

# Sistemas de Automatización

## AÑO 2021

### UNIDAD 4

### Controladores

Profesores:

Ing. María Susana Bernasconi-

[sbernasc@uncu.edu.ar](mailto:sbernasc@uncu.edu.ar)

[susybernasconi@gmail.com](mailto:susybernasconi@gmail.com)

Ing Fernando Geli

[fernandogeli@gmail.com](mailto:fernandogeli@gmail.com)

## Controladores Digitales

### Controladores digitales universales con salida PID


Por su alto grado de confiabilidad, versatilidad y costo razonable son las herramientas, ideales para aplicaciones simples o de alta performance. Esta línea tiene las características apropiadas para control de temperatura y otras variables en los más diversos procesos industriales.

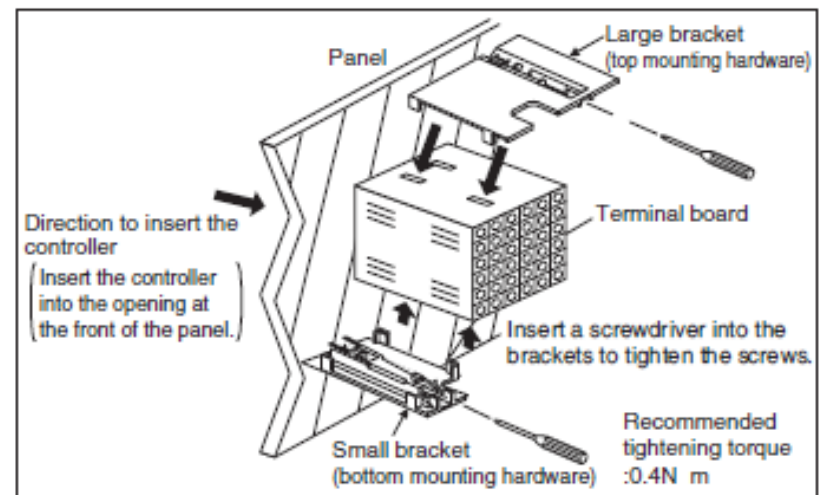
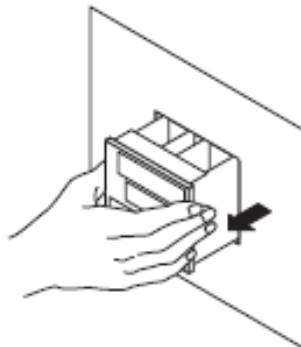
- Entrada universal, permite la configuración para control de temperatura con todo tipo de sensores y señales de tensión y corriente, desde el teclado frontal.
- Password para protección de configuración o modificación de parámetros.
- Display con doble indicación, permite una fácil y rápida interpretación sobre el proceso.
- Fácil programación y manipulación aún por operadores con poca experiencia.
- Autosintonía de todos los parámetros PID.
- Detección de cualquier falla del sensor.
- Menú de programación sencillo que facilita una rápida configuración y protección de acceso al teclado.
- Salidas de control con relé, rele de estado sólo o 4-20 mA.
- Dos relés de alarma adicionales
- Rampa de calentamiento configurable
- Formatos normalizados para adaptarse a todas las necesidades
- Garantía **2 años**

La mejor garantía, soporte técnico y servicio posventa.

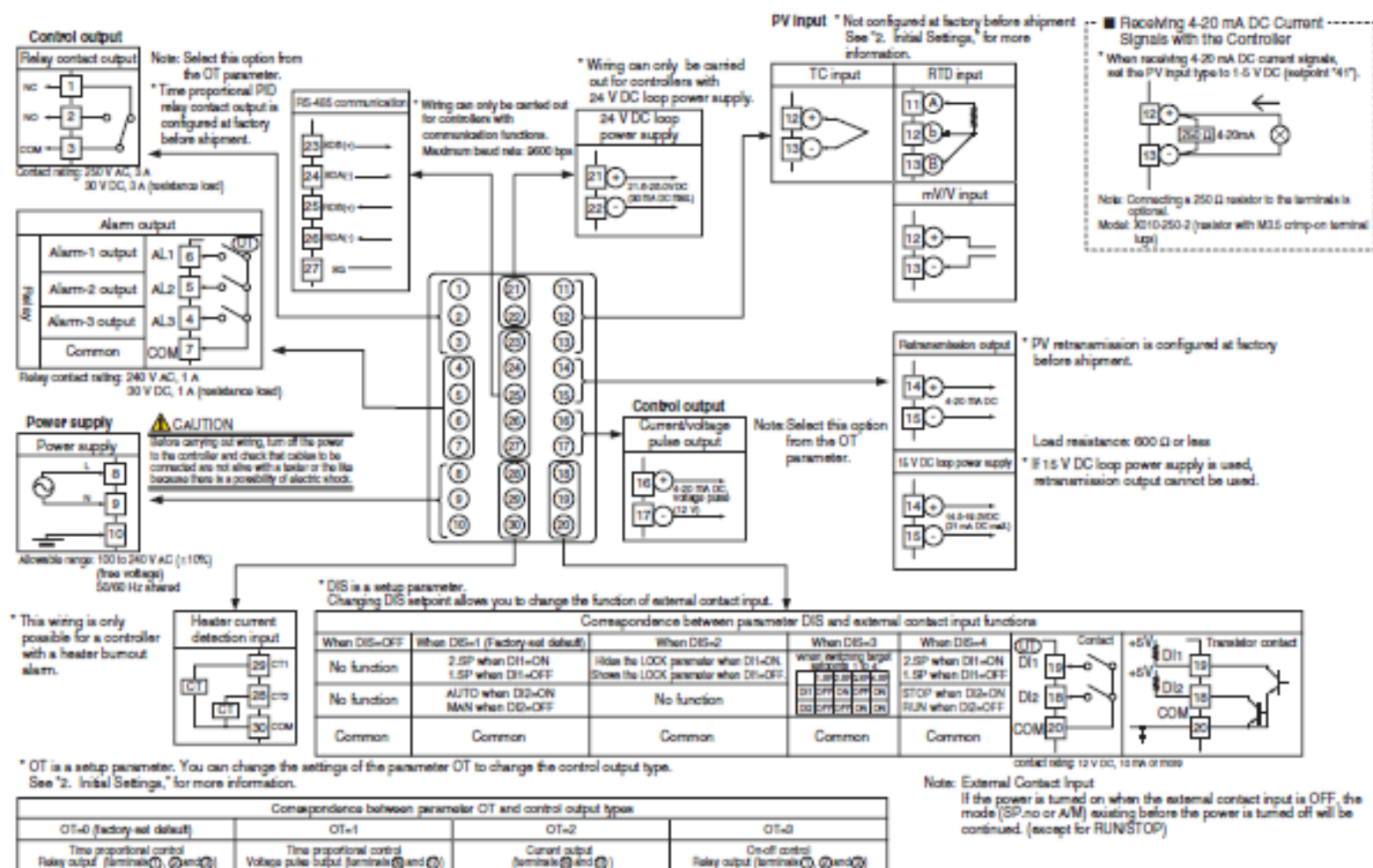
Especificaciones:

Pedido de información y cotización

Modelos	HICH102 - HICH402 - HICH502 - HICH702 - HICH902
	Control PID (con auto sintonía); ON-OFF
	Entrada Universal (configurable) Termocuplas J, K, R, S, B, E, N, T RTD - Termorresistencias Pt100, Cu50 Señales lineales: 0/4-20 mA, 0/1-5Vcc
	Salida (definir) 1 - Relé 2 - SSR - Lógica para relé de estado sólido 3 - mA/V (0/4 - 20 mA, 0/1-5Vcc)
	Alarmas (definir) 1 - Una salida de alarma (relé) 2 - Dos salidas de alarma (relé)
Alimentación (definir)	1 - 100 a 240 CA 2 - 24 a 48 VCA/VCC
Dimensiones	HICH102 (48x48 mm) HICH402 (48x96 mm) HICH502 (96x48 mm) HICH702 (72x72 mm) HICH902 (96x96 mm)
Características adicionales	Operación manual o automática Auto/Manual Porcentaje de auto sintonía Porcentaje de salida de potencia
Características opcionales	1 - Interfase RS485 (protocolo Modbus RTU) 2 - Función de rampa 3 - Selección Pt100 /Pt1000 4 - Fuente de alimentación 24 Vcc para transmisores

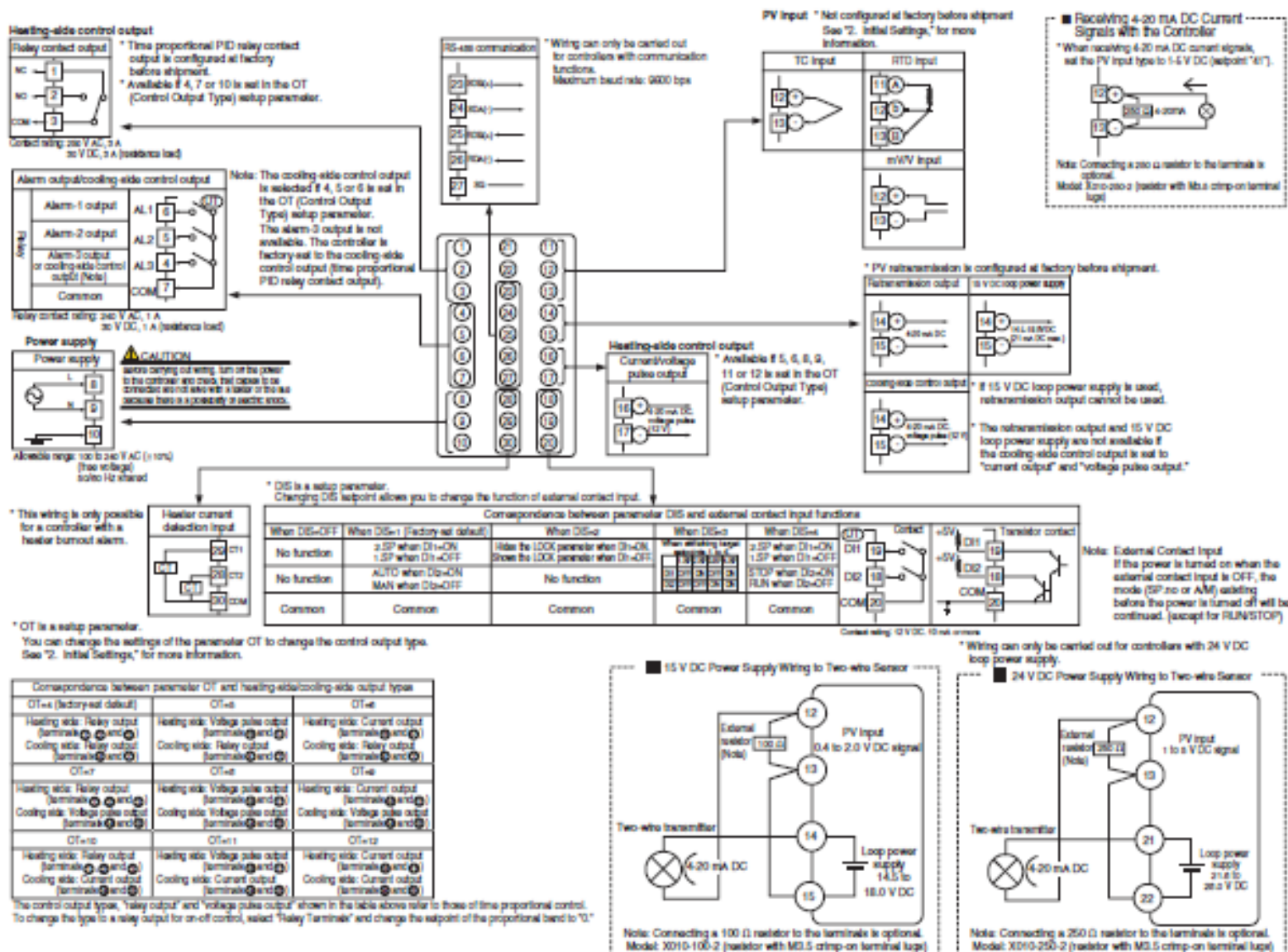


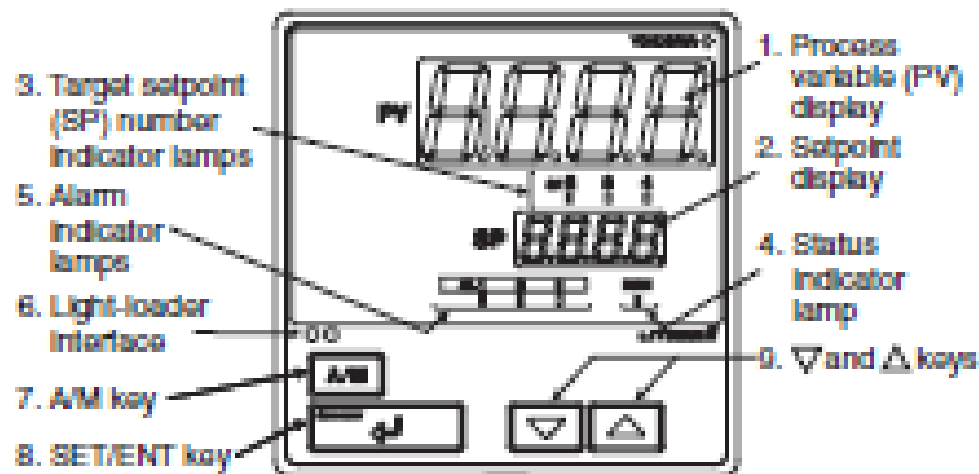
## ■ UT320 Standard Type (Model UT320-0□ or UT320-3□) or Heating/Cooling Type (Model UT320-2□)



