

The logo for Cartagena99 features the text 'Cartagena99' in a stylized, green, cursive font. The text is positioned above a graphic element consisting of a blue and orange arrow-like shape pointing downwards.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Universitaria de
Ingeniería Técnica Industrial

CONTROLADORES PID

DR. BASIL M. AL HADITHI

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
-- --
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



ESCUELA UNIVERSITARIA DE
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Controladores PID

- El algoritmo de control más ampliamente usado en control de procesos es el PID.
- Desciende de los clásicos sistemas realimentados (de tipo proporcional) de la máquina de vapor de Watt (1788).
- El controlador PID destaca ya en los años 30 con la integración de las acciones P-I-D.
- La acción I conocida entonces con el término *automatic reset*.
- La acción D se implementa por primera vez en 1935 bajo el término *pre-act* (preactuación).
- Primero controladores industriales (tipo P) eran neumáticos.
- Con la aparición de los amplificadores operacionales, aparecen los primeros controladores analógicos (*hardware*), (años 50).

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Controladores PID

impulsa un estudio a fondo del PID con la inclusión de la tecnología permite la implementación de toda la

ador revoluciona los sistemas de control (años 60).
computador maneja consignas.
controlador sigue siendo analógico.

en los primeros controladores digitales, conocidos como (DDC).
procesador en los 70 permite la implementación genérica

3

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Controladores PID

- El uso extendido del computador en los 80 permite el desarrollo de sofisticado algoritmos de control, partiendo de la base del PID.
- Nuevas características de los controladores: autonomía, flexibilidad, rapidez, amplio margen de sintonía, adaptación y autosintonía.
- Pioneros: *Foxboro Taylor Instrument*
Fixer Bristol
Honeywell Leeds & Northrup

4

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
--
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Control on-off

mentado más sencillo.
parámetros.
estados de la variable de control:

erca de la consigna.
le de proceso puede oscilar; las conmutaciones de u
ctuadores.
zonas muertas, histéresis ($0.5 \pm 2\%$ del rango máximo)

5

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Acciones correctoras

- El algoritmo de control PID viene caracterizado por tres acciones correctoras:
 - Acción proporcional P
 - Acción integral I
 - Acción derivativa D
- Responde a la ecuación estándar del PID:

$$u(t) = K \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

6

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
--
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Acción proporcional

- Relación entre K y BP: $K=100/BP$

The graph shows the control signal u on the vertical axis and the error e on the horizontal axis. A horizontal line at $u=0$ is shown for errors outside a central region. This central region is labeled "Banda proporcional" with a double-headed arrow. Within this band, the control signal u increases linearly from a minimum value u_{\min} to a maximum value u_{\max} . The slope of this linear portion is labeled "Pendiente K".

7

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Acción proporcional

Acción proporcional al error:

parámetro

de la variable de control u , se suele hablar en términos de banda proporcional (BP, en %).

7

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Acción proporcional

...tiene efectos sobre el régimen transitorio y permanente,
...error en
...variable

...el sistema insensible a variaciones de carga, por el
...insensible al ruido.

9

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Acción integral

- Genera una señal que es proporcional a la integral del error.
- Suele ir combinada con la acción proporcional, de la forma:

$$u(t) = K \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt)$$

- Se ajusta mediante el parámetro T_i , tiempo integral.
- La acción integral actuará mientras exista error:
 - si $e > 0$, variable de control u crece.
 - si $e < 0$, variable de control u decrece.
- Tiene efecto sobre el régimen permanente. Su objetivo: anular el error.

10

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Acción integral

combinada PI aporta a la dinámica del sistema un polo en

$$G(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{K}{T_i} \left(\frac{T_i s + 1}{s} \right)$$

depende del tipo del sistema.

Mover el cero al origen (anulando el efecto del polo en efecto integral, tardará en anular el error (en el límite, se anula).

Mover el cero del origen (mucho efecto del polo en el origen) efecto integral, rapidez en anular el error. *OJO*, puede oscilar.

11

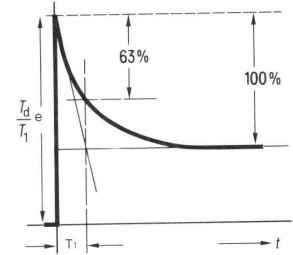
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Acción derivativa

- Genera una señal proporcional a la derivada del error
- Suele ir combinada con la acción proporcional, de la forma:

$$u(t) = K \cdot \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

- Se ajusta mediante el parámetro T_d tiempo derivativo.
- Tiene efecto sobre el régimen transitorio, mejorando la estabilidad.
- En el dominio s la acción combinada PD aporta a la dinámica del sistema un cero en $-1/T_d$

$$G(s) = K(1 + T_d s)$$


12

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Acción derivativa

carácter
 cula el error
 ndencia

Carácter derivativo, acerca el cero al origen.
 aleja el cero del origen.
de la posición relativa del cero en el plano s.
 dor tipo P.
 cción D:
 de la señal.
 res ante cambios bruscos de consigna (SP).

13

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Combinación de las 3 acciones

- El máximo beneficio se obtiene combinando las tres acciones de control = algoritmo PID.
- En el plano s aporta 2 ceros y un polo en 0:

$$G(s) = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) = \frac{K + (KT_i)s + (KT_iT_d)s^2}{sT_i}$$

14

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Tipos de estructuras

antes.
la.

$$G'(s) = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) = \frac{K + (KT_i)s + (KT_iT_d)s^2}{sT_i}$$

15

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Tipos de estructuras

- PID clásico:
 - acciones interactivas.
 - configuración serie.
 - Primeros controladores neumáticos; también analógicos con mínimo número de amplificadores operacionales.
 - Implementando un P, PI o PD, esta estructura es igual a la del PID estándar.

$$G'(s) = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) (1 + sT_d) = \frac{K' + K'(T_i + T_d')s + (K'T_iT_d')s^2}{sT_i}$$

16

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Tipos de estructuras

parámetros de ambas estructuras:

$$K = K' \frac{T_i' + T_d'}{T_i}$$
$$T_i = T_i' + T_d'$$
$$T_d = \frac{T_i' T_d'}{T_i' + T_d'}$$

17

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Tipos de estructuras

- Otra forma habitual de la estructura paralela:
(expresando los parámetros en forma de ganancias)

ganancia proporcional	$k = K$
ganancia integral	$k_i = K/T_i$
ganancia derivativa	$k_d = K T_d$

18

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
--
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Tipos de estructuras

SP:

de proceso de la consigna para formar distintas señales de

$$(e_p(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de_d}{dt})$$

sp - y

sp - y

y

19

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Tipos de estructuras

- El parámetro b limita la sobreoscilación debida a cambios de la consigna (SP). Bajos valores de b reducen sobreoscilación.
- El parámetro c evita que se produzcan elevados transitorios.
- Con $b = c = 1$ se tiene el PID estándar.
- Lo habitual $c = 0$ y $0 < b < 1$
($c = 0$ la acción derivativa recibe en su entrada SOLO la variable de proceso)

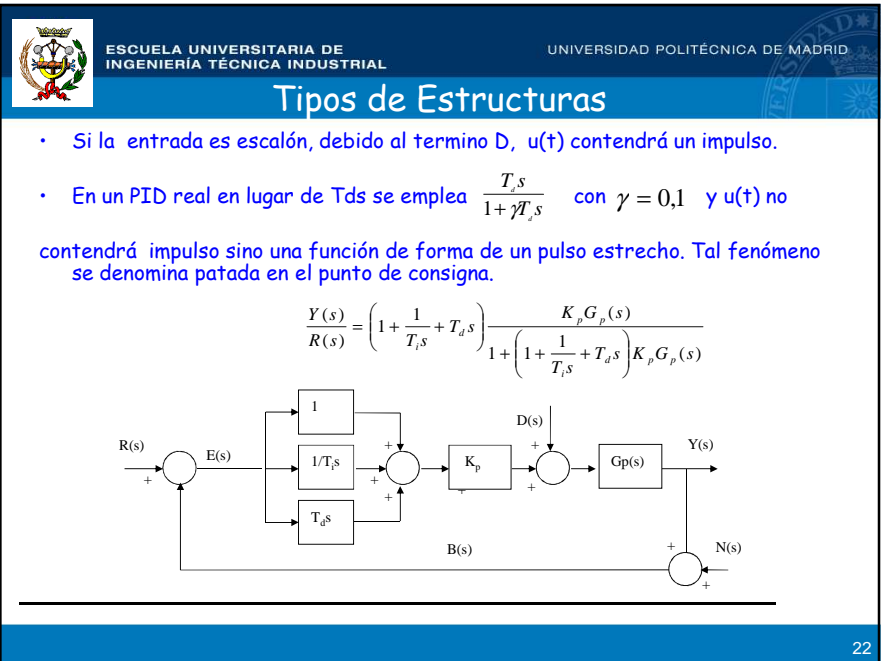
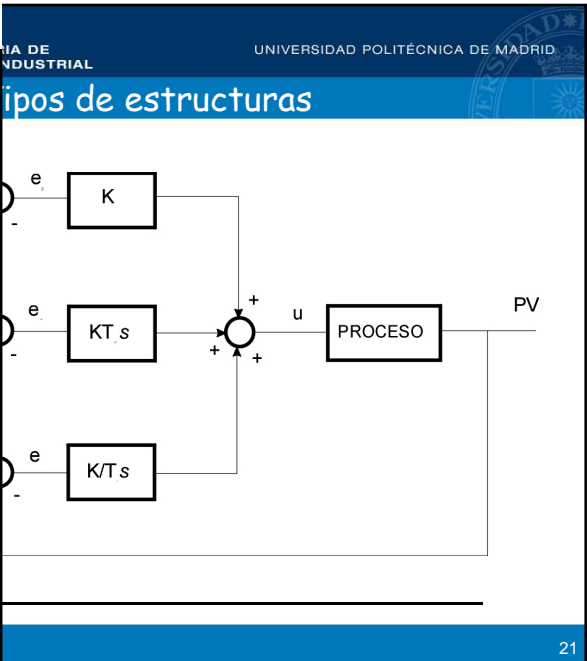
20

