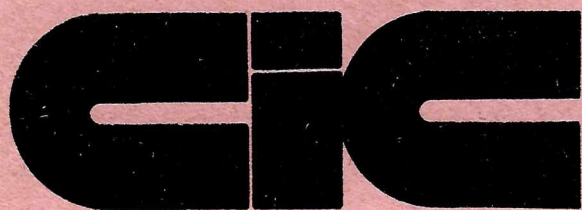


**informe preliminar para
facilitar la selección del
ESPECTROGRAFICO
COUDE DEL GT214**

Ricardo P. Platzeck

PUBLICACION ESPECIAL



**provincia de buenos aires
comisión de
investigaciones científicas**
calle 526 entre 10 y 11 - 1900 La Plata
teléfonos: 43795 - 27374 - 49581

INFORME PRELIMINAR PARA FACILITAR LA SELECCION DEL EQUIPO
ESPECTROGRAFICO COUDE DEL GT214 *

Dr. Ricardo P. Platzeck**

SERIE II, N° 390

- * Informe realizado a pedido del Grupo de Trabajo GT214 (Gran Telescopio 214) de la Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología.
- ** Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET-UNLP-LEMIT).(+2/2/79).

INTRODUCCION

En este informe se presenta un estudio comparativo de los siguientes espectrógrafos para el foco coudé:

1. Espectrógrafos convencionales.
2. Espectrógrafos con divisor de imágenes, con y sin espejos de alta reflectividad desarrollados por Richardson (1).
3. Espectrógrafos con dispositivo de imágenes múltiples y cámara con anamorfosis desarrollados por Platzeck (espectrógrafos con DIMCA) (2).

Sólo se analizan instrumentos que utilizan directamente placas fotográficas. Los instrumentos que requieren detectores más modernos (tubos de imágenes, mosaicos de diodos, etc. (3), todos ellos en una etapa de rápido desarrollo, que encarecen enormemente al equipo en su conjunto, de difícil manejo y mantenimiento, no resultan adecuados para ser considerados en una primera etapa para el equipamiento del GT214.

Si bien no es de interés inmediato, se consideró oportuno agregar un apéndice referente a las muy altas dispersiones, que incluye el uso de redes "échelle".

La evaluación de los sistemas se hace comparando las eficiencias de ranura (η) en función de los parámetros de los mismos. La influencia de la reflectividad de los espejos se analiza por separado. Se analiza también la calidad del espectro desde el punto de vista de la distribución de energía sobre la línea. Se discuten las modificaciones al telescopio que se requieren para la introducción de espejos de alta reflectividad.

Los errores de los valores relativos que se obtienen no sobrepasan el 10 %. Un cálculo más exacto requiere el conocimiento del diseño detallado del instrumento.

EFICIENCIA DE RANURA

La eficiencia de ranura η es la relación entre la energía que pasa por la ranura y por la pupila de entrada del colimador y la

energía incidente sobre el plano de la ranura. Se calcula utilizando un modelo de imagen atmosférica con distribución Gaussiana (4, 5).

Existe una cota máxima para la eficiencia de ranura, $\eta_{\text{máx}} = 0,76$, debido a que se considera como abertura máxima utilizable de la ranura al diámetro de la imagen atmosférica (definido como la distancia entre puntos de intensidad 1/2).

Para los distintos sistemas se dan curvas de la eficiencia de ranura η en función del diámetro \bar{r} de la imagen atmosférica, y tomando como parámetros la razón focal nominal F_C de la cámara ($F_C = f_C/D_{CO}$, donde f_C es la distancia focal de la cámara y D_{CO} es el diámetro del haz que sale del colimador), y el factor de anamorfosis g en el caso que corresponda. Con el objeto de ilustrar la influencia del tamaño del telescopio en los resultados, se dan las curvas para los diámetros $D_T = 120$ cm y $D_T = 215$ cm.

En todos los casos se considera un tamaño máximo de imagen monocromática sobre la placa: ancho $a \leq 0,02$ mm y largo fijo $b = 0,6$ mm.

En los gráficos 1 y 2 está representada la eficiencia de ranura para espectrógrafos convencionales, en los gráficos 3 y 4 para espectrógrafos con divisor de imagen (Richardson) y en los gráficos 5 y 6 para espectrógrafos con dispositivo de imágenes múltiples con cámara con anamorfosis (espectrógrafos con DIMCA). En este último caso aparece también como parámetro el factor de anamorfosis g , que es la relación entre la distancia focal de la cámara en la dirección de la dispersión, f_C , y la distancia focal en la dirección perpendicular a la dispersión; se han elegido los factores de anamorfosis g más interesantes compatibles con las cotas superiores dadas por $(F_C/g) \geq 2$, $D_T \cdot \sqrt{a/b} \cdot g \geq 15$ cm y $b \cdot g/a \leq 120$, cotas que resultan del análisis teórico.

Para facilitar el análisis final se presenta un cuadro comparativo de la eficiencia de ranura η para imagen atmosférica de diámetro $\bar{r} = 2''$, para los tres tipos de instrumento y los dos diámetros de telescopio. Se incluye también la ganancia en magnitud con respecto al sistema convencional ($\Delta m = m - m_C$) que resulta para un mismo tiempo de exposición, suponiendo que todos los otros parámetros sean iguales (pérdidas por reflexión, red y orden, placa, tratamiento previo y proceso de revelado, etc.) (tabla I).

De la tabla mencionada se observa que el comportamiento de la eficiencia de ranura y de la ganancia en magnitud de los distintos sistemas respecto al convencional, en función del diámetro del telescopio D_T y de la razón focal F_C , es complejo. Por lo tanto una extrapolación lineal a partir de un tamaño de espejo y una razón focal dadas, sin un análisis crítico, puede conducir a conclusiones completamente equivocadas.

