

Sintonía de Controladores PID

Control PID: Mapas de sintonía

Caracterización de lazo abierto: Modelado

Métodos empíricos

Ziegler-Nichols (Lazo abierto y Lazo cerrado)

Cohen-Coon

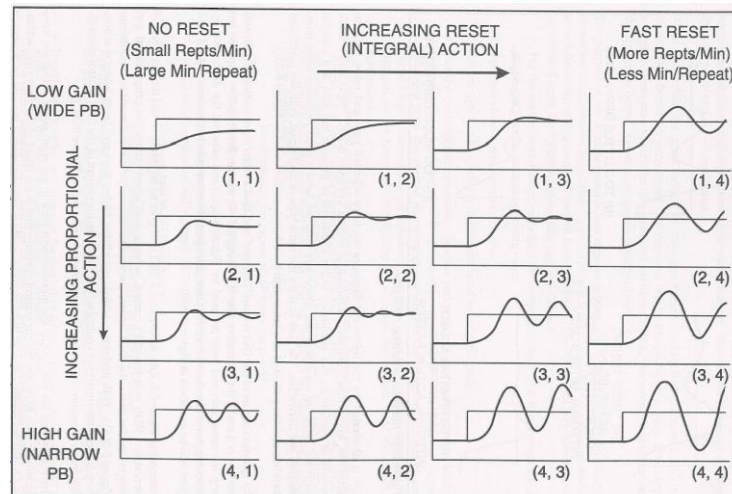
Ajustabilidad

Sintonía óptima: criterios IAE / ISE / ITAE / ITSE

Métodos analíticos: Síntesis directa

Control PID: Mapas de Sintonía

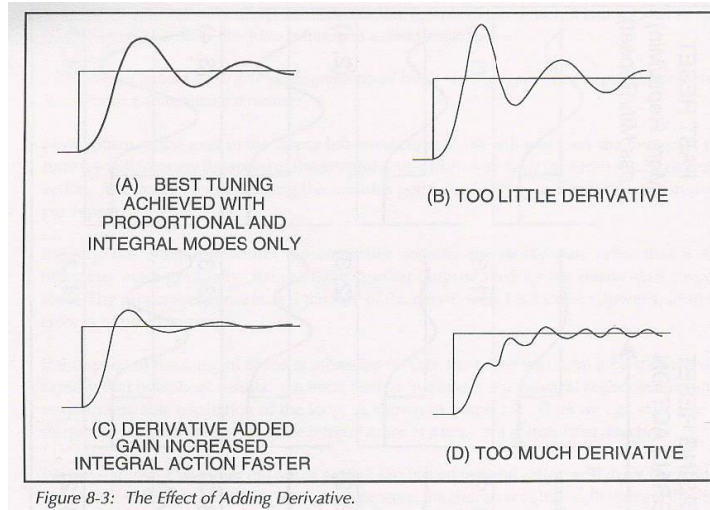
P+I



Tomado de [1]

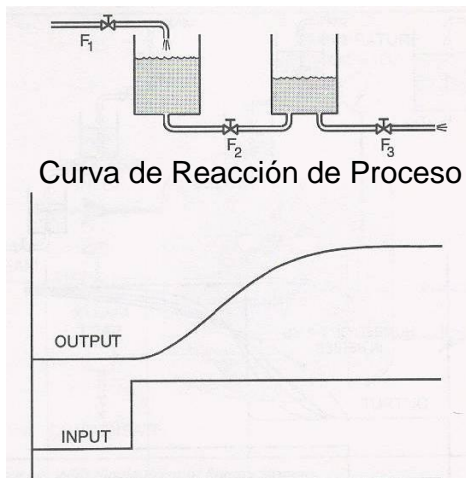
Control PID: Mapas de Sintonía

D



Tomado de [1]

Caracterización de Lazo Abierto

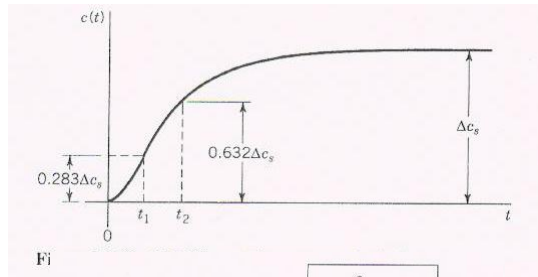


Modelo matemático

$$G(s)=$$

Tomado de [2]

Modelado típico del Proceso: FOLPDT



FOLPDT: First Order
Lag Plus Dead Time

$G(s)=$

Fi

$$\tau = \frac{3}{2} (t_2 - t_1)$$

$$t_0 = t_2 - \tau$$

where

t_1 = time at which $C = 0.283 \Delta c_s$
 t_2 = time at which $C = 0.632 \Delta c_s$

Tomado de [2]

Ziegler-Nichols: Método de Lazo Abierto

Lazo Abierto:
Automático → Manual

Lazo Cerrado PID:

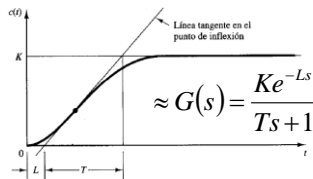


Table 7-2.1 Tuning Formulas for Quarter Decay Ratio Response

Controller Type	Proportional Gain, K_c'	Integral Time, τ_I'	Derivative Time, τ_D'
Proportional-only, P	$\frac{1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	—	—
Proportional-integral, PI	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33 t_0$	—
Proportional-integral-derivative, PID	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$2.0 t_0$	$\frac{1}{2} t_0$

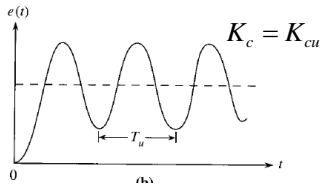
Validez:

$$0.1 < \left(\frac{T_0}{\tau} \right) < 1.0$$

The PID formulas are for the actual PID controller, Eq. 5-3.19. To convert to the ideal PID controller, Eq. 5-3.17: $K_c = K_c' (1 + \tau_D' / \tau_I')$; $\tau_I = \tau_I' + \tau_D'$; $\tau_D = \tau_D' \tau_I' / (\tau_I' + \tau_D')$.

