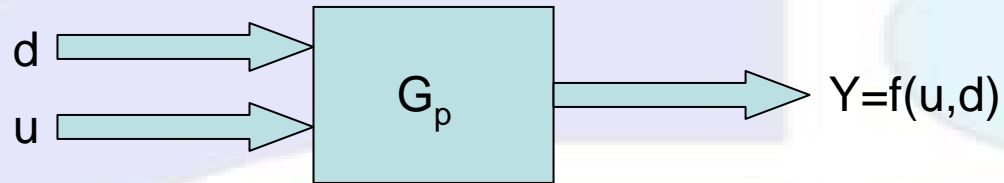
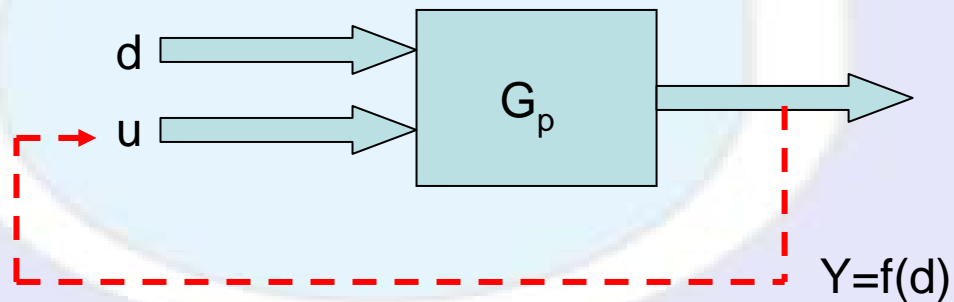


DINAMICA Y CONTROL DE PROCESOS

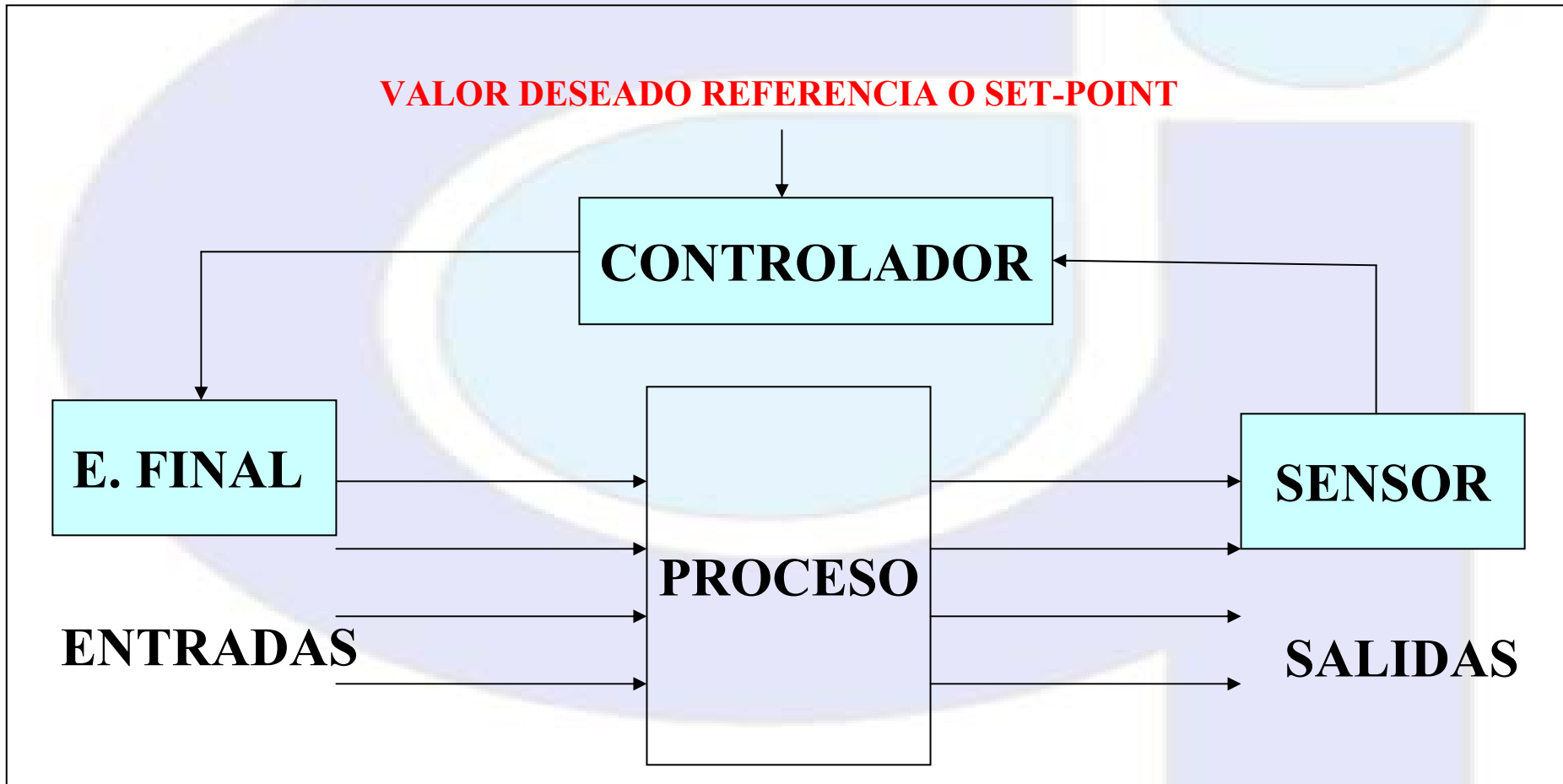


LAZO ABIERTO



LAZO CERRADO O FEEDBACK O RETROALIMENTADO

PODEMOS DISTINGUIR 3 ELEMENTOS BASICOS



Componentes que se distinguen en un proceso automatizado



Interfase -operador

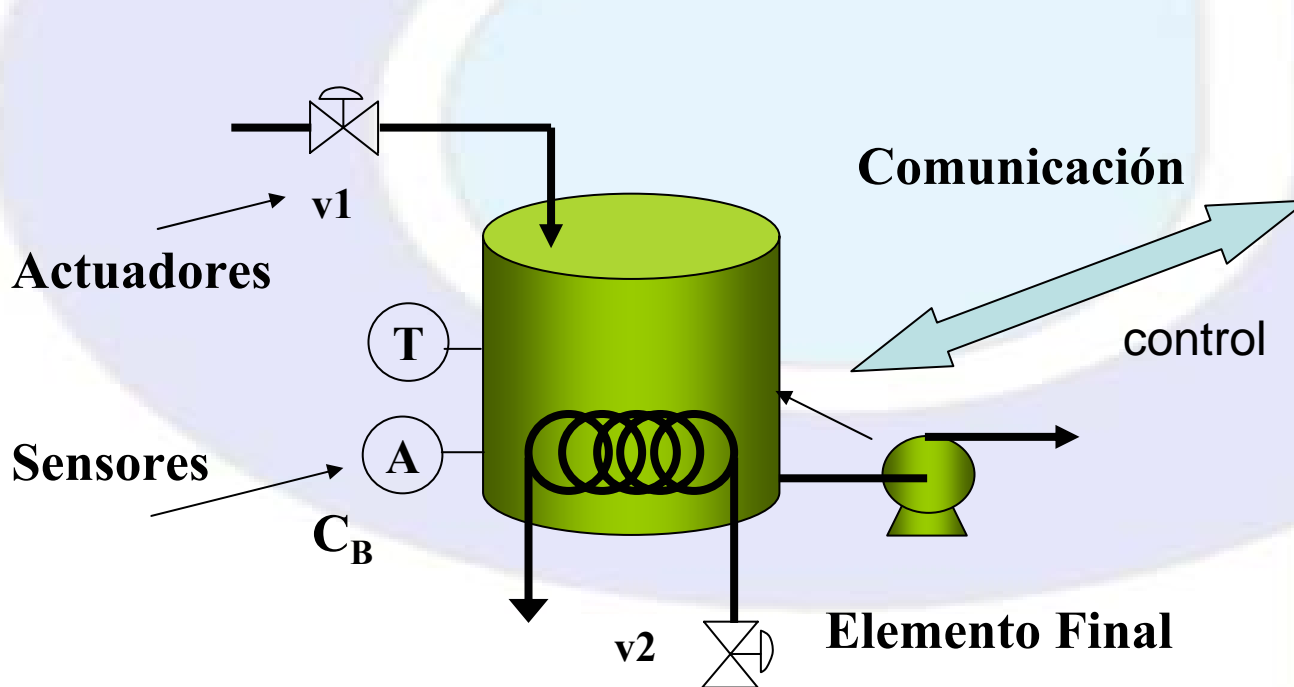
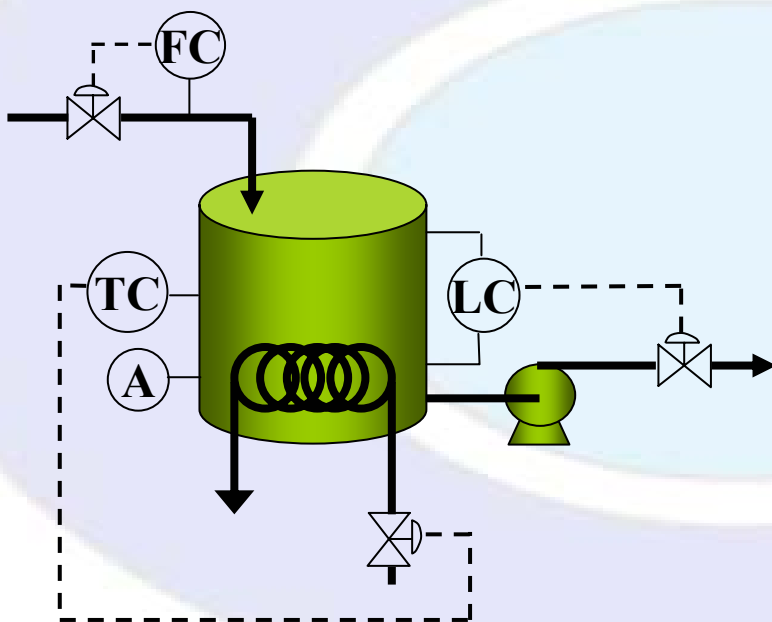


