

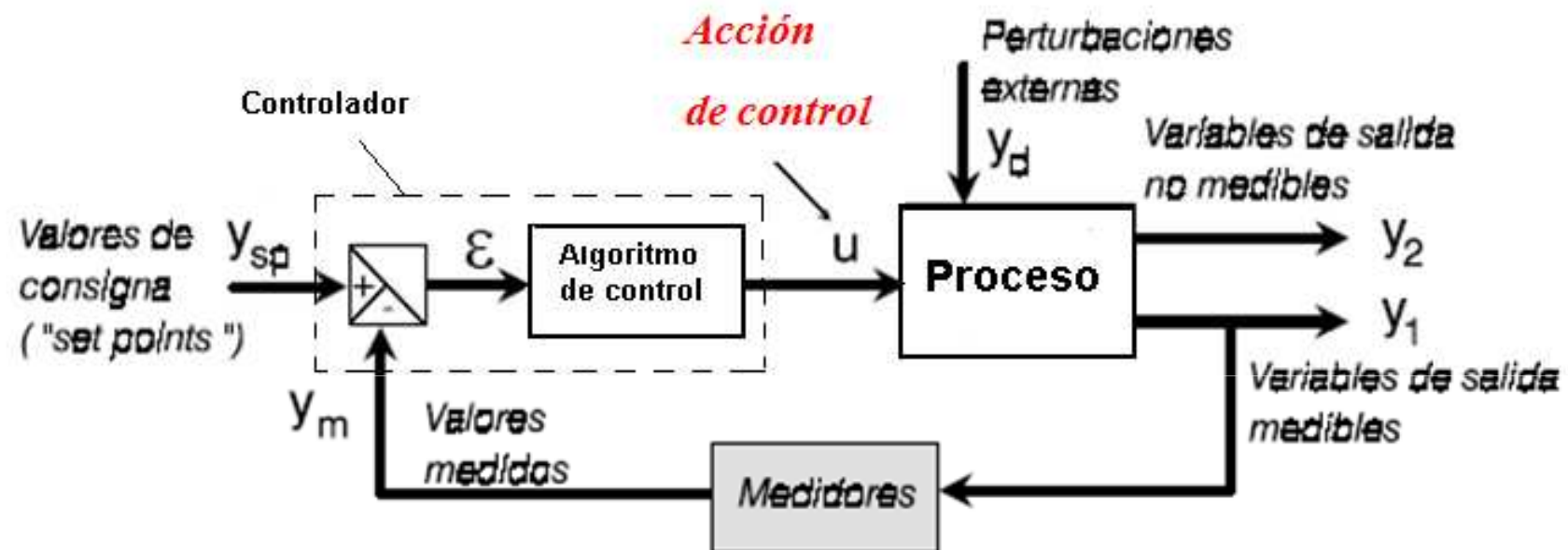


# ACCIONES DE CONTROL

**Esp. Ing. Marcos A. Golato**  
**DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**  
**FACET-UNT**

## ACCIÓN DE CONTROL - DEFINICIÓN:

**ES LA CARACTERÍSTICA, MODO O ALGORITMO, CON EL CUAL EL CONTROLADOR CALCULA LA SEÑAL DE SALIDA AL ELEMENTO FINAL DE CONTROL, SEGÚN LA EVOLUCIÓN DE LA VARIABLE DEL PROCESO Y DE SU VALOR DESEADO.**