Ziegler-Nichols: Método de Lazo Cerrado

Lazo Cerrado sólo P:



Lazo Cerrado PID:

Table 7-1.1 Quarter Decay Ratio Tuning Formulas

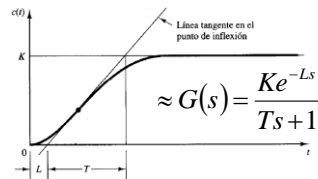
Controller Type	Proportional Gain, K'_c	Integral Time, τ'_I	Derivative Time, τ'_D
Proportional-only, P	$\frac{K_{cu}}{2}$	—	—
Proportional-integral, PI	$\frac{K_{cu}}{2.2}$	$\frac{T_u}{1.2}$	—
Proportional-integral-derivative, PID	$\frac{K_{cu}}{1.7}$	$\frac{T_u}{2}$	$\frac{T_u}{8}$

The PID formulas are for the actual PID controller, Eq. 5-3.19. To convert to the ideal PID controller, Eq. 5-3.17: $K_s = K'_c(1 + \tau'_D/\tau'_I)$; $\tau'_I = \tau'_I + \tau'_D$; $\tau'_D = \tau'_D \tau'_I / (\tau'_I + \tau'_D)$.

Método de Cohen-Coon (Lazo Abierto)

Lazo Abierto:

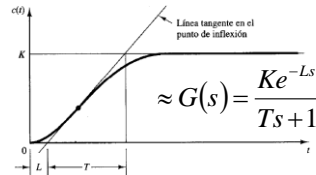
Automático → Manual



Tipo de Regulador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{K} \frac{T}{L} \left[\frac{3T+L}{3T} \right]$	—	—
PI	$\frac{1}{K} \frac{T}{L} \left[\frac{10.8T+L}{12T} \right]$	$\frac{30+3\left(\frac{L}{T}\right)}{9+20\left(\frac{L}{T}\right)} L$	—
PID	$\frac{1}{K} \frac{T}{L} \left[\frac{16T+3L}{12T} \right]$	$\frac{32+6\left(\frac{L}{T}\right)}{13+8\left(\frac{L}{T}\right)} L$	$\frac{4L}{11+2\left(\frac{L}{T}\right)}$

Método del Coeficiente de Ajustabilidad (Lazo Abierto)

Lazo Abierto: Automático → Manual



γ	K_p	T_i	T_d
0 a 0.1	$\frac{5}{K}$	T	0
0.1 a 0.2	$\frac{0.5}{K\gamma}$	T	0
0.2 a 0.5	$\frac{0.5(1+0.5\gamma)}{K\gamma}$	$T(1+0.5\gamma)$	$T \frac{0.5\gamma}{0.5\gamma + 1}$

$$\gamma = \frac{L}{T}$$

Sintonización: Métodos Analíticos

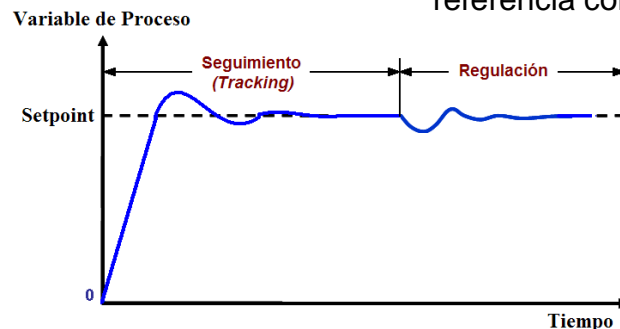
Control Continuo: Seguimiento y Regulación

Control tipo seguimiento

La salida del sistema imita el comportamiento de referencia, que es variante en el tiempo.

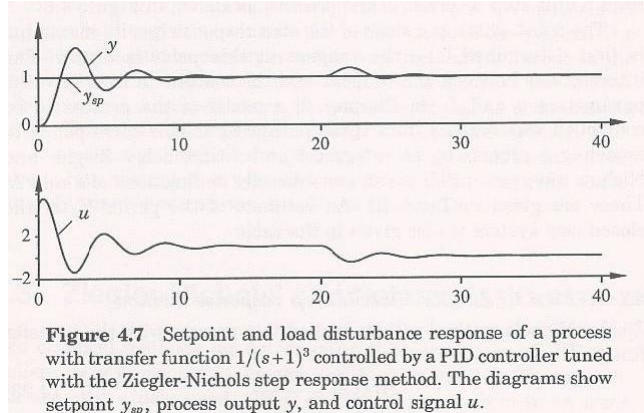
Control tipo regulatorio

Busca minimizar (rechazar) el efecto de las perturbaciones siendo la referencia constante.



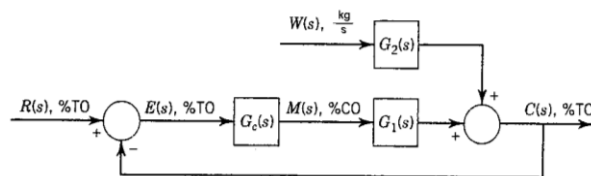
Sintonización: Métodos Analíticos

Cambios en Set point y Rechazo a Perturbación

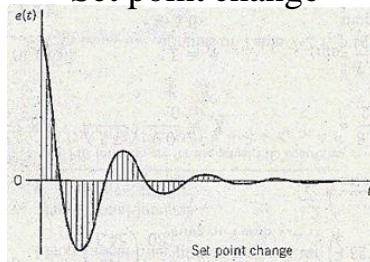


Sintonización: Enfoque de Optimización

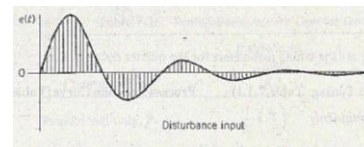
Enfoque de Optimización: Lazo cerrado



Set point change



Disturbance input



Sintonización: Enfoque de Optimización

Enfoque de Optimización

Integral of the Absolute Value of the Error (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

Integral of the Square of the Error (ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

Integral of the Time-Weighted Absolute Value of the Error (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

Integral of the Time-Weighted Square of the Error (ITSE)

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt$$

Sintonía Óptima: Seguimiento (Tracking)

Table 7-2.3 Minimum Error Integral Tuning Formulas for Set Point Changes

Process Model: $\bar{G}(s) = \frac{Ke^{-t_0 s}}{\tau s + 1}$

Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller:

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right)$$

Error Integral	IAE	ITAE
$K_c = \frac{a_1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_1}$	$a_1 = 1.086$	0.965
	$b_1 = -0.869$	-0.855
$\tau_I = \frac{\tau}{a_2 + b_2(t_0/\tau)}$	$a_2 = 0.740$	0.796
	$b_2 = -0.130$	-0.147
$\tau_D = a_3 \tau \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_3}$	$a_3 = 0.348$	0.308
	$b_3 = 0.914$	0.9292

