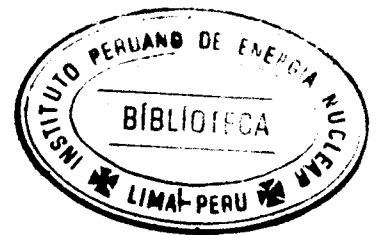
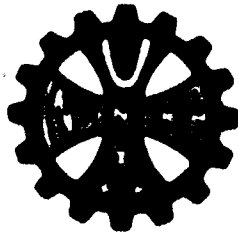


**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Programa Académico de Ingeniería Mecánica**  
**y Eléctrica**



**Sistema de Pilotaje Automático**  
**de un Reactor Nuclear**  
**TESIS**  
**Para Optar el Título Profesional de**  
**Ingeniero Electrónico**

**Presentada por**

**CESAR AUGUSTO PIZABRO CASTRO**

**PROMOCION 77 - 1**

**Lima - Perú**

**1980**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

AV. TUPAC AMARU SIN APARTADO 1201 TELEFONO 81-1670 - CABLES: UNI - LIMA PERU

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

PROYECTO PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRONICO

NOMBRE: César Augusto Pizarro Castro

CODIGO: 701067 E

PROMOCION: 77-1

**TITULO:** SISTEMA DE PILOTAJE AUTOMATICO DE UN REACTOR NUCLEAR.

**CONTENIDO:**


- Introducción
- 1.- Generalidades
- 2.- Descripción del Sistema
- 3.- Diseño
- 4.- Simulación
- Conclusiones
- Apéndice
- Bibliografía

  
 GRADUANDO


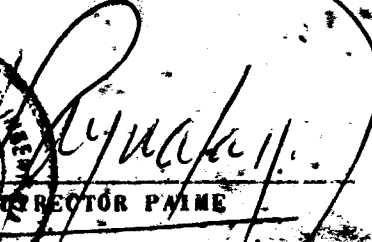
  
 PROFESOR ASESOR

Ing. Carlos Rider B.

Fecha: 20.05.80

Fecha: 19.05.80  
  
 DEPARTAMENTO DE Electricidad y Electrónica  
 JEFE  
 Ing. Darío Biella-Bianchi D.

Fecha 22-5-80

  
  
 DIRECTOR PRIME  
 Rector Reynafarje D.

A MI ESPOSA NELLY

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera hacer presente mi más profundo agradecimiento a las personas e Instituciones que me ayudaron a la concretización de este trabajo.

- Al Prof. Ing. Carlos Rider B. (Universidad Nacional de Ingeniería, Lima), quien accedió gustosamente a asesorar me en este trabajo.
- Al Ing. Miguel Mendoza B. (Instituto Peruano de Energía Nuclear, Lima), quien me propuso el tema de tesis y con todo entusiasmo me dió los primeros lineamientos de ella.
- Al Ing. Ferruccio Dall'osto (Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires), quien me brindó valiosas sugerencias para la culminación del trabajo.
- A la Prof. M.Sc. Eugenia Medico (Universidad Nacional de Ingeniería, Lima), quien me ayudo en la Corrida de los Programas en el Centro de Computo de la UNI.
- Al Lic. Quím. Ricardo Espinoza G. Jefe del RPO, por las facilidades brindadas para la realización del trabajo.
- A mis madres Inés y Dolores, quienes me alentaron en todo momento para la realización de este trabajo.
- Finalmente, al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) y a la Comisión Nacional de Energía Atómica Argentina (CNEA), Instituciones que me permitieron desarrollarme profesionalmente en el área del dominio de la Tecnología Nuclear.

## RESUMEN

El objeto de este trabajo de tesis es el proyectar un sistema de pilotaje automático para un reactor nuclear de investigación, tipo piscina.

Los estudios se realizan por medio de:


- 1º Estudio teórico de la estabilidad del sistema, el cual se analiza por métodos basados en la teoría de servomecanismos lineales.
- 2º Simulación del sistema, a fin de obtener las performances del sistema en las condiciones de funcionamiento real.

En el primer caso se realizan cálculos considerando tan sólo el reactor como de potencia cero y la teoría aproximada de un grupo de neutrones. En cambio en el segundo caso se introduce las no linealidades del sistema y se utilizan mayores variables (teoría de seis grupos, efecto de la temperatura, etc).

La combinación y discusión de los resultados obtenidos en ambos casos permiten determinar los valores óptimos y limitaciones aconsejables de los parámetros fundamentales del sistema, compatibles con unos márgenes apro-

piados en la ganancia y desplazamiento de fase de la señal desde el detector a la barra de regulación, con el fin de garantizar la debida estabilidad del sistema.

## INDICE

	PAGINA
INTRODUCCION	1
	
CAPITULO I	
GENERALIDADES	
1.1.- Física Elemental del Control de Reactores	5
1.2.- Objetivos del Pilotaje Automático	10
1.2.1.- Mantener constante la Potencia del Reactor	10
1.2.2.- Cambiar el nivel de Potencia	13
CAPITULO II	
DESCRIPCION DEL SISTEMA	
2.1.- Reactor Nuclear	14
2.1.1.- Reactor de Potencia Cero	14
2.1.2.- Reactor en régimen de Potencia: Efecto del Coeficiente de Temperatura	18
2.1.3.- Estudio de la Función de Transferencia global del Reactor con Coeficiente de Temperatura	20
2.2.- Sistema de Pilotaje Automático	22
2.2.1.- Selección de una Cadena de Regulación apropiada	22

2.2.2.- Mejora de las Performances	23
2.2.3.- Descripción del Sistema Propuesto	24
2.2.4.- Explicación Simplificada del Funcionamiento del Sistema	29

### CAPITULO III

#### DISEÑO

3.1.- Datos de la Planta y Especificaciones de Funcionamiento	31
3.1.1.- Datos de la Planta	31
3.1.2.- Principios que se aplican	31
3.2.- Selección de los Componentes del Lazo de Control	32
3.3.- Funciones de Transferencia de los Elementos del Sistema	36
3.4.- Estabilidad	43
3.4.1.- Bases del Análisis	43
3.4.2.- Estabilidad del Lazo Interno	45
3.4.3.- Estabilidad del Sistema	50
3.4.4.- Conclusiones	50

### CAPITULO IV

#### SIMULACION

4.1.- Introducción	54
4.2.- Modelo Matemático del Sistema	55
4.2.1.- Ecuaciones Físicas	55



4.2.2.- Definición de Variables	58
4.2.3.- Constantes y Parámetros	59
4.2.4.- Valores Iniciales de las Variables	60
4.2.5.- Valores Numéricos de las Constantes	61
4.3.- Programa de Ensayos	62
4.3.1.- Descripción de Ensayos	62
4.3.2.- Listado del Programa	62
4.4.- Resultados	65
4.4.1.- Presentación	65
4.4.2.- Ensayos	65
4.4.3.- Conclusiones	66
CONCLUSIONES	82
BIBLIOGRAFIA	84
APENDICE 1	
Ecuaciones Cinéticas del Reactor	86
APENDICE 2	
Función de Transferencia de un Reactor de Potencia Cero	89
APENDICE 3	
Reactor RP-10 - Instrumentación y Control	91
APENDICE 4	
Programa de Cálculo y Salidas de la Mini-computadora HP-9825 para Graficar el Dia-	

grama de Bode

95

INDICE DE TABLAS

101

## INTRODUCCION

En un reactor nuclear experimental de baja potencia y temperatura (RP-0), una vez obtenido el nivel de potencia deseado, éste tiende a mantenerse practicamente constante en tanto no se influye exteriormente sobre el reactor. En cambio, en un reactor de investigación de alto flujo neutrónico (RP-10) debido principalmente a los efectos de variación de temperatura, y envenenamiento por productos de fisión, se producen cambios de reactividad - que hacen variar el nivel de potencia, aún sin haber alterado exteriormente las condiciones del reactor ni haber movido las barras de control.

En estas condiciones, el control manual de un reactor, con miras a mantenerle a un nivel constante o a seguir las variaciones de un cambio de potencia, resulta - un trabajo tedioso que exige gran atención y experiencia - por parte del operador. Así por ejemplo cuando se desea - variar rápidamente el nivel de potencia, el operador debe actuar con especial cuidado y con cierta anticipación para prevenir que se originen transitorios de excesiva amplitud o duración que produzcan peligrosos accidentes.

De ello se deduce la necesidad de incrementar la instrumentación del reactor, dotándolo de un sistema de

pilotaje automático capaz de regular y mantener su nivel de potencia sin intervención del operador y siguiendo por sí mismo las variaciones de potencia que sean requeridas, todo ello con las debidas condiciones de seguridad.

El sistema de pilotaje automático constituye, con el reactor, un lazo cerrado. A todo aumento o disminución de potencia indeseada en el reactor ha de responder el sistema introduciendo o sacando, respectivamente, la barra de regulación para oponerse, lo más rápidamente posible a la perturbación señalada por el detector. La señal proporcionada por dicho detector y la que, en consecuencia, recibe la barra de regulación, deberán, pues, estar en oposición de fase.

Sin embargo la señal que parte del detector es traducida por el sistema de pilotaje automático en una orden de neutralización, que llega a la barra con un cierto e inevitable retraso, durante el que pueden variar las condiciones del reactor. Por otra parte, también el reactor responde con retraso y evoluciona en forma muy particular tras una variación de reactividad, motivada por el movimiento de las barras de control o por otra causa cualquiera.

Debido a ello, puede llegar a provocarse en determinadas circunstancias una autooscilación del sistema. En tales condiciones, el retraso en la circulación de señales y órdenes en el ciclo cerrado será tal, que la

extracción de la barra se produzca cuando la potencia del reactor está aumentando en lugar de hacerlo cuando está disminuyendo, lo que tendería a reforzar la amplitud de la oscilación. En esta situación se dice que el sistema se ha hecho inestable; hay que evitar que ello suceda, porque las consecuencias pueden resultar catastróficas.

Para analizar la estabilidad del sistema se requiere el conocimiento previo de la función de transferencia, de cada uno de los elementos que integran el sistema de pilotaje automático. De la adecuada combinación de estas funciones de transferencia se obtiene la de todo el sistema, desde el detector a la barra de control. La combinación de ésta última con la función de transferencia del reactor, nos permitirá determinar las óptimas condiciones de estabilidad. El análisis de tales funciones, que proporciona una indicación del comportamiento del sistema, puede realizarse de varios modos. Suelen utilizarse a menudo métodos gráficos, como los que se basan en las representaciones de Bode y de Nichols.

Una comprobación experimental del comportamiento del sistema y la realización de los ajustes finales, a fin de verificar que se cumplan las especificaciones de diseño pre-establecidas, se lleva a cabo simulando el sistema en un computador digital mediante un programa adecuado (CSMP).

Finalmente, se logra un sistema de pilotaje - automático, el más seguro y rápido que satisfaga los requerimientos de performance, gracias a la investigación de diversas alternativas.

El presente trabajo, es producto de la participación del autor, en el diseño de la Instrumentación y - Control del Reactor RP-10 del Proyecto Centro Nuclear de Investigación del Perú. Proyecto que es parte del proceso de transferencia de Tecnología que es la finalidad del - convenio Perú-Argentina (IPEN-CNEA).

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

#### 1.1.- Física Elemental del Control de Reactores

Un reactor nuclear viene a ser, fundamentalmente, un sistema en el que se genera energía a partir de la fisión en cadena de determinados núcleos pesados, comúnmente uranio 235. En la mayoría de los reactores actuales, dicha fisión es producida por la acción de neutrones térmicos, obtenidos por la moderación de neutrones rápidos procedentes de fisiones anteriores. Estos son los denominados reactores térmicos de fisión, cuyos componentes principales son: el núcleo, en el que se mantiene la fisión en cadena y en donde se libera casi toda la energía de fisión en forma de calor, constituido fundamentalmente por el combustible o material fisible y el moderador; el moderador reduce la energía de los neutrones procedentes de la reacción de fisión; el reflector, que retorna al núcleo los neutrones con tendencia al escape del mismo; el refrigerante, que extrae el calor generado en la fisión y las barras de control, que básicamente regulan el nivel de potencia del núcleo mediante el control del número de neutrones en éste.

El estado de un reactor depende de muchos factores, por ejemplo, cantidad de elementos combustibles, presencia de materiales moderadores, posición de barras -

de control, presencia de venenos, etc., y es generalmente definido como subcrítico, crítico o supercrítico. El parámetro más aceptado para caracterizar el estado de un reactor es la reactividad\*. Este parámetro es utilizado también, para describir la influencia de la variación de un componente del reactor sobre ese estado. Según sea el valor de la reactividad se define los tres estados siguientes:

- Reactor Subcrítico (reactividad negativa,  $k < 1$ ). En éste caso el nivel de flujo neutrónico o nivel de potencia es proporcional al nivel de fuente e inversamente proporcional a la reactividad.

- Reactor Crítico (reactividad nula,  $k = 1$ ). En éste caso el nivel de potencia es constante y puede ser cualquiera.

- Reactor Supercrítico (reactividad positiva,  $k > 1$ ). En éste caso el reactor diverge. La evolución del nivel de potencia se calcula con la ayuda de las ecuaciones cinéticas. Si la reactividad extraída

---

\* Si  $k$  es el factor de multiplicación efectivo la reactividad es entonces:  $\rho = (k-1)/k$ . Si  $k=1$ ,  $\rho = k-1 = \delta k$  puede ser expresado en pcm.



del reactor es constante la evolución del nivel de potencia es exponencial; el período estable depende la reactividad según la ecuación de "Nordheim".

Si la reactividad extraída es débil podemos escribir en una primera aproximación que el reactor integra el exceso de reactividad:

$$\frac{dn}{n} = \frac{\delta\rho}{\bar{\lambda}} dt \quad (1.1)$$

Siendo:

$\bar{\lambda}$  : vida promedio ponderada de los neutrones

El único medio de modificar el nivel de potencia de un reactor es por lo tanto el de actuar sobre su reactividad. Esta reactividad puede provenir de diferentes orígenes:

a) Uno INTERNO, que aparece durante el funcionamiento en alta potencia:

- Primero por calentamiento de las estructuras del reactor (combustible, moderador). Es la reactividad térmica que se manifiesta generalmente para un coeficiente de temperatura medio negativo.

- Enseguida, a causa del envenenamiento por los productos de fisión (Xenon, Samario).

- Finalmente a causa del quemado de combustible (combustión).

El primero de estos efectos puede tener una

constante de tiempo relativamente corta (0.1 a 1 seg.), - en cambio el segundo efecto y sobre todo el tercero no aparece sino a mediano o largo plazo.

b) Otro EXTERNO debido a las modificaciones - en la estructura del núcleo. En general esto se hace por desplazamiento en el núcleo de barras absorbentes, llamadas barras de control. Estos medios de control externo - son indispensables para asegurar el arranque y la subida en potencia, así como la parada del reactor. Sirven - también para asegurar la regulación del nivel de potencia alrededor de un valor dado, y el cambio del nivel de potencia. Según sus funciones estas barras son llamadas: - barras de compensación, que sirven para el control grueso, de regulación, para el control fino; y de seguridad, - que permiten una parada rápida del reactor ante una emergencia o ocurrencia de una situación anormal.

En estas condiciones el esquema de un reactor en funcionamiento puede representarse por el diagrama de la figura 1.1.

Podemos resumir en la tabla 1.1 los principales parámetros que aparecen en cinética de reactores.

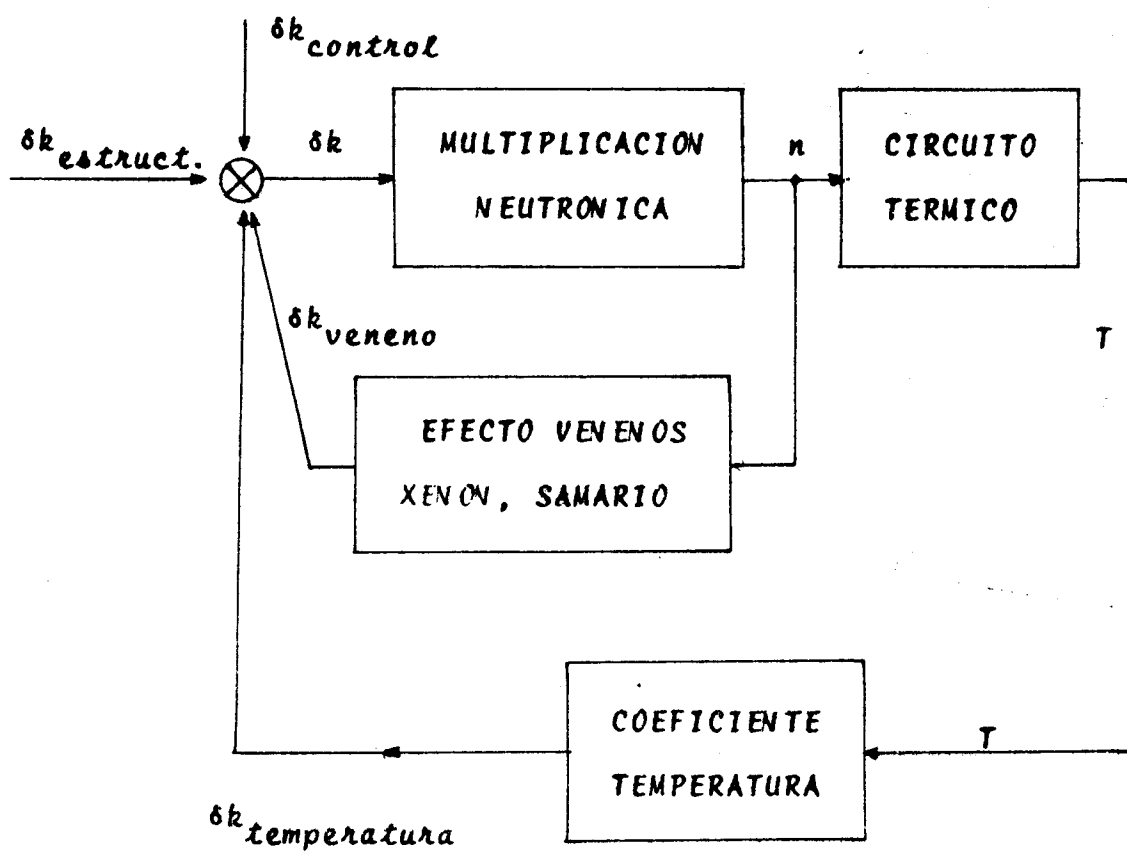


Fig. 1.1

TABLA 1.1

PARAMETROS CINETICOS

NOMBRE	SIMBOLO	CONCEPTO
Factor de multiplicación efectivo	$k_{ef}$	$\frac{\langle \text{Producción} \rangle}{\langle \text{Destrucción} \rangle}$
Vida media	$\lambda$	$\frac{\langle \text{Densidad Neut.} \rangle}{\langle \text{Destrucción} \rangle}$
Reactividad	$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}}$	$\frac{\langle \text{Producción} - \text{Dest.} \rangle}{\langle \text{Producción} \rangle}$
Tiempo entre generaciones	$\Lambda = \frac{\lambda}{k_{ef}}$	$\frac{\langle \text{Densidad Neut.} \rangle}{\langle \text{Producción} \rangle}$

Donde  $\langle \rangle$  significa promedio del proceso físico indicado. En producción se debe considerar únicamente, el proceso de fisión. Por destrucción se indica los procesos de absorción, fuga y el de transferencia de neutrones de un grupo de energía a otro.

## 1.2.- Objetivos del Pilotaje Automático

### 1.2.1.- Mantener Constante la Potencia del Reactor

El objetivo principal del pilotaje automático es mantener constante la potencia del reactor, con una



constante (pilotaje manual). Se puede demostrar con un ejemplo simple que es útil reemplazar al operador por un pilotaje automático en el caso en que se desea obtener una cierta precisión sobre el valor del nivel neutrónico. Se supondrá que en reactor de potencia cero (no hay efecto de potencia) aparece un exceso de reactividad  $\delta k$ . La ley de evolución del nivel neutrónico es de la forma - simplificada:

$$\frac{dn}{n} = \frac{\delta k}{\bar{\lambda}} dt$$

Sea por ejemplo  $\delta k = 1$  pcm,  $\bar{\lambda} = 0.1$  seg.  $\rightarrow dn/n = 10^{-4} dt$ , al cabo de  $\delta t = 100$  seg., se tiene  $\delta n/n = 1\%$

Si se desea mantener el flujo neutrónico constante al 1% y si por otro lado la reactividad introducida por la barra de regulación no puede ser ajustada mejor que 1 pcm habrá que actuar en promedio cada 100 seg. para corregir la deriva lenta de potencia.

En general se puede decir que el pilotaje automático deberá en su rol de regulador combatir dos tipos de perturbaciones de reactividad:

- Perturbaciones rápidas, ligera modificación en la estructura del reflector (para RP-10, extracción de un bucle experimental durante el funcionamiento).

- Perturbaciones lentas, por ejemplo envenenamiento por Xenón, o quemado de combustible.

### 1.2.2.- Cambiar el Nivel de Potencia

Los cambios del nivel de potencia sólo se pueden hacer si se crea provisionalmente una variación de reactividad. Pero es indispensable por razones de seguridad que estas variaciones de reactividad sean limitadas, de modo que la potencia del reactor no pueda evolucionar demasiado rápido. Se ve por lo tanto la necesidad de introducir en el bucle de control precedente (figura 1.2) otros parámetros pueden ser por ejemplo la derivada de la potencia, o mejor la derivada logarítmica (o sea la inversa del período). Un caso particular importante es el arranque automático desde el estado subcrítico.

## CAPITULO II

### DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema se compone del reactor nuclear y el sistema de pilotaje automático o bucle externo de control.

#### 2.1.- Reactor Nuclear

Consideraremos al reactor como elemento de bucle de control.

##### 2.1.1.- Reactor de Potencia Cero

Desde el punto de vista del pilotaje automático el reactor de potencia cero puede ser considerado como una caja negra que transforma las variaciones de reactividad en variaciones de nivel neutrónico. Se puede, haciendo ciertas hipótesis simplificadoras, caracterizar al reactor alrededor de un estado de equilibrio ( $\delta k=0$ ,  $n=n_0$ ) por una función de transferencia simplificada (ver Apéndice 2), como para los sistemas lineales. Esta función de transferencia se puede escribir utilizando las notaciones de Laplace:

$$F(s) = \frac{\delta n(s)}{\delta k(s)} = \frac{n_0}{\rho^*} \frac{1}{s} \frac{s+\lambda}{s+\gamma} \quad (2.1)$$

Donde  $\rho^*$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$  ( $\gamma=\lambda+\beta/\rho^*$ ) son constantes que dependen del reactor.



Para un reactor del tipo piscina (RP-10), se puede considerar:  $\tau = 5 \cdot 10^{-5}$  seg.,  $\lambda = 0.077$  seg.,  $\gamma = 128$  seg. A partir de esta función de transferencia se pueden trazar los diagramas de Bode.

Se ha trazado en las figuras 2.1 y 2.2. las curvas ganancia - frecuencia y fase - frecuencia respectivamente para un reactor de potencia cero que sería idéntica al RP-10 (RP-0).

El examen de esta función de transferencia - permite poner en evidencia algunas particularidades:

a) La ganancia es proporcional al nivel  $n_0$ . - El reactor es un órgano no lineal. Se puede escribir la función de transferencia bajo otra forma para eliminar esta particularidad, o sea:

$$\frac{H(s)/n_0}{\delta k(s)} = \frac{1}{\tau} \frac{1}{s} \frac{s+\lambda}{s+\gamma} \quad (2.2)$$

En estas condiciones la ganancia se expresa - en valor relativo del nivel de potencia por unidad de - reactividad (por ejemplo % de variación por pcm). Se puede por lo tanto trazar una sola curva característica del reactor en el diagrama de Bode. Esta curva es válida para todos los niveles de potencia.

b) La ganancia es infinita en bajas frecuencias, dicho de otro modo el reactor es inestable.

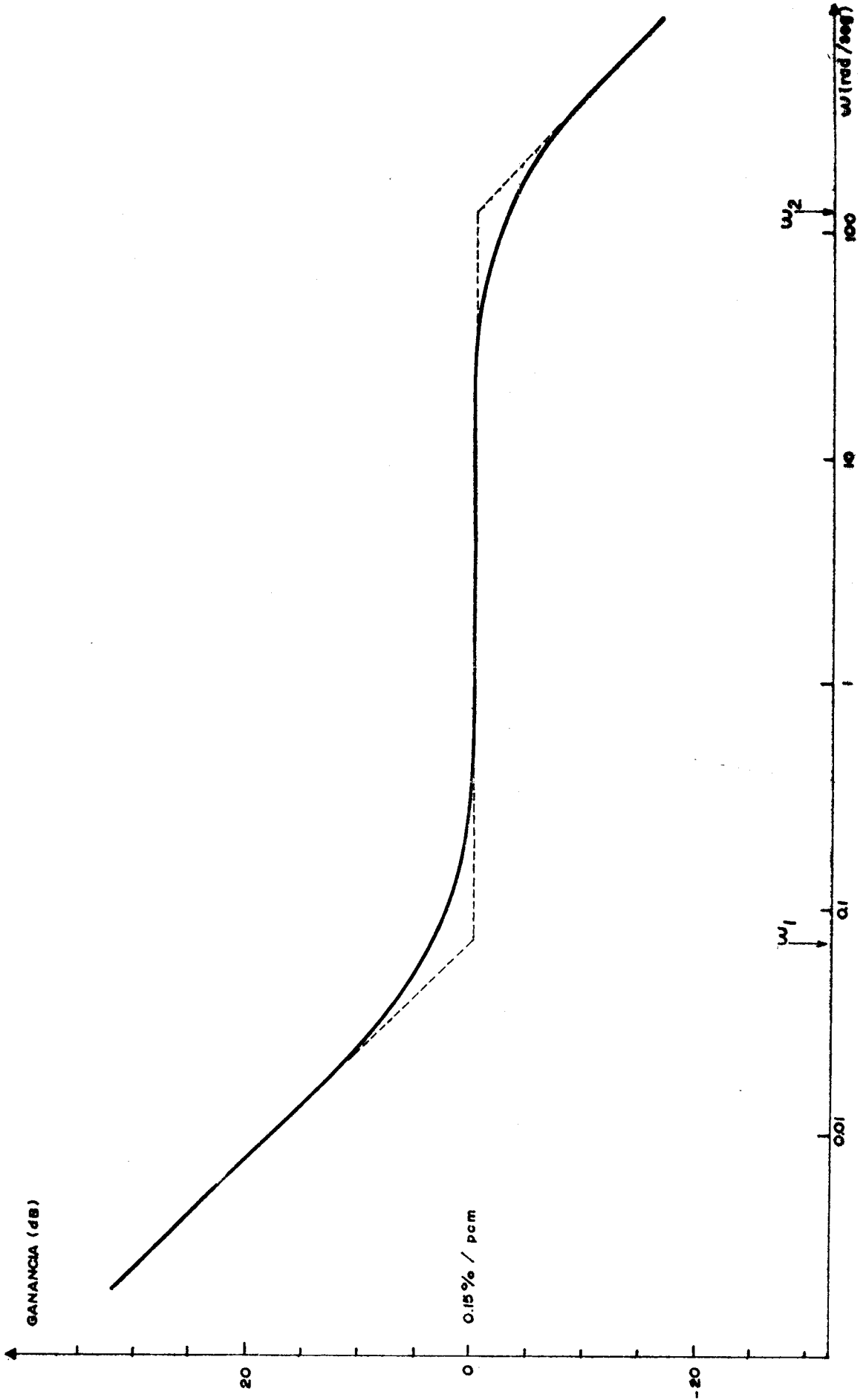


Fig. 2.1 AMPLITUD DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA NORMALIZADA DEL REACTOR DE POTENCIA GERO

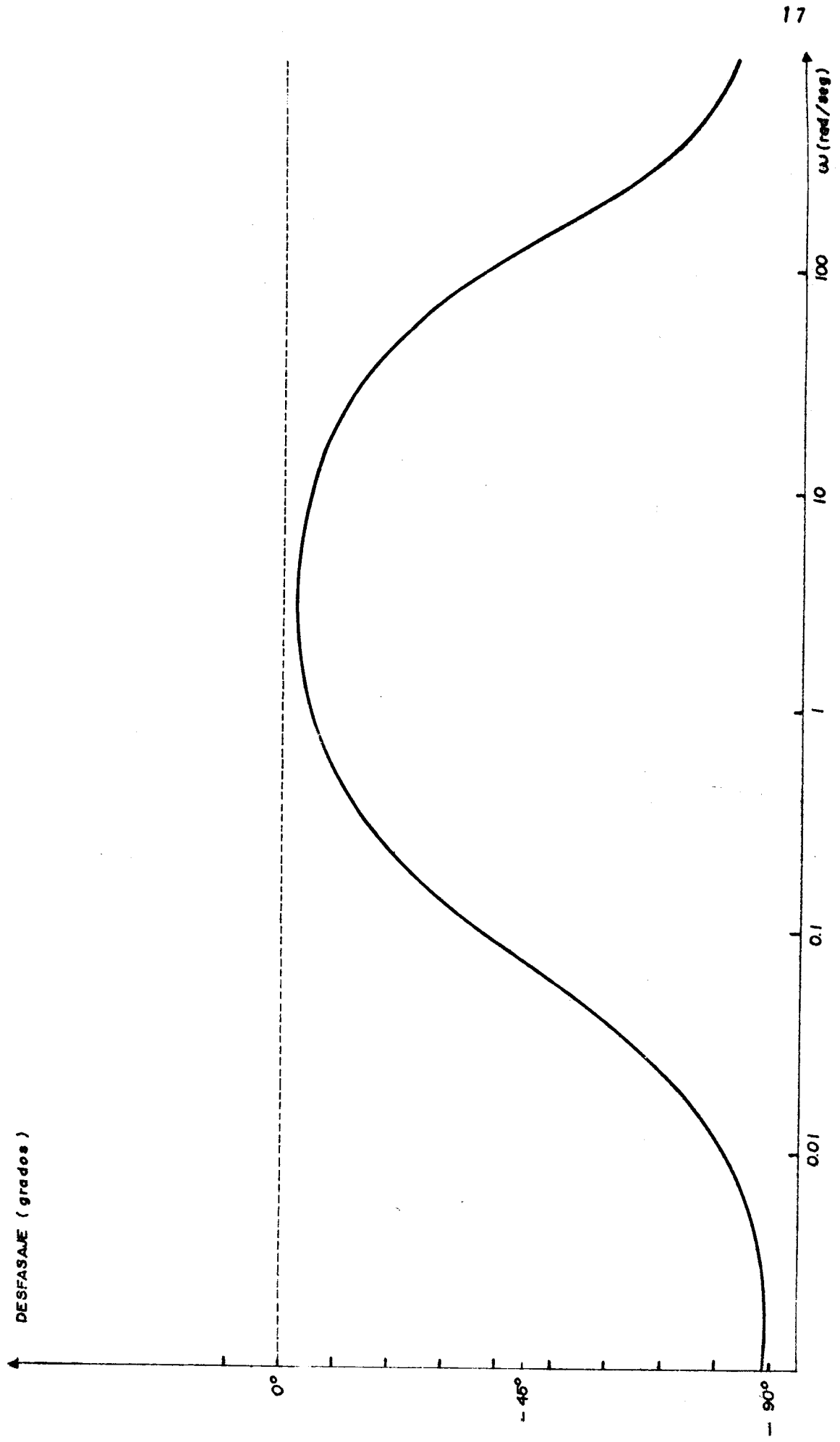


Fig. 2.2 DESFAJAJE DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA NORMALIZADA DEL REACTOR DE POTENCIA CERO

c) La ganancia es constante entre las dos frecuencias  $\omega_1 = \lambda$ ,  $\omega_2 = \gamma$ .

Se demuestra fácilmente que la ganancia de la función de transferencia entre estas dos frecuencias  $\omega_1$  y  $\omega_2$  tiene un valor idéntico para todos los reactores térmicos a uranio enriquecido.

En efecto para  $\omega_1 < \omega < \omega_2$ :

$$\frac{\delta n/n_0}{\delta k} = \frac{1}{\lambda^* B} = \frac{1}{B} \quad (2.3)$$

O sea aproximadamente 0.15% por pcm.

d) Se puede decir que los neutrones retardados juegan en el reactor un papel comparable al de una red de avance de fase en un circuito eléctrico. En efecto la función de transferencia del reactor con neutrones pronto sólo tendría la forma:

$$H'(s) = \frac{1}{\lambda^*} \frac{1}{s} \quad (2.4)$$

### 2.1.2.- Reactor en Régimen de Potencia: Efecto del Coeficiente de Temperatura

El estudio general es complejo. Para simplificar, nos interesaremos en un caso particular (RP-10) y además se harán las hipótesis siguientes:

a) Las perturbaciones de reactividad que pue-

den aparecer son rápidas con relación al tiempo de circulación del agua en el circuito de refrigeración (esta hipótesis es aún más justificable si se considera que la temperatura de entrada es mantenida constante).

b) La potencia proporcionada por el calentamiento del combustible sirve sólo para calentar el agua de refrigeración.

c) No hay más que sólo un coeficiente de temperatura, el del moderador. El es negativo ( $-15 \text{ pcm}/^\circ\text{C}$ ) y la constante de tiempo es del orden de 0.3 seg.

En estas condiciones si se admite las notaciones siguientes:

$T_e$  : Temperatura de entrada del agua

$T_s$  : Temperatura de salida del agua

$T_m$  : Temperatura media del agua

$Q$  : Caudal másico

$M$  : Masa de agua en el núcleo

$\alpha_m$  : Coeficiente de temperatura del agua

Se puede escribir las ecuaciones siguientes:

$$n = QC(T_s - T_e) + MC \frac{dT_m}{dt} \quad (2.5)$$

$$\delta k_T = \alpha_m \delta T_m \quad (2.6)$$

Donde  $C$  es el calor específico

Entonces, usando las transformadas de Laplace:

$$\frac{\delta k_T(s)}{\delta n(s)} = \frac{K_{TC}}{1 + \tau_c s} \quad (2.7)$$

Siendo:

$$K_{TC} = \frac{\alpha_m}{2QC}$$

$$\tau_c = \frac{M}{2Q}$$

$K_{TC}$  puede ser expresado en pcm/Mw.

Se puede por lo tanto trazar también un diagrama de Bode del efecto de temperatura. Debido al signo de este efecto se puede decir que el coeficiente de temperatura actúa sobre el reactor como una red de realimentación negativa de ganancia  $K_{TC}$  y de constante de tiempo  $\tau_c$ .

### 2.1.3.- Estudio de la Función de Transferencia Global del Reactor con Coeficiente de Temperatura

Este estudio lo hacemos una vez conocido las dos funciones de transferencia fundamentales, por cálculo directo (ver Apéndice 4). Se presenta en la figura 2.3 la curva de ganancia-frecuencia correspondiente. Notamos que:

a) En el dominio de las frecuencias  $< 0.01$  rad/seg la ganancia tiende hacia un límite igual a  $1/K_{TC}$

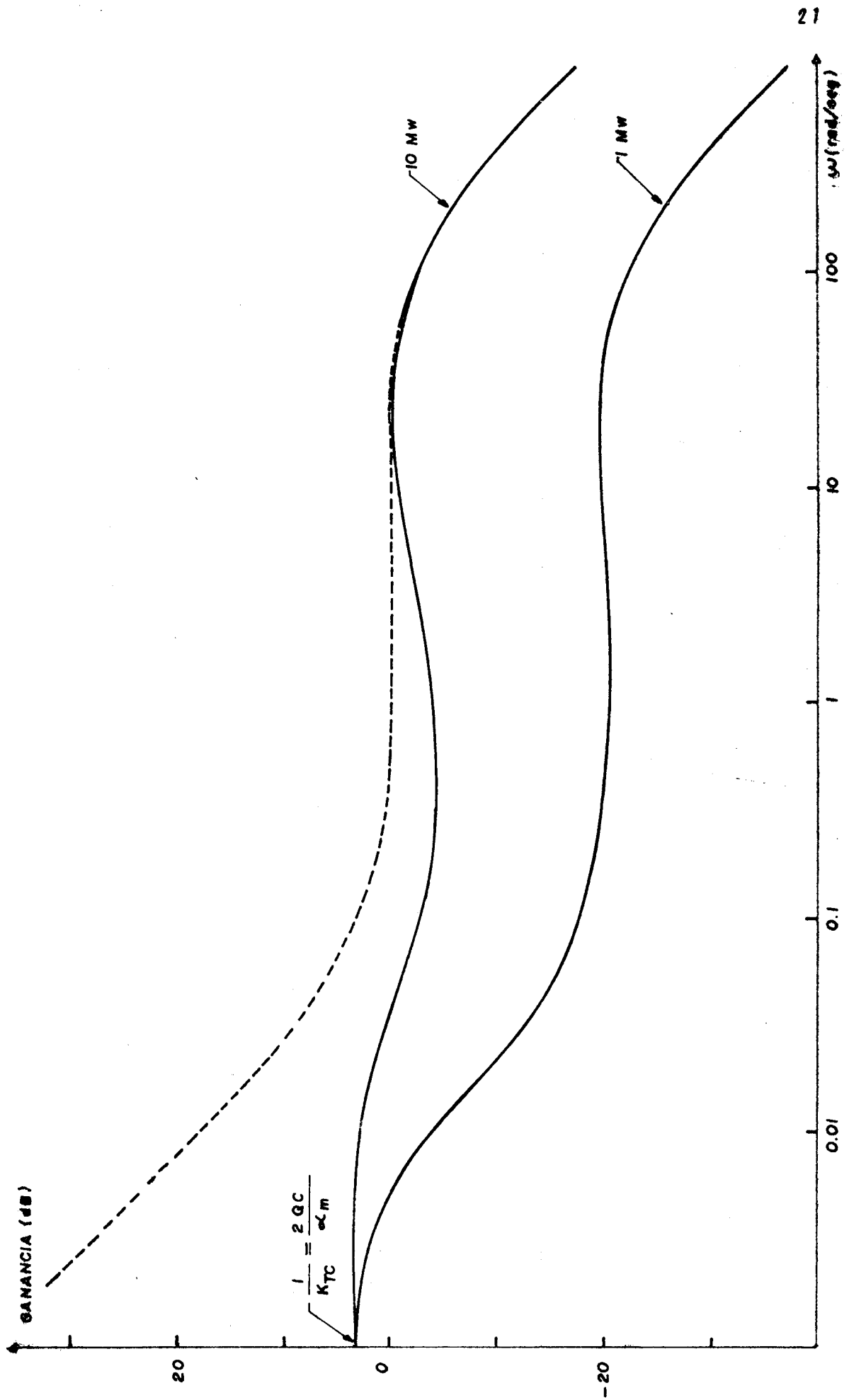


Fig. 2.3 AMPLITUD DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL REACTOR CON COEFICIENTE DE TEMPERATURA

cualquiera sea el nivel de potencia inicial (siempre y cuando el coeficiente de temperatura se haga efectivo: - por ejemplo en la gama de 1 Mw). El reactor tiene entonces en este rango de frecuencias un comportamiento análogo al de un sistema lineal. Además el reactor es estable. Así una variación de reactividad  $\delta k$  introducida en el reactor produce una variación del nivel de potencia neutrónica igual a  $\delta k / K_{TC}$  (en lugar de un aumento exponencial en el caso de un reactor de potencia cero).

b) En el dominio de las frecuencias  $> 0.01$  rad/seg el reactor se comporta como si no hubiera coeficiente de temperatura o sea como el reactor de potencia cero.

## 2.2.- Sistema de Pilotaje Automático

### 2.2.1.- Selección de una Cadena de Regulación Apropriada

El problema a resolver es entonces el siguiente: Encontrar la forma conveniente que se debe dar a la función que relacione la salida del regulador  $\delta k_{\text{pilotaje}}$  y la entrada  $n - n_0$ , teniendo en cuenta las características particulares del reactor nuclear.

Se ha visto anteriormente que el reactor es un sistema no lineal, que su reactividad puede evolucionar constantemente en el tiempo y que el desfase de la función de transferencia tiende hacia  $-90^\circ$  a frecuencias al



tas.

De la primera característica, se deduce que se debe hacer una corrección de ganancia en la cadena de regulación de tal forma de tener una ganancia en bucle abierto constante cualquiera sea el nivel de potencia; se concluye de esto que el comparador debe elaborar una señal de la forma  $\frac{n-n_0}{n_0}$ .

De la segunda característica, se deduce que una regulación de acción proporcional del tipo  $\delta k = A \frac{n-n_0}{n_0}$  no es conveniente para un reactor a alta potencia y que es preferible proveer una regulación con acción integral del tipo  $\delta k = A \int \frac{n-n_0}{n_0} dt$  o si se prefiere un comando de velocidad de la barra de regulación de modo que se tenga  $\frac{d(\delta k)}{dt} = A \frac{n-n_0}{n_0}$ , porque se tiene en cuenta la evolución de la reactividad en el tiempo.

De la tercera característica se deduce que una regulación con acción integral no puede siempre permitir ganancias elevadas, por lo que impide eliminar eficazmente las perturbaciones rápidas de reactividad. Será necesario entonces proveer una regulación con acción proporcional e integral combinada.

### 2.2.2.- Mejora de las Performances

Para lograr performances mejores que las encontradas anteriormente, podemos aplicar los métodos uti-

lizados en la práctica de servomecanismos:

a) Uso de redes compensadoras de avance de fase en lazo directo.

b) Uso de la realimentación de velocidad para mejorar la respuesta transitoria; en el caso del reactor, es preferible usar una realimentación relativa, de ahí la idea de una realimentación de la inversa del período.

c) Uso de un comando de posición de la barra de regulación y un comando de velocidad para las barras de compensación.

d) Uso de la realimentación por la inversa del período, la señal de comando de la barra puede ser entonces de la forma:

$$A \frac{n_0 - n}{n_0} - B \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \quad (2.8)$$

Podemos demostrar fácilmente que éstos métodos buscan lo mismo, proporcionar una regulación con acción proporcional e integral combinada (P. I.).

### 2.2.3.- Descripción del Sistema Propuesto

Se describe a continuación un sistema de pilotaje automático con acción de control proporcional e integral y que usa realimentación de la tasa de crecimiento de la potencia del reactor (que es la inversa del período

de evolución).

Este esquema así como sus detalles se adoptaron para el RP-10 con la participación del autor en la formulación analítica del anteproyecto y el análisis de performances y capacidades en la implementación de detalle del sistema.

Este bucle de pilotaje automático permitirá mantener constante la potencia del reactor con una determinada precisión, independientemente de las perturbaciones externas y efectuar variaciones automáticas entre niveles de potencia pertenecientes a la misma década.

El esquema de funcionamiento se muestra en la figura 2.4.

