

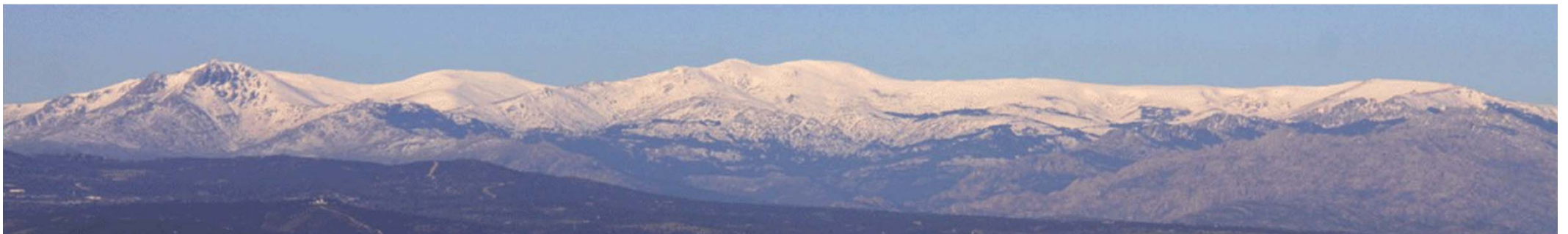


¿Qué quieres controlar? ¿Has probado con controladores PID?

F. Morilla

Dpto. de Informática y Automática

ETSI Informática, UNED



¿De qué y a quién hablo?

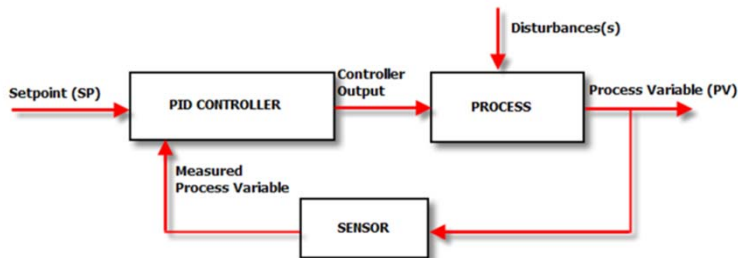


- “control para torpes” →



- “control for dummies” →

¡cantidad de información!



csimn.com/CSI_pages/PIDforDummies.html

Parameter	Unit	Value
Gain	1/s	0.05
Integ. Time	s	10.0
Deriv. Time	s	1.0
Reset On Error		0.0

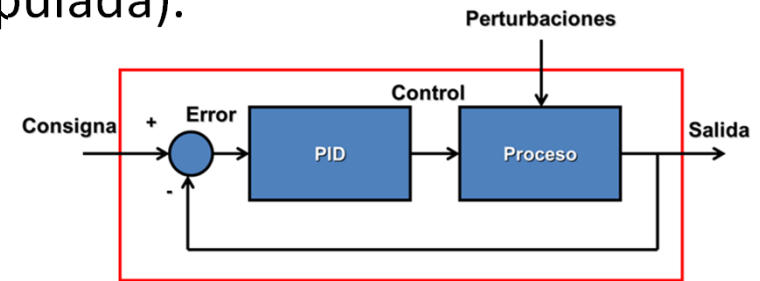
Buy Now \$97

pidtuning.net

Alcance y objetivos

- Alcance

- Procesos con al menos una variable a controlar (variable de proceso), otra sobre la que actuar (variable manipulada).
- Controladores PID.



- Objetivos

- Poner de manifiesto lo importante que es conocer los actores: el proceso y el controlador.
- Recalcar que cualquier problema de control por simple que parezca debería ser analizado en profundidad.
- Insistir que una solución por simple que parezca es preferible a otra más compleja.
- Comprobar que la solución a nuestro problema puede que ya esté en la red. Pero el encontrarlo puede llegar a ser comparable a “buscar una aguja en un pajar”. Es preferible consultar fuentes fiables.



Contenido

- Las fuentes de información.
- Ejemplos de procesos.
- El controlador PID.
- La sintonía.
- Ejemplos de aplicación.



¿Qué quieres controlar?

- Si alguien se plantea controlar algo será porque considera que es posible.
 - ¿Pero es realmente posible lo que quiere controlar?
 - ¿Tiene bien definido el problema de control?
- ¿Quiere controlar una variable física (posición, velocidad, aceleración, caudal, presión, temperatura), una variable fisiológica o una variable socio-económica?
- ¿Dispone del sensor y actuador adecuados?
- ¿Dispone del controlador o lo tiene que implementar?



sobre la presión arterial

- “control de la ...”



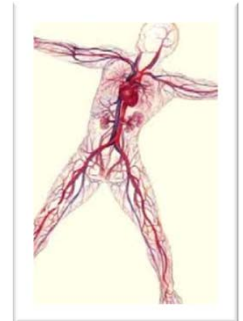
Medida



- “regulación de la ...”



Proceso fisiológico



- “regulación automática de la ...”



Un problema
muy complejo

«.. La investigación sobre el control automático de la presión sanguínea se inició utilizando controladores PID ...»

LA INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA
EN LA BIOINGENIERÍA, P. Caminal
XXIV Jornadas de Automática, León 2...2

jornadas/XXIV/documentos/conferencia1.pdf



sobre la velocidad

- “control de la”



Medida



- “regulación de la”



Muchos procesos



- “control automático de la”



Un problema muy abordado

«.. La solución a todo esto es una tecnología que existe desde finales del siglo XIX: el regulador PID, ...»

¿Cómo funciona el control de crucero?
Web: Circula seguro

circulaseguro.com/como-funciona-el-control-de-crucero/



¿Has probado con controladores PID?

- **SÍ**; ¿bajo qué condiciones? ¿se habrá preocupado de ajustar muy bien el otro controlador pero no el PID?
- **NO**; no sabe lo que es un PID, ¡qué formación estamos dando!

El controlador PID

Es una implementación simple de la idea de realimentación.

Está presente en el nivel inferior de la jerarquía de control, sólo o combinado con otros bloques funcionales.

Concebido originalmente con un grado de libertad (acciones de control basadas en la señal de error) ha evolucionado hacia dos grados de libertad.



Control PID

- Textos sobre Ingeniería de Control → Imagen “ideal”

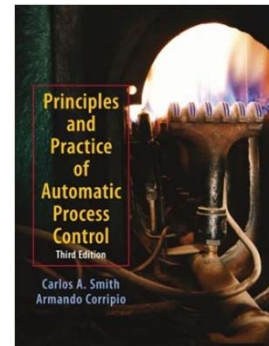
CAPÍTULO 8. Controladores PID y controladores PID modificados	567
8-1. Introducción	567
8-2. Reglas de Ziegler-Nichols para la sintonía de controladores PID	568
8-3. Diseño de controladores PID mediante el método de respuesta en frecuencia	577
8-4. Diseño de controladores PID mediante el método de optimización computacional	582
8-5. Modificaciones de los esquemas de control PID	590
8-6. Control con dos grados de libertad	592
8-7. Método de asignación de ceros para mejorar las características de respuesta	595
Ejemplos de problemas y soluciones	614
Problemas	641



Ingeniería de control moderna. 5ª ed.
K. Ogata. Pearson Educación, 2010.

- Textos sobre Control de Procesos → Imagen “algo más real”

«.. Chapter 5 provides a brief presentation of sensor, transmitters and control valves, and a detailed presentation of feedback controllers ...»



Principles and Practice of Automatic Process Control. 3rd ed. C.A. Smith, A. Corripio. John Wiley & Sons, 2006.