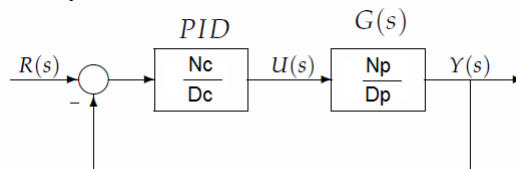
Sintonía Óptima: Rechazo a Perturbación

Table 7-2.2 Minimum Error Integral Tuning Formulas for Disturbance Inputs

Process Model:	$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1}$		
Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller:	$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right)$		
Error Integral	ISE	IAE	ITAE
$K_c = \frac{a_1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_1}$	$a_1 = 1.495$ $b_1 = -0.945$	1.435 -0.921	1.357 -0.947
$\tau_I = \frac{\tau}{a_2} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_2}$	$a_2 = 1.101$ $b_2 = 0.771$	0.878 0.749	0.842 0.738
$\tau_D = \frac{a_3 \tau}{a_3} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_3}$	$a_3 = 0.560$ $b_3 = 1.006$	0.482 1.137	0.381 0.995

Diseño por Ubicación de Polos

- La asignación o ubicación de polos es un método de diseño de controladores cuando se quiere que el desempeño del sistema de lazo cerrado cumpla con determinadas especificaciones de diseño. En esta parte veremos como ajustar un controlador PID utilizando asignación de polos.



$$G_{LC}(s) = \frac{Nc(s)Np(s)}{Nc(s)Np(s) + Dc(s)Dp(s)}$$

Diseño por Ubicación de Polos

Lema. Cualquier controlador de la forma:

$$C(s) = \frac{n_2 s^2 + n_1 s + n_0}{d_2 s^2 + d_1 s}$$

Es idéntico al controlador PID paralelo con filtro derivativo

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{\tau_D s + 1}$$

Con los siguientes parámetros

$$K_p = \frac{n_1 d_1 - n_0 d_2}{d_1^2} \quad K_d = \frac{n_2 d_1^2 - n_1 d_1 d_2 + n_0 d_2^2}{d_1^3}$$

$$K_i = \frac{n_0}{d_1} \quad \tau_D = \frac{d_2}{d_1}$$

Diseño por Ubicación de Polos

Ejemplo. Una planta tiene un modelo nominal dado por:

$$G_p(s) = \frac{2}{(s+1)(s+2)}$$

Sintonizar un controlador PID que en lazo cerrado alcance la dinámica dominada por: $s^2 + 4s + 9$

Resolvemos primero el problema de asignación de polos, donde

$$\Delta_{lc}(s) = (s^2 + 4s + 9)(s + 4)^2; \quad N_p(s) = 2;$$

$$D_p(s) = s^2 + 3s + 2.$$

El factor $(s + 4)^2$ ha sido agregado para asegurar que la asignación de polos tenga solución, es decir que el grado de $\Delta_{lc}(s)$ debe ser 4. Notar que este factor genera modos (polos) que son más rápidos que los originados por el polinomio deseado. De esta forma, la dinámica dominante será la de los polos mas lentos.

Diseño por Ubicación de Polos

Resolviendo la ecuación de asignación de polos, resulta que

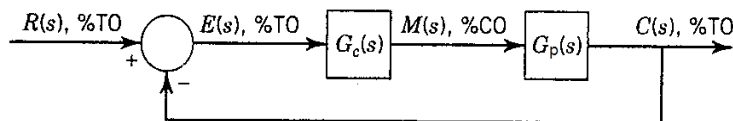
$$PID(s) = \frac{14s^2 + 59s + 72}{s(s + 9)}$$

de donde: $K_p = 5.67$; $K_i = 8$; $K_d = 0.93$; $\tau_D = 0.11$.

En donde el controlador tiene la estructura de un PID paralelo con filtro derivativo. Para un modelo de mayor orden el controlador resultante no será, en general, un controlador PID. El método aquí tratado aplica para modelos de planta de segundo orden.

Métodos Analíticos

Síntesis Directa



Lazo Cerrado

$$G_{LC}(s) = \frac{G_C(s)G_P(s)}{1 + G_C(s)G_P(s)}$$

Controlador

$$G_C(s) = \frac{1}{G_P(s)} \left(\frac{G_{LC}(s)}{1 - G_{LC}(s)} \right)$$

Métodos Analíticos

Síntesis Directa

Planta $G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$

Lazo Cerrado (deseado) $G_{LC}(s) = \text{—————}$

Controlador $G_C(s) = \frac{1}{G_p(s)} \left(\frac{G_{LC}(s)}{1 - G_{LC}(s)} \right) = \frac{1}{G_p(s)} \left(\frac{1}{\lambda s} \right)$

$$G_C(s) = \frac{\tau s + 1}{K \lambda s} = \frac{\tau}{K \lambda} \left(1 + \frac{1}{\tau s} \right) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

=> Controlador PI $K_C = \frac{\tau}{K \lambda}, \quad T_i = \tau$

Sintonización: Resumen de Métodos

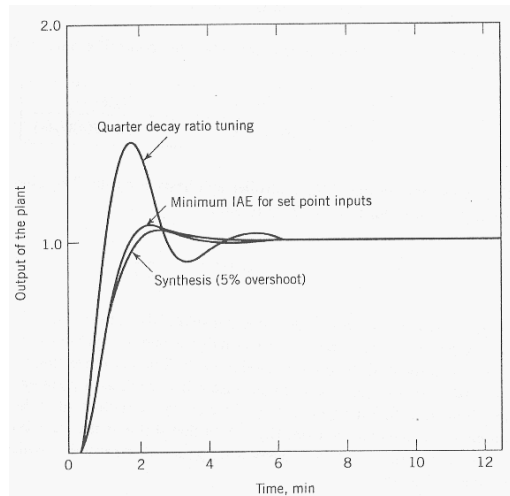


Figure 7-4.4 Closed-loop response to step change in set point for second-order process with PI controller. Model parameters: $\tau = 3.7$ min, $t_0 = 0.53$ min, and $K = 1$. (Reproduced by permission of Reference 8, copyright © ISA, 1976.)

