5,52	5,94
1 KHz	5,58	4,98	1,71	1,07	1,62	4,74	5,48
1,25	5,42	4,54	1,58	1,06	1,44	4,38	5,24
1,5	5,22	4,12	1,46	1,02	1,33	4,02	5,08
2	4,56	3,39	1,39	0,99	1,27	3,31	4,41
3	3,75	2,62	1,27	0,92	1,17	2,43	3,53
4	2,93	2,11	1,19	0,94	1,06	1,96	2,81
5	2,58	1,93	1,19	0,88	1,03	1,78	2,36
6,5	2,23	1,90	1,18	0,92	1,09	1,67	2,39
8	2,10	1,79	1,15	0,90	1,09	1,60	2,02
10	1,96	1,73	1,17	0,92	1,04	1,53	1,84
12,5	1,85	1,69	1,14	0,86	1,04	1,49	1,66
15	1,82	1,61	1,16	0,87	1,03	1,52	1,73
20	1,85	1,69	1,19	0,91	1,14	1,54	1,75
30	1,75	1,64	1,17	0,90	1,15	1,54	1,64
40	1,66	1,63	1,17	0,88	1,11	1,52	1,61
50	1,73	1,57	1,14	0,86	1,05	1,48	1,58
65	1,65	1,52	1,09	0,84	1,03	1,45	1,56
80	1,59	1,48	1,05	0,81	0,99	1,41	1,55
100	1,53	1,43	1,00	0,79	0,98	1,40	1,50
125	1,48	1,35	0,98	0,75	0,94	1,35	1,44
150	1,45	1,32	0,95	0,71	0,90	1,31	1,39

TABLA 11

Serie de Espectros de Potencia del PT9 en la FNR

($\phi_n(t) = 5,5 \times 10^9$ nv. para $P(t) = 2,7$ Mw (referencia))

I_μ	24 μ A	9,0	3,0	0,9	0,4	0,2	0,071
P(t)	2,4 Mw	900 Kw	300	90	40	20	7,1
$\phi_n(t)$	$5,9 \times 10^9$ nv.	$2,2 \times 10^9$	$7,4 \times 10^8$	$2,2 \times 10^8$	$9,8 \times 10^7$	$4,9 \times 10^7$	$1,8 \times 10^7$
I_{DC}	405 μ A	154	50,0	15,4	7,0	3,4	0,95
Frec.	$\langle i^2 \rangle_n$ ($\mu A^2/Hz$)						
150 Hz.							$4,47 \times 10^5$
200							4,14
300							3,85
400							3,83
500	140×10^6	$55,3 \times 10^6$	$17,4 \times 10^6$	$5,6 \times 10^6$	$2,79 \times 10^6$	$1,15 \times 10^6$	3,78
650	123	52,0	16,1	5,46	2,36	1,14	3,88
800	127	53,3	17,2	5,35	2,28	1,24	3,78
1 KHz							3,88
1,25							3,47
1,5							3,15
2							2,70
3							2,21
4							1,73
5	57,4	21,0	6,70	1,93	0,83	0,44	1,55
6,5							1,44
8	52,0	19,0	6,18	1,79	0,76	0,38	1,38
10							1,31
12,5							1,31
15							1,22
20	47,5	18,0	5,80	1,69	0,73	0,35	1,19
30							1,01
40	45,5	15,9	5,49	1,63	0,69	0,34	1,10
50							1,13
65							1,08
80	41,8	14,9	5,12	1,48	0,63	0,31	1,05
100							0,99
125							0,94
150							0,88

TABLA 12

Serie de Espectros de Potencia del PT9 en la FNY

($\phi_n(t) = 2,2 \times 10^9$ nv para $P(t) = 2,4$ Mw (referencia, por cálculo))

I_μ	24 μ A	4,4	$5,5 \times 10^{-7}$ A	$7,1 \times 10^{-8}$	$9,4 \times 10^{-9}$	$9,3 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-10}$	Fondo
$P(t)$	2,4 Mw	440 Kw	55	7,1	940 w	93	12	1 mw
$\phi_n(t)$	$2,2 \times 10^9$	$4,4 \times 10^8$	$5,4 \times 10^7$	$6,4 \times 10^6$	$8,4 \times 10^5$	$7,6 \times 10^4$	$1,7 \times 10^4$	$2,6 \times 10^3$
I_{DC}	1,5 mA	94 μ A	12,6	2,2	0,81	0,67	0,65	0,65
Frec.	$\langle i^2 \rangle_{n+\gamma} [pA^2/Hz]$							
500 Hz	$7,8 \times 10^7$	$1,64 \times 10^7$	$2,26 \times 10^6$	$2,29 \times 10^5$	31200	3260	763	171
650	8,54	1,84	2,19	2,58	34200	3070	781	195
800	8,71	1,91	2,29	2,70	34800	3600	741	301
KHz		$\times 10^6$	$\times 10^5$					
5	5,63	9,23	9,94	1,23	15000	1660	279	51,6
8	5,12	8,36	9,05	1,02	12200	1430	214	43,2
20	4,53	7,79	7,99	$8,35 \times 10^4$	10000	1200	171	23,1
40	4,21	7,03	6,36	6,55	7590	856	107	26,9
80	3,69	5,98	4,59	4,76	5360	587	65,1	15,4
100	3,54	5,53	4,02	4,17	4840	512	56,0	12,8
150	3,44	4,51	3,44	3,37	4100	413	52,0	16,4

TABLA 13

Ganancia del Fotomultiplicador (FOT)

$I_A \text{ [A]}$	$I_k \text{ [A]}$	$I_A I_k \text{ [A}^2\text{]}$	$I_k^2 \text{ [A}^2\text{]}$	$G = \frac{I_A}{I_k}$	$\Delta G = G - \bar{G}_m$	$(\Delta G)^2$
$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-10}$	$\times 10^{-16}$	$\times 10^{-20}$	$\times 10^4$	$\times 10^5$	$\times 10^{10}$
4,1	0,1	0,41	0,01	41	- 1,54	2,37
8,9	0,177	1,58	0,03	50,3	- 0,61	0,37
20	0,39	7,8	0,15	51,3	- 0,51	0,26
48	0,905	43,4	0,82	53,0	- 0,34	0,12
67,2	1,28	86,0	1,64	52,5	- 0,39	0,15
90,5	1,66	150,2	2,76	54,5	- 0,19	0,036
109	2,0	218	4,0	54,5	- 0,19	0,036
150	2,66	399	7,08	56,4	0	0
174	3,0	522	9,0	58	+ 0,16	0,026
196	3,42	670,3	11,7	57,3	+ 0,09	0,008
		$\Sigma = 2098,7$	$\Sigma = 37,2$			$\Sigma = 3,38$

$$\bar{G}_m = \frac{\sum I_A I_k}{\sum I_k^2} = \frac{2098,7 \times 10^{-16}}{37,2 \times 10^{-20}} = 5,64 \times 10^5$$

$$\text{error cuadrático medio: } m = \sqrt{\frac{\sum (\Delta G_i)^2}{n}} = 0,58 \times 10^5$$

$$\text{error medio del promedio: } E = \frac{m}{\sqrt{n-1}} = 0,2 \times 10^5$$

$$G = (5,6 \pm 0,2) \times 10^5$$

TABLA 14

Ancho de Banda de Ruido Equivalente del (FOT)

$$V_{RMS}^2 = 2 e I_A R^2 G B \therefore K = 2 e R^2 G B = \frac{V_{RMS}^2}{I_A}$$

$V_{RMS} [V]$	$I_A [A]$	$V_{RMS}^2 [V^2]$	$V_{RMS}^2 I_A$	I_A^2	K	$\Delta K = K - \bar{K}_m$	$(\Delta K)^2$
$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-12}$	$\times 10^{-12}$			$\times 10^{-6}$
2,04	4,1	4,16	17,06	16,8	1,015	+ 0,003	9
3,0	8,9	9,0	80,1	79,2	1,011	- 0,001	1
4,5	20,0	20,3	406	400	1,015	+ 0,003	9
6,97	48	48,6	2333	2304	1,013	+ 0,001	1
8,2	67,2	67,2	4516	4516	1,0	- 0,012	144
9,5	90,5	90,3	8172	8190	0,998	- 0,014	196
10,6	109	112,4	12252	11881	1,031	+ 0,019	361
12,4	150	153,8	23070	22500	1,025	+ 0,013	169
13,3	174	176,9	30781	30276	1,017	+ 0,005	25
14,0	196	196	38416	38416	1,0	- 0,012	144
			$\Sigma = 120043$	$\Sigma = 118579$			$\Sigma = 1059$

$$\bar{K}_m = 2 e R^2 G B = \frac{\Sigma V_{RMS}^2 I_A}{\Sigma I_A^2} = \frac{120043}{118579} = 1,012$$

$$\text{error cuadrático medio: } m = \sqrt{\frac{\Sigma (\Delta K)^2}{n}} = 0,0103$$

$$\text{error medio del promedio: } E = \frac{m}{\sqrt{n-1}} = 0,0034$$

$$K = 1,012 \pm 0,0034$$

$$G B = \frac{1,0120 \pm 0,0034}{2 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 10^6} = (3,16 \pm 0,02) \times 10^{12}$$

$$B = \frac{(3,16 \pm 0,02) \times 10^{12}}{(5,6 \pm 0,2) \times 10^5} = (5,65 \pm 0,25) \times 10^6$$