Diagrama “Piping and instrument (P&ID)” es el instrumento ingenieril para describir un lazo de control basado en símbolos estandarizados (ISA*)



Variables

F = Flujo

L = Nivel

P = Presión

T = Temperatura

A = Composición

Acciones

I = Indicador

C = Controlador

R = Registrador

T = Transmisor

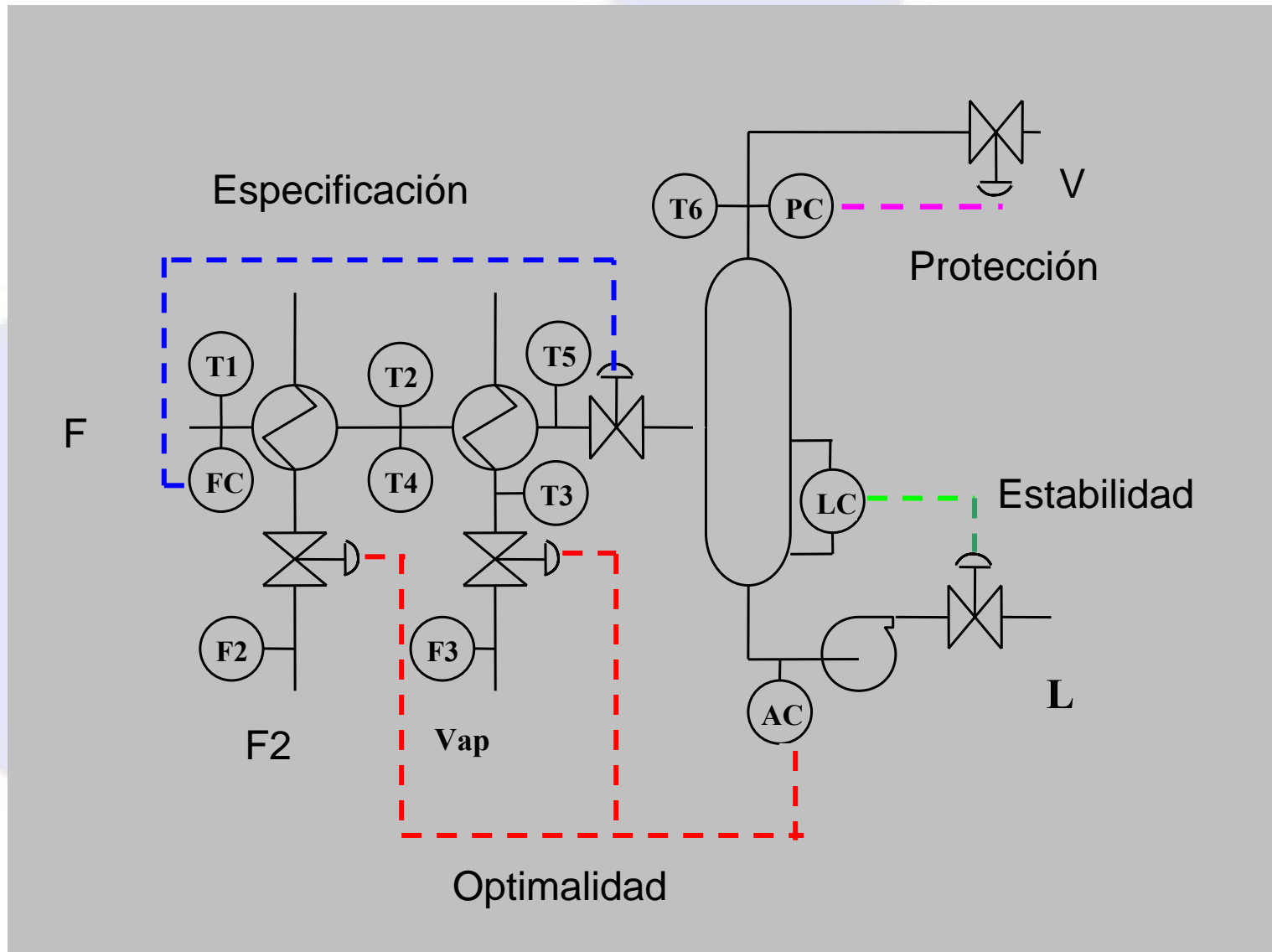
TI : Indicador de Temperatura

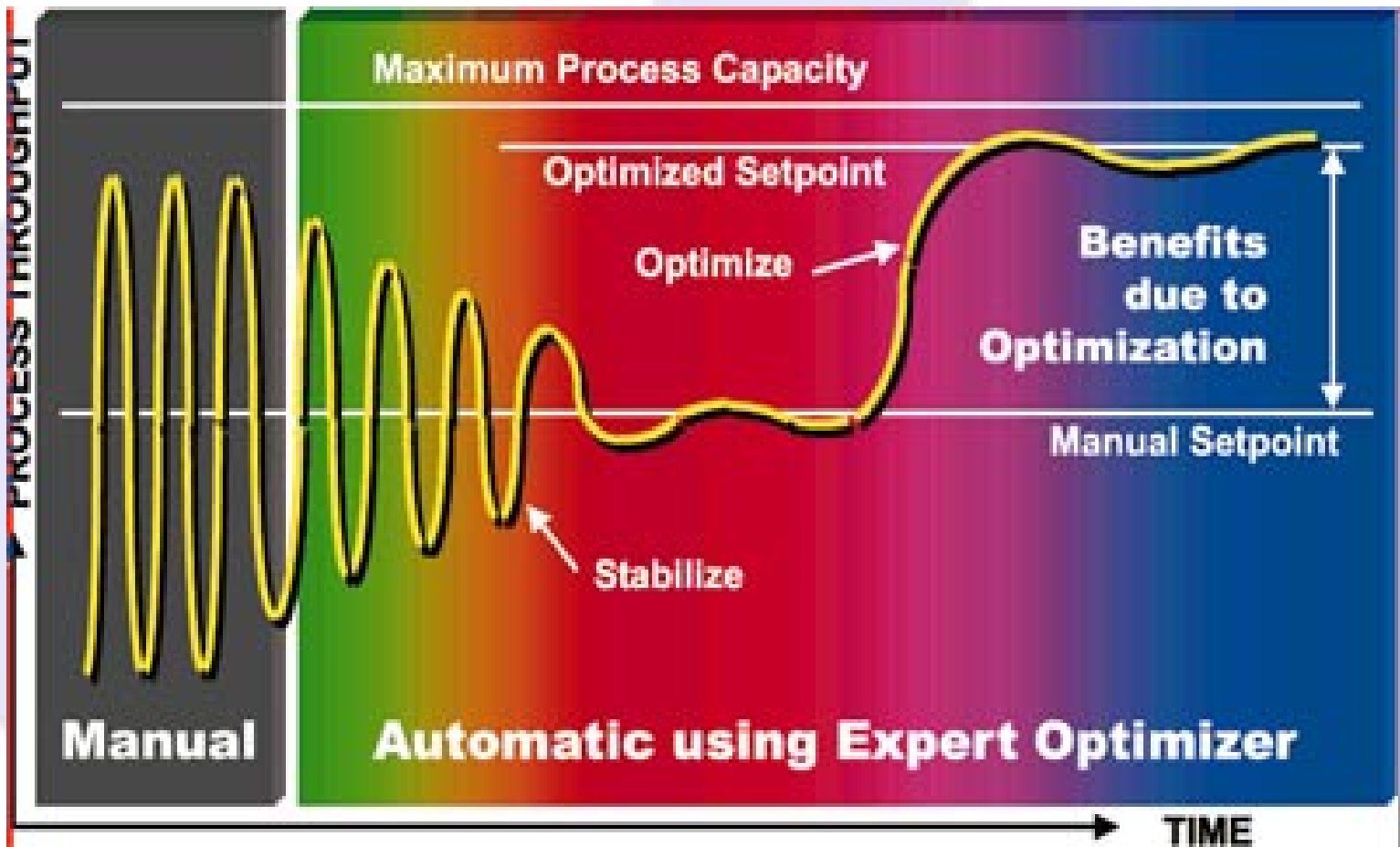
FC: Controlador de Flujo

LIC: Indicador y controlador de nivel

LOS OBJETIVOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

- SEGURIDAD
- PROTECCION AMBIENTAL
- PROTECCION A LOS EQUIPOS DEL PROCESO
- OPERACIÓN ESTABLE
- PRODUCTOS EN ESPECIFICACION
- OPTIMIZACION DE LA OPERACIÓN
- MONITOREO DIAGNOSTICO





ELEMENTO DE MEDICION O SENSORES

Son dispositivos que permiten la medición o detección de la propiedad a controlar.

Corresponde al elemento clave del lazo ya que :

- Si se puede medir → se puede controlar
- Si falla entonces el lazo no se puede utilizar

Tema muy amplio y de constante evolución tecnológica debido a los avances en la electrónica, biotecnología, nuevos materiales, etc. El desarrollo de nuevos sensores es una industria que reporta muchos \$\$\$\$

En revistas especializadas se publican las tecnologías para medir las propiedades mas importantes (F,T,P,A, etc) y guías de selección

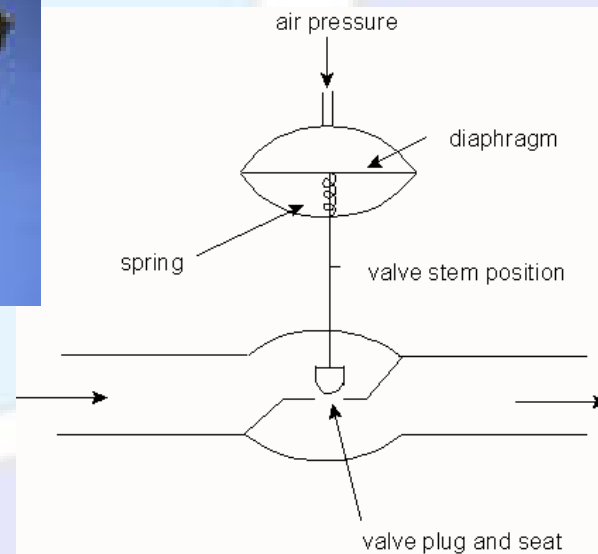
Perry cap-22

Temas asociados: Calibración, “ruido”, reconciliación.

USACH / Depto. Ing. Química / Dinámica & Control de Procesos / Dr. Francisco Cubillos

Elemento Final de Control : Dispositivo que modifica la variable manipulada, habitualmente flujo o energía

Válvulas motorizadas, reóstatos, Variadores de frecuencia (rpm)



Tema importante: Dimensionamiento de válvulas de control

COMUNICACIONES

Dispositivos y protocolos que permiten transmitir y entender las señales entre los distintos elementos del lazo.

Las mas comunes son :

TRANSMISORES (Transmitter) : Convierten la señal de un sensor en otra señal factible de ser transmitida a distancia con seguridad y eficiencia.

CONVERSORES: Convierten señales de diferente tipo (Análogas-digitales-pulsos, frecuencia)

PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

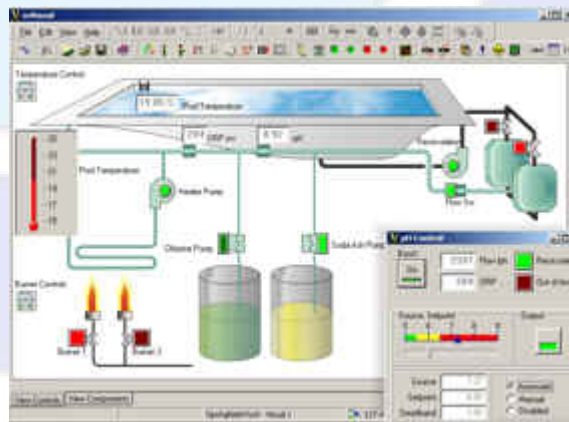
- Neumática (3 -15 psig)
- Corriente (4-20 mA)
- otros mas recientes : FiedlBus, HART, Modicon, TCP/IP

CONTROLADORES

Dispositivo o sistema que especifica el valor (o el cambio) en la variable manipulada en función del valor deseado (referencia o set-point) para la variable controlada.

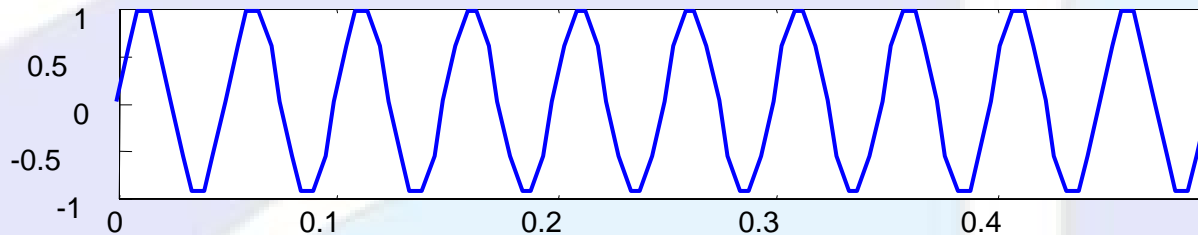
Distinguimos:

- Valor deseado: Referencia, set-point o consigna para la VC
- Ley de Control : El algoritmo matemático usado en el controlador
- Modo de Operación : Manual o Automático



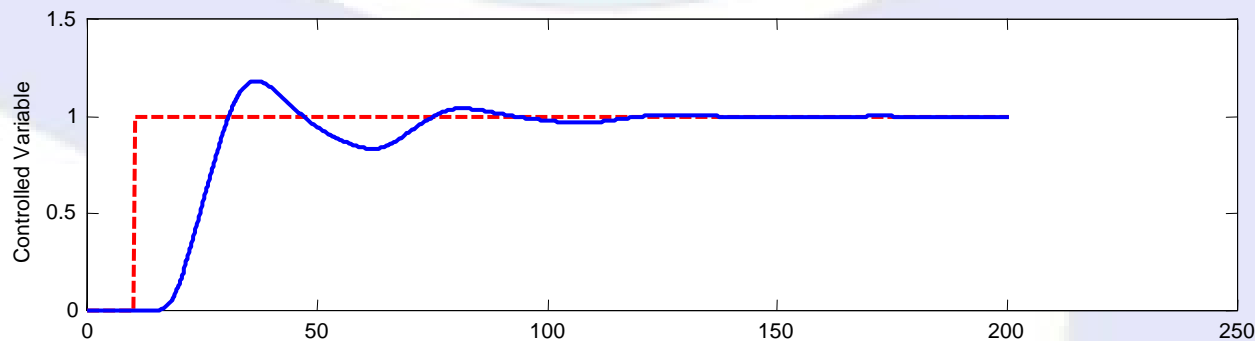
Tipos de controladores

- On/Off : dos posiciones o estados lógicos para la VM (estabilidad)



- PLC : Varios estados lógicos para la VM (secuencia)
- PID (proporcional+integral+derivativo)

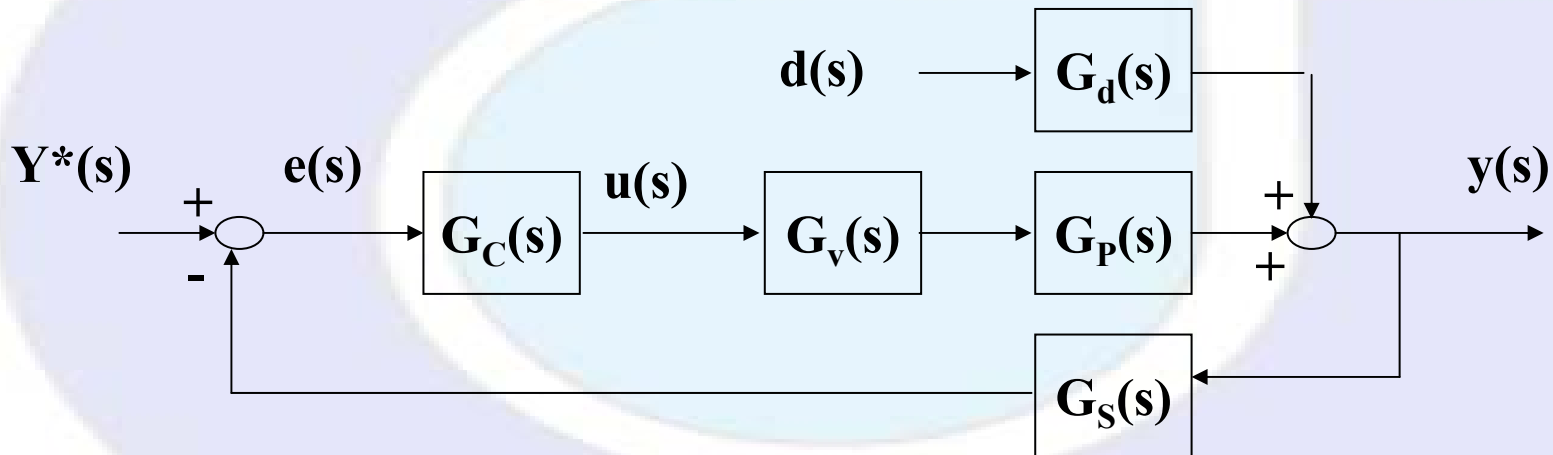
Controlador universal para posicionar al proceso en el Set-point considerando perturbaciones, y cambios dinámicos. Este controlador es el más utilizado para mantener la referencia .



CONTROL CONVENCIONAL

- Un solo lazo de control con elementos lineales representados mediante F.T.
- El controlador actúa en función del error dado por :

$e = (Y^* - Y)$ con Y^* el Set-point e Y la variable controlada

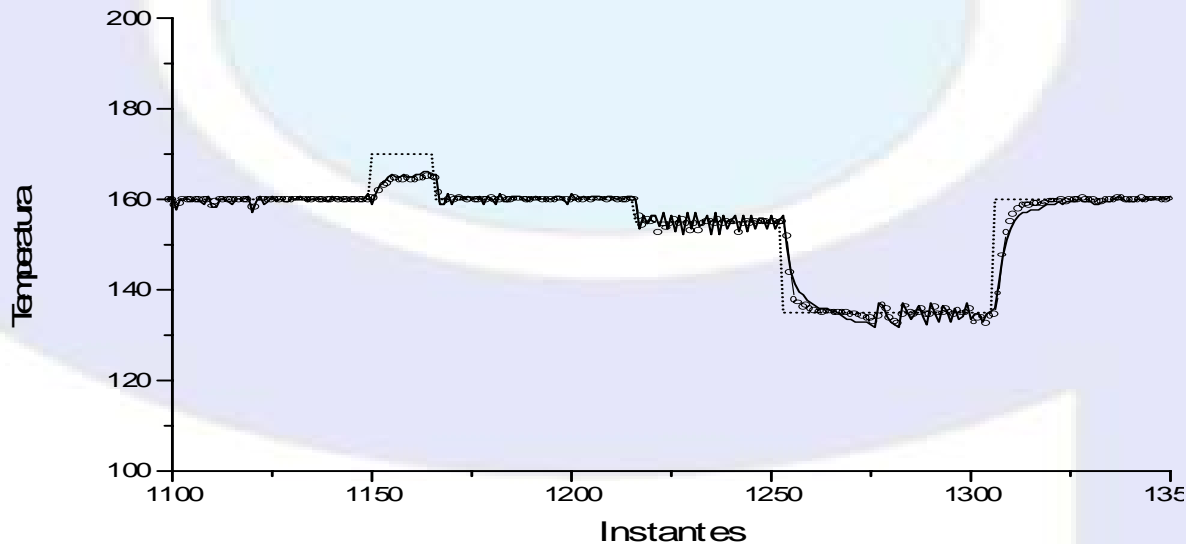


$G_C(s)$ = controlador $G_V(s)$ = válvula $G_P(s)$ = proceso

$G_S(s)$ = sensor $G_d(s)$ = perturbación o carga

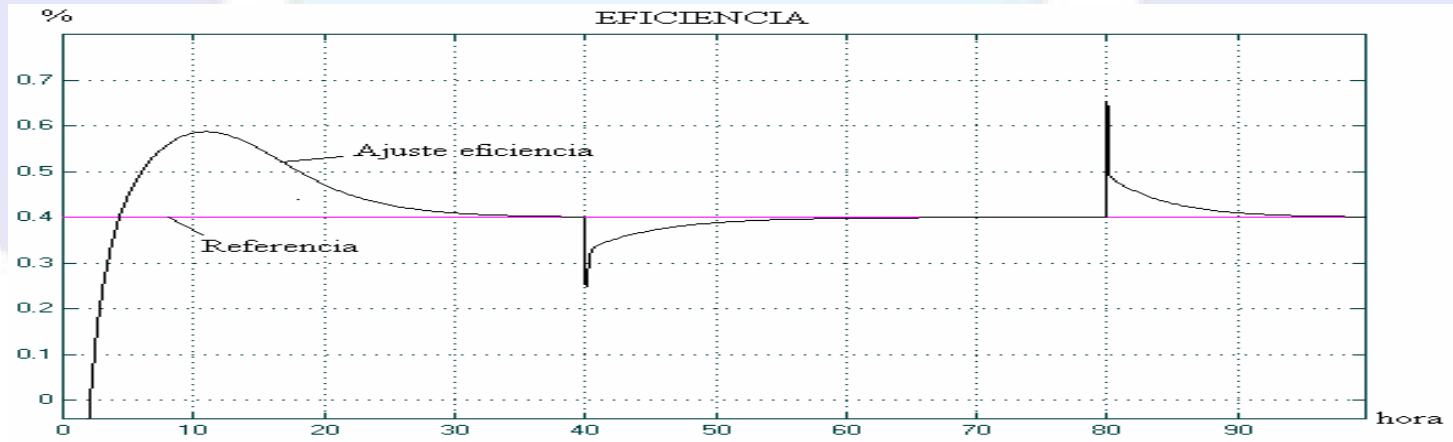
Respuesta Servo: Salida del sistema en lazo cerrado cuando cambia el set-point. Llamado problema servo o de seguimiento de set-point (Piloto automático)

$$\frac{Y(s)}{Y^*(s)} = \frac{G_p(s)G_v(s)G_c(s)}{1 + G_p(s)G_v(s)G_c(s)G_S(s)}$$

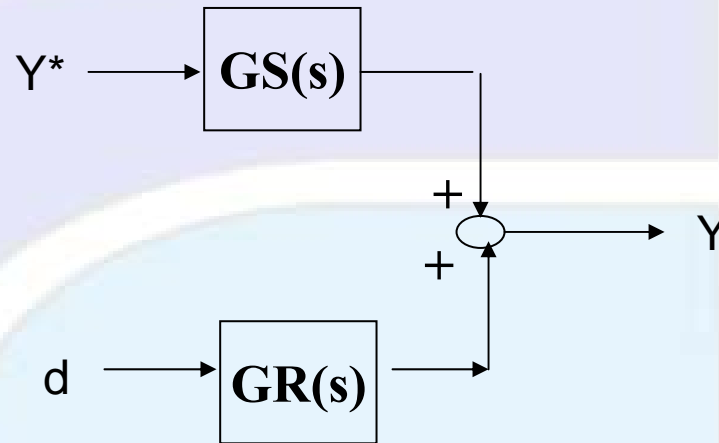


Respuesta Regulatoria : Salida del sistema en lazo cerrado cuando esta sometido a una perturbación. Llamado problema regulatorio o de de mantención del set-point

$$\frac{Y(s)}{d(s)} = \frac{G_d(s)}{1 + G_p(s)G_v(s)G_c(s)G_s(s)}$$



Un sistema en lazo cerrado puede ser analizado como un sistema en lazo abierto con dos entradas y una salida según:



GR: F. de Transferencia de problema "regulatorio"

GS: F. de transferencia de problema "servo"

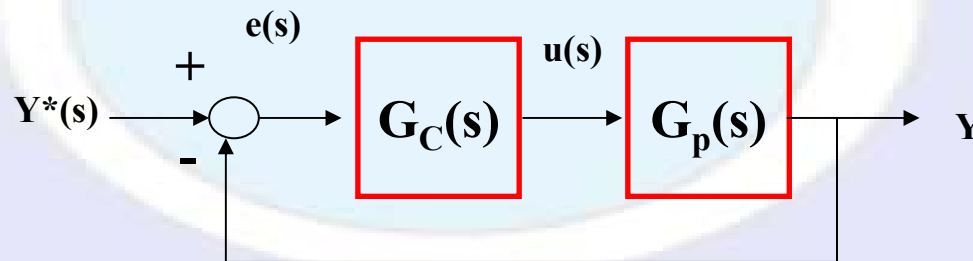
Se puede generalizar la F.T de lazo cerrado según:

$$FT \text{ lazo cerrado} = \frac{FT \text{ lazo abierto}}{1 + FT \text{ ciclo}}$$

Para efectos de análisis y diseño de controladores, se puede indicar lo siguiente:

- El problema regulatorio es un caso especial del problema servo por lo que un sistema debe analizarse en base a este último caso
- Los sensores, transductores, E. final y otros componentes son construidos para ser lineales y con una respuesta muy rápida por lo que solo aportan en el lazo un efecto de ganancia.

Por lo anterior, y para efectos de análisis, sólo son relevantes el controlador y el proceso servo según:



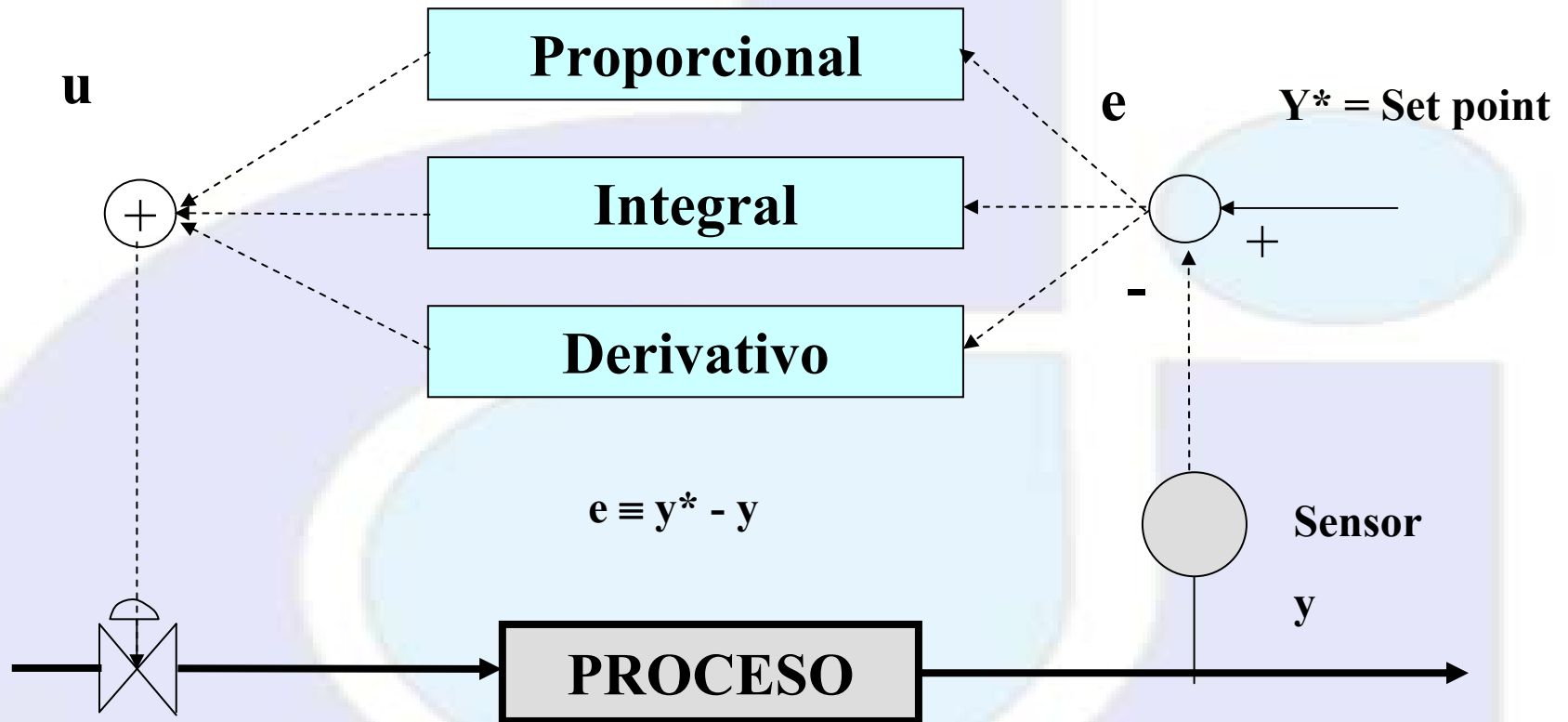
$$\frac{Y(s)}{Y^*(s)} = \frac{G_p(s)G_c(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)}$$

CONTROLADOR P I D

De Proporcional, Integral , Derivativo, este controlador fue desarrollado en los años 40 y aun mantiene su plena vigencia debido a:

- Amplia aplicabilidad a sistemas lineales y cuasi-lineales
- Fácil de implementar en diferentes ambientes de ejecución
- Configuración flexible según servicio (P, PI, PID, PD)
- Acepta un solo lazo de control, pero pueden configurarse en forma mas compleja.
- Parámetros y sintonía relativamente simple

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^{\infty} e(t) dt + \tau_d \frac{d e}{dt} \right] + u_o$$



Tres “modos” para controlar el proceso : P,I,D

K_c, τ_i, τ_d son parámetros ajustables que ponderan cada acción

MODO PROPORCIONAL

En este modo la salida del controlador es proporcional al valor del error según:

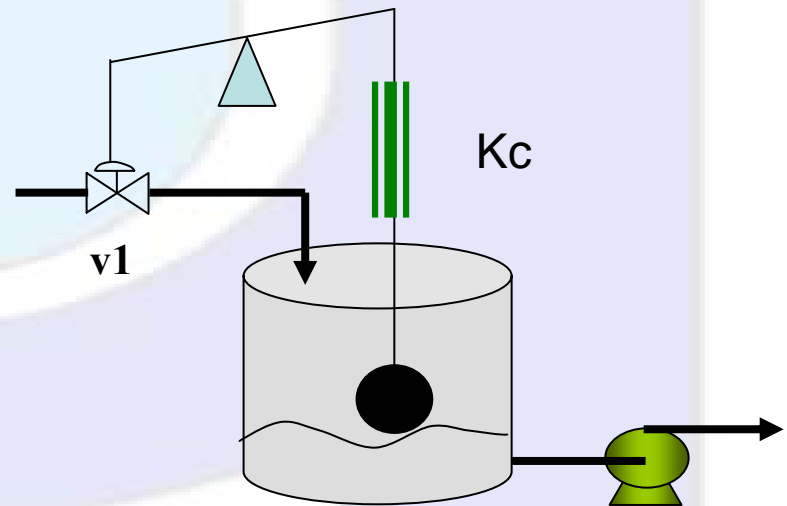
$$u(t) = K_c [e(t)] + u_o$$

$$G_C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_C$$

K_c es el parámetro de ajuste o 'Ganancia' del controlador También se usa el concepto de Banda Proporcional

$$BP = 100/K_c$$

Queda claro que K_c es una medida del grado de severidad de la respuesta del controlador



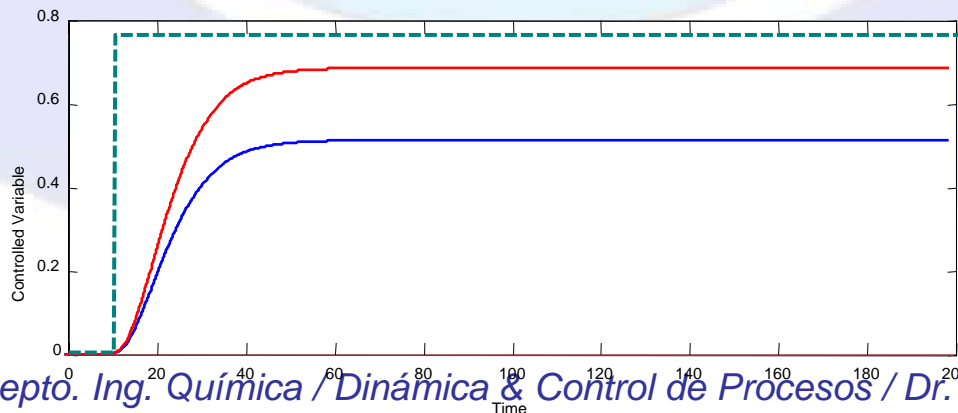
Análisis dinámico modo proporcional:

Supongamos un sistema de primer orden controlado por un controlador P en lazo cerrado. Podemos concluir que:

- El sistema en lazo cerrado sigue siendo de primer orden
- La respuesta final a un escalón de magnitud A en el set-point es:

$$y(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{A K_c G_p}{s (1 + K_c G_p)} = \frac{A * K_c K_p}{1 + K_c K_p} \neq A$$

Es decir **no llega al set-point** y se dice que presenta 'offset'

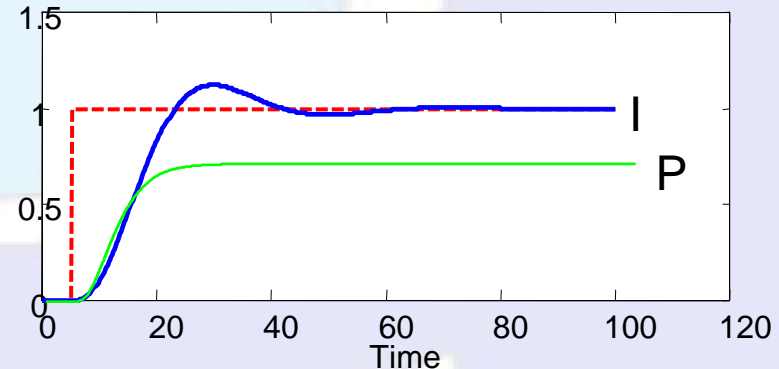
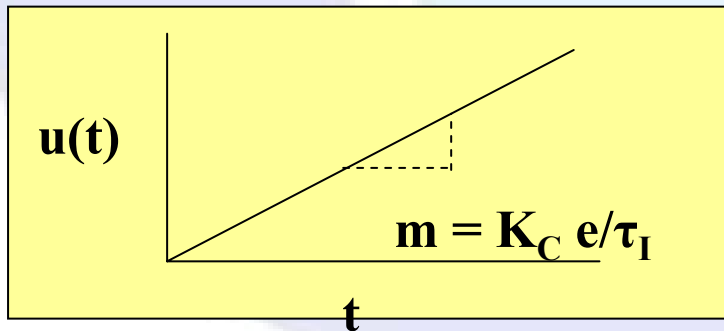


MODO INTEGRAL

La acción integral se incorpora en el algoritmo para que la salida iguale al set-point. La expresión para la acción integral es :

$$u(t) = \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^{\infty} e(t) dt + I_I \quad G_C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_c}{\tau_I} \frac{1}{s}$$

El modo integral aumenta la respuesta cuando 'e' se mantiene constante



El parámetro τ_i se conoce como tiempo integral (min) y al inverso se le llama 'reset time'

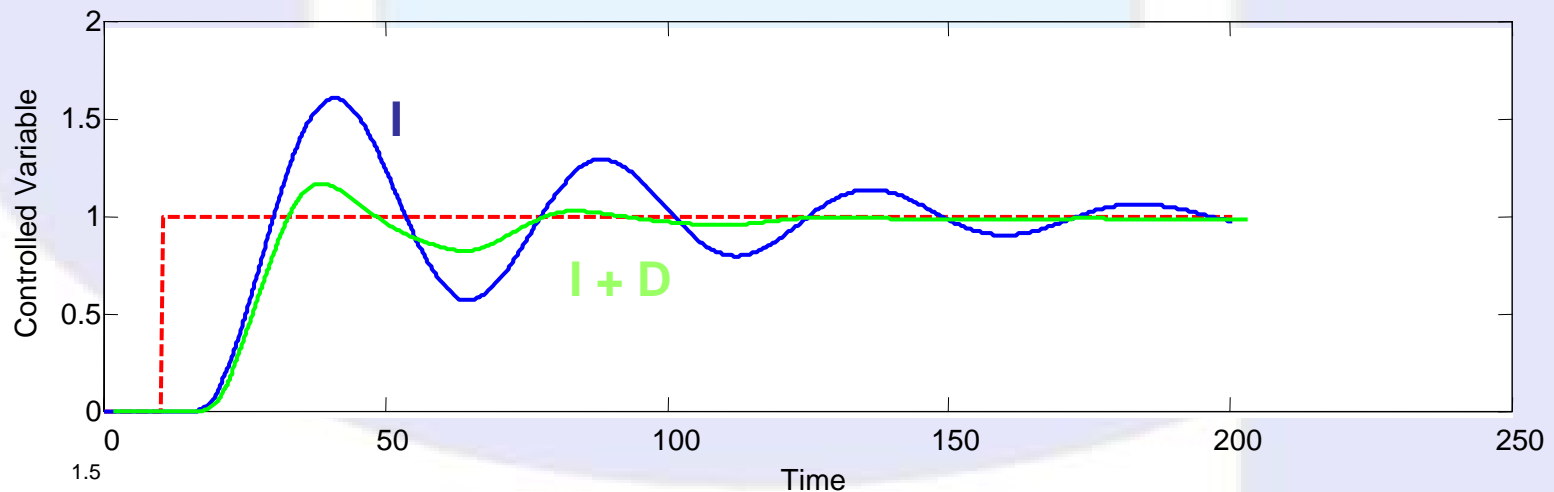
Se puede demostrar que:

- La acción integral aumenta el orden del sistema c/r al proceso en lazo abierto.
- La acción integral es capaz de llevar al proceso hacia el set-point. **Offset=0**

$$y(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{A G_c G_p}{s + G_c G_p} = A$$

Modo Derivativo

Si bien la acción integral permite llegar al set-point, esta introduce una mayor inestabilidad en el lazo que se manifiesta en una mayor oscilación y factibilidad de caer en la zona inestable. Para disminuir el grado de oscilación se incorpora la acción derivativa, que en términos prácticos produce un aumento en el período de oscilación permitiendo amortiguar la respuesta.



La expresión para la acción derivativa es:

$$u(t) = K_c \tau_d \frac{de(t)}{dt} + I_D \quad G_C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_c \tau_d s$$

El parámetro τ_d se conoce como el tiempo derivativo a “Rate”

La acción derivativa no hace control por si sola por lo que siempre va acompañada de acción P o PI.

