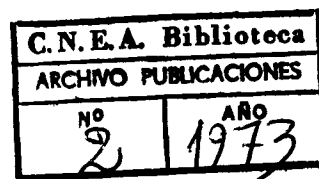


CAB/1973/5

ESTUDIO Y DESARROLLO DE UN BLANCO PARA LA PRODUCCION

DE NEUTRONES CON ACELERADOR LINEAL

M.J. Abbate^(*) y J.V. Lolich

Div. Neutrones y Reactores
Centro Atómico Bariloche
Instituto de Física "Dr. José A. Balseiro"
Comisión Nacional de Energía Atómica
Universidad Nacional de Cuyo
Bariloche, Argentina

RESUMEN:

Se ha estudiado y desarrollado un blanco pesado a fin de obtener una fuente de neutrones de alta eficiencia a partir del haz pulsado de electrones del acelerador lineal del CAB (LINAC).

Fueron estudiadas las propiedades y espesores adecuados de distintos materiales con respecto a la producción de neutrones y la posibilidad de aprovechar los que normalmente se pierden mediante un conveniente reflector.

El diseño del blanco incluyó un sistema de refrigeración por agua forzada, calculado para disipar hasta 2 Kw de potencia media. Elegido el material (Fansteel), se realizaron mediciones de la producción y distribución angular de neutrones para distintos espesores del mismo, lo cual permitió determinar la cantidad de neutrones producidos, por electrón de este material.

El efecto del reflector fue modificar la distribución angular de los neutrones del blanco de modo de aumentar la intensidad en el punto de interés. Este resultó ser del 34%.

Además fueron determinadas las distribuciones angulares en función de la corriente y energía del LINAC y se verificó que la potencia entregada al blanco se disipaba convenientemente.-

(*) Ejército Argentino

Diciembre 1973
Bariloche - Argentina

I N D I C E

1 - Introducción	pág. 2
2 - Eficiencia para producción de neutrones	" 2
3 - Reflector	" 5
4 - Disipación de potencia	" 5
5 - Técnica experimental	" 6
6 - Resultados	" 8
7 - Agradecimientos	" 10
Bibliografía	" 11

Tabla 1: Condiciones de diseño

Figuras:

- 1 - Energía entregada y producción de neutrones por electrón.
- 2 - Dispositivo experimental.
- 3 - Diferencias de temperaturas.
- 4 - Dependencia angular vs. espesor.
- 5 - Intensidad por dirección vs. espesor.
- 6 - Dependencia angular con reflector.
- 7 - Intensidad por dirección con reflector.

1 - Introducción:

La investigación de campos neutrónicos en distintos materiales, en función de variables espaciales y angulares, requiere contar con fuentes pulsadas de neutrones muy intensas. Estas pueden lograrse mediante aceleradores lineales cuyo haz de electrones sea de alta energía y corriente media, combinados con adecuados blancos. Si se toman como hipótesis de trabajo las características de un acelerador dado, el problema reside en el diseño nuclear, térmico y geométrico del blanco que proporcione la mayor cantidad de neutrones en el punto de interés.

El presente trabajo constituye una extensión de estudios y desarrollos de blancos realizados con anterioridad, /10/ y /11/, y ha comprendido al estudio de: la eficiencia de producción de neutrones, la disipación de la potencia que se entrega en forma de calor y el uso del fenómeno de reflexión para aumentar la intensidad en direcciones determinadas.

2 - Eficiencia para producción de neutrones.

a) - Generalidades:

Por este método se producen neutrones a través de una doble conversión, los electrones entregan su energía en forma de radiación de frenamiento en el campo de los núcleos de un material pesado y ésta, produce neutrones por medio de reacciones (γ , n), fundamentalmente .

Existen varios antecedentes acerca del diseño de blancos para este especial propósito /1/ a /10/, que incluyen distintos tipos de concepciones y materiales. En particular, los blancos en uso con el acelerador lineal del Centro Atómico Bariloche /11/, consisten en simples geometrías de uranio natural, tungsteno sinterizado y "fansteel" (nombre comercial de la aleación 89W7Ni4Cu), todos refrigerados con aire.

La experiencia con ello puede resumirse de la siguiente forma:

- i - Uranio natural: este blanco de alta eficiencia, presentó problemas de temperatura y alta actividad aún utilizado a baja potencia media (100 W), por lo que debió ser encapsulado y refrigerado con aire forzado. Actualmente en desuso.
- ii - Tungsteno y fansteel: de razonable eficiencia, fueron utilizados satisfactoriamente con refrigeración a aire forzado, pero en las nuevas condiciones del linac han presentado serios peligros de deterioro por temperatura. Ante esto, se ha replanteado el problema para ciertas condiciones de diseño, algo más exigente que las de uso actual, las que se indican en tabla 1.

b) - Producción de radiación de frenamiento y neutrones:

Estas propiedades han sido discutidas ampliamente en anteriores trabajos /10/ y /11/ para distintos materiales, lo que unido a la experiencia acumulada dá por resultado la elección del fansteel como material para el nuevo blanco.

Con respecto a sus otras características, se deberán hacer algunas acotaciones acerca de la intensidad obtenible.

La figura de mérito fundamental de un material es la cantidad de neutrones que pueden obtenerse por cada electrón de una dada energía que incida sobre él, esta magnitud incluye a la doble conversión.

En general, son particularmente convenientes los materiales de alto número atómico ya que:

- a. es mayor la cantidad de energía que los electrones entregan en forma de radiación que de ionización. La sección eficaz para el primer proceso es proporcional a Z^2 , aproximadamente.
- b. los espesores requeridos son menores ya que la longitud de radiación también sigue una ley como la citada anteriormente.
- c. los umbrales para la reacción (γ, n) son del orden de los 6MeV, y como el espectro de radiación de frenamiento se extiende hasta la energía de los electrones, una gran parte de él es aprovechable.

