	<p>Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Eléctrica</p>	<p>EIE Escuela de Ingeniería Eléctrica</p>
<p>IE0431: Sistemas de Control</p>		<p>II-2017</p>

Nombre: _____ Carné: _____ Grupo: _____

EXAMEN FINAL

Prof. Leonardo Marín Paniagua
Prof. Helber Meneses Navarro

Tiempo máximo: 2 horas 50 min

Instrucciones generales:

1. Entregue el enunciado solucionado al finalizar el examen.
 2. Cada problema debe resolverse por separado en hojas aparte.
 3. Cada hoja de examen debe estar identificada en la parte superior derecha, con el nombre completo, número de carné y número de grupo en el que está matriculado.
 4. Los problemas deben resolverse en forma ordenada, indicando y justificando debidamente, todos los pasos intermedios para la solución.
 5. Todos los cálculos deberán realizarse considerando dos decimales.
 6. No se permite el uso de calculadora programable.
 7. Se supondrá que la calculadora debe resolver polinomios de a lo más, tercer orden.
 8. El examen debe realizarse con bolígrafo azul o negro. Si se hace a lápiz, no se aceptarán reclamos sobre el mismo.
1. Considere un sistema de control de razón en donde se desea realizar la mezcla de dos fluidos que deben conservar la misma proporción en el producto final. Se tiene conocimiento de que el valor deseado del lazo primario permanece constante y que las perturbaciones de carga son frecuentes en ambos lazos (primario y secundario), pero mayoritariamente en el secundario. Adicionalmente, se sabe que el punto de operación del lazo primario casi no varía y que su modelo tiene una alta certidumbre, mientras que el punto de operación del lazo secundario cambia con frecuencia y su modelo tiene una alta incertidumbre.

Cada proceso está descrito mediante las siguientes funciones de transferencia: $P_{11}(s) = \frac{2e^{-2.5s}}{(10s+1)(5s+1)}$

(lazo primario) y $P_{12}(s) = \frac{3e^{-2s}}{4s+1}$ (lazo secundario). Las constantes de tiempo están dadas en minutos.

- 1.1 (2 puntos) Determine los parámetros del controlador de la familia PID que permita controlar cada proceso correctamente. Describa el razonamiento y las justificaciones necesarias para seleccionar el controlador y el método de sintonización.
- 1.2 (0.5 puntos) Dibuje un diagrama de bloques completo del sistema de control diseñado, indicando el contenido de cada bloque.

Indique su solución en los siguientes recuadros:



Universidad de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Eléctrica

EIE

Escuela de
Ingeniería Eléctrica

IE0431: Sistemas de Control

II-2017

Controlador Lazo Primario
Cálculos y Análisis:

Controlador Lazo Secundario
Cálculos y Análisis:

Parámetros
del controlador:

Parámetros
del controlador:

Diagrama:



Nombre: _____ Carné: _____ Grupo: _____

2. (2.5 puntos) Considere un sistema de control cuya función de transferencia de lazo abierto es

$$L_3(s) = \frac{K(s-1)^3}{s^3}$$

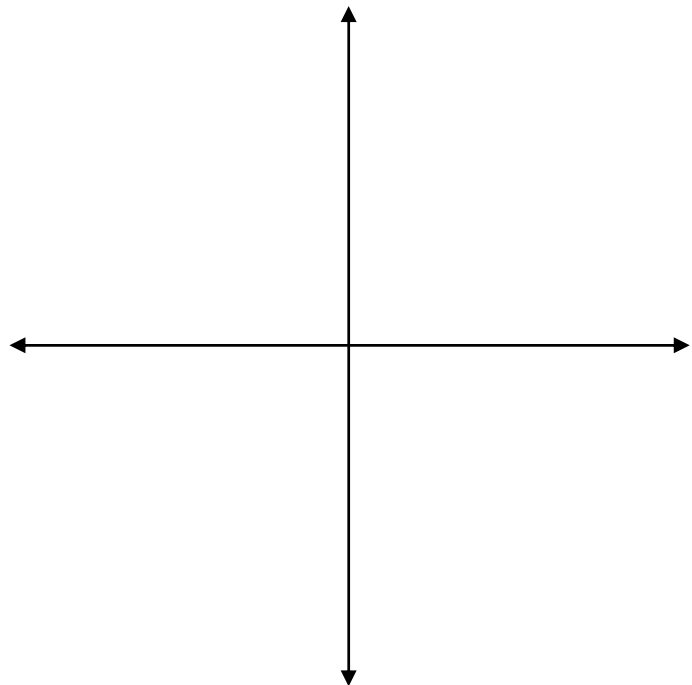
Determine si el sistema de control es estable o no para todo valor de K , empleando el criterio de estabilidad de Nyquist, y en caso de no serlo, determinar el número de raíces inestables. Si correspondiera, dibuje por separado el diagrama de Nyquist para valores bajos y altos de K , e indique con claridad los respectivos encierros, si estos existieran. Indique su solución en los siguientes recuadros:

FT en Frecuencia:

Ecuación de Magnitud:

Ecuación de Fase:

Tabla y Bosquejo General:





Universidad de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Eléctrica

EIE

Escuela de
Ingeniería Eléctrica

IE0431: Sistemas de Control

II-2017

Diagrama ganancias BAJAS (si fuera necesario)

Criterio Nyquist:

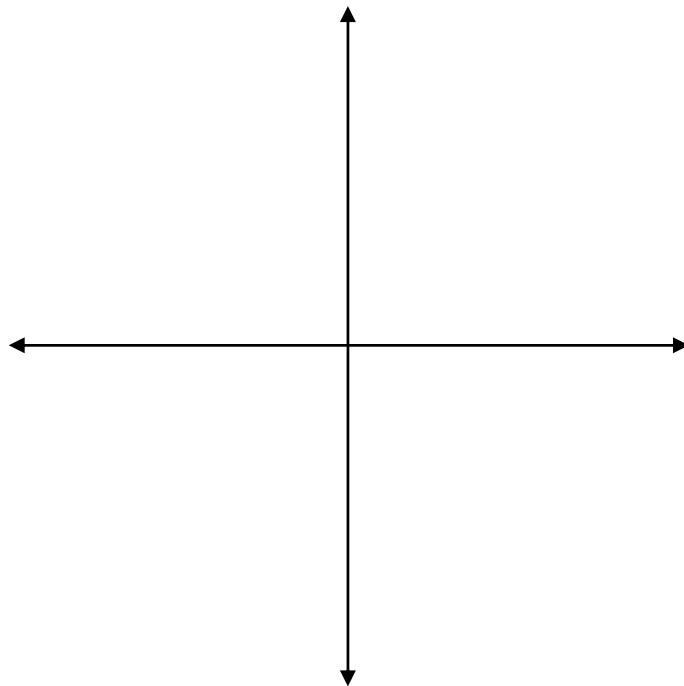
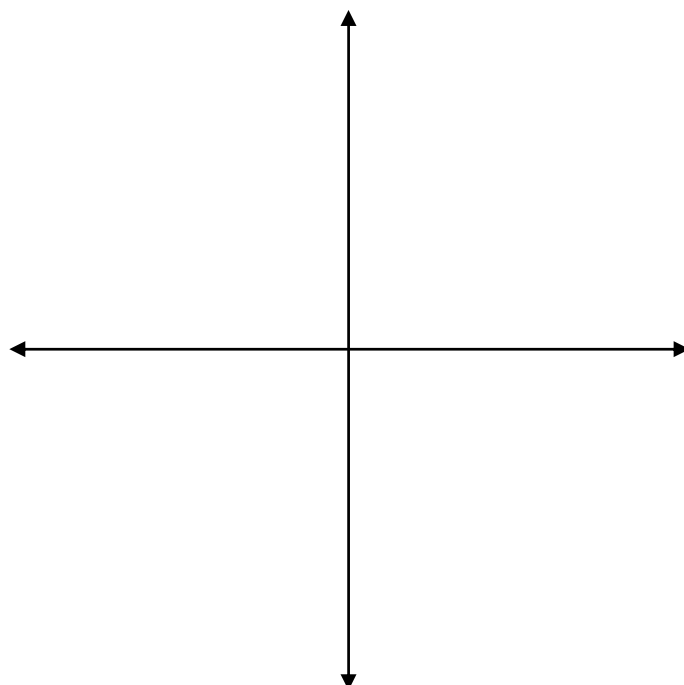



Diagrama ganancias ALTAS (si fuera necesario)

Criterio Nyquist:



	<p>Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Eléctrica</p>	<p>EIE Escuela de Ingeniería Eléctrica</p>
<p>IE0431: Sistemas de Control II-2017</p>		

Nombre: _____ Carné: _____ Grupo: _____

3. (2.5 puntos) Para un sistema de control realimentado simple, se tiene el siguiente proceso:

$$P_3(s) = \frac{2}{(s^2 + 4s + 8)} \text{ (la unidad de tiempo es el segundo). Para este sistema se desea diseñar un controlador}$$

que obtenga una respuesta del sistema de control a un cambio tipo escalón en el valor deseado con un tiempo de asentamiento al 2% $t_{a2} \leq 1$ segundos, un error permanente $e_{pr0} = 0\%$ y con un $M_{p\%} = 9.5\%$ ($\zeta = 0.6$).