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Control PI-D

Para evitar el fenómeno de la patada en el punto de consigna, se puede operar la acción D sólo la realimentación, a fin de que la diferenciación ocurra de realimentación y no en la referencia.

$$\frac{K_p G_p(s)}{1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s} K_p G_p(s)$$

23

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Control I-PD

- Para evitar el fenómeno de la patada en el punto de consigna, se puede operar la acción D sólo la realimentación, a fin de que la diferenciación ocurra únicamente en la señal de realimentación y no en la referencia.
- Se mueve la acción P y D a la realimentación, a fin que estas acciones sólo afectan a la señal de realimentación.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{T_i s} \frac{K_p G_p(s)}{1 + \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) K_p G_p(s)}$$

24

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Operaciones de la acción D

$$r = a \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$y_D = aKT_d\omega \cdot \cos(\omega t)$$

Dependiente de la frecuencia; si esta es elevada, la ganancia disminuye considerablemente.

Primer orden en la acción D (filtro),

$$Y = \frac{KT_d s}{1 + (T_d / N)s} \cdot Y$$

D ≈ -KT_ds (efecto D normal)
 D ≈ -KN (sólo ganancia y esta limitada a 20dB por década)
 N=8 (sólo el ruido con alta frecuencia no se puede filtrar)

25

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Modificaciones sobre el error

- Si error elevado, interesa ganancias elevadas en el sistema.
- Si error bajo, interesa ganancias bajas en el sistema.

" trabajar con el error al cuadrado "

- Se introduce e² en la acción P, a veces en I, nunca en D.
- También se reduce el ruido de baja frecuencia que tenga la señal. Este ruido no se puede filtrar. Usando el error cuadrado, da pequeña amplificación del ruido cuando el error es pequeño y un control efectivo cuando el error es grande.

26

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Efecto windup

iciones, la variable de control u se satura luego:

ite

ado

ena abierta

ón constante

de la salida).

si hay acción I,

ose y por tanto,

do.

ormal cuando

, después de un tiempo.

27

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Efecto windup

- Casos en los que se produce: cambios bruscos de SP o grandes perturbaciones.
- Soluciones:
 - Dispositivos limitadores en el SP.
 - Implementar estructura de "seguimiento"
- Estructura de "seguimiento":
 - detectar fenómeno de saturación.
 - generar error de seguimiento (será nulo sin saturación).
 - con saturación (error de seguimiento no nulo), añadir T_f para minimizar efecto I.
 - bajos T_f eliminan la acción I rápidamente.
 - $T_d < T_f < T_i$
 - sugerencia $T_f = (T_i T_d)^{1/2}$