Según datos de la bibliografía citada, la variación de esta magnitud con el espesor, para el tungsteno, sería (ver figura 1)

Espesor en longitud de radiación (X_0) (1)	Neutrones por electrón (fn) /9/		Porcentaje de energía entregada
	30 MeV (2)	25 MeV (2)	
1	1.54	1.32	63
2	2.92	2.05	86
3	4.12	2.64	95
4	5.15	3.08	98
5	5.85	3.26	99.3
6	6.40	3.34	99.7

(1) X_0 (Tungsteno) = 0.34 cm

(2) los valores deben multiplicarse

X_0 (Fansteel) = 0.36 cm

por 10^{-3}

Si se analiza la entrega de energía por los electrones, un blanco de $3X_0$ ya implica el 95%, pero observando la cantidad de neutrones por electrón obtenibles, un aumento a $4X_0$ implica un 25% más de eficiencia (o un 17% para 25 MeV). No son aconsejables mayores espesores ya que no implican aumentos muy significativos en tanto que originarán una deformación en la distribución angular de los neutrones por efecto de atenuación en el propio blanco.

Es ilustrativo mostrar la intensidad de fuente a que corresponden estos valores, la que suele indicarse de alguna de las siguientes formas.

a. Neutrones por pulso: (n/pulso)

$$I_p = fn \times i \times dt$$

siendo: i la corriente media.-

dt el ancho del pulso

b. Producción durante el pulso: (n/seg).

$$I_d = I_p/dt$$

c. Producción media por unidad de tiempo, es la más representativa y comparable con fuentes estacionarias: (n/seg)

$$I_m = I_p \times f_r$$

siendo: f_r la frecuencia de repetición del linac.

Para el tungsteno, en las condiciones dadas en tabla 1, resultaría:

Espesor	I_p	I_d	I_m
2 Xo	1.5×10^6	1.2×10^2	3.0×10^8
3 Xo	2.1 "	1.7 "	4.2 "
4 Xo	2.6 "	2.2 "	5.2 "

3 - Reflector:

El blanco es ubicado, normalmente, frente a una de las caras del recipiente que contiene al sistema en estudio, de manera que sólo los neutrones que son emitidos dentro de un ángulo sólido de abertura 90° , aproximadamente, ingresan en él.

Se diseñó un reflector para neutrones rápidos que permita reorientarlos dentro del citado ángulo; se construyó de acero común, uno de los materiales más efectivos, y su espesor se determinó considerando que el camino libre medio de "scattering" elástico es de 5.4 cm a 2 MeV.

4 - Disipación de potencia:

El empleo de haces de electrones de alta potencia, para este caso se ha tomado el valor de 2 Kw, crea el problema de la disipación de la parte que se entrega en forma de calor. Su tratamiento completo ha tenido en cuenta varios aspectos, los que fueron analizados individualmente y en sus interrelaciones y

compromisos, como ser: origen de las fuentes de calor, propiedades de los materiales a emplear, potencia específica, potencia total entregada y su distribución, efecto de los pulsos, deformación térmica, calentamiento del material, transferencia de calor al refrigerante y caída de presión del refrigerante.

Las principales conclusiones fueron:

- a. de la potencia del haz un alto porcentaje se entrega en forma de calor (ionización). Del orden del 43% a 30 MeV y del 52% a 25 MeV, para un blanco de plomo.
- b. para facilitar la circulación y efecto del refrigerante, el blanco consta de dos partes de fansteel de 5 cm de diámetro por 2Xo de espesor cada una; separadas entre sí y de las tapas del encapsulado de acero inoxidable, por espacios de 2 mm. Las tapas del encapsulado son de 0.1 cm de espesor.
- c. la potencia específica media en las condiciones de diseño alcanza a 905 W/cm^3 para el caso de 3Xo y se reduce a 670 W/cm^3 para 4Xo de espesor.
- d. la potencia máxima, durante el pulso, alcanza hasta varios Mw, pero su efecto no implica grandes variaciones de temperatura dada la corta duración del mismo.
- e. el caudal de refrigerante (agua) a utilizar, para no superar una cierta temperatura máxima pero suficiente como para obtener una adecuada transferencia de calor en las condiciones más desfavorables, resultó ser de 11 litros/minuto. Fue obtenido separadamente con dos modelos: de tubería recta /5/ utilizando un diámetro hidráulico o equivalente, y de placa /6/; con datos de /12/ a /15/.

6 - Técnica experimental:

La parte experimental consistió fundamentalmente en la medición de la intensidad relativa de neutrones producidos en el blanco en función del ángulo en que son emitidos, para distintos espesores y con y sin reflector adicionado en

iguales condiciones de irradiación. Además, se observó la variación de intensidad acusada por un detector colocado al final del tubo de vuelo de 17 m.

Se ubicaron 3 detectores, figura 2, tipo cámara de fisión de U^{235} en bloques de moderador blindado, en las direcciones de 0° , 45° y 90° con el haz de electrones, y un detector de vidrio de litio en el tubo de vuelo que hace las veces de monitor.

Con un conveniente modelo puede efectuarse la integración a fin de obtener la intensidad total, por lo menos en un ángulo sólido de $8/3 \pi$. La parte restante, inaccesible prácticamente para los detectores, es la de menor intensidad y se presume presentará menores variaciones.

La respuesta de los detectores en cada condición, fue analizada en altura de pulsos y temporalmente a fin de sustraer fondo y asegurarse no estar en una zona temporal de saturación. Además se determinó la relación entre sus eficiencias de detección.