Control PID

- Textos específicos



Relativamente recientes

«.. creemos que está emergiendo una nueva era de control PID. Este libro tendrá en cuenta el desarrollo realizado, evaluará su potencial, e intentará acelerarlo al compartir nuestras experiencias ...»



Control PID Avanzado. K. Aström, T. Hägglund. Prentice Hall, 2009.

- Documentación técnica de fabricantes



“.. es mucho más ..”

Controllers	
Model	718TC
Opto-isolated RS-485 Modbus serial communications interface	x
PID control with programmable ramp and soak function, 4-20 mA or 0-20 mA control signal, or time proportional control with relay outputs	x
Auto-tuning, SMART adaptive tuning	x
Anti-windup	x
Independent set points selectable from external input contacts	4
Analog Outputs	1
Relay Outputs	3
Inputs: Universal, TC type, mV, V, mA, and RTD, fully selectable and keyboard programmable	x
Output "Turn Off" function allows controller to be used as an indicator	x
Lock-out function prevents unauthorized configuration	x
NEMA 4X	x
Accurate to 0.2% full scale (Measurement)	x



Foxboro 718TC. Temperature Controller, 1997.



Control PID

- “PID control”



Aproximadamente
574000 resultados

CONTROL TUTORIALS
FOR MATLAB & SIMULINK

Introduction: PID Controller Design

In this tutorial we will introduce a simple yet versatile feedback compensator structure, the Proportional-Integral-Derivative (PID) controller. We will discuss the effect of each of the pid parameters on the closed-loop dynamics and demonstrate how to use a PID controller to improve the system performance.

Key MATLAB commands used in this tutorial are: `tf`, `step`, `pid`, `feedback`, `pidtool`, `pidtune`

Contents

- PID Overview
- The Characteristics of P, I, and D Controllers
- Example Problem
- Open-Loop Step Response
- Proportional Control
- Proportional-Derivative Control
- Proportional-Integral Control
- Proportional-Integral-Derivative Control
- General Tips for Designing a PID Controller
- Automatic PID Tuning

«.. the Control Tutorials for MATLAB and Simulink (CTMS) are designed to help you learn how to use MATLAB and Simulink for the analysis and design of automatic control systems. They cover the basics of MATLAB and Simulink and introduce the most common classical and modern control design techniques.»

«.. Most of the original development work was done by undergraduate students over 1996 ..»

ctms.engin.umich.edu/CTMS/



Control PID

Interactive Learning Modules Project

Learning control by Interactivity

by Jose Luis Guzman, Karl Johan Astrom, Sebastian Dormido, Tore Hagglund, Manuel Berenguel, and Yves Piguat

ILM Project

[Interactivity](#)

[Project description](#)

[Book](#)

Interactive Modules

[Modelling](#)

[PID Basics](#)

[PID Design](#)

[PID LoopShaping](#)

[PID Windup](#)

[Dead-time compensators](#)

[Interaction](#)

[Feedforward design](#)

Documentation

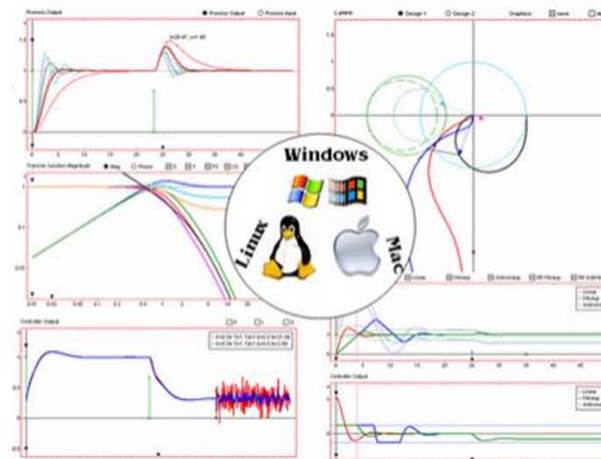
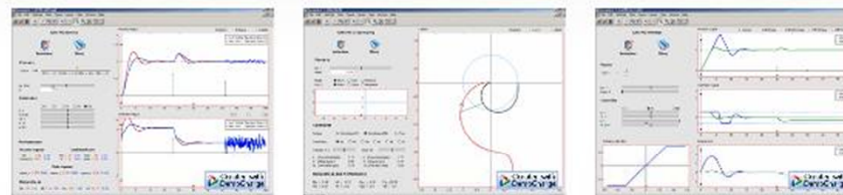
[Papers](#)

[Technical Reports](#)

[Other interactive tools](#)

Interactive Learning Modules Project

The *Interactive Learning Modules* project is a set of interactive tools developed as support to the well-know book [Advanced PID Control](#). The set of interactive modules that comprise the ILM Project is presented to support the teaching and learning of basic automatic control concepts.



«.. The modules focus on PID control, studying feedback fundamentals from the standpoint of the time and frequency domains, including robustness issues, measurement of noise filtering, load-disturbance rejection, windup phenomenon, feedforward design, and so on ...»

«.. the modules are available from 2009 for Windows, Mac, and Linux operating systems and can be freely downloaded..»

aer.ual.es/ilm/



Control PID

- 1 History and applications
- 2 Control loop basics
- 3 PID controller theory
 - 3.1 Proportional term
 - 3.2 Integral term
 - 3.3 Derivative term
- 4 Loop tuning
 - 4.1 Stability
 - 4.2 Optimum behavior
 - 4.3 Overview of methods
 - 4.4 Manual tuning
 - 4.5 Ziegler–Nichols method
 - 4.6 PID tuning software
- 5 Limitations of PID control
 - 5.1 Linearity
 - 5.2 Noise in derivative
- 6 Modifications to the PID algorithm
 - 6.1 Integral windup
 - 6.2 Overshooting from known disturbances
 - 6.3 PI controller
 - 6.4 Deadband
 - 6.5 Set Point step change
 - 6.6 Feed-forward
 - 6.7 Bumpless Operation
 - 6.8 Other improvements

- En Wikipedia
 - “controlador pid”
 - “pid controller”



- 7 Cascade control
- 8 Alternative nomenclature and PID forms
 - 8.1 Ideal versus standard PID form
 - 8.2 Reciprocal gain
 - 8.3 Basing derivative action on PV
 - 8.4 Basing proportional action on PV
 - 8.5 Laplace form of the PID controller
 - 8.6 PID Pole Zero Cancellation
 - 8.7 Series/interacting form
 - 8.8 Discrete implementation
- 9 Pseudocode
- 10 Notes
- 11 See also
- 12 References
- 13 External links
 - 13.1 PID tutorials

