

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**CONTROL DE POTENCIA DEL REACTOR NUCLEAR DE
HUARANGAL MEDIANTE ESTRATEGIAS DE CONTROL
AVANZADO**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

ALBERTO GILIMON SALAZAR CCARHUARUPAY

PROMOCIÓN

1985-I

LIMA-PERÚ

2003

**CONTROL DE POTENCIA DEL REACTOR NUCLEAR DE
HUARANGAL MEDIANTE ESTRATEGIAS DE CONTROL
AVANZADO**

A mi esposa Luz Angélica y a mis
queridos y ejemplares padres:
Vicente y Asunción
En agradecimiento por su constante e
invalorable apoyo.

SUMARIO

El presente trabajo es el de proyectar un control de potencia para el piloto automático del Reactor Nuclear de Huarangal RP-10 mediante técnicas de control avanzado, y reemplazar el que se tiene actualmente que es del tipo proporcional integral modificado.

Para un mejor entendimiento, el tema se ha desarrollado por capítulos los cuales se describen a continuación:

El capítulo I detalla de manera general los temas que están relacionados al trabajo que se va a realizar.

El capítulo II describe el sistema, que es el reactor y el sistema de pilotaje automático que actualmente funciona en el reactor RP-10 de Huarangal.

En el capítulo III se realiza el modelamiento, discretización del modelo y simulación a lazo abierto del sistema.

El capítulo IV describe el diseño del sistema de control Proporcional Integral modificado (P.I.), que se tiene actualmente funcionando en el Reactor Nuclear de Huarangal (RP-10).

Finalmente, en el capítulo V se expone el trabajo del diseño del controlador y simulación del sistema de control en lazo cerrado tanto para el control Óptimo como para el control Adaptivo.

La simulación del sistema, que se aplica a dos de las nuevas técnicas de control avanzado (control óptimo y control adaptivo) nos permitirá obtener las performances del sistema en las condiciones de funcionamiento real, para ello se usa el programa desarrollado en Matlab para visualizar las respuestas gráficas del sistema.

Para el desarrollo del informe se ha tenido que hacer algunas simplificaciones como es el caso de considerar en el análisis un solo grupo de neutrones retardados para no tener que trabajar con matrices de orden trece que complicaría el desarrollo del sistema. Es por ello que al final sólo se trabaja con una matriz de orden cinco que es más manejable.

De los resultados obtenidos en ambas estrategias de control óptimo y adaptivo, y comparando con el diseño de control que esta instalado en el reactor RP-10 que es proporcional integral modificado podemos ver las diferencias que hay entre uno y otro y establecer el mejor de los tres tipos de controles.

TABLA DE CONTENIDO

	PAGINA
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
GENERALIDADES	
1.1.- Física Elemental del Control de Reactores	4
1.2.- Objetivos del Pilotaje Automático	8
1.2.1.- Mantener constante la Potencia del Reactor	8
1.2.2.- Cambiar el nivel de potencia	10
CAPITULO II	
DESCRIPCION DEL SISTEMA	
2.1.- Reactor Nuclear	11
2.1.1.- Reactor de 10 Megawatts de potencia	11
2.1.2.- Reactor en régimen de Potencia: efecto del Coeficiente de Temperatura	14
2.2.- Sistema de Pilotaje Automático	15
2.2.1.- Selección de una cadena de regulación apropiada	15
2.2.2.- Mejora de las performances	16
2.2.3.- Descripción del sistema propuesto	17
2.2.4.- Explicación simplificada del Funcionamiento del sistema	20
CAPITULO III	
MODELAMIENTO	
3.1.- Modelamiento de la planta	25
3.2.- Controlabilidad y observabilidad del proceso	32

3.2.1.-	Concepto de Controlabilidad	32
3.2.2.-	Concepto de Observabilidad	32
3.3.-	Discretización del modelo	33
3.4.-	Simulación del modelo a lazo abierto	37

CAPITULO IV

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL

(P.I.)

4.1.-	Datos de la planta y especificaciones de funcionamiento	
4.1.1.-	Datos de la planta	38
4.1.2.-	Consideraciones de funcionamiento	38
4.2.-	Selección de los componentes del lazo de control	38
4.3.-	Función de transferencia del sistema	42
4.4.-	Estabilidad	48
4.4.1.-	Bases del Análisis	48
4.4.2.-	Estabilidad del Lazo Interno	49
4.4.3.-	Estabilidad del Sistema	52
4.4.4.-	Conclusiones	53

CAPITULO V

DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL AVANZADO

5.1.-	Diseño del controlador óptimo proporcional integral	57
5.2.-	Simulación del sistema de control en lazo cerrado	62
5.3.-	Diseño del control adaptivo	67
5.3.1.-	Introducción	67

5.3.2.- Modelando procesos no lineales	69
5.3.3.- Procedimientos de Estimación	70
5.3.4.- La ley de control	74
5.3.5.- Simulación del sistema de control en lazo cerrado	76
CONCLUSIONES	82
APENDICE A	
ECUACIONES CINÉTICAS DEL REACTOR	84
APENDICE B	
FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE UN REACTOR DE 10 MEGAWATTS DE POTENCIA	88
APENDICE C	
REACTOR RP-10- INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	91
BIBLIOGRAFIA	95

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 prácticamente 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 del 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 mas rápidamente posible a la perturbación señalada por el reactor. 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 al sistema se requiere el conocimiento previo de la planta y de los demás componentes; de las ecuaciones matemáticas que gobiernan los sistemas, es así como se pueden construir modelos matemáticos a partir de un modelo físico determinado. Esto se debe a que el comportamiento de los componentes de la mayoría de los sistemas de ingeniería, se rigen por leyes naturales bien conocidas (como las leyes de Newton, de Hooke, de Ohm, etcétera), y el problema de reconocer la presencia de estos componentes y la interconexión adecuada entre ellos nos permitirán analizar todo el sistema.

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 preestablecidas, se lleva a cabo simulando el sistema con el programa Matlab y viendo su respuesta en el tiempo.

Finalmente, se logra un pilotaje automático, el más seguro y rápido que satisfaga los requerimientos de performance, gracias a la investigación de diversas alternativas mediante el estudio de dos técnicas de control avanzado, el control óptimo y el control adaptivo pudiendo comparar los resultados de ambas técnicas y tomar el mejor de ellos, inclusive comparándolo con el control proporcional integral modificado que está actualmente en uso en el reactor RP-10 de Huarangal.

El alcance que se espera dar a este trabajo es implementar el mejor de ellos en el Reactor Nuclear de Huarangal de 10 Megawatts de Potencia Térmica y en cualquier otro Reactor de Investigación, inclusive en los Reactores de Potencia que he visitado en el extranjero, se puede implementar en la Instrumentación de estos Reactores, con algunos cambios previos.

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.- lugar en el 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.

El Moderador.- el moderador reduce la energía de los neutrones procedentes de la reacción de fisión.

El Reflector.- retorna al núcleo los neutrones con tendencia al escape del mismo.

El Refrigerante.- extrae el calor generado en la fisión.

Las Barras de Control.- Regulan el nivel de potencia del núcleo del reactor mediante el control del número de neutrones en éste.

El estado del reactor depende de muchos factores, por ejemplo, cantidad de elementos combustibles, presencia de materiales moderadores, posición de las barras de control, presencia de venenos, etc., y es generalmente definido como subcrítico, crítico y 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 definen los tres estados siguientes:

-Reactor Subcrítico.- Reactividad negativa, $k < 1$, en este 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 este caso el nivel de potencia es constante y puede ser cualquiera.

Reactor Supercrítico.- Reactividad Positiva, $k > 1$, en este caso el reactor diverge, la evolución del nivel de potencia se calcula con la ayuda de las ecuaciones cinéticas. Si la reactividad extraída del reactor es constante la evolución del nivel de potencia es exponencial; el período estable depende de 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:

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

Siendo:

\bar{l} : vida promedio ponderada de los neutrones

ρ : reactividad

n : potencia del reactor

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

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 de 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 (Xenón, Samario).

- Finalmente a causa del quemado del 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 las estructuras 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 de 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 u 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.

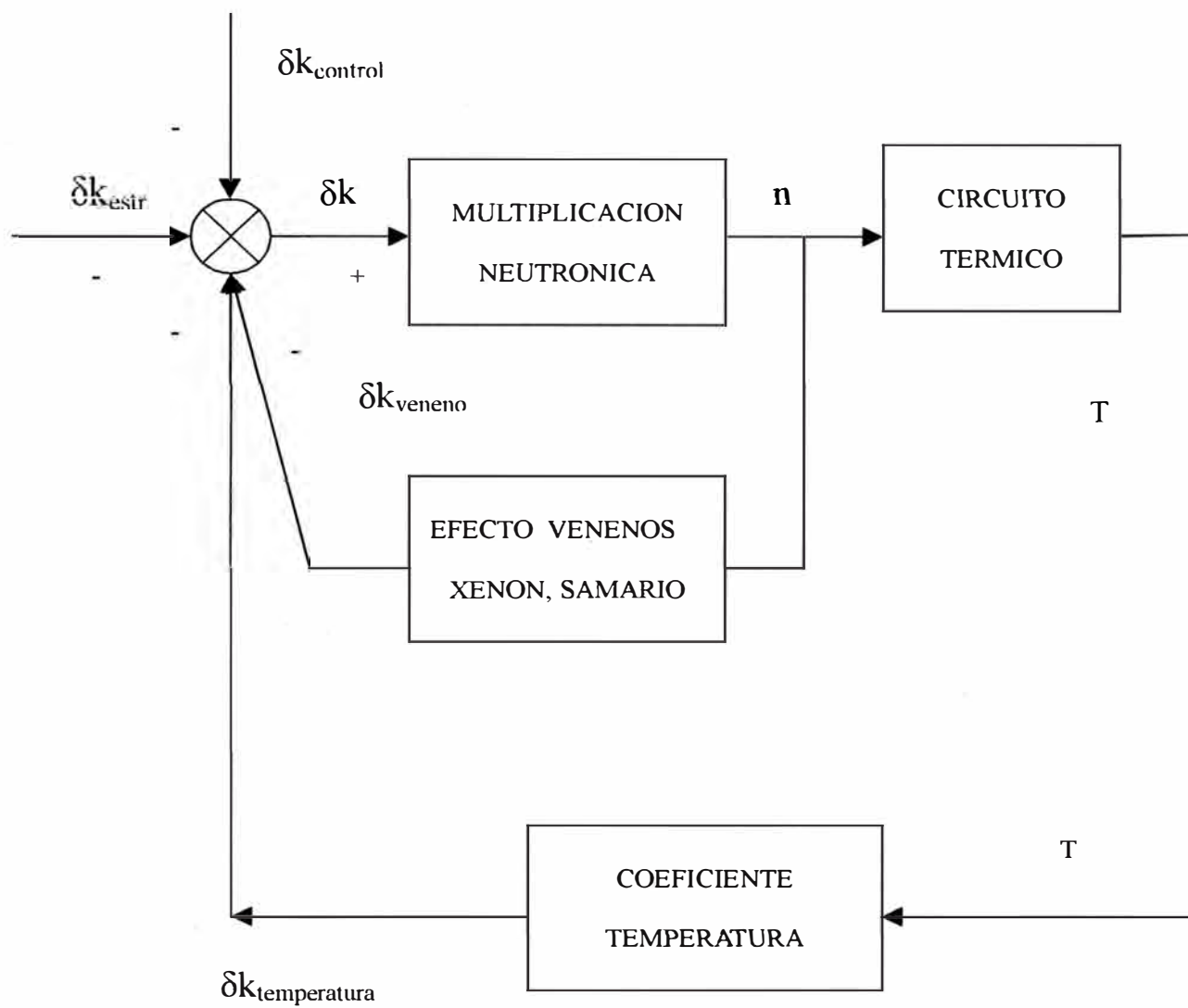


Fig. 1.1 Reactor en funcionamiento

NOMBRE	SIMBOLO	CONCEPTO
<i>Factor de Multiplicación efectivo</i>	k_{ef}	$\frac{\langle Producción \rangle}{\langle Destrucción \rangle}$
<i>Vida Media</i>	l	$\frac{\langle Densidad Neut. \rangle}{\langle Destrucción \rangle}$
<i>Reactividad</i>	$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}}$	$\frac{\langle Producción - Dest. \rangle}{\langle Destrucción \rangle}$
<i>Tiempo entre generaciones</i>	$\Lambda = \frac{l}{k_{ef}}$	$\frac{\langle Densidad Neut. \rangle}{\langle Producción \rangle}$

Tabla 1.1 Parámetros Cinéticos

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 cierta precisión a pesar de las perturbaciones accidentales que pueden hacer variar la reactividad; en efecto este es el caso para la mayoría de reactores experimentales. Se inserta entre la salida y la entrada del reactor una cadena de regulación que comande la barra de regulación de modo que se anule el error entre la potencia del reactor y la potencia de referencia (Figura 1.2)

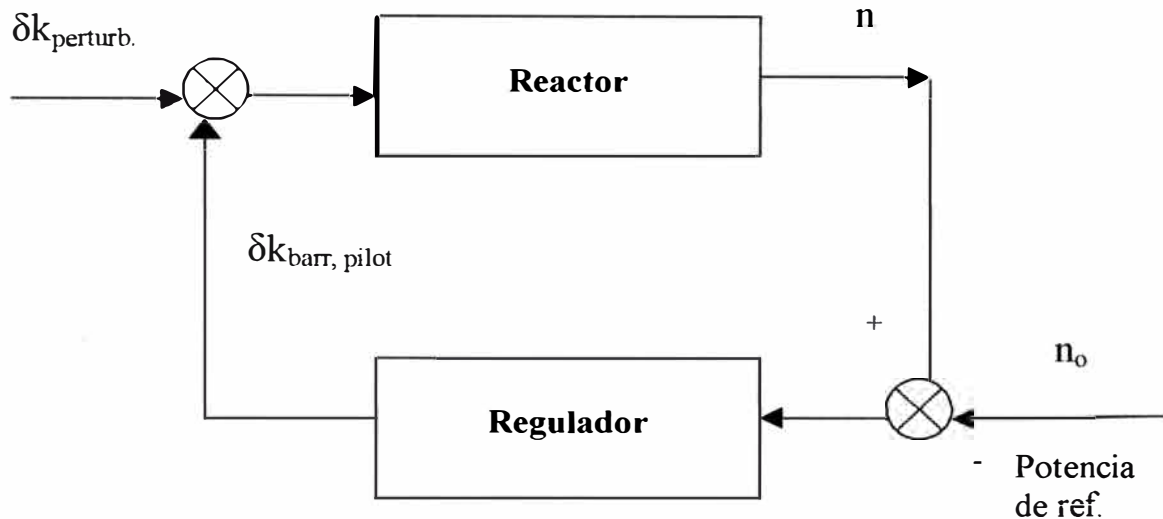


Fig. 1.2 Cadena de Regulación aplicado al reactor

La variable de entrada al sistema realimentado así formado es entonces la reactividad, y la variable de salida el nivel de flujo neutrónico.

El bucle puede ser abierto siendo entonces la regulación confiada a un operador, quien por acciones repetidas sobre la barra de regulación, mantiene el nivel constante (pilotaje manual).

Se puede demostrar con un ejemplo simple que es útil reemplazar al operador por un pilotaje automático en el caso que se desea obtener una precisión sobre el valor del nivel neutrónico.

Si aparece un exceso de reactividad δk . La ley de evolución del nivel neutrónico es de la forma simplificada.

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

Sea por ejemplo $\delta k = 1 \text{ pcm}$, $\bar{l} \cong 0.1 \text{ seg} \longrightarrow \frac{dn}{n} = 10^{-4} dt$

Al cabo de $\delta t = 100 \text{ seg.}$, se tiene $dn/n = 1\%$.