Como verificación se midió la intensidad total del blanco a 24,7 MeV en función de la corriente media obteniéndose la relación lineal esperada, dentro de la precisión de los parámetros (6%).

Las condiciones de referencia fueron fijadas en: energía: 24.7 MeV, corriente media 1.0 micro A y frecuencia de repetición 100pps.

Se midieron las temperaturas de entrada y salida del refrigerante con termocuplas de cobre-constantan, en función del caudal y de la potencia del haz, pero a energía constante por cuanto la fracción entregada en forma de calor depende de ella.

El circuito de medición incluyó discriminación de fondo por altura de pulso y temporal para igualar los tiempos muertos de los detectores, ésta se fijó midiendo los decaimientos de los moderadores de manera tal de habilitarlos en iguales lapsos y que estos estén en la zona de variación exponencial o sea evitando la de saturación.

6 - Resultados:

a - Disipación de potencia:

Si se analizan las diferencias entre temperaturas de salida y de entrada del refrigerante, se observa que (figura 3):

- i - guardan una relación lineal.
- ii - equivalen tanto para uno como otro caudal utilizado, a iguales cantidades de potencia entregada, las que son sistemáticamente menores que las calculadas. Esto es coherente con lo dicho de que no toda la potencia del haz se entrega como calor.
- iii - cuantitativamente, la diferencia anterior, independientemente del caudal y de la potencia, significa que el 66% de ésta es transformada en calor.- Según las estimaciones para el plomo, que se tomaron como base con datos de /4/, resulta que para 25 MeV el 48% de ésta es irradiado, luego:

$$\frac{\text{energía irradiada en plomo}}{\text{energía irradiada en fansteel}} = \frac{48}{33} = 1.46$$

Por su parte, la fracción de energía irradiada es proporcional a la sección eficaz respectiva y ésta al número atómico al cuadrado, /7/, asumiendo que el fansteel tiene un número atómico efectivo de 69, obtenido de su composición, resulta que la relación anterior debería ser:

$$\frac{(82)^2}{(60)^2} = 1.43$$

que guardan muy buen acuerdo. Todos resultados que aseguraron una adecuada disipación de la potencia entregada.

b - Producción de neutrones en función del espesor:

Se realizaron mediciones con blancos de espesores: 2Xo (FII), 3Xo (FIII) y 4Xo (FIV); irradiados en las condiciones de referencia.

- i - Dependencia angular: figura 4, se observó que la distribución tiende a ser isotrópica al aumentar el espesor, la mayor variación de intensidad se produce a 90° y luego a 45° . Si se representan directamente las intensidades por dirección, figura 5, puede verse la ganancia de intensidad con el espesor del blanco.
- ii - Intensidad total: las intensidades totales integradas guardaron las siguientes relaciones:

FII	1.00
FIII	1.31
FIV	1.53

valores que tienen perfecto acuerdo con los que pueden inferirse de los de W.C. Barber/3/ asumiendo nuevamente que el fansteel tiene un número atómico efectivo de 69, ya que son: 1.00, 1.32 y 1.51 respectivamente. Luego, desde este punto de vista puede considerarse a este material con ese número atómico efectivo con lo que su producción de neutrones por electrón a 25 MeV sería de: 0.00191 para 2Xo; 0.00252 para 3Xo y 0.00288 para 4Xo.

- iii - Ganancia en el detector de litio: las relaciones obtenidas en éste fueron de :1.00, 1.20 y 1.41.

c - Efecto del reflector:

Fueron comparadas mediciones con y sin reflector en iguales condiciones de irradiación, con los siguientes resultados:

- i - Dependencia angular: figura 6, se nota una marcada diferencia a 90° que es la zona cubierta por el reflector; las variaciones de intensidad por dirección indicaron que se ha logrado el efecto deseado de reflejar los neutrones dentro del ángulo sólido antes definido, lo que puede verse en figura 7.

ii - Intensidad total: la intensidad total en los dos casos fue la misma, dentro del 1%, lo que significa que se ha realizado efectivamente una reorientación de los neutrones.

d - Variación de la intensidad total a través de las distintas configuraciones:

Se determinó dicha variación para lo cual se verificó que si bien el caso FIV y la medición sin reflector, que se diferencian porque en esta última el blanco está encapsulado y tienen distinta distribución angular (FIV es menos isotrópica), las intensidades totales en ambos casos no difieren más del 2%.

Resultando:

FII	1.00
c/reflector	1.53

además, en el ángulo sólido de interés medido con el detector de litio, resultó:

FII	1.00
c/reflector	1.65

siendo la ganancia por el sólo efecto del reflector del 34%. -

7 - Agradecimientos:

Los autores desean expresar su agradecimiento al Lic. J.J. Olcese por su colaboración en el diseño del encapsulado y circuito de refrigeración; al Lic. G. García Cano por su colaboración en la revisión de los cálculos térmicos y en el diseño del reflector y del montaje del blanco y al personal del Linac del Centro Atómico Bariloche quién tuvo a su cargo las mediciones de los parámetros del mismo.