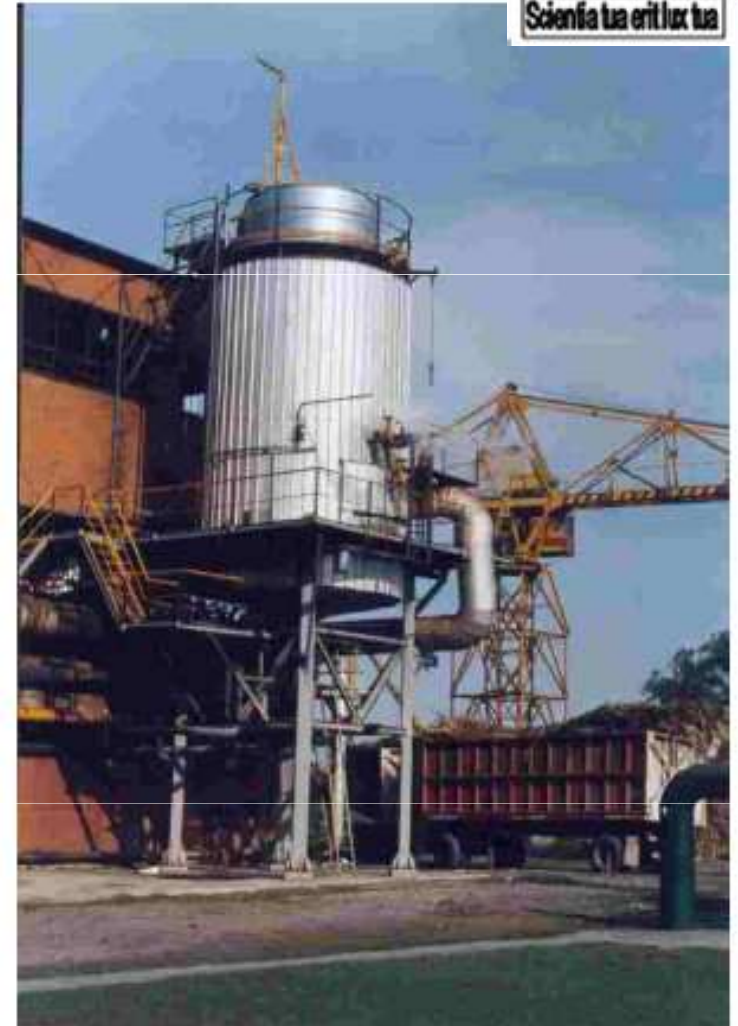
**Diagrama de bloques característico de un sistema de control realimentado**

## **CLASIFICACIÓN DE LAS ACCIONES DE ACUERDO AL TIPO DE FUENTE DE ENERGÍA UTILIZADA**

- **ACCIONES NEUMÁTICAS.**
- **ACCIONES HIDRÁULICAS.**
- **ACCIONES ELÉCTRICAS**
- **ACCIONES MECÁNICAS**

## **CLASIFICACIÓN DE LAS ACCIONES ESTÁNDARES DE CONTROL**

- **ACCIÓN DE CONTROL DE DOS POSICIONES ON-OFF.**
- **ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL.**
- **ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL + INTEGRAL.**
- **ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL + DERIVATIVA.**
- **ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL + INTEGRAL + DERIVATIVA.**



## ● ACCIÓN DE CONTROL DE DOS POSICIONES ON-OFF

**EL ACCIONADOR TIENE DOS POSICIONES FIJAS, “CONECTADO” O “DESCONECTADO”. ESTE CONTROL ES ELEMENTAL Y CONSISTE EN ACTIVAR EL MANDO DE ACCIÓN CUANDO LA VARIABLE CONTROLADA ESTÁ POR DEBAJO DEL VALOR DESEADO Y LUEGO DESACTIVARLO CUANDO ESTÉ POR ARRIBA.**

MATEMÁTICAMENTE LA DESCRIPCIÓN DE ESTE CONTROL ES:

$$m(t) = \begin{cases} M1 & \text{si } e(t) > 0 \\ M2 & \text{si } e(t) \leq 0 \end{cases}$$

CON M1 y M2 CONSTANTE

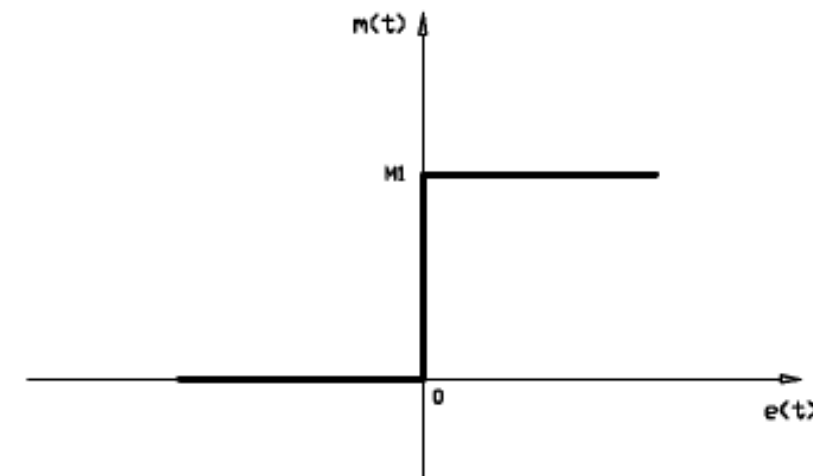
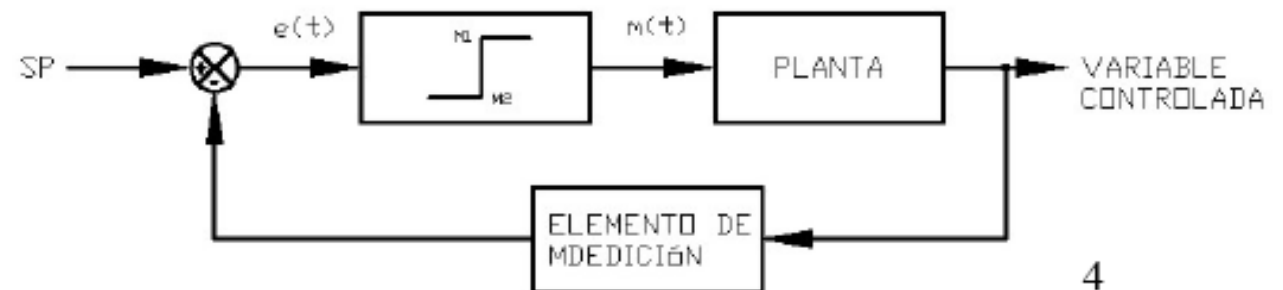


DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL

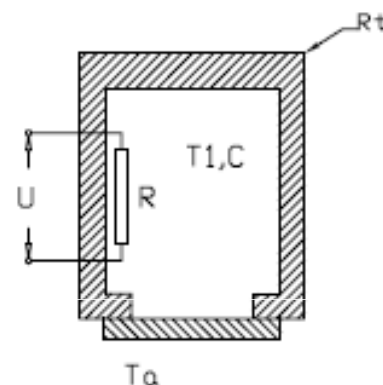
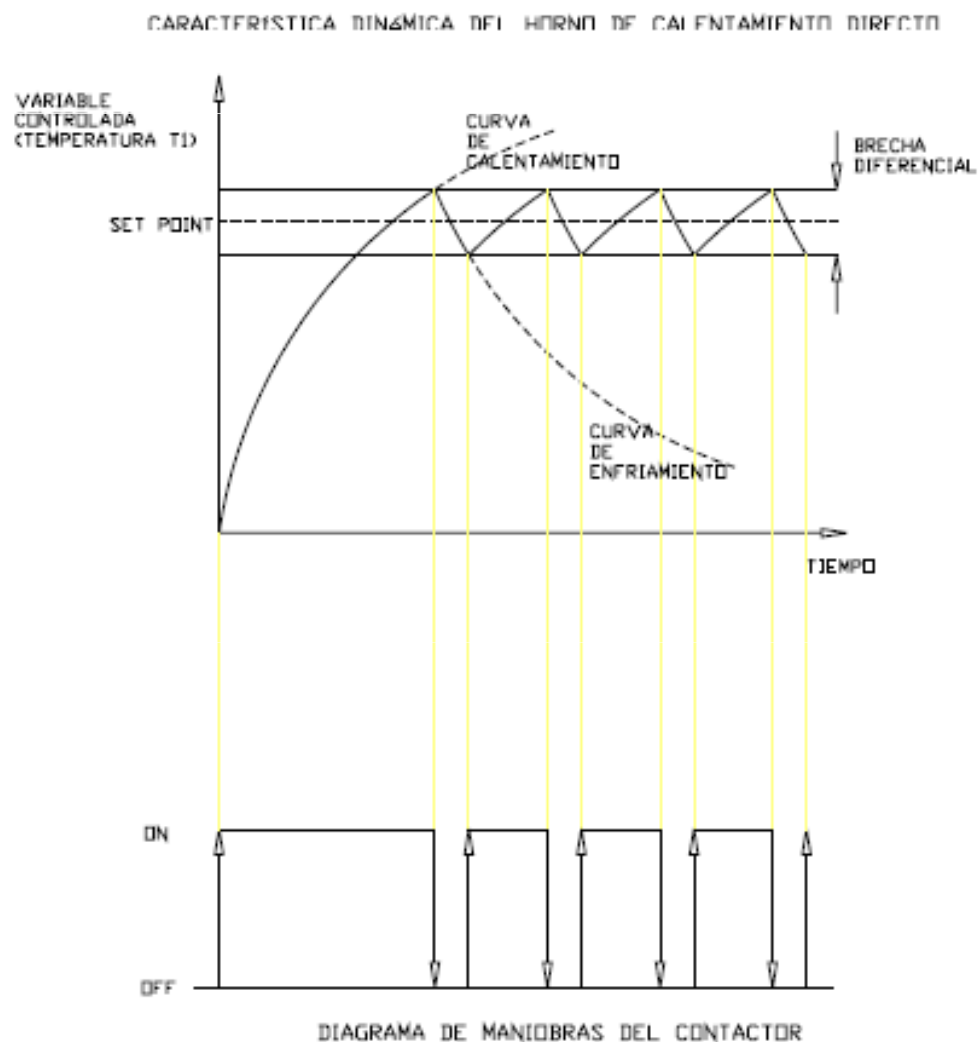
SEA:

$m(t)$  = SEÑAL DE CONTROL.