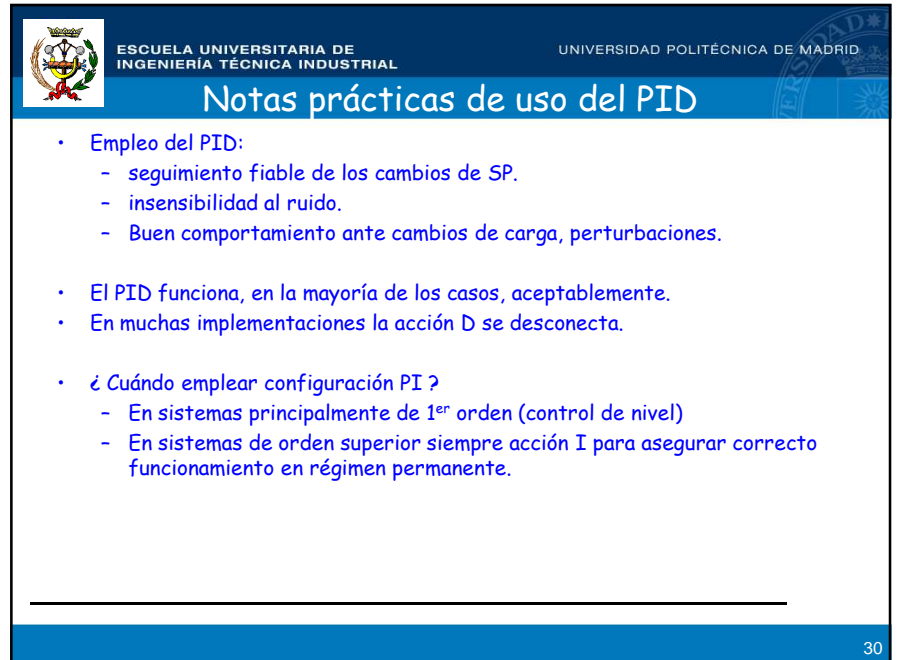
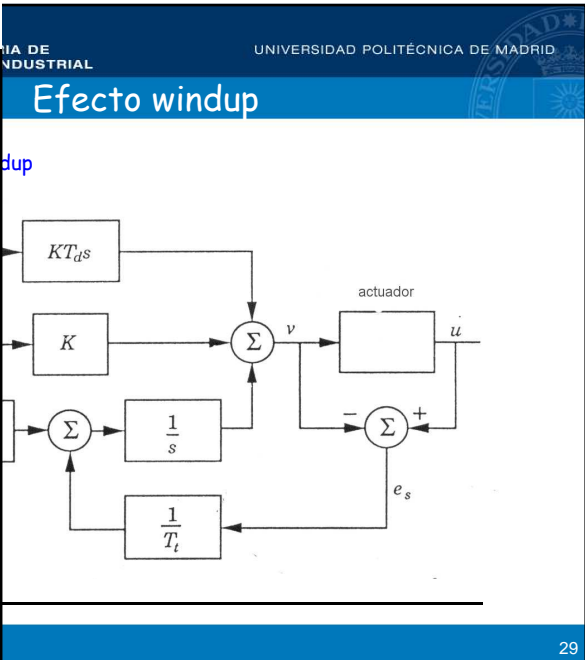
28

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

Prácticas de uso del PID

Configuración PID ?

Control de 2º orden (control de temperatura)
 Necesario para sistemas que requieran una mayor
 rapidez que incrementar la velocidad de respuesta y en
 sistemas con inercia superior, mediante la adición de la acción D.

Control de 3º orden (control más sofisticado).
 Necesario para sistemas con retardos tiempo muertos (predicador Smith).
 Necesario para sistemas con polos complejos (sistemas
 con polos complejos con parte real nula o negativa y
 parte imaginaria no nula).

31

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

PIDs comerciales

- PID estándar:

$$U(s) = K \cdot \left((b \cdot SP - PV) + \frac{1}{sT_i} \cdot E + \frac{sT_d}{1 + s(T_d/N)} (c \cdot SP - PV) \right)$$

- PID clásico:

$$U(s) = K \cdot \left(\left(b + \frac{1}{sT_i} \right) \frac{1 + s c T_d'}{1 + s(T_d'/N)} \cdot SP - \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \frac{1 + s T_d'}{1 + s(T_d'/N)} \cdot PV \right)$$

- PID paralelo:

$$U(s) = K \cdot (b \cdot SP - PV) + \frac{K_i}{s} \cdot E + \frac{K_d s}{1 + K_d s / (K' N)} (c \cdot SP - PV)$$

32

IA DE INDUSTRIAL UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

tiempos comerciales

Estructura	Ponderacion SP		Limitacion accion D	Muestreo
	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>N</i>	(s)
I, III	1.0	1.0	none	load dependent
II, III	0.0 or 1.0	0.0 or 1.0	10	0.25
II	1.0	0.0	8	0.1, 0.25, or 1.0
II	0.0	0.0	8	0.2
II	1.0	0.0 or 1.0	none	0.1
II	1.0	0.0	10	0.25
II	1.0	1.0	8	0.33, 0.5, or 1.0
II	1.0	0.0	1 – 30	0.1
II	0.0	0.0	8	0.2
II	0.0 or 1.0	0.0	17 or 20	0.25
II	1.0	1.0	3.3 – 10	0.2
II	1.0	1.0	none	0.036 – 1.56
I	0.0 or 1.0	0.0 or 1.0	10	0.1

33

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

--

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70