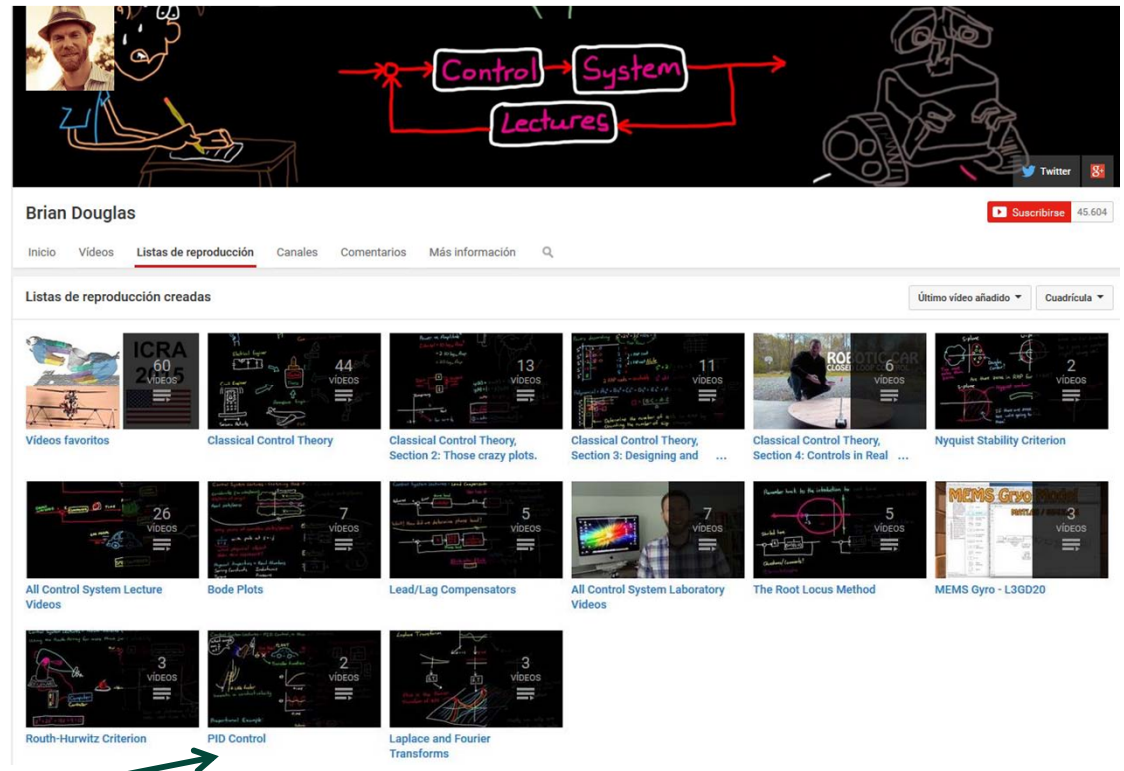
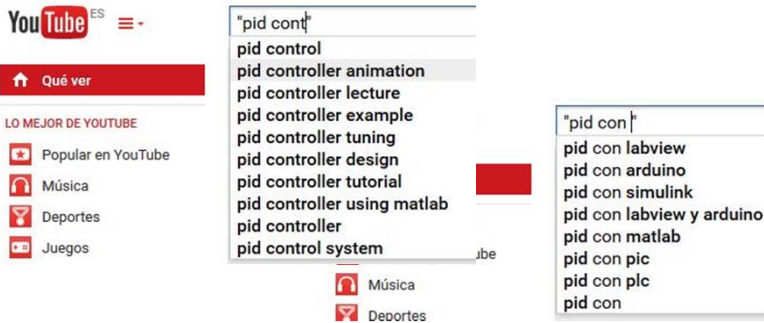
- 1 Historia y aplicaciones
- 2 Funcionamiento
 - 2.1 Proporcional
 - 2.2 Integral
 - 2.3 Derivativo
- 3 Significado de las constantes
- 4 Ajuste de parámetros del PID
 - 4.1 Ajuste manual
- 5 Limitaciones de un control PID
- 6 Ejemplos prácticos
- 7 Referencias
- 8 Enlaces externos

Información mucho mejor y más exhaustiva en inglés. Aunque, en ambos casos, algo sesgadas.



Videos sobre Control PID

- En YouTube “pid control” → Aproximadamente 24400 resultados



«Welcome to my channel trailer and the first video for a course on control theory. In this video I present a few reasons why learning control theory is important and try to give some motivation to continue learning.»

youtube.com/user/ControlLectures/featured

PID Control – A brief introduction (7':43'')
 Simple Examples of PID Control (13':09'')



¿Qué quieres controlar?

- No olvide que los procesos son intrínsecamente multivariados (perturbaciones) y que las medidas pueden venir afectadas por ruido.
- ¿El proceso es estable? ¿Cuál es su rango de operación? ¿Es lineal?
- ¿Se trata de un proceso real o simulado?
- ¿Sabía que para controlar un proceso basta con conocer algunas de sus características dinámicas?

Proceso: 3 Depósitos interconectados

- Proceso configurable, disponible en UNILabs.

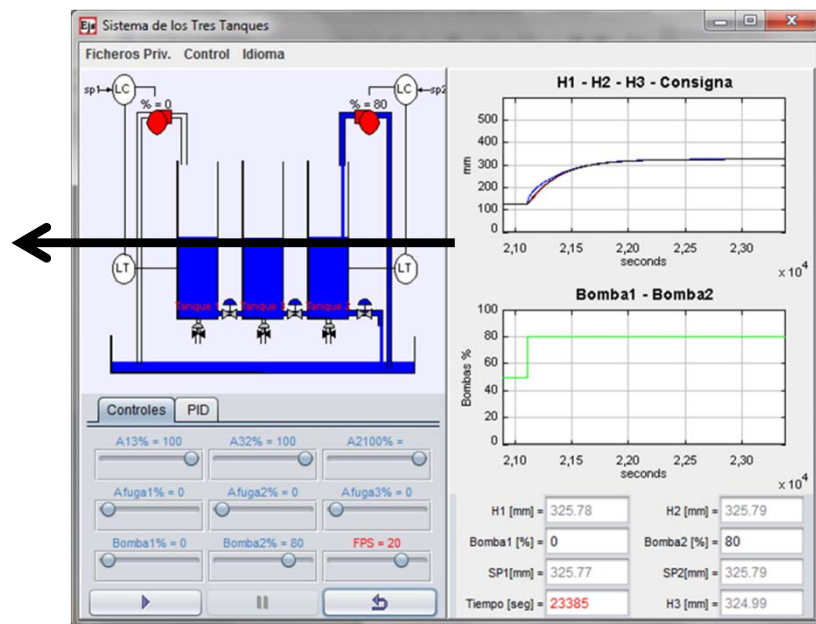


The screenshot shows the UNILabs website interface. At the top, there is a header with the UNILabs logo and navigation links for 'Español - Internacional (es)', 'Mis cursos', and 'This course'. Below the header, there is a breadcrumb trail: 'Página Principal > Mis > UN > LPM'. The main content area is titled 'Prácticas de Laboratorio del Master en Ingeniería de Sistemas y Control'. Under this title, there is a 'Foro de noticias' link. A section titled 'Información general' contains text explaining that the page lists laboratory practices for the Master in Systems and Control Engineering, and that each student can only access their assigned remote practices. It also mentions a reservation system at the bottom of the page. Below the information, there is a link for 'Listado y descripciones breves de los laboratorios disponibles'. At the bottom of the page, there is a section for a specific practice: 'Práctica con el sistema 'bola y viga'', with a sub-description 'Control PID, Reset y Difuso' and a small image of a ball and beam system.