$e(t)$  = SEÑAL DE ERROR ACTUANTE



## EJEMPLO PRÁCTICO: HORNO ELÉCTRICO DE CALENTAMIENTO DIRECTO.



$T_1$  = TEMPERATURA DEL HORNO.  
 $T_a$  = TEMPERATURA AMBIENTE.  
 $U$  = TENSION APLICADA  
 $R$  = RESISTENCIA CALEFACTORA  
 $R_t$  = RESISTENCIA TÉRMICA DE LAS PAREDES DEL HORNO.  
 $C$  = CAPACIDAD TÉRMICA DEL HORNO Y DE LA CARGA.

### PROBLEMAS DE CONTROL EN EL HORNO ELÉCTRICO:

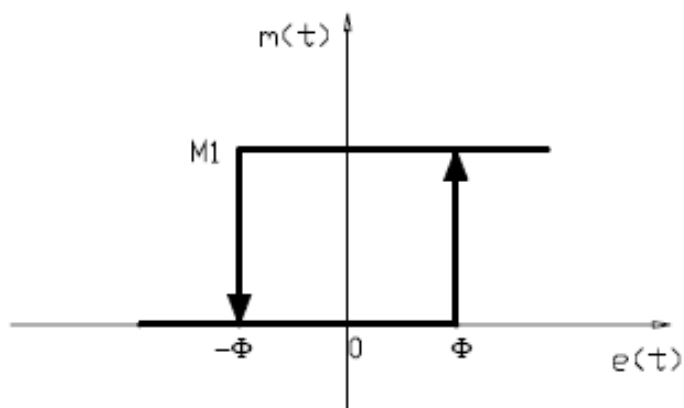
- DEBIDO AL RETARDO EN LA PROPAGACIÓN DEL CALOR, EXISTE INERCIA TÉRMICA.
- FLUCTUACIÓN DE  $T_1$  ALREDEDOR DEL SP, DEBIDO A LA INERCIA TÉRMICA.
- A MAYOR INERCIA TÉRMICA DEL HORNO (MAYOR RETARDO), MAYOR SERÁ LA FLUCTUACIÓN.

### VENTAJA DEL CONTROL ON-OFF:

- DISPOSITIVOS SIMPLES Y ECONÓMICOS.
- PARA VALORES ALTOS DE LA BRECHA DIFERENCIAL, PROVOCA UN BAJO DESGASTE EN LOS CONTACTORES, PUES SE ACTIVAN Y DESACTIVAN LO MÍNIMO NECESARIO.

## CONTROL ON-OFF CON HISTÉRESIS

**EL CONTROL ON-OFF CON HISTÉRESIS, INCORPORA UN RETARDO EN EL CAMBIO DE LA SEÑAL PARA DISMINUIR LA CANTIDAD DE CONMUTACIONES, PROLONGANDO LA VIDA ÚTIL DE LOS COMPONENTES.**