La eficiencia de ranura para todos los sistemas disminuye, pero no linealmente, al aumentar $(F_C \cdot D_T)$. En el caso de espectrógrafos con

TABLA II. DISPERSIONES

1/mm	Orden	Zona	Dispersión recíproca (Å/mm)		
			F _C = 6	F _C = 8	F _C = 12
1 200	II	a	3,1	2,3	1,5
1 200	I	r	6,3	4,6	3,1
632	II	a	5,8	4,4	2,9
632	I	r	11,7	8,8	5,8
316	II	a	11,7	8,8	5,8
316	I	r	23,4	17,6	11,7
158	II	a	23,4	17,6	11,7
158	I	r	46,8	35,1	23,4

DIMCA, η además aumenta con g .

Para el telescopio de menor diámetro, $D_T = 120$ cm, la eficiencia de ranura que se obtiene con el sistema Richardson se aproxima, para las razones focales 6 y 8, a la cota máxima 0,76. Debido a esto, la utilización del sistema DIMCA en este caso no representa una ganancia significativa en magnitud con respecto al sistema Richardson; para $F_C = 6$ la ganancia es despreciable, y para $F_C = 8$ es del orden del décimo de magnitud; recién para $F_C = 12$ la diferencia llega a media magnitud.

Para el telescopio de $D_T = 215$ cm la situación es bien diferente; si bien la eficiencia de ranura del sistema Richardson es muy superior a la del convencional, es bastante inferior a la cota máxima; en este caso la utilización de un sistema DIMCA con factor de anamorfosis 3 o 4 (según la razón focal) permite aumentar la eficiencia de ranura pudiendo obtenerse una ganancia en magnitud respecto al sistema Richardson, que va desde 0,4 para $F_C = 6$ hasta 1,2 para $F_C = 12$.

Como puede verse en la tabla I, la máxima ganancia en magnitud del sistema DIMCA con respecto al convencional es del orden de 2 magnitudes.

Para tener una idea de las dispersiones que se pueden alcanzar, en la tabla II se dan las dispersiones aproximadas que se obtienen para las razones focales consideradas ($F_C = 6, 8$ y 12) con redes de $8'' \times 10''$ (204 mm \times 254 mm) de 1200, 632, 316 y 158 1/mm, utilizadas en 1° y 2° orden en el rojo y el azul respectivamente (Blaze aproximadamente 7500 \AA en 1° orden) (6).

Para lograr mayores dispersiones con una dada F_C se pueden utilizar redes de mayor tamaño (escasas en el mercado y de muy elevado precio), o mosaicos de 4 redes, que requieren un mecanismo de orientación muy preciso y ajuste frecuente (7).

REFLECTIVIDAD DE LOS ESPEJOS

En el sistema instalado por Richardson en el telescopio de 120 cm de diámetro de Victoria (1), se ha sustituido el espejo secundario y dos espejos planos por espejos dieléctricos de alta reflectividad ($r = 0,975$). Con ello se logra un aumento en la energía que llega a la ranura que corresponde a una ganancia adicional de alrededor de media magnitud (0,15 magnitudes por cada superficie sustituida por una de alta reflectividad).

Se trata de una modificación del telescopio que eventualmente se podría aplicar a telescopios con los otros espectrógrafos discutidos, en cuyo caso se tendría exactamente la misma ganancia en magnitud. Más adelante se discutirán las modificaciones que habría que realizar en el telescopio GT214.

Este incremento en la reflectividad, junto con la mayor eficiencia de ranura (tabla I), explica perfectamente los bajos tiempos de exposición que obtiene Richardson con el telescopio de 120 centímetros con el divisor de imágenes en relación a los tiempos que resultan con los sistemas convencionales y con telescopios considerablemente mayores.

DISTRIBUCION DE ENERGIA SOBRE LA LINEA ESPECTRAL

En el presente análisis se supone que la calidad óptica de los sistemas considerados es tal que su poder resolvente es considerablemente superior al de la placa.

En el espectrógrafo convencional, debido a que el largo de la línea se obtiene por paseo de la imagen estelar, suponiendo que éste sea uniforme resulta una distribución de energía uniforme a lo largo de la línea salvo en los extremos en que decae. Si se mantiene la estrella fija (caso de altas dispersiones y espectros angostos), la distribución de energía es de tipo Gaussiana.

En el espectrógrafo con divisor de imagen de Richardson, debido a que se utiliza una imagen astigmática sobre la ranura, no se puede evitar una disminución de energía en el centro de la línea causada por el cono de sombra del telescopio, *que puede ser producido por el espejo secundario o por el agujero del espejo primario*. El perfil fotométrico a lo largo de la línea presenta una forma ondulada, con dos máximos y un mínimo en el centro. La relación entre mínimo y máximos y la distancia entre máximos depende del tamaño relativo del cono de sombra; por ejemplo para el telescopio de $D_T = 120$ cm con un secundario de 42 cm el mínimo es alrededor de 30 % menor que los máximos. Una diferencia levemente más favorable (25 %) se obtendría para el telescopio de $D_T = 215$ cm que tiene un agujero de 61 cm de diámetro y secundario de tamaño similar.

Para uniformar la distribución de energía a lo largo de la línea (y aumentar el rendimiento luminoso del telescopio), Richardson reemplaza el secundario de 42 cm por uno de 15,5 cm (ver Ref.1). Debido a que el agujero del primario de ese telescopio es inferior

a 15 cm, este reemplazo del secundario disminuye el cono de sombra y por lo tanto mejora la calidad del espectro; en este caso el mínimo es sólo un 12 % menor que el máximo. En el GT214, como el agujero del primario es del mismo diámetro que el espejo secundario del coudé, la disminución del diámetro de este último no modificaría el cono de sombra, y por lo tanto en caso de usarse divisor de imagen de Richardson, la línea espectral presentará (independientemente del tamaño del secundario utilizado) una depresión del orden del 25 %.

En el espectrógrafo con DIMCA la línea espectral está formada por una sucesión de imágenes (del orden de 30 para $g = 1$ y del orden de 120 para $g = 4$). Debido a que la distancia entre imágenes es, en el peor de los casos, del orden del poder separador de la placa, el perfil fotométrico a lo largo de la línea resulta uniforme con efecto de borde muy pequeño.