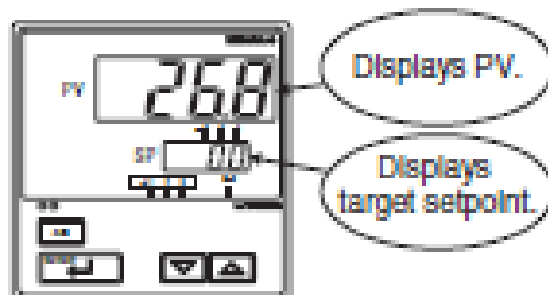



## ■ UT320 Heating/Cooling Type (Model UT320-2□)

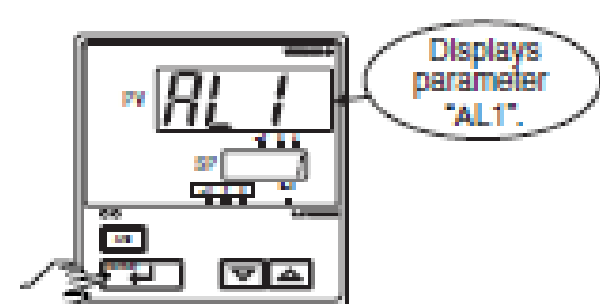




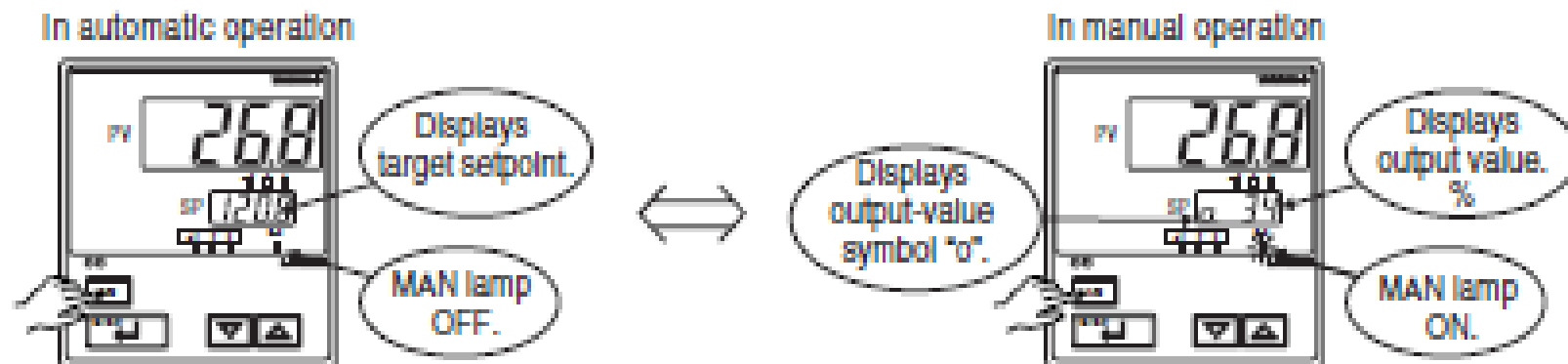
Bring the operating display into view (display appears at power on).



Press the  key several times to display the parameter "AL1" (alarm-1 type).



Each time you press the **MAN** key on the front panel of the instrument, AUTO and MAN is switched alternately.

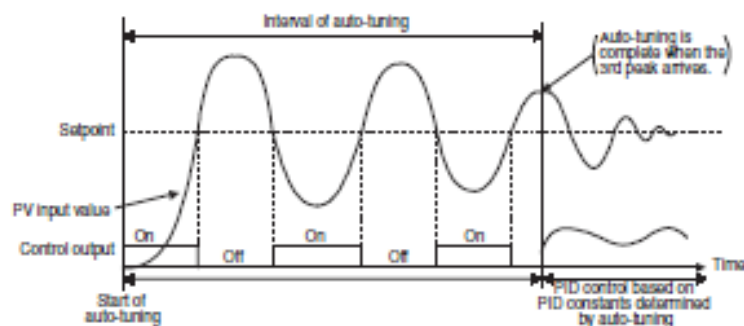


Press the **▲** or **▼** key to display the required setpoint. Tuning for 1.SP is **AT = 1**.



To cancel auto-tuning, set **AT = OFF**.

Auto-tuning is a function with which the controller automatically measures the process characteristics to automatically set the optimum PID constants. This function does not work when the controller is performing on-off control. The UT350/UT320 employ the "Limit Cycle Method." As shown in the figure below, the controller temporarily changes its control output in a step-waveform manner. Then, it calculates the optimum proportional band (P), integral time (I) and derivative time (D) from the resulting response to set them in their respective parameters.



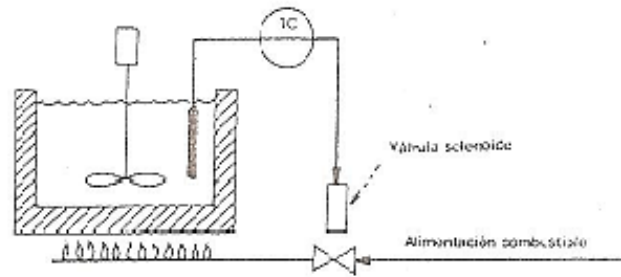
If the Output High Limit (OH) and Output Low Limit (OL) parameters are already configured, the control output turns on and off only between the output's high and low limits during auto-tuning.

<b>A1</b> (A1)	Alarm 1-setpoint	PV alarm / SP alarm: -100.0 to 100.0% of PV input range Deviation alarm: -100.0 to 100.0% of PV input range span Output alarm: -5.0 to 105.0% An alarm common to the 1.SP to 4.SP parameters.	PV high limit/SP high limit alarm: 100.0% of PV input range Deviation alarm: 0.0% of PV input range span Other PV/SP low limit alarm: 0.0% of PV input range Output high limit alarm: 100.0% Output low limit alarm: 0.0%		—
<b>A2</b> (A2)	Alarm 2-setpoint				—
<b>A3</b> (A3)	Alarm 3-setpoint				—
<b>At</b> (AT)	Auto-tuning	OFF (0): No auto-tuning 1: Auto-tuning for 1.SP    2: Auto-tuning for 2.SP 3: Auto-tuning for 3.SP    4: Auto-tuning for 4.SP AUTO (5): Performs auto-tuning to all groups 1 to 4.	OFF (0)		—
<b>FF</b>	FF reset function	OFF (0): Disable	OFF (0)		

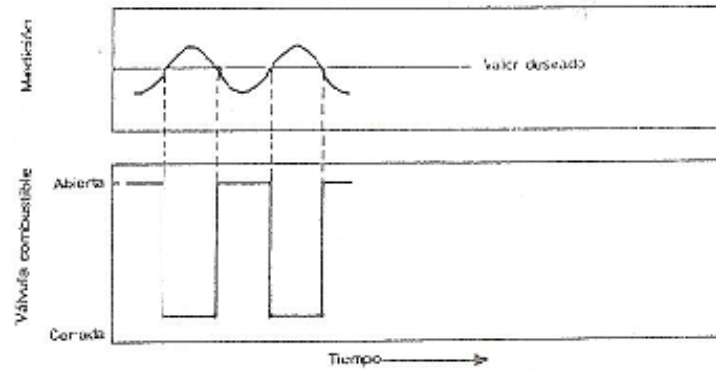
Parameter Symbol	Name of Parameter	Setting Range and Description	Initial Value	User Setting	Target Item in CD-ROM
<b>IP</b> (1.P)	Proportional band/Heating-side proportional band (in heating/cooling control)	0.1 to 999.9% In heating/cooling control: 0.0 to 999.9% (heating-side ON/OFF control applies when 0.0)	5.0%		
<b>I</b> (1.I)	Integral time Heating-side integral time (in heating/cooling control)	OFF (0), 1 to 6000 second.	240 second.		
<b>Id</b> (1.D)	Derivative time Heating-side derivative time (in heating/cooling control)	OFF (0), 1 to 6000 second.	60 second.		
<b>Inr</b> (1.MR)	Manual reset	-5.0 to 105.0% (enabled when integral time "1.I" is OFF) The manual reset value equals the output value when PV = SP is true. For example, if the manual reset value is 50%, the output value is 50% when PV = SP becomes true.	50.0%		