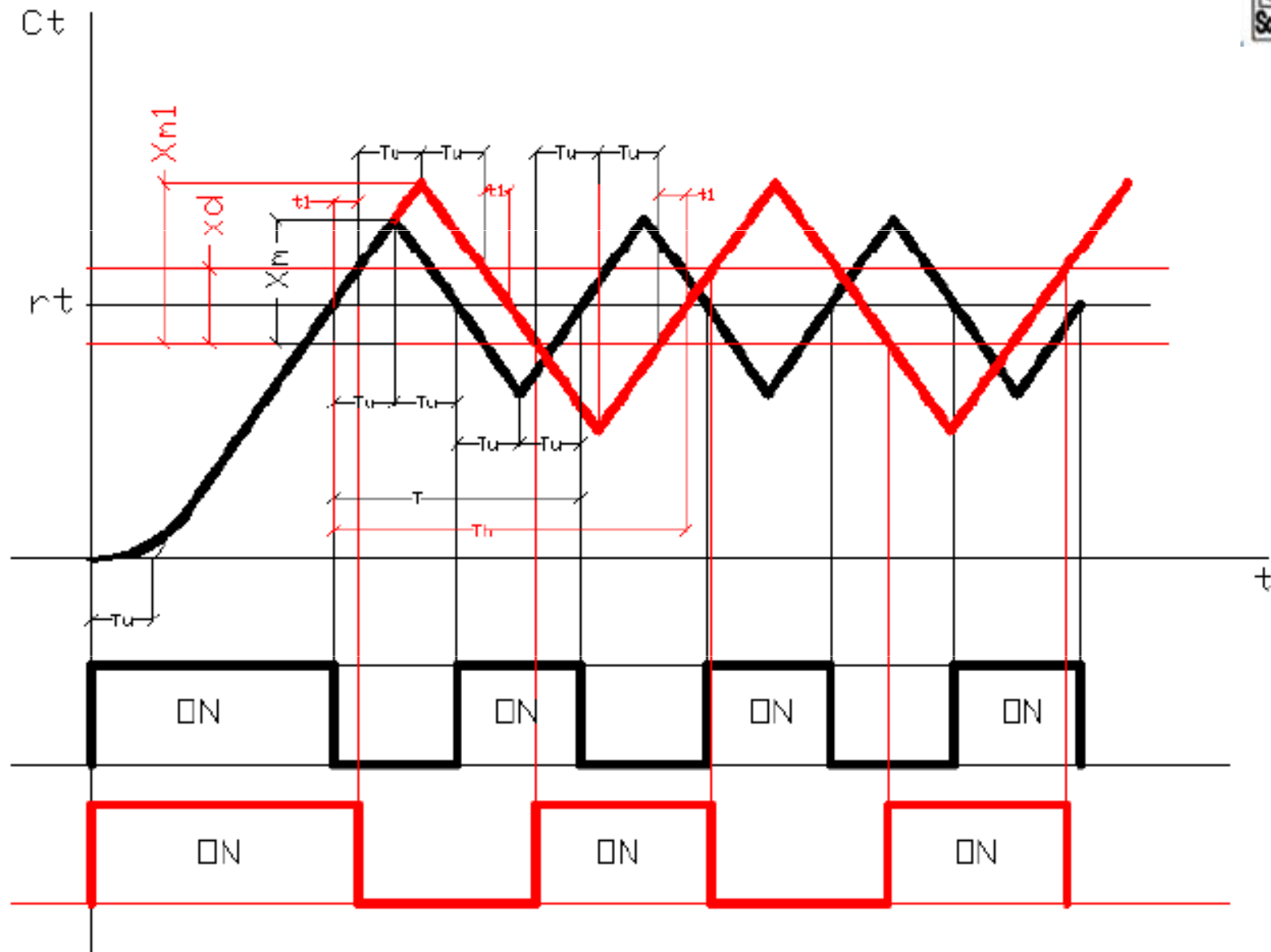


- LA SALIDA NO CAMBIA MIENTRAS EL ERROR (SP-PV) ESTA EN LA ZONA MUERTA.  $M_1$  SE ACTIVA UNOS GRADOS POR ARRIBA DEL SP Y SE DESACTIVA UNOS GRADOS POR DEBAJO.
- ESTO PROVOCA UNA MENOR FLUCTUACIÓN DE LA VARIABLE, POR LO TANTO MENORES CONMUTACIONES DEL ELEMENTO FINAL DE CONTROL, POR LO QUE REDUCE SU DESGASTE.
- CUANTO MAYOR ES LA ZONA MUERTA ( $\Delta\Phi$ ), MENOR ES LA FRECUENCIA DE OSCILACIÓN.
- AL AUMENTAR  $\Delta\Phi$ , SE TENDRÁ MENOR PRECISIÓN EN TORNO A LA REFERENCIA.