MODIFICACIONES QUE HABRIA QUE INTRODUCIR AL GT214 PARA EL USO DE ESPEJOS DE ALTA REFLECTIVIDAD

La utilización de espejos de alta reflectividad en el telescopio GT214 requeriría modificaciones mecánicas considerables. El espejo secundario de 60 cm de diámetro correspondiente al coudé debería ser sustituido por un sistema de tres espejos de tamaño considerablemente menor. Al mismo tiempo habría que mantener el secundario del foco Cassegrain (Richey-Chretien).

En la montura del GT214, para pasar de un foco al otro el sistema de espejos secundarios se gira alrededor de un eje normal al eje óptico del telescopio; las posiciones de los espejos son tales que el sistema queda prácticamente enfocado requiriéndose por lo tanto sólo un pequeño desplazamiento de los secundarios para un ajuste fino del foco, para lo cual el mecanismo permite un desplazamiento de 5 cm (figura A).

Si se reemplazara el espejo secundario coudé por la terna de tres espejos de diámetro menor, la posición de enfoque de los mismos se encontraría aproximadamente 1 metro más cerca del foco principal del telescopio; de mantener el mecanismo de rotación que posee el telescopio habría que modificar el dispositivo de enfoque para permitir un desplazamiento del orden de 1 metro (figuras B y C). De no mantener el sistema de rotación alrededor de un eje perpendicular al eje óptico, habría que recurrir a un sistema de intercambio entre el espejo Cassegrain y la terna de espejos coudé. Con ello se perdería la actual simplicidad y rapidez en el cambio

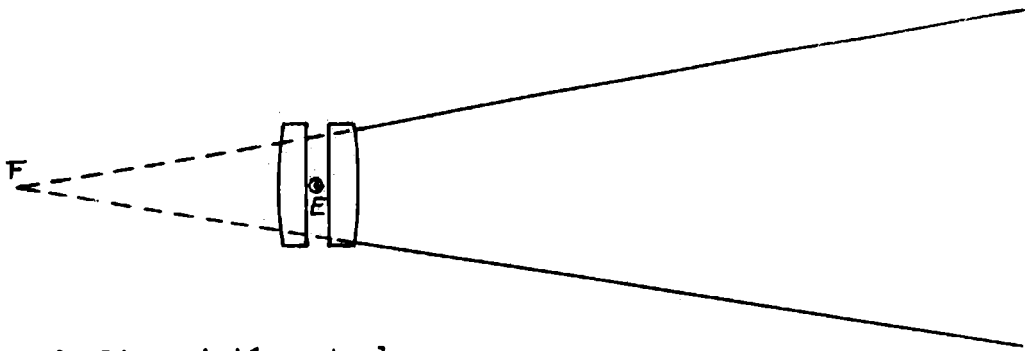


Figura A: Disposición actual

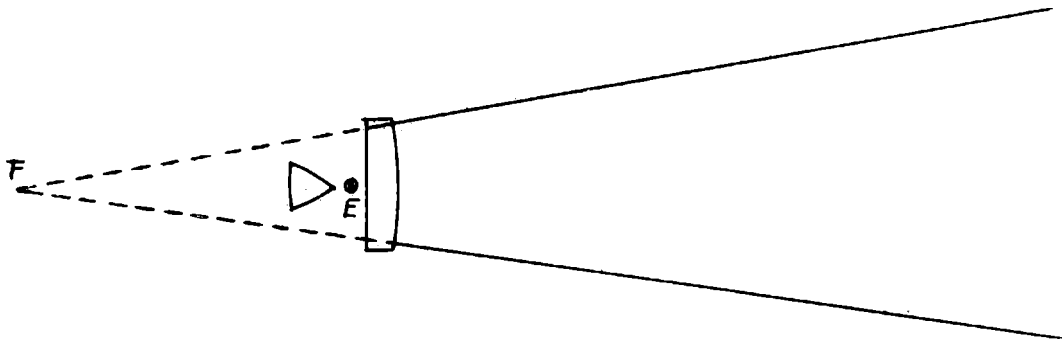


Figura B: Disposición modificada; foco Cassegrain

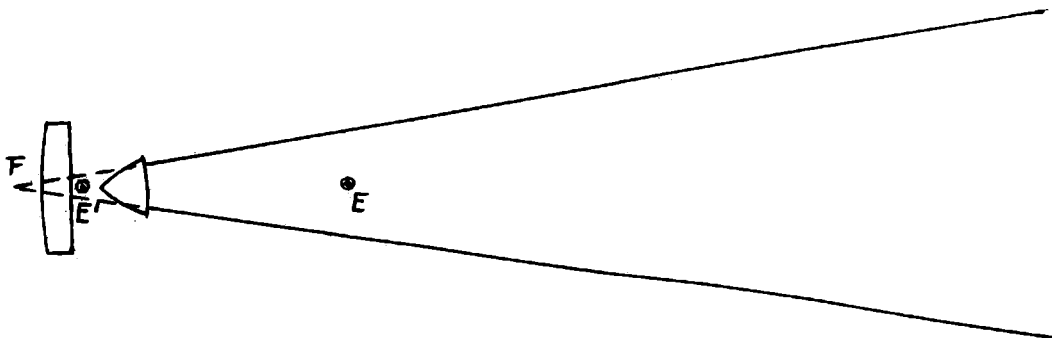


Figura C: Disposición modificada; foco coudé

F: foco principal; E, E': posiciones del eje de rotación; $E'E \cong 100$

para pasar de la observación desde un foco al otro.

Cualquiera de las dos alternativas analizada sería de un costo similar al del espectrógrafo coudé y requeriría para su realización la explícita autorización de la casa Bohler and Shovens.

RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES DE LOS DISTINTOS SISTEMAS

1. *Espectrógrafos convencionales*

Ventajas:

- construcción e instalación simples,
- buena distribución de energía sobre la línea espectral,
- ancho del espectro a voluntad del astrónomo.

Inconvenientes:

- muy baja eficiencia de ranura.

2. *Espectrógrafos con divisor de imagen desarrollados por Richardson*

Ventajas:

- mayor eficiencia de ranura en relación al convencional, que proporciona una ganancia promedio del orden de 1 magnitud.