Tomado de [2]

Sintonización: Ajuste de Ganancia

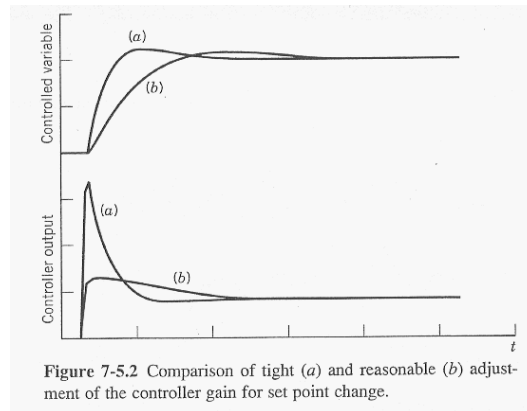


Figure 7-5.2 Comparison of tight (a) and reasonable (b) adjustment of the controller gain for set point change.

[Smith&Corripio]:

Una vez que se han seleccionado las constantes integral y derivativa, la sintonía se “reduce” a ajustar la constante proporcional.

Cuando se ajusta la ganancia del controlador, se deben considerar tanto la “estrechez” (tightness) de la acción de control como la variabilidad de la variable manipulada.

Control PID: Ejemplo Comercial

C501

The C501 is a versatile single-loop controller with advanced control features built-in as standard, e.g. gain scheduling, process optimization, alarm logic, maths and linearizers.

The instrument can be commissioned using a built-in library of application templates and advanced autotune facilities. Configurations can also be edited and stored off-line using our Windows™-based PC Configurator.

A wide range of process connections is included in the standard instrument; a choice of option cards provides additional input/output for complex applications. Modbus serial communications are available for integration with factory automation systems.

IP66 (NEMA 4X) front panel protection makes the C501 an extremely robust controller, suitable for use in a wide variety of industrial environments.

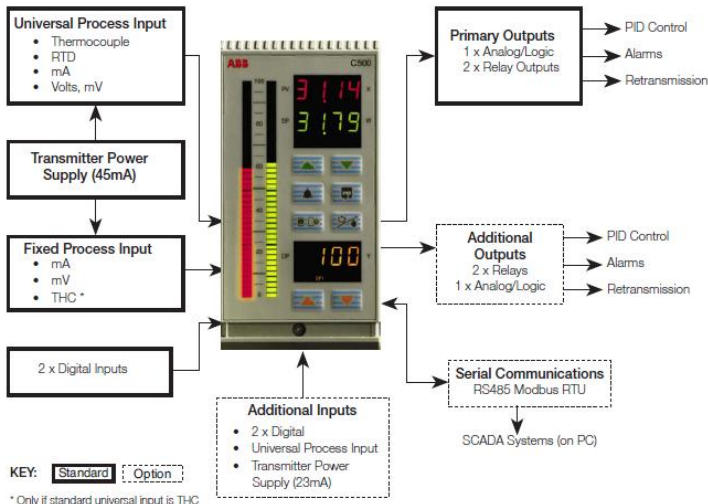


Control PID: Ejemplo Comercial

1/2 DIN Process Controller
C501

SS/C501_6

Process Connections



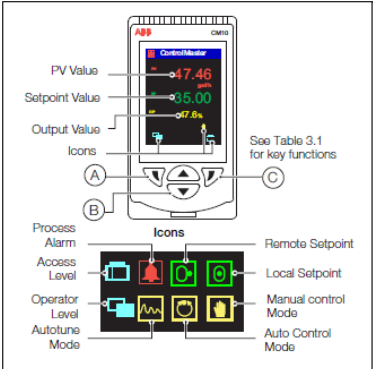
Control PID: Ejemplo Comercial

ControlMaster CM10, CM30 and CM50
Universal process controllers, 1/8, 1/4 and 1/2 DIN

3 Displays, Overview

3 Displays, Overview

3.1 CM10 Operator Page, Icons & Keys



(A)	Navigation (left) / Operator Level access key – see page 23.
(B)	Up / Down keys – highlight menu items and increase / decrease displayed values.
(C)	Navigation key (right) / programmable Soft Key – see page 39.

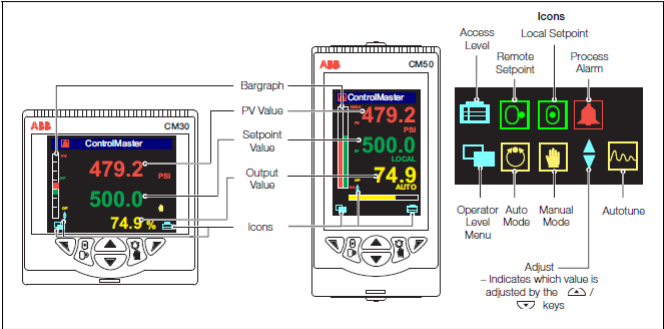
Table 3.1 CM10 Front Panel Key Functions

Note. When a Soft Key option is assigned to key (C), the Advanced Level (see page 35) must be accessed using the Operator Level access key (A).

Control PID: Ejemplo Comercial

3.2 CM30 and CM50 Operator Page, Icons & Keys

The ControlMaster CM30 and CM50 displays and icons are shown in Fig. 3.2.



The ControlMaster CM30 and CM50 front panel keys are shown in Fig. 3.3.

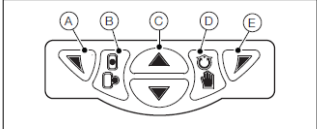


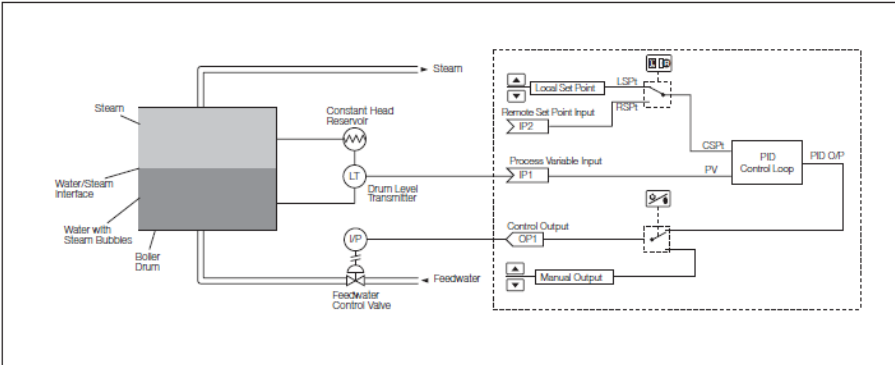
Fig. 3.3 ControlMaster CM30 and CM50 Front Panel Keys

(A)	Navigation (left) / Operator Level access key – see page 23.
(B)	Local / Remote setpoint mode selection key.
(C)	Up / Down keys – navigate up / down menus and increase / decrease displayed values.
(D)	Auto / Manual control mode selection key.
(E)	Navigation key (right) / programmable Soft Key – see page 39.