El presente trabajo se realizó con el apoyo del Ejército Argentino a través del proyecto "Física de Neutrones y Reactores". -

BIBLIOGRAFIA:

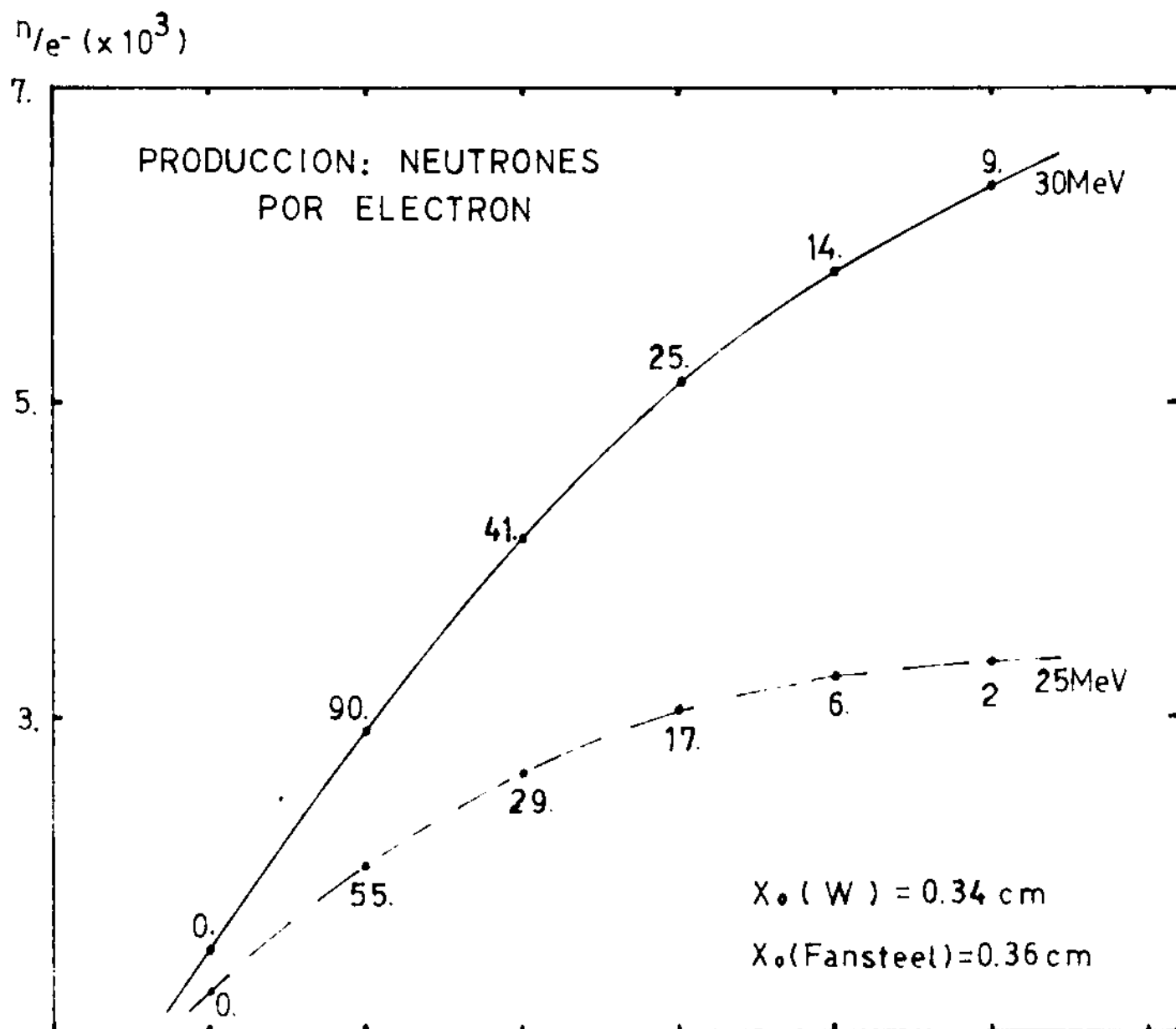
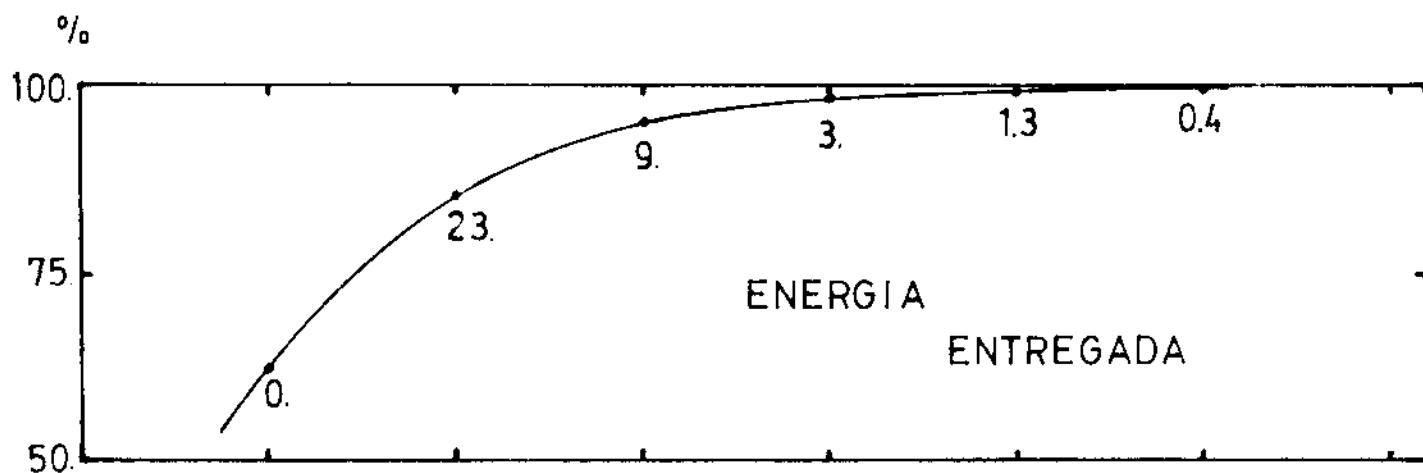
- /1/ J.D. Cockcroft, Nature 163, 869 (1949).
- /2/ M.L. Yeater et al., Phys. Rev. 91, 451 (1953).
- /3/ M.L. Yeater et al., Rev. Sci. Inst. 28, 514 (1957).
- /4/ E.R. Wiblin, "Neutron Spectrometer Based on Pulsed Sources", Proc. of the Inter. Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1955, P/421, vol. 4 UN, New York (1956), p. 35.
- /5/ M.J. Poole and E.R. Wiblin, "The design of a high-intensity pulsed source using a neutron booster target", Proc. of the Inter. Conf. on the peaceful uses of atomic energy, Geneva, 1958, P/59, col. 14, UN, New York (1958), p.266.
- /6/ J.R. Beyster, Atomic Energy Commission Report, ORNL 2739 (IV-E)(GAMD-348) 1958.
- /7/ J.R. Beyster et al., "Lattice Physics Studies", GA-7378, (August 26, 1966).
- /8/ J.R. Beyster et al., Nucl. Sci. and Eng. 9, 168, (1961).
- /9/ H.J. Willard, Jr. "Investigations into neutron source targets for on electron linear acelerator", Master Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, June 1962.
- /10/ M.J. Abbate and H.M. Antúnez, "Basic study for the Bariloche Booster Linac target specification", CNEA-CAB, Bariloche, enero 1970.
- /11/ M.J. Abbate, "Espectrómetro de neutrones por el método de tiempo de vuelo", trabajo especial, CNEA-UNC, Instituto de Física "Dr. J.A. Balseiro", Bariloche (1968).
- /12/ W.C. Barber and W.D. George, Phys. Rev. 116, 1551/9 (1959).
- /13/ R.R. Wilson, Phys. Rev. 86, 261 (1952).
- /14/ Hutte, "Manual del Ingeniero", tomo I, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2da. ed. (1963).
- /15/ W.H. Giedt, "Principles of Engineering heat transfer", D. van Nostrand Co. Inc., Princeton, New Yersey, (1957).