Inconvenientes:

- distribución de energía no uniforme a lo largo de la línea espectral,
- eficiencia de ranura relativamente baja, inferior a 0,5, para el GT214 y razón focal 6 o mayor, para imagen de 2",
- ajuste crítico del divisor,
- ancho del espectro prefijado por construcción.

3. *Espectrógrafos con dispositivo de imágenes múltiples y cámara con anamorfosis*

Ventajas:

- alta eficiencia de ranura: para el GT214 varía entre 0,70 y 0,49

- para razones focales entre 6 y 12 e imagen de 2", y la ganancia respecto al convencional varía entre 1,7 y 2 magnitudes,
- distribución de energía uniforme a lo largo de la línea espectral,
 - ajuste del sistema óptico correspondiente al dispositivo de imágenes múltiples poco crítico,
 - control permanente de la buena forma del sistema óptico del telescopio.

Inconvenientes:

- sistema óptico de difícil construcción,
- ancho del espectro fijado por construcción, aunque se lo puede variar cambiando solamente la lente cilíndrica de la cámara,
- ajuste crítico de la cámara.

APENDICE: MUY ALTAS DISPERSIONES

Si se quiere llegar a dispersiones del orden de $1 \text{ \AA}/\text{mm}$ con redes convencionales de $8'' \times 10''$ es necesario utilizar $F_c = 16$ o mayor. Para esta razón focal los rendimientos de ranura para el sistema convencional y el sistema Richardson son muy bajos: para imagen de $\bar{\gamma} = 1,5$ resulta para el convencional $\eta = 0,075$ y para Richardson $\eta = 0,156$. Para el sistema DIMCA con $g = 4$ y ancho $b = 0,6 \text{ mm}$ resulta, para $\bar{\gamma} = 1,5$ una eficiencia de ranura aceptable, $\eta = 0,49$; con el objeto de reducir los tiempos de exposición se puede utilizar un ancho de espectro menor, $b = 0,4 \text{ mm}$; en tal caso se puede utilizar una anamorfosis $g = 6$, con lo que se mantiene igual la eficiencia de ranura. En el caso del sistema Richardson el disminuir el ancho del espectro no modifica apreciablemente el tiempo de exposición ya que la eficiencia de ranura en este caso particular disminuye aproximadamente en la misma proporción. En el sistema DIMCA, si se mantiene el mismo valor para el producto $b.g$, se puede usar el mismo dispositivo de imágenes múltiples, cambiando la anamorfosis de la cámara por sustitución de la lente cilíndrica de la misma.

Otra solución para alta dispersión está dada por el uso de redes "echelle". Debido a la gran dispersión angular de estas redes las razones focales que se requieren son considerablemente menores. Por ejemplo, para una red "echelle" de $204 \text{ mm} \times 408 \text{ mm}$ de área ra-

yada, ángulo de blaze $\theta = 63^{\circ}26'$, se obtiene una dispersión del orden de $1,1 \text{ \AA/mm}$ con una cámara de $F_c = 4,5$. Es aproximadamente la misma dispersión que se obtiene con redes comunes de 1200 1/mm de $8'' \times 10''$ en 2° orden con $F_c = 16$. Un sistema convencional con $F_c=4,5$ tiene, para imagen atmosférica de $\bar{\gamma} = 1,5$, una eficiencia de ranura $\eta = 0,26$. Si en lugar de utilizar un sistema convencional se utiliza un sistema DIMCA con $g = 1$ y un ancho de espectro $b = 0,4 \text{ mm}$ resulta, para una imagen atmosférica de $1,5$, una eficiencia de ranura $\eta = 0,66$.

Si bien los espectrógrafos con red "echelle" se caracterizan por su elevado rendimiento luminoso, presentan algunas desventajas que pesan en contra:

- a) el espectrógrafo es ópticamente más complejo ya que necesita una dispersión cruzada para separar los distintos órdenes, lo que produce disminución de rendimiento,
- b) la medición de los espectros resulta más laboriosa,
- c) debido a la escasa selección y al elevado precio de las redes "echelle" es necesario disponer de una cámara por cada dispersión que se desea obtener.

Por otro lado presenta las siguientes características:

- 1) Si se utiliza el sistema óptico ideado por Baranne (8) (a pupila blanca), el plano focal no intercepta al haz incidente, lo que permite utilizar tubo de imágenes.
- 2) El espectro distribuido en varios órdenes (distribución rectangular o cuadrada) se adapta mejor a la forma del cátodo de un tubo de imágenes que el espectro lineal proporcionado por una red común.

NOTAS Y REFERENCIAS

1. Richardson E. H.- Publications of the Dominion Astrophysical Observatory, Vol XIV, N° 1 (1971); Proceedings of the ESO/CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Geneva 1972, pág. 285.

2. Sistema con divisor de pupila del telescopio, que forma imágenes múltiples sobre la ranura, las que son proyectadas sobre la pupila de entrada del colimador. En lugar de cámara convencional se puede usar cámara con anamorfosis.

3. Vin A.- Les Recepteurs Photoelectriques Multicanaux, Colloque

de la Baume Ste. Marie, 21,22,23 Janvier 1976, V.

4. Un análisis teórico indica que la imagen debe ser aproximadamente Gaussiana, lo que ha sido corroborado experimentalmente por G. Lelievre, Actualité du Développement des Divers Récepteurs, Colloque de la Baume Ste Marie, 21,22,23 Janvier 1976, VII.

5. Otros autores hacen un análisis basado en modelos de estrella más simplificados. Ver por ejemplo Ch. Fehrenbach, Luminosité et Efficacité des Spectrographes, Proceedings of the ESO/CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Geneva, May 2-5 1972, pág. 99. Fehrenbach usa como modelo de imagen un disco, que a los efectos del cálculo aproxima a un cuadrado uniformemente iluminado, lo que le da una eficiencia de ranura que aumenta linealmente con el ancho de la misma. El análisis está limitado a espectrógrafos convencionales.

6. Las redes mencionadas aparecen en el catálogo Baush y Lomb de 1974. Para una elección definitiva hay que recurrir al catálogo más reciente.

7. Bayle A and Espiard J.- Mosaique de Réseaux, Proceedings of the ESO/CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Geneva, May 2-5, 1972, pág. 217.