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 perturbación de reactividad:

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

Perturbaciones lentas, 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 que pueden ser por ejemplo la derivada de la potencia, o mejor la derivada logarítmica (o sea la inversa del período), en el caso del diseño del controlador ya sea óptimo ó adaptivo este parámetro estará considerado dentro del controlador.

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

Consideremos al reactor como elemento de bucle de control.

2.1.1.- Reactor de Potencia de 10 Megawatts

Desde el punto de vista del pilotaje automático el reactor de potencia de Huarangal de 10 Megawatts 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, como para los sistemas lineales.

La función de transferencia es:

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

Donde:

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

Para el reactor tipo piscina (RP-10) se puede considerar: $l^* = 5 \cdot 10^{-5}$ 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 de 10 Megawatts (RP-10)

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

a) La función de transferencia del reactor es no lineal, cuya ganancia es proporcional al nivel n_0 . Se puede describir la función de transferencia bajo otra forma para eliminar esta particularidad, o sea.

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

En estas condiciones la ganancia se expresa en valor relativo del nivel de potencia por unidad de reactividad (% de variación por pcm). Se puede por lo tanto trazar una 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.

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

Para las frecuencias: $\omega_1 < \omega < \omega_2$

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

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:



Figuras 2.1 y 2.2 Amplitud y desfase de la función de transferencia normalizada del reactor

$$\frac{\delta n(s)}{X(s)} = \frac{1}{l^*} \frac{1s + \lambda}{s + \gamma}$$

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

2.1.2.- Reactor en régimen de potencia: Efecto del coeficiente de temperatura

El estudio general es complejo. Para simplificar, nos interesa el caso particular (RP-10) para el cual se harán las siguientes hipótesis:

- Las perturbaciones de reactividad que pueden aparecer son rápidas con relación al tiempo de circulación del agua en el circuito de refrigeración (esta hipótesis es aún más justificada si se considera que la temperatura de entrada es mantenida constante).
- La potencia proporcionada por el calentamiento del combustible sirve sólo para calentar el agua de refrigeración.
- 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 0.3seg.

En estas condiciones se si 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.

α_m = Coeficiente de temperatura del agua (moderador)

Se puede escribir las ecuaciones siguientes:

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

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

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 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 τ_c .

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° a frecuencias altas.

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 $\delta k = A \frac{n - n_0}{n_0}$ no es conveniente para un reactor a alta potencia y que es preferible prever 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 prever 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 utilizados 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:

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

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 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 2.3.

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 este 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

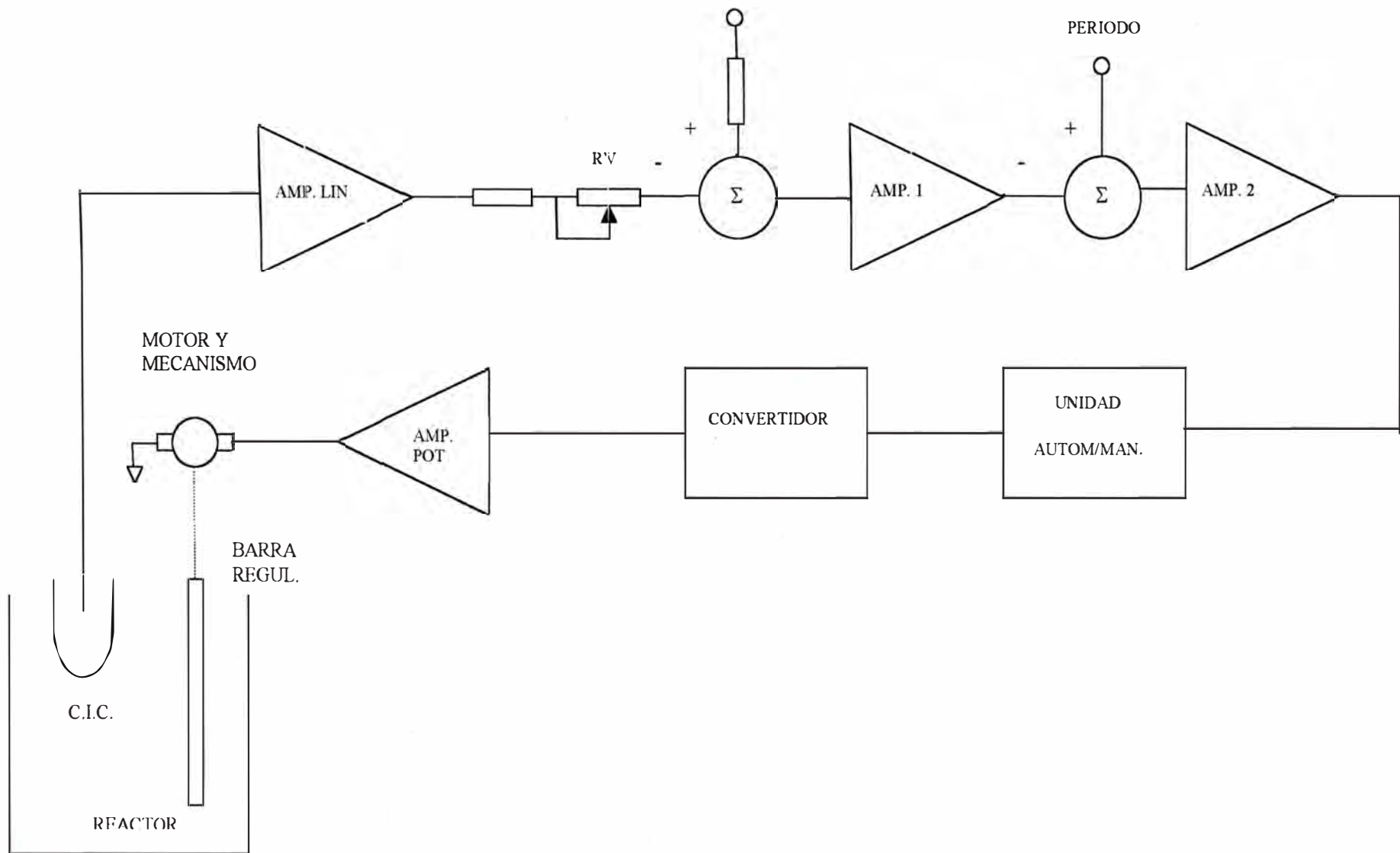


Fig. 2.3 Esquema simplificado del sistema de pilotaje automático de un reactor nuclear

potencia del reactor obtenida de un periodómetro, 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:

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

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 la saturación del amplificador, proporcional a la tensión ε , 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:

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

Donde k se mide en $\frac{\text{pcm/seg}}{\text{volt}}$. Se trata entonces del control del 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 ε 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 este caso, si la tensión de salida del amplificador comparador, se limita al valor C y si el lazo constituido por el amplificador de potencia, el motor y el mecanismo, el reactor y el periodómetro, es suficientemente rápido, ε es prácticamente nulo y la potencia crece con período constante:

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

La relación B/A y C, serán determinada 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, algunas 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 descenderá. 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.

Definición de variables

Reactor

n : potencia térmica

C_i : Potencia correspondiente a los emisores de neutrones retardados del grupo

$\langle\langle i \rangle\rangle$.

δk : Reactividad total (pcm).

δk_R : Reactividad introducida por la barra de regulación (pcm)

δk_c : Reactividad introducida por la barra de compensación (cm).

δk_T : Reactividad debido al efecto de temperatura (cm)

T_e : Temperatura de entrada del agua del núcleo (°C)

T_m : Temperatura media del agua del núcleo (°C)

T_s : Temperatura de salida del agua del núcleo (°C)

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).

Constantes y parámetros

Reactor

l^* : Vida media de neutrones (seg.).

β : Fracción de neutrones retardados.

β_i : Fracción de neutrones retardados pertenecientes al grupo i (1 a 6)

λ_i : Constante de decaimiento del grupo i (seg^{-1})

M_C : Masa calorífica del agua del núcleo (Kw seg / °C)

τ_c : Constante de tiempo de calentamiento de agua del núcleo (seg.).

α : Coeficiente de temperatura del moderador (pcm / °C)

T_{m0} : Valor inicial de T_m .

Pilotaje Automático

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

K_A : Ganancia del servoamplificador.

τ_2 : Constante de tiempo del periodómetro (seg.)

K_2 : Constante del periodómetro (volts seg / %)

τ_m : Constante de tiempo del motor (seg.).

- K_v : Constante de velocidad del motor $\frac{pcm/seg}{volts}$
 a : Velocidad de la barra de compensación (pcm/seg.)
 n_o : Valor de referencia de la potencia (kw)

Valores iniciales de las variables

N	T_c	T_m	T_s	δk	V_1, V_2, V_3
(Kw)	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	pcm	volts
2000	40	42.15	44.3	0	0

Valores numéricos de las Constantes

Reactor

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

$$\beta : 0.0064$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\beta_1 : 27 \cdot 10^{-5}$$

$$\beta_2 : 74. 10^{-5}$$

$$\beta_3 : 253. 10^{-5}$$

$$\beta_4 : 125. 10^{-5}$$

$$\beta_5 : 140. 10^{-5}$$

$$\beta_6 : 21. 10^{-5}$$

Pilotaje Automático

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

$$K_A : \text{regulable}$$

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

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

$$K_v : \text{regulable}$$

$$\tau_m : 0.15 \text{ seg}$$

$$a : 10 \text{ pcm/seg}$$

CAPITULO III

MODELAMIENTO

3.1 Modelamiento de la planta

El esquema funcional se representa en la figura 3.1

El comportamiento dinámico del reactor queda representado por las ecuaciones cinéticas, utilizando seis grupos de neutrones retardados.

Nivel de potencia:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k - \beta}{l^*} n + \sum \lambda_i C_i \quad (3.1)$$

Concentración de precursores:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} n - \lambda_i C_i \quad (3.2) \text{ a } (3.7)$$

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:

$$\delta k = \delta k_R + \delta k_C + \delta k_T \quad (3.8)$$

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.

Reactividad por temperatura en el moderador:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{n}{M_c} - \frac{1}{\tau_c} (T_m - T_e) \quad (3.9)$$

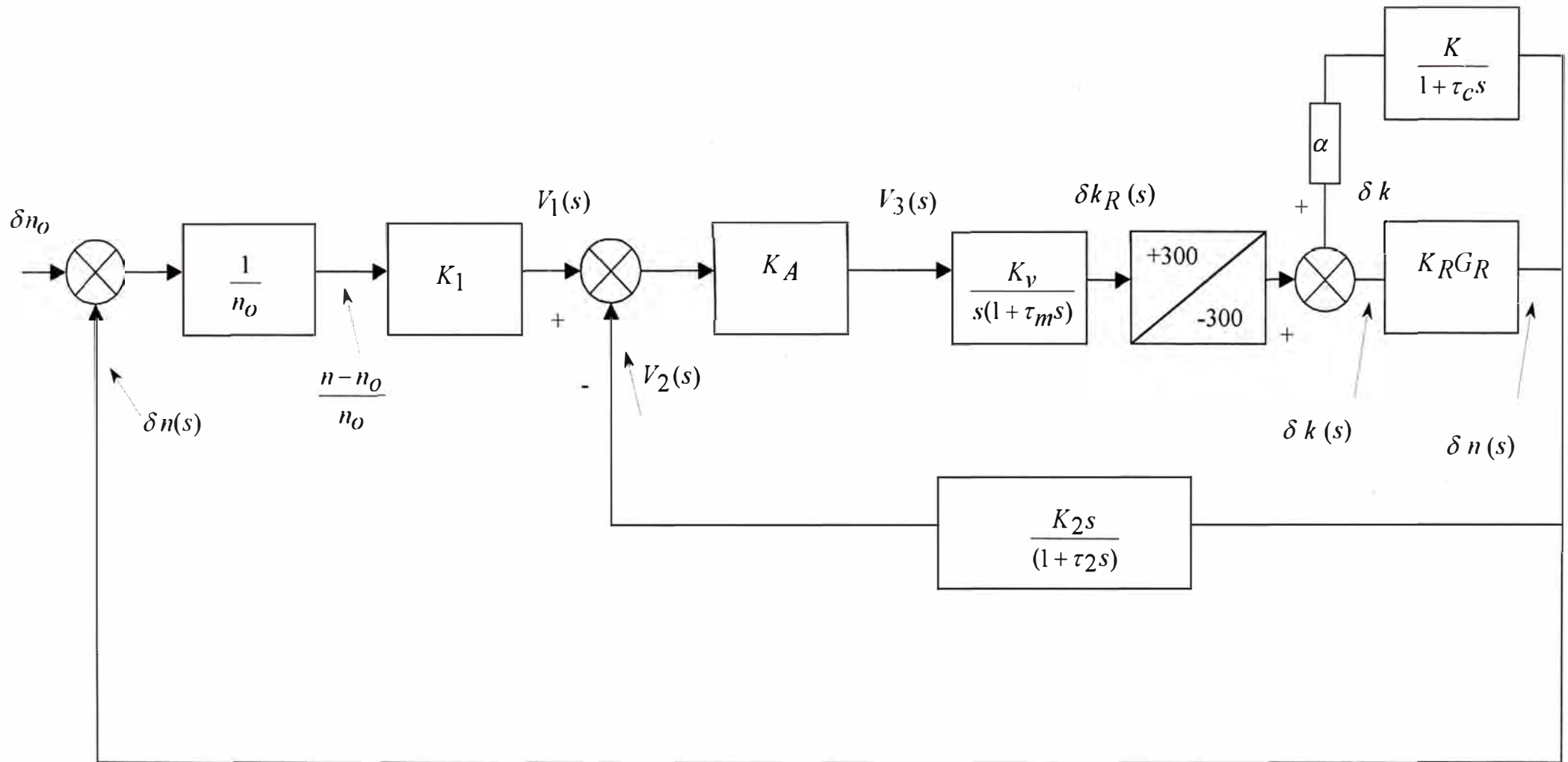


Fig. 3.1 Esquema funcional del sistema de pilotaje automático

$$\delta k_T = \alpha(T_m - T_{m0}) \quad (3.10)$$

Amplificador de potencia:

$$V_3 = K_A V_2 \quad (3.11)$$

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

Barra de regulación:

$$\frac{d^2 \delta k_R}{dt^2} = \frac{1}{\tau_m} K_V V_3 - \frac{1}{\tau_m} \frac{d\delta k_R}{dt} \quad (3.12)$$

Barra de compensación:

$$\delta k_C = at \quad (3.13)$$

Para que el análisis matemático sea más cómodo tomaremos los nombres de las variables con términos más sencillos de manejar y luego se hará los cambios de notaciones como corresponde.

$$e_1 = V_2$$

$$e_2 = V_3$$

$$e_3 = \theta$$

$$e_4 = \delta k_R$$

$$e_5 = \delta n$$

$$e_6 = \delta k_T$$

$$e_7 = \delta k$$

$$\frac{e_2(s)}{e_1(s)} = K_A(s) \quad \Rightarrow \quad e_2(t) = K_A e_1(t) \quad (1)$$

$$\frac{e_3(s)}{e_2(s)} = K_m G_m(s) = \frac{10}{s(1+0.15s)} \quad \Rightarrow \quad \dot{e}_3(t) + 0.15\ddot{e}_3(t) = 10e_2(t) \quad (2)$$

$$\frac{e_4(s)}{e_3(s)} = K_B \quad \Rightarrow \quad e_4(t) = K_B e_3(t) \quad (3)$$

$$\frac{e_5(s)}{e_7(s)} = K_R G_R(s) = \frac{0.012(1+13s)}{s(1+0.008s)} \quad \Rightarrow \quad 0.008\ddot{e}_5(t) + \dot{e}_5(t) = 0.012e_7(t) + 0.156\dot{e}_7(t) \quad (4)$$

$$\frac{e_6(s)}{e_5(s)} = \frac{K}{1+\tau_c s} \quad \Rightarrow \quad e_6(t) + \tau_c \dot{e}_6(t) = K e_5(t) \quad (5)$$

$$e_6(s) + e_4(s) = e_7(s) \quad \Rightarrow \quad e_6(t) + e_4(t) = e_7(t) \quad (6)$$

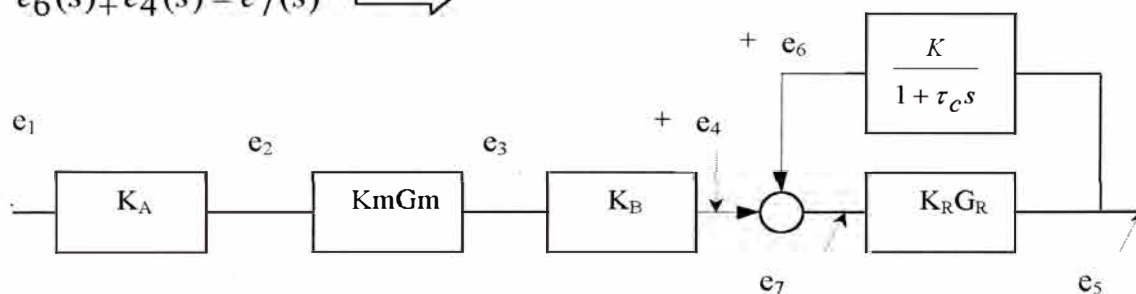


Fig.3.2 Diagrama de bloques de la Planta a modelar

Resolviendo las ecuaciones anteriores, se llega a lo siguiente:

$$\begin{aligned} \hat{e}_5(t) + 428.0124\bar{e}_5(t) + 3113.309\ddot{e}_5(t) + 2285.0564\ddot{\ddot{e}}_5(t) + 0.177\dot{e}_5(t) + \\ 0.570986e_5(t) = 14055.88\dot{e}_1(t) + 44260.3722\dot{e}_1(t) + 3487.411e_1(t) \end{aligned} \quad (7)$$

Se ve que es una ecuación diferencial lineal de orden 5 cuya función excitadora (e_1) incluye términos derivativos y es de la forma:

$$\begin{aligned} \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) = b_0 \frac{d^n u(t)}{dt^n} + b_1 \frac{d^{n-1} u(t)}{dt^{n-1}} + \\ \dots + b_{n-1} \frac{du(t)}{dt} + b_n u(t) \end{aligned} \quad (8)$$

Con salida $y=x_1$

El problema principal al definir las variables de estado para este caso, consiste en los términos derivativos del miembro derecho de la ecuación (8).

Las variables de estado deben ser tales que eliminen las derivadas de u (en nuestro caso es e_1) en la ecuación de estado.

Una forma de obtener una ecuación de estado y una ecuación de salida es definir las siguientes n variables como un conjunto de n variables de estado:

$$\begin{aligned}x_1 &= y - \beta_0 u \\x_2 &= \dot{y} - \beta_0 \dot{u} + \beta_1 u = \dot{x}_1 - \beta_1 u \\x_3 &= \ddot{y} - \beta_0 \ddot{u} - \beta_1 \dot{u} - \beta_2 u = \dot{x}_2 - \beta_2 u \\&\vdots \\x_n &= y^{(n-1)} - \beta_0 u^{(n-1)} - \beta_1 u^{(n-2)} - \dots - \beta_{n-2} \dot{u} - \beta_{n-1} u = \dot{x}_{n-1} - \beta_{n-1} u\end{aligned}$$

Donde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ vienen a ser:

$$\begin{aligned}\beta_0 &= b_0 \\ \beta_1 &= b_1 - a_1 \beta_0 \\ \beta_2 &= b_2 - a_1 \beta_1 - a_2 \beta_0 \\ \beta_3 &= b_3 - a_1 \beta_2 - a_2 \beta_1 - a_3 \beta_0 \\ &\vdots \\ \beta_n &= b_n - a_1 \beta_{n-1} - \dots - a_{n-1} \beta_1 - a_n \beta_0\end{aligned}$$

Con esta elección de n variables de estado (nótese que no es la única selección posible de las variables de estado), se obtiene

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + \beta_1 u \\ \dot{x}_2 &= x_3 + \beta_2 u \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n + \beta_{n-1} u \\ \dot{x}_n &= -a_n x_1 - a_{n-1} x_2 - \dots - a_1 x_n + \beta_n u\end{aligned}$$

La ecuación anterior y la ecuación de salida pueden reescribirse así:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_n & a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

Y su forma normalizada es como sigue:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

De las ecuaciones (7) y (8) tenemos:

$$b_2 = b_1 = b_0 = 0$$

$$\beta_0 = 0$$

$$\beta_1 = 0 - a_1(0) = 0$$

$$\beta_2 = 0 - 0 - 0 = 0$$

$$\beta_3 = 1405588$$

$$\beta_4 = b_4 - a_1\beta_3 - a_2\beta_2 - a_3\beta_1 - a_4\beta_0 = -442603722 - 4280124(1405588) - 6060351305$$

$$\beta_5 = b_5 - a_1\beta_4 - a_2\beta_3 - a_3\beta_2 - a_4\beta_1 - a_5\beta_0 = 3487411 - 4280124(-6060351305) - 3113309(1405588)$$

$$\beta_5 = 2550148697$$

Entonces el conjunto de las variables de estado vienen a ser:

$$x_1 = y$$

$$x_2 = \dot{x}_1$$

$$x_3 = \dot{x}_2$$

$$x_4 = \dot{x}_3 - 14054045u$$

$$x_5 = \dot{x}_4 + 1849358809u$$

De estas últimas ecuaciones se despejan las ecuaciones de estado siguientes:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

$$\dot{x}_3 = x_4 + 14054.045u$$

$$\dot{x}_4 = x_5 - 1849358.809u$$

$$\dot{x}_5 = -a_5x_1 - a_4x_2 - a_3x_3 - a_2x_4 - a_1x_5 + \beta_5u$$

$$= 0.570986x_1 - 0.17702x_2 - 2285.0564x_3 - 3113.309x_4 - 428.0124x_5 + 2550148697u$$

Las que, en su forma matricial, queda representada así:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.570986 & 0.17702 & -2285.0564 & -3113.309 & -428.0124 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 14054.045 \\ -1849358.809 \\ 2550148697 \end{bmatrix} u$$

$$y = x_1$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad D = 0$$

Linealización del modelo

Se puede observar que las ecuaciones del modelo son lineales.

3.2 Controlabilidad y observabilidad del proceso

3.2.1. Concepto de Controlabilidad

Un proceso lineal se dice que es controlable si existe un vector $u(k)$ realizable y capaz de trasladar el estado del proceso desde un estado inicial $x(0)$ hacia cualquier estado final $x(N)$ en un tiempo finito N .

Donde el $\det(M) \neq 0$. M es conocida como la matriz de controlabilidad, la cual puede contener columnas o filas linealmente dependientes. Por consiguiente, para que un proceso sea completamente controlable, lo que quiere decir, para que su matriz de controlabilidad sólo posea filas o columnas independientes, se debe cumplir que:

$$\text{Rango}(M) = \text{rango}([B \ AB \ \dots \ A^{N-1}B]) = n$$

Donde n es el orden del proceso. Para $N < n$ no existe solución para u , y para $N > n$ la solución no es única.

3.2.2. Concepto de Observabilidad

Un proceso lineal dinámico con salida $y(k)$ se denomina observable si algún estado $x(x)$ puede ser obtenido a partir de un número finito de salidas $y(k)$, $y(k-1)$,..... y $y(k-n)$.

Siempre que el $\det(N_1) \neq 0$. Luego, para que el proceso dinámico sea observable, la matriz de observabilidad N_1 debe cumplir:

$$\text{Rango}[N_1] = n$$

Usando Matlab, la controlabilidad y la observabilidad se determina con las siguientes órdenes:

$$M = [B \ A*B \ A*A*B \ A*A*A*B \ A*A*A*A*B]$$

$$N_1 = [C' \ A'*C' \ A'*A'*C' \ A'*A'*A'*C' \ A'*A'*A'*A'*C']$$

$rank(M)$;
 $rank(N_1)$;
 % Cumple con observabilidad y controlabilidad
 $rank[M] = rank[N_1] = n = 5 \Rightarrow c.c. \text{ y } c.o.$
 En Matlab : $AB \rightarrow A * B$
 $A^2B \rightarrow A * A * B$

3.3.- Discretización del Modelo

En años recientes se ha incrementado el uso de controladores digitales en sistemas de control. Los controladores digitales se utilizan para alcanzar el desempeño óptimo por ejemplo, en la forma de productividad máxima, beneficio máximo, costo mínimo ó la utilización mínima de la energía.

Recientemente, la aplicación de control por computadora ha hecho posible el movimiento “inteligente” en robots industriales, la optimización de economía de combustible en automóviles y el refinamiento en la operación de enseres y máquinas de uso doméstico, tales como horno de microondas y máquinas de cocer, entre otros. La capacidad en la toma de decisiones y la flexibilidad en los programas de control son las mayores ventajas de los sistemas de control digital.

La tendencia actual de controlar los sistemas dinámicos en forma digital en lugar de analógica, se debe principalmente a la disponibilidad de computadoras digitales de bajo costo y a las ventajas de trabajar con señales digitales en lugar de señales en tiempo continuo.

Una señal en tiempo discreto es una señal definida sólo en valores discretos de tiempo (esto es, aquellos en los que la variable independiente t está cuantificada). En una señal en tiempo discreto, si la amplitud puede adoptar valores en un intervalo continuo, entonces la señal se denomina señal de datos muestreados. Una señal de

datos muestreados se puede generar muestreando una señal analógica en valores discretos de tiempo.

Una señal digital es una señal en tiempo discreto con amplitud cuantificada, Dicha señal se puede representar mediante una secuencia de números, por ejemplo, en la forma de números binarios.

(En la práctica, muchas señales digitales se obtienen mediante el muestreo de señales analógicas que después se cuantifican; la cuantificación es lo que permite que estas señales analógicas sean leídas como palabras binarias finitas. La señal digital está cuantificado tanto amplitud como en tiempo.

El término “señal en tiempo discreto” es más general que el término “señal digital” o que el término “señal de datos muestreados”. De hecho, una señal en tiempo discreto se puede referir ya sea a una señal digital o a una señal de datos muestreados. En la práctica los términos “tiempo discreto” y “digital” a menudo se intercambian. Sin embargo, el término “tiempo discreto” se emplea en el estudio teórico, mientras que el término “digital” se utiliza en conexión con las realizaciones de hardware y software.

Muchos sistemas de control industrial incluyen señales en tiempo continuo, señales de datos muestreados y señales digitales. En nuestro caso utilizamos el término “sistemas de control en tiempo discreto” para describir los sistemas de control que incluyen alguna de las formas de señales de datos muestreados (señales de pulsos modulados en amplitud) y/o señales digitales (señales codificadas en forma numérica)

En el programa desarrollado en Matlab se tienen las siguientes instrucciones para discretizar la ecuación de estado para un tiempo discreto $k = t/T$ y asumiendo que entre muestras la señal de control u es constante. Escogimos:

$$T = 0.005$$

$$[G, H, C, D] = c2dm(A, B, Cc, Dc, T, 'zoh'); \% \text{conversión a discreto}$$

G =

```

1.0000  0.0050  0.0000  0.0000  0.0000
0.0000  1.0000  0.0050  0.0000  0.0000
0.0000  0.0000  1.0000  0.0050  0.0000
0.0000  0.0000 -0.0156  0.9787  0.0020
0.0012  0.0004 -4.6539 -6.3565  0.1070

```

H =

```

1.0e+006 *
0.0000
0.0000
0.0001
0.0082
5.2331

```

C =

```

1  0  0  0  0

```

D =

```

0

```

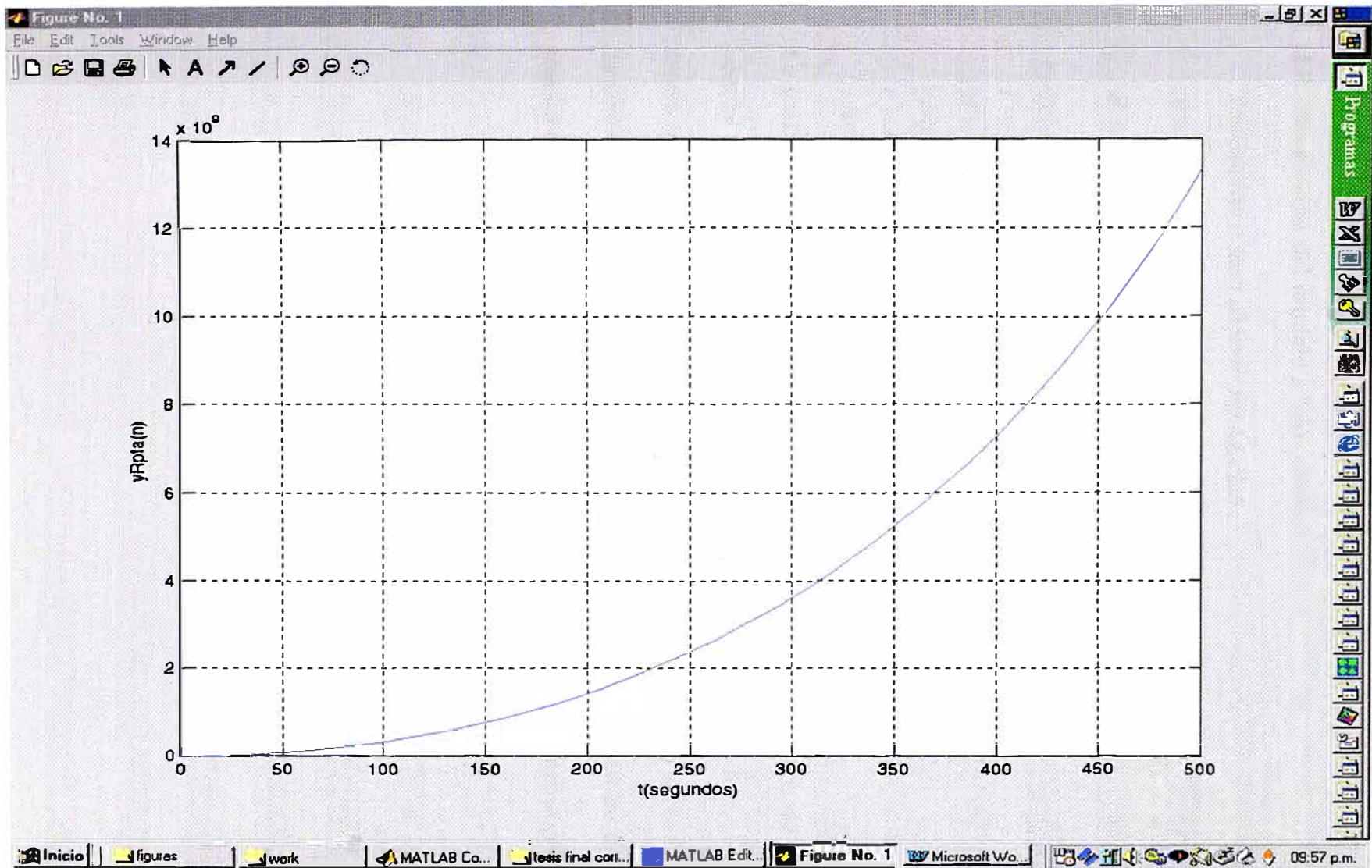


Fig. 3.3 Simulación del modelo a lazo abierto

CAPITULO IV

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (P.I.)

4.1 Datos de la planta y especificaciones de funcionamiento

4.1.1 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%.

4.1.2 Consideraciones de funcionamiento:

- a) Precisión: 0.5% (para mantener el nivel de potencia deseado).
- b) Período mínimo: 80 seg. (para limitar la evolución de la potencia).
- c) Estabilidad y comportamiento transitorio:
 - Estabilidad Absoluta: Que no haya 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.

4.2 Selección de los componentes del lazo de control

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

- a) Reactor.

En el cual existe un flujo neutrónico ϕ que equivale a una potencia n .

- b) Un detector de neutrones.

Es una 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/cm² seg.)
- Sensibilidad gamma: $5.5 \cdot 10^{-12}$ A/(r/hr)
- Tensión máxima de operación: 800voltios

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 década.
- Tensión de salida: +4.5 volt a fondo de escala.
- Tensión de offset de salida: +0.5 volt sin señal de entrada.
- Tiempo de respuesta: la constante de tiempo será menor a 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.

$$V_s = A \log n \quad (4.1)$$

Donde :

A = factor de escala.

n = potencia neutrónica.

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

$$n = n_0 e^{\frac{t}{T}} \quad (4.2)$$

Siendo:

n_0 = valor inicial.

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

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

$$V_s = A \left(\log n_o + \frac{t}{T} \log e \right) \quad (4.3)$$

Si se diferencia esta señal se obtiene:

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{0.43}{T} \quad (\text{décadas/seg.}) \quad (4.4)$$

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: 0.5volt con entrada de 10^{-11} A

Periodómetro:

- Rango de medición: -3%/seg hasta +7%/seg.
- Tensión de salida: 1.5volt 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 de mecanismo de la barra de regulación. La ganancia de este amplificador será determinada.

g) Un mecanismo.

Que transforma el movimiento de rotación del motor, en desplazamiento vertical de la barra de regulación. Generalmente lo comprende el mecanismo, el motor y una caja reductora que actúa 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: 220volts.
- Frecuencia : 400hz
- Voltaje fase de control: 220volts.
- 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: 600pcm
- Material: acero inoxidable.

4.3 Función de transferencia del sistema

El diagrama de bloques del sistema se muestra en la figura 4.1. Se presentaran las funciones de transferencia que caracterizan a cada uno de los elementos mencionados.

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:

$$\frac{\delta n(s)/n_0}{\delta k(s)} = \frac{1}{l^*} \frac{1}{s \left(1 + \sum \frac{\beta_i}{l^* (s + \lambda_i)} \right)} \quad (4.5)$$

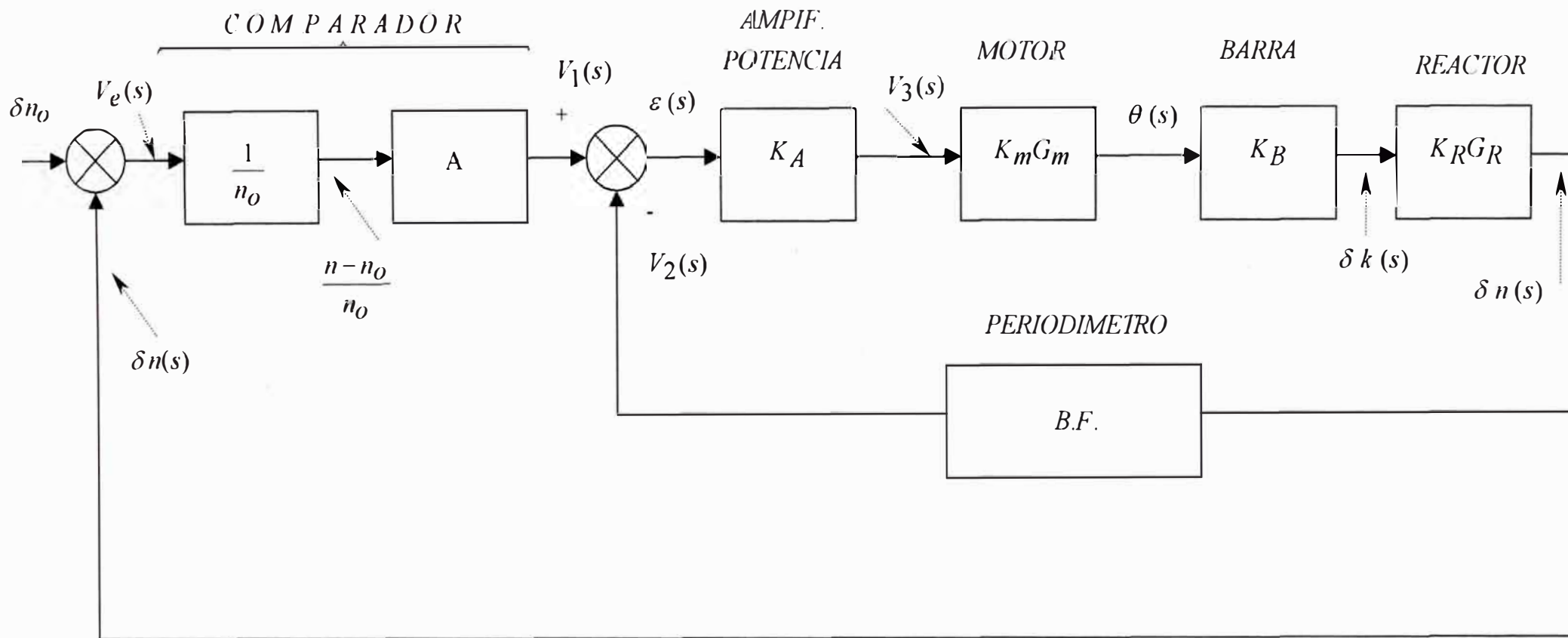


Fig. 4.1 Diagrama de bloques del sistema

Siendo:

n_0 = potencia del reactor en equilibrio.

l^* = vida media de los neutrones.

β_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:

$$K_{RGR} = \frac{\delta n(s)/n_0}{\delta k(s)} = \frac{1}{sl^*} \frac{s + \lambda}{s + \lambda + \beta/l^*} \quad (4.6)$$

Donde:

β = fracción total de neutrones retardados.

λ = constante de decaimiento media.

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

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

$$\beta = 0.0064$$

$$l = 5 \cdot 10^{-5} \text{ seg}$$

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

$$K_{RGR}(s) = \frac{1}{s} \frac{\lambda \left(1 + \frac{s}{\lambda}\right)}{\beta \left(1 + \frac{s}{\beta/l^*}\right)} \quad (4.7)$$

En la que se ha despreciado λ frente al valor de β/l^*

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

$$K_{RG_R} = \frac{\delta n(s)/n_0}{\delta k(s)} = 0.012 \frac{1+13s}{s(1+0.007s)} \quad (4.8)$$

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 al 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 0.1volts/% de error. Como el motor, debido a la función estática del reductor y mecanismo, responderá cuando el voltaje ≥ 20 volt (para el motor seleccionado), la ganancia necesaria en tensión para mantener la precisión de 0.5% deberá ser:

$$K_A \geq \frac{V}{AP_r} = \frac{20}{0.1(0.5)} = 400$$

En la práctica:

$$100 < K_A < 1000 \quad (4.9)$$

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.

La función de transferencia estable de este circuito será:

$$BF(s) = B \frac{s}{1 + \tau_2 s} \quad (4.10)$$

Un valor apropiado del tiempo de respuesta del periodómetro es de $\tau_2 = 1$ seg, de tal forma que no tarde en señalar el período correcto; el retardo puede resultar inadmisibles, dado que, en general, la tensión de salida debe actuar sobre la lógica de seguridad que pare 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 de B estará en parte fijado por las siguientes consideraciones: Dado el sistema de comando automático debe permitir al operador efectuar una variación automática de potencia, es necesario 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 alto posible, para que no traiga problemas con offset de las etapas siguientes.

Para un primer ensayo se puede adoptar que:

Para una velocidad de crecimiento de 1%/seg corresponde a una salida de 2 volts.

Luego B será: 2 volt seg/%

La función de transferencia queda:

$$BF(s) = 2 \frac{s}{1+s} \quad (4.11)$$

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:

$$K_m G_m = \frac{\theta(s)}{V_3(s)} = \frac{K_v}{s(1 + \tau_m s)} \quad (4.12)$$

Siendo:

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

τ_m = constante de tiempo del motor (seg.)

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

$$K_m G_m = \frac{10 \frac{rad}{seg}}{s(1 + 0.15s) \text{ volt}} \quad (4.13)$$

f) Constante 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, esta limitada en base a consideraciones de estabilidad del sistema. Conservativamente adoptamos un valor de 20 pcm/seg (velocidad máxima de introducción de reactividad) que podrá ser posteriormente ajustada.

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

$$K_B = \frac{\alpha}{\omega_m} \frac{\text{pcm}/\text{seg}}{\text{rad}/\text{seg}} \quad (4.14)$$

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

$$K_B = \frac{1}{37} \frac{\text{pcm}}{\text{rad}} \quad (4.15)$$

4.4 Estabilidad

4.4.1 Bases del Análisis

El sistema se estudia por el método gráfico de trazado de la función de transferencia total en lazo abierto; se determina 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 $n_0 \text{ min}$ y $n_0 \text{ máx}$, 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 elementos que componen el lazo de control, es lineal en un entorno de la posición de equilibrio y que la función de transferencia del reactor está linealizada en todo el intervalo $n_0 \text{ min.}$, $n_0 \text{ max}$, 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 sobreimpulso no debe llegar al valor de potencia máximo permitido.

La velocidad de crecimiento de la potencia, no debe ser superior a un periodo 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 barra de control es comandada 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 próxima a valor de equilibrio.

4.4.2 Estabilidad de 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 éste lazo tenemos

$$KG(s) = K_A \cdot K_m \cdot K_B \cdot K_R \cdot G_m(s) \cdot G_R(s) \quad (4.16)$$

Donde la función de transferencia del reactor es:

$$K_R G_R(s) = 0.012 \frac{(1+13s)}{s(1+0.008s)} \quad (4.17)$$

Los valores de las constantes son:

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

Agrupando en un sólo coeficiente:

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

La función de transferencia BF(s) es:

$$BF(s) = \frac{2s}{1+s} \frac{\text{volts}}{\%/\text{seg}} \quad (4.18)$$

Finalmente la F.T en lazo abierto KG(s)BF(s) queda:

$$KG(s)BF(s) = \frac{K(1+s/\lambda)}{\beta s^2 (1+\tau_m s)(1+l^* s/\beta)^{1+\tau_2 s}} \quad (4.19)$$

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

La curva de amplitud y fase de la ecuación (4.19) está representada en la figura 4.2. En un diagrama de Nichols se representa la misma función, en este último se aprecia que el margen de fase es exiguo (23°). Para obtener un margen de fase aceptable (45°), se reduce la ganancia del medidor de período en 8 dB, lo que equivale en éste diagrama a desplazar verticalmente la curva hacia abajo 8 dB. Se observa que ahora el margen de fase es de 45° y que la curva es tangente al círculo de amplitud constante $M = 2$ dB, lo que le acuerda un comportamiento transitorio aceptable. En el punto de tangencia leemos la frecuencia de resonancia 8 rad/seg. El margen de ganancia se obtiene en el mismo gráfico y resulta 17 dB.

Bode Diagrams

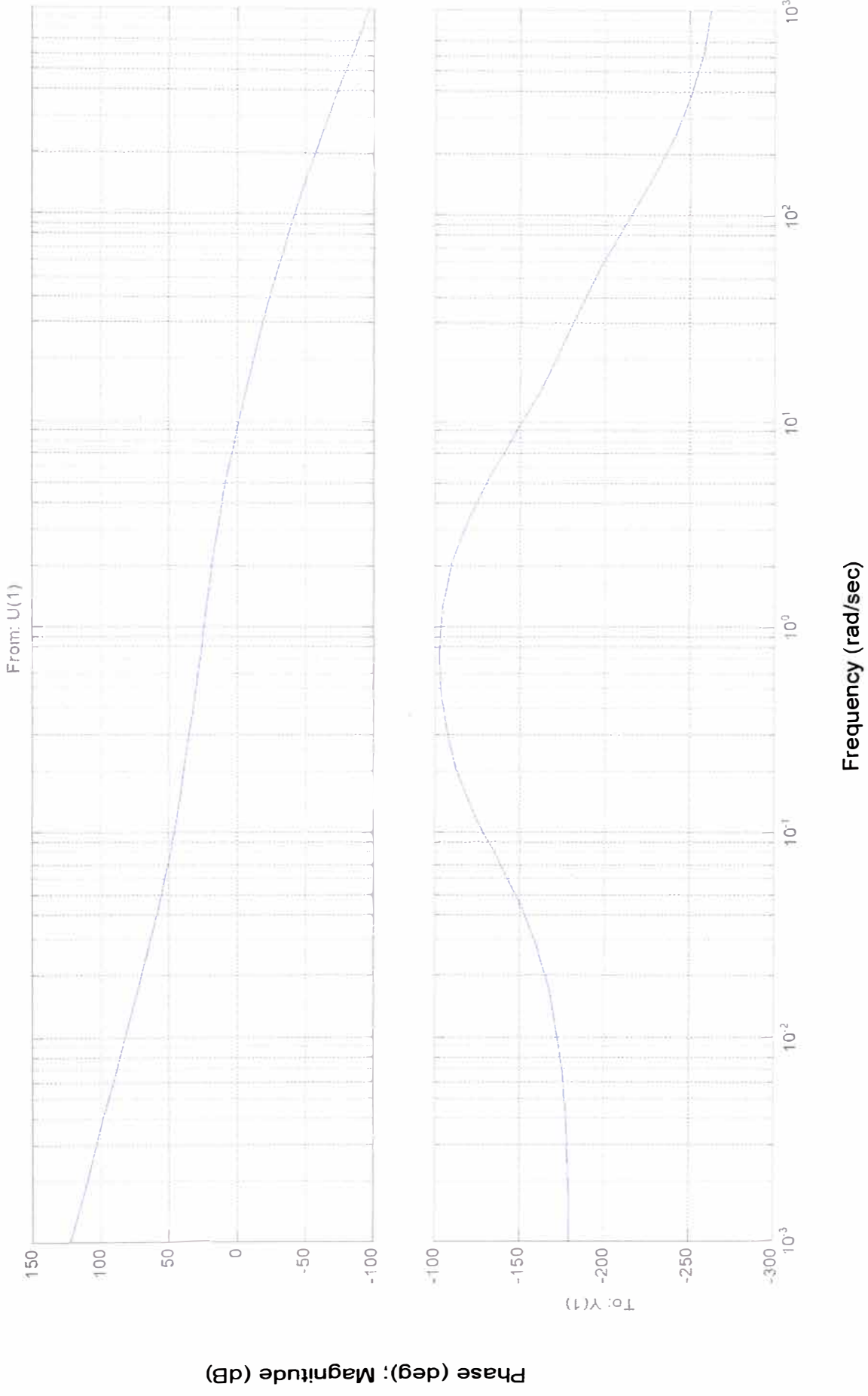


Fig. 4.2 Curva amplitud y fase $KG(s).BF(s)$

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

En la figura 4.2, 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 $0.8 \frac{\text{volt}}{\%/\text{seg}}$. 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:

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

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 mecanismo. Medido experimentalmente se obtuvo el valor $V_{arr} = 20$ volt. Como $K_A = 400$ resulta:

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

4.4.3 Estabilidad del Sistema.

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

$$K_S G_S(s) = \frac{\delta n(s)}{V_e(s)} = \frac{A \cdot KG(s)}{1 + KG(s) \cdot BF(s)} \quad (4.20)$$

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

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

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

Utilizando la expresión (4.20) se completa el trazado de la curva para las frecuencias próximas a $\omega=1$. Las curvas resultantes se muestran en la figura 4.3.

Se observa que el sistema es estable y que existe un margen de fase considerable, próximo a los 85° .

En la gráfica de la figura 4.4 se aprecia la respuesta del sistema frente a una entrada escalón.

4.4.4 Conclusiones

La relación (2.11), muestra que el periodo de la evolución puede controlarse actuando sobre la ganancia del periodómetro o sobre el valor límite de la tensión C del comparador. El primer método no es adecuado, pues ello modifica la estabilidad del lazo interno de realimentación.

De ahí que la segunda alternativa sea la que presenta mejores posibilidades.

En cuanto a la influencia que sobre el sistema agrega la realimentación de la señal de período, vemos que el avance de fase que produce la diferenciación (figura 4.2) no se hace sentir mucho más allá de la frecuencia $1/\tau_2$, alcanzando los 80° a 0.1 rad/seg.

Bode Diagrams

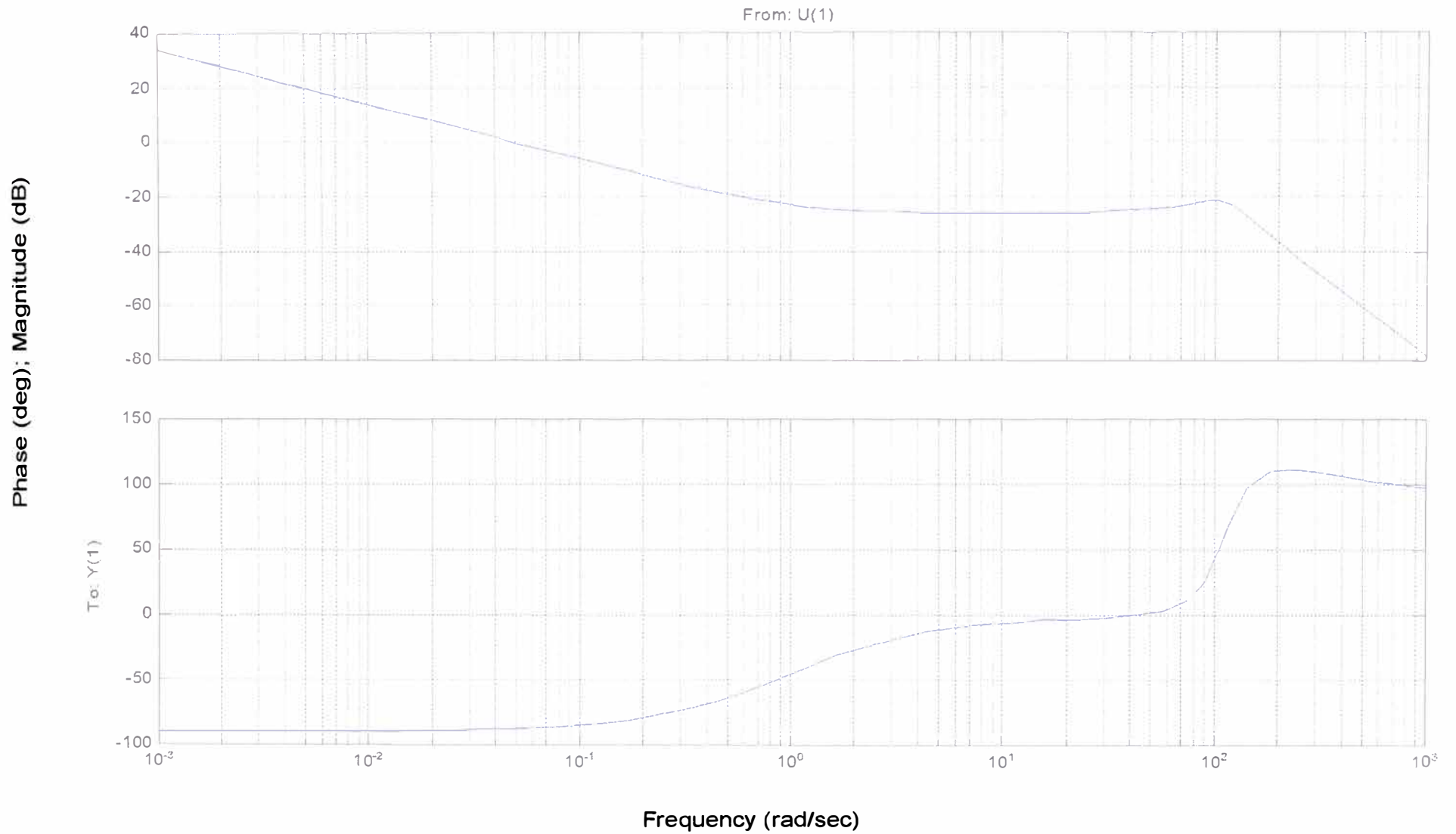


Fig 4.3 Curva amplitud-fase $AKG(s) / 1+KG(s)BF(s)$

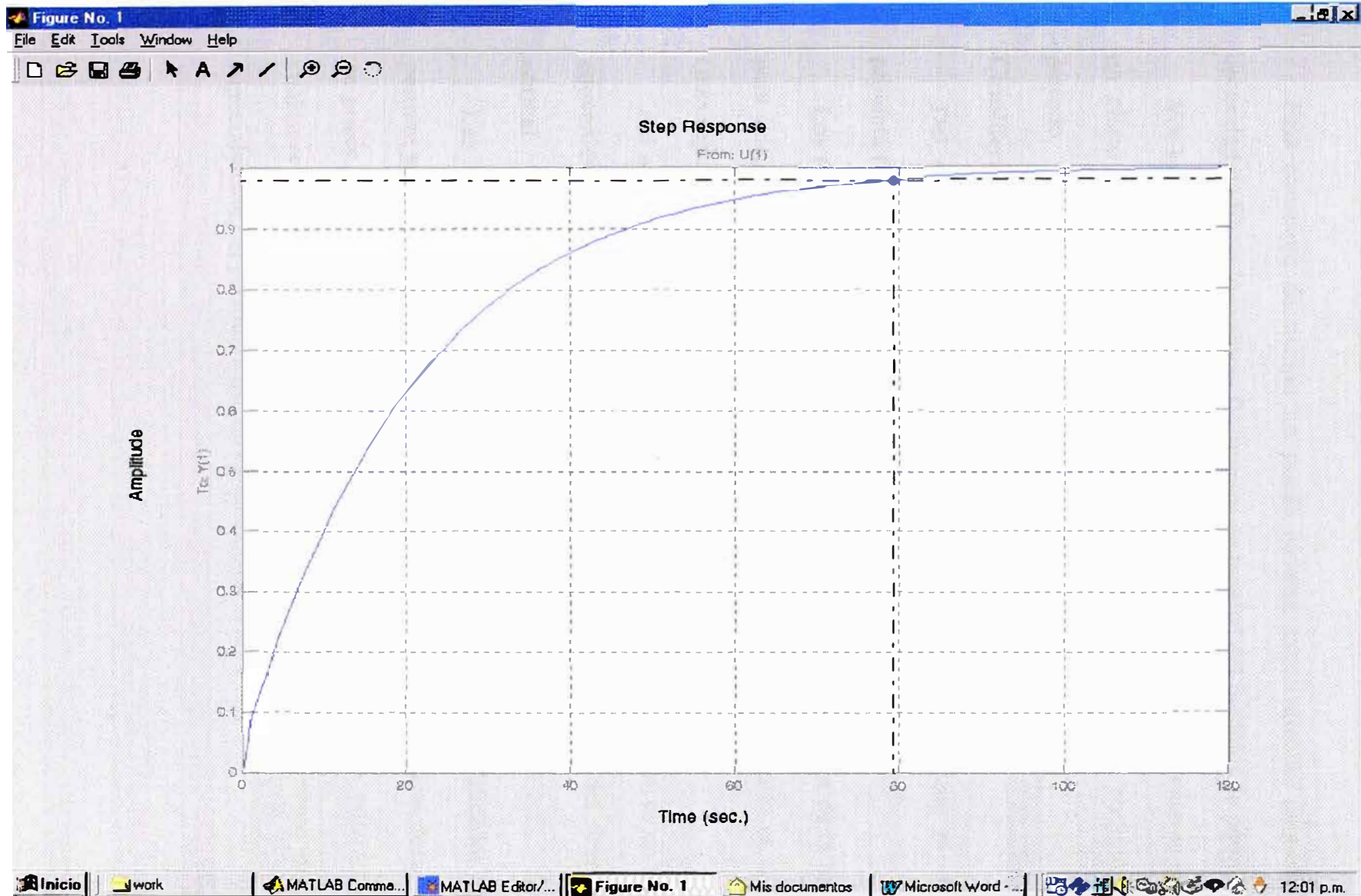


Fig.4.4 Gráfica de respuesta al escalón para el control P.I.

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

Por lo tanto la ganancia de la rama directa K , no puede aumentarse más allá de un cierto límite, confiando en la acción estabilizadora de la realimentación de período.

Consideraciones a tomarse en cuenta:

Del conjunto de resultados obtenidos se puede deducir que el sistema no presenta inestabilidad al menos para las ganancias utilizadas.

Los resultados 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.

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.

CAPITULO V

DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL AVANZADO

5.1. -Diseño del controlador óptimo proporcional integral

He escogido el regulador Optimo Proporcional Integral debido a que los errores en estado permanente pueden aparecer si los parámetros del proceso o su estructura (su ecuación de estado) no han sido estimados con suficiente exactitud. Para procesos que no posean propiedades integradoras, la inclusión de acción integral en el “sistema de control permite obtener un error estacionario nulo. La figura 5.1 ilustra un regulador óptimo para sistemas univariados, que incluye dicha acción integral en el sistema de control: un integrador con señal de salida $v(k)$ y una ganancia integral K_I asociada. Siendo la señal de referencia $r(k)$ un escalón unitario, de la figura 5.1 podemos deducir que las ecuaciones de estado y de salida del proceso son:

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (5.1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (5.2)$$

La señal de control $u(k)$ viene dado por:

$$u(k) = -Kx(k) + K_I v(k) \quad (5.3)$$

Donde la matriz de ganancia del controlador es:

$$K = [K_1 \quad K_2 \quad \dots \quad K_n] \quad (5.4)$$

La ecuación para el integrador resulta:

$$v(k) = v(k-1) + r(k) - y(k) \quad (5.5)$$

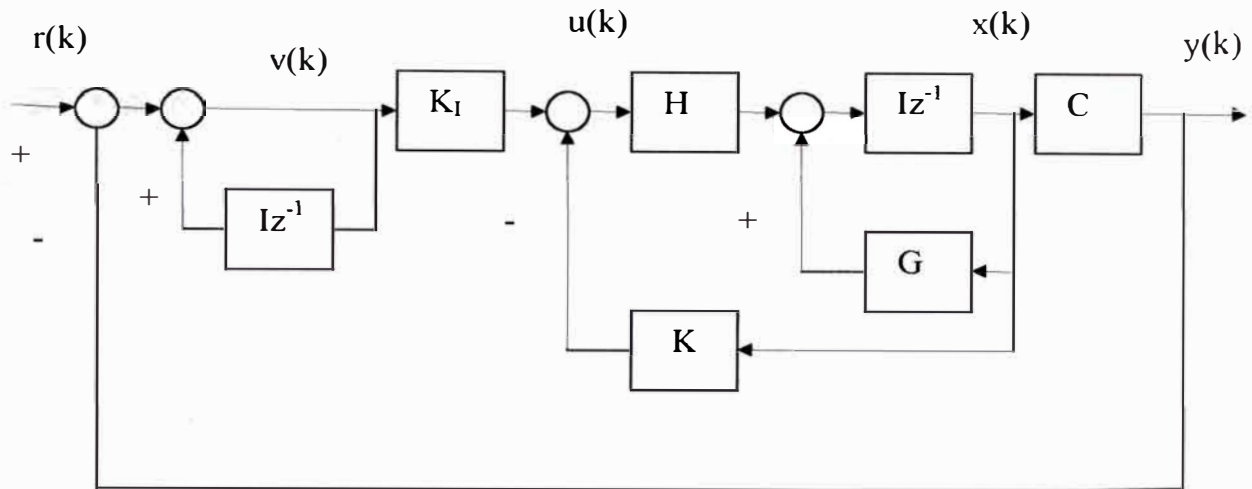


Figura 5.1 El regulador proporcional integral

De donde se obtiene:

$$\begin{aligned}
 v(k+1) &= v(k) + r(k+1) - y(k-1) \\
 &= v(k) + r(k+1) - C[Gx(k) + Hu(k)] \\
 &= (1 - CHK_I)v(k) + (-CG + CHK)x(k) + r(k+1)
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Empleando las ecuaciones obtenemos:

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= Gx(k) + H[-Kx(k) + K_I v(k)] \\
 &= (G - HK)x(k) + HK_I v(k)
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Y de las ecuaciones (5.6) y (5.7) y (5.2) deducimos:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G - HK & HK_I \\ -CG + CHK & 1 - CHK_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(k+1) \tag{5.8}$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix} \tag{5.9}$$

En el estado de equilibrio para $(k \rightarrow \infty)$, los valores de $x(k)$, $u(k)$ y $v(k)$ toman los valores estacionarios $x(\infty)$, $u(\infty)$ y $v(\infty)$. Así la ecuación (5.8) se convierte en:

$$\begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G - HK & HK_I \\ -CG + CHK & 1 - CHK_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r \end{bmatrix} \tag{5.10}$$

Si definimos

$$x(k) - x(\infty) = x_e(k) \quad (5.11)$$

$$v(k) - v(\infty) = v_e(k) \quad (5.12)$$

y restamos ahora la ecuación (5.10) de (5.8), y luego usando las relaciones (5.11) y (5.12) obtendremos :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_e(k+1) \\ v_e(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G - HK & HK_I \\ -CG + CHK & 1 - CHK_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G & 0 \\ -CG & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} H \\ -CH \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -K & K_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.13)$$

La ecuación (5.13) puede ser escrita como:

$$\xi(k+1) = \tilde{G}\xi(k) + \tilde{H}w(k) \quad (5.14)$$

$$w(k) = -\tilde{K}\xi(k) \quad (5.15)$$

donde :

$$\xi(k) = \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$\tilde{G}(k) = \begin{bmatrix} G & 0 \\ -CG & I \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$\tilde{H}(k) = \begin{bmatrix} H \\ -CH \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$\tilde{K}(k) = \begin{bmatrix} K & -K_I \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Observar que la inclusión de un integrador en el sistema de control aumenta en uno el orden del sistema; es decir, si n es el orden del sistema original, el nuevo orden del sistema con un integrador es $(n+1)$. En otras palabras el vector de estado $x(k)$ del sistema original posee dimensión n , mientras que el vector de estado $\xi(k)$ del regulador proporcional integral posee dimensión $(n+1)$.

Teniendo en mente las relaciones anteriores, podemos definir la siguiente función de costo:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\xi(k)^T \tilde{Q} \xi(k) + w^2(k) \tilde{R} \right] \quad (5.20)$$

Debemos entonces calcular una matriz \tilde{K} adecuada de forma tal que minimice la función de costo dada en la ecuación (5.20). Empleando el mismo procedimiento usado en este tipo de controles, es posible formular la ecuación de Riccati y la ecuación de ganancia del controlador \tilde{K} para el regulador, como sigue:

$$\tilde{P} = \tilde{Q} + \tilde{G}^T \tilde{P} \tilde{G} - \tilde{G}^T \tilde{P} \tilde{H} \left[\tilde{R} + \tilde{H}^T \tilde{P} \tilde{H} \right]^{-1} \tilde{H}^T \tilde{P} \tilde{G} \quad (5.21)$$

$$\tilde{K} = \left[\tilde{R} + \tilde{H}^T \tilde{P} \tilde{H} \right]^{-1} \tilde{H}^T \tilde{P} \tilde{G} \quad (5.22)$$

El programa en Matlab reactoropt.m se presenta completo, y parte de ello se lista a continuación:

En programa Matlab se usan otras nomenclaturas

```
Gtilde=[G zeros(5,1)
-C*G eye(1,1)]; %debe ser de orden n+1=6
Htilde=[H
-C*H];
Q=[1 0 0 0 0 0;0 1 0 0 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 0 1 0 0;0 0 0 0 1 0;0 0 0 0 0 1]; R=[1];
%Matrices de ponderación
[Ktil,Ptil,E]=dlqr(Gtilde,Htilde,Q,R); %Ktil: Ganancia Optima

K=[Ktil(1) Ktil(2) Ktil(3) Ktil(4) Ktil(5)]; KI=-Ktil(6);
%KI=Ganancia del Integrador
%K=Matriz de realimentación
x=[0;0;0;0;0]; yi=10; v=0; %condiciones iniciales
N=10000; r=100; %N=número de puntos r=setpoint
%RESPUESTA AL ESCALON r=100
for k=1:N
v=v + r-yi;
u(k)=-K*x + KI*v;
```

$$\begin{aligned}x &= G * x + H * u(k); \\ y(k) &= C * x; \quad y_i = y(k); \end{aligned}$$

Cuyos resultados se dan a continuación:

Gtilde =

1.0000	0.0050	0.0000	0.0000	0.0000	0
0.0000	1.0000	0.0050	0.0000	0.0000	0
0.0000	0.0000	1.0000	0.0050	0.0000	0
0.0000	0.0000	-0.0156	0.9787	0.0020	0
0.0012	0.0004	-4.6539	-6.3565	0.1070	0
-1.0000	-0.0050	-0.0000	-0.0000	-0.0000	1.0000

Htilde =

1.0e+006 *

0.0000

0.0000

0.0001

0.0082

5.2331

-0.0000

Ktil =

1.0e-004 *

0.4569 0.2789 0.0915 0.0061 0.0002 -0.0019

Ptil =

1.0e+006 *

4.9473	2.1798	0.5582	0.0693	0.0001	-0.0294
2.1798	1.0773	0.3060	0.0422	0.0001	-0.0111
0.5582	0.3060	0.0973	0.0152	0.0000	-0.0025
0.0693	0.0422	0.0152	0.0028	0.0000	-0.0003
0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000
-0.0294	-0.0111	-0.0025	-0.0003	-0.0000	0.0002

E =

0.0000
 0.9888 + 0.0076i
 0.9888 - 0.0076i
 0.9863
 0.9956 + 0.0123i
 0.9956 - 0.0123i

K =

1.0e-004 *
 0.4569 0.2789 0.0915 0.0061 0.0002

Con estos valores se logra tener un control mejor que el anterior proporcional e integral.

5.2. Simulación del sistema de control en lazo cerrado

La simulación se da ejecutando el programa reactoropt.m ya indicado, produciendo el resultado gráfico que se muestra en la figura 5.2.

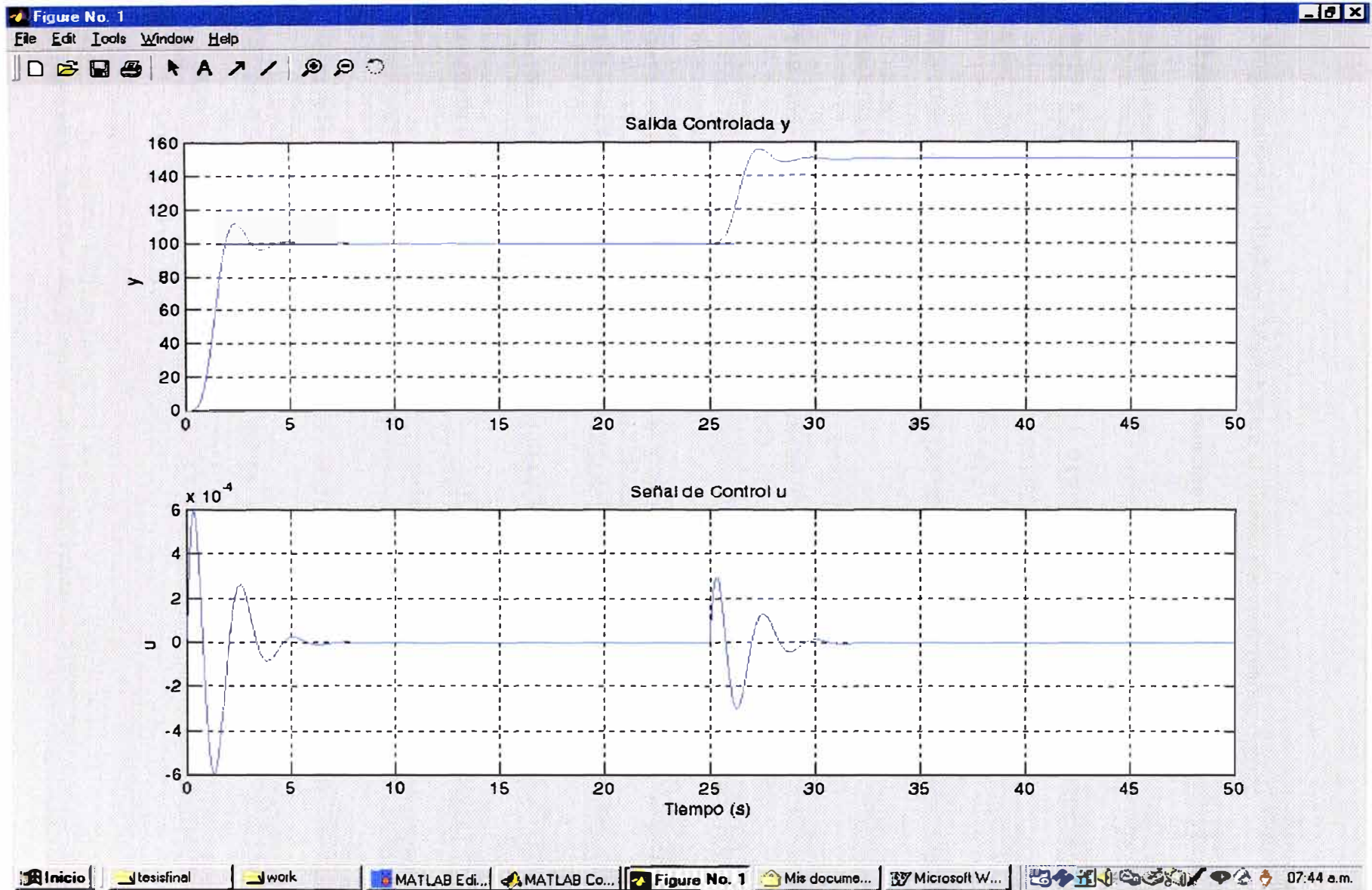


Figura 5.2 Salida controlada y señal de control para control óptimo del piloto automático del Reactor RP-10

Programa desarrollado en Matlab para el diseño del controlador óptimo

El programa completo se dá a continuación:

```

%reactoropt.m
%Con Perturbación
%Para estabilizar el Reactor
A=[0 1 0 0 0;0 0 1 0 0;0 0 0 1 0;0 0 0 0 1;0.570986 0.17702 -
2285.0264 -3113.309 -428.0024];
B=[0;0;14054.045;-1849358.809;2550148697];
Cc=[1 0 0 0 0]; Dc=[0];
M=[B A*B A*A*B A*A*A*B A*A*A*A*B];
%controlabilidad
N1=[Cc' A'*Cc' A'*A'*Cc' A'*A'*A'*Cc' A'*A'*A'*A'*Cc'];
%Observabilidad
rank(M);
rank(N1);
%Cumple con observabilidad y controlabilidad
%rank(M)=rank(N)=n=5=>c.c y c.o
T=0.005; %Periodo de muestreo
[G,H,C,D]=c2dm(A,B,Cc,Dc,T,'zoh'); %conversión a discreto
Gtilde=[G zeros(5,1)
-C*G eye(1,1)]; %debe ser de orden n+1=6
Htilde=[H
-C*H];
Q=[1 0 0 0 0 0;0 1 0 0 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 0 1 0 0;0 0 0 0 1 0;0 0 0
0 0 1]; R=[1]; %Matrices de ponderación
[Ktil,Ptil,E]=dlqr(Gtilde,Htilde,Q,R); %Ktil: Ganancia
Optima

K=[Ktil(1) Ktil(2) Ktil(3) Ktil(4) Ktil(5)]; KI=-Ktil(6);
%KI=Ganancia del Integrador
%K=Matriz de realimentación
x=[0;0;0;0;0]; yi=10; v=0; %condiciones
iniciales
N=10000; r=100; %N=numero de puntos r=setpoint
%RESPUESTA AL ESCALON r=100
for k=1:N
v=v + r-yi;
u(k)=-K*x + KI*v;
x=G*x + H*u(k);
y(k)=C*x; yi=y(k);
if k>=5000 %En 25seg se corta l estabilidad
break;
end
end
end

%Entra la perturbacion para 25 seg.
%Ingresar valores de p para la perturbación

A=[0 1 0 0 0;0 0 1 0 0;0 0 0 1 0;0 0 0 0 1;0.570986 0.17702 -
2285.0264 -3113.309 -428.0024];
B=[0;0;14054.045;-1849358.809;2550148697];

```



```

Cc=[1 0 0 0 0]; Dc=[0];

T=0.005; %Periodo de muestreo
[G,H,C,D]=c2dm(A,B,Cc,Dc,T,'zoh'); %conversión a discreto
Gtilde=[G zeros(5,1)
        -C*G eye(1,1)]; %debe ser de orden n+1=6
Htilde=[H
        -C*H];
Q=[1 0 0 0 0 0;0 1 0 0 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 0 1 0 0;0 0 0 0 1 0;0 0 0
0 0 1]; R=[1]; %Matrices de ponderacion

[Ktil,Ptil,E]=dlqr(Gtilde,Htilde,Q,R); %Ktil: Ganancia Optima
K=[Ktil(1) Ktil(2) Ktil(3) Ktil(4) Ktil(5)]; KI=-Ktil(6);
r=150;
%continuación de la gráfica desde 25seg
for k=5001:N
    v=v + r-yi;
    u(k)=-K*x + KI*v;
    x=G*x + H*u(k);
    y(k)=C*x; yi=y(k);
end

%GRAFICOS
t=linspace(0,T*N,N);
subplot(2,1,1)
plot(t,y); ylabel('y ');title('Salida Controlada y'); grid;
subplot(2,1,2)
plot(t,u); ylabel('u ');title('Señal de Control u'); grid;
xlabel('Tiempo (s)');
print -deps -f tesis7
%Calculo recursivo de la matriz Ptilde y calculo de Ktilde
T=2000;Ptilde=zeros(6,6);
for i=1:T
    Ptilde=Q+Gtilde'*Ptilde*Gtilde-
    Gtilde'*Ptilde*Htilde*inv(R+Htilde'*Ptilde*Htilde)*Htilde'*Ptilde*Gt
ilde;
end
Ktilde=inv(R+Htilde'*Ptilde*Htilde)*Htilde'*Ptilde*Gtilde;
-Se cumple que Ktil=Ktilde y Ptil=Ptilde

```

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

Los resultados obtenidos en el análisis teórico de la estabilidad realizado, basados 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 (Xenón 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.

En la simulación del modelo a lazo abierto en donde se introduce perturbaciones “escalón” se pretende verificar la simulación correcta de las ecuaciones cinéticas y lo que se observa es la evolución libre de la potencia del reactor.

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.

Para el sistema de control que se tiene actualmente (P.I. mejorado) y los que se han diseñado ya sea controladores del tipo óptimo u adaptivo se tendrá que tomar en cuenta el valor de la constante del periodómetro (0.8 seg.) para obtener una evolución con un periodo del orden de 80 seg. , importante para la seguridad de toda

instalación nuclear para la no ocurrencia de accidentes que podrían originar daños catastróficos.

Mientras en el diseño original la señal de error del piloto automático es corregida por la señal de período, en el nuevo diseño ya sea con control óptimo u control adaptivo la buena selección de los parámetros y elementos de las matrices nos darán una buena respuesta que considere todo lo visto anteriormente.

5.3 Diseño del controlador adaptivo

5.3.1 Introducción

En esta capítulo se diseñará el control de potencia del reactor con el control adaptivo con autosintonización, que tiene la capacidad de controlar procesos no lineales univariados (de una entrada y una salida) operando en la presencia de cargas no lineales. Tales procesos pueden ser representados por ecuaciones diferenciales no lineales, donde los términos no lineales complican los aspectos analíticos de modelado del proceso y de diseño del controlador.

Sin embargo, basado en el correspondiente modelo lineal del proceso, se puede estructurar un sistema de control adaptivo con autosintonización combinando algoritmos lineales de control con procedimiento para estimar en línea los parámetros y estados del proceso.

Los sistemas de control adaptivo ajustan su comportamiento a las cambiantes propiedades del proceso controlado y de las señales que interactúan sobre dicho proceso. Este tipo de control adaptivo con autosintonización mostrado en la figura 5.3 combina en su diseño un método de estimación de parámetros (el de los mínimos cuadrados recursivo mejorado), una técnica de estimación de estados (el filtro de Kalman),

una representación lineal del modelo del proceso, y una ley de control (el controlador proporcional-integral óptimo cuadrático con realimentación de estados). El objetivo del control es determinar una fuerza de control capaz de minimizar la diferencia entre

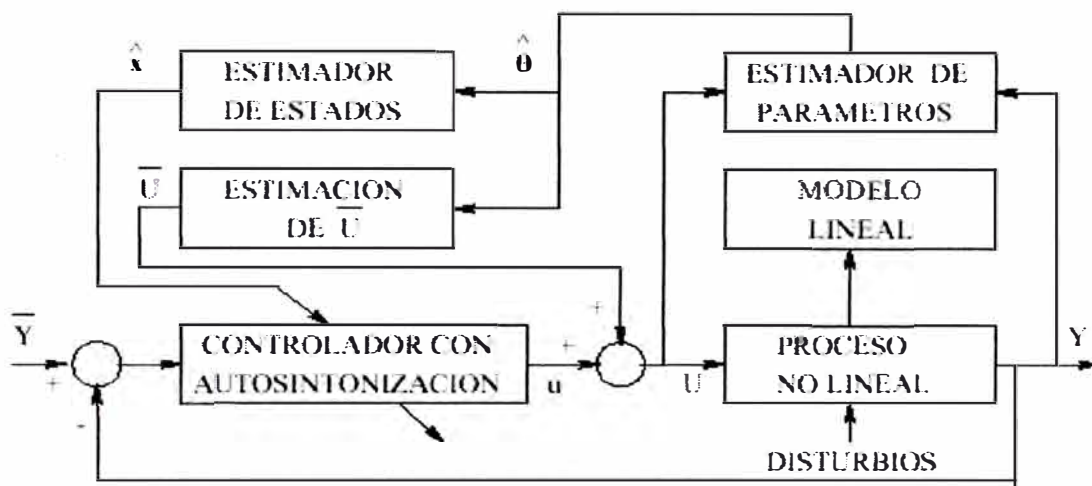


Figura 5.3 Configuración del sistema de control con autosintonización.

la salida del proceso y la señal de referencia.

El sistema de control con autosintonización mostrado en la figura opera como sigue: luego de cada tiempo de muestreo, el vector estimado de parámetro $\hat{\theta}$ se actualiza empleando los datos proporcionados por la entrada U del proceso y por la salida Y del mismo. Luego los elementos de θ se usan para recuperar el modelo lineal del proceso, lo cual permite estimar el vector de estado del modelo del proceso \hat{x} (empleando un filtro de Kalman) y el valor de equilibrio \bar{U} de la ley de control actual U . Tales resultados se usan luego para computar la ley de control residual u y para actualizar la ley de control actual U a partir de la relación $U = \bar{U} + u$.

El trabajo esta organizado como sigue. La sección 5.3.2 trata de modelar procesos no lineales usando modelos lineales. Procedimientos para estimar en línea (“on-line”) los parámetros y estados del modelo del proceso se ve en 5.3.3, mientras que el algoritmo del controlador con autosintonización se deriva en la sección 5.3.4.

5.3.2 Modelando procesos no lineales

Consideremos el siguiente proceso dinámico continuo:

$$\dot{X} = f(X, U(t), v(X, t), t) \quad (5.23)$$

Donde X (de orden n) y $U(t)$ (de orden uno) son el vector de estado y la ley de control, respectivamente. La función no lineal $f(\cdot)$ puede también contener disturbios $v(\cdot)$ en los estados. De la ecuación (5.23), es posible obtener el modelo lineal siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= [A + \Delta A] X(t) + [B + \Delta B] U(t) + v(X, t) \\ Y(t) &= [C + \Delta C] X + w(X, t) \end{aligned} \quad (5.24)$$

Donde A es la matriz de estado de dimensión $n \times n$, B es la matriz de control de dimensión $n \times 1$, C es la matriz de salida de dimensión $1 \times n$, y ΔA , ΔB y ΔC son las correspondientes incertidumbres acotadas con dimensiones apropiadas. Además $v(x, t)$ es un vector no lineal de disturbios de orden n actuando sobre los estados, $w(x, t)$, es un disturbio no lineal de orden uno actuando en la salida, e $Y(t)$ es la salida del proceso de orden uno.

El proceso nominal no perturbado (o proceso con certidumbre) se obtiene fijando en cero todas las incertidumbres y todos los disturbios en la ecuación 5.1. Muestreando dicho modelo nominal, podemos obtener la siguiente representación:

$$X(k+1) = GX(k) + HU(k); \quad Y(k) = CX(k) \quad (5.25)$$

donde k es el tiempo discreto y las matrices G y H poseen las mismas dimensiones que las matrices A y B , respectivamente. La correspondiente ecuación polinomial toma la forma:

$$A(z^{-1})y(z) = B(z^{-1})u(z) \quad (5.26)$$

donde z es el operador de desplazamiento, con:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n} \end{aligned} \quad (5.27)$$

Empleando ahora las relaciones residuales $y = Y - \bar{Y}$, $x = X - \bar{X}$ y $u = U - \bar{U}$

en las ecuaciones (5.25) y (5.26) obtenemos:

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k); \quad y(k) = Cx(k) \quad (5.28)$$

$$A(z^{-1})Y(k) = B(z^{-1})U(k) + C \quad (5.29)$$

Donde la constante C se determina de:

$$C = (1 + a_1 + \dots + a_n)\bar{Y} - (b_1 + \dots + b_n)U \quad (5.30)$$

5.3.3 Procedimientos de Estimación

Esta sección presenta los procedimientos para estimar (o identificar) en línea los parámetros y los estados del modelo del proceso.

Método de Mínimos Cuadrados Recursivo Mejorado

El algoritmo básico de los mínimos cuadrados recursivo mejorado se emplea aquí porque a diferencia del método de mínimos cuadrados recursivo cuyo algoritmo puede presentar problemas potenciales de carácter numérico que podrían afectar el diseño final del controlador con autosintonización; el primero no los tiene y se puede implementar en la forma siguiente:

- 1) Obtener el vector de parámetros inicial $\theta(0)$ usando los valores de los parámetros del modelo del proceso dadas en la ecuación (5.26).
- 2) Obtener el valor inicial del parámetro $C(0)$ empleando la ecuación (5.30), considerando $\ddot{U}(0)$ e igual a la señal de referencia.
- 3) La matriz de covarianza inicial P puede tener la forma $P = \alpha I$, donde I es la matriz identidad y $\alpha \gg 1$.
- 4) Tomar nuevas mediciones de $Y(k)$ y de $U(k)$ en el proceso, para obtener una nueva ecuación de la forma dada en (5.31).
- 5) Computar $\rho(k) = \max(1, \|\psi(k)\|^{-2})$; $\psi_n = \psi \rho(k)$
- 6) Determinar la matriz $N(k)$ aplicando factorización Cholesky en:

$$N(k)N(k)^T = P(k)$$

- 7) Determinar la matriz diagonal de escalamiento $S(k)$ con elementos s_{jj} .

Tal matriz minimiza el número condicional del producto $S(k)N(k)$ siempre que $s_{jj} = 1/n_{jj}$, donde cada n_{jj} se obtiene tomando el valor absoluto de la suma de los elementos de la fila j de $N(k)$.

8) Computar:

$$P_S(k) = S(k)P(k)S(k)$$

$$\psi_{nS} = [S(k)]^{-1}\psi_n$$

$$r(k) = 1 + \psi_{nS}^T(k)P_S(k-1)\psi_{nS}^T(k)$$

$$\lambda(k) = 1 - \frac{1}{2} \left[r(k) - \sqrt{r^2(k) - \frac{4\|P_S(k-1)\psi_{nS}(k)\|^2}{\text{tr } P_S(k-1)}} \right]$$

$$e_n(k) = \frac{Y(k)}{\rho(k)} - \varphi_n^T(k)\hat{\theta}(k-1)$$

$$j(k) = \left[\varphi_{nS}^T(k+1)P_S(k)\psi_{nS}(k+1) + \lambda(k) \right]$$

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + S^{-1}(k)P_S(k)\psi_{nS}(k)e_n(k+1)/j(k)$$

$$H_{nS}(k+1) = P_S(k)\varphi_{nS}(k+1) \times \left[\varphi_{nS}^T(k+1)P_S(k)\varphi_{nS}(k+1) + \lambda(k) \right]^{-1}$$

$$P_S(k+1) = \left[I - H_{nS}(k+1)\varphi_{nS}^T(k+1) \right] P_S(k) / \lambda(k)$$

$$tt = \text{abs} \left[\frac{\max \text{eig}(P_S)}{\min \text{eig}(P_S)} \right]$$

9) Implementar el criterio para parar la estimación y para encontrar la nueva matriz de escalamiento N_{new} como sigue: sabiendo que tt es el número condicionante de P_S , si $tt < \tau$ (cota inferior), parar la estimación; en otro caso, si $tt > \kappa$ (cota superior), determinar $N_{\text{new}}(k)$ (a partir de la relación $P_S = N_{\text{new}}^{-T}$), calcular los elementos $n_{\text{new}ij}$ (valor absoluto de la suma de los elementos de las filas de $N_{\text{new}}(k)$), determinar la matriz diagonal S_{new} con elementos $s_{\text{new}ij} = 1/n_{\text{new}ij}$, y calcular la matriz $P_{\text{news}} = S_{\text{new}}P_S S_{\text{new}}$. Finalmente, actualizar: $P = P_{\text{news}}$.

Estimación de Estados

De la ecuación (5.28) podemos obtener el siguiente modelo nominal perturbado del proceso:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Gx(k) + Hu(k) + v(k) \\y(k) &= Cx(k) + w(k)\end{aligned}\tag{5.31}$$

El procedimiento de estimación descrito en la subsección anterior nos proporciona el vector de parámetros estimado del proceso $\theta(k)$. Usando los elementos de dicho vector de parámetros, podemos reconstruir las matrices estimadas $G(k)$, $H(k)$ y $C(k)$. El vector de estado estimado $x(k)$ puede ser obtenido empleando un filtro de Kalman con ecuación de observación:

$$\hat{x}(k) = \bar{x}(k) + K_o(k) [y(k) - \hat{C}(k)\bar{x}(k)]\tag{5.32}$$

Y ecuación de actualización de estados:

$$\bar{x}(k+1) = \tilde{G}(k)\hat{x}(k) + \tilde{H}(k)u(k)\tag{5.33}$$

En la ecuación (5.33), la matriz de ganancia $K_o(k)$ se calcula de:

$$K_o(k) = P_o(k)\hat{C}^T(k) \left[\hat{C}(k)P_o(k)\hat{C}^T(k) + R_o \right]^{-1}\tag{5.34}$$

Donde $P_o(k)$ es la matriz definida positiva, solución única de la siguiente ecuación matricial discreta asociada de Riccati:

$$P_o(k+1) = Q_o + \hat{G}^T(k)P_o(k)\hat{G}(k) - \hat{G}^T(k)K_o(k)\hat{C}(k)P_o(k)\hat{G}(k)\tag{5.35}$$

Donde Q_o y R_o son matrices de covarianza definidas positivas correspondiente a los disturbios v y w , respectivamente.

5.3.4 La Ley de Control

Es bastante conocido que el controlador proporcional óptimo cuadrático es una matriz de ganancia de K_x que nos permite formular la siguiente ley de control $u = -K_x x(k)$. Dicha matriz es el resultado de la minimización de la función de costo:

$$I = \sum_{k=0}^{\infty} \left[x^T(k) Q x(k) + u^2(k) R \right] \quad (5.36)$$

Sujeto a la ecuación de restricción:

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k)$$

Donde la matriz $Q=Q^T$ es semidefinida positiva y la matriz R es definida positiva. La ganancia K_x se obtiene de:

$$K_x = (R + H^T S H)^{-1} H^T S G \quad (5.37)$$

Donde S es la única matriz definida-positiva solución de la siguiente ecuación matricial discreta asociada de Riccati:

$$0 = S - G^T S G + G^T S H K_x \quad (5.38)$$

Para mejorar el rendimiento del controlador proporcional, es posible adicionar acción integral a dicho controlador. Definiendo la variable $z(k)$ como la integral (sumatoria) del error $[\bar{Y}(k) - Y(k)]$:

$$z(k) = \sum_{i=0}^{k-1} [\bar{Y}(k) - Y(k)] = \sum_{i=0}^{k-1} [-y(k)], \quad z(k+1) = \sum_{i=0}^k [-y(k)]$$

Entonces:

$$z(k+1) = z(k) - y(k) = z(k) - Cx(k) \quad (5.39)$$

De modo que la representación en el espacio de estado del sistema aumentado toma la forma siguiente:

$$x^a(k+1) = G^a x^a(k) + H^a u(k) \quad (5.40)$$

$$y(k) = C^a x^a(k) \quad (5.41)$$

Donde el superíndice a significa aumentado. El vector x^a y las matrices A^a , B^a y C^a poseen la forma:

$$x^a(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix}; \quad G^a(k) = \begin{bmatrix} G & 0 \\ -C & I \end{bmatrix}$$

$$H^a = \begin{bmatrix} H \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C^a = [C \ 0] \quad (5.42)$$

Por consiguiente, el problema es determinar la matriz de ganancia K^a como resultado de la minimización de la siguiente función de costo:

$$J^a = \sum_{k=0}^{\infty} \left[(x^a)^T(k) Q^a x^a(k) + u^2(k) R \right] \quad (5.43)$$

Donde la matriz $Q^a = [Q^a]^T$ es semidefinida positiva. La ganancia K^a se obtiene de:

$$K^a = \left\{ R + [H^a]^T P^a H^a \right\}^{-1} [H^a]^T P^a G^a \quad (5.44)$$

En la ecuación (5.44), P^a es la única matriz definida-positiva solución de la siguiente ecuación matricial discreta asociada de Riccati:

$$P^a = Q^a + [G^a]^T P^a G^a - [G^a]^T P^a H^a K^a \quad (5.45)$$

Por consiguiente, la ley de control del controlador óptimo cuadrático proporcional integral viene a ser:

$$u(k) = -K^a x^a(k) \quad (5.46)$$

y los parámetros de ponderación de rendimiento son R y Q^a .

5.3.5. Simulación del control en lazo cerrado

La simulación se da ejecutando el programa reactoradap.m ya indicado, produciendo el resultado gráfico que se muestra en la figura 5.4.

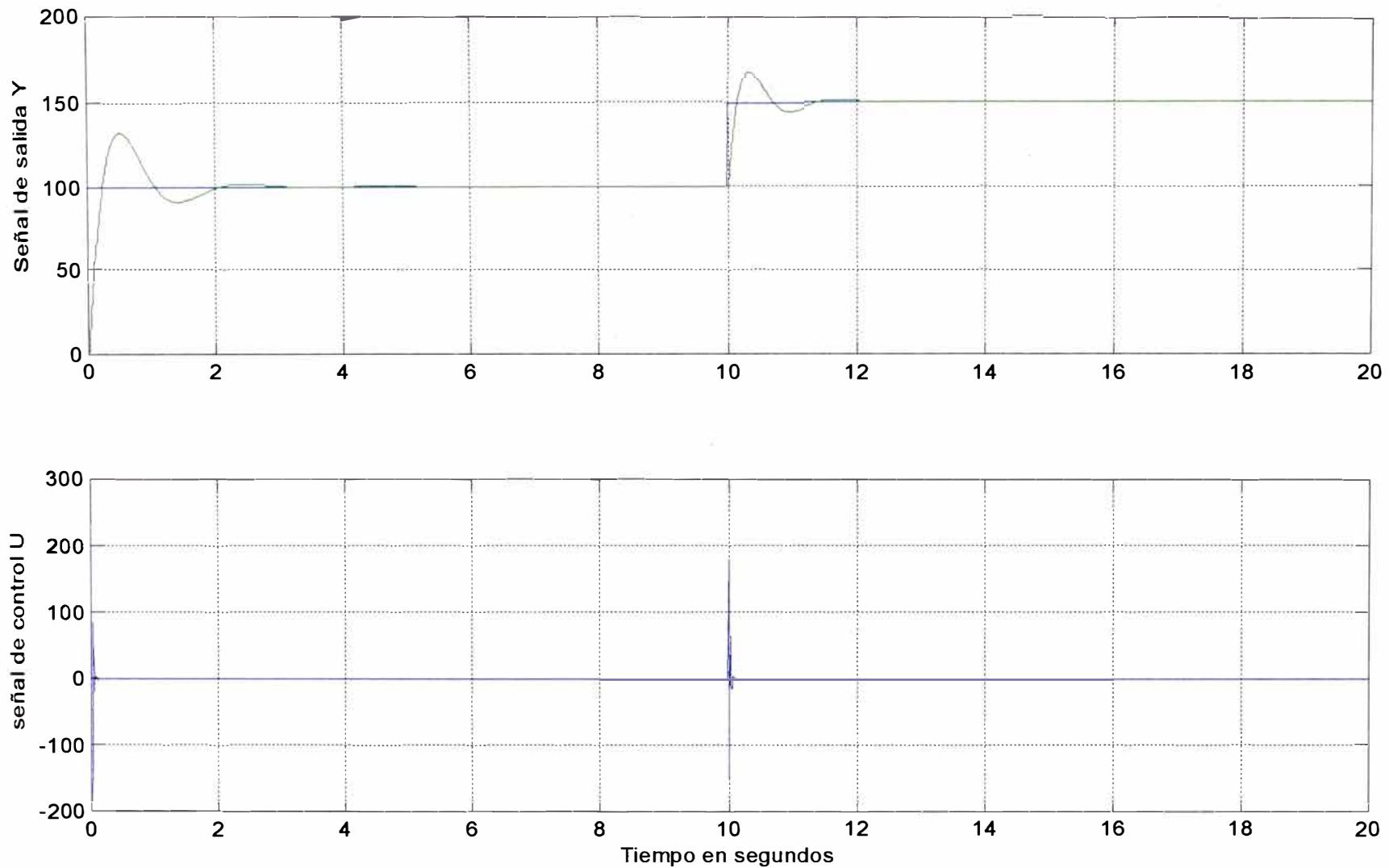


Figura 5.3 Salida controlada y señal de control para el control adaptivo del piloto automático del Reactor RP-10 de Huarangal

Programa desarrollado en Matlab para el diseño del controlador adaptivo

El programa completo desarrollado se dá a continuación :

```

%Simulacion del sistema de control de potencia del Reactor
%Adaptivo con autosintonizacion

%reactoradap.m
%Parametros Generales
nn=5; r=1;
NN=11; %Orden del vector estimador de parametros

%Parametros para Optimizar ganacia del filtro kalman
Xi=10000; Sigma=0.00005;

%Parametros de optimizacion del controlador Ke
KR=6; Qa=1*eye(r+nn,r+nn);
R=20; Qa=1*eye(r+nn,r+nn);

%Modelo Lineal
A=[0 1 0 0 0;0 0 1 0 0;0 0 0 1 0;0 0 0 0 1;0.570986 0.17702 -
2285.0264 -3113.309 -428.0024];
B=[0;0;14054.045;-1849358.809;2550148697];
C=[1 0 0 0 0]; D=[0];
[numc,denc]=ss2tf(A,B,C,D);
%Modelo Lineal Discreto
T = 0.005; %Periodo de muestreo
[G,H,C,D]=c2dm(A,B,C,D,T,'zoh');
[num,den]=ss2tf(G,H,C,D);

a1=den(2); a2=den(3); a3=den(4); a4=den(5); a5=den(6);
b1=num(2); b2=num(3); b3=num(4); b4=num(5); b5=num(6);

%Condiciones Iniciales
Ref=100;%Referencia Inicial
Ce=(1+a1+a2+a3+a4+a5)*Ref;
thi=[-a1 -a2 -a3 -a4 -a5 b1 b2 b3 b4 b5 Ce]'; %vector inicial de
parametros
alfa=1000; Pi=alfa*eye(NN);
lamb=0.98; lamb0=0.99;
Y(1)=0; Y(2)=0; Y(3)=0; Y(4)=0; Y(5)=0; %salida actual
y(1)=0; y(2)=0; y(3)=0; y(4)=0; y(5)=0; %salida residual
U(1)=0; U(2)=0; U(3)=0; U(4)=0; U(5)=0; %señal de control ac-
tual
u(1)=0; u(2)=0; u(3)=0; u(4)=0; u(5)=0; %señal de cor-
trol residual
xmenos=zeros(nn,1); %vector de observacion inicial
z=0; %accion Integral inicial
%Inicio del Lazo de Control
MM=2000;
for t=1:MM
%Señal de Referencia
Yo(t+5)=Ref;
Y(t+5)=[Y(t+4) Y(t+3) Y(t+2) Y(t+1) Y(t)...
U(t+4) U(t+3) U(t+2) U(t+1) U(t)]*...
[-a1 -a2 -a3 -a4 -a5 b1 b2 b3 b4 b5]';

```

```

y(t+5)=Y(t+5)-Yo(t+5);
%Estimacion de parametros metodo MCRM
psi=[Y(t+4) Y(t+3) Y(t+2) Y(t+1) Y(t)...
      U(t+4) U(t+3) U(t+2) U(t+1) U(t) 1]';
rho=max(1,norm(psi));
psin=psi/rho;
Nn=chol(Pi'); %Nn'*Nn=Pi=>Nn*Nn'=Pi'
S=inv(diag(Nn*ones(NN,1),0));
Ps=S*Pi*S;
psins=inv(S)*psin;
rt=1+psins'*Ps*psins;
lamb=1-(rt-sqrt(rt^2-4*norm(Ps*psins)^2/trace(Ps)))/2;
e=Y(t+5)/rho - thi'*psin;
j=psins'*Ps*psins+lamb;
th=thi+e*inv(S)*Ps*psins/j;
Hns=Ps*psins/j;
Ps=(Ps-Hns*psins'*Ps)/lamb;
tt=abs(max(eig(Ps))/min(eig(Ps)));
cmax=100; cmin=15;
%cmx=1200; cmin=100;
if tt<=cmin
    Pi=Ps; thi=th;
elseif tt>=cmax
    Nnew=chol(Ps'); %Nnew*Nnew'=Ps'
    Snew=inv(diag(Nnew*ones(NN,1),0));
    Psnew=Snew*Ps*Snew;
    Pi=Psnew; thi=th;
end
%Recuperacion de la ecuacion canonica controlable
ae1=-th(1); ae2=-th(2); ae3=-th(3); ae4=-th(4); ae5=-th(5);
be1=th(6); be2=th(7); be3=th(8); be4=th(9); be5=th(10);
Ce=th(11);

ae11=0; ae12=1; ae13=0; ae14=0; ae15=0;
ae21=0; ae22=0; ae23=1; ae24=0; ae25=0;
ae31=0; ae32=0; ae33=0; ae34=1; ae35=0;
ae41=0; ae42=0; ae43=0; ae44=0; ae45=1;
ae51=-ae5; ae52=-ae4; ae53=-ae3; ae54=-ae2; ae55=-ae1;

GE=[ae11 ae12 ae13 ae14 ae15;ae21 ae22 ae23 ae24 ae25;ae31 ae32
ae33 ae34 ae35;ae41 ae42 ae43 ae44 ae45;ae51 ae52 ae53 ae54 ae55];

be11=0; be21=0; be31=0; be41=0; be51=1;

HE=[be11;be21;be31;be41;be51];

ce11=be5; ce12=be4; ce13=be3; ce14=be2; ce15=be1;

CE=[ce11 ce12 ce13 ce14 ce15];
DE=[0];
%Calculo de la ganancia F del Estimador de Kalman
F=dlqe(GE,HE,CE,Sigma,Xi);
xmas=xmenos+F*(y(t+5)-CE*xmenos);
z=z-CE*xmas;
%Calculo de la Ganancia Ka del Controlador
Ga=[GE zeros(nn,r);-CE eye(r,r)];
Ha=[HE;zeros(r,r)];
Ca=[CE zeros(r,r)];

```

```

Ka=dlqr(Ga,Ha,Qa,R);
%Calculo de la ley de control residual
u(t+5)=-Ka*[xmas;z];
%Actualizando estados
xmenos=GE*xmas+HE*u(t+5);
AE=1+ae1+ae2+ae3+ae4+ae5;
BE=be1+be2+be3+be4+be5;
Uin=inv(BE)*(AE*Yo(t+5)-Ce);
%calculo de la señal de control U(t)
U(t+5)=u(t+5)+Uin;
end %Fin del lazo de control

%Inicio de otro lazo para MM>=2000
Xi=1000; Sigma=0.00005;

%Parametros de optimizacion del controlador Ke
R=20; Qa=1*eye(r+nn,r+nn);

Ref1=150;%Nueva Referencia
MM=4000;
for t1=2001:MM

%Señal de Referencia
Yo(t1+5)=Ref1;%*sign(sin(0.02*t));
Y(t1+5)=[Y(t1+4) Y(t1+3) Y(t1+2) Y(t1+1) Y(t1)...
        U(t1+4) U(t1+3) U(t1+2) U(t1+1) U(t1)]*...
        [-a1 -a2 -a3 -a4 -a5 b1 b2 b3 b4 b5]';
y(t1+5)=Y(t1+5)-Yo(t1+5);
%Estimacion de parametros metodo MCRM
psi=[Y(t1+4) Y(t1+3) Y(t1+2) Y(t1+1) Y(t1)...
     U(t1+4) U(t1+3) U(t1+2) U(t1+1) U(t1) 1]';
rho=max(1,norm(psi));
psin=psi/rho;
Nn=chol(Pi'); %Nn'*Nn=Pi=>Nn*Nn'=Pi'
S=inv(diag(Nn*ones(NN,1),0));
Ps=S*Pi*S;
psins=inv(S)*psin;
rt=1+psins'*Ps*psins;
lamb=1-(rt-sqrt(rt^2-4*norm(Ps*psins)^2/trace(Ps)))/2;
e=Y(t1+5)/rho - thi'*psin;
j=psins'*Ps*psins+lamb;
th=thi+e*inv(S)*Ps*psins/j;
Hns=Ps*psins/j;
Ps=(Ps-Hns*psins'*Ps)/lamb;
tt=abs(max(eig(Ps))/min(eig(Ps)));
cmax=100; cmin=15;
%cmaz=1200; cmin=100;
if tt<=cmin
    Pi=Ps; thi=th;
elseif tt>=cmax
    Nnew=chol(Ps'); %Nnew*Nnew'=Ps'
    Snew=inv(diag(Nnew*ones(NN,1),0));
    Psnew=Snew*Ps*Snew;
    Pi=Psnew; thi=th;
end
%Recuperacion de la ecuacion canonica controlable
ae1=-th(1); ae2=-th(2); ae3=-th(3); ae4=-th(4); ae5=-th(5);

```



```

be1=th(6); be2=th(7); be3=th(8); be4=th(9); be5=th(10);
Ce=th(11);

ae11=0; ae12=1; ae13=0; ae14=0; ae15=0;
ae21=0; ae22=0; ae23=1; ae24=0; ae25=0;
ae31=0; ae32=0; ae33=0; ae34=1; ae35=0;
ae41=0; ae42=0; ae43=0; ae44=0; ae45=1;
ae51=-ae5; ae52=-ae4; ae53=-ae3; ae54=-ae2; ae55=-ae1;

GE=[ae11 ae12 ae13 ae14 ae15;ae21 ae22 ae23 ae24 ae25;ae31 ae32
ae33 ae34 ae35;ae41 ae42 ae43 ae44 ae45;ae51 ae52 ae53 ae54 ae55];

bell=0; be21=0; be31=0; be41=0; be51=1;

HE=[bell;be21;be31;be41;be51];

cell=be5; cel2=be4; cel3=be3; cel4=be2; cel5=be1;

CE=[cel1 cel2 cel3 cel4 cel5];
DE=[0];
%Calculo de la ganancia F del Estimador de Kalman
F=dlqe(GE,HE,CE,Sigma,Xi);
xmas=xmenos+F*(y(t1+5)-CE*xmenos);
z=z-CE*xmas;
%Calculo de la Ganancia Ka del Controlador
Ga=[GE zeros(nn,r);-CE eye(r,r)];
Ha=[HE;zeros(r,r)];
Ca=[CE zeros(r,r)];
Ka=dlqr(Ga,Ha,Qa,R);
%Calculo de la ley de control residual
u(t1+5)=-Ka*[xmas;z];
%Actualizando estados
xmenos=GE*xmas+HE*u(t1+5);
AE=1+ae1+ae2+ae3+ae4+ae5;
BE=be1+be2+be3+be4+be5;
Uin=inv(BE)*(AE*Yo(t1+5)-Ce);
%calculo de la señal de control U(t)
U(t1+5)=u(t1+5)+Uin;
end %Fin del lazo de control

%Graficos
MM=4000;
T = 0.005; %Periodo de muestreo
ejex=linspace(0,MM*T,MM);
subplot(2,1,1)
plot(ejex,Yo(6:MM+5),ejex,Y(6:MM+5)); grid
ylabel('Señal de salida Y ');
subplot(2,1,2)
plot(ejex,U(6:MM+5)); grid
ylabel('señal de control U');
xlabel('Tiempo en segundos')
print -f -deps adapfinal17

```

CONCLUSIONES

A continuación se indican las conclusiones que se pueden extraer del presente informe de suficiencia:

- 1.- Que el sistema presentado cumple las funciones y requerimientos para el que fue diseñado. Lo cual es mostrado en éste trabajo (simulación).
- 2.- Que la inclusión de los controladores ya sea óptimo ó adaptivo en conjunción con el pilotaje manual, completa las exigencias fundamentales, para el control de un reactor de éste tipo (investigación).
- 3.- Que el sistema puede ser aplicado a cualquier reactor, teniendo en cuenta la combinación de las barras a actuar (regulación y/o compensación) y la distribución de los mismos en el núcleo.
- 4.- Que la aplicación del sistema está condicionado 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 instrumentación 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 (100 Kws) hasta alcanzar el rango fijado en el canal lineal de regulación.

7.- Comparación de resultados de los controladores P.I., Optimo y Adaptivo.

	ts (seg)	P.O. (%)	Amplitud máx. de señal de control (V)
P.I.	25	0	2
Optimo	3.5	0.1219	máx.: $5.9 \cdot 10^{-6}$ mín. : $-6 \cdot 10^{-6}$
Adaptivo	1.4	0.3438	máx.: 3.508 mín. : -2.943

De la tabla podemos deducir que, mientras en el control proporcional integral modificado el control es mas seguro y lento, los otros controles modernos son más rápidos, pero presentan un P.O. ligeramente por arriba de cero.

ANEXO A

ECUACIONES CINÉTICAS DEL REACTOR

Las ecuaciones de la cinética resultan del balance neutrónico entre los términos de producción y destrucción

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

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

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

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

De estos:

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

Pero debido a la existencia de los neutrones retardados

$$k_{ef} \frac{n(t)}{l^*} : \text{son los que se producirían por fisión}$$

Siendo β la fracción efectiva de los neutrones retardados.

Además por decaimiento de los precursores, se producen

$$\sum \lambda_i C_i(t) : \text{neutrones retardados}$$

Siendo:

γ_i : constante de decaimiento del precursor del grupo $\langle\langle i \rangle\rangle$

C_i : concentración al instante t , del grupo precursor $\langle\langle i \rangle\rangle$ 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:

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

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:

$K_{ef} n(t)/l$: neutrones que se producirían por fisión, de ellos únicamente la fracción β_i (fracción efectiva de neutrones retardados correspondientes al grupo i -ésimo).

De ahí la ecuación de balance será:

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i k_{ef}}{l} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (3)$$

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_{ef} es muy cercano a 1, en particular próximo a la criticidad, estas ecuaciones se escriben:

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

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

Siendo:

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

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

ANEXO B

FUNCION DE TRANSFERENCIA DE UN REACTOR DE

POTENCIA DE 10 MEGAWATTS

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

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

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

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

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

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

Definimos para una variación temporal sinusoidal de la reactividad δk , que:

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

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

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

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

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

Despreciando el término δn respecto a 1 y teniendo en cuenta para el estado estacionario:

$$C_{io} = \frac{\beta_i n_o}{l^* \lambda_i}$$

Las ecuaciones precedentes se escribirán:

$$\frac{d(\delta n)}{dt} = \frac{n_o}{l^*} \delta k - \frac{\beta}{l^*} \delta n + \sum \lambda_i \delta C_i \quad (7)$$

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

Aplicando la transformada de Laplace:

$$\frac{\delta n(s)}{\delta k(s)} = \frac{n_o}{l^*} \frac{1}{s \left(1 + \frac{1}{l^*} \sum \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} \right)} \quad (9)$$

ANEXO C

REACTOR RP-10 INSTRUMENTACION Y CONTROL

GENERALIDADES

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

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

El control se efectúa 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 $1650 \text{ m}^3 / \text{h}$ 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 y para la producción de radioisótopos, contándose con cajas de irradiación en el núcleo, columna térmica disponibilidad de haces neutrónicos 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, formado por tres canales de seguridad

Sistema lineal de regulación, formado 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 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 secundario

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 ésta instrumentación en los siguientes rubros de operación:

Mediciones propiamente dichas

Regulaciones

Alarmas

Sistema de enclavamiento

Sistemas de seguridad

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arturo Rojas-Moreno Ph.D; “Control Avanzado, Diseño y Aplicaciones en Tiempo Real ” Edición Independiente,UNI, Perú 2001
- [2] Eronini Umez Eronini; “ Dinámica de Sistemas y Control” Thomson Learning, 2001
- [3] Katsuhiko Ogata; “ Sistemas de Control en tiempo discreto” Pearson Educación 2ª Edición 1996
- [4] Cesar Augusto Pizarro Castro; “Sistema de Pilotaje Automático de un Reactor Nuclear” Lima-Perú 1980
- [5] M.A. Shultz; “ Control of Nuclear Reactor and Power Plants” Mc Graw-Hill 1961
- [6] G. Keepin; “Physics of Nuclear Kinetics” Addison – Wesley, 1965
- [7] S. Glasstone – A. Sesonnke; “Ingeniería de Reactores Nucleares” Reverté, Barcelona 1975
- [8] Katsuhiko Ogata; “ Ingeniería de Control Moderna” Tercera Edición Pearson Prentice Hill 1996
- [9] OIEA; “Manejo sin riesgos de los conjuntos críticos y de los Reactores de Investigación” Organismo Internacional de Energía Atómica, 1972
- [10] Argonne National Laboratory ; “Reactor Physics Constants” United States Atomic Energy Commission, 1963 2nd Edition
- [11] A. Tanarro S. ; “Instrumentación Nuclear” Junta de Energía Nuclear, Madrid 1970