

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1966

08.66.04

Enero 1966

ESTUDIO TEORICO DE LA ESTABILIDAD
DEL SISTEMA DE COMANDO AUTOMATICO
DE UN REACTOR NUCLEAR

Horacio Huber

Ingeniero del departamento de reac-
-tores de la Comisión Nacional de
Energía Atómica.

I - INTRODUCCION

En este estudio se analiza por métodos utilizados en el análisis de servomecanismos lineales, un sistema de control automático a instalarse en el reactor RA-1.

El control automático tiene por objeto en este caso, mantener la potencia del reactor estable con una precisión del 0,5% y efectuar variaciones automáticas entre niveles de potencia pertenecientes a la misma década.

La finalidad del estudio es verificar la estabilidad del sistema.

II - DESCRIPCION DEL SISTEMA

El RA-1 es un reactor de uranio enriquecido, moderado y refrigerado con agua liviana. Desde su instalación ha sufrido diversas modificaciones, que permitieron aumentar su potencia hasta 100 Kw.

El control se efectúa por medio de cuatro barras de compensación-seguridad. A efectos de ser utilizada para el control automático, se agregó una quinta barra de un valor en reactividad de 0,5% (500 pcm).

La barra es accionada por un motor bifásico, comandado por un amplificador. La señal aplicada a la entrada del amplificador es de la forma: (.)

$$\varepsilon = A \frac{N_d - N}{N_d} - B \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

Donde N es la señal que representa la potencia del reactor, N_d es el valor de referencia o potencia en la que se desea estabilizar el reactor; A y B son constantes.

La señal N se recibe en forma de corriente del detector ubicado en las proximidades del núcleo. Un amplificador, cuya sensibilidad se varía por pasos, transforma la corriente en señal de tensión. Esta tensión es la que se aplica a la entrada del amplificador comparador. N_d se fija en el dial de un potenciómetro en el mismo comparador. De esta forma, a la salida del amplificador, se tiene una señal de la forma del primer término de la (1).

La señal de la forma del segundo término de la expresión (1) se obtiene del periodómetro, equipo que forma parte de la instrumentación normal del reactor, destinado a medir la velocidad (.) Referencia 1.

de crecimiento de la potencia.

El sistema puede apreciarse en forma esquemática en la figura 1.

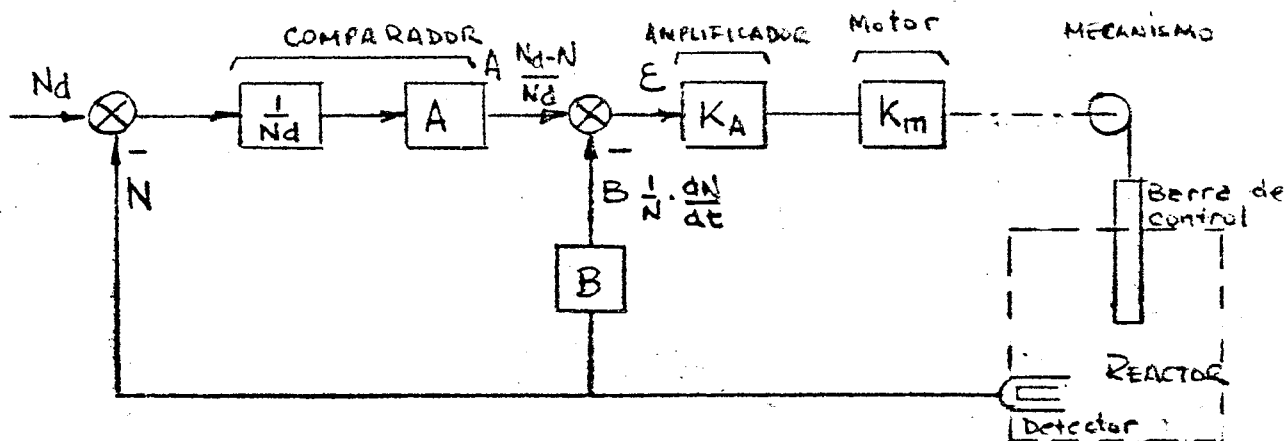


Figura 1

Como la velocidad del motor es, dentro de los límites de saturación del amplificador, proporcional a la tensión $\mathcal{E}$, la posición de la barra y por lo tanto la reactividad (al menos en la zona central) es proporcional a la integral de la tensión

$$\delta k(s) = K \cdot \frac{\mathcal{E}}{s} \quad (2)$$

K se mide en $\frac{\text{pcm/seg}}{\text{volt}}$. Se trata entonces de un control de tipo integral y por lo tanto el error permanente es nulo. Es decir que ante cualquier perturbación de reactividad (presencia de venenos, temperatura, introducción de muestras a irradiar, etc.) la barra se desplaza hasta compensar dicha perturbación y mantener el reactor crítico; la posición será en general diferente de la que ocupaba inicialmente pero $\mathcal{E}$ será cero y la potencia se esta-

bilizará en el valor que tenía antes de la perturbación.