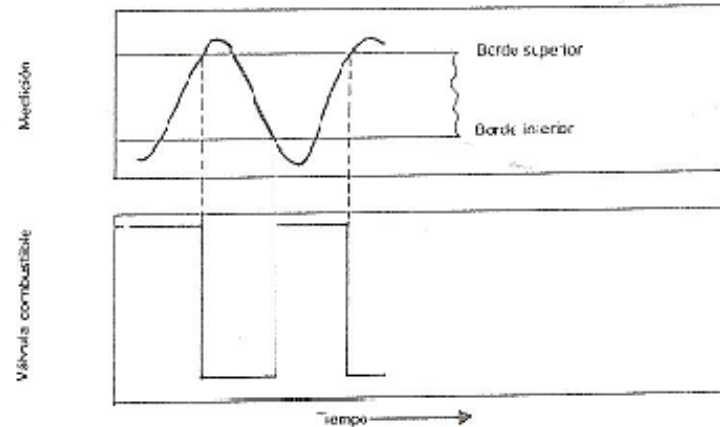
# Control ON OFF



a. Proceso



b. Control de dos posiciones

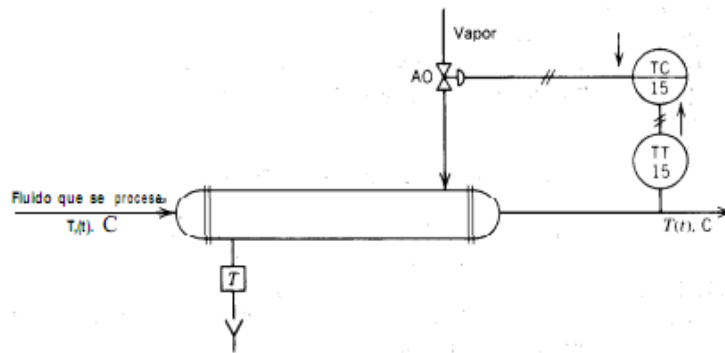


c. Control con acción de intervalo

# Controladores

## Funcionamiento de los controladores.

Considérese el circuito de control del intercambiador de calor que se muestra en la figura 4; si la temperatura del fluido sobrepasa el punto de control, el controlador debe cerrar la válvula de vapor. Puesto que la válvula es de aire para abrir (AA), se debe reducir la señal de salida



del controlador (presión de aire o corriente) (ver la flechas en la figura). Para tomar esta decisión el controlador debe estar en acción inversa. Algunos fabricantes designan tal acción como **decremento**; es decir, cuando hay un incremento en la señal que entra al controlador, entonces se presenta un decremento en la señal que sale del mismo.

Imagen 4 Circuito de control para intercambiador de calor.

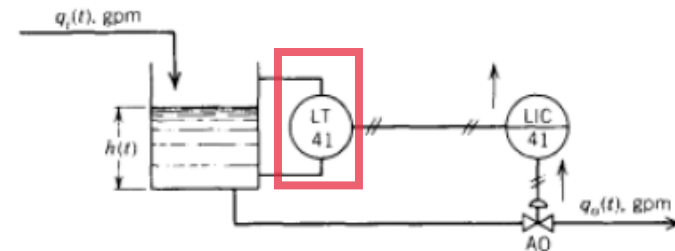


Imagen 5. Circuito para control de nivel de líquido

El controlador es un elemento en el sistema en lazo cerrado que tiene como entrada la señal de error y produce una salida que se convierte en entrada al elemento correctivo.

La relación entre la salida y la entrada al controlador con frecuencia se denomina **ley de control**. Existen 3 formas de dicha ley: **proporcional**, **integral** y **derivativo**, y son las que se estudiarán.

## Controlador P

Con el controlador proporcional la salida del controlador es directamente proporcional a su entrada (que es la señal de error, la cual es una función del tiempo).

$$\text{Salida} = K_p * e(t)$$

donde  $K_p$  es una constante llamada **ganancia proporcional**. La función de transferencia para el controlador  $G_c(s)$  es:  $G_c(s) = K_p$

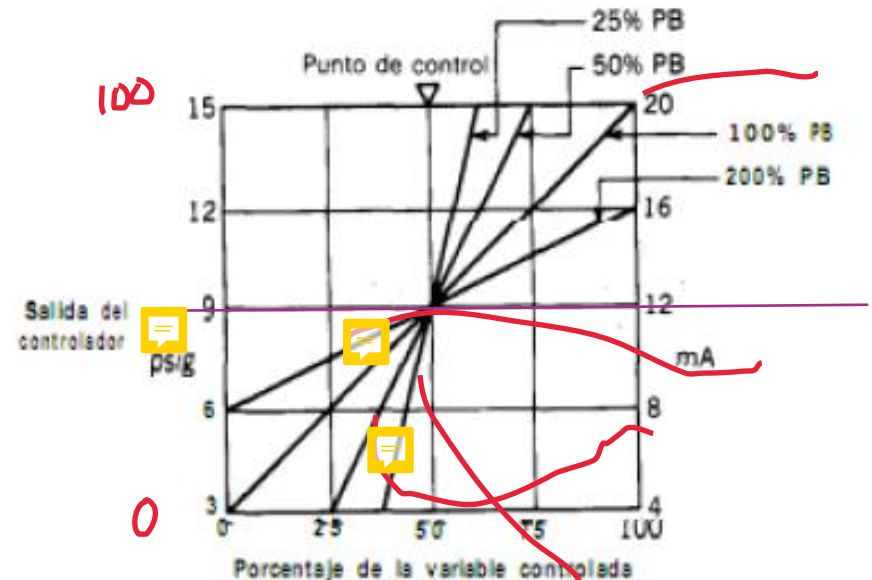
Este controlador es, en efecto, sólo un amplificador con una ganancia constante. Sin embargo, la ganancia constante tiende a existir sólo sobre cierto rango de errores que se conoce como **banda proporcional**.

$$m(t) = \text{Salida} = \bar{m} + K_p(r(t) - c(t))$$



$$m(t) = \text{Salida} = \bar{m} + \frac{100}{PB} (r(t) - c(t))$$

$$m(t) = \bar{m} + \frac{100}{PB} (e(t))$$

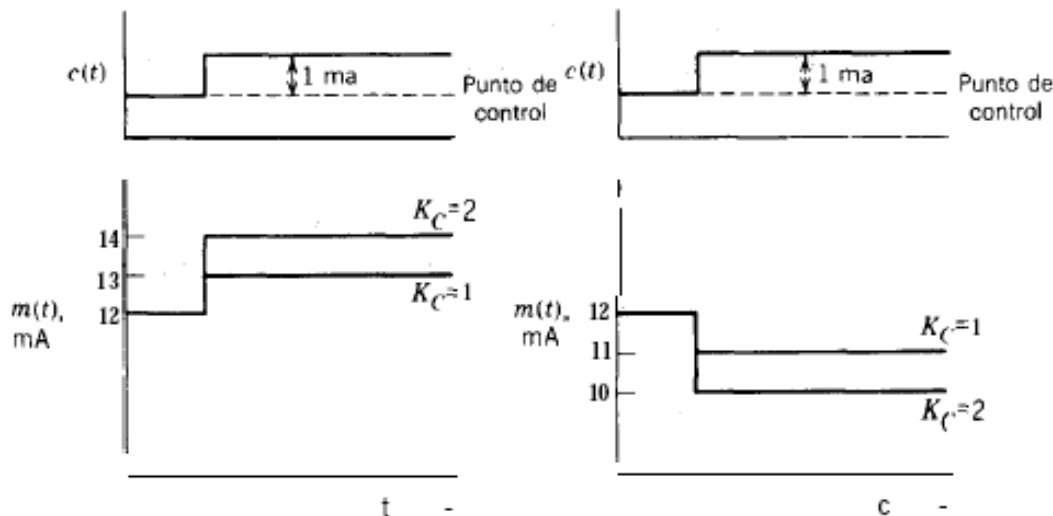


# Controlador P

Es común expresar la salida del controlador como un porcentaje de la posible salida total de éste. De este modo, un 100% de cambio en la salida del controlador corresponde a un cambio en el error desde un extremo a otro de la banda proporcional. Así:

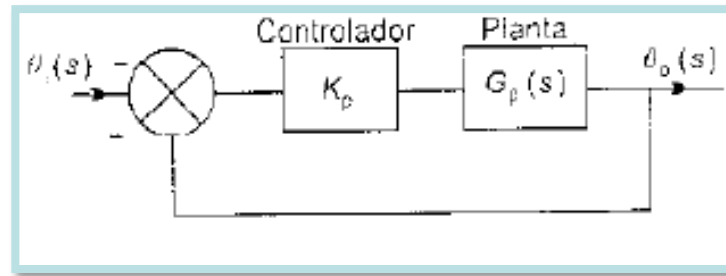
$$K_p = K_c = \frac{100}{\text{banda proporcional}}$$

Debido a que la salida es proporcional a la entrada, si la entrada al controlador es un error en la forma de un escalón, entonces la salida es también un escalón, y es exactamente una versión a escala de la entrada.



$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t)$$

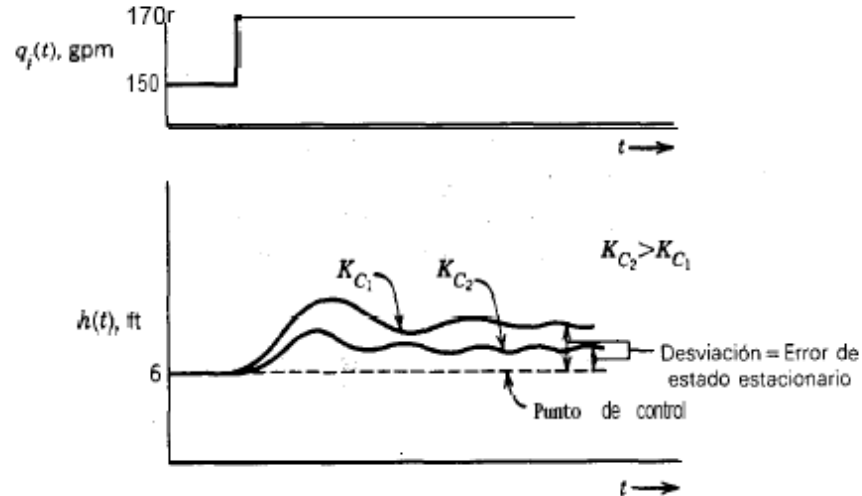
# Controlador P



El resultado es una función en lazo abierto de:  $G_0(s) = K_p * G_p(s)$

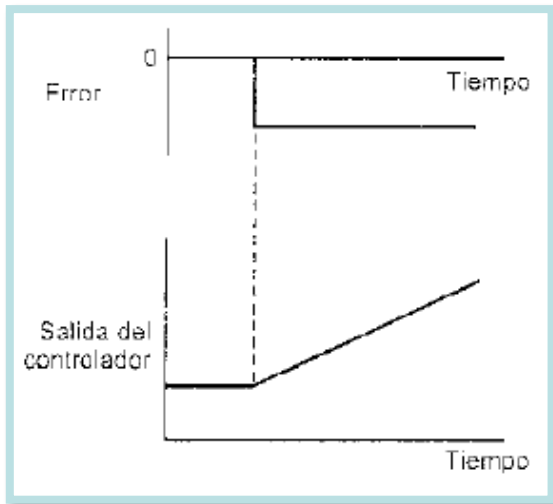
El controlador no introduce nuevos ceros o polos al sistema, sólo determina la ubicación de los polos en lazo cerrado. Esto se debe a que la función de transferencia en lazo cerrado (con el controlador y realimentación unitaria) es:

$$G(s) = \frac{K_p * G_p(s)}{1 + K_p * G_p(s)}$$



y, de esta manera, la ecuación característica  $1 + K_p * G_p(s)$  tiene los valores de sus raíces afectados por  $K_p$ .

# Controlador I



Con el controlador integral la salida del controlador es proporcional a la integral de la señal de entrada.

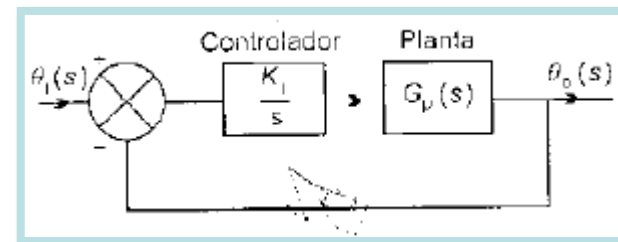
$$Salida = K_i * \int_0^t e(t) dt$$

$$G_c(s) = \frac{salida(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s}$$

donde  $K_i$  es una constante llamada **ganancia integral**. Ésta tiene unidades de  $s^{-1}$ . La figura muestra qué pasa cuando el error es de la forma de un escalón. La integral entre 0 y  $t$  es el área bajo la gráfica del error entre 0 y  $t$ . Así, debido a que después de que el error comienza, el área se incrementa en una razón regular, la salida del controlador se debe incrementar en una razón regular.

Se produce una reducción de la estabilidad relativa como resultado de usar el control integral ya que introduce una raíz  $s$  en el denominador.

$$G_0(s) = \frac{K_i}{s} * G_p(s)$$





# Controlador PI

Para mejorar la estabilidad relativa y disminuir el error de estado estacionario, se utiliza el control proporcional integral. Para tal combinación la salida del controlador es:

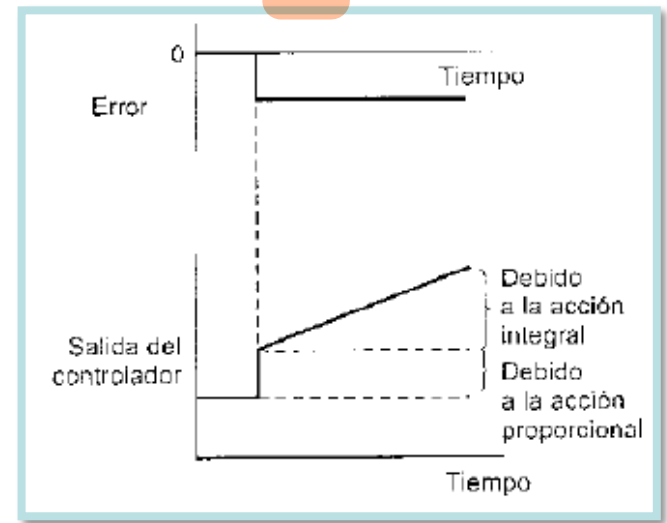
$$Salida = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t) dt \quad G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

$$m(t)=Salida= \overline{m} + K_p[e(t)+ K_i * \int e(t)dt]$$

$$G_c(s) = K_p * (1 + \frac{1}{\tau_i s})$$

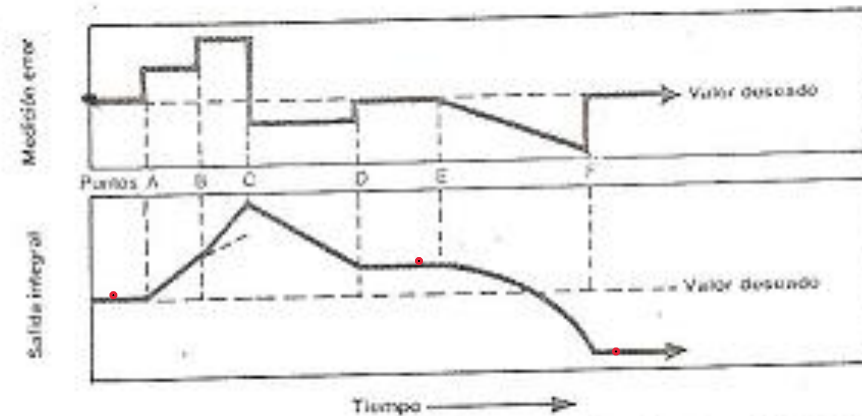
$$G(s) = Kp * \left( \frac{s + \frac{1}{\tau_i}}{s} \right)$$

De esta manera, mediante el uso del control PI se adicionan un cero en  $(-\frac{1}{\tau_i})$  y un polo en 0. Es por ello que las raíces a lazo cerrado se hacen más positivas y cercanas al origen. Sin embargo, la reducción en la estabilidad relativa no es tanto como lo es el control integral solo.

