

ESTUDIO DE CONTROL DE REACTORES POR LOS METODOS COMPLEMENTARIOS
DE SIMULACION Y ANALISIS DE CURVAS DE RAICES

Tadeo Hajduk, Alberto Castello y Roberto Harán*

Centro Atómico Bariloche-Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro - Universidad Nacional de Cuyo

RESUMEN: Se estudia la influencia de distintos parámetros del reactor y de su sistema de control sobre la respuesta dinámica del mismo. Al usar en paralelo dos métodos, de simulación digital y de curvas de raíces, se evalúa la aplicabilidad del método analítico y se obtiene una visión más completa y profunda de los problemas de control de reactores.

Debido a la no linealidad de la cinética de neutrones y de la dinámica de transmisión de calor, se efectuó el estudio usando las técnicas de simulación digital; pero se consideró muy conveniente, a los fines de lograr una mejor comprensión del complejo sistema total y de las relaciones e interacciones entre sus partes componentes, como también para comparar los resultados y determinar los márgenes de estabilidad, complementar la simulación digital con un estudio analítico lineal. Se ha aplicado el método de curvas de raíces, por ofrecer el mismo los resultados en el dominio de tiempo directamente comparables con los resultados obtenidos en la computadora (a diferencia del método de análisis de frecuencia que se encuentra en la mayor parte de la literatura específica). Este método ofrece además una visión muy satisfactoria del sistema completo y hace posible un amplio estudio de la influencia de la variación de sus múltiples parámetros y de la respuesta dinámica a distintas clases de perturbaciones.

En esa primera etapa de estudio se analizó la respuesta de un reactor homogéneo, con parámetros promedio integrados, a cambios de reactividad escalonados, exponenciales y tipo rampa. El estudio tiende a determinar y esclarecer la influencia de la variación de distintos parámetros del reactor y de su sistema de control. Se analiza, usando ambos métodos mencionados, la influencia del coeficiente de temperatura y de su constante de tiempo sobre la respuesta del reactor sin control o con un sistema de control por barras, con distintos algoritmos para el error actuante y, además, la influencia de diversos parámetros del lazo de control como frecuencia natural del mismo, su factor de amortiguamiento, constante de tiempo de derivada y de integración y ganancia de lazo.

El estudio es particularmente interesante para los reactores poco estables o inherentemente inestables, permitiendo esclarecer la influencia crítica de algunos parámetros de diseño del sistema de control.

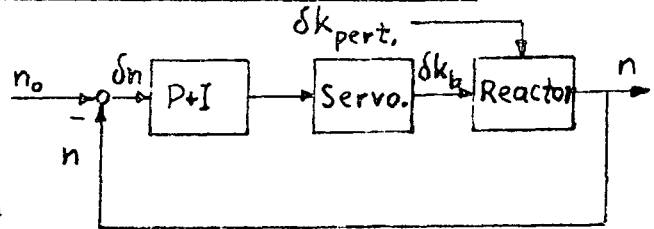
Cada la extensión del trabajo, se presentan en forma muy resumida únicamente tres ejemplos típicos.

* Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería.

1) Influencia de la ganancia de lazo de control del reactor.

El esquema representa a un sistema Reactor-Servomecanismo de control de barras de acción proporcional e integral (PI) sometido a señales de perturbación. Típicamente son señales tipo escalón de variación de reactividad:

$$\delta k_{\text{pert}} = + 0.003.$$



Reactor sin realimentación por temperatura — $K_{TC} = 0$.

Función de transferencia (F.T.) del mismo derivada de las ecuaciones cinéticas linealizadas (para un solo grupo medio de neutrones retardados)*:

$$G_R = \left(\frac{\Delta n}{\Delta k} \right)_s = \frac{1}{1 \cdot s} \cdot \frac{s + \lambda}{s \cdot [s + (\lambda + \beta/1 \cdot s)]} \approx 10^4 \cdot \frac{s + 0.08}{s(s + 65)}$$

$$1 \cdot = 10^{-4}$$

$$\lambda = 0.08$$

$$\beta = 0.0065$$

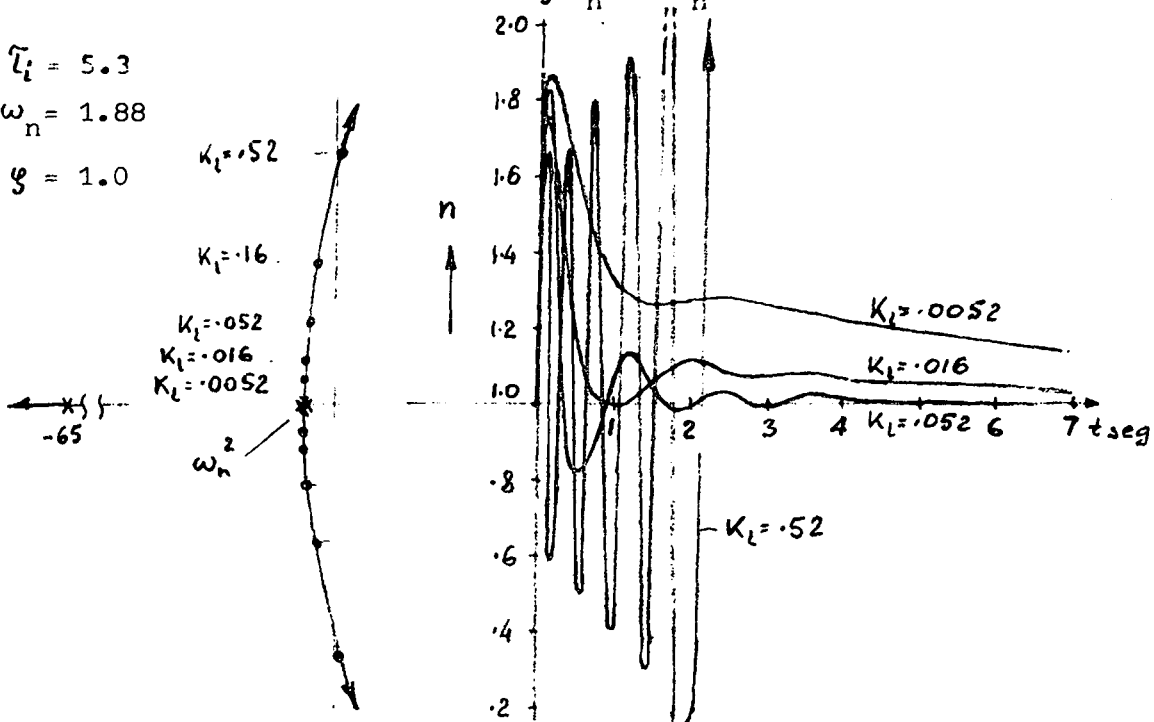
F.T. del servomecanismo de barras, de acción P.I.:

$$G_S = \left(\frac{\Delta k}{\Delta n} \right)_s = K_1 \frac{s + 1/T_i}{s} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\gamma\omega_n s + \omega_n^2} = K_1 \frac{s + 0.19}{s} \frac{3.54}{(s + 1.88)^2}$$

$$T_i = 5.3$$

$$\omega_n = 1.88$$

$$\gamma = 1.0$$

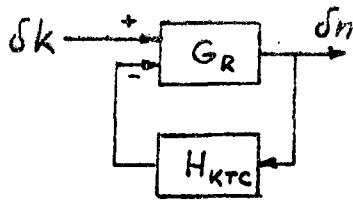


Ganancias de lazo mayores dan raíces dominantes y oscilaciones transitorias de mayor frecuencia. Para elevadas ganancias las raíces se acercan al eje $j\omega$ y dan transitorios de alta frecuencia y débil convergencia. $K_L = 0.52$ da raíces con parte real positiva e inestabilidad. Todos los resultados han quedado confirmados por los gráficos de la computadora (ver figuras precedentes).

*En toda la simulación digital se han usado ecuaciones cinéticas no linealizadas para seis grupos de neutrones retardados.

2) Control PI de un reactor inherentemente inestable.

Reactor con coeficiente de temperatura positivo $K_{TC} = + 0.009$



$$G_R = 10^4 \cdot \frac{s + 0.08}{s(s + 65)} \quad (\text{ver ejemplo 1})$$

$$K_{KTC} = - \frac{K_{TC}}{\tau} \frac{1}{s + 1/\tau} = - \frac{0.057}{s + 6.3}; \quad \tau = 0.159$$

$$\left(\frac{\Delta n}{\Delta k} \right)_s = 10^4 \cdot \frac{(s + 0.08)(s + 6.3)}{(s - 2.43)(s + 0.25)(s + 72.9)}$$

Servomecanismo de barras:

$$G_S \left(\frac{\Delta k}{\Delta n} \right)_s = K_1 \cdot \frac{s + 1/\tau_i}{s} \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta \omega_n)^2}; \quad \tau_i = \frac{10}{\omega_n}; \quad \zeta = 1.0$$

K_{TC} positivo causa la aparición de una raíz real positiva del reactor en + 2.43; el sistema es inherentemente inestable. La curva de raíces que parte del segmento positivo indica que el sistema Reactor-Servomecanismo es condicionalmente estable, para un range determinado de ganancias de lazo.

La frecuencia natural f_n del servomecanismo tiene notable importancia; un servomecanismo lento no puede estabilizar a un reactor inestable. Los gráficos de las curvas de raíces correspondientes a $f_n = 0.5$ y 1.0 muestran que las mismas quedan repelidas por el polo doble de un servomecanismo de baja frecuencia natural, hacia el semiplano derecho; dando un sistema marginalmente estable; por lo contrario la $f_n = 2.0$ y 5.0 aleja el polo doble y permite una atracción de las curvas hacia los dos ceros del sistema. Así un servomecanismo rápido dará mayores rangos de estabilidad y raíces finales alejadas del eje $j\omega$, con rápida convergencia de los transitorios.

Ejemplo:

Frec.Nat. Rango Ganancias

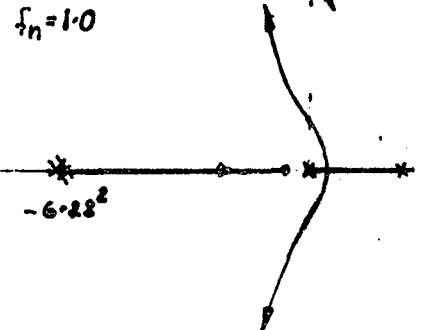
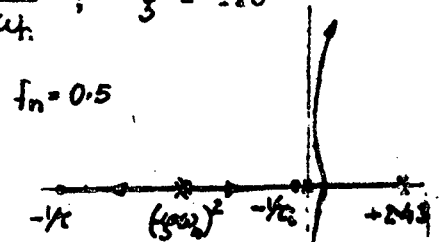
$$f_n = 1.0 \quad .0031 < K_1 < .0500$$

$$f_n = 5.0 \quad .0016 < K_1 < .0550$$

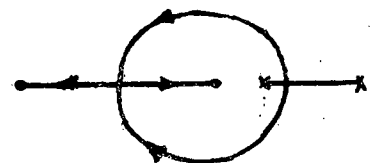
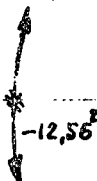
Frec.Nat. Parte Real Raíces

$$f_n = 1.0 \quad \text{Décimas}$$

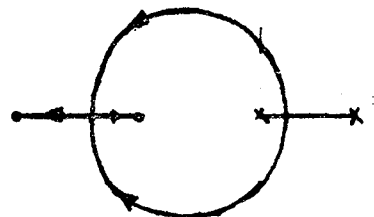
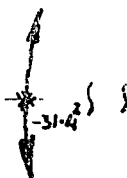
$$f_n = 5.0 \quad \text{Enteros}$$



$f_n = 2.0$



$f_n = 5.0$



* Para $f_n = 1.0$

3) Control PID de un reactor inherentemente inestable.

Reactor: Ver ejemplo anterior.

Servomecanismo de barras:

$$(\Delta k)_s (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) - (\Delta n)_s K_1 \omega_n^2 (1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$$

Control PI

$f_n = 5$

$$\left(\frac{\Delta k}{\Delta n}\right)_s = K_1 \omega_n^2 T_d \frac{(s - s_1)(s - s_2)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2T_d} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_d^2} - \frac{1}{T_i T_d}} = -1.57 \pm j 2.75$$

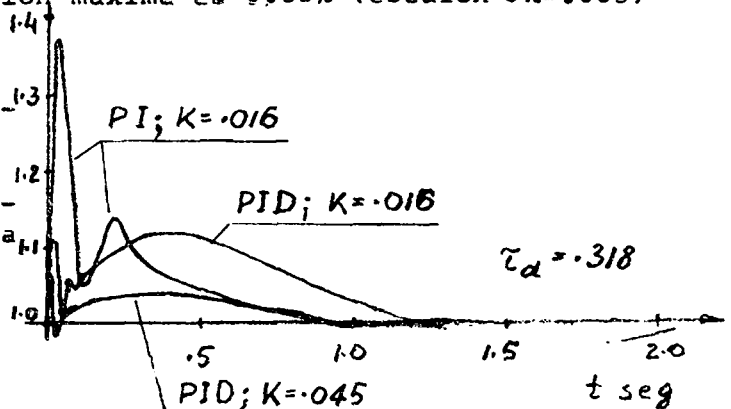
$$\omega_n = 31.4 ; \quad f_n = 5.0 ; \quad T_i = T_d = 0.318$$

El cero adicional debido a la acción derivativa hace variar de tal forma al gráfico de raíces "enderezando" las asíntotas, que las raíces dominantes, cuya influencia se hace notar en primeros décimos de segundo, se alejan considerablemente del eje $j\omega$, dando picos transitorios pequeños y cortos (comparar el gráfico de control PI y PID). Para evitar un aumento de los transitorios más lentos debidos a las raíces cercanas al origen, conviene usar ganancias altas que aseguran, apartando esas raíces del origen y reduciendo sus residuos, que su aporte será moderado y de breve duración. Al usar control PID no aparece teóricamente el riesgo de inestabilidad con ganancias y constantes T_d de magnitud aún muy elevadas y la respuesta es muy buena:

Con $T_d = 2.0$ y $K = (K_1/1) \omega_n^2 T_d = 0.5$: excursión máx. es 1% ($\delta k = .003$)

Con $T_d = 5.0$ y $K = 0.5$: excursión máxima es 0.35% (escalón $\delta k = .003$)

Razones prácticas (presencia de ruidos) hacen, no obstante, necesario limitar la magnitud de T_d y K . En la simulación digital es importante reducir el paso de cálculo al estar presente la derivada con una constante T_d elevada.



Control PID

$f_n = 5$

Resumen de Resultados

La correlación de ambos métodos usados ha permitido evaluar el método analítico de curvas de raíces en su aplicación al estudio de control de reactores. En todos los casos de un sistema aceptablemente estable, donde las excursiones de la potencia del reactor no son elevadas, el método analítico da resultados muy similares a los obtenidos en la simulación de las ecuaciones no lineales completas; ofrece, además, una visión total del sistema más amplia y profunda y hace posible un buen entendimiento de la influencia cualitativa y cuantitativa de los cambios de distintos parámetros del sistema, sobre el comportamiento del reactor.

Cuando las ganancias usadas (u otros parámetros) dan una respuesta próxima a la inestable y caracterizada por grandes picos de potencia, desaparece la similitud comentada de los resultados; alcanzándose la misma, en esos casos, al linealizar las ecuaciones de la computadora (o sea únicamente al distorsionar el modelo del reactor). No obstante, considerando que en las soluciones prácticas se opera siempre con adecuados márgenes de estabilidad, correspondería considerar confirmada la eficacia del método de curvas de raíces para los fines del estudio y del diseño de sistemas de control de reactores.

Símbolos Usados:

- ρ - densidad neutrónica
- ρ_0 - densidad neutrónica de referencia (deseada)
- k - reactividad
- l^* - tiempo medio de generación de neutrones instantáneos
- λ - constante media de desintegración
- β - fracción de neutrones retardados
- K_{TC} - coeficiente de temperatura del reactor
- T - constante de tiempo de realimentación por temperatura
- K_1 - ganancia de lazo de control
- K - ganancia total del sistema reactor-servomecanismo de barras
- f_n u $\omega_n = 2\pi f_n$ - frecuencia natural del servomecanismo de barras
- φ - factor de amortiguamiento del servomecanismo de barras
- T_i - constante de tiempo de acción integral
- T_d - constante de tiempo de acción derivativa

Bibliografía:

1. "Control of Nuclear Reactors and Power Plants"
M.A.Schultz; Mc Graw Hill, 1961.
2. "Nuclear Reactor Engineering"
S.Glasstone and A.Seskone, Van Nostrand, 1967.
3. "A Dynamic Simulation of a Nuclear Power Station for Control Analysis"
K.K.Mehta, Nuclear Engineering and Design 33, 1975.
4. "Feedback Control System Analysis and Synthesis"
I.I.D'Azzo and C.H.Houpis, 2nd.Ed., Addison - Wesley.
5. "Sistemas de Control Automático"
T.A.Hajduk, UNLP, 1972.