8. Baranne A.- Equipement Spectrographique du Foyer Coudé du Télescope de 3,6 m. Etude d'un Spectrographe Universel, Proceedings of the ESO/CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Geneva, May 2-5, 1972, pág. 227.

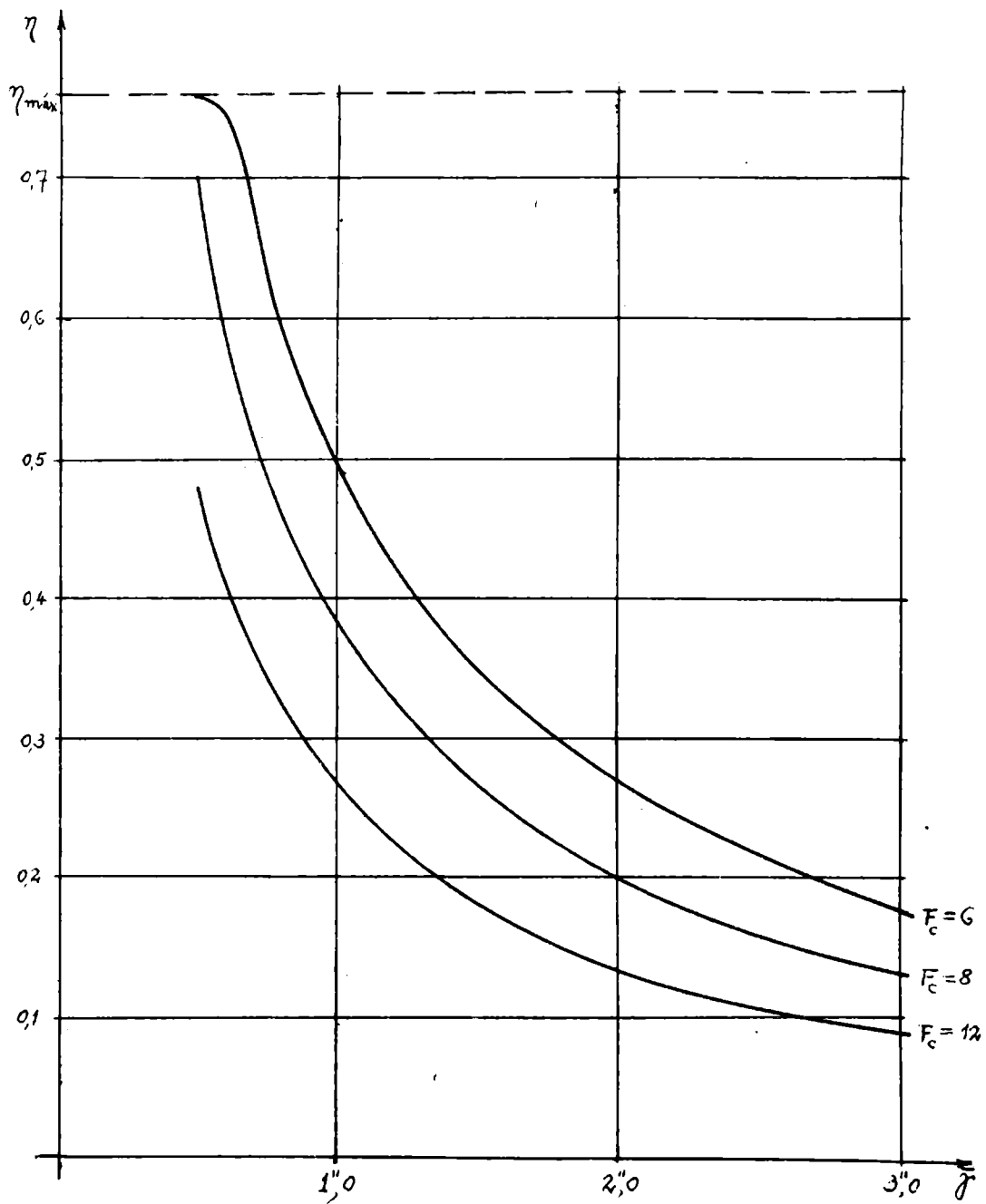


Gráfico 1.- Eficiencia de ranura para espectrógrafos convencionales, para $D_T = 120$ cm y espectro de $0,02$ mm x $0,6$ mm

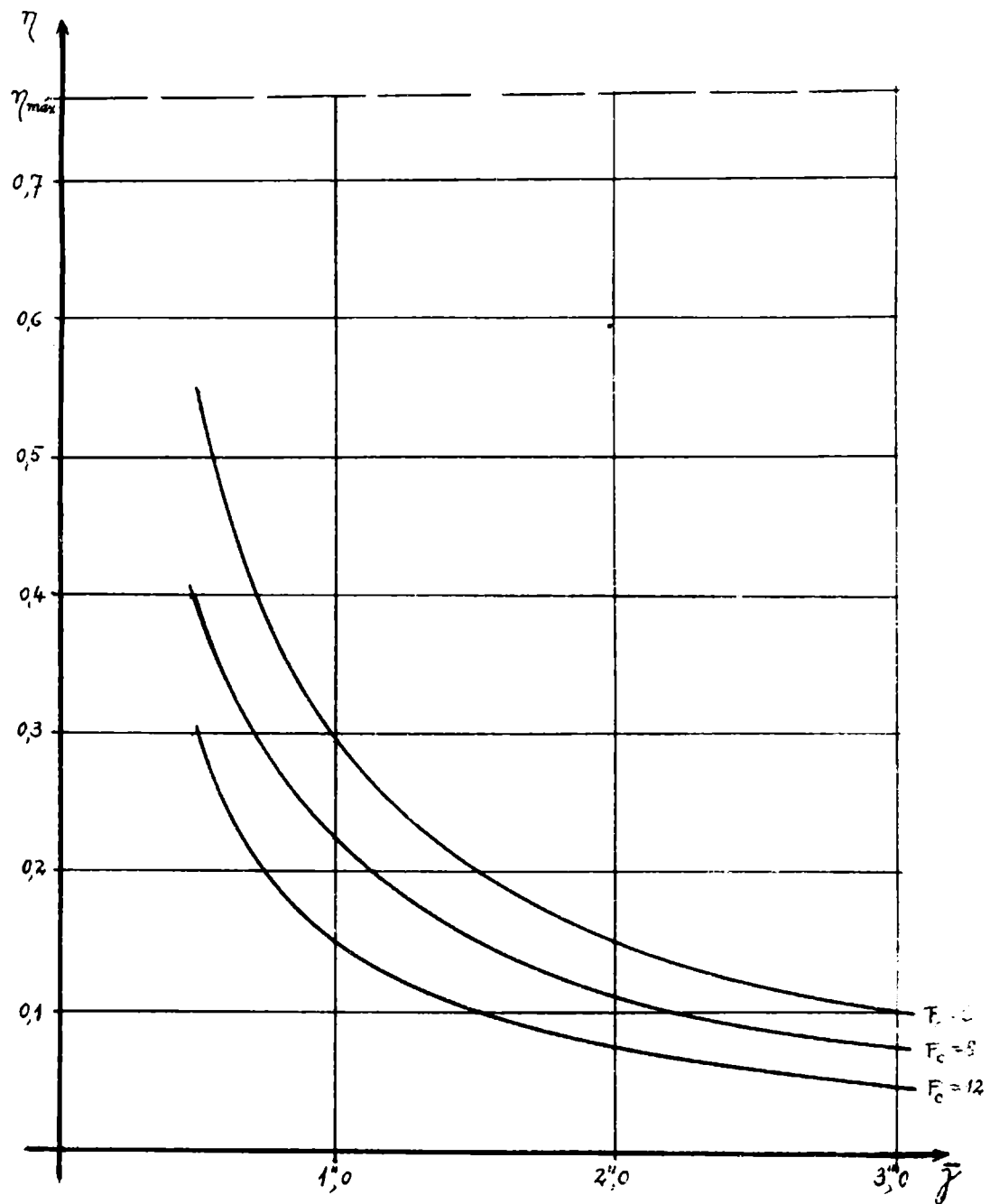


Gráfico 2.- Eficiencia de ranura para espectrógrafos convencionales, para $D_T = 215$ cm y espectro de $0,02$ mm x $0,6$ mm

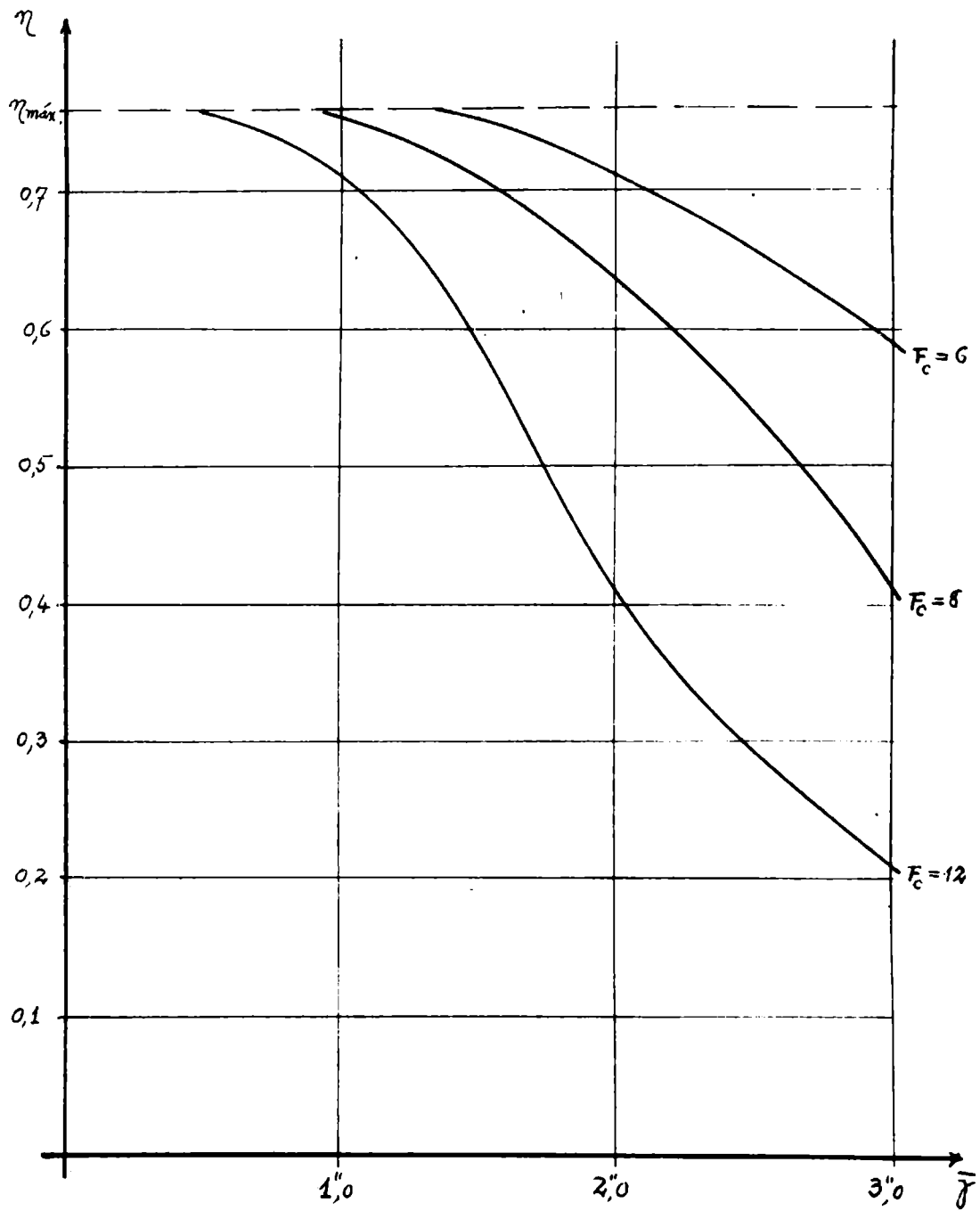


Gráfico 3.- Eficiencia de ranura para espectrógrafo con divisor de imagen (Richardson), para $D_T = 120$ cm y espectro de $0,02$ mm x $0,6$ mm