Con el fin de linealizar la función transferencia de la rama directa, la señal $\mathcal{E}$ está referida a N , pues la ganancia del reactor es proporcional al nivel de potencia.

La presencia del segundo término en (1) obedece a la necesidad de limitar la velocidad de crecimiento de la potencia, cuando se modifica el valor de N_d .

En este caso, si la tensión de salida del amplificador comparador, se limita al valor C , y si el lazo constituido por el amplificador de potencia, el motor y el mecanismo, el reactor y el periodómetro, es suficientemente rápido, $\mathcal{E}$ es prácticamente nulo y la potencia crece con período constante

$$T = \frac{1}{\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}} = \frac{B}{C} = \frac{B}{A \left| \frac{N_d - N}{N_d} \right|_{\text{lim.}}} \quad (3)$$

La relación $\frac{B}{A}$ y el valor C , son determinados por las siguientes consideraciones:

- Estabilidad y comportamiento transitorio.
- Precisión deseada.
- Período mínimo permitido de la evolución.

La condición de estabilidad determina que la ganancia del lazo mencionado previamente, sea menor que 1 (0 dB) cuando la fase alcanza a -180° , es decir que la curva de Nyquist no rodee el punto -1 .

Se determina el valor de B en base a las consideraciones de estabilidad; se determinará el valor de C para obtener el período mínimo de 30 segundos. La ganancia de la rama directa se ajusta para obtener la precisión pedida y finalmente se verifica la estabilidad de todo el sistema.

III - BASES DEL ESTUDIO

El sistema se estudia por el método gráfico de trazado de la función transferencia total en lazo abierto; se determinan la ganancia necesaria, el margen de ganancia y el margen de fase.

- Especificaciones:

a) En caso de nivel de potencia de referencia constante, N_d .

- El sistema debe ser estable cualquiera sea el valor que tome N_d , entre $N_{d \min}$, $N_{d \max}$; ninguna variable debe entrar en régimen oscilatorio.

- La potencia debe mantenerse en el valor fijado N_d , con la precisión establecida.

Partiendo de que el comportamiento de los elementos que componen el lazo de control, es lineal en un entorno de la posición de equilibrio y que la función transferencia del reactor está linealizada en todo el intervalo $N_{d \min}$, $N_{d \max}$, el análisis es válido para cualquier potencia de operación dentro de este rango.

b) En caso de variación automática del nivel de potencia.

- No deben producirse oscilaciones alrededor del valor final. La máxima amplitud del sobreimpulso no debe llegar al valor de potencia máximo permitido.

- La velocidad de crecimiento de la potencia, no debe ser superior a un período de crecimiento de 30 segundos.

Se estudia primeramente la estabilidad del lazo interno que incluye la realimentación de la señal de período.

Durante el crecimiento de la potencia, el amplificador comparador (fig. 1) se encuentra en un valor límite y la barra de control es comandada sólo por la señal del periodómetro.

Cuando la señal de error del comparador, se hace inferior al valor límite, y ninguna de las variables se encuentra en el valor de saturación, la estabilidad puede analizarse según se mencionó en a), pues la potencia se encuentra suficientemente próxima al valor de equilibrio.

-.--.-.-.-

IV - FUNCION TRANSFERENCIA DE LOS COMPONENTES DEL LAZO DE CONTROL

El diagrama block del sistema se muestra en la figura 2. Se presentará la función transferencia que caracteriza a cada uno de los elementos indicados.

a) Reactor.

La función transferencia del reactor, se obtiene a partir de las ecuaciones que gobiernan su comportamiento temporal, llamadas ecuaciones cinéticas, suponiendo pequeños incrementos de la reactividad. La expresión obtenida cuando se emplean 6 grupos de neutrones retardados es: (.)

$$\frac{\delta N/N_0(s)}{\delta k(s)} = \frac{1}{\ell^*} \cdot \frac{1}{s \left[1 + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\ell^*(s + \lambda_i)} \right]} \quad (4)$$

Siendo:

N_0 : potencia del reactor en equilibrio.

ℓ^* : vida media de los neutrones.

β_i : fracción de neutrones retardados del grupo i.

λ_i : constante de decaimiento radioactivo del emisor de neutrones retardados del grupo i.

$\delta k(s)$: transformada de la variación de reactividad.

$\delta N(s)$: transformada de la variación de potencia.

En problemas de control, es suficiente con utilizar la expresión que se obtiene partiendo de un sólo grupo de neutrones reatardados

Así se llega a

$$K_{RG_R} = \frac{\delta N/N_0(s)}{\delta k(s)} = \frac{1}{s \ell^*} \cdot \frac{s + \bar{\lambda}}{s + \bar{\lambda} + \beta/\ell^*} \quad (5)$$

(.) Referencia 2.