Table 3.2 CM30 / CM50 Front Panel Key Functions

Control PID: Ejemplo Comercial

Single Loop Control Template – Example



Control PID: Ejemplo Comercial

Advanced control functionality

The CM30 features many advanced control functions providing the power to bring even the most complex process under control.

Autotune

Once initial configuration is complete, a powerful autotune facility enables automatic calculation of the PID values required, enabling rapid commissioning of the CM30.

Gain scheduling

The CM30's gain scheduling functionality is used for efficient control of non-linear processes. Up to 3 different sets of PID parameters are selected automatically from a reference signal ensuring optimum control response, regardless of the process status.

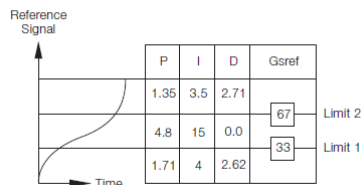


Fig. 7: Gain scheduling example

Predictive control (dead-time compensation)

Control of processes with long dead-times, such as pH dosing in a pipeline, is addressed easily using pPI control. Configured via only 3 parameters (gain, integral time and dead-time), pPI control can also be combined with gain scheduling for optimum control efficiency.

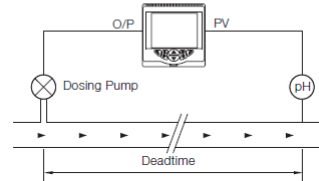


Fig. 8: Predictive control example

Adaptive control

Adaptive control enables the CM30 to adjust its control response automatically to suit changing process dynamics. This makes the CM30 particularly useful for processes with varying or uncontrolled types of load, by providing continuous tuning to maximize control efficiency. Fig. 9 shows a product used in a manufacturing process that is stored in an outside tank. The use of adaptive control within the manufacturing process compensates automatically for the change in product temperature caused by seasonal variation.

Problema de Diseño del Control

- Escogencia de la Planta
- Definir Desempeño deseado (Dominio temporal o frecuencial)
- Control
 - Imposición de una estructura del Control (ej: PID, Lead/Lag)
 - > Ajustar Desempeño en Lazo Cerrado
 - Imposición Comportamiento Lazo Cerrado
 - > Calcular Controlador Requerido
- Implementación y Validación del Comportamiento

En esta sección consideraremos el segundo enfoque:

Imposición Comportamiento de Lazo Cerrado -> Cálculo Control Requerido
(Síntesis Directa, Método Inward)

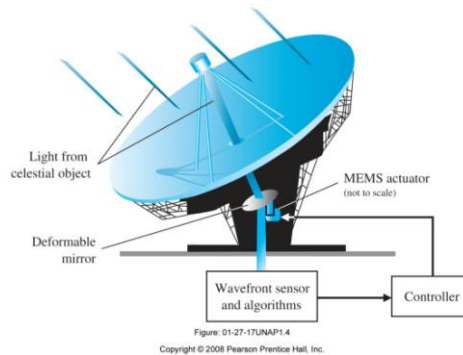
Escogencia de la Planta

Consideremos un ejemplo, se tiene un antena de la cual se conoce:

- Especificaciones → Peso y momento de inercia.
- Rango Operacional → Velocidades y aceleraciones, tanto máximas como promedio.

Se desea diseñar un sistema de control que controle la posición de dicha antena.

¿Tipo de Motor?



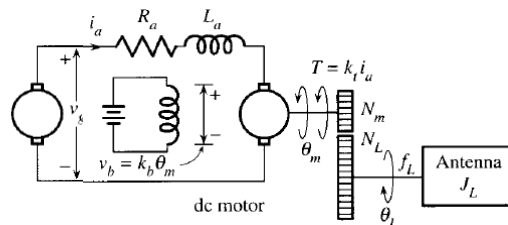
Escogencia de la Planta

Después de determinar el tamaño del motor, es necesario seleccionar el tipo: *dc*, *ac* o *hidráulico*. Esto depende de:

- Disponibilidad / Confiabilidad / Costos / Energía
- Otras consideraciones

Se deben también considerar los otros elementos constitutivos del sistema de control: sensor, transmisor (opcional) y actuador.

El conocimiento técnico y la experiencia juegan un papel importante en la escogencia.



Escogencia de la Planta

Es claro que la escogencia de la planta no es única.

(Existen múltiples opciones, se debe escoger la mejor posible)

Una vez seleccionada la planta el problema de diseño consiste en lograr hacer el mejor uso de la misma -> desempeño óptimo

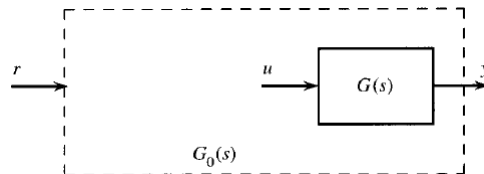
Si no se pueden lograr los objetivos de diseño

Relajar los Objetivos

Cambiar la Planta

Desempeño Lazo Cerrado

Una vez seleccionada la planta $G(s)$ el problema es diseñar un sistema global que cumpla las especificaciones de diseño.