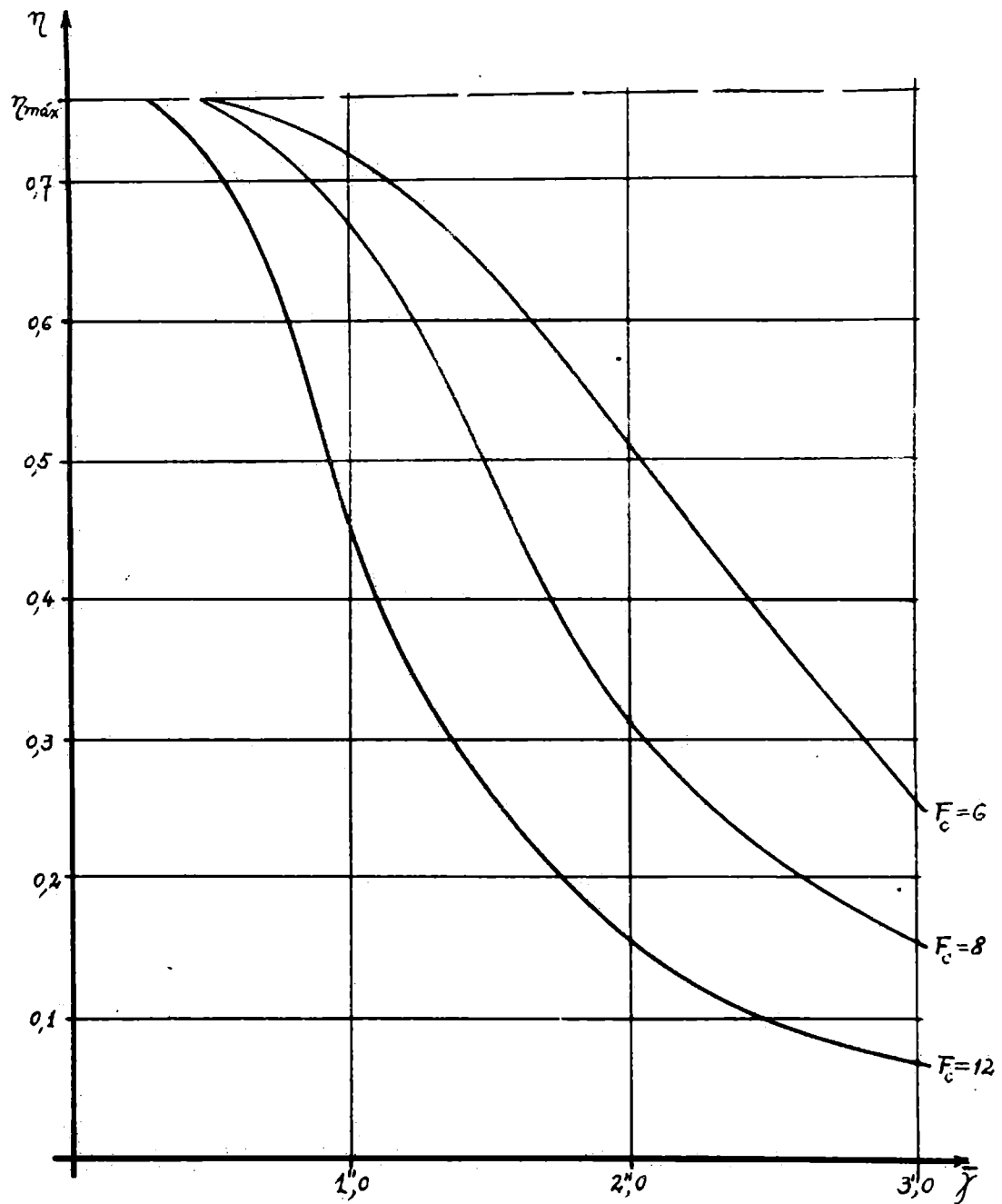


Gráfico 4.- Eficiencia de ranura para espectrógrafo con divisor de imagen (Richardson), para $D_T = 215$ cm y espectro de 0,02 mm x 0,6 mm