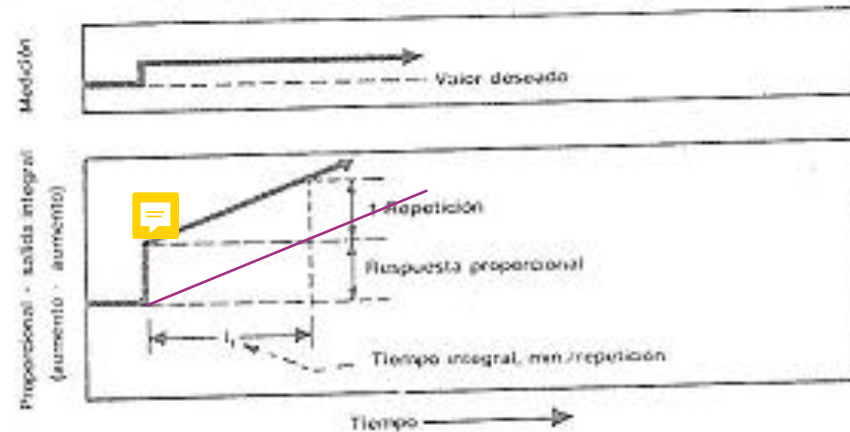


# Controlador PI

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt$$



a. La acción integral responde al signo, magnitud y duración del error



b. El tiempo integral determina la velocidad de respuesta

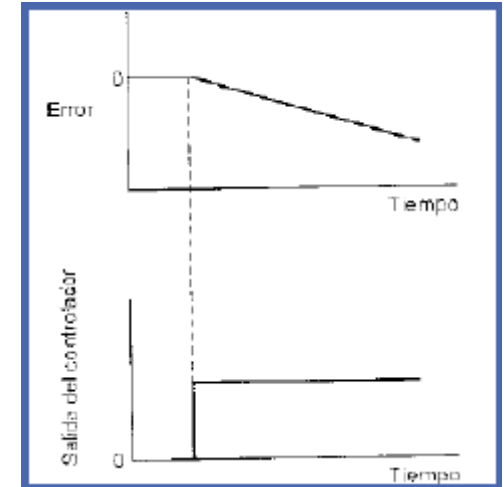
## Controlador D

$$Salida = K_d * \frac{de(t)}{dt}$$

Con el controlador derivativo la salida del controlador es proporcional a la razón de cambio con el tiempo de la señal de entrada (que es la señal de error, la cual es una función del tiempo).

donde  $K_d$  es la *ganancia derivativa*.

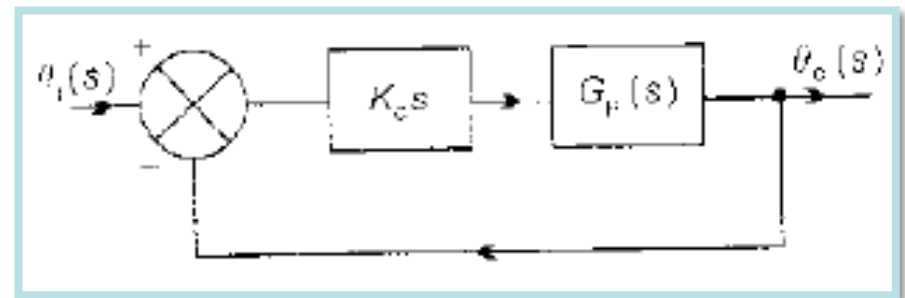
Ésta tiene unidades de  $s$  (seg.) Con el control derivativo, tan pronto como la señal de error inicia puede haber una salida del controlador muy grande (puesta que ésta es proporcional a la razón de cambio de la señal de error y no a su valor). De este modo puede proporcionar una acción correctiva grande antes de que se presente un error grande en realidad.



Sin embargo, si el error es constante, entonces NO hay acción correctiva, aún si el error es grande.

Función de transferencia de lazo cerrado

$$G_0(s) = \frac{K_d s * G_p(s)}{1 + K_d s * G_p(s)}$$



# Controlador PD

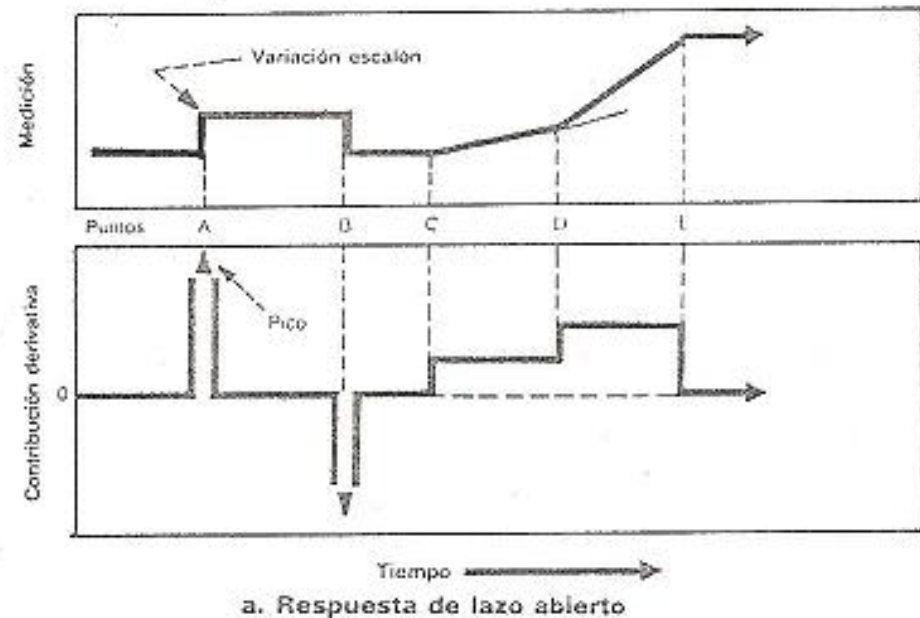
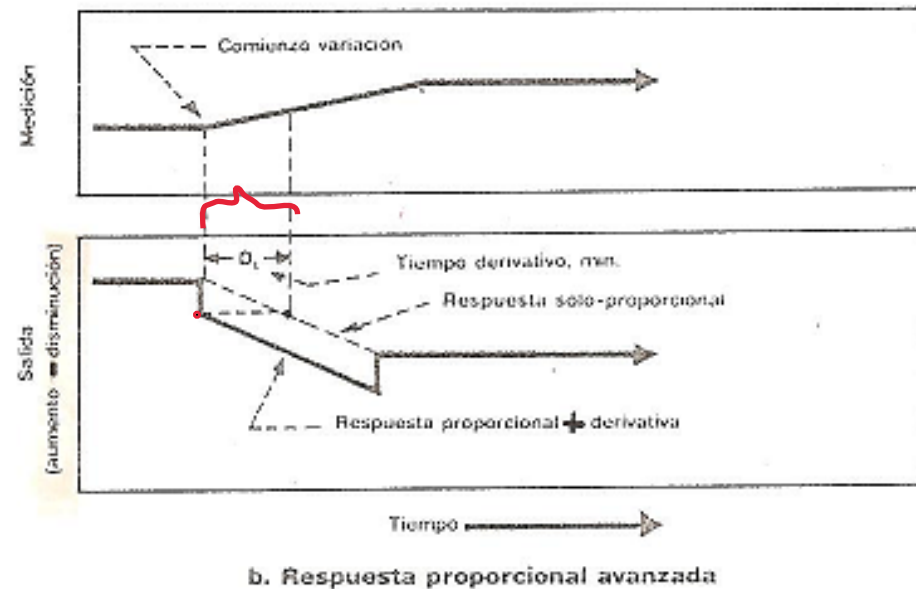
$$m(t) = \frac{100}{P} \cdot \left( e(t) + D \cdot \frac{de(t)}{dt} \right)$$