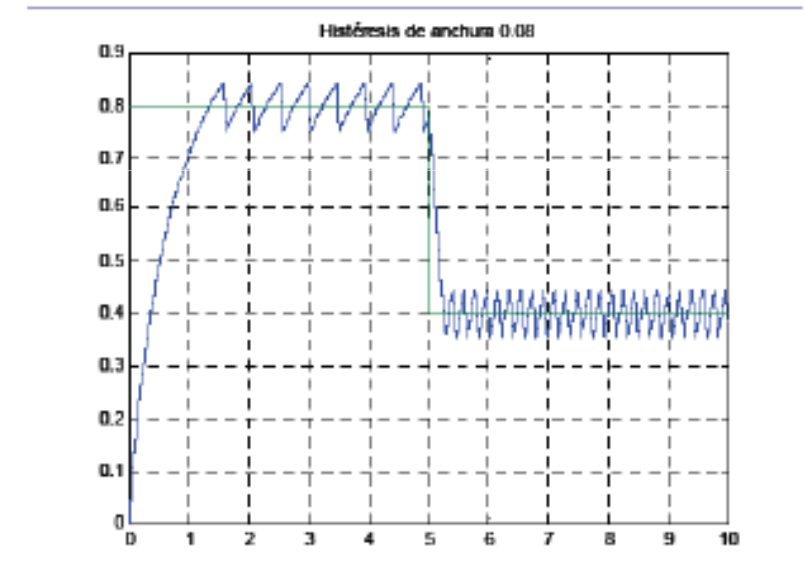
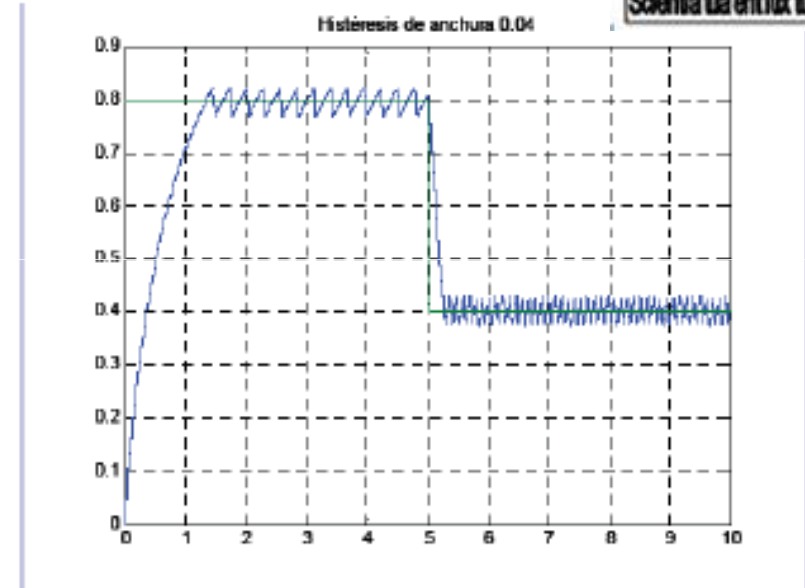
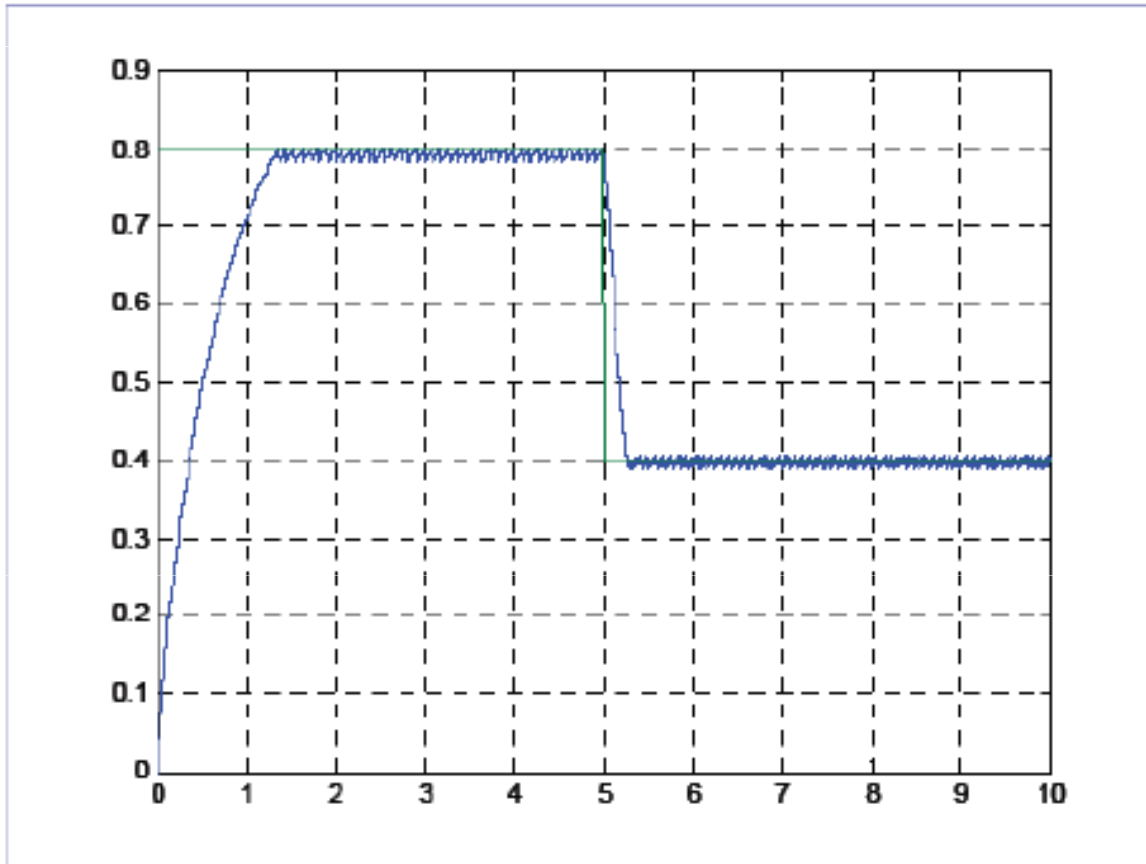
### CONCLUSIÓN:

- LA HISTÉRESIS ESTÁ DEFINIDA COMO A DIFERENCIA ENTRE LOS TIEMPOS DE APAGADO Y ENCENDIDO DEL CONTROLADOR
- EVIDENTEMENTE ESTE ALGORITMO DE CONTROL NO ES EL MÁS ADECUADO CUANDO SE DESEA UNA TEMPERATURA CONSTANTE Y UNIFORME.
- ESTE TIPO DE CONTROL SE ADECUA A PLANTAS CON CAPACITANCIAS GRANDES. PARA ALTAS Y BAJAS RESISTENCIAS Y CAMBIOS DE CARGA. POR EJEMPLO: CONTROL DE NIVEL Y TEMPERATURA EN PROCESOS DE GRAN CAPACIDAD.

# ESQUEMA DE OPERACIÓN DEL CONTROL ON-OFF CON HISTÉRESIS



CONTROL ON-OFF CON HISTÉRESIS = 0

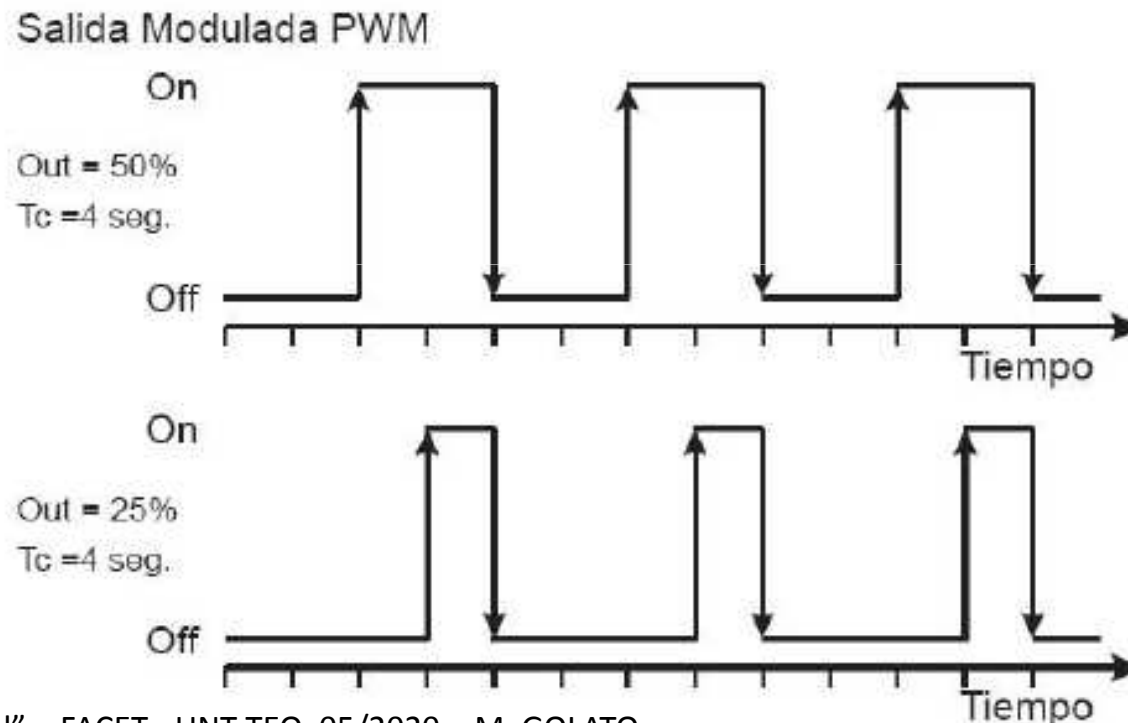




## TIEMPO DE CICLO (TC) / MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM)

Es el tiempo de activación del contactor durante un lapso de tiempo fijo (TC), menor al tiempo característico de respuesta del horno, de modo que el mismo reciba finalmente un promedio de la potencia.