Desempeño $\begin{cases} \text{Estacionario} \\ \text{Transitorio} \end{cases}$

$$G_0(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{\beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \cdots + \beta_m s^m}{\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \cdots + \alpha_n s^n}, \quad n \geq m$$

Desempeño Lazo Cerrado

Desempeño en Estado Estacionario - Exactitud

Entrada de Referencia Paso

$$y_s(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sG_0(s) \frac{a}{s} = aG_0(0) = a \frac{\beta_0}{\alpha_0}$$

Error normalizado de Posición

$$e_{ssp} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left| \frac{a - y(t)}{a} \right| = \left| \frac{a - a \frac{\beta_0}{\alpha_0}}{a} \right| = \left| \frac{\alpha_0 - \beta_0}{\alpha_0} \right| = |1 - G_0(0)|$$

$$e_{ssp} = 0 \leftrightarrow G_0(0) = 1 \text{ o } \beta_0 = \alpha_0.$$

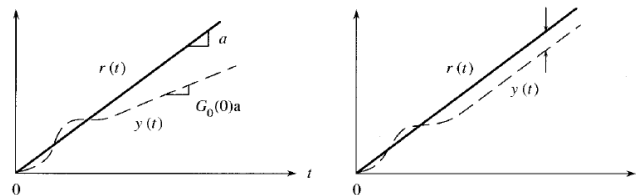
Desempeño Lazo Cerrado

Entrada de Referencia Rampa

$$y_s(t) = G_0(0)at + G'_0(0)a = \frac{\beta_0}{\alpha_0}at + \frac{\alpha_0\beta_1 - \beta_0\alpha_1}{\alpha_0^2}a$$

$$e_v(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left| \frac{r(t) - y(t)}{a} \right| = \left| \frac{at - y_s(t)}{a} \right| = \left| \left(\frac{\alpha_0 - \beta_0}{\alpha_0} \right)t - \frac{\alpha_0\beta_1 - \beta_0\alpha_1}{\alpha_0^2} \right|$$

$$e_v(t) < \infty \leftrightarrow G_0(0) = 1 \text{ o } \beta_0 = \alpha_0.$$



Desempeño Lazo Cerrado

Entonces, con $\beta_0 = \alpha_0$ se tendría error finito de velocidad:

$$e_v(t) = \left| \frac{\alpha_0 \beta_1 - \beta_0 \alpha_1}{\alpha_0^2} \right| = \left| \frac{\beta_1 - \alpha_1}{\alpha_0} \right|$$

Para lograr *Error de Velocidad Nulo*:

$$e_{ssv} = 0 \leftrightarrow G_0(0) = 1 \text{ y } G_0'(0) = 0 \text{ o } \beta_0 = \alpha_0 \text{ y } \beta_1 = \alpha_1.$$

Por otra parte, se dice que la salida $y(t)$ de un sistema rastrea o sigue asintóticamente a una señal de referencia $r(t)$ si

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - r(t)| = 0$$

Si $G_0(0) = 1$ o $\beta_0 = \alpha_0 \rightarrow e_{ssp} = 0$

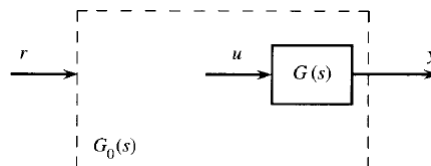
Si $G_0(0) = 1$ y $G_0'(0) = 0$ o $\beta_0 = \alpha_0$ y $\beta_1 = \alpha_1 \rightarrow e_{ssv} = 0$

Si $G_0(0) = 1$, $G_0'(0) = 0$ y $G_0''(0) = 0$ o $\beta_0 = \alpha_0$, $\beta_1 = \alpha_1$ y $\beta_2 = \alpha_2 \rightarrow e_{ssa} = 0$

Funciones de Transferencia Implementables

Introducción

Idealmente $G_0(s) = 1$



$G_0(s) = 1$ no es posible de implementar.

Funciones de Transferencia Implementables

Consideremos una planta con función de transferencia propia

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$$

entonces $G_0(s)$ es implementable si y solo si:

- $\deg D_0(s) - \deg N_0(s) \geq \deg D(s) - \deg N(s)$
- Todos los ceros no minifase de $N(s)$ deben aparecer en $N_0(s)$.
- $D_0(s)$ debe ser Hurwitz.

donde

$$G_0(s) = \frac{N_0(s)}{D_0(s)}$$

Funciones de Transferencia Implementables

Ejemplo: Para $G(s)$ dada, diga cuales $G_0(s)$ son implementables

$$G(s) = \frac{(s+2)(s-1)}{s(s^2-2s+2)}$$

$$G_0(s) = 1$$

$$G_0(s) = \frac{s-1}{(s+3)(s+1)^2}$$

$$G_0(s) = \frac{s+2}{(s+3)(s+1)}$$

$$G_0(s) = \frac{(2s-3)(s-1)}{(s+2)^3}$$

$$G_0(s) = \frac{s-1}{s(s+2)}$$

$$G_0(s) = \frac{(2s-3)(s-1)(s+1)}{(s+2)^5}$$

$$G_0(s) = \frac{s-1}{(s+3)(s+1)}$$

Índices de Desempeño

Los siguientes son algunos ejemplos de índices de desempeño vistos en capítulos anteriores:

$$I_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad I_{ISE} = \int_0^{\infty} |e(t)|^2 dt$$

$$I_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad I_{ITSE} = \int_0^{\infty} t |e(t)|^2 dt$$

Estos no deben ser usados sin considerar limitaciones físicas.

Ejemplo: Dada $G(s)$

$$G(s) = \frac{(s+2)}{s(s+3)} \quad G_0(s) = \underbrace{\frac{a}{s+a}}_{\text{¿Implementable?}}, \quad a > 0$$

Sistemas Óptimos ITAE

Error de Posición Nulo

$$G_0(s) = \frac{\alpha_0}{s^n + \alpha_{n-1}s^{n-1} + \dots + \alpha_2s^2 + \alpha_1s + \alpha_0}$$

Denominadores

$$\begin{aligned} & s + w_0 \\ & s^2 + 1.4w_0s + w_0^2 \\ & s^3 + 1.75w_0s^2 + 2.15w_0^2s + w_0^3 \\ & s^4 + 2.1w_0s^3 + 3.4w_0^2s^2 + 2.7w_0^3s + w_0^4 \\ & s^5 + 2.8w_0s^4 + 5w_0^2s^3 + 5.5w_0^3s^2 + 3.4w_0^4s + w_0^5 \\ & s^6 + 3.25w_0s^5 + 6.6w_0^2s^4 + 8.6w_0^3s^3 + 7.45w_0^4s^2 + 3.95w_0^5s + w_0^6 \\ & s^7 + 4.475w_0s^6 + 10.42w_0^2s^5 + 15.08w_0^3s^4 + 15.54w_0^4s^3 + 10.64w_0^5s^2 + 4.58w_0^6s + w_0^7 \\ & s^8 + 5.2w_0s^7 + 12.8w_0^2s^6 + 21.6w_0^3s^5 + 25.75w_0^4s^4 + 22.2w_0^5s^3 + 13.3w_0^6s^2 + 5.15w_0^7s + w_0^8 \end{aligned}$$