La potencia del reactor se mide en términos de su flujo neutrónico, utilizando un detector de neutrones ubicado en las proximidades del núcleo. Un amplificador lineal, cuya sensibilidad se varía por rangos, transforma la corriente en señal de tensión. Esta señal, que representa la potencia real del reactor, se compara con la variable de entrada  $n_0$  (preseleccionable en el potenciómetro RV), que en éste caso representa la potencia requerida o nivel de referencia. Esta comparación se realiza en el circuito comparador, que suministra a la salida del amplificador 1 una señal en error relativo  $(n/n_0)$ . A su vez ésta señal será restada de la tasa de crecimiento de la potencia del reactor obtenida de un periodómetro,

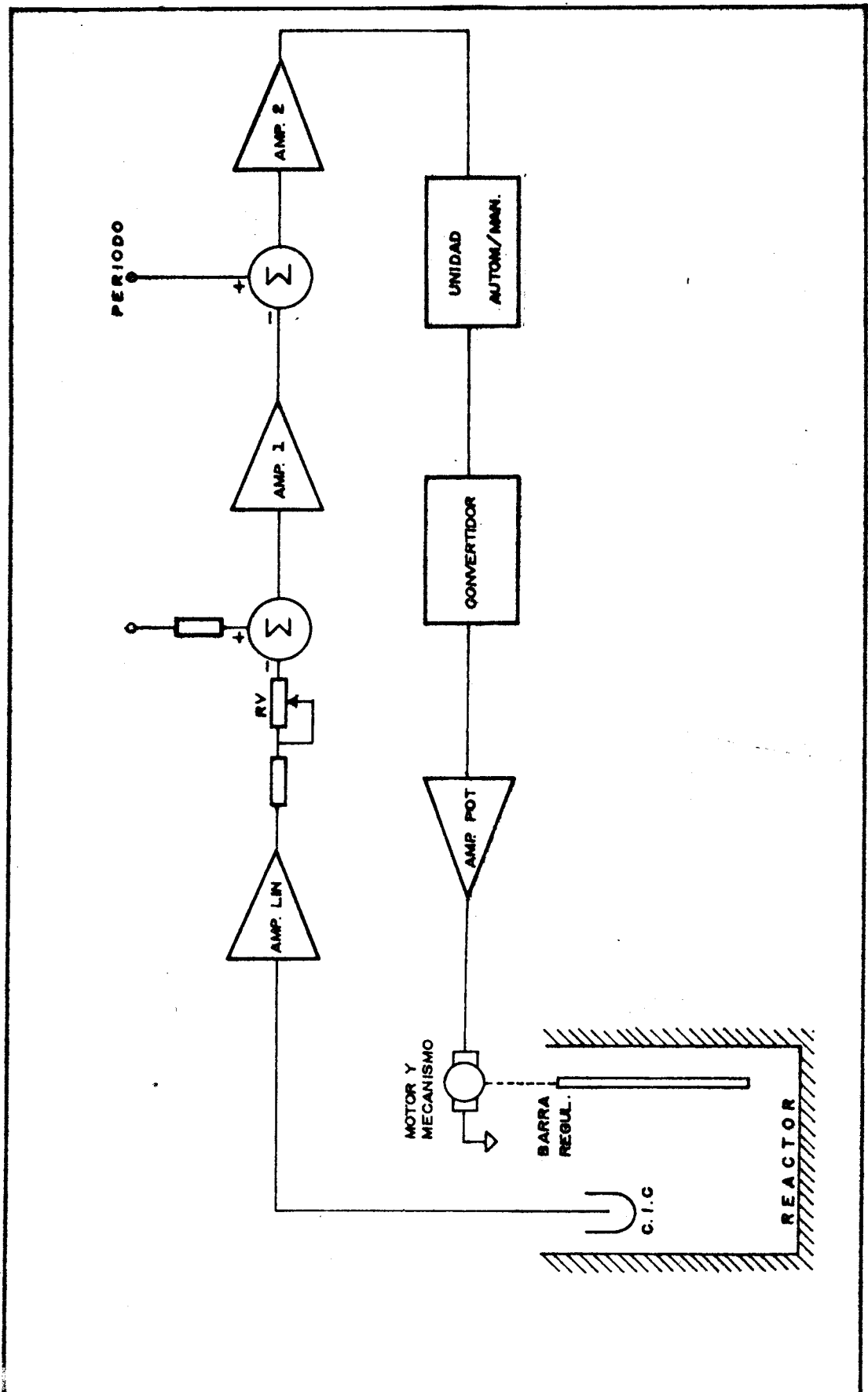


Fig. 2.4 ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL SISTEMA DE PILOTAJE AUTOMATICO DE UN REACTOR NUCLEAR

resultando así la señal de error completa a la salida del amplificador 2.

La barra de regulación es accionada por el motor, comandado por un amplificador de potencia. La señal aplicada a la entrada del amplificador será de la forma:

$$\epsilon = A \frac{n_0^{-n}}{n_0} - B \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \quad (2.9)$$

Siendo:

$n$  : potencia del reactor

$n_0$  : potencia en la que se desea estabilizar el reactor

A y B : constantes

Como la velocidad del motor es, dentro de los límites de saturación del amplificador, proporcional a la tensión  $\epsilon$ , 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:

$$\delta k(s) = K \frac{\epsilon}{s} \quad (2.10)$$

Donde K se mide en  $\frac{\text{pcm/seg}}{\text{volt}}$ . Se trata entonces del 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 a la que ocupaba inicialmente pero  $\epsilon$  será cero y la potencia se estabilizará en el valor que tenía antes de la perturbación.

Con el fin de linealizar la función de transferencia de la rama directa, la señal está referida a  $n_0$ , pues la ganancia del reactor es proporcional al nivel de potencia.

La presencia del segundo término en la expresión (2.9) obedece a la necesidad de limitar la velocidad de crecimiento de la potencia, cuando se modifica el valor de  $n_0$ .

En éste 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,  $\epsilon$  es prácticamente nulo y la potencia crece con período constante:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{n} \frac{dn}{dt}} = \frac{B}{C} = \frac{B}{A \left| \frac{n_0 - n}{n_0} \right| \lim} \quad (2.11)$$

La relación  $B/A$  y  $C$ , serán determinados por las siguientes consideraciones:

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

#### 2.2.4 - Explicación Simplificada del Funcionamiento del sistema

Durante el ascenso de las barras de compensación, el reactor alcanzará la criticidad a un nivel de potencia que dependerá de la antireactividad inicial. El operador puede advertir que ha alcanzado el estado crítico, pues cuando se interrumpe el ascenso de las barras, la potencia en lugar de estabilizarse continua ascendiendo. A partir de ese momento, el operador puede controlar la velocidad de crecimiento de la potencia, extrayendo en mayor o menor grado, alguna de las barras de compensación o usando la de regulación, tratando de dejar ésta última en la posición central.

Cuando la potencia alcanza el 1% de la potencia nominal (dos últimas décadas de potencia), puede conectarse al comando automático (vía la unidad AUTOMATICO/MANUAL). Esto es debido a que es más dificultoso controlar el reactor a bajos niveles de potencia, que a niveles altos, donde el reactor es naturalmente estable.

El aumento de potencia se efectuará una vez - estabilizada la misma, accionando el potenciómetro que fijará el valor de referencia  $n_0$ .

Si la barra de regulación alcanza el 80% de su carrera, se pondrá en marcha la barra de compensación (seleccionada en la consola de comando). Desde que la señal de error cambia de signo, la barra de regulación descende-

rá. La barra de compensación (por efecto del pilotaje automático) sólo se detendrá cuando aquella alcanza el punto medio (50% de su recorrido). Inversamente, si la barra de regulación alcanza 20% de su carrera, la barra de compensación desciende a velocidad constante y se detiene cuando aquella alcanza nuevamente el punto medio.



## CAPITULO III

### DISEÑO

#### 3.1.- Datos de la Planta y Especificaciones de Funcionamiento

##### 3.1.1.- Datos de la Planta

Reactor nuclear de investigación, tipo piscina, moderado y refrigerado por agua ligera, y que utiliza como combustible uranio enriquecido al 20%.

##### 3.1.2.- Principios que se Aplican

- a) Precisión: 0.5% (para mantener el nivel de potencia deseado).
- b) Período mínimo: 80 segundos (para limitar la evolución de la potencia).
- c) Estabilidad y comportamiento transitorio:
  - Estabilidad Absoluta: Que no hayan oscilaciones autosostenidas divergentes en el sistema realimentado.
  - Estabilidad Relativa: Retorno al equilibrio con un número de oscilaciones reducido luego de la aparición de una perturbación.

d) *Parámetros de regulación:*

- *Ganancia de la cadena de regulación.*
- *Tiempo de respuesta del servomecanismo - de comando de la barra de regulación.*

3.2.- *Selección de los Componentes del Lazo de Control*

*Podemos resumir las características de los elementos principales que componen el lazo del sistema:*

a) *El reactor, en el cual existe un flujo neutrónico  $\phi$  que equivale a una potencia  $n$ .*

b) *Un detector de neutrones: cámara de ionización compensada, que produce una corriente continua proporcional al valor de  $n$ .*

*Especificaciones:*

- *Tipo: RC6-EB/CENTRONIC ó similar*
- *Sensibilidad a los neutrones:  $2.0 \cdot 10^{-14}$  A/(n/cm<sup>2</sup> seg)*
- *Sensibilidad gamma:  $5.5 \cdot 10^{-12}$  A/(R/hr)*
- *Tensión máxima de operación: 800 volts*

c) *Un amplificador lineal multirango, cuya sensibilidad es variable por rangos, que transforma la señal de corriente proporcionada por la cámara en tensión de salida.*

Especificaciones:

- Rango de medición:  $10^{-11}$  A a  $10^{-4}$  A por décadas.
- Tensión de salida: +4.5 volt a fondo de escala.
- Tensión de off-set de salida: +0.5 volt sin señal a la entrada.
- Tiempo de respuesta: la constante de tiempo será menor de 5 seg en  $10^{-11}$  A y de 5 mseg desde  $10^{-8}$  A hacia arriba.

d) Un amplificador comparador, cuya misión consiste en detectar cualquier diferencia entre la demanda y la salida. Además de esta función, cumple otra que tiene por objeto linealizar el lazo de control, pues la presencia del reactor dentro del mismo da al sistema características no lineales.

En la práctica es más simple, realizar la división por  $n_0$ , lo que no altera fundamentalmente las funciones del comparador pues estos valores, al nivel que actúa el control automático son próximos entre sí.

Estas funciones las realiza generalmente el comparador suministrando una señal de error de la forma:

$$\frac{n_0 - n}{n_0}$$

e) Un amplificador logarítmico y diferenciador (periodómetro), que produce una señal proporcional a la derivada del logaritmo de la potencia y corrige la señal de error.

A la salida del amplificador logarítmico se obtiene una tensión de salida proporcional al logaritmo de la corriente de entrada, pero dado que esa corriente de entrada es directamente proporcional al flujo neutrónico (densidad neutrónica media) y, por lo tanto, a la potencia del reactor, en definitiva se tiene una tensión de salida proporcional al logaritmo de la potencia neutrónica.

$$V_S = A \log n \quad (3.1)$$

donde:

A : factor de escala

n : potencia neutrónica

Para un crecimiento exponencial del flujo (producido para un incremento positivo de la reactividad).

$$n = n_0 e^{t/T} \quad (3.2)$$

Siendo:

$n_0$  : valor inicial

$T = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt}$  : constante de tiempo de crecimiento o período

Esta potencia representa una tensión de salida de la etapa logarítmica:

$$V_S = A(\log n_0 + \frac{t}{T} \log e) \quad (3.3)$$

Si se diferencia ésta señal se obtiene:

$$\frac{dV_S}{dt} = \frac{0.43}{T} (\text{décadas/seg}) \quad (3.4)$$

Especificaciones:

Amplificador logarítmico:

- Rango de medición:  $10^{-11}$  A a  $10^{-4}$  A.
- Tiempo de respuesta: la constante de tiempo será menor de 5 seg en  $10^{-11}$  A y de 5 mseg desde  $10^{-8}$  A hacia arriba.
- Tensión de salida: 0.5 volt con entrada de  $10^{-11}$  A.

Periodómetro:

- Rango de medición: -3%/seg hasta +7%/seg.
- Tensión de salida: 1.5 volt con entrada de 0.%/seg (potencia estable).

f) Un amplificador de potencia, que recibe la señal de error corregida y comanda el motor de accionamiento del mecanismo de la barra de regulación. La ganancia de éste amplificador será determinado en éste trabajo.

g) Un mecanismo, que transforma el movimiento de rotación del motor, en desplazamiento vertical de la

barra de regulación. Generalmente lo comprenden el mecanismo, el motor y una caja reductora que actúan sobre un sin fin provocando la subida o bajada de la barra.

Para mover dicha barra se puede utilizar un motor de inducción bifásico, muy apropiado para estos casos.

*Especificaciones:*

*Motor bifásico típico: Allen-Products o similar.*

- Voltaje fase de referencia: 115 volts
- Frecuencia: 400 cps
- Voltaje fase de control: 115 volts
- Potencia máxima: 0.65 watts

h) La barra de regulación, mediante la cual se aumenta o disminuye la reactividad del reactor.

*Especificaciones:*

- Valor en reactividad: 600 pcm
- Material: acero inoxidable

### 3.3.- Función de Transferencia del Sistema

El diagrama de bloques del sistema se muestra en la figura 3.1. Se presentarán las funciones de transferencia que caracterizan a cada uno de los elementos mencionados.

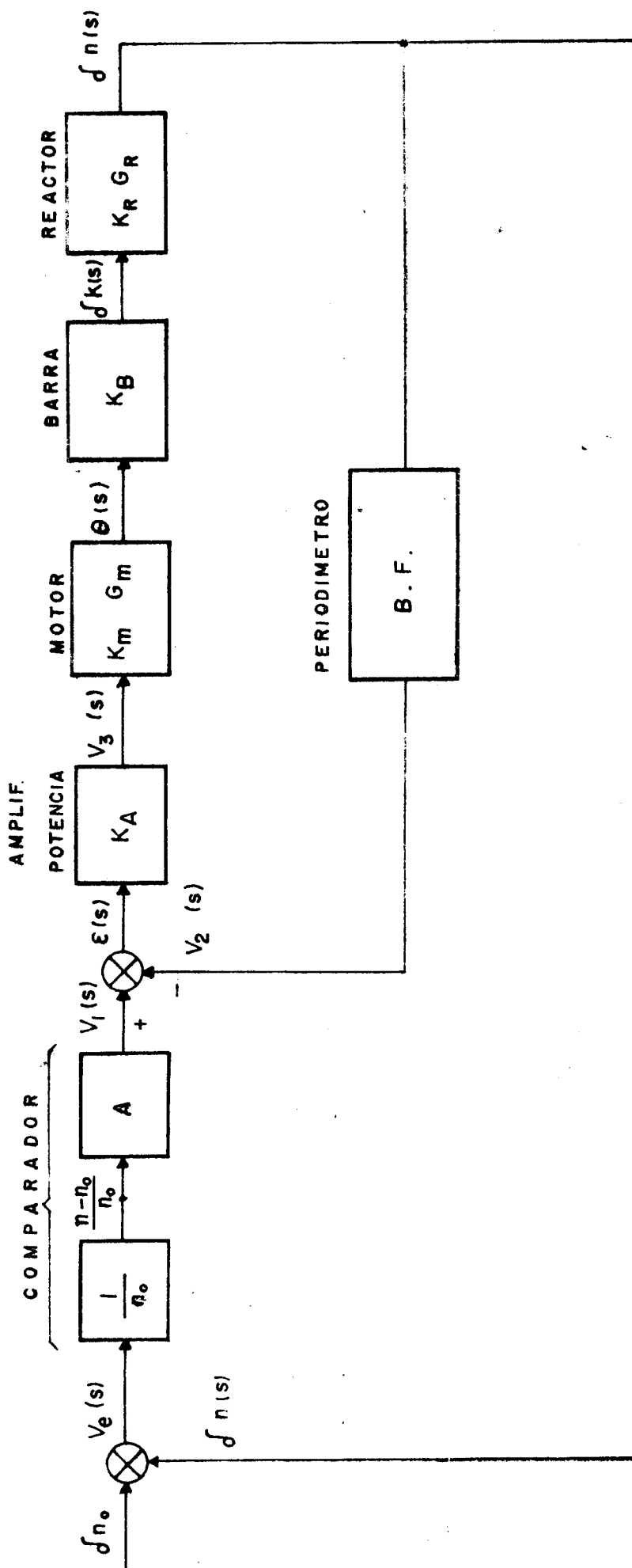


Fig. 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA

## a) Reactor

La función de 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 seis grupos de neutrones retardados (ver Apéndice 2) es:

$$\frac{\delta n(s)/n_0}{\delta k(s)} = \frac{1}{\rho^* s \left( 1 + \sum \frac{\beta_i}{\rho^* (s + \lambda_i)} \right)} \quad (3.5)$$

Siendo:

$n_0$  : potencia del reactor en equilibrio

$\rho^*$  : vida media de los neutrones

$\beta_i$  : fracción 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 utilizar la expresión que se obtiene partiendo de un sólo grupo de neutrones retardados.

Así se llega a:

$$K_{RG_R} = \frac{\delta n(s)/n_0}{\delta k(s)} = \frac{1}{s \rho^*} \frac{s + \lambda}{s + \lambda + \beta/\rho^*} \quad (3.6)$$



Donde:

$\beta$  : fracción total de neutrones retardados

$\lambda$  : constante de decaimiento media

Los valores de las constantes para un reactor tipo piscina (RP-10) serán:

$$\lambda : 0.077 \text{ seg}^{-1}$$

$$\beta : 0.0064$$

$$\lambda : 5 \cdot 10^{-5} \text{ seg}$$

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

$$K_R G_R(s) = \frac{1}{s} \frac{\lambda(1 + s/\lambda)}{\beta(1 + s/(B/\lambda^*))} \quad (3.7)$$

En la que se ha despreciado  $\lambda$  frente al valor de  $B/\lambda^*$ .

Si queremos expresar  $n/n_0$  en por ciento y  $\delta k$  en pcm debemos multiplicar  $K_R$  por  $10^{-3}$  ( $10^2/10^5$ ), quedando finalmente:

$$K_R G_R = \frac{\delta n(s)/n_0}{\delta k(s)} = 0.012 \frac{1 + 13s}{s(1 + 0.007s)} \quad (3.8)$$

b) Comparador

Como se vio anteriormente el comparador elabora una señal de error de la forma:  $(n - n_0)/n_0$ . Por lo tanto la función de transferencia del comparador, dentro del rango de frecuencias que nos interesa es una constante.

## c) Amplificador de Potencia

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

Como la señal suministrada por el comparador es proporcional a la diferencia entre el nivel deseado y el nivel real, asumamos sea ésta de 0.1 volt/% de error. Como el motor, debido a la función estática del reductor y mecanismo, responderá cuando el voltaje  $\geq 20$  volt (para el motor seleccionado), la ganancia necesaria en tensión para mantener la precisión de 0.5% deberá ser:

$$K_A \geq \frac{V}{A \cdot Pr} = \frac{20}{0.1 \cdot 0.5} = 400$$

En la práctica:

$$100 < K_A < 1000 \quad (3.9)$$

## d) Periodómetro

La función de transferencia del periodómetro, podemos deducirlo en forma simplificada, considerando una configuración de un circuito diferenciador que tenga una sola constante de tiempo de integración (Ref. 3).

La función de transferencia estable de este circuito será:

$$BF(s) = B \frac{s}{1 + \tau_2 s} \quad (3.10)$$

Un valor apropiado del tiempo de respuesta -

Un valor apropiado del tiempo de respuesta del periodómetro es  $\tau_2 = 1$  seg, de tal forma que no tarde en señalar el período correcto; el retraso puede resultar inadmisibles, dado que, en general, la tensión de salida debe actuar sobre la lógica de seguridad que para rápidamente el reactor en el caso de presentarse un período peligrosamente corto, y por otro lado la rapidez de respuesta excesiva puede ocasionar paradas innecesarias debido a perturbaciones rápidas (ruidos, etc).

El valor B estará en parte fijado por las siguientes consideraciones: Dado que el sistema de comando automático debe permitir al operador efectuar una variación automática de potencia, es necesaria que la evolución se efectúe en condiciones seguras, sin que el período sea inferior a un valor mínimo preestablecido.

La ganancia del periodómetro generalmente se hace lo más alta posible, para que no traiga problemas con off-set de las etapas siguientes.

Para un primer ensayo se puede adoptar que: Para una velocidad de crecimiento de 1 %/seg corresponda a una salida de 2 volts.

Luego B será: 2 volt seg/%

La función de transferencia queda:

$$BF(s) = 2 \frac{\Delta}{1 + s} \quad (3.11)$$

e) Motor de accionamiento de la barra

Considerando la ecuación de funcionamiento de un motor bifásico, incluyendo las inercias reflejadas sobre el eje de salida y los rozamientos, se obtiene la función de transferencia:

$$K_m G_m = \frac{\theta(s)}{V_3(s)} = \frac{K_v}{s(1 + \tau_m s)} \quad (3.12)$$

Siendo:

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

$\tau_m$  : constante de tiempo del motor (seg)

Para el motor bifásico marca Allen-Products, - aproximadamente podemos escribir:

$$K_m G_m = \frac{10}{s(1 + 0.15s)} \frac{\text{rad/seg}}{\text{volt}} \quad (3.13)$$

f) Constantes del mecanismo y barra de control

Como se mencionó anteriormente, el movimiento de la barra se efectuará por medio de un mecanismo que - transforma el movimiento de rotación del motor (a través - de un reductor apropiado), en desplazamiento vertical de la barra.

La relación del reductor se elige de manera de limitar la máxima velocidad de introducción de reactividad. Esta velocidad, está limitada en base a consideraciones -

de estabilidad del sistema. Conservativamente adoptamos, un valor de 20 pcm/seg (velocidad máxima de introducción - de reactividad aconsejada por el OIEA, Ref. 13), que podrá ser posteriormente ajustada.

La reactividad en pcm, estará vinculada al ángulo de giro del eje del motor por la constante  $K_B$ .

$$K_B = \frac{a}{\omega_m} \frac{\text{pcm/seg}}{\text{rad/seg}} \quad (3.14)$$

Para el motor típico definido, la velocidad - con tensión y carga nominal es del orden de 7000 rpm (733 rad/seg).

$$K_B = \frac{1}{37} \text{ pcm/rad} \quad (3.15)$$

### 3.4.- Estabilidad

#### 3.4.1.- Bases del Análisis

El sistema se estudia por el método gráfico de trazado de la función de 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,  $n_0$ .
  - El sistema debe ser estable cualquiera sea el valor que tome  $n_0$ , entre  $n_0$  mín.,  $n_0$  max.,

ninguna variable debe entrar en régimen oscilatorio.

- La potencia debe mantenerse en el valor fijado  $n_0$ , con la precisión establecida.

Partiendo de que el comportamiento de los e l e m e n t o s q u e l o z o d e c o n t r o l, - es lineal en un entorno de la posición de equilibrio y que la función de transferencia del reactor está linealizada en todo el intervalo  $n_0$  min.,  $n_0$  máx., el análisis es válido para cualquier potencia de operación dentro de éste rango.

b) En caso de variación automática del nivel de potencia

- No deben producirse oscilaciones alrededor del valor final. La máxima amplitud del s o b r e i m p u l s o 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 80 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 (figura 2.4) se encuentra en un valor límite (10%) y la ba-

rra 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.