Determine de forma consecutiva los parámetros de los siguientes controladores de la familia PID: P, PD y PID, de forma que la respuesta del sistema de control a un cambio tipo escalón en el valor deseado cumpla la mayor cantidad de especificaciones posibles.

Indique los valores de las especificaciones obtenidas (t_{a2} , e_{pr0} y $M_{p\%}$) para todos los casos.

Los diseños no se considerarán como válidos en caso de no presentar los bosquejos de los LGR correspondientes.

Indique su solución en los siguientes recuadros:

Controlador tipo P:	LGR:	
Cálculos y Análisis:		
	Parámetros:	Especificaciones:



Universidad de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Eléctrica

EIE

Escuela de
Ingeniería Eléctrica

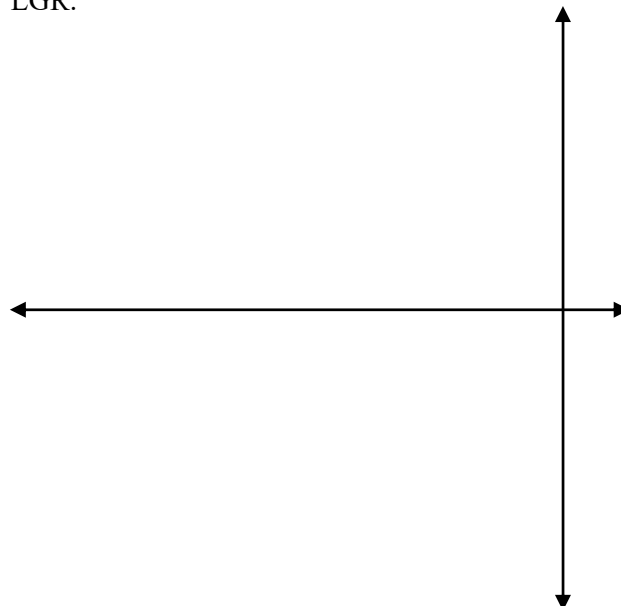
IE0431: Sistemas de Control

II-2017

Controlador tipo PD:

Cálculos y Análisis:

LGR:



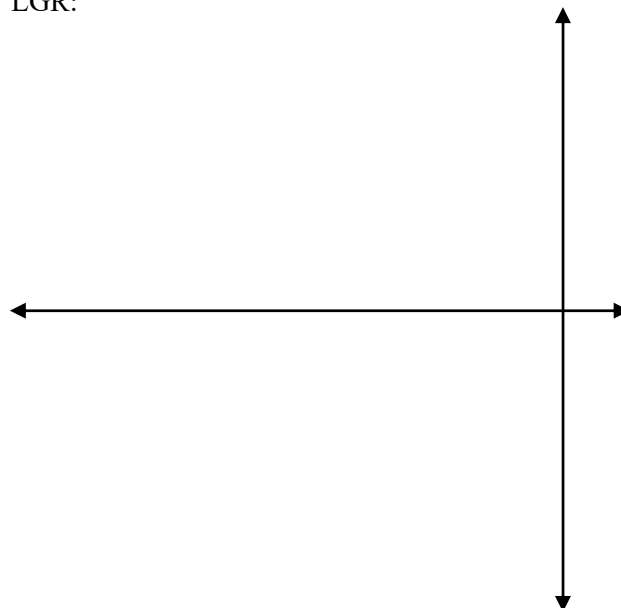
Parámetros:

Especificaciones:

Controlador tipo PID:

Cálculos y Análisis:

LGR:



Parámetros:

Especificaciones:



Universidad de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Eléctrica

EIE
Escuela de
Ingeniería Eléctrica

IE0431: Sistemas de Control

II-2017

Nombre: _____ Carné: _____ Grupo: _____

4. Para un sistema de control realimentado simple:

4.1 (1.5 puntos) Desarrolle la síntesis analítica para determinar, en forma general, los parámetros de un controlador PI o PID de dos grados de libertad, considerando que el modelo del proceso controlado es inestable de primer orden. Se desea que la respuesta del sistema de control de lazo cerrado, a entradas tipo escalón, sea sin oscilaciones y con el menor número posible de parámetros de diseño.

4.2 (1.0 puntos) Utilizando el procedimiento desarrollado en el punto anterior y teniendo que el proceso está dado por la siguiente función de transferencia $P_3(s) = \frac{1}{2s-1}$ (la unidad de tiempo es el minuto), determine los parámetros de un controlador PI o PID de dos grados de libertad, de tal forma que la respuesta del sistema de control sea: $y(s) = \frac{1}{2s+1}r(s) + \frac{2s}{(2s+1)^2}d(s)$.

Indique el RESUMEN de su solución en el siguiente recuadro:

Ecuaciones de los parámetros:

Parámetros del Controlador:



• **Parámetros de la respuesta a un escalón en el valor deseado**

* Sistema de 2° orden $G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} : M_p = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}, t_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}},$
 $t_l \approx \frac{0,6 + 2,16\zeta}{\omega_n}, t_{a5} \approx \frac{3}{\zeta\omega_n}, t_{a2} \approx \frac{4}{\zeta\omega_n}$

* Sistema de primer orden $G(s) = \frac{1}{Ts + 1} : t_{a5} = 3T, t_{a2} = 4T$

* Sistema de polo doble $G(s) = \frac{1}{(T's + 1)^2} : t_{63,2} = 2,15T', t_{a5} = 4,74T', t_{a2} = 5,83T'$

REGLAS DE SINTONIZACIÓN

- a. El método de Méndez y Rímolo, que utiliza un controlador PI y optimiza el desempeño del lazo de control a la entrada que considere más importante. Los parámetros del controlador se calculan como:

$$\kappa_p = K_p K = a_0 + a_1 \tau_o^{a_2}, \quad \tau_i = \frac{T_i}{T} = b_0 + b_1 \tau_o^{b_2}$$

en donde las constantes de las ecuaciones están dadas por el cuadro 1.

Cuadro 1: Parámetros para el método de Méndez y Rímolo

Constantes para servo control (Méndez y Rímolo)										
a=	IAE					ITAE				
	0,0	0,25	0,5	0,75	1,0	0	0,25	0,5	0,75	1
a_0	0,265	-0,035	0,013	-0,040	0,035	0,209	-0,148	-0,198	-0,299	-0,338
a_1	0,509	0,761	0,730	0,835	0,825	0,441	0,748	0,788	0,914	0,997
a_2	-1,042	-0,619	-0,616	-0,587	-0,618	-1,054	-0,475	-0,416	-0,372	-0,360
b_0	0,433	0,395	0,382	0,353	0,406	0,326	0,316	0,307	0,299	0,291
b_1	0,922	1,117	1,381	1,671	1,903	0,882	1,005	1,169	1,371	1,605
b_2	-0,017	-0,080	-0,114	-0,121	-0,134	-0,035	-0,033	-0,067	-0,076	-0,072

Constantes para control regulatorio (Méndez y Rímolo)										
a=	IAE					ITAE				
	0	0,25	0,5	0,75	1	0	0,25	0,5	0,75	1
a_0	0,124	0,250	0,225	0,190	0,184	0,114	0,179	0,212	0,191	0,225
a_1	0,886	0,658	0,731	0,868	0,994	0,758	0,598	0,592	0,648	0,718
a_2	-1,005	-0,991	-1,010	-0,999	-0,999	-1,012	-0,910	-0,952	-0,970	-0,978
b_0	-2,422	0,272	0,280	0,223	0,194	-1,997	0,276	0,248	0,202	0,239
b_1	3,855	1,341	1,627	2,013	2,358	3,273	1,161	1,437	1,691	1,938
b_2	0,780	0,087	-0,013	-0,022	-0,020	0,763	0,097	0,018	-0,007	-0,011

- b. El método uSORT₁ o uSORT₂, que utiliza un controlador PI o PI₂ para optimizar el desempeño del sistema de control a la entrada que considere más importante, considerando adicionalmente la robustez.