Donde

β : fracción total de neutrones retardados.
 λ : constante de decaimiento media.

b) Comparador.

El comparador elabora la señal $\frac{N_0 - K}{N_0}$. Su F.T.(.), dentro del rango de frecuencias que nos interesa es una constante.

c) Amplificador de potencia.

Análogamente podemos considerar al amplificador de potencia como una constante pura, de ganancia K_A .

d) Motor de accionamiento.

Considerando la ecuación de funcionamiento del motor bifásico, incluyendo las inercias reflejadas sobre el eje de salida y los rozamientos, se obtiene la F.T.

$$K_m G_m(s) = \frac{\Theta(s)}{V_c(s)} = \frac{K_v}{s(1 + Ts)} \quad (6)$$

Siendo:

K_v : constante de velocidad del motor $\left(\frac{\text{rad/seg}}{\text{volt}} \right)$

T : constante de tiempo del motor (seg)

e) Constantes del mecanismo y barra de control.

El movimiento de la barra se efectúa por medio de un cable arrollado en una polea, que recibe su movimiento del motor a través de un reductor apropiado.

La relación del reductor se elige de manera de limitar la máxima velocidad de introducción de reactividad a 20 pcm/seg.

La reactividad en pcm, esté vinculada al ángulo de giro del eje del motor por la constante

$$K_F = \frac{\alpha}{\omega_m} \frac{\text{pcm/seg}}{\text{rad/seg}} \quad (7)$$

(.) F.T. : Función transferencia.

f) Función transferencia del periodómetro.

La F.T. del periodómetro se midió utilizando un equipo comercial especialmente diseñado para tal fin. Las curvas obtenidas se observan en la figura 3. La F.T. es:

$$B \cdot F(s) = B \cdot \frac{s}{(1+T_1 s)(1+T_2 s)} \quad (8)$$

Las constantes de tiempo T_1 y T_2 resultan, según la medición efectuada, 5 segundos y 0,33 segundos respectivamente.

En cuanto a la ganancia observamos que la prolongación de la asíntota 20 dB/década, corta la abscisa $f=1$ en 1,6 dB, que corresponde a 1,2 volts.seg