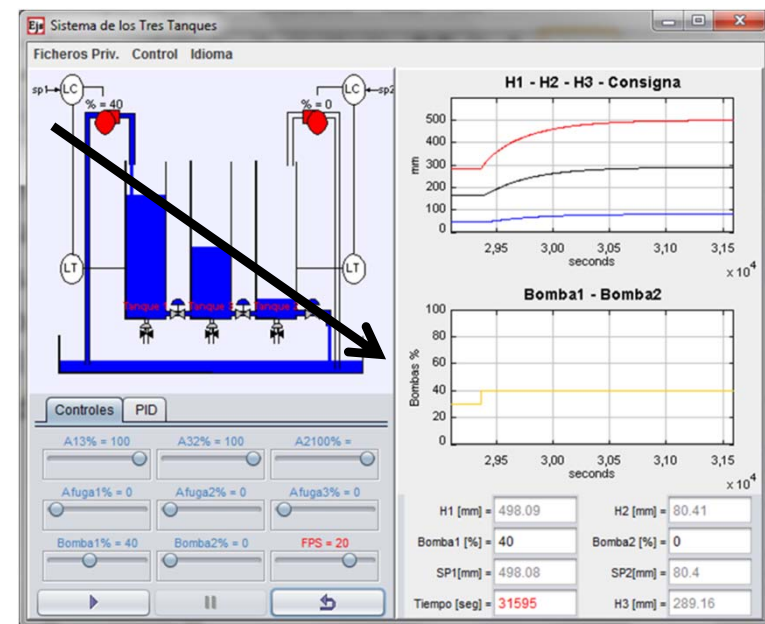
unilabs.dia.uned.es

Proceso: 3 Depósitos interconectados

- Centramos la atención en 2 configuraciones:
 - Únicamente hay salida en el depósito de la derecha.
 - 1 variable manipulada, 3 candidatas a ser controladas, 1 perturbación.



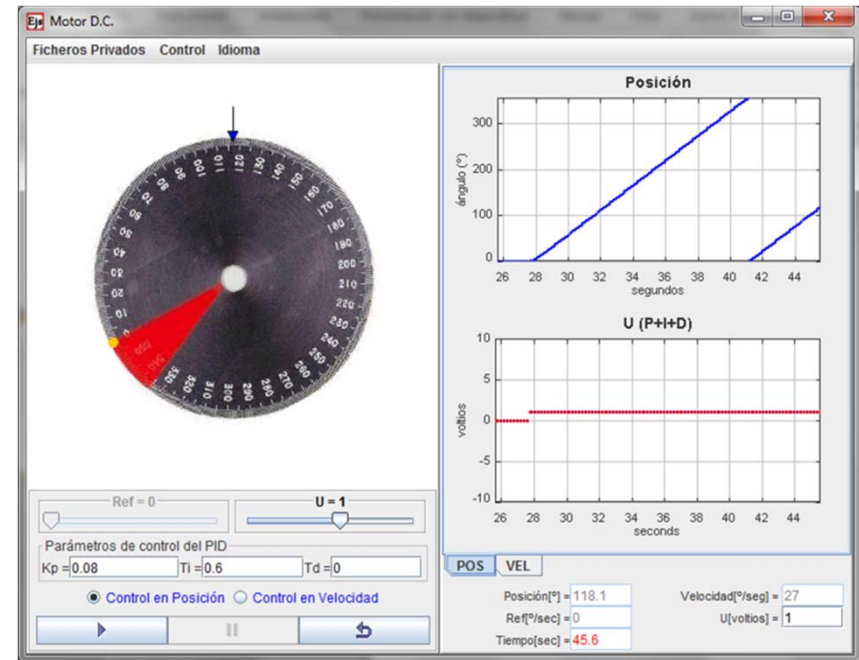
Bomba 1 parada,
manipulación de la Bomba 2



Manipulación de la Bomba 1,
Bomba 2 parada

Proceso: Motor de corriente continua

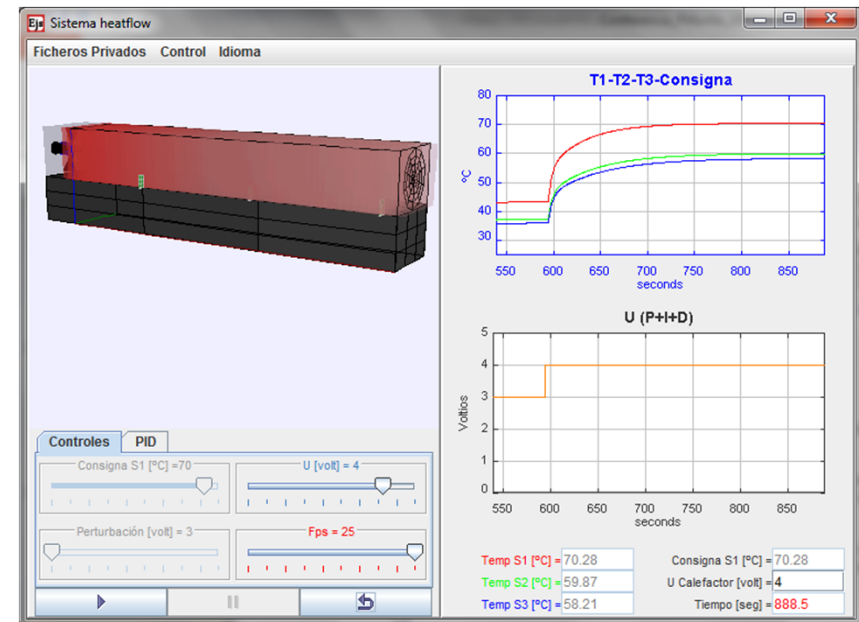
- Proceso configurable, disponible en UNILabs.
- Centramos la atención en la posición del disco solidario con el eje del motor.
 - Presencia de integrador.
 - No linealidad en la medida.
 - Zona muerta en la actuación.



Manipulación de la tensión al motor

Proceso: Calefactor por aire

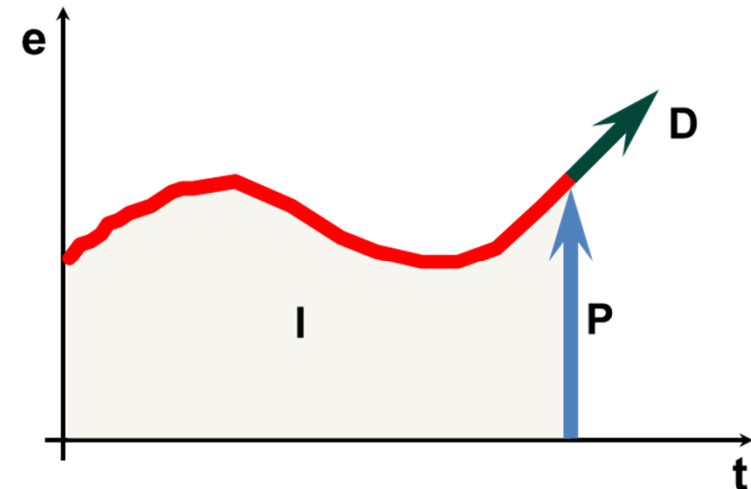
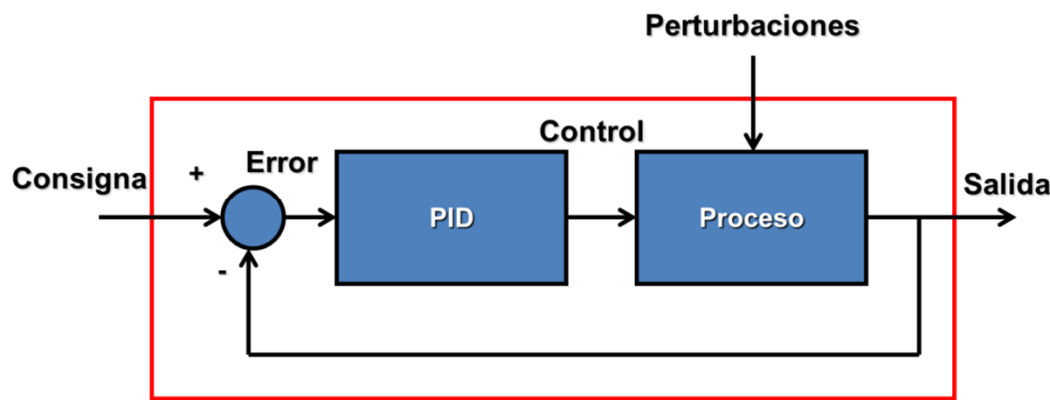
- Proceso configurable, disponible en UNILabs.
- Centramos la atención en los tres sensores de temperatura:
 - Una variable manipulada.
 - Tres candidatas a ser controladas.
 - Perturbaciones (caudal de aire y temperatura ambiente).