### 3.4.2.- 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:

$$KG(s) = K_A \cdot K_m \cdot K_B \cdot K_R \cdot G_m(s) \cdot G_R(s) \quad (3.16)$$

Donde la función de transferencia del reactor es:

$$K_R G_R(s) = 0.012 \frac{(1 + 13s)}{s(1 + 0.008s)} \quad (3.17)$$

Los valores de las constantes son:

$$K_A = 400, K_m = 10 \text{ rad/seg}; K_B = 1/37 \text{ pcm/rad}$$

Agrupando en un sólo coeficiente:

$$K = K_A \cdot K_m \cdot K_B = 108 \frac{\text{pcm/seg}}{\text{volt}}$$

La función de transferencia  $BF(s)$  es :

$$BF(s) = \frac{2s}{1+s} \frac{\text{volts}}{\%/\text{seg}} \quad (3.18)$$

Finalmente la F.T. en lazo abierto  $KG(s) \cdot BF(s)$  queda

$$KG(s)BF(s) = \frac{K}{Bs^2} \frac{(1+s/\lambda)}{(1+\tau_m s)(1+\frac{2}{B}s)} \frac{Bs}{(1+\tau_2 s)} \quad (3.19)$$

$$= 2.59 \frac{1+s/0.077}{s(1+1.5s)(1+s/10)(1+s/128)}$$

La curva de amplitud y fase de la ecuación (3.19) está representada en la figura 3.2. En la figura 3.3 se representó la misma función en el diagrama de Nichols (curva 1).

En este último se aprecia que el margen de fase es exiguo ( $23^\circ$ ). Para obtener un margen de fase aceptable ( $45^\circ$ ), se reduce la ganancia del medidor de período en 8 dB, lo que equivale en este diagrama a desplazar verticalmente la curva hacia abajo 8 dB. Se observa que ahora el margen de fase es de  $45^\circ$ , y que la curva es tangente al círculo de amplitud constante  $M = 2$  dB, lo que le acuerda un comportamiento transitorio aceptable (Ref. 14). En el punto de tangencia leemos la frecuencia de resonancia 8 rad/seg. El margen de ganancia se obtiene en el mismo gráfico y resulta 17 dB.

Estos resultados muestran que con la nueva ganancia del periodómetro, ( $6 - 8 = -2$  dB), el lazo interno



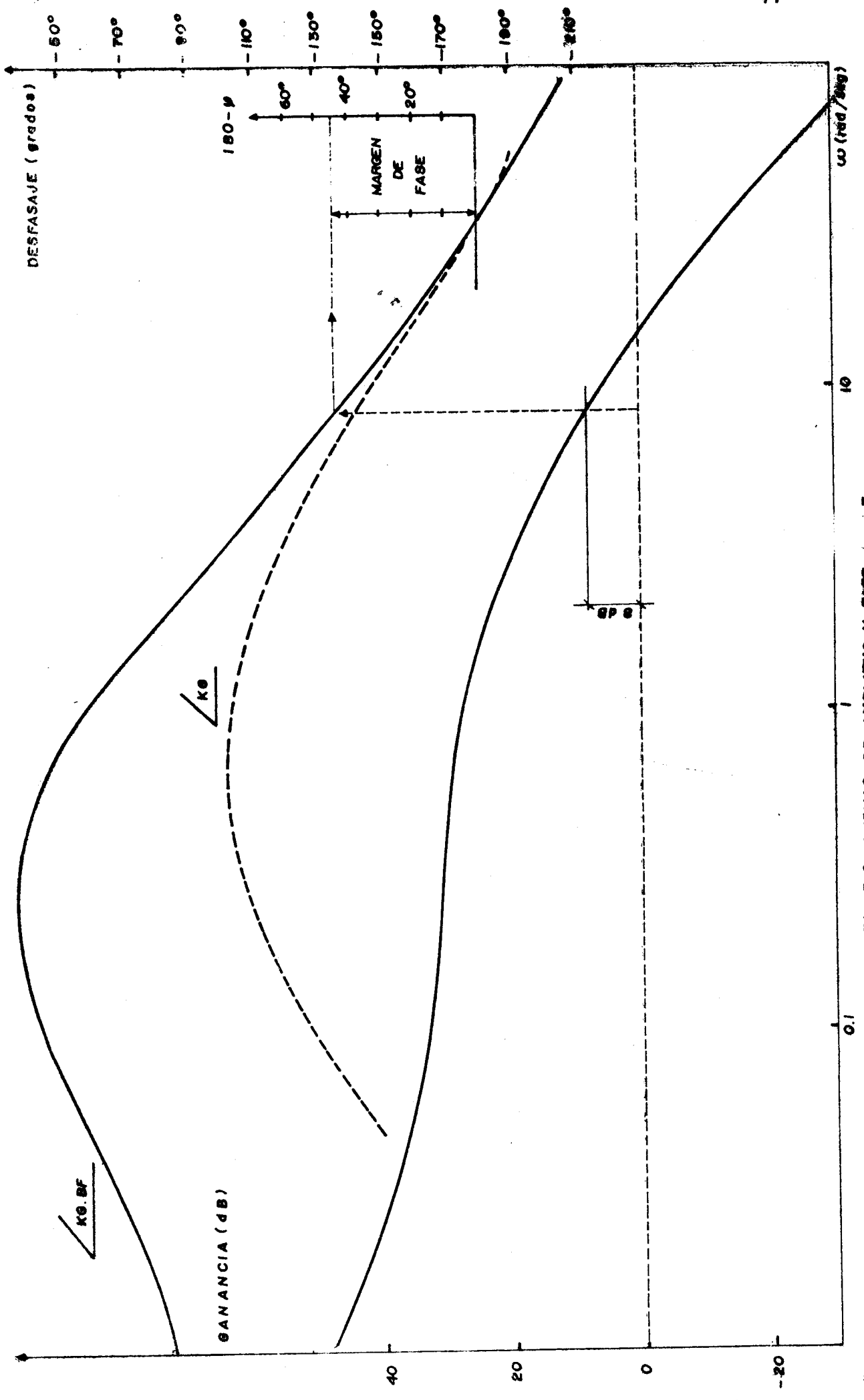


FIG. 3.2 CURVAS DE AMPLITUD Y FASE

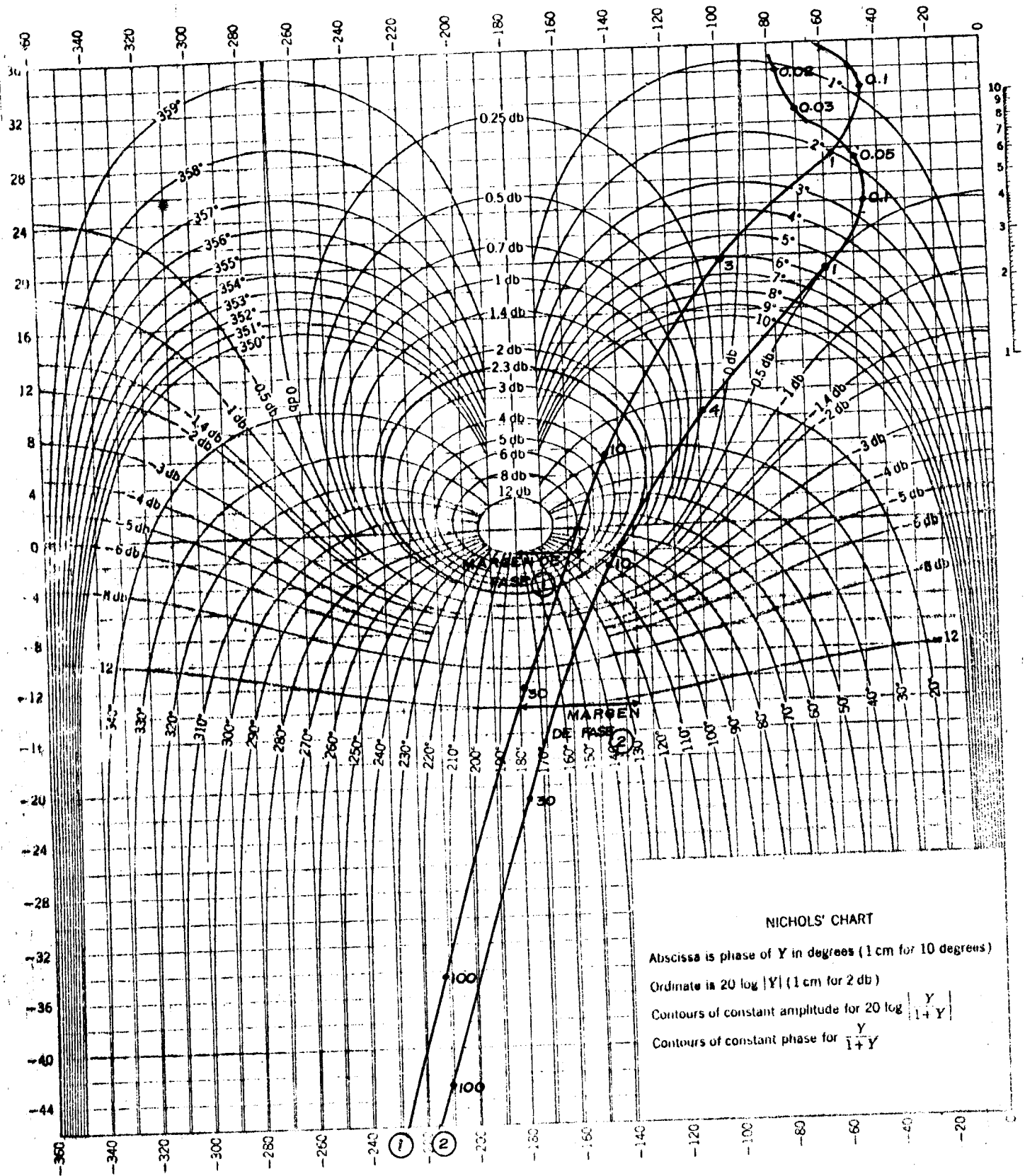


Fig. 3.3 CURVA AMPLITUD-FASE KG.BF.

es perfectamente estable.

En la figura 3.2, la reducción de ganancia equivale a desplazar el eje 8 dB hacia arriba. La fase, naturalmente, no varía.

El período de la evolución se calcula a partir de (2.11) con el valor de la nueva ganancia del periodómetro  $B = -2$  dB, que equivale a  $0.8 \frac{\text{volt}}{\%/\text{seg}}$ . Conviene expresar también el período en esta unidad. A un período de 80 seg corresponde una velocidad de crecimiento de 1.25 %/seg. El valor de C resulta:

$$C = \frac{B}{T} = B \cdot r (\%/ \text{seg}) = 0.8 \cdot 1.25 (\text{volt}) = 1 \text{ volt}$$

Es decir que limitando la tensión de salida del comparador a 1 voltio, la evolución se efectúa con un período de 80 seg.

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  $V_{\text{arr}} = 20$  volts. Como  $K_A = 400$ , resulta:

$$A = \frac{20 \text{ volt}}{400 \cdot 0.5} = 0.1 \text{ volt}/\%$$

### 3.4.3.- Estabilidad del Sistema

Para estudiar la estabilidad del sistema completo, es suficiente el conocimiento de la F.T. en lazo abierto del bucle completo  $\frac{\delta n(s)}{V_e(s)}$ ,

$$K_{\delta}G_{\delta}(s) = \frac{\delta n(s)}{V_e(s)} = \frac{A.KG(s)}{1+KG(s).BF(s)} \quad (3.20)$$

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

$$\text{Para } KG.BF \gg 1 \quad K_{\delta}G_{\delta} \rightarrow \frac{1}{BF}$$

$$\text{Para } KG.BF \ll 1 \quad K_{\delta}G_{\delta} \rightarrow KG$$

Utilizando la expresión (3.20), se completa el trazado de la curva para las frecuencias próximas a  $\omega=1$ . Las curvas resultantes se muestran en las figuras 3.4 y 3.5.

Se observa que el sistema es estable y que existe un margen de fase considerable, próximo a los  $85^{\circ}$ .

### 3.4.4.- Conclusiones

La relación (2.11), 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

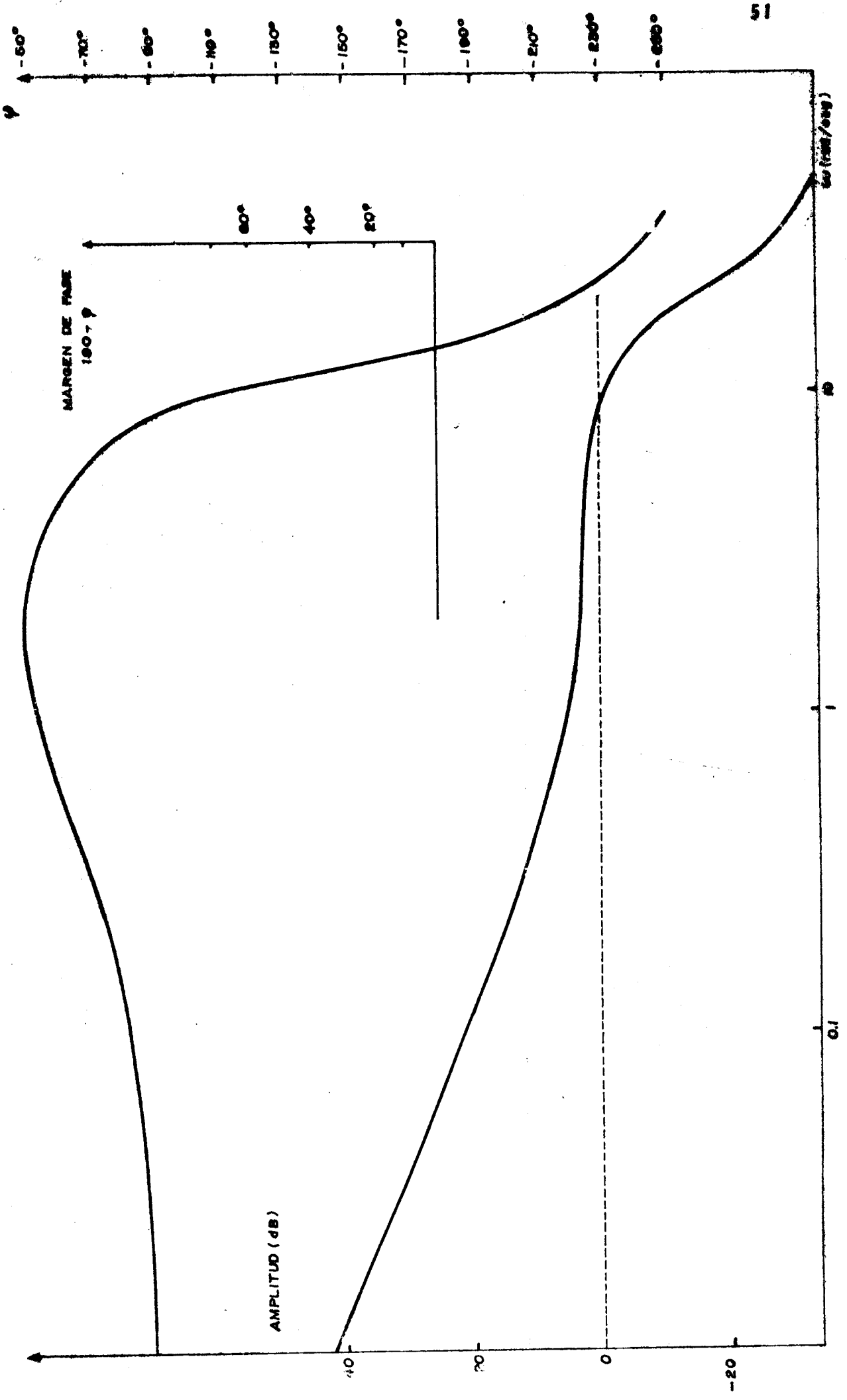


Fig. 3.4 CURVAS DE AMPLITUD Y FASE A  $\frac{K_0}{1 + K_0 s}$

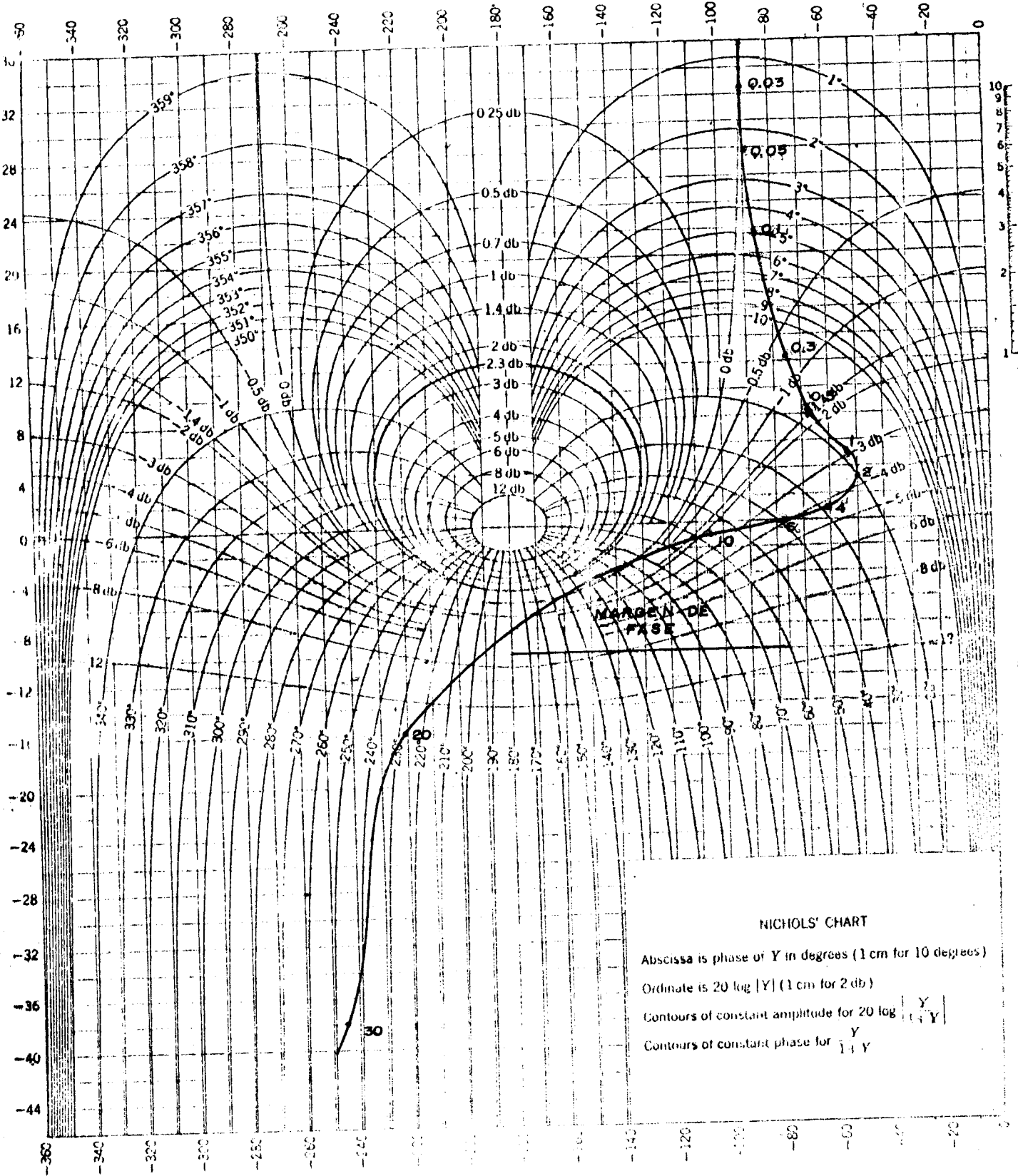


Fig. 3.5 CURVA AMPLITUD-FASE  $A \frac{KG}{1+KG.BF}$

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 (figura 3.2) no se hace sentir mucho más allá de la frecuencia  $\frac{1}{\tau_2}$ , alcanzando los  $80^\circ$  a  $0.1$  rad/seg.

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

## CAPITULO IV

### SIMULACION

#### 4.1.- Introducción

La simulación del sistema está destinado a verificar el comportamiento del reactor controlado automáticamente y las condiciones de funcionamiento real.

Se obtendrá en primer lugar la respuesta del reactor a diferentes perturbaciones, con el objeto de poner a punto el sistema de pilotaje automático.

Los resultados obtenidos en el análisis teórico de la estabilidad realizado, basado en la teoría de servomecanismos lineales, son válidos sólo para las potencias de operación próximas al valor de equilibrio. Por el contrario, la simulación del sistema permite un estudio más avanzado, de un lado porque introduce las no linealidades del sistema y por otro lado porque se considera un margen muy importante de variación de los parámetros.

En la simulación, se considera solamente el efecto de la temperatura debida al moderador sobre la reactividad. Los efectos sobre la reactividad de los venenos (Xenon y Samario) no son incluidos en la simulación, esto es teniendo en cuenta que se trata de efectos a largo plazo que no puede modificar los resultados de los ensayos, cuya duración es de algunos minutos.



La simulación se realizó usando el Programa SYSTEM/360: CSMP: Continuous System Modeling Program (Ref. 16).

#### 4.2.- Modelo Matemático del Sistema

##### 4.2.1.- Ecuaciones Físicas

El esquema funcional se representa en la figura 4.1.

El comportamiento dinámico del reactor queda representado por las ecuaciones cinéticas, utilizando seis grupos de neutrones retardados (Ref. 1, 2).

Nivel de potencia:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{\lambda^*} n + \sum \lambda_i C_i \quad (4.1)$$

Concentración de precursores:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\lambda^*} n - \lambda_i C_i \quad (4.2) \text{ a } (4.7)$$

La reactividad total es la suma de los efectos introducidos por la barra de regulación, la barra de compensación y las variaciones de la temperatura del moderador.