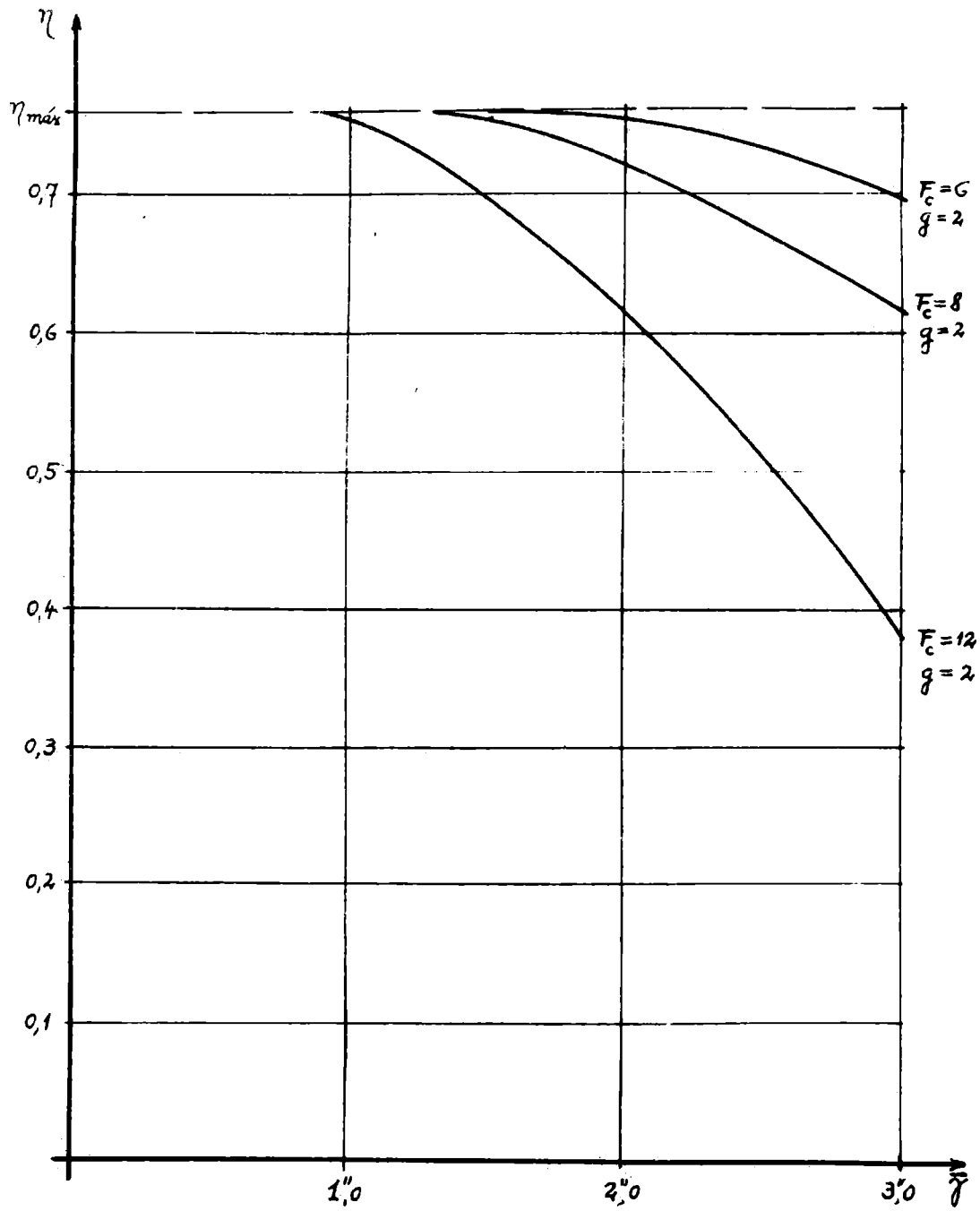


Gráfico 5.- Eficiencia de ranura para espectrógrafos con DIMCA, para $D_T = 120$ cm y espectro de $0,02$ mm x $0,6$ mm

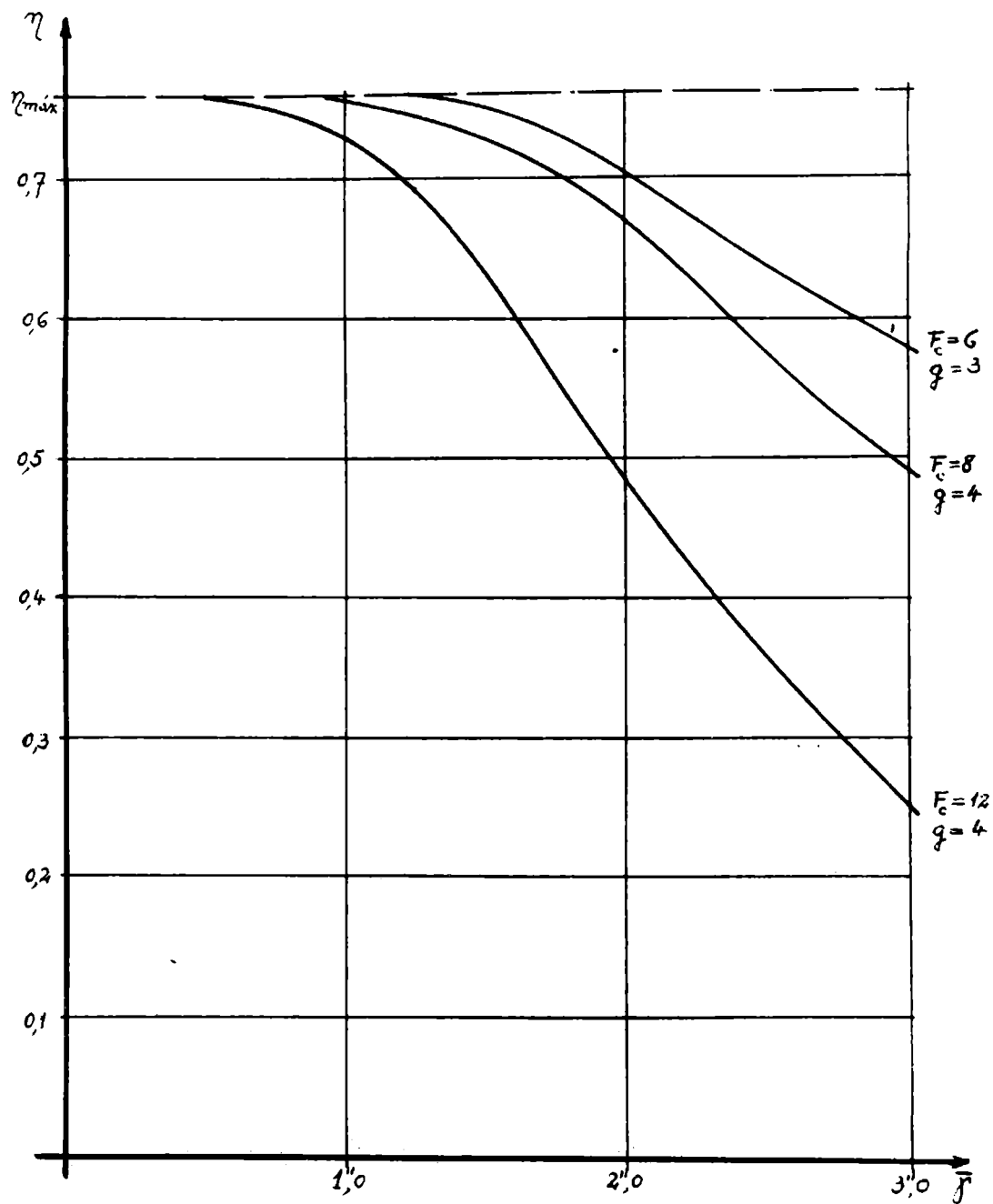


Gráfico 6.- Eficiencia de ranura para espectrógrafos con DIMCA, para $D_T = 215$ cm y espectro de $0,02$ mm x $0,6$ mm