Manipulación de la tensión a la resistencia calefactora

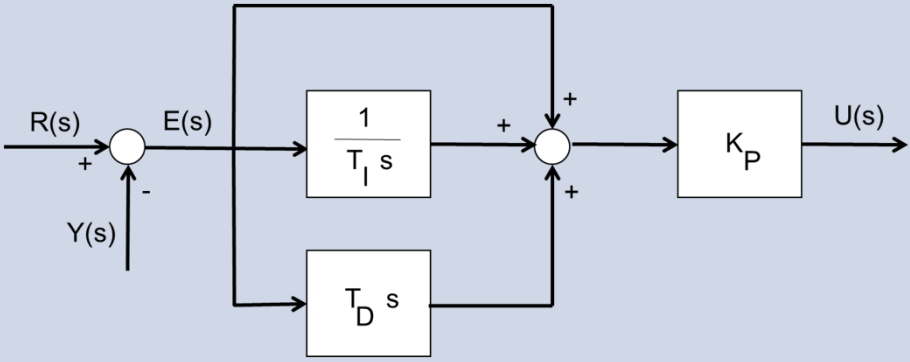
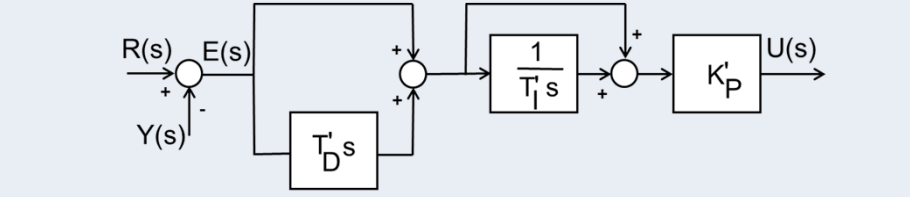
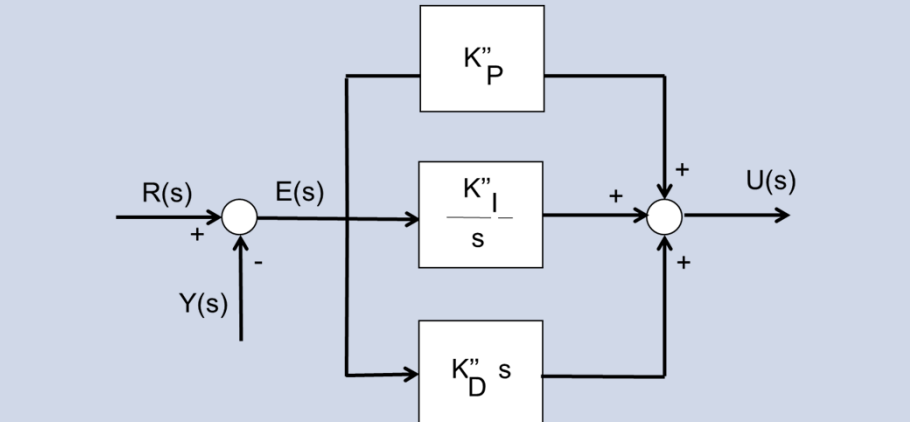
Lazo básico de control PID

- Señal de control basada en el **PASADO** (I), en el **PRESENTE** (P), y en la **TENDENCIA** (D) de la señal de error.



$$u(t) = \underbrace{K_P e(t)}_P + \underbrace{\frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(t) dt}_I + \underbrace{K_P T_D \frac{de(t)}{dt}}_D$$

¿El algoritmo PID es estándar?

Tipo	Estructura interna	Parámetros y FT
<p>No interactivo</p>		$U(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) E(s)$
<p>Interactivo</p>		$U(s) = K'_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) (1 + T'_D s) E(s)$
<p>Paralelo</p>		$U(s) = \left(K''_P + \frac{K''_I}{s} + K''_D s \right) E(s)$

¿PID, PI-D, I-PD?

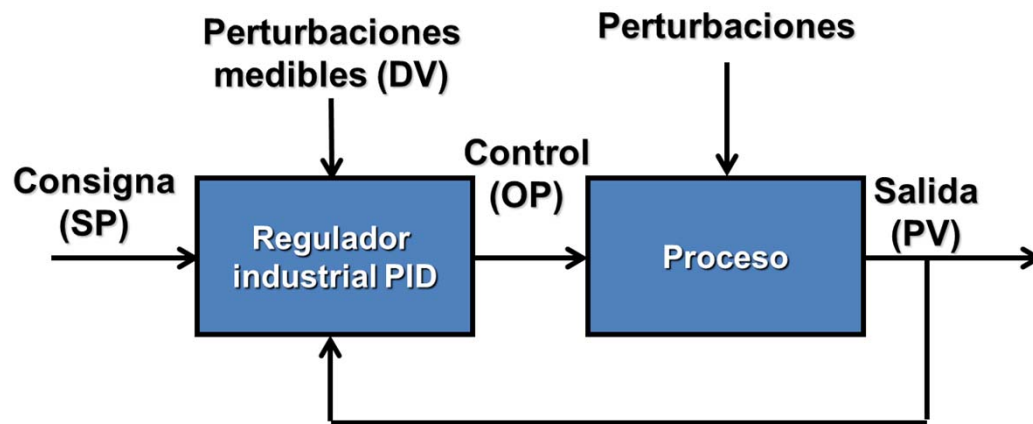
$$u(t) = K_P \left(b r(t) - y(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{d(c r(t) - y(t))}{dt} \right)$$

Estructura	Características
PID	Las tres acciones utilizan la señal de error ($b=1, c=1$). No recomendable si predominan los cambios bruscos de consigna.
PI-D	La acción D utiliza la salida. ($b=1, c=0$). Evita señales de control excesivamente elevadas cuando se producen cambios bruscos en el punto de consigna.
I-PD	Las acciones P y D utilizan la salida ($b=0, c=0$). Garantiza cambios suaves en la señal de control.

El parámetro $b \in [0, 1]$ propuesto por Aström y Hägglund añade un grado de libertad al controlador PID.

Lazo industrial de control PID

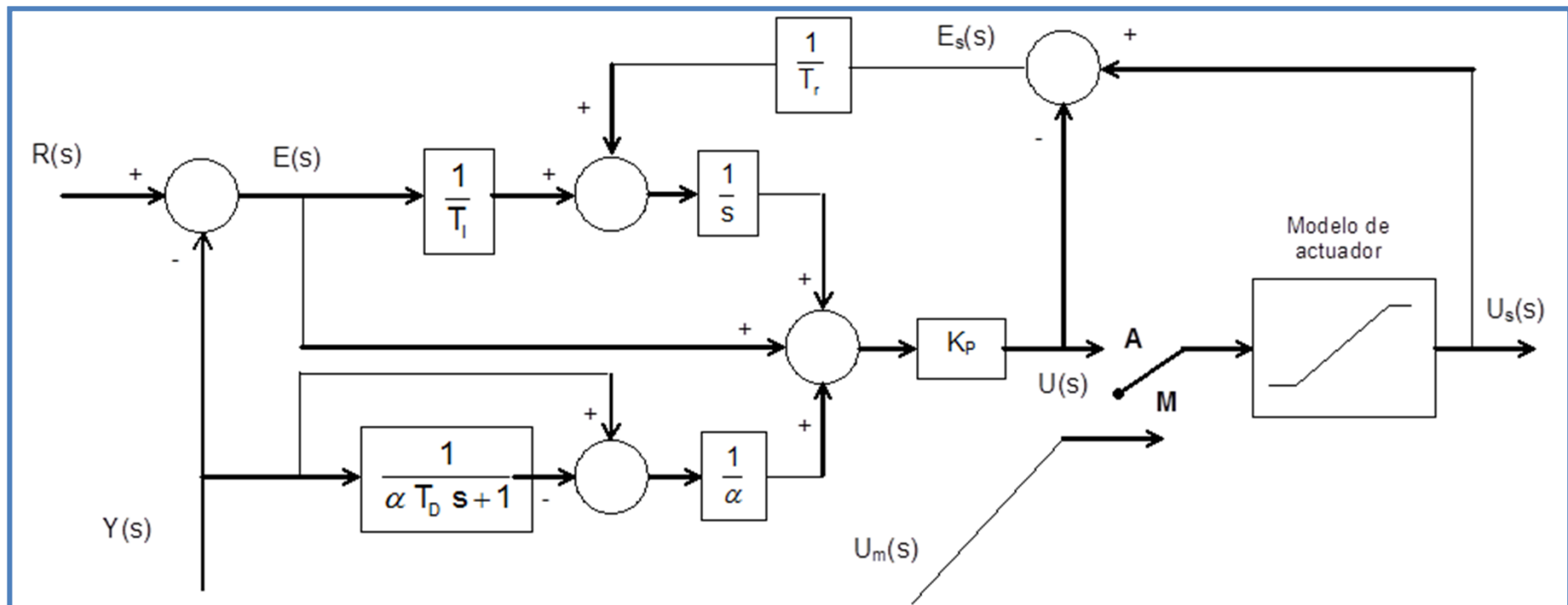
- Control digital.
- Escalados en PV.
- Filtrado de la PV.
- Limitación en la señal de control.
- Modos de funcionamiento.



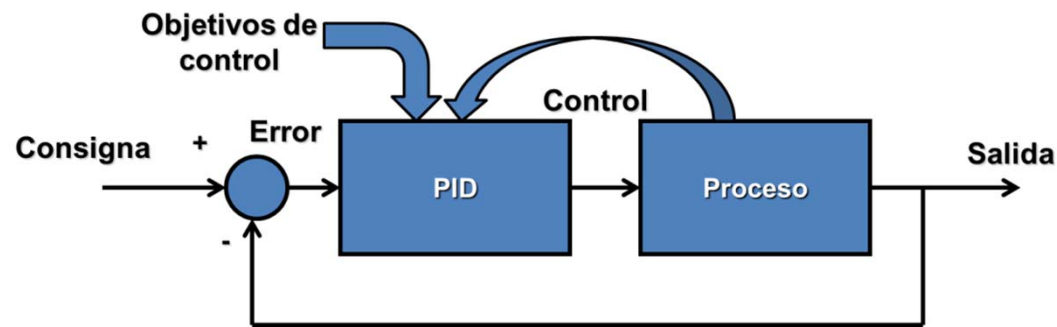
ECA 600 de SattControl

Esquema de controlador más realista

- PI-D con filtro en la acción derivativa, anti-windup y cambio de modo.



¿Sintonía?



- Poner las características del controlador “en sintonía” con las del proceso y los objetivos de control (“criterio de sintonía”).
 - La naturaleza del proceso puede aconsejar descartar (no implementándola o desconectándola) alguna de las acciones (P, PI, PD).
 - Ej: P o PD en procesos con integrador o procesos en los que no importe tener error en estado estacionario.
 - Ej: PI en casi todos los procesos estables con respuesta monótona creciente.
 - El tipo de controlador también suele estar condicionado por el criterio de sintonía y/o por las características del modelo del proceso.
 - En ciertas aplicaciones puede interesar tener (“mal sintonizado”) algún lazo.
 - Ej: Control de depósitos intermedios.

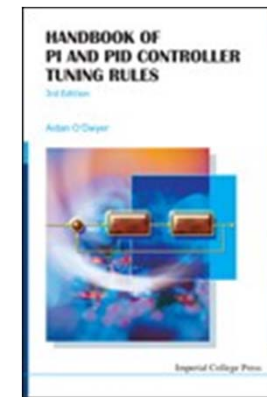
Sintonía heurística

- Modificaciones sucesivas de los parámetros.
 - Poco práctico, pero utilizado por personas experimentadas si el proceso es rápido.
 - Útil, como entrenamiento, en los entornos interactivos de experimentación o de diseño.

Centrado en la acción	Ajuste sistemático de K_p , T_I y T_D
P	Poner T_I a su máximo valor. Poner T_D a su mínimo valor. Empezar con ganancia K_p baja e ir aumentando hasta obtener las características de respuesta deseadas.
I	Reducir T_I hasta anular el error en estado estacionario, aunque la oscilación sea excesiva. Disminuir ligeramente la ganancia K_p . Repetir hasta obtener las características de respuesta deseadas.
D	Mantener la K_p y el T_I a los valores anteriores. Aumentar T_D hasta obtener características de respuesta similares pero más rápida. Aumentar ligeramente la K_p si fuera necesario.

Sintonía mediante fórmulas

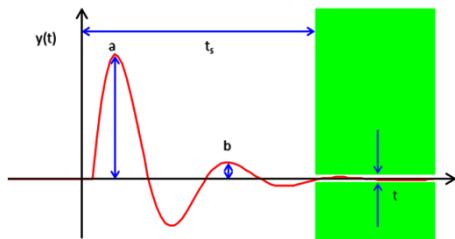
- Cálculo de parámetros en función de:
 - Ciertas características (modelo simple) del proceso.
 - Experiencias en lazo abierto o en lazo cerrado.
 - El criterio de sintonía.
 - Implícito o con cierto grado de libertad.
 - El tipo de controlador.
- Resumen la experiencia de otras personas en un rango limitado de características del proceso.
- Son aproximaciones muy útiles, que requieren un posterior “ajuste fino”.
- Disponible en muchos controladores industriales como “sintonía automática”.



Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 3rd Edition. O' Dwyer, A. Imperial College Press, 2009

Sintonía mediante fórmulas

- Ziegler y Nichols (1942)
 - Las primeras y más referenciadas.



Criterio: Razón de amortiguamiento $b/a=1/4$ para cambio en la carga.