TABLA 1

Condiciones de diseño

M a g n i t u d			Valor de diseño
Definición	Variable	Unidad	
Energía de electrones	E	eV	30×10^6
Corriente máxima	I	A	0.275
Potencia del haz	$P = E \times I$	W	8.3×10^6
Frecuencia de repetición	fr	1/seg	200
Período	P	seg	0.005
Ancho de pulso	dt	seg	1.2×10^{-6}
"Duty Cycle"	$D = \text{fr} \times \text{dt}$		2.4×10^{-4}
Potencia del blanco	$P_b = P \times D$	W	2000
Corriente media	$i = I \times D$	A	66×10^{-6}
Diámetro del blanco		cm	5.1
Area del blanco		cm ²	20.3
Temperatura del agua:			
- entrada		°C	15
- salida		°C	80

Figura 1



$\Delta T (^{\circ}C)$

DIFFERENCIAS DE TEMPERATURAS (Exp. 091102)

- calculadas.
- o- medidas.
- - - error.

3.03 l/min

11.0 l/min

Potencia (W)

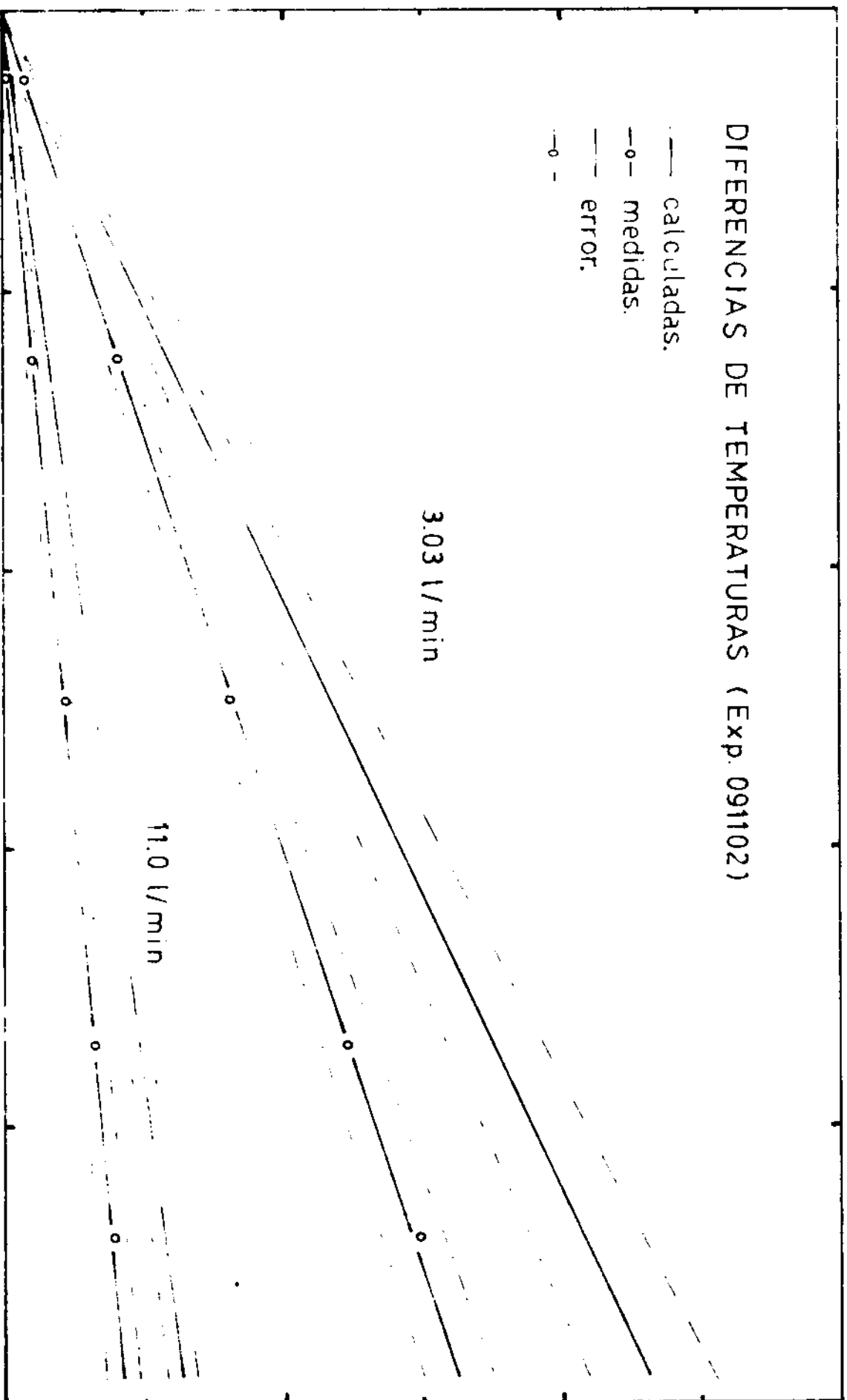


Figura 2

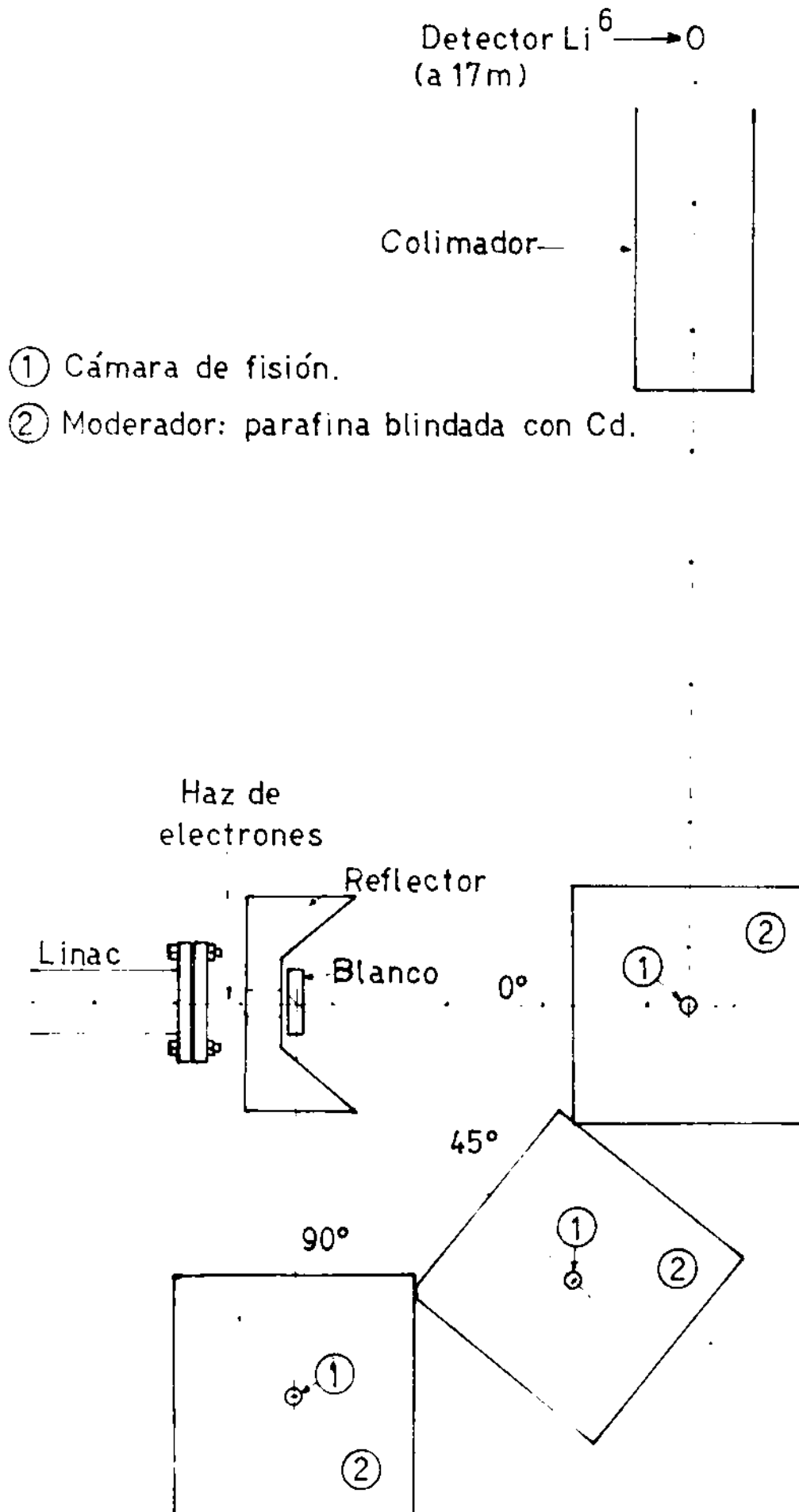
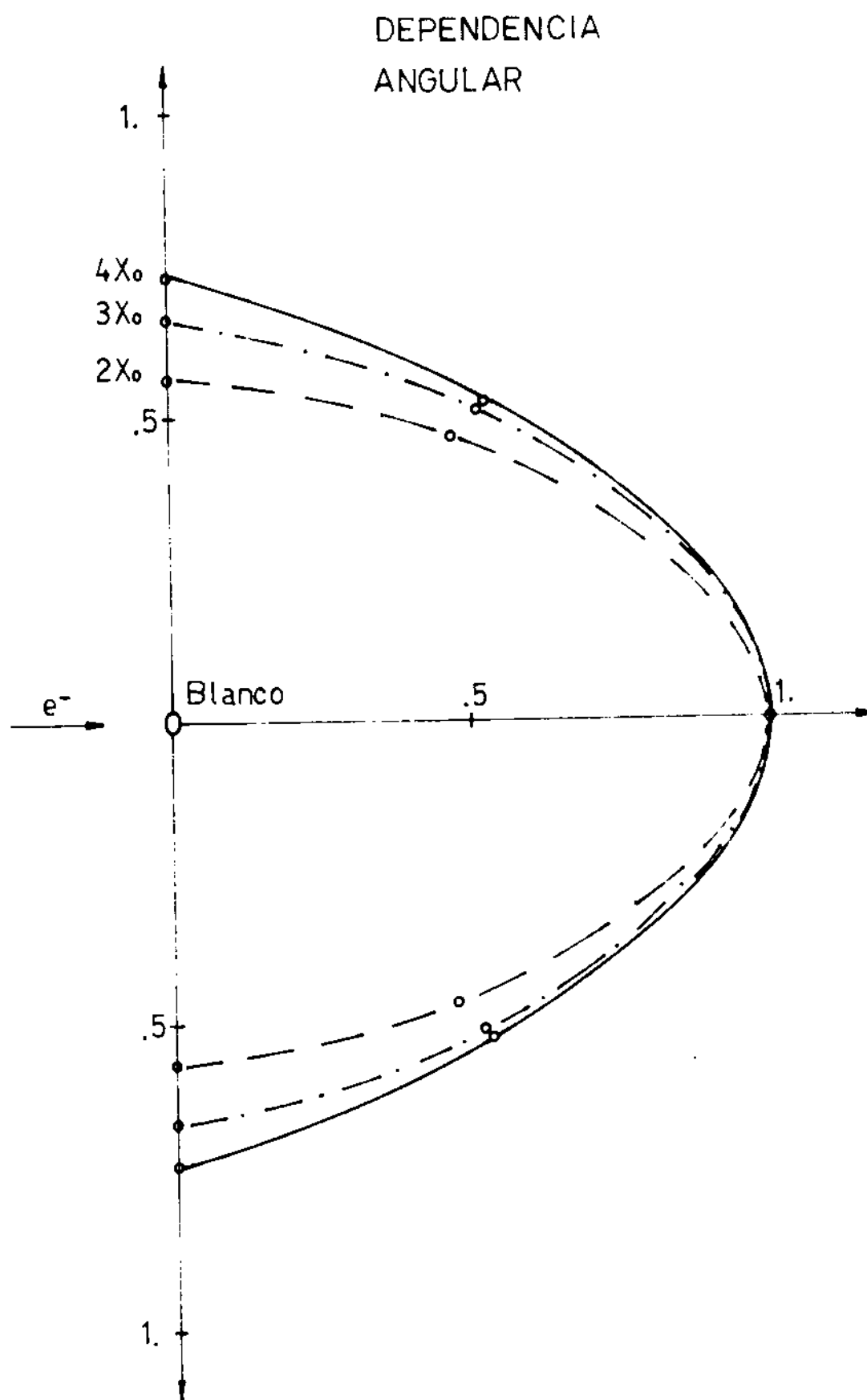
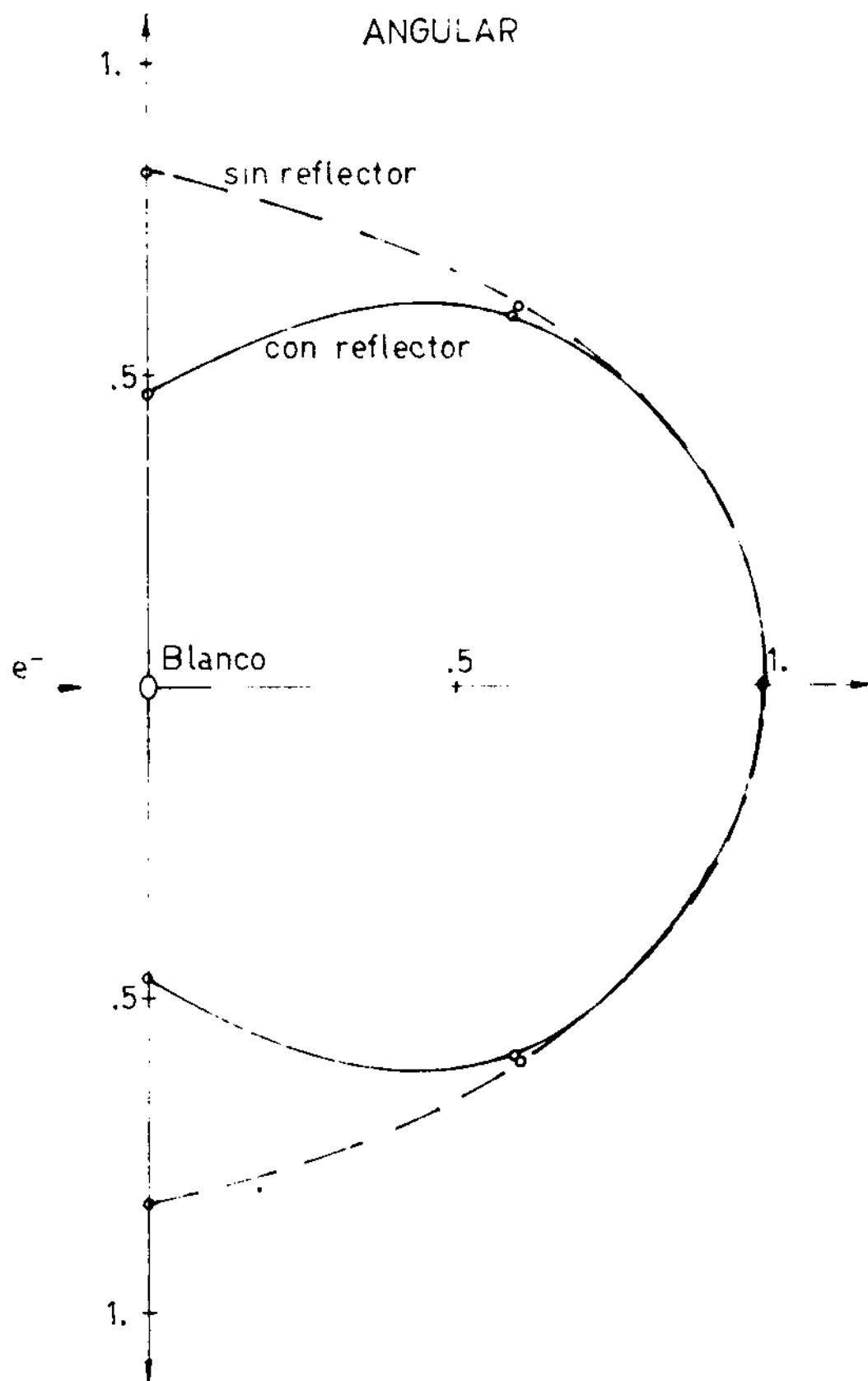