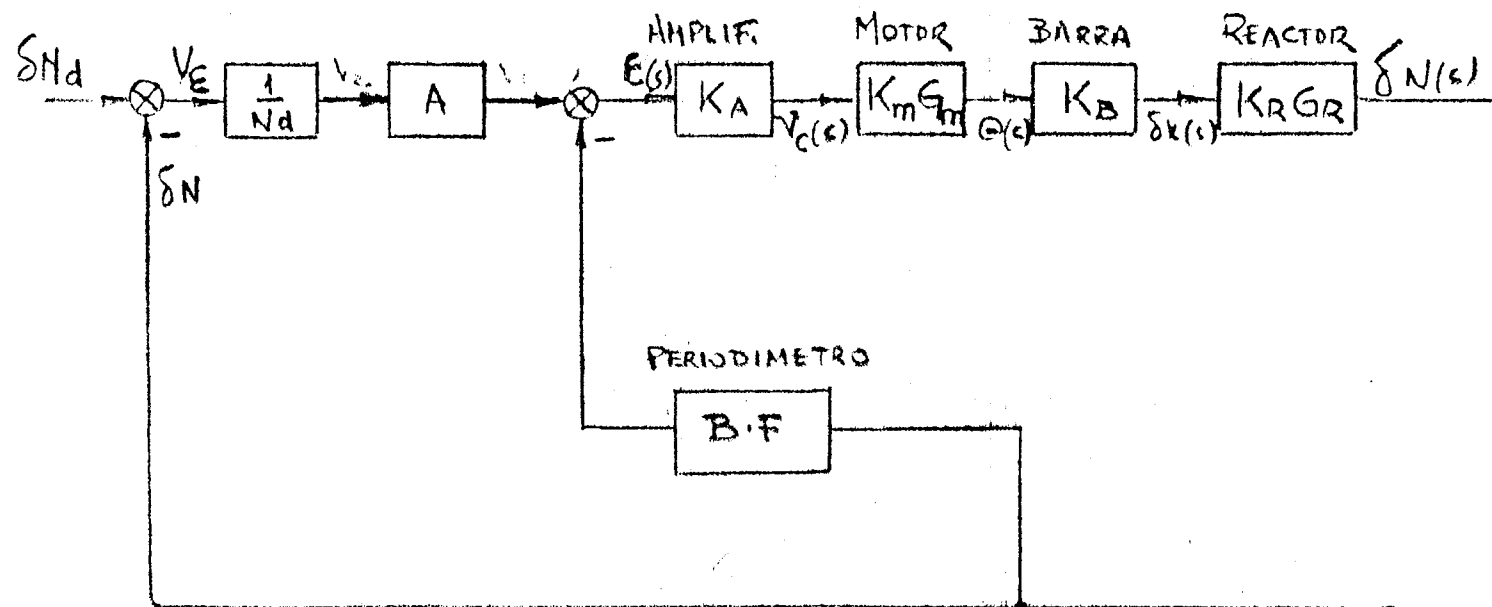


Figura 2 - DIAGRAMA BLOCK DEL CONTROL AUTOMATICO

V - ESTABILIDAD DEL LAZO INTERNO

La introducción de la señal producida por el periodómetro, después del comparador, constituye un lazo interno de realimentación, cuya estabilidad debe verificarse.

En la rama directa de este lazo tenemos:

$$KG(s) = K_A \cdot K_m \cdot K_B \cdot K_R \cdot G_R(s) \cdot G_m(s) \quad (9)$$

La función transferencia del reactor (5) puede escribirse de la siguiente manera:

$$K_R G_R(s) = \frac{1}{s} \frac{\bar{\lambda} \left(1 + \frac{s}{\bar{\lambda}}\right)}{\beta \left(1 + \frac{s}{\left(\frac{\beta}{\ell^*}\right)}\right)} \quad (10)$$

En la que se ha despreciado $\bar{\lambda}$ frente al valor de $\left(\frac{\beta}{\ell^*}\right)$

Las constantes valen (.)

$$\bar{\lambda} = 0,077 \text{ seg}^{-1}$$

$$\beta = 0,0064$$

$$\ell^* = 5 \times 10^{-5} \text{ seg (para el RA-1)}$$

Si queremos expresar N/N_0 en por ciento y δk en pcm, debemos multiplicar K_R por 10^{-3} , quedando finalmente:

$$K_R G_R(s) = \frac{\delta N/N_0}{\delta k(s)} = 0,012 \frac{1 + 13s}{s(1 + 0,0078s)}$$

Los valores de las constantes en (9) son:

$$100 < K_A < 1000 ; \quad K_m = 10 \frac{\text{rad/seg}}{\text{volt}} ; \quad K_B = 1/37 \frac{\text{pcm}}{\text{radián}}$$

Agrupando en un sólo coeficiente y haciendo K_A igual al máximo valor:

(.) Referencia 3.

$$K = K_A K_m K_E = 270 \frac{\text{pcm/seg}}{\text{volt}}$$

La función transferencia BF(s) es:

$$BF(s) = \frac{1,2 s}{(1 + 5s)(1 + 0,33s)} \left(\frac{\text{volts} \cdot \text{seg}}{\%} \right)$$

Finalmente la F.T. en lazo abierto KG.BF queda

$$\begin{aligned} KG \cdot BF &= K \frac{1}{\beta \cdot s^2} \frac{(1 + s/\bar{\tau})}{(1 + \frac{\tau}{\beta} s)} \cdot B \frac{s}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} = \\ &= 3,9 \frac{1 + s/0,077}{s(1 + s/0,2)(1 + s/3)(1 + s/10)(1 + s/125)} \quad (11) \end{aligned}$$

La curva de amplitud y fase de la (11) está representada en la figura 4. En la figura 5 se representó la misma función en el diagrama de Nichols, (curva 1).

En este último se aprecia que el margen de fase es exiguo (11°). Para obtener un margen de fase aceptable (45°), se reduce la ganancia del medidor de período en 12 dB, lo que equivale en este diagrama a desplazar verticalmente la curva hacia abajo 12 dB. Se observa que ahora el margen de fase es de 45°, y que la curva es tangente al círculo de amplitud constante M=2 dB, lo que le acuerda un comportamiento transitorio aceptable (.). En el punto de tangencia leemos la frecuencia de resonancia f=2 c/seg. El margen de ganancia se obtiene en el mismo gráfico y resulta 16 dB.

Estos resultados muestran que con la nueva ganancia del periodómetro, (1,6 - 12 = -10,4 dB), el lazo interno es perfectamente estable .

En la figura 4, la reducción de ganancia equivale a desplazar el eje 12 dB hacia arriba. La fase, naturalmente, no varía.

(.) Referencia 4.

El período de la evolución se calcula a partir de (3) con el valor de la nueva ganancia del periodómetro $B = -10,4$ dB, que equivale a $0,3 \frac{\text{volt}}{\%/\text{seg}}$. Conviene expresar también el período en esta unidad. A un período de 30 segundos corresponde una velocidad de crecimiento de $3,3 \text{ } \%/ \text{seg}$. El valor de C, resulta:

$$C = \frac{B}{T} = B \cdot r \left(\frac{\%}{\text{seg}} \right) = 0,3 \cdot 3,3 \text{ (volts)} = 1 \text{ volt}$$

Es decir que limitando la tensión de salida del comparador a 1 volt, la evolución se efectúa con un período de 30 segundos.