En este caso, los parámetros del controlador se calculan como:

Control regulatorio

$$\kappa_p \doteq K_p K = a_0 + a_1 \tau_o^{a_2}$$

$$\tau_i \doteq \frac{T_i}{T} = b_0 + b_1 \tau_o^{b_2}$$

$$\tau_d \doteq \frac{T_d}{T} = c_0 + c_1 \tau_o^{c_2}$$

Servo control

$$\kappa_p \doteq K_p K = a_0 + a_1 \tau_o^{a_2}$$

$$\tau_i \doteq \frac{T_i}{T} = \frac{b_0 + b_1 \tau_o + b_2 \tau_o^2}{b_3 + \tau_o}$$

$$\tau_d \doteq \frac{T_d}{T} = c_0 + c_1 \tau_o^{c_2}$$

Factor de peso del valor deseado

$$\beta = d_0 + d_1 \tau_o^{d_2}$$



en donde las constantes de las ecuaciones están dadas por el cuadro 2.

Cuadro 2: Parámetros para los métodos uSORT₁ y uSORT₂

<i>Controlador PI – Control regulatorio</i>					
Razón de constantes de tiempo del modelo a					
	0,0	0,25	0,50	0,75	1,0
Robustez de diseño $M_S^t = 2,0$					
a_0	0,265	0,077	0,023	-0,128	-0,244
a_1	0,603	0,739	0,821	1,035	1,226
a_2	-0,971	-0,663	-0,625	-0,555	-0,517
Robustez de diseño $M_S^t = 1,6$					
a_0	0,175	-0,009	-0,080	-0,247	-0,394
a_1	0,466	0,612	0,702	0,913	1,112
a_2	-0,911	-0,578	-0,522	-0,442	-0,397
b_0	-1,382	0,866	1,674	2,130	2,476
b_1	2,837	0,790	0,268	0,112	0,073
b_2	0,211	0,520	1,062	1,654	1,955

<i>Controlador PI – Servo control</i>					
Razón de constantes de tiempo del modelo a					
	0,0	0,25	0,50	0,75	1,0
Robustez de diseño $M_S^t = 1,8$					
a_0	0,243	0,094	0,013	-0,075	-0,164
a_1	0,509	0,606	0,703	0,837	0,986
a_2	-1,063	-0,706	-0,621	-0,569	-0,531
Robustez de diseño $M_S^t = 1,6$					
a_0	0,209	0,057	-0,010	-0,130	-0,220
a_1	0,417	0,528	0,607	0,765	0,903
a_2	-1,064	-0,667	-0,584	-0,506	-0,468
b_0	14,650	0,107	0,309	0,594	0,625
b_1	8,450	1,164	1,362	1,532	1,778
b_2	0,0	0,377	0,359	0,371	0,355
b_3	15,740	0,066	0,146	0,237	0,209

Factor de peso del valor deseado			
Robustez de diseño M_S^t			
	2,0	1,6	1,4
Controlador PI			
d_0	0,658	0,649	0,811
d_1	0,578	0,900	1,205
d_2	0,372	0,446	0,608



Reglas de Evans para el dibujo del lugar geométrico de las raíces (LGR)

1. Simetría del LGR
2. Inicio y final del LGR
3. Número de ramas del LGR
4. LGR sobre el eje real
5. Angulos de las asíntotas

$$\alpha_k = \frac{(2k+1)180^\circ}{n-m}, \quad k=0,1,2,\dots,(n-m-1)$$

6. Intersección de las asíntotas con el eje real

$$\sigma_a = \frac{\sum_{j=1}^n \Re(p_j) - \sum_{i=1}^m \Re(z_i)}{n-m}, \quad (n-m) \geq 2$$

7. Centroid de las raíces

$$\sigma_r = \frac{\sum_{j=1}^n \Re(p_j)}{n}, \quad (n-m) \geq 2$$

8. Puntos de salida o entrada al eje real

$$\frac{dK(\sigma)}{d\sigma} = 0$$

9. Ángulos de salida o entrada al eje real

$$\alpha_{c,k} = \frac{(2k+1)180^\circ}{p}, \quad p=2,3,\dots \quad k=0,1,\dots,(p-1)$$

10. Angulo de partida (de llegada) de un polo (a un cero) complejo

$$\angle(s+p_x) = \left(\sum_{i=1}^m \angle(s+z_i) - \sum_{j=1, j \neq x}^n \angle(s+p_j) \right) - 180^\circ$$

$$\angle(s+z_x) = 180^\circ - \left(\sum_{i=1, i \neq x}^m \angle(s+z_i) - \sum_{j=1}^n \angle(s+p_j) \right)$$

11. Punto de cruce del eje imaginario
12. Cálculo de la ganancia en un punto del LGR

$$|K|_{s=s_1} = \frac{1}{|C'(s_1)P'(s_1)|} = \frac{\prod_{j=1}^n |s_1+p_j|}{\prod_{i=1}^m |s_1+z_i|}$$