$$G_c(s) = K_p * (1 + \tau_d s)$$

Si el control derivativo se usa con el proporcional, entonces la función de transferencia en lazo abierto se convierte en:

$$G_0(s) = (K_p(1 + K_d s)) * G_p(s)$$

Con esta forma de control se ha introducido un cero en  $s = -\frac{1}{\tau_d}$ . Produce mayor estabilidad relativa.



# Controlador PID

El controlador PID, dará una salida:

$$Salida = K_p(e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}) \quad \Rightarrow \quad G_c(s) = K_p(1 + \frac{K_i}{s} + K_d s)$$

$$G_c(s) = K_p * (1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s)$$

La función de transferencia en lazo abierto para el sistema formado por el controlador PID ( $G_c(s)$ ) y un proceso ( $G_p(s)$ ) es:

$$G_0(s) = G_c(s) * G_p(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) * G_p(s)$$

# Ajuste de Controladores

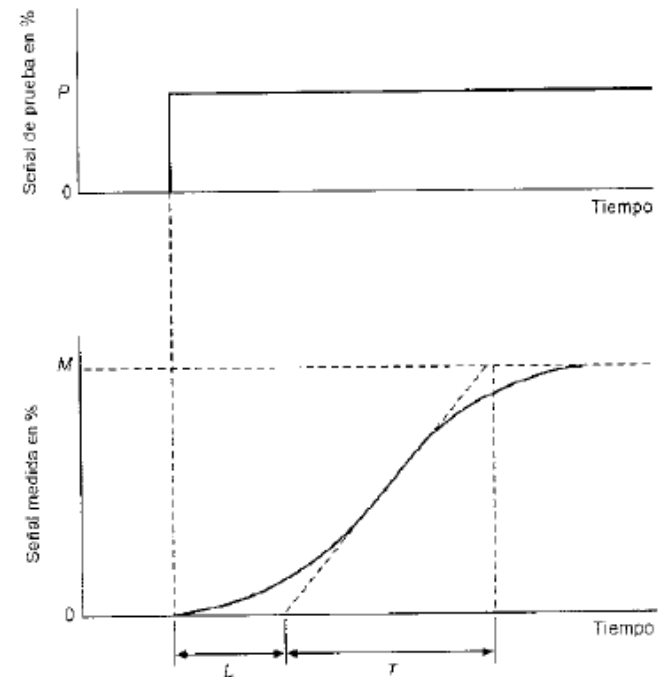
El uso del control proporcional sólo requiere la elección de una variable, la ganancia proporcional ( $K_p$ ), un controlador PI requiere la selección de 2 variables:  $K_p$  y  $K_i$ , un controlador PID, se deben seleccionar 3 variables:  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ .

La selección de estas variables permite variar los polos y ceros que introduce el controlador y por lo tanto, afectan la estabilidad del sistema de control.

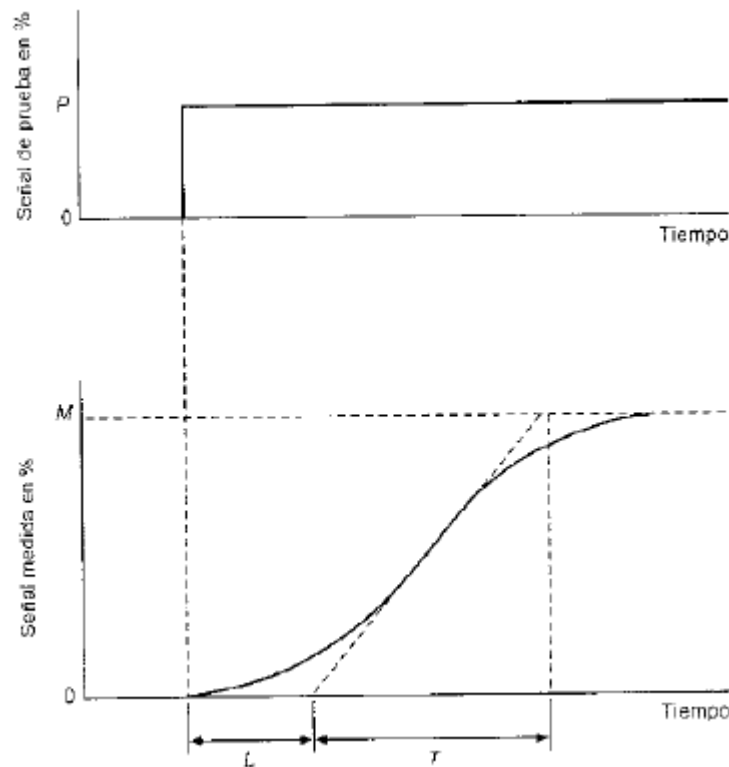
Para describir el proceso de selección de los mejores valores para el controlador se usa el término sintonización.

Existen varios métodos para ajustar dichos parámetros, veremos los 2 métodos de Ziegler y Nichols.

El primer método se denomina **método de la curva de reacción del proceso**. El procedimiento con este método consiste en abrir el lazo de control (el lazo deja de trabajar en modo automático). El controlador en Modo Autotunnig aplica, una señal de prueba a la unidad de corrección y se determina a través de la realimentación del sensor, la respuesta de la variable de proceso medida.







La señal de prueba  $P$  se expresa como el porcentaje de cambio en la unidad de corrección.

La variable medida se expresa como el porcentaje del rango a escala completa. Para la figura, el máximo **gradiente  $R$  es  $M/T$** .

El tiempo entre la aplicación de la señal de prueba y cuando esta tangente intersecta el eje de tiempo de la gráfica se denomina **atraso  $L$** .

La siguiente tabla proporciona los criterios recomendados por Ziegler y Nichols para los valores del controlador con base en los valores  $P$ ,  $R$  y  $L$ .

<i>Modo de control</i>	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Proporcional solamente	$P/RL$		
Proporcional + integral	$0.9 P/RL$	$1/3.33L$	
Proporcional + integral + derivativo	$1.2 P/RL$	$1/2L$	$0.5 L$

El segundo método se conoce como el **método de la última ganancia**. Primero, las acciones integral y derivativa se reducen a sus valores mínimos.