La ganancia del comparador, A, debe ser tal que cuando el error es de $0,5\%$, sobre el motor debe estar aplicada una tensión superior a la tensión de arranque. Este valor depende de los rozamientos del reductor y mecanismos. Medido experimentalmente se obtuvo el valor $V_{arr} = 20$ volts. Como $K_A = 1000$, resulta:

$$A = \frac{20 \text{ volts}}{1000 \cdot 0,5\%} = 0,04 \frac{\text{volts}}{\%}$$

Haciendo $A = 0,1 \text{ v}/\%$, podemos reducir K_A a 400, manteniendo la misma ganancia de la rama directa.

--- --

V - ESTABILIDAD DEL SISTEMA

Para estudiar la estabilidad del sistema completo, es suficiente el conocimiento de la F.T. en lazo cerrado $\frac{\delta W(s)}{V_E(s)}$,

$$K_S G_S(s) = \frac{\delta N(s)}{V_E(s)} = \frac{A - KG(s)}{1 + KG(s) BF(s)} \quad (12)$$

Siendo $V_E(s)$ la tensión a la entrada del comparador. El trazado de la función transferencia se facilita observando que: (.)

$$\text{Para } KG BF \gg 1 \quad K_S G_S \rightarrow \frac{1}{BF}$$

$$\text{Para } KG BF \ll 1 \quad K_S G_S \rightarrow KG$$

Utilizando la (12), se completa el trazado de la curva para las frecuencias próximas a 1. Las curvas resultantes se muestran en las figuras 6 y 7.

Se observa que el sistema estable y que existe un margen de fase considerable, próximo a los 70°.

(.) Referencia 5.

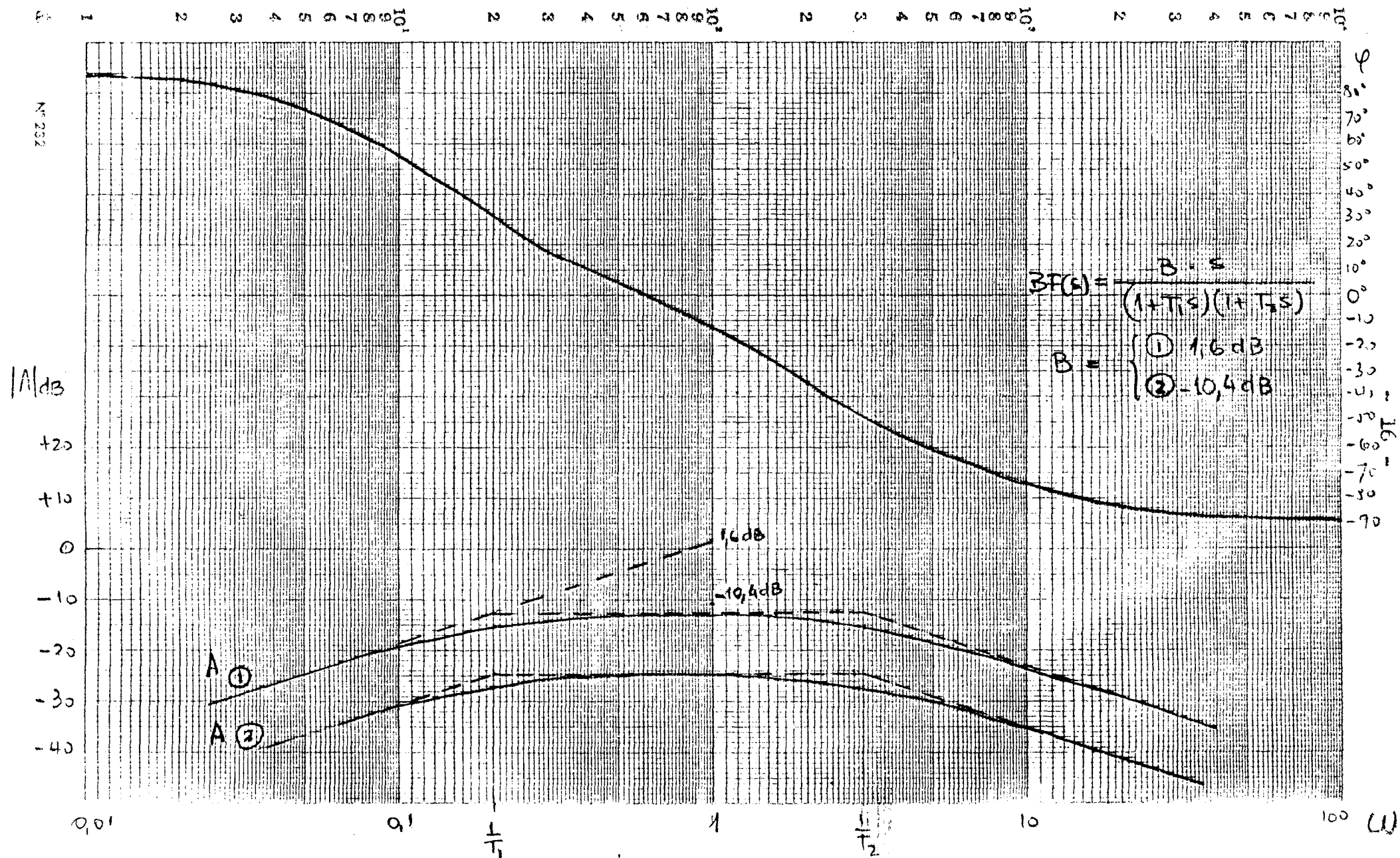
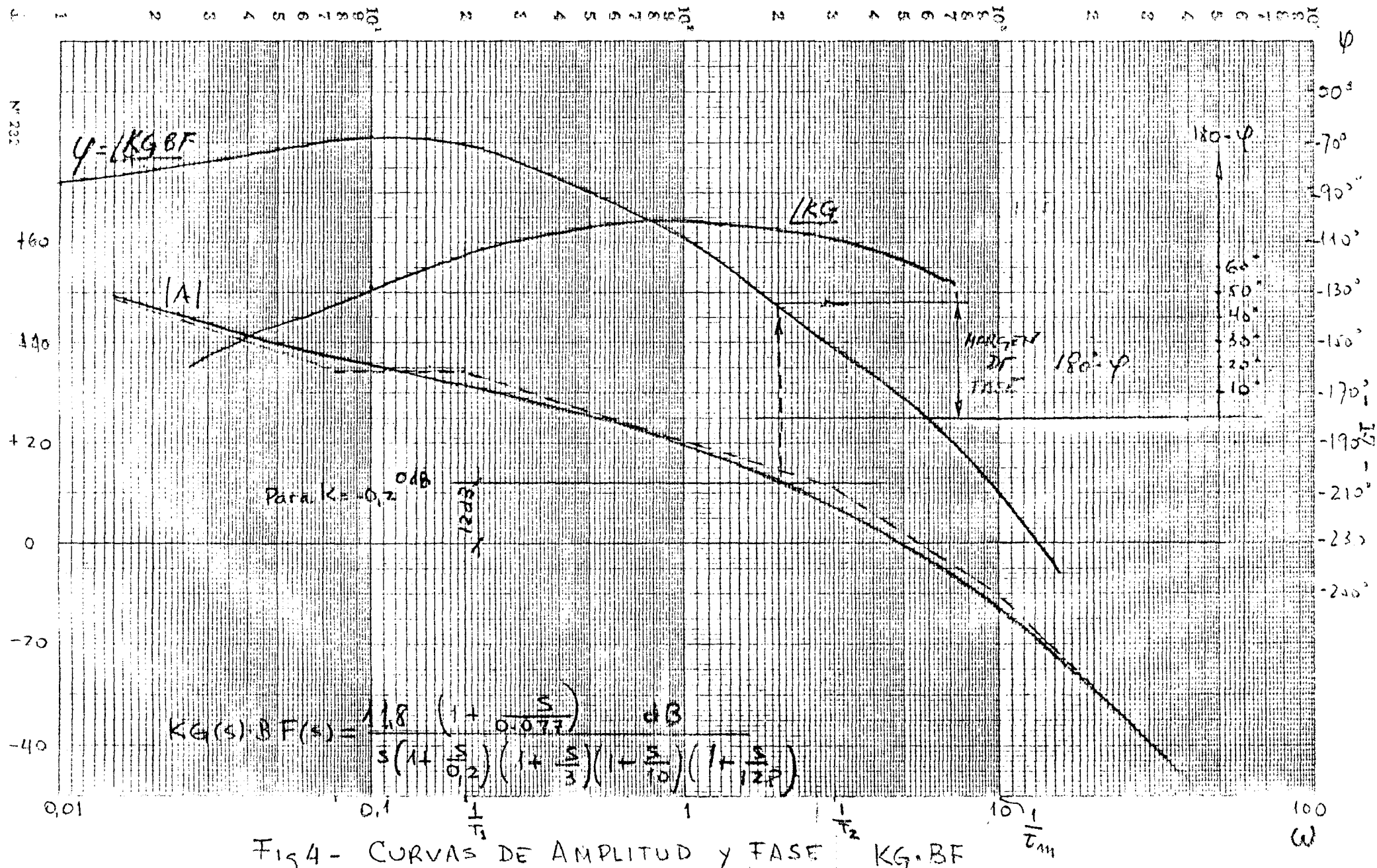


Figura 3 - Curvas de amplitud y fase del periodómetro



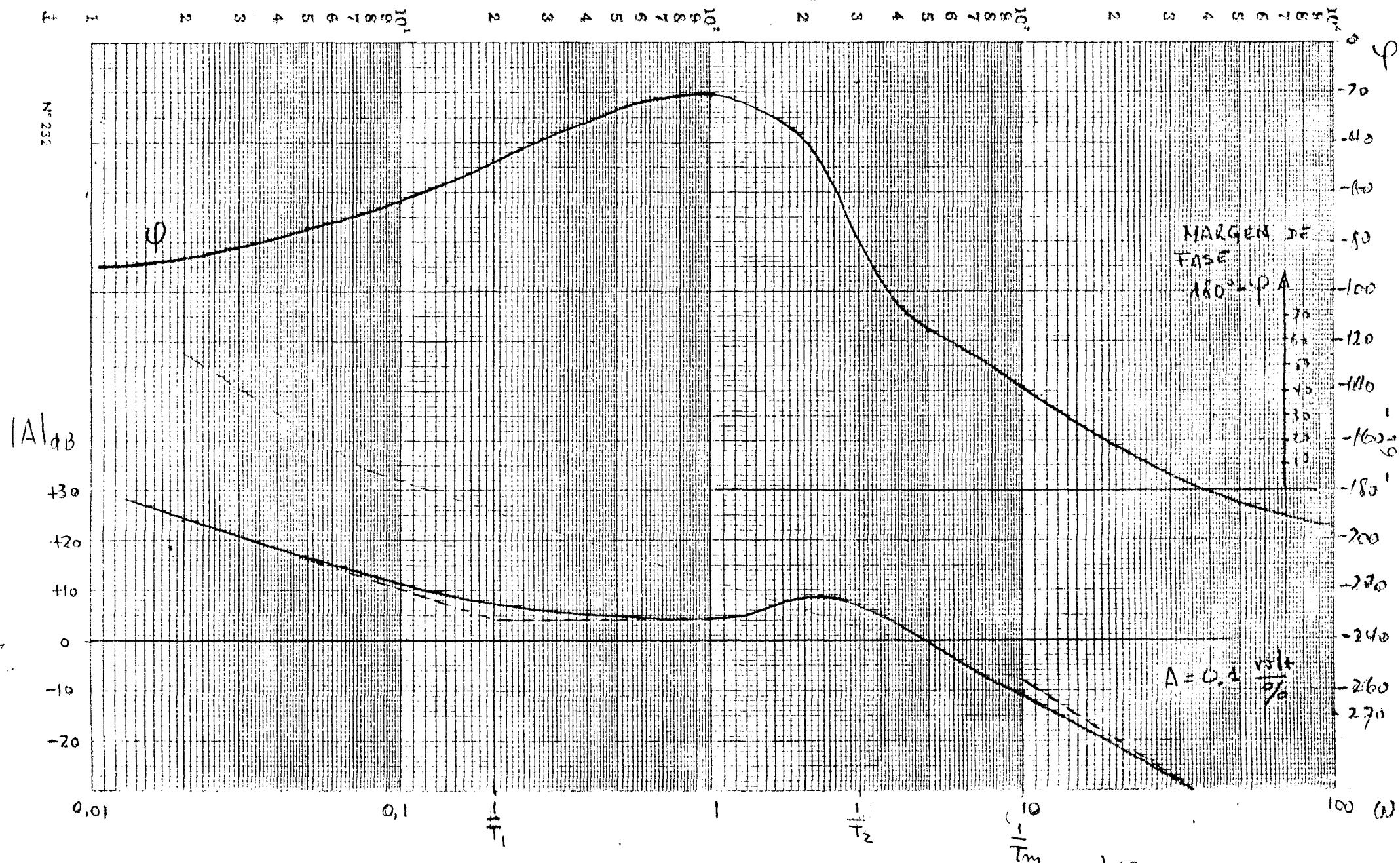


FIGURA 6 - CURVAS DE AMPLITUD Y FASE $A = \frac{KG}{1 + KG BF}$

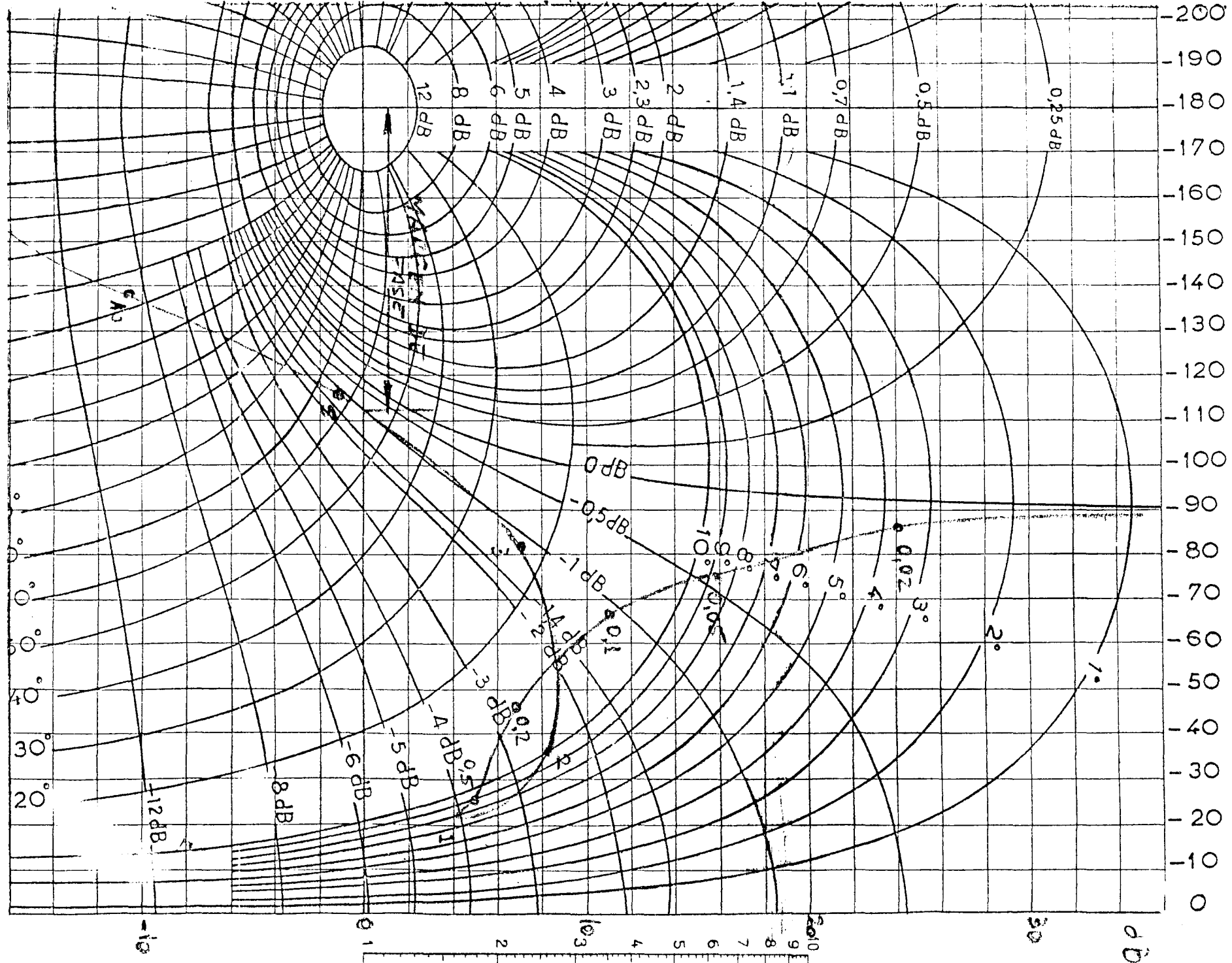


Figura 7. CURVA AMPLITUDE FASE A $\frac{KG}{mm \cdot sec}$

VI - CONCLUSIONES

La relación (3), muestra que el período de la evolución puede controlarse actuando sobre la ganancia del periodómetro o sobre el valor límite de la tensión C del comparador. El primer método no es adecuado, pues ello modifica la estabilidad del lazo interno de realimentación. De ahí que la segunda alternativa sea la que presenta mejores posibilidades.

En cuanto a la influencia que sobre el sistema agrega la realimentación de la señal de período, vemos que el avance de fase que produce la diferenciación (fig. 4) no se hace sentir mucho más allá de la frecuencia $\frac{1}{T_1}$, alcanzando los 45° a 0,1 c/seg.

Esta constante de tiempo no puede hacerse excesivamente pequeña vista la necesidad de filtrar los valores fluctuantes de la señal del medidor de período.

Por lo tanto la ganancia de la rama directa K, no puede aumentarse más allá de un cierto límite, confiando en la acción estabilizadora de la realimentación de período. Finalmente aparece también la constante de tiempo T_2 y la fase alcanza rápidamente los 180° (hacia los 6 ciclos/seg)

-.--.-.-.-.-.-

REFERENCIAS

- 1 Génie Atomique, Vol II Electronique et Pilotage des Réacteurs, chap. XIX.
- 2 M.A. Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plants, capít. 4; Mac Graw Hill 1961, 2a. edición.
- 3 J.M. Harrer, Nuclear Reactor Control Engineering, cap. 8, Van Nostrand, 1963.
- 4 G. Thaler- R. Brown, Servomechanism Analysis, Mac Graw Hill, 1953 capítulo 12.
- 5 J.G. Truxal, Control Engineer's Handbook, sección 2. Mac Grav Hill 1958.