Figura 4



DEPENDENCIA ANGULAR



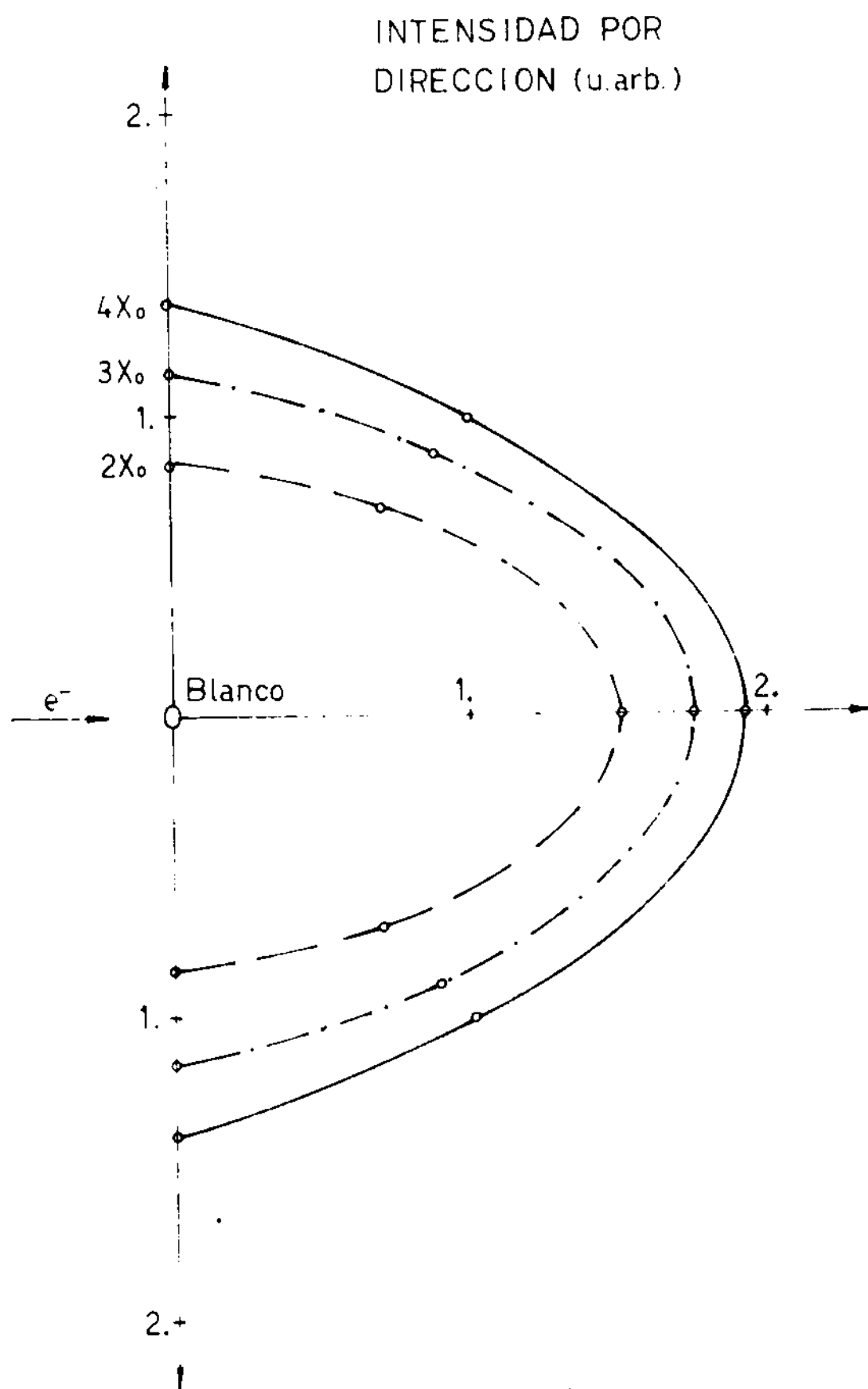


Figura 7