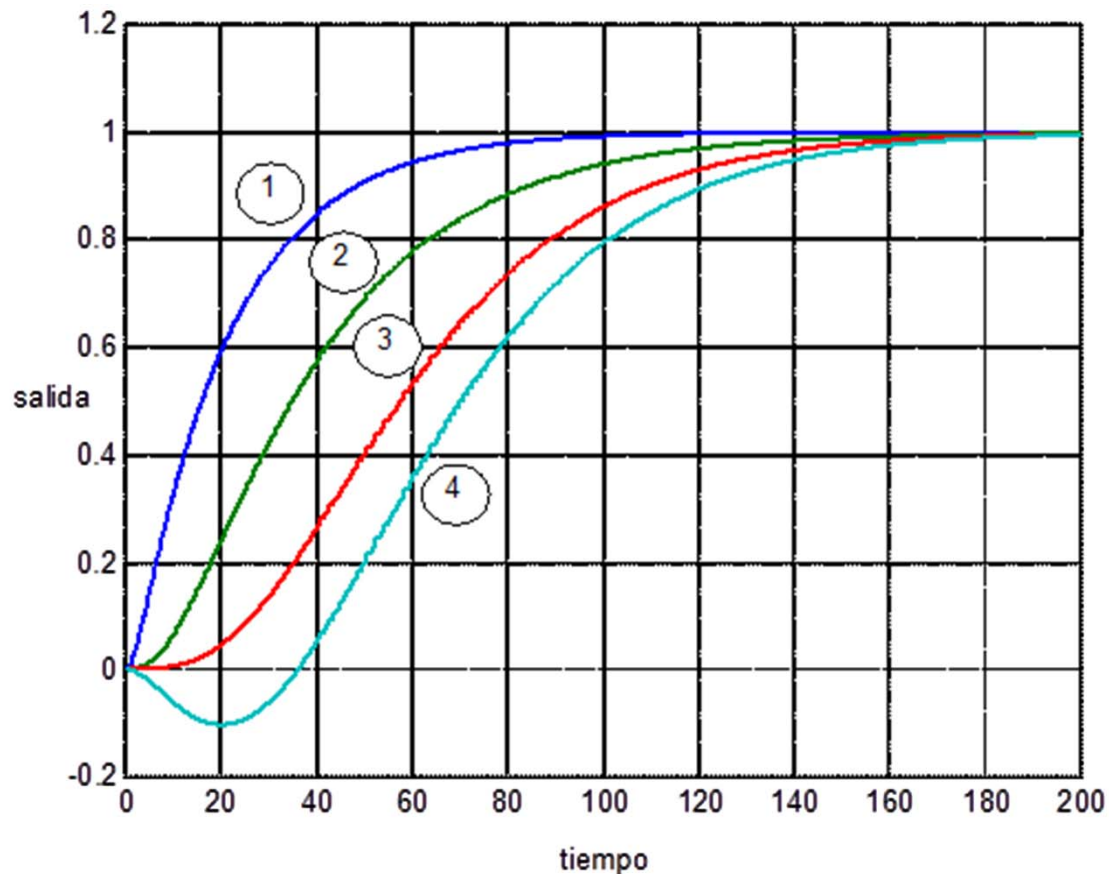
Características en lazo cerrado: K_c (ganancia crítica), t_c (periodo de oscilación mantenida)

Características en lazo abierto: K (ganancia), T_p (constante de tiempo), T_o (retardo).

Controlador	Parámetros	Lazo cerrado	Lazo abierto
P	K_p	$0.5 K_c$	$\frac{T_p}{K T_o}$
PI	K_p	$0.45 K_c$	$0.9 \frac{T_p}{K T_o}$
	T_I	$\frac{t_c}{1.2}$	$\frac{T_o}{0.3}$
PID no interactivo	K_p	$0.6 K_c$	$1.2 \frac{T_p}{K T_o}$
	T_I	$\frac{t_c}{2}$	$2 T_o$
	T_D	$\frac{t_c}{8}$	$0.5 T_o$

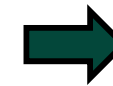
Ejemplos de respuesta en lazo abierto

- La mayoría de los procesos tienen respuesta estable monótona creciente a una entrada escalón.



Característica	Procesos			
	1	2	3	4
K	1	1	1	1
T_p	20.07	33.63	41.41	39.20
T_o	2.03	11.03	27.62	42.33
T_o/T_p	0.10	0.33	0.67	1.08
k_c	29.69	7.27	2.24	0.92
t_c	5.51	33.04	94.91	132.14

T_o/T_p aumenta
 k_c disminuye
 t_c aumenta



Aumenta la dificultad para controlar el proceso

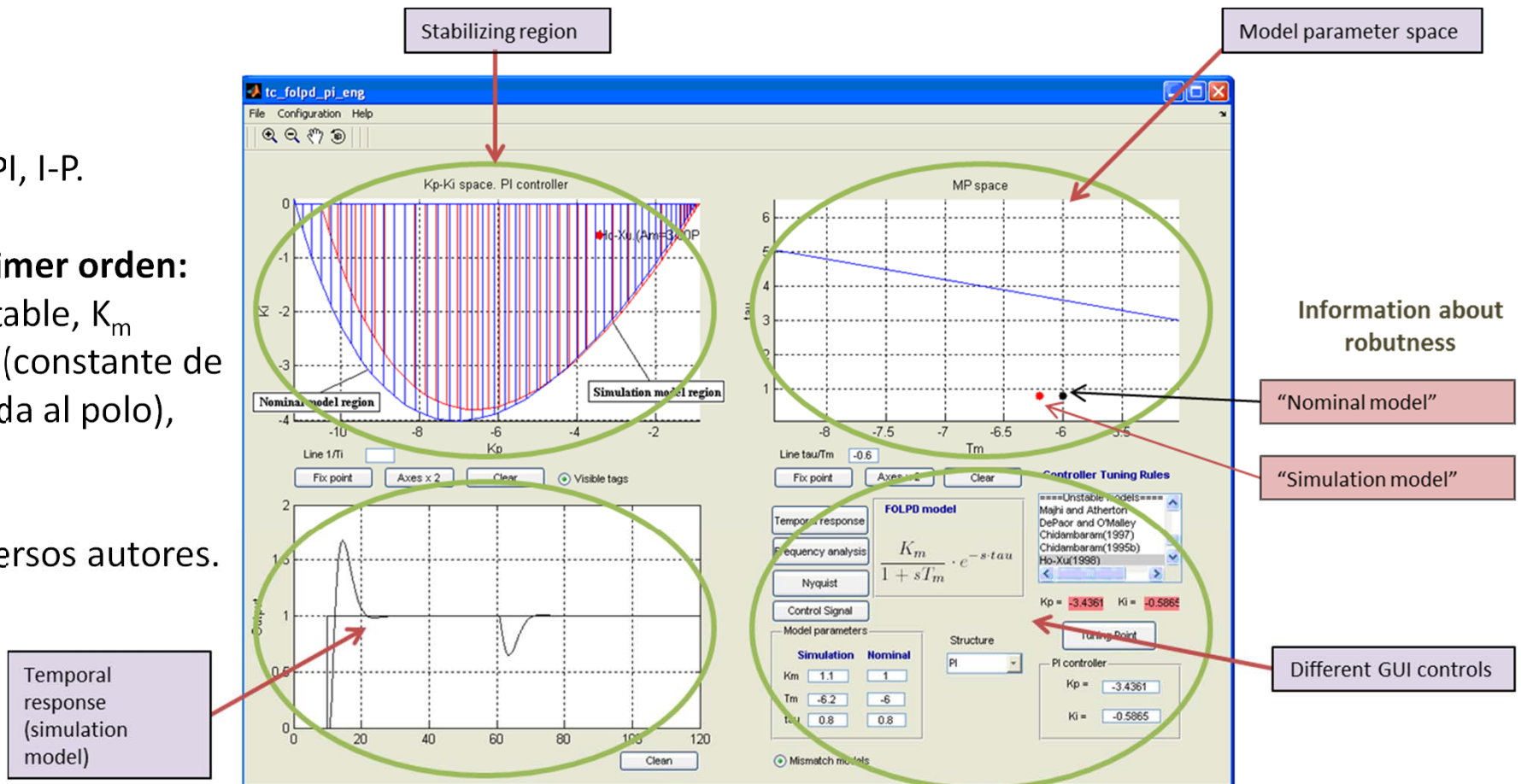
Sintonía mediante fórmulas

- Disponible en entornos específicos de experimentación o de diseño.

Controlador: PI, I-P.

Modelo de primer orden: estable o inestable, K_m (ganancia), T_m (constante de tiempo asociada al polo), Tau (retardo).

Fórmulas: Diversos autores.



Teaching control with first order time delay model and PI controllers (Ruz, Morilla, Vázquez, 2009).

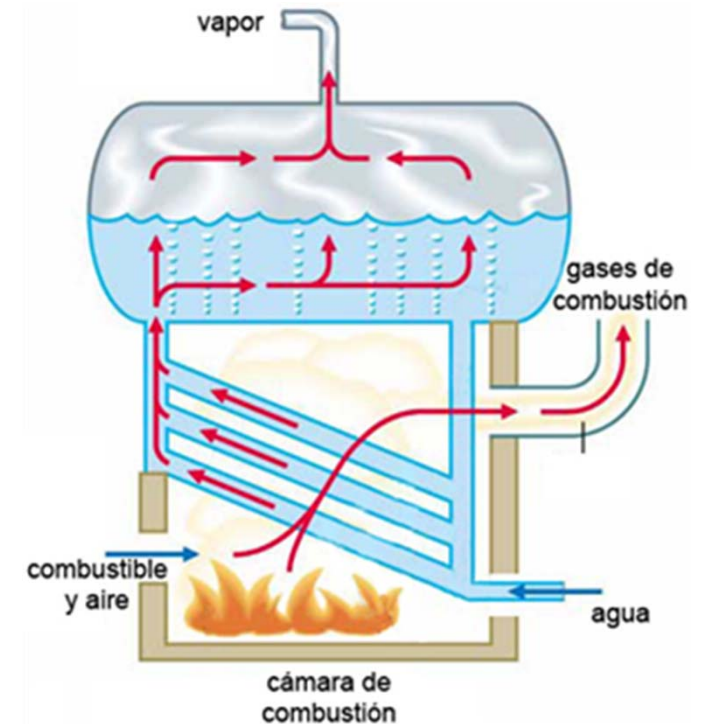
Ejemplos de aplicación

- Ciertas prácticas del “Master en Ingeniería de Sistemas y control”:
 - Control de una caldera.
 - Identificación y control de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad.
 - Aplicación de técnicas de control multivariable a un sistema de 4 tanques. Control descentralizado.
 - Control de un sistema de Bola y Viga.
 - Control de un sistema de Bola y Aro.
 - Control de un sistema de Bola y Plato.
 - Control de tensión y velocidad de una cinta en un sistema de dos motores acoplados.



Práctica “Control de una caldera”

- Proceso y objetivos de control bien definidos.
- Control descentralizado PID que sirve de referencia para otros controladores.
- Punto de operación, que sirve de inicialización a todas las experiencias.
- Todas las variables en % de su rango de instrumentación.
- Ruido en las medidas y en las perturbaciones.
- Limitaciones en las señales de control.
- Perturbaciones medibles.
- Características dinámicas variadas (incluyendo comportamiento de fase no mínima e integrador).

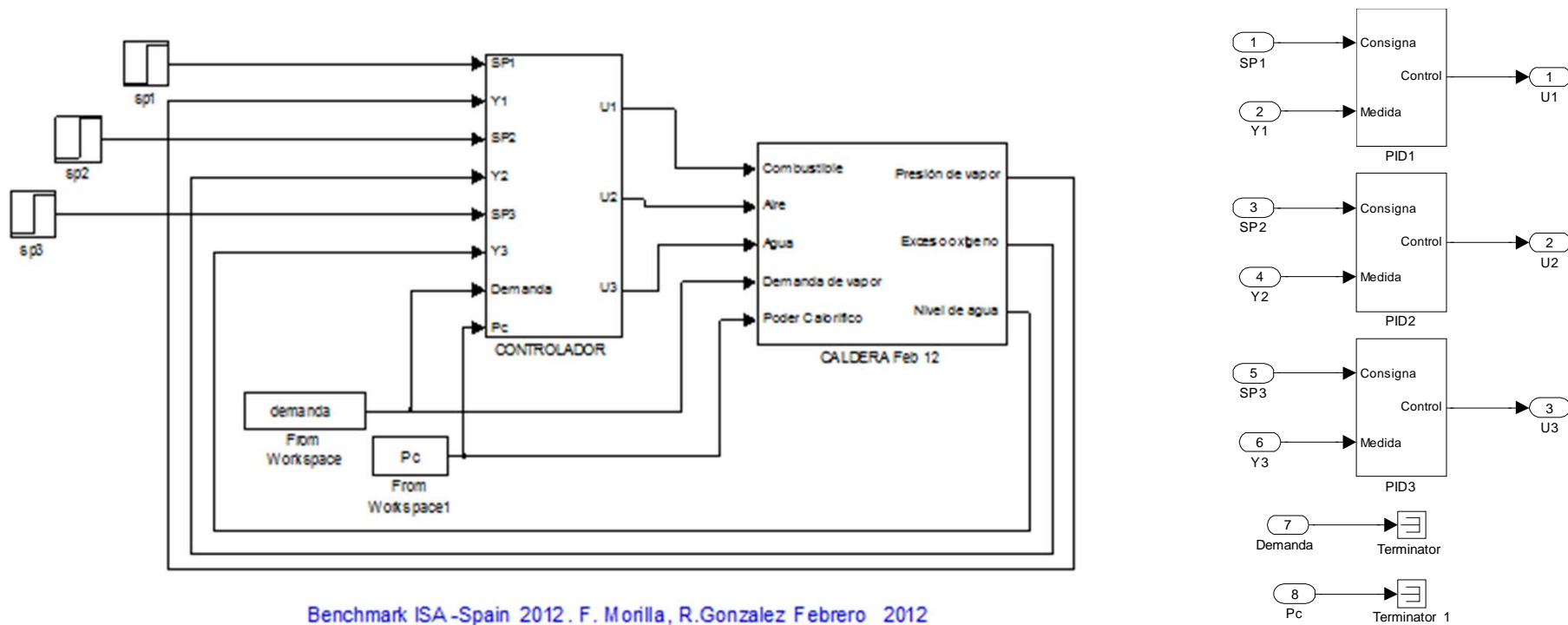


Caldera para generación de vapor

dia.uned.es/~fmorilla/benchmarkISA2012/

Práctica “Control de una caldera”

- Modelo del proceso y de los controladores en Simulink.



Controladores PID discretos con filtro derivativo, antiwindup por rango y velocidad de cambio.



“F. Morilla” & “PID”

- Aproximadamente 963 resultados

UNED ETSII DIA PRINIA CEA ISA UNEDLabs Español English [Contacta](#)



FERNANDO MORILLA GARCÍA
Catedrático de Ingeniería de
Sistemas y Automática
+34 913987156
fmorilla@dia.uned.es

Docencia en el curso actual

Líneas de investigación

Publicaciones recientes

Material didáctico

Contenidos hasta Julio de 2013

Proyectos de investigación

Publicaciones por temáticas

Galería de imágenes

Modelado, Simulación y Control de Procesos
Control por Desacoplo
Controladores PID
Benchmarks de control

Apuntes de asignaturas
Guiones de prácticas
Presentaciones de postgrado
Herramientas interactivas

dia.uned.es/~fmorilla/

¡Gracias!



dia.uned.es/~fmorilla/

19/05/2015

F. Morilla

UNED