La constante proporcional  $K_p$  se fija en un valor bajo y, entonces, se incrementa en forma gradual. Esto, es lo mismo que decir que la banda proporcional se hace más angosta de manera gradual.

Mientras esto sucede, al sistema se le aplican pequeñas perturbaciones. El proceso continúa hasta que se presentan oscilaciones.

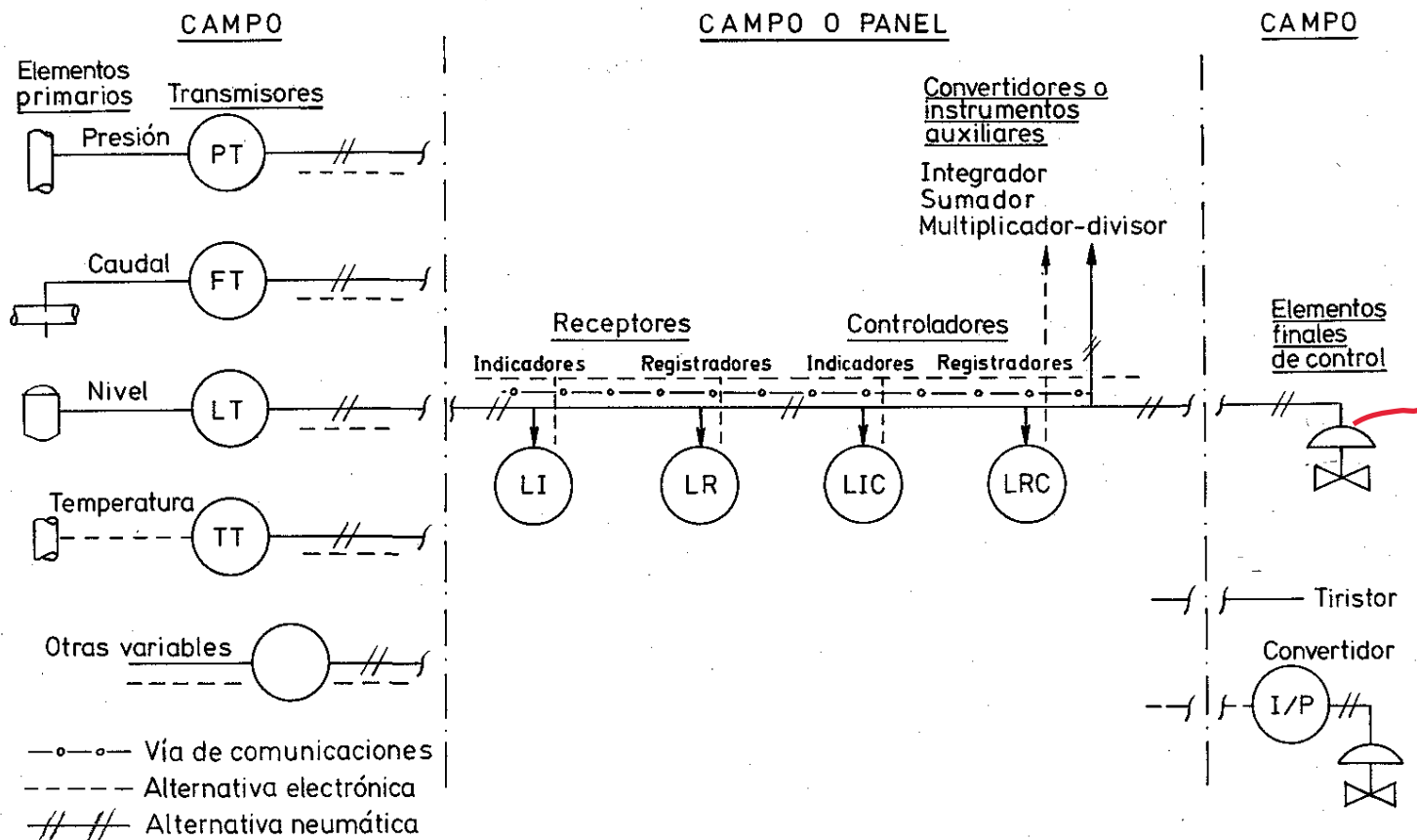
Se anota el valor crítico de la constante proporcional ( $K_{pc}$ ), en la que se presentan las oscilaciones, así como el tiempo ( $T_c$ ), de éstas.

La siguiente tabla muestra los criterios de Ziegler y Nichols sobre cómo oscilan los valores de  $K_{pc}$  y  $T_c$  para establecer los valores del controlador. La banda proporcional crítica es  $100/K_{pc}$ .

<i>Modo de control</i>	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Proporcional solamente	$0.5 K_{pc}$		
Proporcional + integral	$0.45 K_{pc}$	$12/T_c$	
Proporcional + integral + derivativo	$0.6 K_{pc}$	$20/T_c$	$T_c/8$

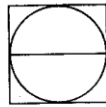
Ziegler - Nichols	Ziegler-Nichols	IAE	Dahlin
$K_c = \frac{1,2}{K} \left( \frac{\tau}{\tau_d} \right)$	$K_c = \frac{K_{ca}}{1,7}$	$K_c = \frac{a_1}{K} \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)^{b_1}$ <div> <math>a_1 = 1,435</math>  <math>b_1 = -0,921</math> </div>	$K_c = \frac{\tau}{K(\tau_d + \tau_c)}$ <div> <math>\tau_c = \frac{1}{5} \tau_d</math> </div>
$R = 2\tau_d$	$R = \frac{\tau_u}{2}$	$R = \frac{\tau}{a_2} \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)^{b_2}$ <div> <math>a_2 = 0,878</math>  <math>b_2 = 0,749</math> </div>	$R = \tau$
$D = \frac{\tau_d}{2}$	$D = \frac{\tau_u}{8}$	$D = a_3 \tau \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)^{b_3}$ <div> <math>a_3 = 0,482</math>  <math>b_3 = 1,137</math> </div>	$D = \frac{\tau_d}{2}$

# Nomenclatura-Norma ISA-S5.1-84 (R-1992)



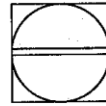
T R C		2 A	
Primera letra	Letras sucesivas	Número del bucle	Sufijo (no se usa normalmente)
Identificación funcional		Identificación del bucle	

1. Accesible normalmente al operador-indicador/controlador/registrador o punto de alarma.



- (1) Visualización compartida.
- (2) Visualización y control compartidos.
- (3) Acceso limitado a la red de comunicaciones.
- (4) Interfase del operador en la red de comunicaciones.

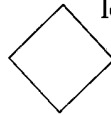
2. Dispositivo de interfase auxiliar del operador.



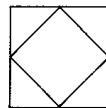
- (1) Montado en panel; carátula analógica; no está montado normalmente en la consola principal del operador.
- (2) Controlador de reserva o estación manual.
- (3) El acceso puede estar limitado a la red de comunicaciones.
- (4) Interfase del operador vía la red de comunicaciones.

### *Símbolos de control lógico y secuencial*

6. Símbolo general. Para complejos no definidos interconectando control lógico o secuencial (ver ISA-S5.1-84).

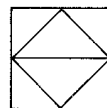


7. Control distribuido interconectando controladores lógicos con funciones lógicas binarias o secuenciales.



- (1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido.
- (2) No accesible normalmente al operador.

8. Control distribuido interconectando un controlador lógico con funciones lógicas binarias o secuenciales.



- (1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido.
- (2) Accesible normalmente al operador.

### Ejemplo de control de combustión:

