

ESTUDIO DINAMICO DEL LAZO DE CONTROL DE LA POTENCIA DEL
REACTOR EN LA C.N.A

J. CASTAÑO - J.R. LORENZETTI

1. GENERALIDADES:

El modo normal de operación de la CNA1 corresponde al denominado seguimiento del reactor por la turbina. En este modo de funcionamiento, el valor de referencia de la potencia del reactor se ajusta al valor fijo deseado de acuerdo a las exigencias de demanda, y es la turbina la que debe adaptarse a las condiciones impuestas por el reactor, de manera de mantener la presión del sistema secundario en un valor igual al de set point.

La acción de la planta sobre el reactor se reduce a las variaciones de reactividad producidas por las variaciones de temperatura de combustible, refrigerante y moderador.

No se han tenido en cuenta en este análisis la influencia de la presión del sistema primario sobre la reactividad del núcleo.

Para el estudio realizado se ha supuesto un sistema de control de presión del generador de vapor rápido y de alta ganancia, por lo que en general resultan variaciones muy reducidas en la presión del generador de vapor.

Dos tipos distintos de análisis se han realizado:

- Análisis en el dominio del tiempo empleando el programa de simulación SIMAT(1).
- Análisis en el dominio de frecuencia mediante el programa BODEC(2), ambos desarrollados en la Gerencia de Ingeniería.

2. ANÁLISIS TEMPORAL

Para el análisis temporal se han realizado

ensayos partiendo del 100% de potencia y añadiendo un salto escalón en la demanda de carga del reactor, del 10%.

Estas simulaciones se han realizado suponiendo que no existe limitación en cuanto a la potencia máxima que puede suministrar el reactor y en cuanto a las acciones de seguridad que se desencadenan al sobrepasar límites de temperatura y presión en el refrigerante.

De la misma forma se considera admisible una variación tipo escalón en la demanda de carga, el cual si bien es útil para obtener una respuesta indicativa, apta para el análisis de estabilidad del lazo de control, no responde a la realidad, ya que en la práctica, el rate de crecimiento del set point de potencia se encuentra limitado superiormente. Por esta razón, a continuación de la simulación del comportamiento a un salto en la demanda, se ha realizado la simulación de la respuesta a un crecimiento lineal de la demanda, con un rate máximo de variaciones del 0,5%/seg entre el 90 y el 100% de potencia.

Este último ensayo corresponde a una evolución posible de la planta, ya que se encuentra dentro de las limitaciones impuestas por el sistema.

la simulación presenta las alinealidades del proceso pero no tiene en cuenta las limitaciones de variaciones de variables de planta con lo que el comportamiento resulta comparable con el análisis frecuencial que es lineal.

3. ANALISIS FRECUENCIAL

En la figura 3-1, partes A y B, puede verse el diagrama en bloques del lazo de control analizado juntamente con el sistema del circuito primario de transporte de calor y el moderador.

En el lazo analizado, se asume una excitación de entrada, en el error de potencia porcentual DPW, siendo la variable de salida a lazo abierto, la potencia calibrada PWIST.

En general se han utilizado las mismas ecuaciones que las del modelo que calcula la respuesta en el tiempo, con las siguientes diferencias:

3.1 - Cinética del reactor.

Las ecuaciones del reactor han sido linealizadas en el entorno del estado de plena potencia, resultando las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\rho}{\ell^*} \phi_0 - \sum \frac{dC_i}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell^*} \phi - \lambda_i C_i \quad (2)$$

Reemplazando (2) en (1):

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\rho}{\ell^*} \phi_0 - \sum \frac{\beta_i}{\ell^*} \phi + \sum \lambda_i C_i \quad (3)$$

y aplicando la transformada de Laplace a (2) y (3):

$$C_i(s) = \frac{\frac{\beta_i}{\ell^*} \phi(s)}{\lambda_i + s} \quad \phi(s) = \frac{\frac{\phi_0}{\ell^*} \rho(s) + \sum \lambda_i C_i(s)}{\sum \frac{\beta_i}{\ell^*} + s}$$

que son las ecuaciones que aparecen en el diagrama de la figura 1-A donde el valor PKN corresponde a un flujo neutrónico normalizado en % respecto de los valores nominales y PK corresponde a la potencia en KW equivalente.

3.2 - Accionamiento de las barras de control.

Dado un error de potencia DPW, la acción de control será proporcional al error y a su derivada, ya que el regulador de potencia es de tipo P-D.

$$A_c = DPW(k_1 + k_2 s)k_3$$

En los ensayos se ha supuesto los siguientes valores:

$$k_1 = 1.0$$

$$k_2 = 0.1$$

$$k_3 = 10^{-5}$$

El modelo representa el sistema de accionamiento de barras como un retardo simple de primer orden, siendo la velocidad de variación de reactividad de la barra:

$$VRST = \frac{Ac}{1 + \tau, s}$$

En donde el valor de τ , se ha establecido en 2.5 sec y corresponde a la constante de tiempo de establecimiento de una determinada velocidad, supuesto un salto escalón en la variable de control Ac .

La variación de reactividad producida por el movimiento de las barras de control está limitada en ambos sentidos a un valor máximo $VSTM$, preestablecido.

Esta limitación implica una saturación en el sistema de control que transforma al mismo en no lineal.

Dadas las características eminentemente lineales del análisis frecuencial, se ha buscado una aproximación lineal para saltos escalón del 10% en la demanda de potencia que represente la limitación en la velocidad de movimiento de las barras de control.

Si un incremento en la demanda de potencia exige una variación de reactividad $\Delta \rho$, entonces el tiempo que demorará la reactividad en alcanzar ese valor será:

$$T = \frac{\Delta \rho}{VSTM}$$

donde $VSTM$ es la máxima velocidad de variación de reactividad.

El intervalo de tiempo en que se alcanza el 63% del valor final, corresponde a una constante de tiempo equivalente

$$\tau_e = 0.63 \frac{\Delta \rho}{VSTM}$$

La figura 3-2 muestra el análisis efectuado, en donde se aprecia como se aproxima la respuesta temporal (con línea llena) por la exponencial (con línea punteada).

Como resultado de esta aproximación, la variación de reactividad $\Delta \rho_0$ puede expresarse mediante la siguiente ecuación

$$\Delta \rho_0 = \frac{VRST}{s(1 + Z_e s)}$$

En la tabla I, se calculan las constantes de tiempo equivalentes de acuerdo a las limitaciones de velocidad impuestas.

TABLA I

VSTM(seg ⁻¹)	Z_e (seg)
2×10^{-4}	2.5
4×10^{-5}	12.5
2×10^{-5}	25
1×10^{-5}	50

4. EFFECTOS DE LOS COEFICIENTES DE REACTIVIDAD.

En estos ensayos no se ha considerado, como hemos dicho anteriormente, el coeficiente de reactividad por variación de presión del sistema primario:

$$\frac{d\rho}{dP} \left[\frac{P_H}{A_{TA}} \right] = 0.0$$

Se ha asignado en este análisis, los siguientes valores a los coeficientes de reactividad por temperatura, según se detallan en la tabla II (3)

TABLA II

	Ensayo 1	Ensayo 2	
$\frac{\delta P}{\delta T_n}$	-0.1×10^{-4}	0.0	PU/°C
$\frac{\delta P}{\delta T_R}$	-0.56×10^{-6}	0.0	PU/°C
$\frac{\delta P}{\delta T_m}$	-0.12×10^{-5}	0.0	PU/°C

La figura 4-1 representa el espectro de amplitud VS frecuencia y el diagrama de fase VS frecuencia en donde puede observarse el efecto estabilizador de dichos coeficientes de temperatura sobre la respuesta dinámica del sistema.

Nótese que para el caso de coeficientes negativos de temperatura la fase total de la transferencia a lazo abierto es de -90° , mientras que en el caso de coeficientes nulos, es decir sin acoplamiento al sistema térmico, dicha fase es de -180° .

Este efecto produce una gran diferencia en el margen de fase disponible.

La figura 4-2 muestra la comparación entre ambas respuestas en el diagrama de Nyquist.

Puede observarse en dichos diagramas que para el caso de coeficientes nulos se obtiene un pico de la respuesta frecuencial de lazo cerrado que supera el 50%, este pico en la respuesta frecuencial no se observa en el caso de coeficientes de reactividad negativos.

Las figuras 4-3-1 corresponden a la respuesta temporal del sistema con coeficientes de reactividad nulos, mientras que las figuras 4-3-2 corresponden a un ensayo con coeficientes de temperatura negativos.

Como se puede observar, la primera presenta un "overshoot" del orden del 50% del salto escalón, mientras que la segunda corresponde a una respuesta amortiguada por encima del valor crítico.

Otra interesante conclusión que surge de la comparación entre los valores de uno y otro análisis, es la que resulta al considerar el valor de reactividad ρ correspondiente a la posición de las barras de control. Se observa que en el caso de existir acoplamiento al sistema térmico, con coeficientes negativos de temperatura, se requiere un desplazamiento en el nivel estacionario de posición de la barra para compensar los efectos de las mayores temperaturas en el reactor.

Se han calculado los márgenes de fase y ganancia los cuales se comparan en la tabla III para ambos casos planteados:

TABLA III

	Coeficientes nulos		Coef. Negat.
Margen de ganancia	dB	36	42
Margen de fase	°	31	79
Overshoot en la potencia neutrónica	% de sobre-elongación	66	- - -

5. ANALISIS DEL EFECTO DINAMICO DE LA VELOCIDAD DE MOVIMIENTO DE LAS BARRAS DE CONTROL.

La figura 5-1 presenta el diagrama de Nyquist comparativo para distintos valores límites de velocidad de las barras de control, calculado mediante el análisis frecuencial según la aproximación lineal del párrafo 3-2.

Se observa que la limitación en la velocidad tiene, desde el punto de vista dinámico, un fuerte efecto desestabilizante.

Según el diagrama, las respuestas correspondientes a 10^{-5} y 2×10^{-5} , presentarían un comportamiento inestable.

Las figuras 5-2-1, 5-2-2, 5-2-3, muestran el comportamiento temporal para velocidades límites de barras de 4×10^{-5} /seg, 2×10^{-5} /seg respectivamente.

Puede observarse que cuando se disminuye el valor límite de velocidad desmejora la estabilidad del sistema.

Correlacionando los diagramas de Nyquist con los diagramas temporales, puede apreciarse que si bien hay un deterioro en la estabilidad, no es tan agudo como el que surge del análisis frecuencial.

Esto se debe a que en este último se ha sido conservativo, en la forma en que se ha realizado la aproximación lineal. Observando la figura 3-2 la respuesta exponencial queda "por debajo" de la respuesta real.

Por otra parte, el análisis anterior es válido mientras el sistema está saturado, ya que apenas el movimiento de las barras deja de estar limitado a su velocidad máxima el sistema pasa a ser el representando en la figura 4-2, el cual es estable y sobreamortiguado.

Debido a tal cambio en sus características, es que el sistema responde inicialmente en forma inestable al salto escalón, dependiendo el grado de inestabilidad de la magnitud del salto.

Cuando el sistema abandona la zona de saturación correspondiente al límite de velocidad de movimiento de barras, este converge a su valor estacionario comportandose con las características del sistema sin saturación por velocidad.

6. CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos por el análisis temporal y frecuencial son compatibles entre sí.

Como era de esperar los coeficientes térmicos de reactividad tienden a estabilizar el lazo y presentan, por lo tanto, respuestas temporales con menor overshoot, para las mismas condiciones de lazo.

Limitar la velocidad de las barras produce un efecto desestabilizante desde el punto de vista del lazo considerado y conduce al sistema a oscilaciones de baja frecuencia.

Las figuras 6-1 muestran una evolución para una demanda que sigue una rampa lineal de máximo rate de variación de potencia entre el 90% y el 100%.

Se observa que para una mayor velocidad de movimiento de barras el sistema responde en forma amortiguada, con un menor movimiento de barras hasta alcanzar el estado estacionario y con una pequeña mejora en la distancia crítica de ebullición.

REFERENCIAS

- 1) MODELO DE SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LA CNA
H. Gvirtzman, J. Castaño.
- 2) PROGRAMA PARA EL ANALISIS DE SISTEMAS POR EL METODO DE BODE.
J. Lorenzetti, E. Marzullo.
- 3) CNA COMPORTAMIENTO EN SERVICIO Y EN CASO DE PERTURBACIONES.
Bortolazzi, Hintergraeber, Huber.

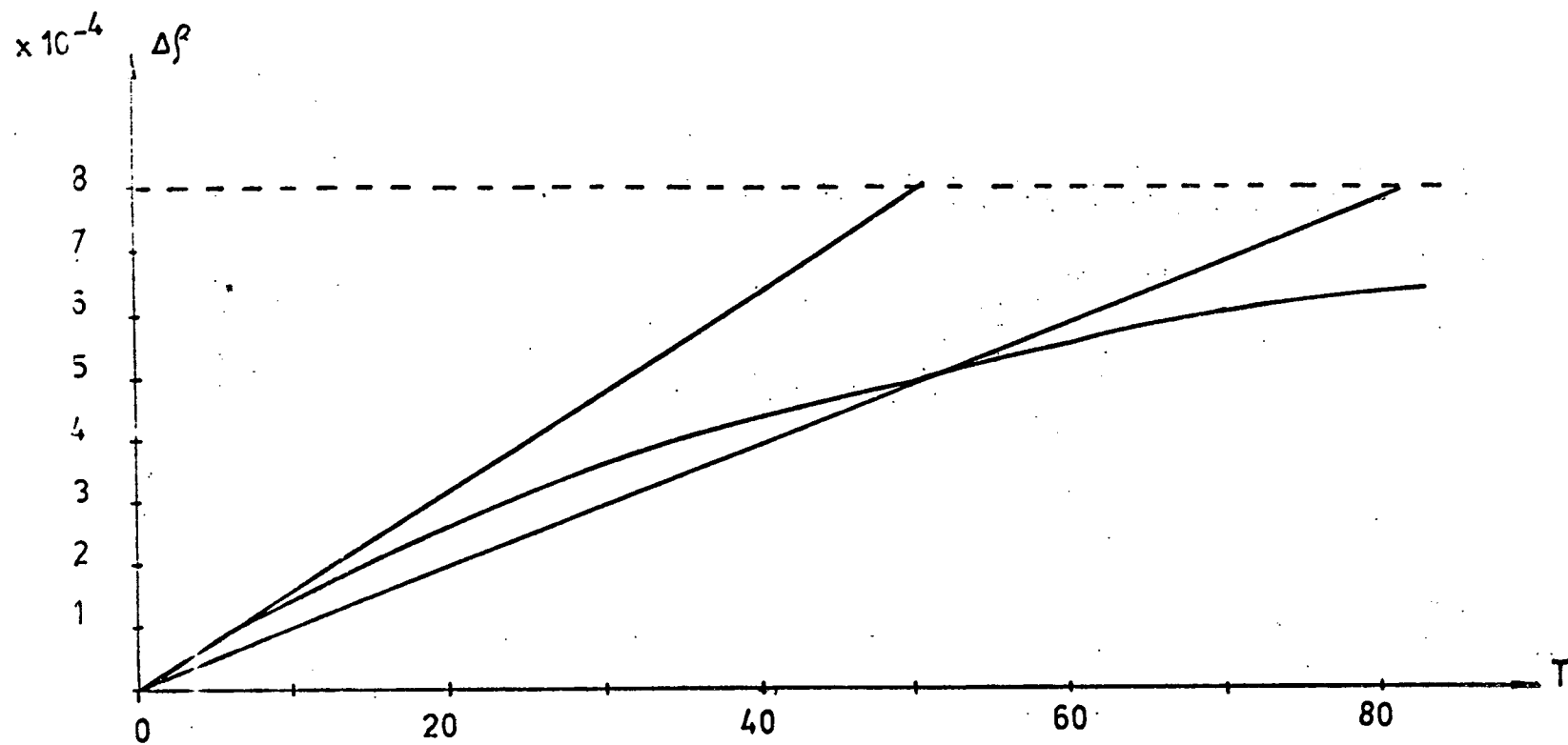


Fig 3-2

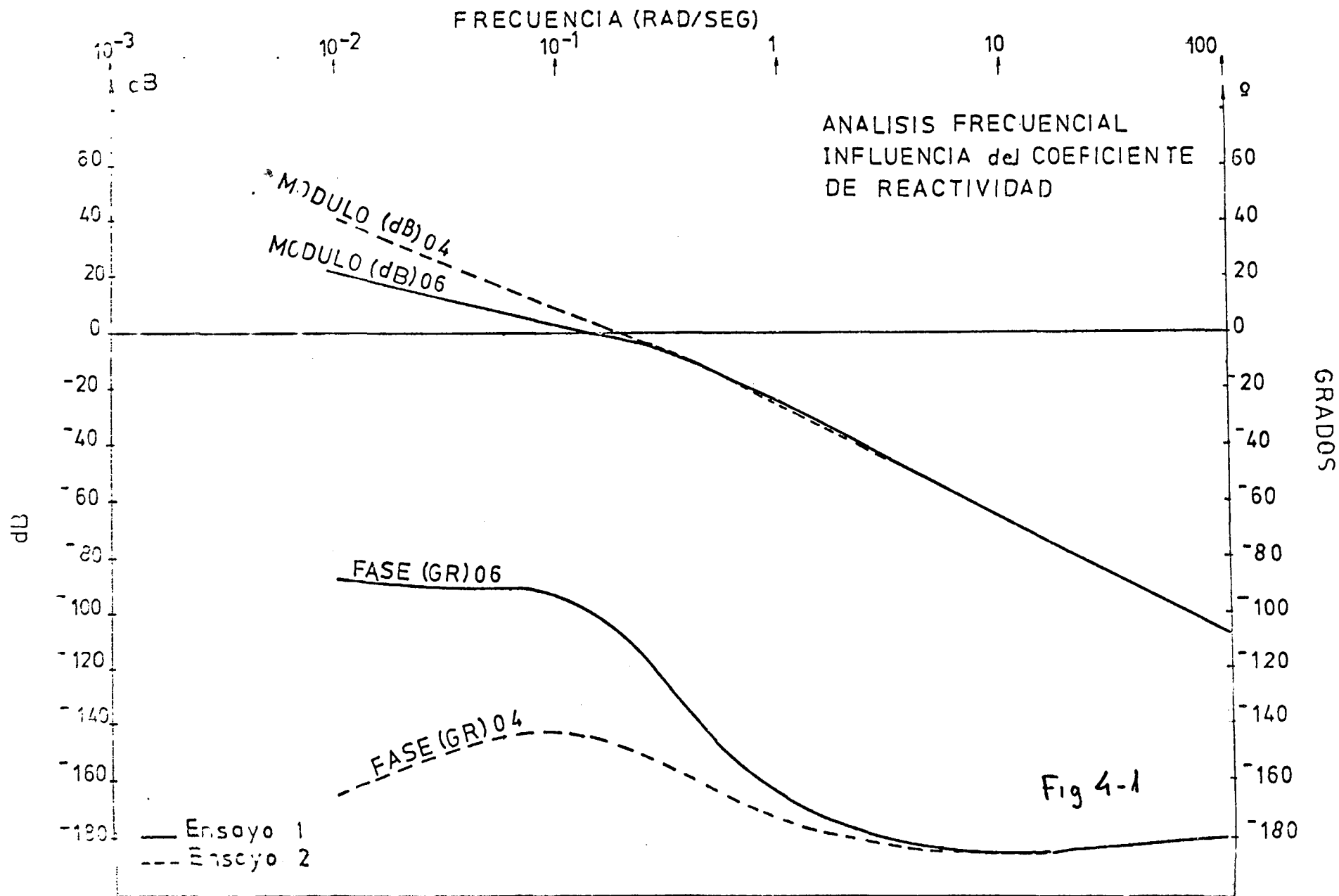


Diagrama de Nyquist

--- sin coeficiente de temperatura
— con coeficiente de temperatura

150

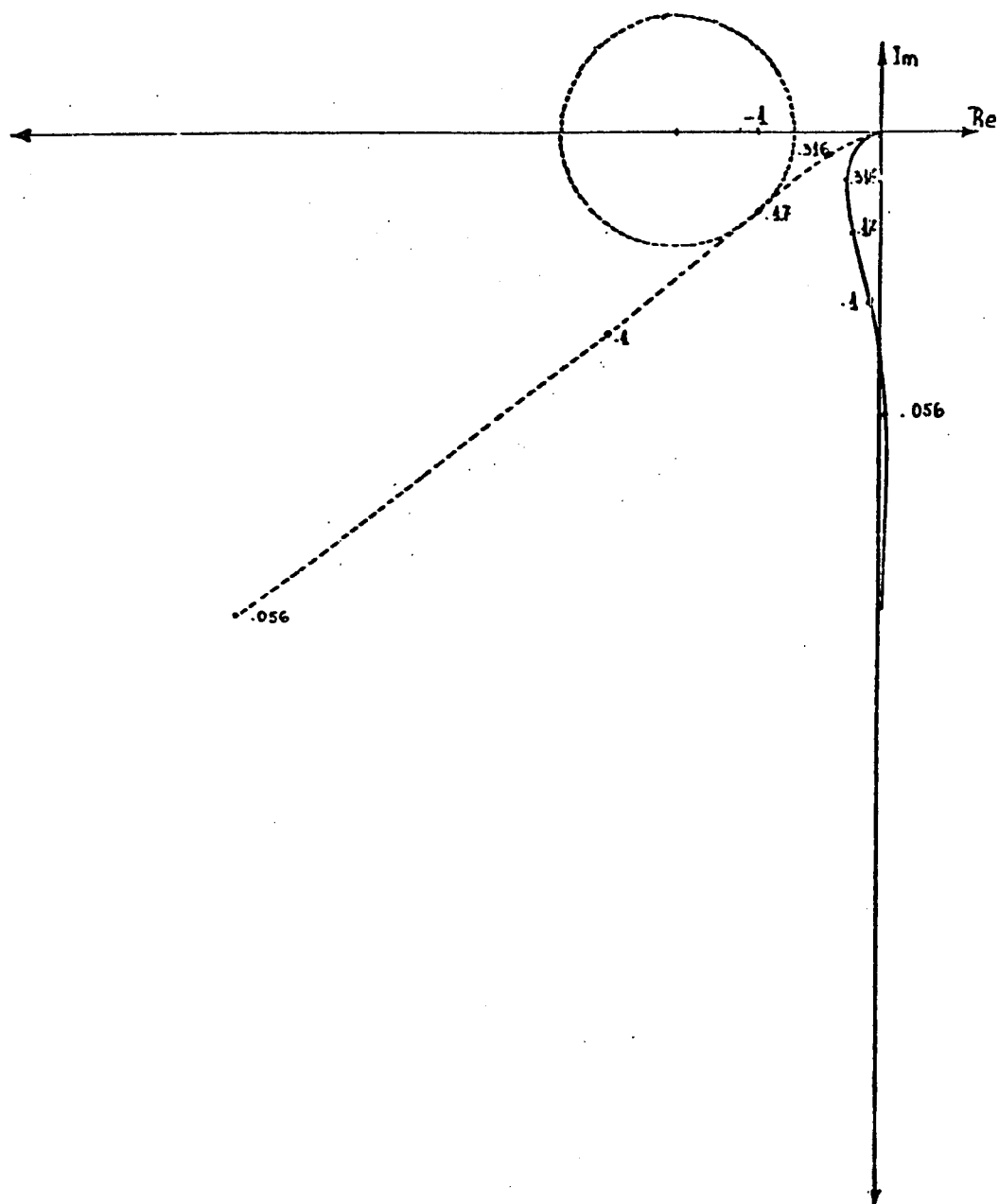
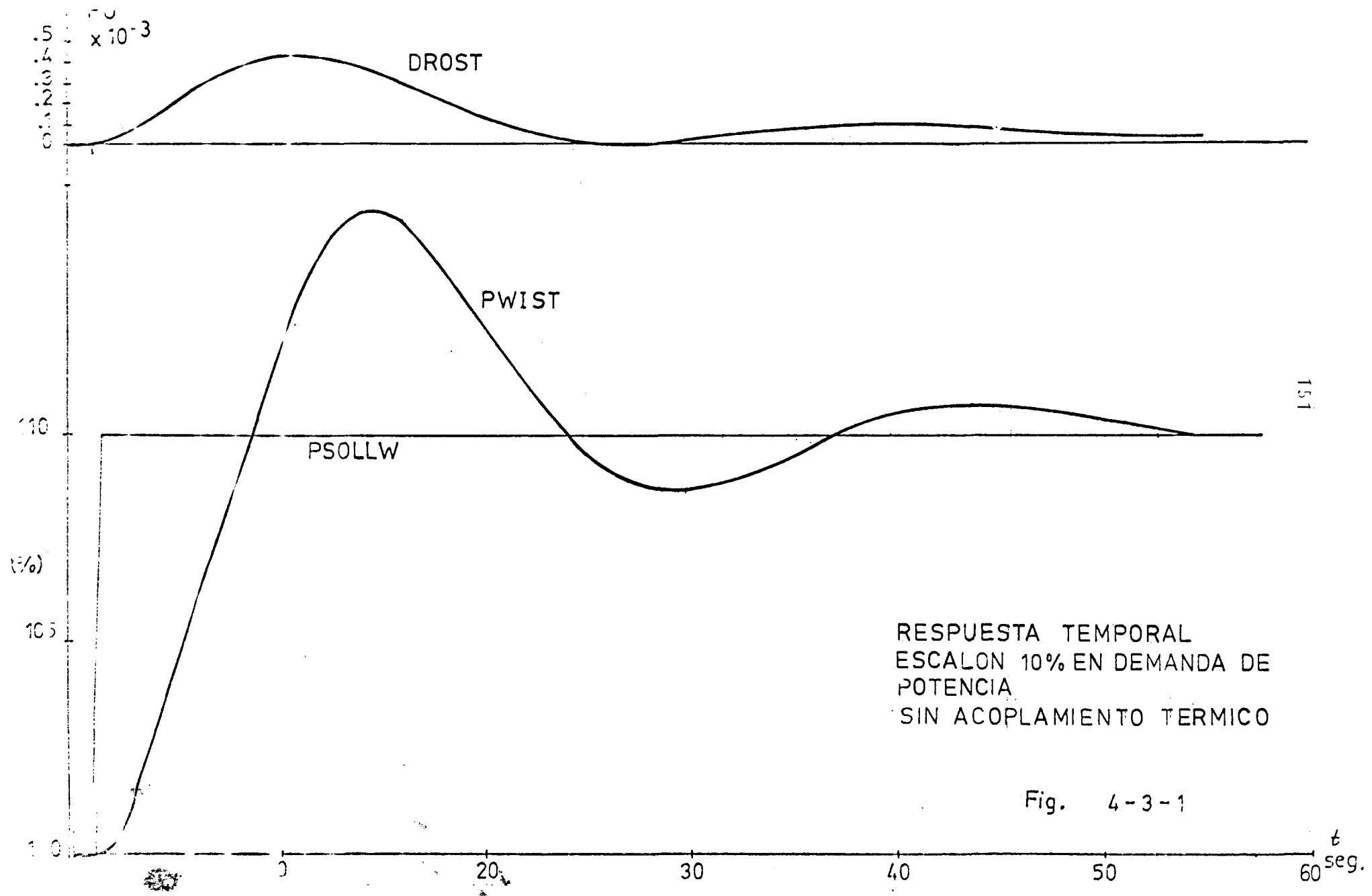
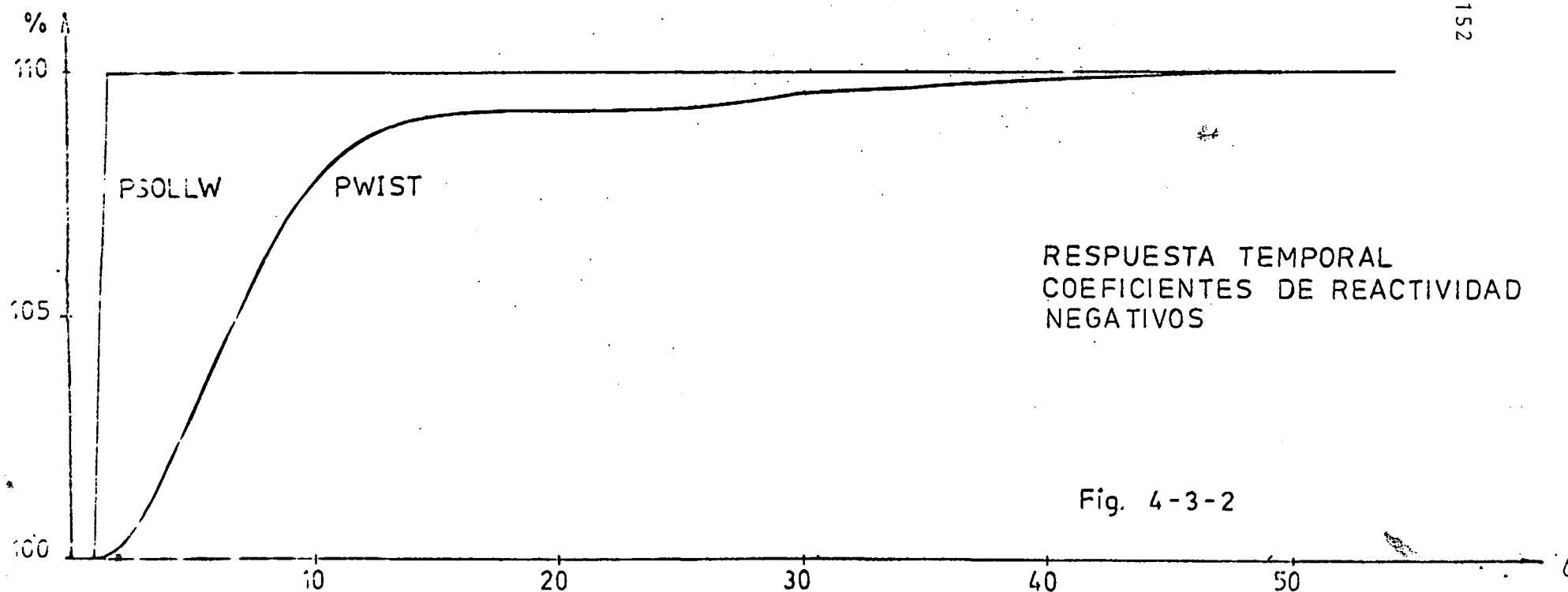
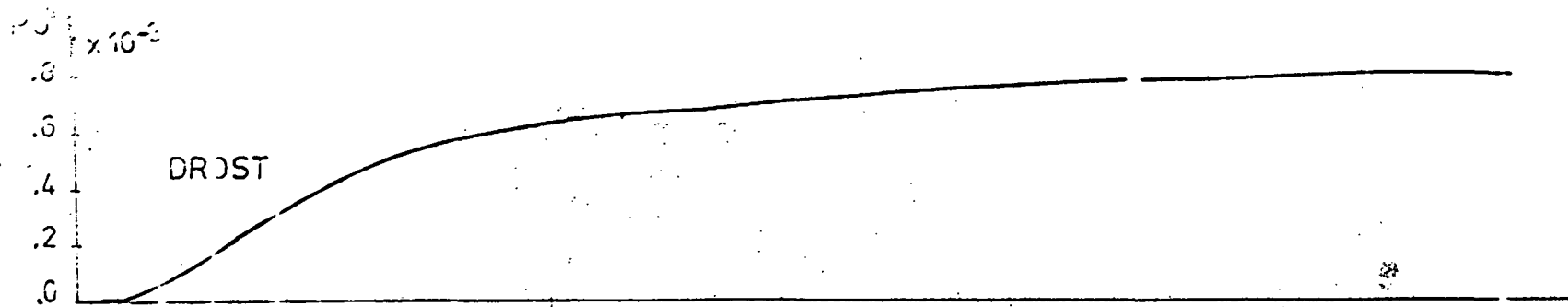


Fig 4-2





RESPUESTA TEMPORAL
COEFICIENTES DE REACTIVIDAD
NEGATIVOS

Fig. 4-3-2

Diagrama de Nyquist

- velocidad límite : 4×10^{-5} PU/seg
 --- velocidad límite : 2×10^{-5} PU/seg
 ... velocidad límite : 1×10^{-5} PU/seg

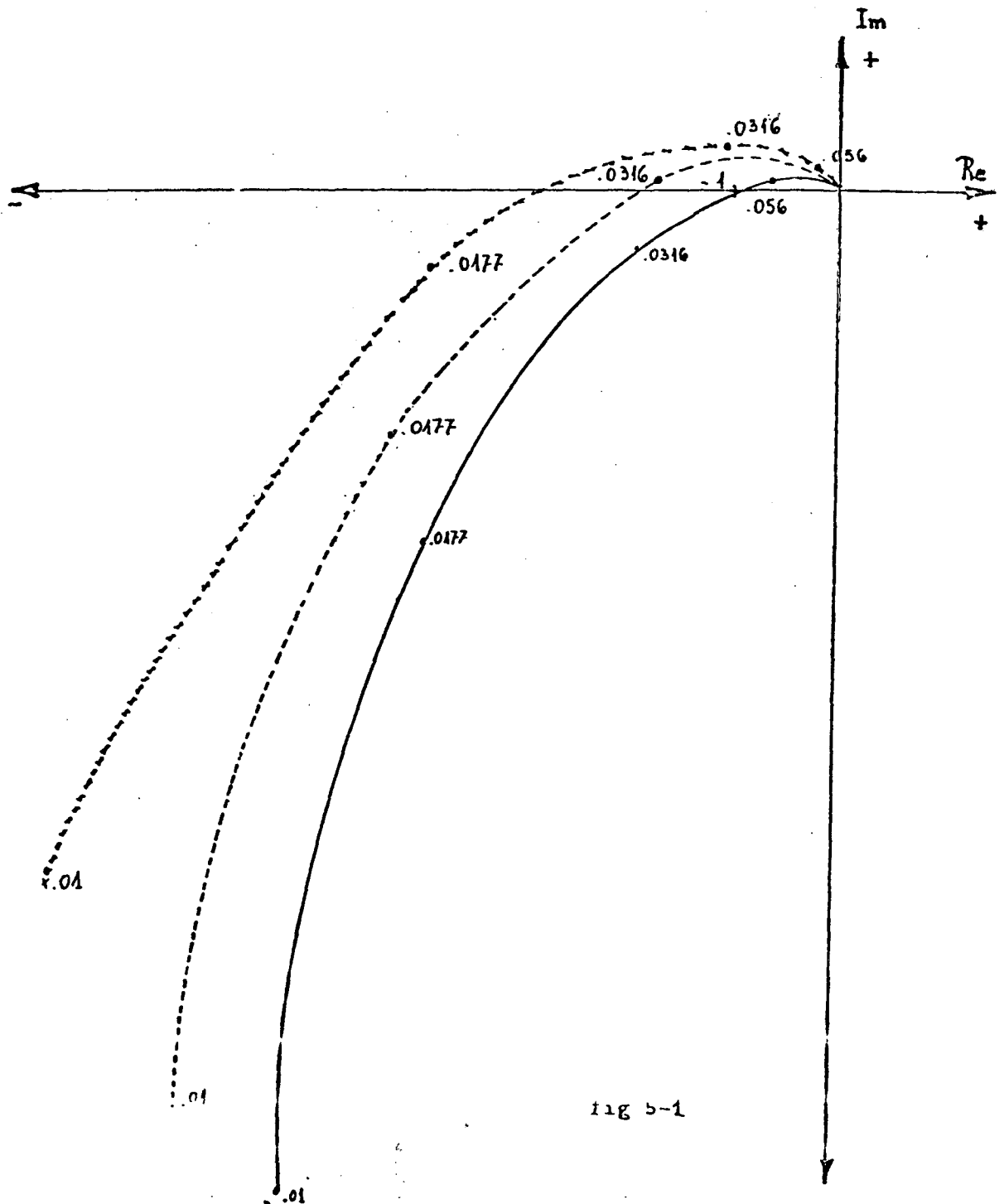
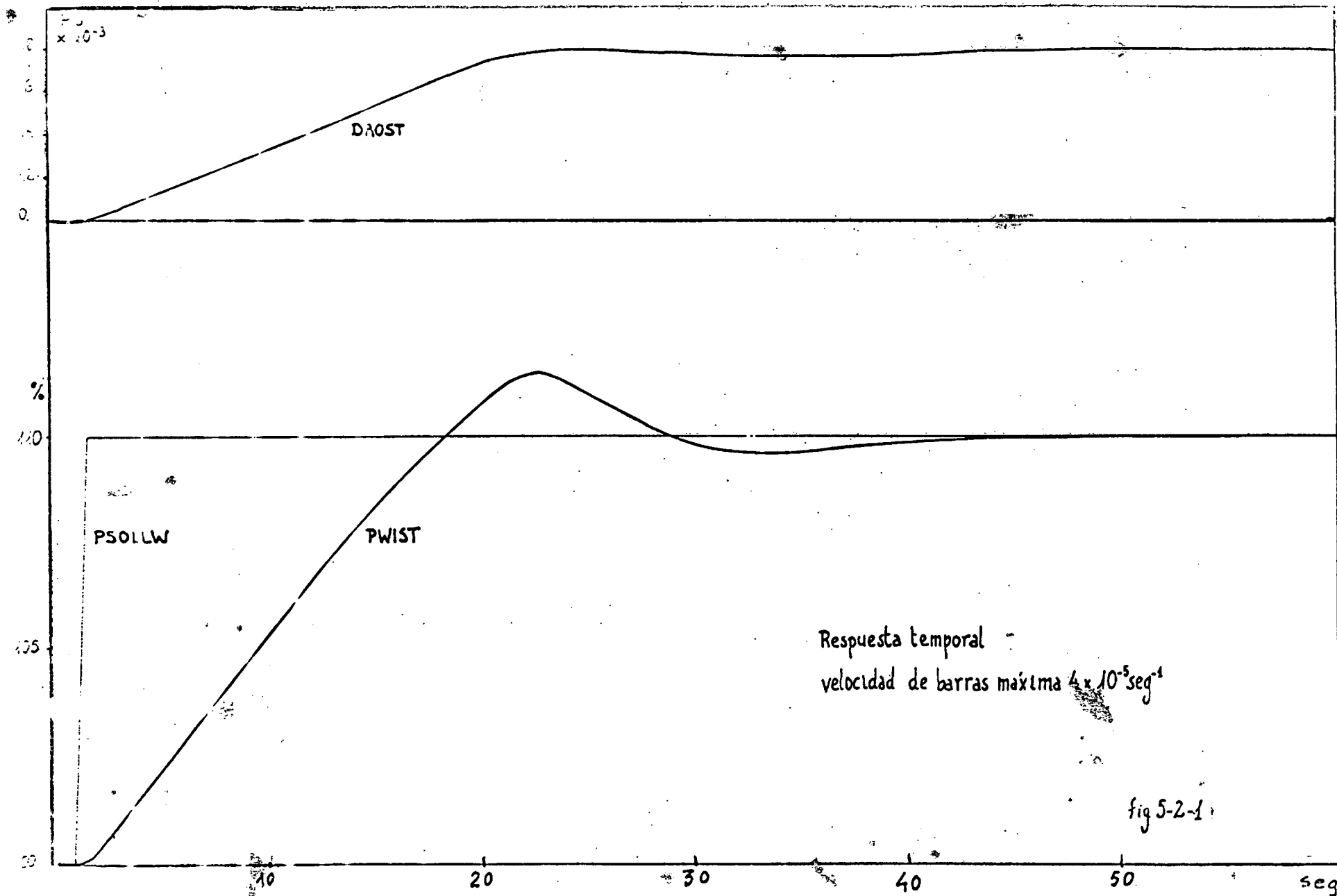
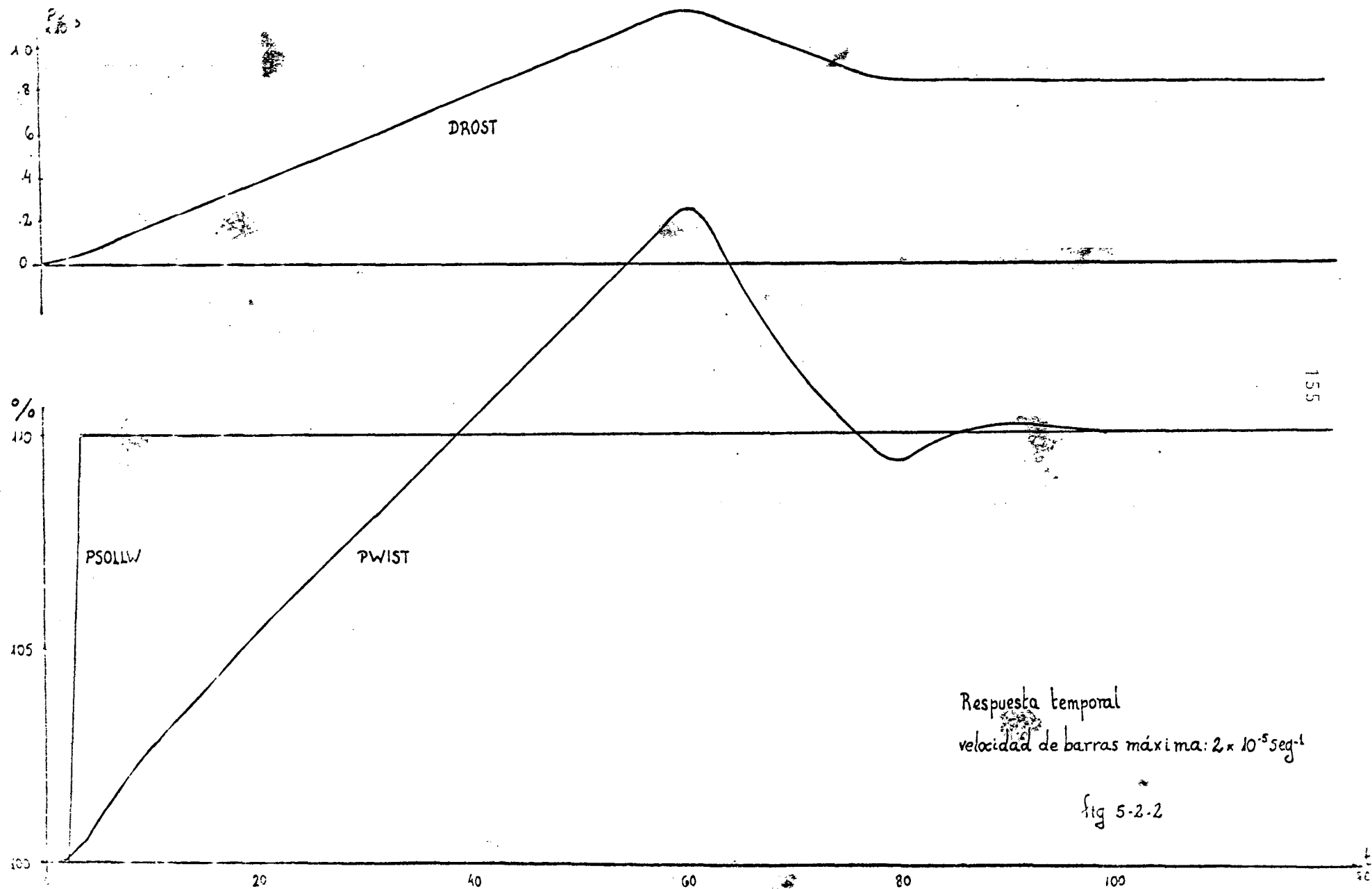


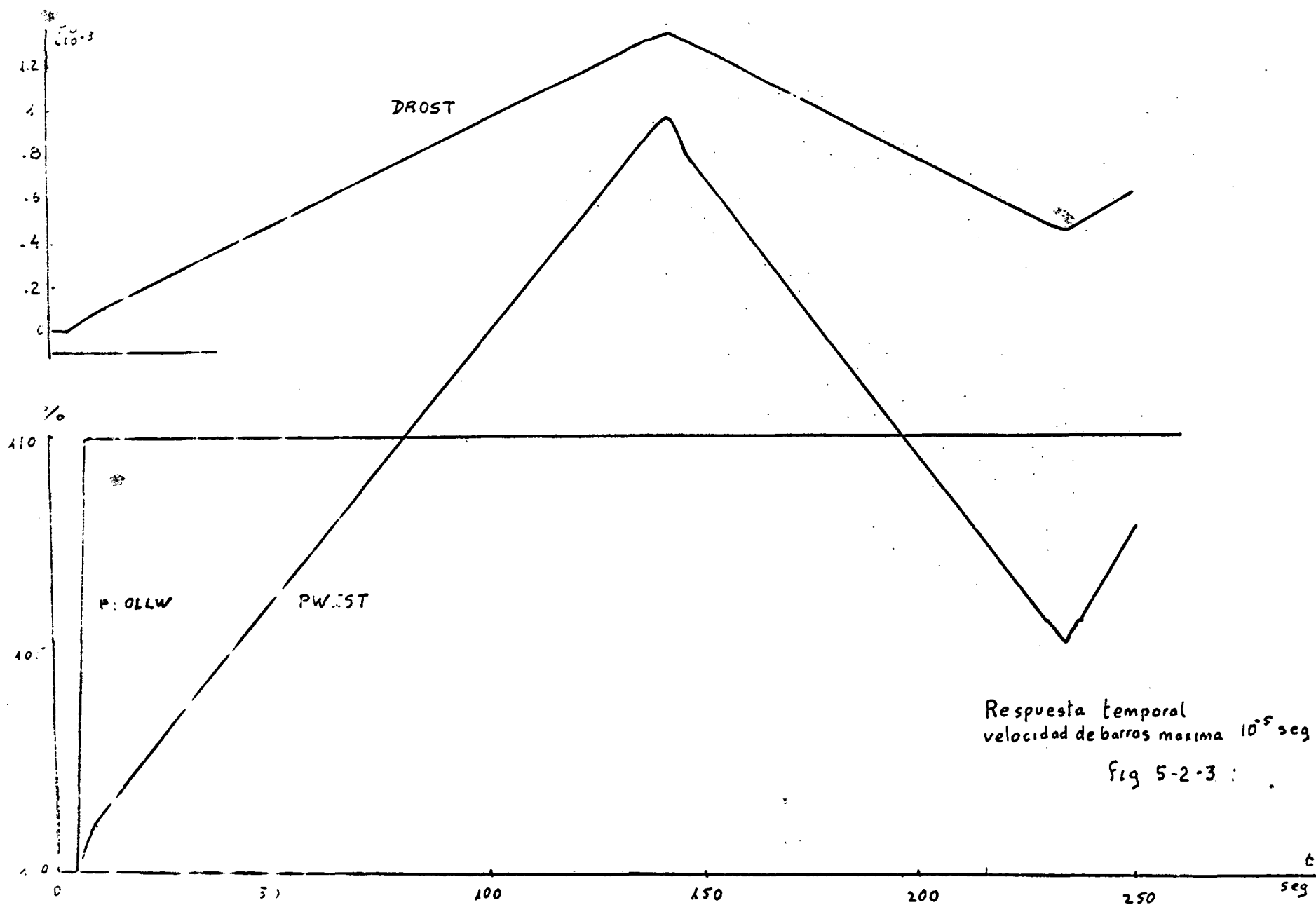
fig 5-1





Respuesta temporal
velocidad de barras máxima: $2 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$

fig 5-2.2



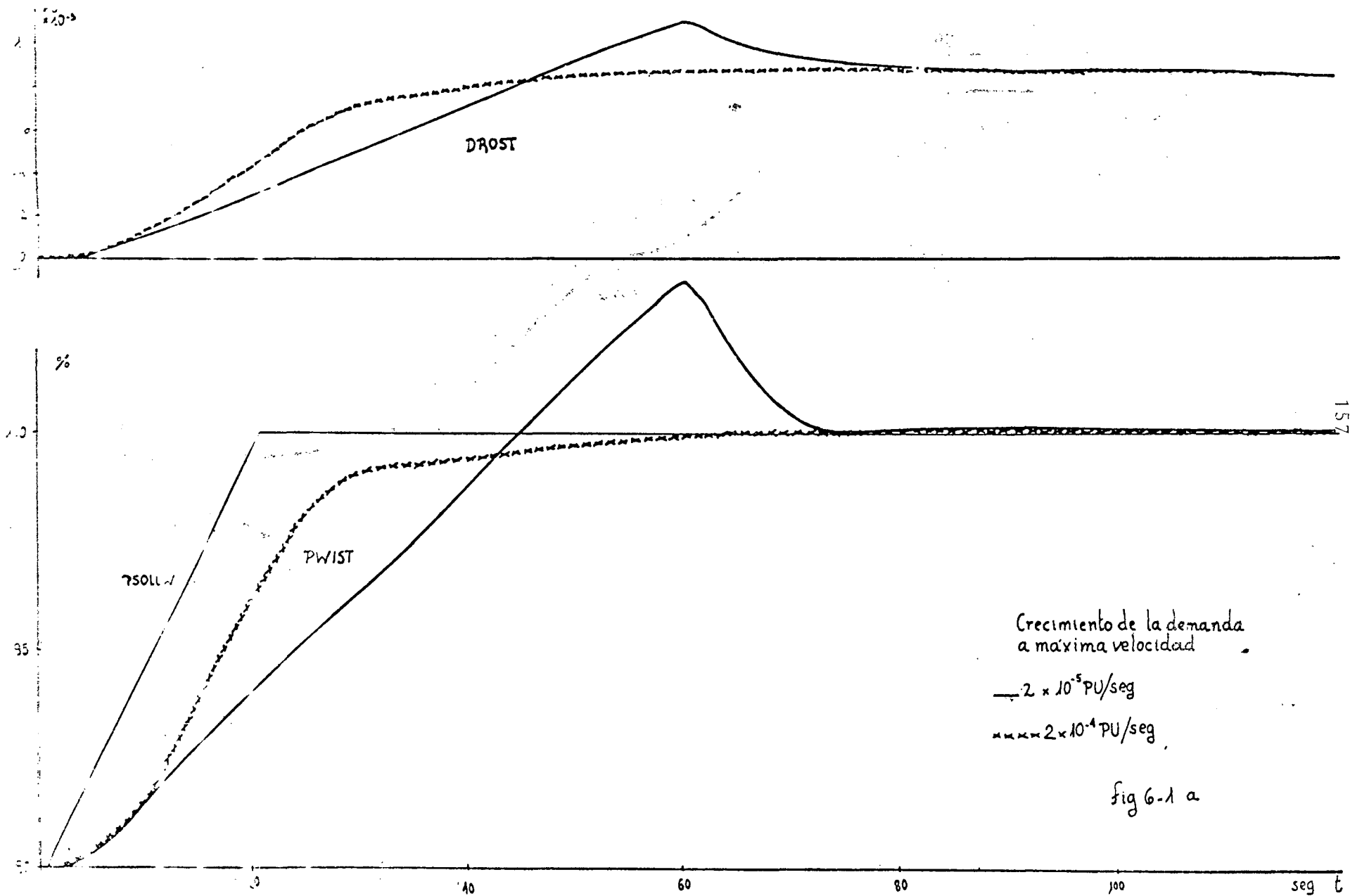


fig 6-1 a