Sistemas Óptimos ITAE

Error de Velocidad Nulo

$$G_0(s) = \frac{\alpha_1 s + \alpha_0}{s^n + \alpha_{n-1} s^{n-1} + \dots + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}$$

Denominadores

$$\begin{aligned} & s^2 + 3.2w_0 s + w_0^2 \\ & s^3 + 1.75w_0 s^2 + 3.25w_0^2 s + w_0^3 \\ & s^4 + 2.41w_0 s^3 + 4.93w_0^2 s^2 + 5.14w_0^3 s + w_0^4 \\ & s^5 + 2.19w_0 s^4 + 6.5w_0^2 s^3 + 6.3w_0^3 s^2 + 5.24w_0^4 s + w_0^5 \\ & s^6 + 6.12w_0 s^5 + 13.42w_0^2 s^4 + 17.16w_0^3 s^3 + 14.14w_0^4 s^2 + 6.76w_0^5 s + w_0^6 \end{aligned}$$

Sistemas Óptimos ITAE

Error de Aceleración Nulo

$$G_0(s) = \frac{\alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}{s^n + \alpha_{n-1} s^{n-1} + \dots + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}$$

Denominadores

$$\begin{aligned} & s^3 + 2.97w_0 s^2 + 4.94w_0^2 s + w_0^3 \\ & s^4 + 3.71w_0 s^3 + 7.88w_0^2 s^2 + 5.93w_0^3 s + w_0^4 \\ & s^5 + 3.81w_0 s^4 + 9.94w_0^2 s^3 + 13.44w_0^3 s^2 + 7.36w_0^4 s + w_0^5 \\ & s^6 + 3.93w_0 s^5 + 11.68w_0^2 s^4 + 18.56w_0^3 s^3 + 19.3w_0^4 s^2 + 8.06w_0^5 s + w_0^6 \end{aligned}$$

Sistemas Óptimos ITAE – Restricción del Control

Ejemplo: Considere el Sistema con Función de transferencia

$$G(s) = \frac{1}{s(s+2)}$$

Encuentre un sistema óptimo ITAE con e_p nulo, manteniendo

$$|u(t)| \leq 3 \quad (\text{Restricción del esfuerzo de control})$$

La función de transferencia global óptima ITAE es

$$G_0(s) = \frac{w_0^2}{s^2 + 1.4w_0s + w_0^2}$$

¿Cómo se Selecciona w_0 ?

Sistemas Óptimos ITAE – Restricción del Control

Esfuerzo del Controlador

La función de transferencia que relaciona $U(s)$ con $R(s)$ está dada por

$$Q(s) = \frac{U(s)}{R(s)} = \frac{w_0^2 s(s+2)}{s^2 + 1.4w_0s + w_0^2}$$

Simulando el sistema se observa que el máximo valor de la salida del controlador $u(t)$ ocurre en $t = 0^+$. Entonces aplicando *Teorema del Valor Inicial*,

$$u_{\max} = u(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} sU(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{w_0^2 s(s+2)}{s^2 + 1.4w_0s + w_0^2} = w_0^2$$

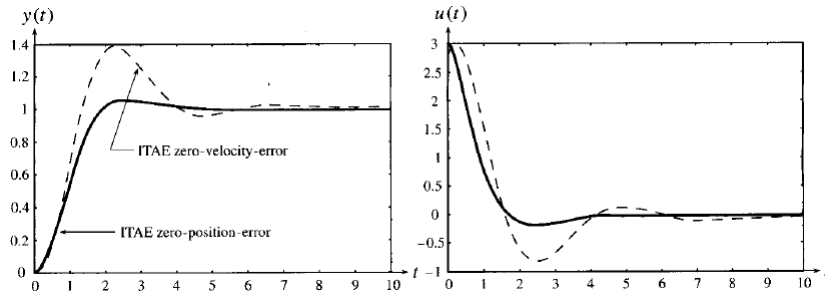
Puesto que se consideró $|u(t)| \leq 3$ entonces $u_{\max} = 3$, de donde

$$G_0(s) = \frac{3}{s^2 + 2.4s + 3}$$

Sistemas Óptimos ITAE – Restricción del Control

Sistema de Segundo Orden Óptimo con Restricciones en el Control

Respuesta al escalón unitario de $G_0(s)$ y Acción de Control $u(t)$



Sintonización

Auto-tuning (Automatic tuning)

Ajuste automático de los parámetros. Se clasifica como una técnica de control adaptativa intermitente (por demanda/necesidad).

Self-tuning

Actualización continua de los parámetros del controlador. Capacidad de adaptación en línea.

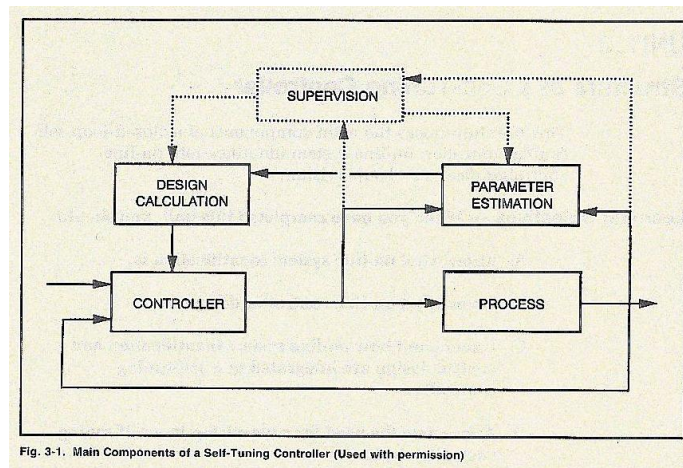
Sintonización

Auto-tuning (Automatic tuning)

- To improve engineering efficiency by automating the time-consuming and tedious task of controller tuning.
- To automate the on-line design of a gain-scheduling controller, making it much easier to use.
- To enable more sophisticated model-based advanced control to be applied with relative ease as its commissioning and the necessary periodic controller tuning tasks are automated.