Balance de reactividad:

$$\delta k = \delta k_R + \delta k_C + \delta k_T \quad (4.8)$$

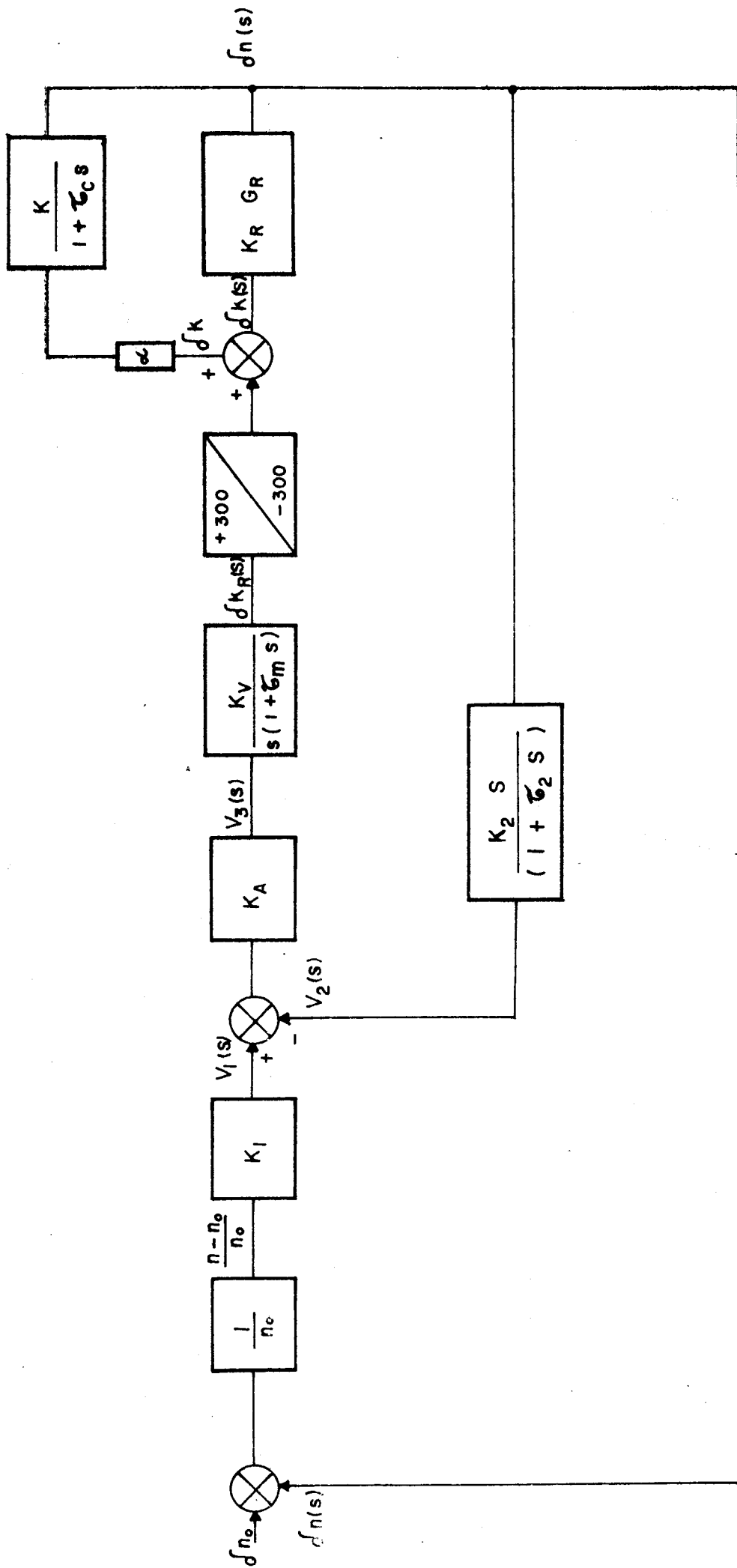


Fig. 4.1 ESQUEMA FUNCIONAL DEL SISTEMA DE PILOTAJE AUTOMATICO

La ecuación de intercambio térmico entre el combustible y el agua del núcleo no ha sido considerado. El calor liberado en el combustible se supone transferido sin retardo al seno del moderador (Ref. 1).

Reactividad por temperatura en el moderador:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{n}{M_c} - \frac{1}{\tau_c} (T_m - T_e) \quad (4.9)$$

$$\delta k_T = \alpha (T_m - T_{m0}) \quad (4.10)$$

Comparador:

$$V_1 = K_1 \frac{n - n_0}{n_0} \quad (4.11)$$

Periódometro (Ref. 3):

$$V_2 = K_2 \cdot 100 \frac{dn}{ndt} (1 - e^{-t/\tau_2}) \quad (4.12)$$

Amplificador de potencia:

$$V_3 = K_A (V_1 - V_2) \quad (4.13)$$

La reactividad introducida por las barras se supone proporcional al desplazamiento.

Barra de regulación:

$$\frac{d^2 \delta k_R}{dt^2} = \frac{1}{\tau_m} K_V V_3 - \frac{1}{\tau_r} \frac{d \delta k_R}{dt} \quad (4.14)$$

Barra de compensación:

$$\delta k_c = a.t \quad (4.15)$$

Podemos realizar ciertas modificaciones que llevan a la eliminación de variables que no son necesarias obtener explícitamente. Este cambio de variables, trae consigo también una simplificación del esquema y una economía de los elementos de cálculo.

Un cambio de variables aplicado a las ecuaciones cinéticas permite escribir:

$$C_i = \frac{\beta_i}{\lambda_i} \gamma_i$$

Donde  $\gamma_i$  es la nueva variable.

Las ecuaciones de (4.1) a (4.7) se transforman por lo tanto:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{\lambda} n + \frac{1}{\lambda} \sum \beta_i \gamma_i \quad (4.16)$$

$$\frac{d\gamma_i}{dt} = \lambda_i (n - \gamma_i) \quad (4.17) \text{ a } (4.22)$$

#### 4.2.2.- Definición de Variables

##### 4.2.2.1.- Reactor

$n$  : Potencia térmica (Kw).

$C_i$  : Potencia correspondiente a los emisores de neutrones retardados del grupo  $\langle\langle i \rangle\rangle$ .

- $\delta k$  : Reactividad total (pcm).
- $\delta k_r$  : Reactividad introducida por la barra de regulación (pcm).
- $\delta k_c$  : Reactividad introducida por la barra de compensación (pcm).
- $\delta k_T$  : Reactividad debido al efecto de temperatura (pcm).
- $T_e$  : Temperatura de entrada del agua del núcleo ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $T_m$  : Temperatura media del agua del núcleo ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $T_s$  : Temperatura de salida del agua del núcleo ( $^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4.2.2.2.- Pilotaje Automático

- $V_1$  : Tensión a la salida del comparador (volts).
- $V_2$  : Tensión a la salida del periodómetro (volts).
- $V_3$  : Tensión de comando del motor (volts).

#### 4.2.3.- Constantes y parámetros

##### 4.2.3.1.- Reactor

- $\lambda^*$  : Vida media de neutrones (seg).
- $\beta$  : Fracción de neutrones retardados.
- $\beta_i$  : Fracción de neutrones retardados pertenecientes al grupo  $\langle\langle i \rangle\rangle$  (1 a 6).

$\lambda_i$  : Constante de decaimiento del grupo <<i>>  
(seg<sup>-1</sup>).

$M_c$  : Masa calorífica del agua del núcleo (Kw  
seg/°C).

$\tau_c$  : Constante de tiempo de calentamiento del  
agua del núcleo (seg).

$\alpha$  : Coeficiente de temperatura del moderador  
(pcm/°C).

$T_{m0}$  : Valor inicial de  $T_m$ .

#### 4.2.3.2.- Pilotaje automático

$K_1$  : Constante del amplificador de error -  
(volts/%).

$K_A$  : Ganancia del servoamplificador.

$\tau_2$  : Constante de tiempo del periodómetro (seg).

$K_2$  : Constante del periodómetro (volts seg/ %).

$\tau_m$  : Constante del tiempo del motor (seg).

$K_v$  : Constante de velocidad del motor ( $\frac{\text{pcm/seg}}{\text{volts}}$ ).

$a$  : Velocidad de la barra de compensación -  
(pcm/seg).

$n_0$  : Valor de referencia de la potencia (Kw).

#### 4.2.4.- Valores Iniciales de las Variables

$n$ (Kw)	$T_e$ °C	$T_m$ °C	$T_\Delta$ °C	$\delta k$ pcm	$V_1 - V_2 - V_3$ volts
2000	40	42.15	44.3	0	0

#### 4.2.5.- Valores numéricos de las Constantes

##### 4.2.5.1.- Reactor

$$\lambda^* : 5. 10^{-5} \text{ seg}$$

$$B : 0.0064$$

$$M_c : 261.7 \text{ Kw seg/}^\circ\text{C}$$

$$\tau_c : 0.31 \text{ seg}$$

$$\alpha : -15 \text{ pcm/}^\circ\text{C}$$

$$T_{mo} : 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 : 3.01 \text{ seg}^{-1}$$

$$\lambda_2 : 1.14 \text{ seg}^{-1}$$

$$\lambda_3 : 0.301 \text{ seg}^{-1}$$

$$\lambda_4 : 0.111 \text{ seg}^{-1}$$

$$\lambda_5 : 0.0305 \text{ seg}^{-1}$$

$$\lambda_6 : 0.0124 \text{ seg}^{-1}$$

$$B_1 : 27. 10^{-5}$$

$$B_2 : 74. 10^{-5}$$

$$B_3 : 253. 10^{-5}$$

$$B_4 : 125. 10^{-5}$$

$$B_5 : 140. 10^{-5}$$

$$B_6 : 21. 10^{-5}$$

##### 4.2.5.2.- Pilotaje automático

$$K_1 : 0.1 \text{ volt/\%}$$

$$K_A : \text{regulable}$$

$$\tau_2 : 1 \text{ seg}$$

$$K_2 : 0.8 \text{ volt seg/\%}$$

$K_v$  : regulable

$m$  : 0.15 seg

$a$  : 10 pcm/seg

#### 4.3.- Programa de Ensayos

##### 4.3.1.- Descripción de Ensayos

Los ensayos realizados pueden clasificarse en tres tipos diferentes:

a) Verificación del comportamiento del reactor libre, sometido a perturbaciones del tipo "escalón" (step)

b) Obtención de la respuesta transitoria del reactor, sometido a perturbaciones del tipo escalón.

c) Cambio automático de la potencia con limita  
ción del período mínimo. El reactor está estable a 100 Kw y  $n_0$  es pasado bruscamente al valor de 1000 Kw e inversamen  
te.

El ensayo a) se hizo considerando sólo las e-  
cuaciones cinéticas y el ensayo b) sin señal de período.

##### 4.3.2.- Listado de Programa

A continuación se muestra el listado completo del programa para el primer ensayo de la tercera serie, in  
cluido el segmento TERMINAL y las tarjetas de control.



//FIKI0943 JOB (T038MCM4,701067E),'PIZARRO-CESA',CLASS=B

// EXEC CSMP

//CSMP.SYSIN DD \*

TITLE SIMULACION: SISTEMA DE PILOTAJE AUTOMATICO DE UN REAC  
TOR NUCLEAR

\* SEGMENTO INITIAL

INITIAL

CONSTANT L=5.E-5, BETA=0.0064, B1=27.E-5, B2=74.E-5, ...  
B3=253.E-5, B4=125.E-5, B5=140.E-5, ...  
B6=21.E-5, LAM1=3.01, LAM2=1.14, LAM3=0.301, ...  
LAM4=0.111, LAM5=0.0305, LAM6=0.0124, ...  
MC=261.7, TAUC=0.31, TE=40., TMO=40., ...  
K1=0.1, TAUM=0.15, ALFA=-15.

INCON ICN=2000., ITM=42.15, IDK=0.

PARAMETER KA=300., KV=0.45, K2=0.8

\* SEGMENTO DYNAMIC

DYNAMIC

NI=0.2\*DK\*N (BETA\*N-B1\*GAM1-B2\*GAM2-B3\*GAM3 ...  
-B4\*GAM4-B5\*GAM5-B6\*GAM6)/L

N=INTGRL(ICV,NI)

DG1=LAM1\*(N-GAM1)

GAM1=INTGRL(ICN,DG1)

DG2=LAM2\*(N-GAM2)

GAM2=INTGRL(ICV,DG2)

DG3=LAM3\*(N-GAM3)

GAM3=INTGRL(ICV,DG3)

DG4=LAM4\*(N-GAM4)

```

GAM4=INTGRL(ICN,DG4)
DG5=LAM5*(N-GAM5)
GAM5=INTGRL(ICN,DG5)
DG6=LAM6*(N-GAM6)
GAM6=INTGRL(ICN,DG6)
DK=DKR+DKT+DKC
TI=N/MC-(TM-TE)/TAUC
TM=INTGRL(ITM,TI)
DKT=ALFA*(TM-TM0)
CB=900.*STEP(45.)
NO=100.+CB
E=100.*(N-NO)/NO
EMAX=LIMIT(-10.,+10.,E)
V1=K1*EMAX
EP=EXP(-TIME)
DN=DERIV(ICN,N)
V2=K2*100.*DN*(1.-EP)/N
V3=KA*(V1-V2)
DDKR=DERIV(IDK,DKR)
DKR1=(KV*V3-DDKR)/TAUM
DKR2=INTGRL(IDK,DKR1)
DKR=INTGRL(IDK,DKR2)
VADKR=ABS(DKR)
FC=COMPAR(VADKR,180.)
DKC=FC*10.*TIME

```

•  
 TERMINAL

TIMER

SEGMENTO TERMINAL  
 DELT=0.01, FINTIM=330., PRDEL=7.5, OUTDEL=7.5

PRTPLT        N  
END  
STOP  
ENDJOB  
/\*

#### 4.4.- Resultados

##### 4.4.1.- Presentación

Los resultados se obtienen bajo la forma de curvas y tablas que son presentadas a continuación.

En cada ensayo de la segunda serie, se han registrado simultáneamente la potencia térmica y el desplazamiento de la barra de regulación, expresado en unidades de reactividad. No fue necesario registrar la barra de compensación.

En la primera y última serie de ensayos, se graficó e imprimió solamente la potencia.

##### 4.4.2.- Ensayos

La primera serie de ensayos tiende a verificar la simulación correcta de las ecuaciones cinéticas. Para ello, se introduce perturbaciones "escalón" y se observa la evolución de la potencia.

Las curvas obtenidas se muestran en la figura 4.2 (Tabla 4.1).

Se verifica también que el reactor no evoluciona en ausencia de perturbaciones.

Cuando se ha verificado que la simulación del reactor es correcta se efectúa los ensayos sobre el sistema completo.

En la segunda serie el reactor es controlado automáticamente sin señal de período. Las perturbaciones sobre la reactividad son del tipo "escalón". Se muestran los resultados en las figuras 4.3 a 4.6 (Tablas 4.2 a 4.5). Los mejores resultados se obtienen con una ganancia de 300 y una velocidad máxima de la barra de regulación de  $45 \frac{\text{pcm}}{\text{seg}}$ .

En la tercera serie de ensayos la señal de error de pilotaje automático es corregida por la señal de período. Si partimos del sistema estable a 100 Kw se pasa bruscamente al valor 1000 Kw e inversamente cuando se quiere disminuir la potencia.

La constante del periodómetro ha sido ajustada a 0.8 para obtener una evolución con un período del orden de 80 seg. Los resultados se muestran en las figuras 4.7 y 4.8 (Tabla 4.6). Se ve que no se sobrepasa considerablemente la potencia final.

#### 4.4.3.- Conclusiones

Del conjunto de resultados obtenidos se puede

deducir que el sistema no presenta inestabilidad al menos para las ganancias utilizadas.

Los resultados de las series de ensayos nos conduce a adoptar una velocidad máxima de la barra de 45 pcm/seg y una ganancia de 300. El comportamiento transitorio es satisfactorio (más seguro y lento).

Así mismo se puede sacar a conclusión que la variación de  $n_0$  es un medio muy conveniente para efectuar los cambios de potencia en la gama del funcionamiento normal.

Los ensayos con señal de período tienen por objeto verificar la evolución de la potencia en el caso en que se desea un arranque totalmente automático. Las limitaciones impuestas por la instrumentación (amplificador lineal) no permite seguir la potencia sino más que sobre un rango igual a una década, además se puede sacar la conclusión siguiente: el comportamiento será satisfactorio sobre cualquier número de décadas si las características del instrumento de medición especialmente del periodómetro, no cambia de un nivel a otro.

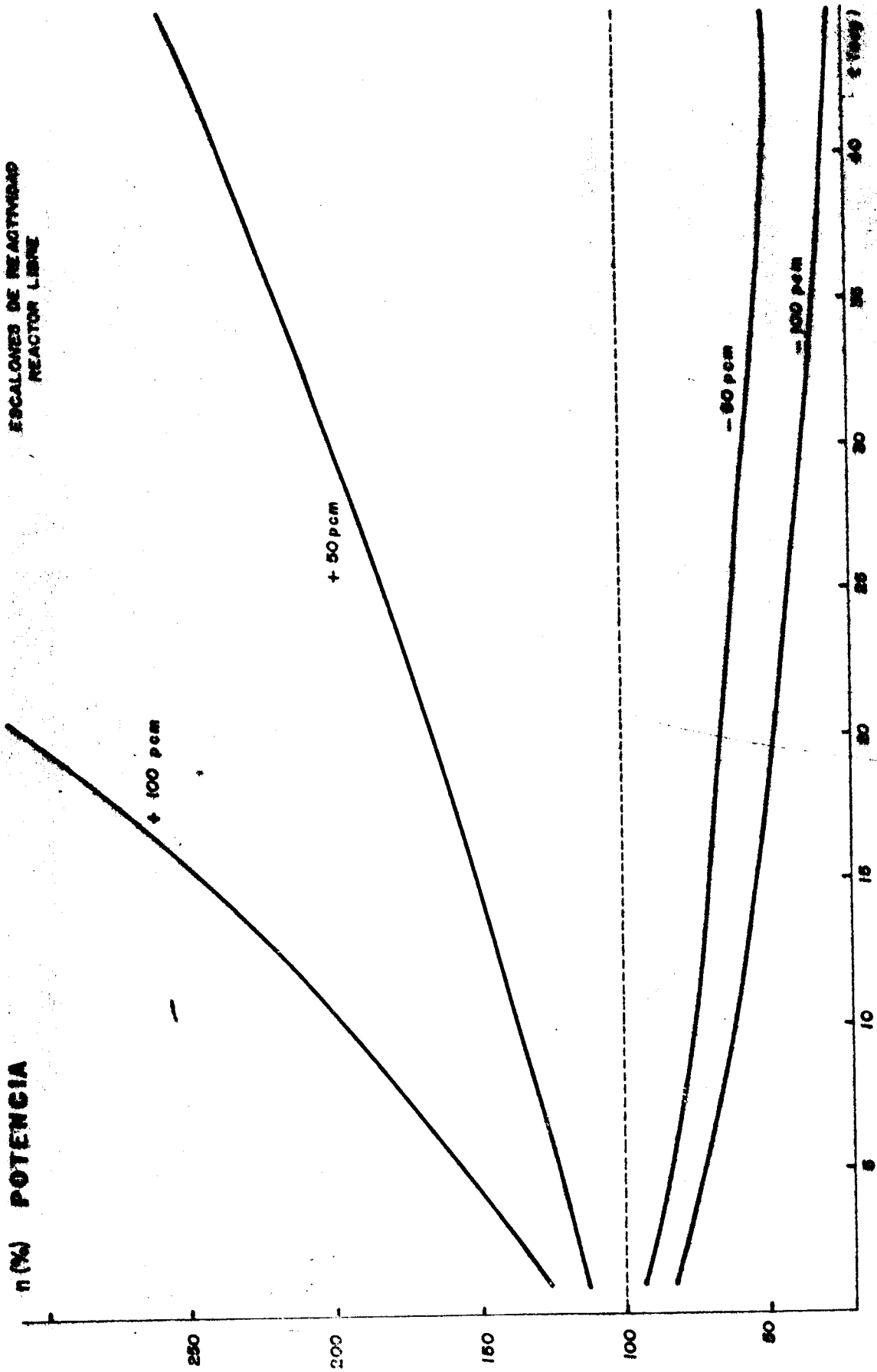


FIG. 3.2

PERTURBACION

STEP DE REACTIVIDAD DE + 50 pcm

CONDICIONES

REACTOR CRITICO A 2 MV

$K_V = 0.15 \frac{\text{pcm/seg}}{\text{year}}$

$\lambda_1 : 10\%$

$K_A : 50, 100, 200$

POTENCIA

$\pi$  (Mw)

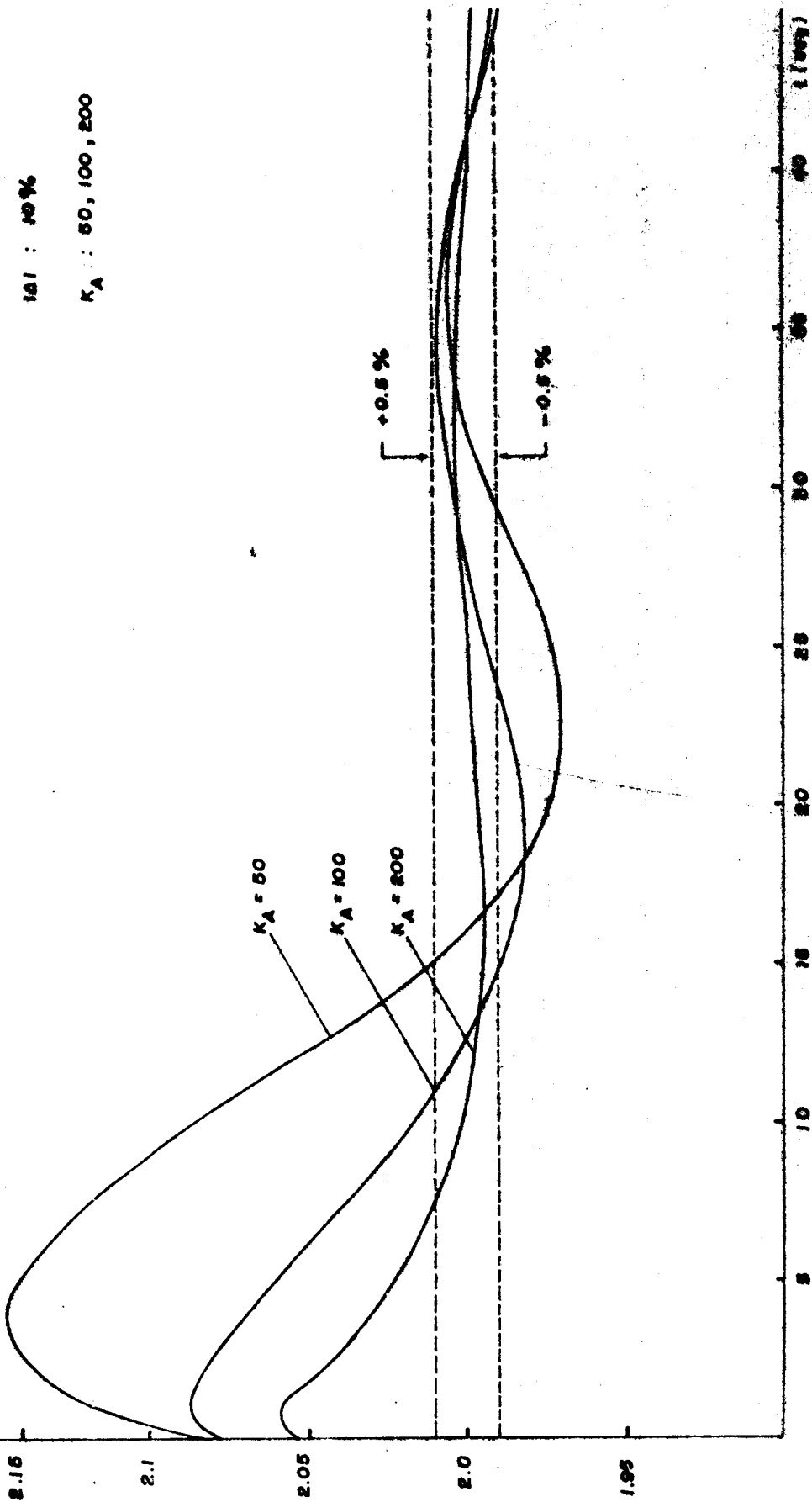


Fig. 4.3

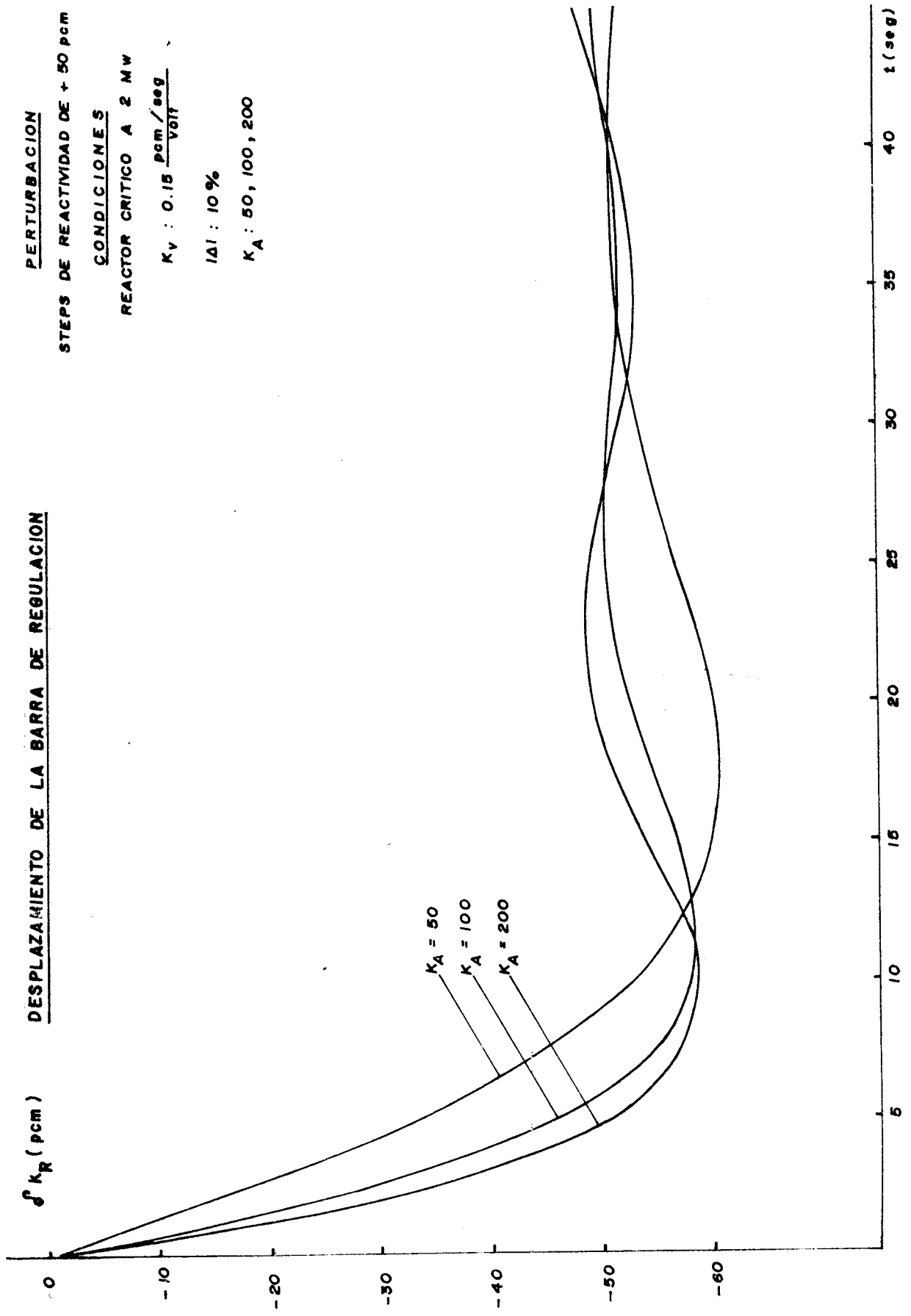
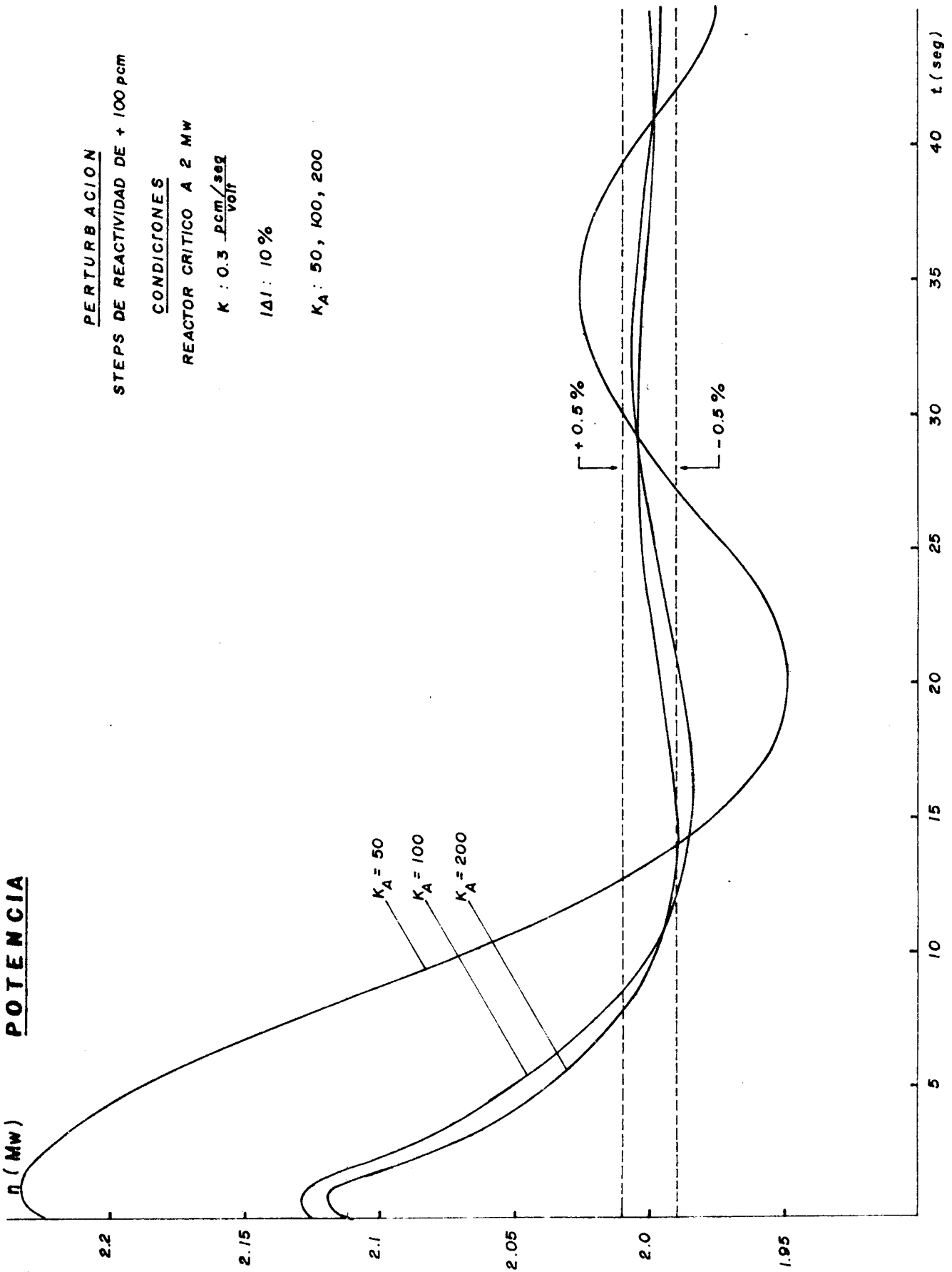


Fig. 4.4



POTENCIA



PERTURBACION  
STEPS DE REACTIVIDAD DE + 100 pcm

CONDICIONES  
REACTOR CRITICO A 2 MW

$K : 0.3 \frac{\text{pcm/seg}}{\text{volt}}$

$|A| : 10\%$

$K_A : 50, 100, 200$

Fig. 4.5

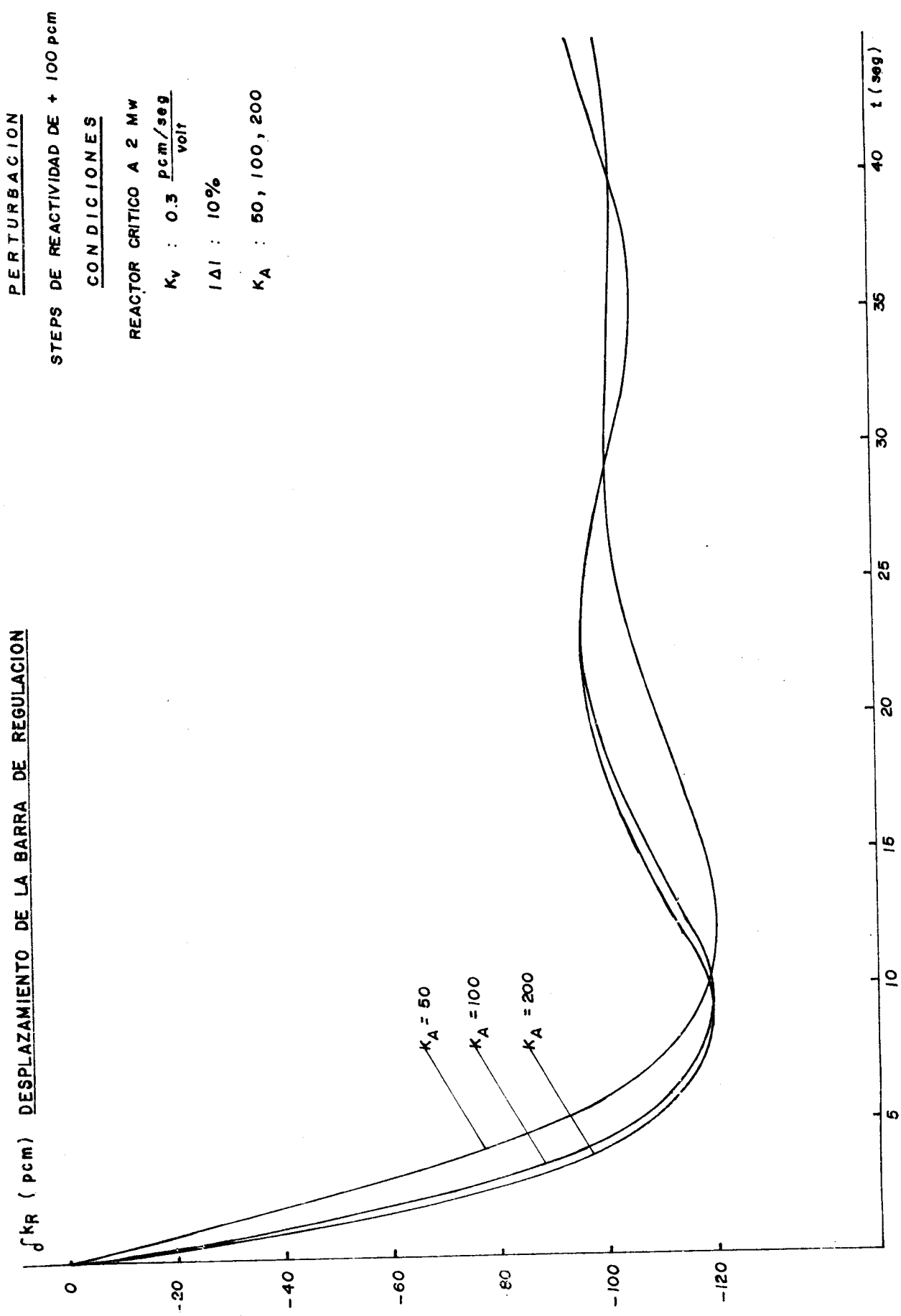


Fig. 4.6

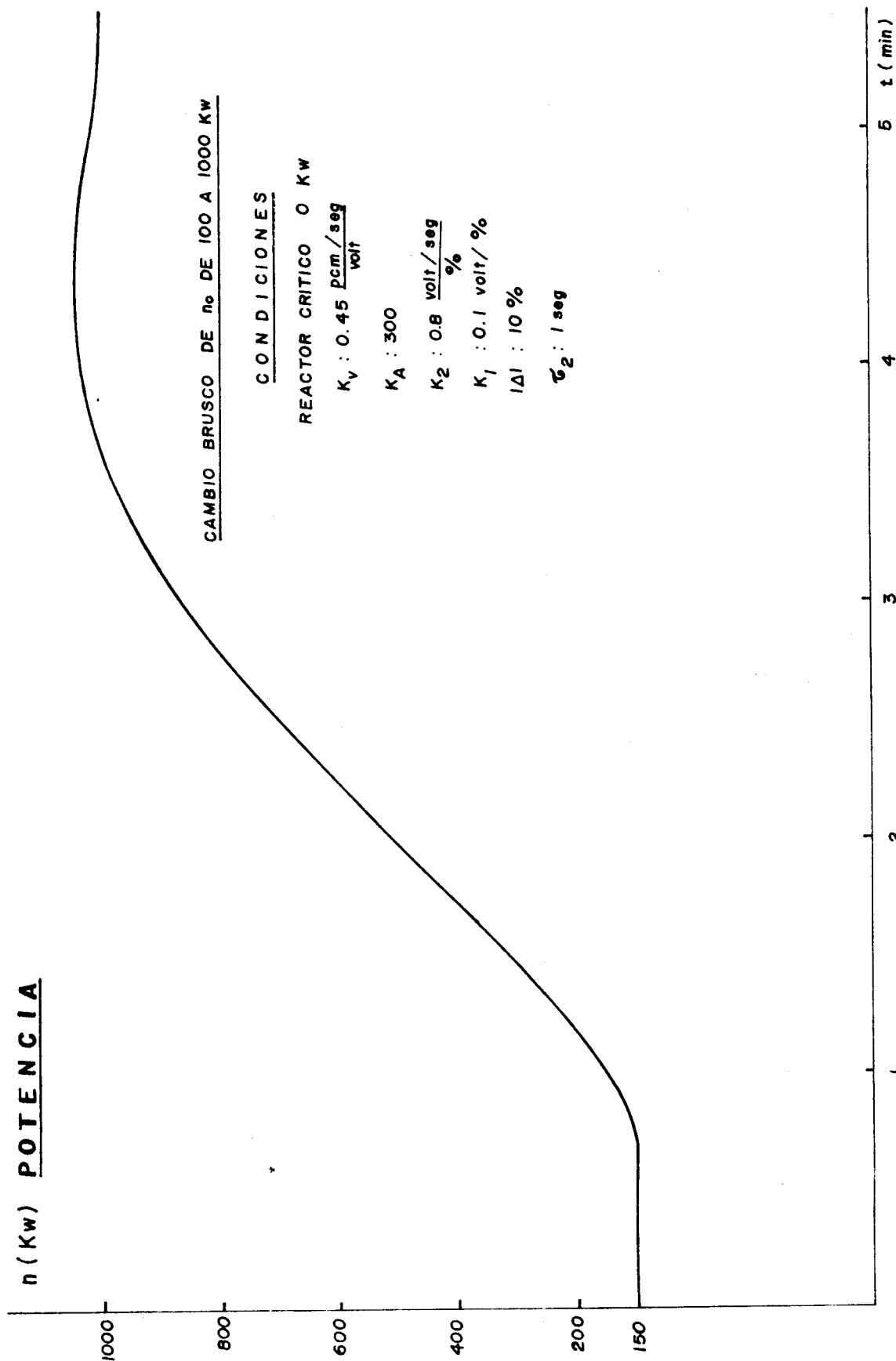


Fig. 4.7

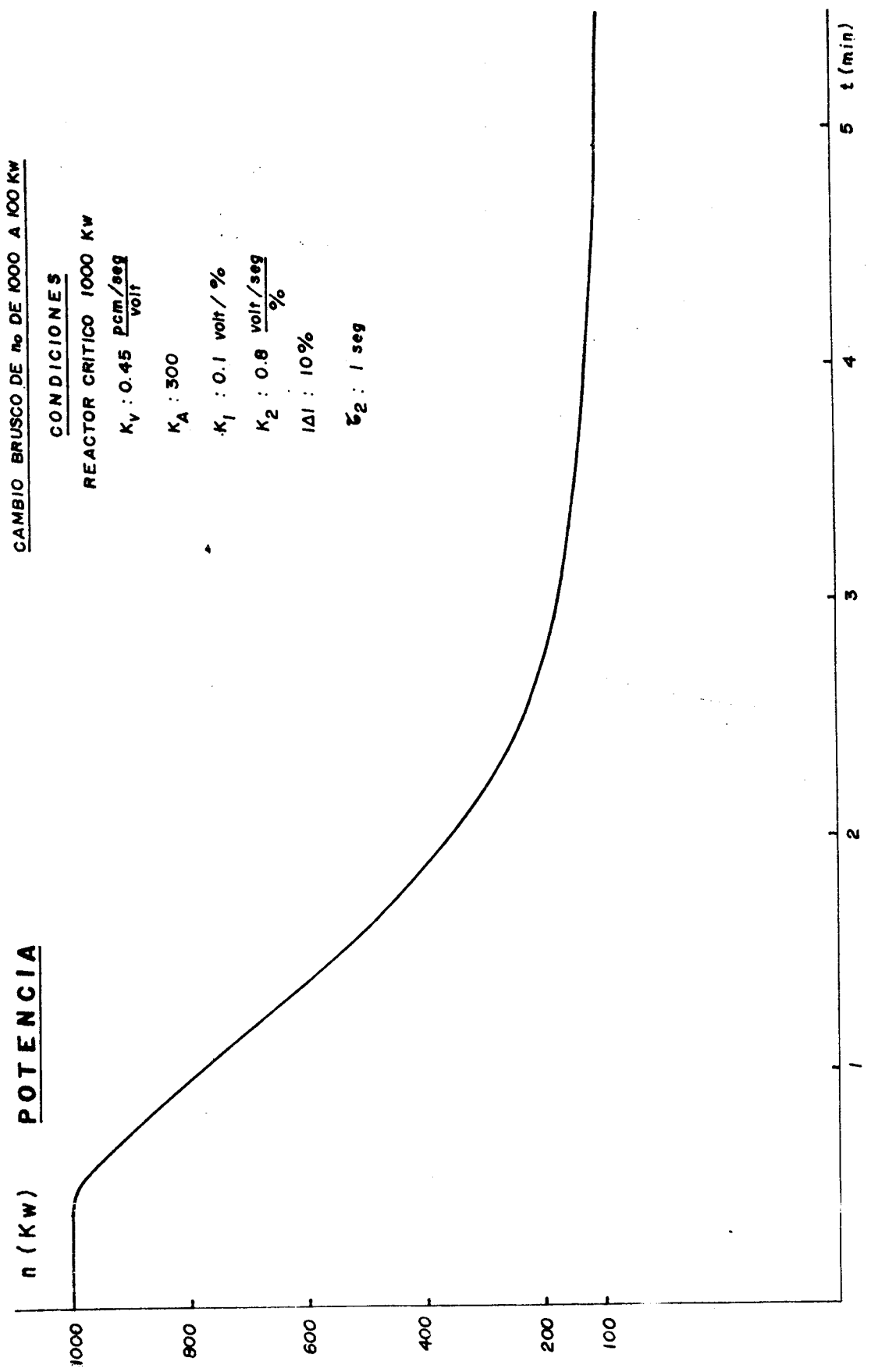


Fig. 4.8

TABLA 4.1

VARIACION DE LA POTENCIA DEL REACTOR LIBRE A DIFERENTES  
PERTURBACIONES

PRIMERA SERIE ENSAYO # 1 POT: 2 Mw(100%) STEP: 0 pcm TIEMPO POTENCIA (seg) (%)		PRIMERA SERIE ENSAYO # 2 POT: 2 Mw(100%) STEP: +50 pcm TIEMPO POTENCIA (seg) (%)	
1	100.000	1	111.835
2	100.000	2	114.665
3	100.000	3	117.355
4	100.000	4	120.000
5	100.000	5	122.640
6	100.000	6	125.275
7	100.000	7	127.920
8	100.000	8	130.585
9	100.000	9	133.265
10	100.000	10	135.970
11	100.000	11	138.695
12	100.000	12	141.450
13	100.000	13	144.235
14	100.000	14	147.055
15	100.000	15	149.900
16	100.000	16	152.790
17	100.000	17	155.715
18	100.000	18	158.680
19	100.000	19	161.685
20	100.000	20	164.730
21	100.000	21	167.815
22	100.000	22	170.950
23	100.000	23	174.125
24	100.000	24	177.350
25	100.000	25	180.620
26	100.000	26	183.940
27	100.000	27	187.310
28	100.000	28	190.735
29	100.000	29	194.205
30	100.000	30	197.730
31	100.000	31	201.305
32	100.000	32	204.940
33	100.000	33	208.635
34	100.000	34	212.380
35	100.000	35	216.185
36	100.000	36	220.050
37	100.000	37	223.970
38	100.000	38	227.955
39	100.000	39	232.005
40	100.000	40	236.115
41	100.000	41	240.285
42	100.000	42	244.530
43	100.000	43	248.835
44	100.000	44	253.215
45	100.000	45	257.660

TABLA 4.1

(CONTINUACION)

PRIMERA SERIE ENSAYO # 3 POT: 2 Mw(100%) STEP: +100 pcm TIEMPO POTENCIA (seg) (%)		PRIMERA SERIE ENSAYO # 4 POT: 2 Mw(100%) STEP: -50 pcm TIEMPO POTENCIA (seg) (%)		PRIMERA SERIE ENSAYO # 5 POT: 2 Mw(100%) STEP: -100 pcm TIEMPO POTENCIA (seg) (%)	
1	126.685	1	90.370	1	82.385
2	133.855	2	88.480	2	79.220
3	140.980	3	86.770	3	76.415
4	148.045	4	85.170	4	73.830
5	155.370	5	83.650	5	71.415
6	162.915	6	82.190	6	69.140
7	170.710	7	80.785	7	66.990
8	178.770	8	79.435	8	64.955
9	187.115	9	78.125	9	63.015
10	195.770	10	76.865	10	61.175
11	204.745	11	75.645	11	59.415
12	214.055	12	74.455	12	57.740
13	223.735	13	73.305	13	56.130
14	233.790	14	72.185	14	54.595
15	244.235	15	71.095	15	53.120
16	255.100	16	70.035	16	51.705
17	266.430	17	69.000	17	50.345
18	278.185	18	67.990	18	49.041
19	290.420	19	67.005	19	47.785
20	303.145	20	66.045	20	46.575
21	316.395	21	65.110	21	45.410
22	330.185	22	64.195	22	44.287
23	344.540	23	63.300	23	43.204
24	359.485	24	62.420	24	42.158
25	375.045	25	61.565	25	41.150
26	391.255	26	60.730	26	40.176
27	408.125	27	59.905	27	39.234
28	425.700	28	59.105	28	38.324
29	443.990	29	58.315	29	37.446
30	463.055	30	57.550	30	36.596
31	482.905	31	56.850	31	35.774
32	503.550	32	56.055	32	34.978
33	525.100	33	55.330	33	34.207
34	547.550	34	54.620	34	33.462
35	570.900	35	53.925	35	32.739
36	595.250	36	53.245	36	32.040
37	620.600	37	52.575	37	31.362
38	647.000	38	51.920	38	30.706
39	674.500	39	51.275	39	30.069
40	703.150	40	50.645	40	29.452
41	733.000	41	50.025	41	28.854
42	764.100	42	49.419	42	28.274
43	796.500	43	48.822	43	27.711
44	830.200	44	48.237	44	27.165
45	865.350	45	47.662	45	26.635

TABLA 4.2

## VARIACION DE LA POTENCIA DEL SISTEMA

(PERTURBACION: STEPS DE REACTIVIDAD DE +50 pcm)

SEGUNDA SERIE ENSAYO # 1 POT: 2 Mw KV= 0.15 pcm V/s KA= 50		SEGUNDA SERIE ENSAYO # 2 POT: 2 Mw KV= 0.15 pcm V/s KA= 100		SEGUNDA SERIE ENSAYO # 3 POT: 2 Mw KV= 0.15 pcm V/s KA= 200	
TIEMPO (seg)	POTENCIA (Mw)	TIEMPO (seg)	POTENCIA (Mw)	TIEMPO (seg)	POTENCIA (Mw)
1.0	2.118	1.0	2.088	1.0	2.059
2.0	2.134	2.0	2.083	2.0	2.048
3.0	2.142	3.0	2.077	3.0	2.039
4.0	2.144	4.0	2.069	4.0	2.031
5.0	2.141	5.0	2.061	5.0	2.023
6.0	2.134	6.0	2.052	6.0	2.017
7.0	2.123	7.0	2.043	7.0	2.012
8.0	2.111	8.0	2.034	8.0	2.008
9.0	2.097	9.0	2.026	9.0	2.004
10.0	2.082	10.0	2.018	10.0	2.001
11.0	2.067	11.0	2.011	11.0	1.999
12.0	2.052	12.0	2.004	12.0	1.997
13.0	2.038	13.0	1.998	13.0	1.996
14.0	2.024	14.0	1.993	14.0	1.995
15.0	2.012	15.0	1.989	15.0	1.995
16.0	2.001	16.0	1.986	16.0	1.995
17.0	1.992	17.0	1.984	17.0	1.995
18.0	1.985	18.0	1.983	18.0	1.995
19.0	1.979	19.0	1.982	19.0	1.995
20.0	1.974	20.0	1.983	20.0	1.996
21.0	1.971	21.0	1.984	21.0	1.997
22.0	1.970	22.0	1.985	22.0	1.998
23.0	1.970	23.0	1.987	23.0	1.998
24.0	1.971	24.0	1.989	24.0	1.999
25.0	1.973	25.0	1.992	25.0	2.000
26.0	1.976	26.0	1.995	26.0	2.000
27.0	1.979	27.0	1.997	27.0	2.001
28.0	1.983	28.0	2.000	28.0	2.002
29.0	1.987	29.0	2.002	29.0	2.002
30.0	1.991	30.0	2.004	30.0	2.002
31.0	1.995	31.0	2.006	31.0	2.002
32.0	1.999	32.0	2.008	32.0	2.002
33.0	2.002	33.0	2.009	33.0	2.002
34.0	2.004	34.0	2.009	34.0	2.002
35.0	2.006	35.0	2.009	35.0	2.002
36.0	2.007	36.0	2.008	36.0	2.001
37.0	2.007	37.0	2.007	37.0	2.001
38.0	2.006	38.0	2.005	38.0	2.000
39.0	2.004	39.0	2.003	39.0	2.000
40.0	2.002	40.0	2.001	40.0	1.999
41.0	1.999	41.0	1.999	41.0	1.999
42.0	1.996	42.0	1.996	42.0	1.998
43.0	1.993	43.0	1.994	43.0	1.998
44.0	1.990	44.0	1.992	44.0	1.998
45.0	1.989	45.0	1.991	45.0	1.998

TABLA 4.3

## DESPLAZAMIENTO DE LA BARRA DE REGULACION

(PERTURBACION: STEPS DE REACTIVIDAD DE +50 pcm)

SEGUNDA SERIE ENSAYO # 4 POT: 2 Mw Kv= 0.15 pcm V/s KA= 50		SEGUNDA SERIE ENSAYO # 5 POT: 2 Mw Kv= 0.15 pcm V/s KA= 100		SEGUNDA SERIE ENSAYO # 6 POT: 2 Mw Kv= 0.15 pcm V/s KA= 200	
TIEMPO (seg)	BARR.REG. (pcm)	TIEMPO (seg)	BARR.REG. (pcm)	TIEMPO (seg)	BARR.REG. (pcm)
1.0	-6.4	1.0	-13.2	1.0	-18.4
2.0	-14.4	2.0	-24.3	2.0	-29.7
3.0	-21.5	3.0	-33.3	3.0	-38.6
4.0	-27.9	4.0	-40.6	4.0	-45.5
5.0	-33.5	5.0	-46.3	5.0	-50.7
6.0	-38.5	6.0	-50.6	6.0	-54.3
7.0	-42.9	7.0	-53.9	7.0	-56.8
8.0	-46.6	8.0	-56.1	8.0	-58.2
9.0	-49.8	9.0	-57.6	9.0	-58.8
10.0	-52.5	10.0	-58.4	10.0	-58.7
11.0	-54.8	11.0	-58.7	11.0	-58.2
12.0	-56.6	12.0	-58.6	12.0	-57.4
13.0	-58.0	13.0	-58.1	13.0	-56.3
14.0	-59.0	14.0	-57.5	14.0	-55.1
15.0	-59.8	15.0	-56.7	15.0	-53.9
16.0	-60.3	16.0	-55.8	16.0	-52.7
17.0	-60.5	17.0	-54.9	17.0	-51.6
18.0	-60.5	18.0	-54.0	18.0	-50.7
19.0	-60.3	19.0	-53.2	19.0	-49.9
20.0	-59.9	20.0	-52.5	20.0	-49.3
21.0	-59.5	21.0	-51.8	21.0	-48.9
22.0	-58.9	22.0	-51.3	22.0	-48.6
23.0	-58.2	23.0	-50.9	23.0	-48.6
24.0	-57.6	24.0	-50.6	24.0	-48.7
25.0	-56.8	25.0	-50.4	25.0	-49.0
26.0	-56.1	26.0	-50.3	26.0	-49.3
27.0	-55.4	27.0	-50.4	27.0	-49.8
28.0	-54.7	28.0	-50.5	28.0	-50.4
29.0	-54.0	29.0	-50.6	29.0	-50.9
30.0	-53.4	30.0	-50.8	30.0	-51.5
31.0	-52.8	31.0	-51.0	31.0	-52.0
32.0	-52.3	32.0	-51.2	32.0	-52.4
33.0	-51.9	33.0	-51.4	33.0	-52.8
34.0	-51.6	34.0	-51.6	34.0	-53.0
35.0	-51.3	35.0	-51.7	35.0	-53.1
36.0	-51.1	36.0	-51.7	36.0	-53.6
37.0	-51.0	37.0	-51.7	37.0	-52.8
38.0	-51.0	38.0	-51.6	38.0	-52.4
39.0	-51.0	39.0	-51.4	39.0	-51.9
40.0	-51.1	40.0	-51.1	40.0	-51.3
41.0	-51.1	41.0	-50.8	41.0	-50.6
42.0	-51.2	42.0	-50.4	42.0	-49.8
43.0	-51.3	43.0	-50.0	43.0	-49.1
44.0	-51.4	44.0	-49.7	44.0	-48.5
45.0	-51.4	45.0	-49.4	45.0	-48.1



TABLA 4.4

## VARIACION DE LA POTENCIA DEL SISTEMA

(PERTURBACION: STEPS DE REACTIVIDAD DE +100 pcm)

SEGUNDA SERIE ENSAYO # 7 POT: 2 Mw Kv= 0.3 pcm V/s KA= 50		SEGUNDA SERIE ENSAYO # 8 POT: 2 Mw Kv= 0.3 pcm V/s KA= 100		SEGUNDA SERIE ENSAYO # 9 POT: 2 Mw Kv= 0.3 pcm V/s KA= 200	
TIEMPO (seg)	POTENCIA (Mw)	TIEMPO (seg)	POTENCIA (Mw)	TIEMPO (seg)	POTENCIA (Mw)
1.0	2.233	1.0	2.129	1.0	2.119
2.0	2.230	2.0	2.105	2.0	2.093
3.0	2.220	3.0	2.084	3.0	2.072
4.0	2.205	4.0	2.066	4.0	2.053
5.0	2.185	5.0	2.049	5.0	2.038
6.0	2.163	6.0	2.036	6.0	2.026
7.0	2.139	7.0	2.024	7.0	2.016
8.0	2.115	8.0	2.014	8.0	2.008
9.0	2.090	9.0	2.006	9.0	2.002
10.0	2.066	10.0	1.999	10.0	1.997
11.0	2.044	11.0	1.994	11.0	1.994
12.0	2.020	12.0	1.990	12.0	1.992
13.0	2.005	13.0	1.988	13.0	1.991
14.0	1.989	14.0	1.986	14.0	1.990
15.0	1.976	15.0	1.985	15.0	1.990
16.0	1.965	16.0	1.985	16.0	1.991
17.0	1.957	17.0	1.985	17.0	1.992
18.0	1.952	18.0	1.986	18.0	1.993
19.0	1.949	19.0	1.988	19.0	1.995
20.0	1.948	20.0	1.989	20.0	1.996
21.0	1.950	21.0	1.991	21.0	1.997
22.0	1.953	22.0	1.993	22.0	1.999
23.0	1.959	23.0	1.995	23.0	2.000
24.0	1.965	24.0	1.997	24.0	2.001
25.0	1.972	25.0	1.999	25.0	2.002
26.0	1.980	26.0	2.000	26.0	2.002
27.0	1.988	27.0	2.002	27.0	2.003
28.0	1.996	28.0	2.003	28.0	2.003
29.0	2.004	29.0	2.004	29.0	2.003
30.0	2.010	30.0	2.005	30.0	2.003
31.0	2.016	31.0	2.006	31.0	2.003
32.0	2.021	32.0	2.006	32.0	2.003
33.0	2.024	33.0	2.006	33.0	2.002
34.0	2.026	34.0	2.005	34.0	2.002
35.0	2.026	35.0	2.005	35.0	2.001
36.0	2.025	36.0	2.004	36.0	2.000
37.0	2.021	37.0	2.003	37.0	2.000
38.0	2.017	38.0	2.001	38.0	1.999
39.0	2.011	39.0	2.000	39.0	1.999
40.0	2.004	40.0	1.999	40.0	1.998
41.0	1.997	41.0	1.998	41.0	1.998
42.0	1.990	42.0	1.996	42.0	1.998
43.0	1.983	43.0	1.996	43.0	1.998
44.0	1.978	44.0	1.995	44.0	1.998
45.0	1.975	45.0	1.995	45.0	1.999

TABLA 4.5

## DESPLAZAMIENTO DE LA BARRA DE REGULACION

(PERTURBACION: STEPS DE REACTIVIDAD DE +100 pcm)

SEGUNDA SERIE ENSAYO # 10 POT: 2 Mw KV= 0.3 pcm v/s KA= 50 TIEMPO BARR.REG. (seg) (pcm)		SEGUNDA SERIE ENSAYO # 11 POT: 2 Mw KV= 0.3 pcm v/s KA= 100 TIEMPO BARR.REG. (seg) (pcm)		SEGUNDA SERIE ENSAYO # 12 POT: 2 Mw KV= 0.3 pcm v/s KA= 200 TIEMPO BARR.REG. (seg) (pcm)	
1.0	-18.3	1.0	-39.7	1.0	-41.6
2.0	-41.3	2.0	-62.5	2.0	-64.1
3.0	-60.3	3.0	-80.4	3.0	-81.7
4.0	-75.9	4.0	-94.1	4.0	-95.0
5.0	-88.5	5.0	-104.2	5.0	-104.8
6.0	-98.4	6.0	-111.2	6.0	-111.6
7.0	-106.0	7.0	-115.8	7.0	-115.8
8.0	-111.7	8.0	-118.3	8.0	-118.1
9.0	-115.6	9.0	-119.1	9.0	-118.7
10.0	-118.2	10.0	-118.7	10.0	-118.1
11.0	-119.6	11.0	-117.3	11.0	-116.6
12.0	-120.0	12.0	-115.3	12.0	-114.5
13.0	-119.7	13.0	-112.9	13.0	-112.0
14.0	-118.8	14.0	-110.3	14.0	-109.3
15.0	-117.5	15.0	-107.6	15.0	-106.6
16.0	-115.9	16.0	-105.0	16.0	-104.0
17.0	-114.1	17.0	-102.7	17.0	-101.7
18.0	-112.3	18.0	-100.7	18.0	-99.8
19.0	-110.5	19.0	-99.0	19.0	-98.2
20.0	-108.7	20.0	-97.7	20.0	-97.0
21.0	-107.1	21.0	-96.9	21.0	-96.3
22.0	-105.6	22.0	-96.4	22.0	-95.9
23.0	-104.4	23.0	-96.4	23.0	-96.0
24.0	-103.3	24.0	-96.7	24.0	-96.4
25.0	-102.5	25.0	-97.3	25.0	-97.2
26.0	-101.8	26.0	-98.1	26.0	-98.1
27.0	-101.4	27.0	-99.2	27.0	-99.3
28.0	-101.1	28.0	-100.3	28.0	-100.5
29.0	-101.0	29.0	-101.5	29.0	-101.8
30.0	-101.0	30.0	-102.7	30.0	-103.1
31.0	-101.2	31.0	-103.8	31.0	-104.2
32.0	-101.4	32.0	-104.7	32.0	-105.2
33.0	-101.6	33.0	-105.5	33.0	-105.9
34.0	-101.9	34.0	-105.9	34.0	-106.3
35.0	-102.1	35.0	-106.1	35.0	-106.5
36.0	-102.3	36.0	-105.9	36.0	-106.2
37.0	-102.5	37.0	-105.4	37.0	-105.7
38.0	-102.5	38.0	-104.6	38.0	-104.8
39.0	-102.5	39.0	-103.5	39.0	-103.5
40.0	-102.3	40.0	-102.1	40.0	-102.1
41.0	-102.0	41.0	-100.6	41.0	-100.4
42.0	-101.7	42.0	-99.0	42.0	-98.7
43.0	-101.2	43.0	-97.4	43.0	-97.1
44.0	-100.8	44.0	-96.2	44.0	-95.8
45.0	-100.3	45.0	-95.3	45.0	-94.9

TABLA 4.6

VARIACION DE LA POTENCIA DEL SISTEMA A CAMBIOS BRUSCOS DEL  
VIVEL DE REFERENCIA  $n_0$

TERCERA SERIE ENSAYO # 1 POT: 100→1000 Kw KV= 0.45 KA= 300		TERCERA SERIE ENSAYO # 2 POT: 1000→100 Kw KV= 0.45 KA= 300	
TIEMPO (min)	POTENCIA (Kw)	TIEMPO (min)	POTENCIA (Kw)
0.125	100	0.125	1000
0.250	100	0.250	1000
0.375	100	0.375	1000
0.500	100	0.500	998
0.625	100	0.625	958
0.750	101	0.750	908
0.875	124	0.875	852
1.000	152	1.000	792
1.125	186	1.125	731
1.250	225	1.250	669
1.375	267	1.375	609
1.500	311	1.500	551
1.625	358	1.625	496
1.750	407	1.750	446
1.875	456	1.875	400
2.000	505	2.000	358
2.125	555	2.125	321
2.250	603	2.250	288
2.375	650	2.375	260
2.500	696	2.500	236
2.625	740	2.625	215
2.750	781	2.750	198
2.875	820	2.875	184
3.000	856	3.000	172
3.125	889	3.125	162
3.250	919	3.250	155
3.375	945	3.375	148
3.500	969	3.500	143
3.625	988	3.625	138
3.750	1005	3.750	134
3.875	1018	3.875	130
4.000	1028	4.000	127
4.125	1035	4.125	123
4.250	1038	4.250	120
4.375	1039	4.375	116
4.500	1038	4.500	112
4.625	1034	4.625	109
4.750	1029	4.750	106
4.875	1022	4.875	103
5.000	1014	5.000	100
5.125	1005	5.125	98
5.250	1000	5.250	97
5.375	997	5.375	96
5.500	980	5.500	97

## CONCLUSIONES

A continuación se indican las conclusiones que se pueden extraer de la presente tesis:

- 1.- Que el sistema presentado cumple las funciones y reque  
rimientos para la que fue diseñado. Lo cual es mostra  
do en este trabajo (simulación).
- 2.- Que la inclusión del sistema, en conjunción con el pi  
lotaje manual completa las exigencias fundamentales  
para el control de un reactor de este tipo (Investiga  
ción).
- 3.- Que el sistema puede ser aplicado en cualquier reactor,  
teniendo en cuenta la combinación de las barras a ac  
tuar (regulación y/o compensación) y la distribución  
de los mismos en el núcleo.
- 4.- Que la aplicación del sistema está condicionada a un  
conocimiento más detallado del reactor en particular  
a ser aplicado, siendo su aplicación inmediata en el  
Reactor RP-10, del Centro Nuclear de Investigaciones  
del Perú.
- 5.- Que el sistema, a pesar de no haber sido diseñado con  
criterio económico, puede ser construido a un costo -  
relativamente bajo, comparado con el resto de la ins-

trumentación básica de un reactor. Siendo del orden del 5 % del costo total (componentes, diseño y fabricación) de la instrumentación y control del reactor, más aún considerando que en el sistema se utiliza el canal lineal de regulación, canal que complementa las necesidades mínimas para la operación del reactor.

- 6.- Que el sistema propuesto permitiría en una tercera instancia, proveer arranque automático del reactor, a partir del nivel 1 % de la potencia nominal (10 kw) hasta alcanzar el rango fijado en el canal lineal de regulación

## BIBLIOGRAFIA

- ( 1 ) J. FURET  
"Controlé et Electronique des Réacteurs Nucléaires"  
Masson et Cie, Paris, 1968
- ( 2 ) M. A. SCHULTZ  
"Control of Nuclear Reactor and Power Plants"  
McGraw-Hill 1961, 2nd. Edition
- ( 3 ) A. PEARSON and C. G. LENNOX  
"Sensing and Control Instrumentation"  
Atomic Energy of Canada Limited  
Canada, 1963
- ( 4 ) P. JOVER et J. MENEZES  
"Étude Théorique D' un Système de Pilotage Automatique par "Tout ou Rien" pour un Réacteur Nucléaire"  
Commissariat à L'Energie Atomique  
C.E.A. N° 2547, Paris 1964
- ( 5 ) G. CHAZAL et J. MENEZES  
"Étude Analogique des Performances D' un Système de Pilotage Automatique par "Tout ou Rien" pour un Réacteur Nucléaire"  
Commissariat à L'Energie Atomique  
Rapport 1791/SAER/1103, Paris 1964
- ( 6 ) G. MAC LUSKY  
"Automatic Control of a Research Reactor"  
Nuclear Electronics, I.A.E.A., 1969, Vol. II
- ( 7 ) GÉNIE ATOMIQUE, VOL II  
"Electronique et Pilotage des Réacteurs"  
Bibliothèque des Sciences et Techniques Nucléaires  
Presses Universitaires, Paris 1960
- ( 8 ) B. MURMIS - H. HUBER  
"Estudio Analógico del Sistema de Control Automático del Reactor RA-3"  
Publicación Interna del Departamento de Reactores,  
CNEA  
Buenos Aires, 1966
- ( 9 ) J. M. HARRER  
"Nuclear Reactor Control Engineering"  
Van Nostrand, 1963

- ( 10 ) G. KEEPIN  
"Physics of Nuclear Kinetics"  
Addison - Wesley, 1965
- ( 11 ) S. GLASSTONE - A. SESONKE  
"Ingeniería de Reactores Nucleares"  
Reverté, Barcelona 1975
- ( 12 ) HAROLD ETHERINGTON  
"Reactor Engineering Handbook"  
McGraw-Hill, 1958
- ( 13 ) OIEA  
"Manejo sin Riesgos de los Conjuntos Críticos y de  
Los Reactores de Investigación"  
Organismo Internacional de Energía Atómica, 1972
- ( 14 ) J. G. THALER  
"Analysis and Design of Feedback Control Systems"  
McGraw-Hill, 1960, 2nd. Edition
- ( 15 ) CNEA  
"Informe de Riesgos del RA-3"  
Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires,  
1978
- ( 16 ) R. D. BRENNAV and M. V. SILBERG  
"The System/360 Continuous System Modeling Program"  
Simulation - Vol. II, 1968
- ( 17 ) F. DIFILIPPO - R. WALDMAN  
"Introducción a la Cinética Nuclear"  
CNEA-Re-75, Dpto. de Reactores, Buenos Aires, 1973
- ( 18 ) R. CORCUERA - J. TESTONI - J. BABINO - V. HOFFMANN  
"Proyecto Reactor de 10 Mw para Perú"  
CNEA-Re-126, Buenos Aires, 1976
- ( 19 ) ARGONNE NATIONAL LABORATORY  
"Reactor Physics Constants"  
United States Atomic Energy Commission, 1963. 2nd.  
Edition
- ( 20 ) A. TAVARRO S.  
"Instrumentación Nuclear"  
Junta de Energía Nuclear, Madrid, 1970

## APENDICE 1

### ECUACIONES CINÉTICAS DEL REACTOR

Las ecuaciones de la cinética resultan del balance neutrónico entre los términos de producción y destrucción (Ref. 17)

$$\frac{dn(t)}{dt} = \langle \text{Prod.} \rangle - \langle \text{Dest} \rangle \quad (1)$$

Donde  $n(t)$  es la densidad neutrónica al instante  $t$ .

Por la definición de la vida media (Cap. 1):

$\frac{n(t)}{\lambda}$  : número de neutrones que desaparecen por unidad de tiempo, o sea representa el término de destrucción.

De estos:

$k_{ef} n(t) / \lambda^*$  : son los que se producirían por fisión.

Pero debido a la existencia de los neutrones retardados

$(1-\beta) k_{ef} \frac{n(t)}{\lambda^*}$  : son los que aparecen como instantáneos.

Siendo  $\beta$  la fracción efectiva de los neutrones retardados.

Además por decaimiento de los precursores, se producen

$\sum \lambda_i C_i(t)$  neutrones retardados



Siendo:

$\gamma_i$  : constante de decaimiento del precursor del grupo <<i>>.

$C_i$  : concentración al instante  $t$ , del grupo precursor <<i>> de neutrones retardados.

$m$  : número de grupos precursores.

Si además el sistema contiene una fuente de neutrones externa, y designamos por  $Q(t)$  el número de neutrones producidos por unidad de tiempo por la misma (fuente externa efectiva en el instante  $t$ ).

La ecuación (1) que expresa el balance neutrónico será:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(1-\beta)}{\lambda} k_{ef} n(t) + \sum \lambda_i C_i(t) + Q(t) - \frac{n(t)}{\lambda} \quad (2)$$

Además existe una ecuación de balance para cada grupo de precursores. Como se dijo:

$C_i(t)$  : son los que decaen y representan el término de destrucción.

El término de producción se obtiene de la siguiente manera:

$k_{ef} \frac{n(t)}{\lambda}$  neutrones que se producirían por fisión, de ellos únicamente la fracción  $\beta_i$  (fracción efectiva de neutrones retardados correspondientes al grupo  $i$ -ésimo).

De ahí que la ecuación de balance será:

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i k e^{\delta t}}{\lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (3)$$

De acuerdo a las definiciones dadas en el capítulo I, las ecuaciones (1) y (2) pueden escribirse:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum \lambda_i C_i(t) + Q(t) \quad (4)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (5)$$

Cuando  $k_{eff}$  es muy cercano a 1, en particular próximo a la criticidad, estas ecuaciones se escriben:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{\Lambda^*} n(t) + \sum \lambda_i C_i(t) \quad (6)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda^*} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (7)$$

Siendo:

$$\Lambda = \lambda = \lambda^* \text{ (vida media de neutrones)}$$

$$\rho = \delta k \text{ (reactividad)}$$

## APENDICE 2

### FUNCION DE TRANSFERENCIA DE UN REACTOR DE POTENCIA CERO

Suponemos que el funcionamiento del reactor es tá definido unicamente por las ecuaciones cinéticas (ver Apéndice 1).

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{\lambda} n + \sum \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\lambda} n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

Linealizamos las ecuaciones alrededor de un punto de funcionamiento correspondiente al régimen crítico (estado estacionario):

$$p = \delta k = 0; \quad n = n_0, \quad C_i = C_{i0}$$

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0} = 0 \quad \text{y} \quad \left. \frac{dC_i}{dt} \right|_{t=0} = 0 \quad (3)$$

Definimos para una variación temporal sinusoidal de la reactividad  $\delta k$ , que:

$$n = n_0 + \delta n \quad (4)$$

$$C_i = C_{i0} + \delta C_i$$

Reemplazando (4) en (1) y (2):

$$\frac{d}{dt}(n_0 + \delta n) = \frac{\delta k - B}{\lambda^*} (n_0 + \delta n) + \Sigma \lambda_i (C_{i0} + \delta C_i) \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}(C_{i0} + \delta C_i) = \frac{B_i}{\lambda^*} (n_0 + \delta n) - \lambda_i (C_{i0} + \delta C_i) \quad (6)$$

Despreciando el término  $\delta n \cdot \delta k$ , B respecto a 1 y teniendo en cuenta para el estado estacionario:

$$C_{i0} = \frac{B_i n_0}{\lambda^* \lambda_i}$$

Las ecuaciones precedentes se escribirán:

$$\frac{d}{dt}(\delta n) = \frac{n_0}{\lambda^*} \delta k - \frac{B}{\lambda^*} \delta n + \Sigma \lambda_i \delta C_i \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}(\delta C_i) = \frac{B_i}{\lambda^*} \delta n - \lambda_i \delta C_i \quad (8)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$\frac{\delta n(s)}{\delta k(s)} = \frac{n_0}{\lambda^*} \frac{1}{s \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda^*} \Sigma \frac{B_i}{s + \lambda_i} \right\}} \quad (9)$$

## APENDICE 3

### REACTOR RP-10 - INSTRUMENTACION Y CONTROL

#### GENERALIDADES

El reactor nuclear RP-10 (Ref. 18) es un reactor de investigación, tipo piscina, de una potencia nominal de 10 Mw térmicos, moderado y refrigerado por agua ligera.

Los elementos combustibles serán del tipo placa, conteniendo uranio enriquecido al 20 %, envainado en aluminio. El reflector está formado por elementos de grafito.

El control se efectuará por medio de cinco barras de compensación-seguridad de un valor igual a 4000 pcm y una barra de regulación cuyo valor es de 600 pcm.

La refrigeración del núcleo se establece en sentido descendente por circulación forzada de 1650 m<sup>3</sup>/h de agua desmineralizada (a la potencia nominal).

A través de tres intercambiadores de calor se transfiere la potencia térmica del circuito de refrigeración primario hacia el circuito secundario. Se encuentran en este último circuito tres torres de enfriamiento destinadas a disipar a la atmósfera el calor generado en el proceso nuclear.

El flujo neutrónico disponible puede ser aprovechado con fines experimentales o para producción de radioisótopos, contándose con cajas de irradiación en el núcleo, columna térmica disponibilidad de haces neutrónicas y tubos neumáticos.

### INSTRUMENTACION Y CONTROL

La operación del reactor y sus sistemas auxiliares, dentro de normas de seguridad adecuadas para las instalaciones y el personal, se establece mediante el sistema de instrumentación y control.

La instrumentación y control de reactores se puede subdividir en:

- a) Instrumentación y Control Nuclear
- b) Instrumentación y Control Convencional

a) Instrumentación y Control Nuclear:

a.1) Neutrónica, permite vigilar el funcionamiento del reactor en lo concerniente a la producción de neutrones y su evolución, desde el nivel de fuente hasta el nivel de potencia.

Se compone de:

- Sistema de arranque, formado por tres canales de medición
- Sistema de marcha, formada por tres canales de seguridad

- Sistema lineal de regulación, formada por un canal de regulación asociado al pilotaje automático del reactor.
- a.2) Sistema de lógicas de enclavamiento, son aquellas que permitirán o no, llevar a cabo determinadas acciones en función del estado de determinado parámetro.
- a.3) Sistemas de seguridad, aquellas destinadas a informar sobre situaciones anormales y/o de riesgo tanto para el personal, como para la planta en casos extremos ejecutará acciones automáticas para preservar a dicha seguridad. Estos sistemas, según su capacidad de llevar a cabo o no, acciones automáticas permite hacer una subdivisión entre:
- Sistemas de alarmas con acción automática (lógica de Scram o de parada, etc).
  - Sistemas de alarmas simples

b) Instrumentación y Control Convencional

Se puede agrupar de la forma siguiente:

- b.1) Instrumentación y control del sistema primario
- b.2) Instrumentación y control del sistema se-

cundario

b.3) Instrumentación y control del sistema colchón caliente

b.4) Instrumentación y control de la planta de tratamiento de agua

Análogamente que en la nuclear se divide esta instrumentación en los siguientes rubros de operación:

- Mediciones propiamente dichas
- Regulaciones
- Alarmas
- Sistema de enclavamiento
- Sistemas de seguridad



## APÉNDICE 4

### PROGRAMA DE CALCULO Y SALIDAS DE LA MINICOMPUTADORA HP-9825 PARA GRAFICAR EL DIAGRAMA DE BODE

#### 1) Listado del Programa:

```

0: trk 1
1: wrt 16, "DIAGRAMA DE BODE";
   spc 1
2: wrt 16, " W
   GAIN DESFA"
3: wrt 16, "(r/
   s)(dB) (ard)";
   spc 1
4: ent "GRADO
   DE P[X+iY]", N
5: ent "GRADO
   DE Q[X+iY]", M
6: "COEF. DE P[X+
   iY], Q[X+iY]": d
   im A[0:N], B[0:M]
7: ent "File
   coef. de los
   Pols.", F
8: for I=0 to N;
   ent A[I]; next
   I; for I=0 to M;
   ent B[I]; next I
9: rcf F, A[*],
   B[*]
10: dim C[0:N],
   D[0:N]
11: "COEF. DE
   Q[X+iY]": dim
   E[0:M], F[0:M]
12: "POL. EVAL":
13: 0+X; 1+D; ent
   "# de decadas",
   r1, "VALOR INICI
   AL", r2
14: "EVAL. P[X+
   iY]":
15: "DECADA": for
   Y=r2 to 9r2
   by r2
16: 1+C[0]; 0+D[0]
   ]; X+C[1]; Y+D[1]
17: for I=1 to
   N-1; X[C[I]-YD[I]
   +C[I+1]; X[D[I]+
   YC[I]+D[I+1];
   next I
18: 0+U+V; for
   K=0 to N; A[K]C[
   K]+U+U; A[K]D[K]
   +V+V; next K
19: "EVAL. Q[X+
   iY]":
20: 1+E[0]; 0+F[0]
   ]; X+E[1]; Y+F[1]
21: for I=1 to
   M-1; X[E[I]-YF[I]
   +E[I+1]; X[F[I]+
   YE[I]+F[I+1];
   next I
22: 0+R+S; for
   K=0 to M; B[K]E[
   K]+R+R; B[K]F[K]
   +S+S; next K
23: "EVAL. P[X+
   iY]/Q[X+iY]":
24: (UR+VS)/(R+2
   +S+2)+P; (VR-
   US)/(R+2+S+2)+Q
25: "FORMA POLAR
   ":
26: r(P+2+Q+2)+H
27: "RAMIFICACION":
   if P<0; eto
   "2/3"
28: eto "1/4"
29: "2/3": atn(Q/
   P)-180+0; eto
   "SIGUE"
30: "1/4": atn(Q/
   P)+0
31: "SIGUE": fmt
   1, e6.0, 10x; wrt
   16.1, Y
32: 20log(H)+T
33: fmt 2, f9.1,
   1x, f6.1; wrt
   16.2, T, 0
34: next Y
35: D+1+D
36: if D>r1; eto
   "FIN"
37: eto "OTRA
   DECADA"
38: "OTRA DECADA
   ": 10r2+r2; eto
   "DECADA"
39: "FIN": stp

```

## 2) Salida para Reactor de Potencia Cero:

## DIAGRAMA DE BODE

$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^\circ$ rd)
1E-03	81.6	-89.3
2E-03	75.6	-88.5
3E-03	72.1	-87.8
4E-03	69.6	-87.0
5E-03	67.6	-86.3
6E-03	66.1	-85.5
7E-03	64.7	-84.8
8E-03	63.6	-84.1
9E-03	62.6	-83.3
1E-02	61.7	-82.6
2E-02	55.9	-75.4
3E-02	52.7	-68.7
4E-02	50.6	-62.6
5E-02	49.1	-57.0
6E-02	48.1	-52.1
7E-02	47.3	-47.8
8E-02	46.7	-43.9
9E-02	46.3	-40.6

## DIAGRAMA DE BODE

$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^\circ$ rd)
1E-01	45.9	-37.6
2E-01	44.5	-21.1
3E-01	44.1	-14.5
4E-01	44.0	-11.1
5E-01	44.0	-9.0
6E-01	43.9	-7.6
7E-01	43.9	-6.6
8E-01	43.9	-5.9
9E-01	43.9	-5.3
1E 00	43.9	-4.9
2E 00	43.9	-3.1
3E 00	43.9	-2.8
4E 00	43.9	-2.9
5E 00	43.9	-3.1
6E 00	43.9	-3.4
7E 00	43.9	-3.8
8E 00	43.9	-4.1
9E 00	43.9	-4.5

## DIAGRAMA DE BODE

$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^\circ$ rd)
1E 01	43.8	-4.9
2E 01	43.8	-9.1
3E 01	43.6	-13.3
4E 01	43.5	-17.5
5E 01	43.3	-21.4
6E 01	43.0	-25.2
7E 01	42.7	-28.7
8E 01	42.4	-32.0
9E 01	42.1	-35.1
1E 02	41.8	-38.0
2E 02	38.5	-57.4
3E 02	35.8	-66.9
4E 02	33.6	-72.3
5E 02	31.8	-75.6
6E 02	30.3	-78.0
7E 02	29.0	-79.6
8E 02	27.8	-80.9
9E 02	26.8	-81.9

## 3) Salida para Reactor de Potencia a 1 Mw:

DIAGRAMA DE BODE			DIAGRAMA DE BODE			DIAGRAMA DE BODE		
$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^{\circ}$ rd)	$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^{\circ}$ rd)	$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^{\circ}$ rd)
1E-03	80.9	-10.6	1E-01	59.3	-34.7	1E 01	57.8	-3.7
2E-03	80.4	-20.3	2E-01	57.9	-19.5	2E 01	57.7	-8.5
3E-03	79.7	-28.7	3E-01	57.6	-13.2	3E 01	57.6	-12.9
4E-03	78.9	-35.7	4E-01	57.4	-9.9	4E 01	57.5	-17.2
5E-03	78.0	-41.3	5E-01	57.4	-7.8	5E 01	57.2	-21.2
6E-03	77.2	-45.7	6E-01	57.4	-6.4	6E 01	57.0	-25.0
7E-03	76.4	-49.3	7E-01	57.4	-5.4	7E 01	56.7	-28.6
8E-03	75.6	-52.1	8E-01	57.4	-4.6	8E 01	56.4	-31.9
9E-03	74.8	-54.3	9E-01	57.4	-4.0	9E 01	56.1	-35.0
1E-02	74.1	-56.0	1E 00	57.4	-3.5	1E 02	55.8	-37.9
2E-02	69.0	-61.4	2E 00	57.4	-1.3	2E 02	52.5	-57.4
3E-02	66.0	-59.2	3E 00	57.5	-0.8	3E 02	49.7	-66.9
4E-02	63.9	-55.4	4E 00	57.6	-0.9	4E 02	47.5	-72.3
5E-02	62.5	-51.3	5E 00	57.7	-1.3	5E 02	45.7	-75.6
6E-02	61.5	-47.3	6E 00	57.7	-1.7	6E 02	44.2	-78.0
7E-02	60.7	-43.6	7E 00	57.7	-2.2	7E 02	43.0	-79.6
8E-02	60.1	-40.3	8E 00	57.8	-2.7	8E 02	41.8	-80.9
9E-02	59.7	-37.3	9E 00	57.8	-3.2	9E 02	40.8	-81.9

## 4) Salida para Reactor de Potencia a 10 Mw:

DIAGRAMA DE BODE			DIAGRAMA DE BODE			DIAGRAMA DE BODE		
$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^{\circ}$ rd)	$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^{\circ}$ rd)	$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^{\circ}$ rd)
1E-03	61.0	-1.1	1E-01	54.9	-19.3	1E 01	57.3	6.3
2E-03	61.0	-2.1	2E-01	53.8	-10.7	2E 01	57.7	-2.9
3E-03	61.0	-3.1	3E-01	53.6	-6.3	3E 01	57.7	-9.2
4E-03	61.0	-4.2	4E-01	53.5	-3.6	4E 01	57.5	-14.4
5E-03	60.9	-5.2	5E-01	53.5	-1.7	5E 01	57.3	-19.1
6E-03	60.9	-6.2	6E-01	53.5	-0.2	6E 01	57.1	-23.4
7E-03	60.9	-7.2	7E-01	53.5	1.0	7E 01	56.8	-27.3
8E-03	60.8	-8.2	8E-01	53.5	2.1	8E 01	56.5	-30.9
9E-03	60.7	-9.1	9E-01	53.6	3.1	9E 01	56.2	-34.2
1E-02	60.7	-10.0	1E 00	53.6	3.9	1E 02	55.9	-37.2
2E-02	59.9	-17.5	2E 00	54.2	9.7	2E 02	52.5	-57.2
3E-02	58.9	-21.9	3E 00	54.9	12.2	3E 02	49.8	-66.8
4E-02	57.9	-23.8	4E 00	55.5	12.8	4E 02	47.5	-72.2
5E-02	57.1	-24.2	5E 00	56.0	12.3	5E 02	45.8	-75.6
6E-02	56.5	-23.8	6E 00	56.4	11.3	6E 02	44.3	-77.9
7E-02	56.0	-22.8	7E 00	56.7	10.0	7E 02	43.0	-79.6
8E-02	55.5	-21.7	8E 00	56.9	8.7	8E 02	41.8	-80.9
9E-02	55.2	-20.5	9E 00	57.1	7.5	9E 02	40.8	-81.9

5) Salida para Sistema de Pilotaje Automático: Lazo Abierto  
Interno

DIAGRAMA DE BODE

$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^\circ$ rd)
1E-02	48.4	-83.3
2E-02	42.5	-76.8
3E-02	39.4	-70.7
4E-02	37.3	-65.2
5E-02	35.8	-60.3
6E-02	34.8	-56.0
7E-02	34.0	-52.3
8E-02	33.4	-49.2
9E-02	32.9	-46.5
1E-01	32.5	-44.2
2E-01	31.0	-34.2
3E-01	30.5	-33.8
4E-01	30.1	-36.3
5E-01	29.7	-39.8
6E-01	29.3	-43.7
7E-01	28.8	-47.6
8E-01	28.4	-51.4
9E-01	27.9	-55.0

DIAGRAMA DE BODE

$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA ( $^\circ$ rd)
1E 00	27.5	-58.4
2E 00	23.2	-83.2
3E 00	19.7	-98.6
4E 00	16.9	-109.8
5E 00	14.4	-118.6
6E 00	12.3	-125.8
7E 00	10.3	-131.8
8E 00	8.5	-136.9
9E 00	6.9	-141.3
1E 01	5.3	-145.1
2E 01	-5.6	-166.6
3E 01	-12.5	-177.0
4E 01	-17.5	-184.1
5E 01	-21.5	-189.7
6E 01	-24.9	-194.5
7E 01	-27.7	-198.7
8E 01	-30.3	-202.5
9E 01	-32.5	-205.9

6) Salida para Sistema de Pilotaje Automático: Lazo Abierto Completo

DIAGRAMA DE BODE

$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA (ard)
1E-02	41.9	-90.0
2E-02	35.9	-89.9
3E-02	32.3	-89.7
4E-02	29.8	-89.5
5E-02	27.8	-89.4
6E-02	26.2	-88.7
7E-02	24.8	-88.2
8E-02	23.6	-87.7
9E-02	22.6	-87.2
1E-01	21.6	-86.6
2E-01	15.6	-80.9
3E-01	12.3	-75.8
4E-01	10.2	-71.3
5E-01	8.6	-67.3
6E-01	7.5	-63.9
7E-01	6.6	-60.9
8E-01	5.9	-58.4
9E-01	5.4	-56.4

DIAGRAMA DE BODE

$\omega$ (r/s)	GAIN (dB)	DESFA (ard)
1E 00	4.9	-54.7
2E 00	2.9	-49.9
3E 00	1.9	-54.2
4E 00	1.2	-60.7
5E 00	0.5	-67.5
6E 00	-0.0	-74.5
7E 00	-0.4	-81.5
8E 00	-0.7	-89.0
9E 00	-0.9	-97.3
1E 01	-1.0	-106.9
2E 01	-15.8	-222.6
3E 01	-30.0	-244.3
4E 01	-41.1	-72.5
5E 01	-37.7	-76.3
6E 01	-37.4	-78.7
7E 01	-37.9	-80.4
8E 01	-38.5	-81.7
9E 01	-39.2	-82.6

## INDICE DE TABLAS

## TABLA 1.1

*Parámetros Cinéticos*

## TABLA 4.1

*Variación de la Potencia del Reactor Libre a diferentes perturbaciones*

## TABLA 4.2

*Variación de la Potencia del Sistema  
(Perturbación: Steps de Reactividad de +50 pcm)*

## TABLA 4.3

*Desplazamiento de la Barra de Regulación  
(Perturbación: Steps de Reactividad de +50 pcm)*

## TABLA 4.4

*Variación de la Potencia del Sistema  
(Perturbación: Steps de Reactividad de +100 pcm)*

## TABLA 4.5

*Desplazamiento de la Barra de Regulación  
(Perturbación: Steps de Reactividad de +100 pcm)*

## TABLA 4.6

*Variación de la Potencia del Sistema a Cambios Bruscos del Nivel de Referencia  $n_0$*