La acción derivativa introduce un ‘cero real negativo’ mejorando las cualidades de estabilidad, por lo que su principal utilidad es estabilizar sistemas muy oscilatorios o inestables.

No es recomendable usar la acción derivativa cuando la variable controlada presenta mucho ruido.

Selección del controlador

La selección del controlador depende de las consideraciones dinámicas del proceso y de los objetivos del lazo de control. Así:

- Es permitido offset, entonces usar P
- Es necesario offset cero, usar P+I
- El sistema es lento, usar P+I+D
- La señal es muy ruidosa, entonces no usar acción D
- El sistema es rápido y oscilatorio, entonces usar P+D

Una guía rápida sugiere diferentes modos según la variable a controlar

Nivel : P Presión : P o P+D

Flujo: P o P+ I Temperatura : P+I+D

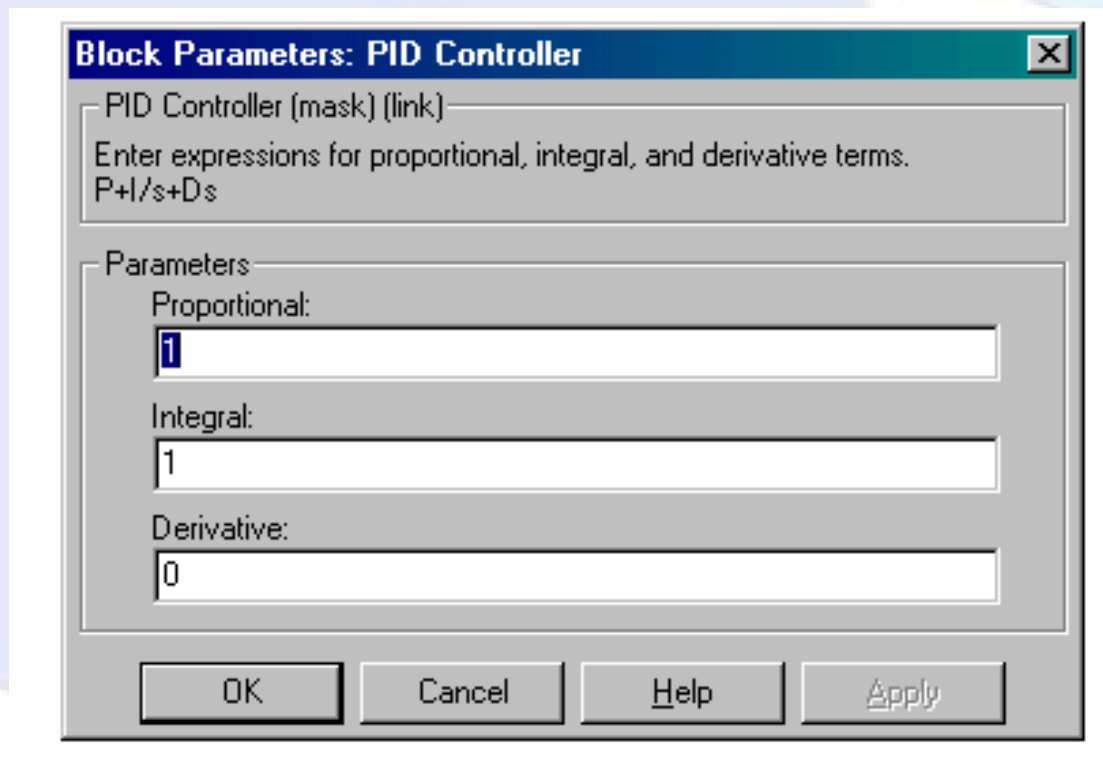
Initial Settings For Common Control Loops For Some Ideal and Series Controllers

<i>Loop Type</i>	<i>PB %</i>	<i>Integral min/rep</i>	<i>Integral rep/min</i>	<i>Derivative min</i>	<i>Valve type</i>
Flow	50 to 500	.005 to .05	20 to 200	none	Linear or Modified Percentage
Liquid Pressure	50 to 500	.005 to .05	20 to 200	none	Linear or Modified Percentage
Gas Pressure	1 to 50	.1 to 50	.02 to 10	.02 to .1	Linear
Liquid Level	1 to 50	1 to 100	.01 to 1	.01 to .05	Linear or Modified Percentage
Temperature	2 to 100	.2 to 50	.02 to 5	.1 to 20	Equal Percentage
Chromatograph	100 to 2000	10 to 120	.008 to .1	.1 to 20	Linear

These settings are rough, assume proper control loop design, ideal or series algorithm and do not apply to all controllers. Use ExperTune PID Tuner to find the proper PID settings for your process and controller.

PID en SIMULINK

En la biblioteca Simulinkextras/Add-Lineal se puede encontrar el block de PID en Simulink. En el se pueden especificar las acciones P,I,D en forma separada según se muestra.



SINTONIA DE CONTROLADORES

Los controladores poseen parámetros ajustables que permiten modular su salida de acuerdo a una respuesta dinámica esperada, por ejemplo

- Error nulo (ideal) , Error mínimo en el tiempo, Respuesta rápida, mínimo overshoot, poca oscilación en la salida, poca oscilación en la válvula, etc.

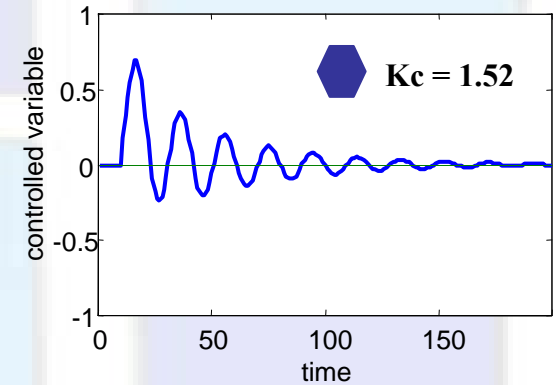
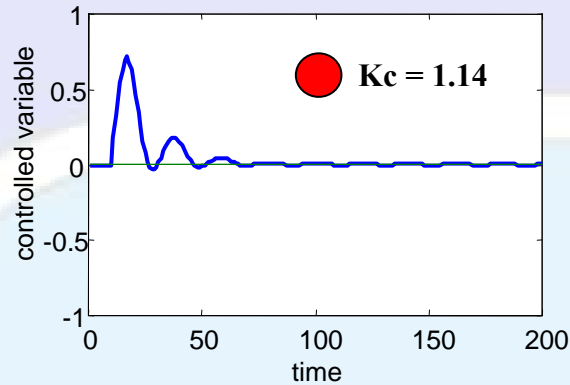
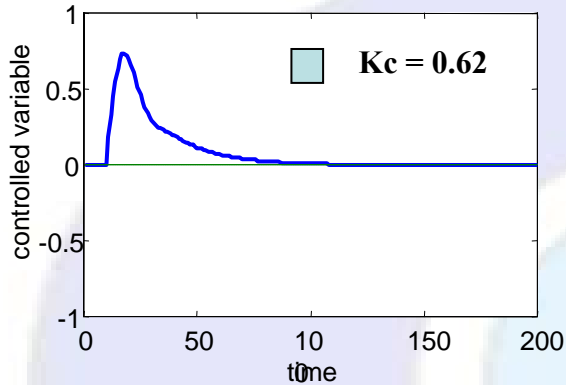
La tarea de encontrar el mejor conjunto de parámetros ("óptimos") de acuerdo a cierto criterio se llama "Sintonía".

Los métodos de sintonía pueden clasificarse en:

- **Empíricos:** Siguen una serie de reglas establecidas y aceptadas como ciertas.
- **Semi Empíricos:** Combinan empirismo con un cierto grado de análisis matemático que posibilita una cuantificación más precisa.
- **Analíticos:** Métodos puramente matemáticos basados en métodos de optimización



¿Cuál de estas respuestas es mejor



Podríamos decir que el óptimo es aquel que minimiza el error de salida en el horizonte de tiempo, es decir:

$$\min_{K_c} \sum \left(y^* - \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \right)$$

El problema es de difícil de solución, en forma analítica o numérica, por lo que en la práctica se recurre a métodos semi-empíricos.

Métodos Semi-Empíricos

Estos métodos son muy utilizados para la sintonía de controladores PID donde se requiere especificar K_c, τ_i, τ_d

Presentamos dos de los métodos clásicos de sintonía para PID's

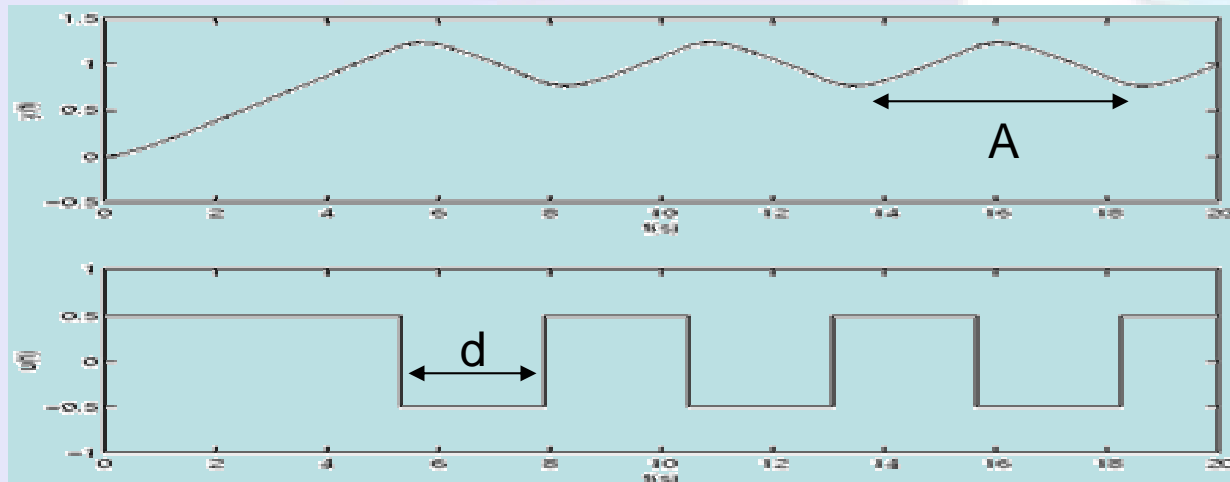
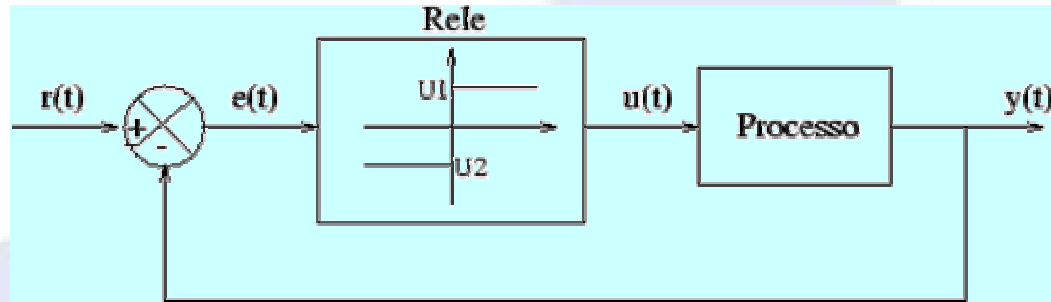
Método de Ziegler-Nichols (ZN)

Es un método de lazo cerrado que persigue encontrar el punto de oscilación completa según:

- Aplicar solo control proporcional con ganancia K_c pequeña
- Aumentar K_c hasta que el lazo comience a oscilar
- Registrar la ganancia para una oscilación constante, llamada "Ultima Ganancia" o " K_u " y el período de oscilación P_u
- Ajustar los parámetros del controlador según la tabla adjunta.

	K_c	τ_i	τ_d
P	$0.5K_u$		
PI	$0.45K_u$	$P_u/1,2$	
PID	$0.6K_u$	$P_u/2$	$P_u/8$

Existe una forma alternativa de encontrar los puntos de operación en oscilación completa que consiste en someter la entrada a una secuencia de escalón periódica con período “d” según se muestra en la figura siguiente



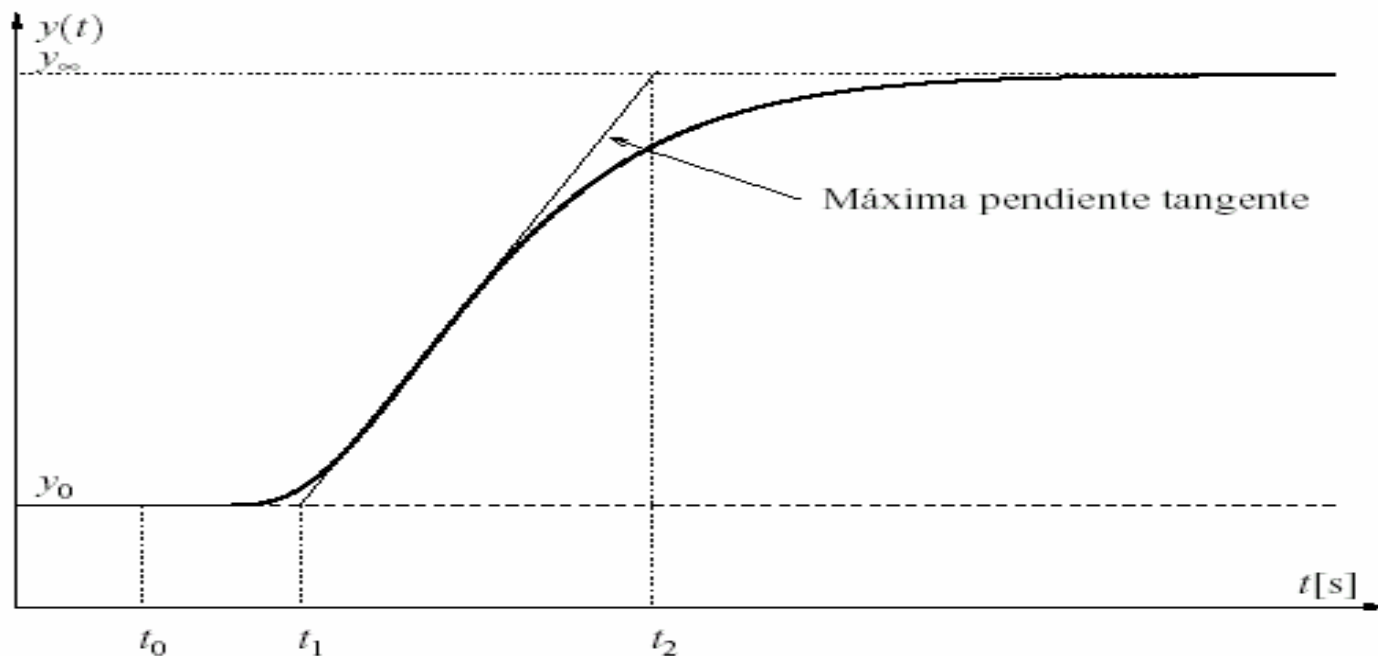
Una vez alcanzado una salida con período constante, se puede demostrar que la última ganancia está dada por:

$$K_u = \frac{\pi A}{d}$$

METODO DE COHEN Y COON (Curva de Reacción)

El Método de Cohen y Coon es un método de lazo abierto que consiste en someter al proceso a una entrada tipo escalón a $t = t_0$ y registrar la salida según se ilustra en la figura.

$$k_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \quad \tau_0 = t_1 - t_0, \quad \gamma_0 = t_2 - t_1.$$



El método asume que el proceso se puede aproximar a un sistema de primer orden con atraso según:

$$G_0(s) = \frac{k_0 e^{-s\tau_0}}{\gamma_0 s + 1}; \quad \gamma_0 > 0.$$

De manera análoga al método Z-N, los parámetros del controlador PID se determinan mediante las ecuaciones dadas en la tabla adjunta.

P	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(1 + \frac{\tau_0}{3\gamma_0} \right)$		
PI	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(0,9 + \frac{\tau_0}{12\gamma_0} \right)$	$\frac{\tau_0 (30\gamma_0 + 3\tau_0)}{9\gamma_0 + 20\tau_0}$	
PID	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(\frac{4}{3} + \frac{\tau_0}{4\gamma_0} \right)$	$\frac{\tau_0 (32\gamma_0 + 6\tau_0)}{13\gamma_0 + 8\tau_0}$	$\frac{4\tau_0 \gamma_0}{11\gamma_0 + 2\tau_0}$