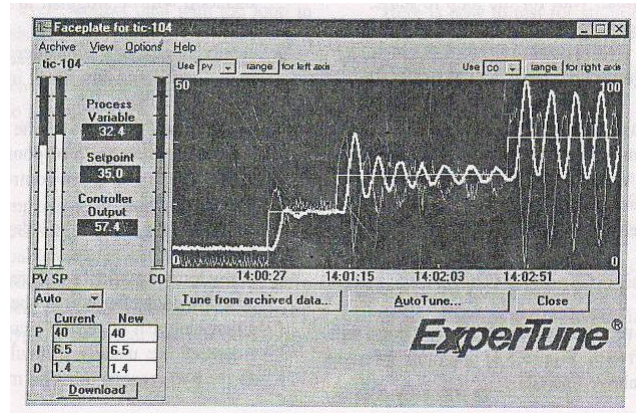
Sintonización

Self-tuning (Continuous adaptation)



Sintonización: Herramientas

ExperTune



Sintonización: Herramientas

ExperTune

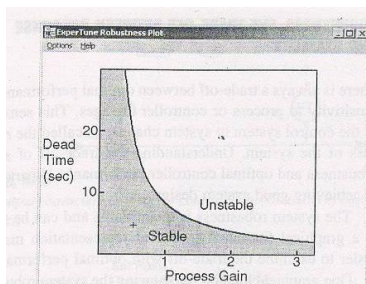


FIG. 5.1v
The marginal stability line. (Courtesy of ExperTune, Inc.)

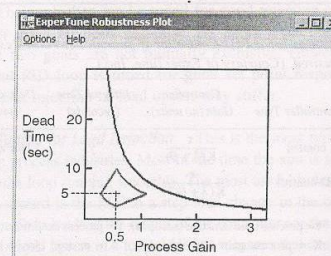
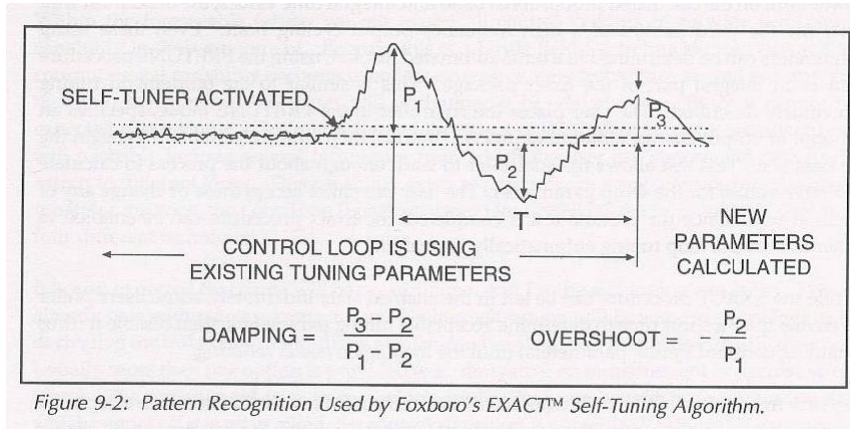


FIG. 5.1w
A full robustness plot includes the area within which the stability margin is two in any direction. (Courtesy of ExperTune, Inc.)

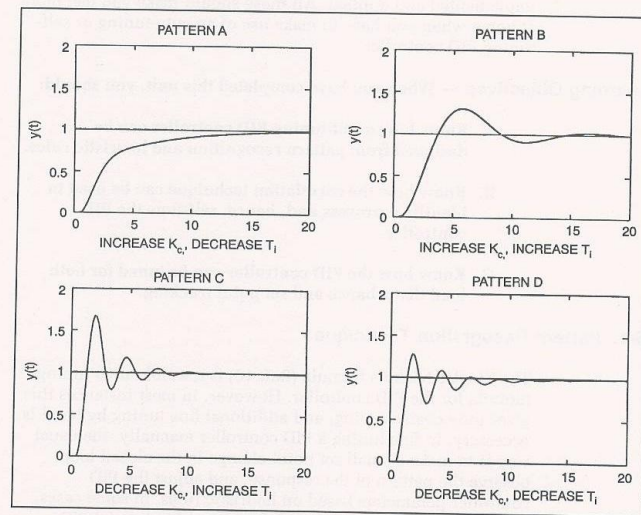
Sintonización: Herramientas

Foxboro - EXACT



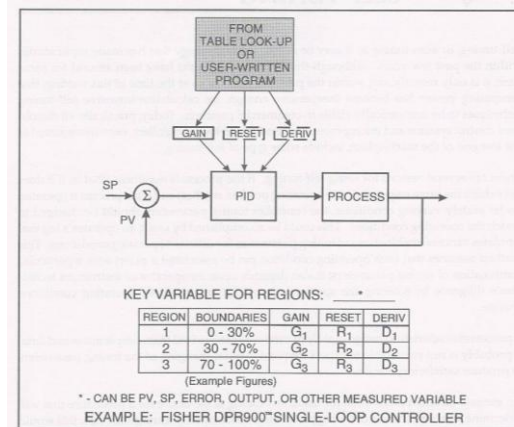
Sintonización: Herramientas

Foxboro - EXACT



Sintonización: Herramientas

Gain Scheduling



Términos

- **ATO**, Air To Open – **FC**, Fail Closed
- **ATC**, Air To Close – **FO**, Fail Open
- **DIR**, Direct action (Inc/Inc) / **REV**, Reverse action (Inc/Dec)
- **On/Off** – **On/Off** con histéresis
- **PID** – Proportional (**P**): G/%, Reset (**I**): [rpm]/[mpr], Rate (**D**): Td [min]
- **Reset windup**
- **Alpha, Beta, Gamma**
- **Estructuras: Ideal, Series, Parallel**
- **Modelo FOLPDT**
- **Tuning: Ziegler-Nichols / Cohen-Coon / Ajustabilidad**
- **Respuesta Óptima: IAE, ISE, ITSE, ITAE**
- **Síntesis directa -> Escogencia de la Función de Transfer Global**
- **Auto-tuning / Self-tuning**
- **Gain Scheduling**

Referencias

1. *Regulatory and Advanced Regulatory Control: System Development*, H. L. Wade, ISA, 1994.
2. *Commande Numérique de Systèmes Dynamiques*, R. Longchamp, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, EPFL, Lausanne, Suisse.
3. *Principles and Practice of Automatic Control*, C. Smith & A. Corripio, Wiley, 1997.
4. *Instrument Engineers' Handbook*, vol.II, Bela G. Liptak, CRC Taylor & Francis and ISA, 2006.
5. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, 2nd. Edition, K. Astrom, T. Hagglund, ISA, 1995.
6. *Tuning and Control Loop Performance*, 3rd Edition, G.K. McMillan, ISA, 1994.