Existe una técnica conocida como modulación por ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation), que permite controlar la temperatura con menos fluctuaciones, entregando al horno una potencia gradual, en la medida requerida para mantenerlo a la temperatura deseada.



## OBSERVACIONES

- Al aplicarle pulsos de calentamiento periódicamente cada 4 segundos, modulados en duración, el horno experimentará un calentamiento proporcional al promedio de tiempo que ha estado activado, sin que su temperatura siga las fluctuaciones de 4 segundos con que se aplica la potencia.
- Para sistemas típicos el “tiempo de ciclo” se ajusta entre 1 y 200 segundos.
- A mayor “tiempo de ciclo”, menos desgaste de los contactores, pero siempre tiene que ser inferior al tiempo característico del sistema.
- La práctica recomendada es usar un tiempo de ciclo inferior a la mitad del tiempo característico del sistema.

## ● ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL

**ESTA ACCIÓN DE CONTROL SE CARACTERIZA PORQUE LA SALIDA DEL CONTROLADOR ES PROPORCIONAL A LA SEÑAL DE ERROR ACTUANTE.**

MATEMÁTICAMENTE SE DEFINE COMO:

$$m(t) = m_o + K_p \times e(t)$$

DONDE:

$m_o$  = SEÑAL DE CONTROL.

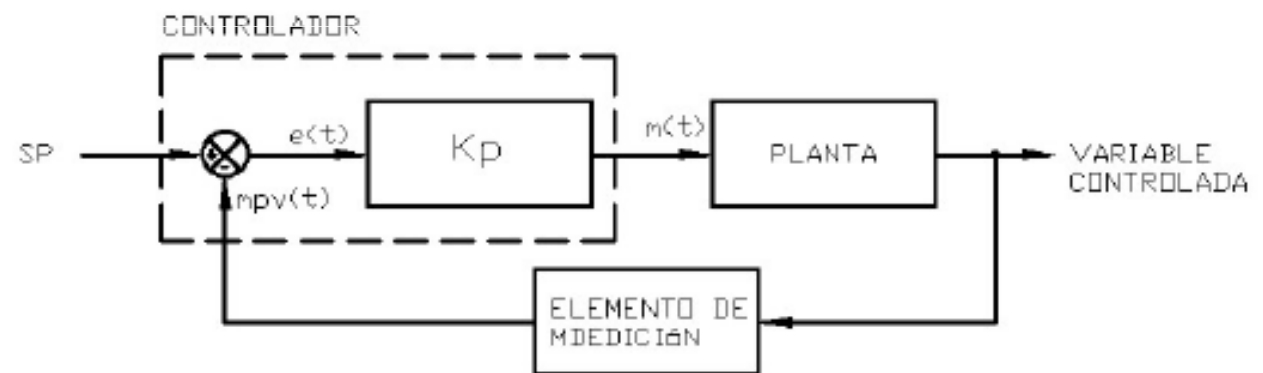
$m_o$  = SEÑAL INICIAL O POLARIZACIÓN.

$e_o$  = SEÑAL DE ERROR ACTUANTE.

SP = VALOR DESEADO (SET POINT).

$K_p$  = GANANCIA ESTÁTICA DEL CONTROLADOR.

$m_{pv}$  = SEÑAL DE MEDICIÓN DE LA VARIABLE DE PROCESO.



**LA GANANCIA ESTÁTICA DEL CONTROLADOR “ $K_p$ ” O “SENCIBILIDAD”, DETERMINA CUANTO SE MODIFICA LA SALIDA DEL CONTROLADOR CON UN CIERTO CAMBIO DEL ERROR ( $e_o$ ).**

**SEÑAL INICIAL ( $m_o$ ):**

**REPRESENTA LA SEÑAL DE SALIDA DEL CONTROLADOR CUANDO LA SEÑAL DE ERROR ACTUANTE ES CERO.**

**ERROR ESTACIONARIO:**

**ES LA DESVIACIÓN DEL SISTEMA CUANDO SE ATENÚAN LOS TRANSITORIOS.**

**VENTAJA DEL CONTROL “P”: POSEE UN SOLO PARÁMETRO DE AJUSTE ( $K_p$ ).**

**DESVENTAJA DEL CONTROL “P”: TRABAJA CON UNA DESVIACIÓN EN LA VARIABLE QUE SE CONTROLA.**

## EJEMPLO PRÁCTICO: CONTROL DE NIVEL EN UN TANQUE

### CONDICIONES DE DISEÑO:

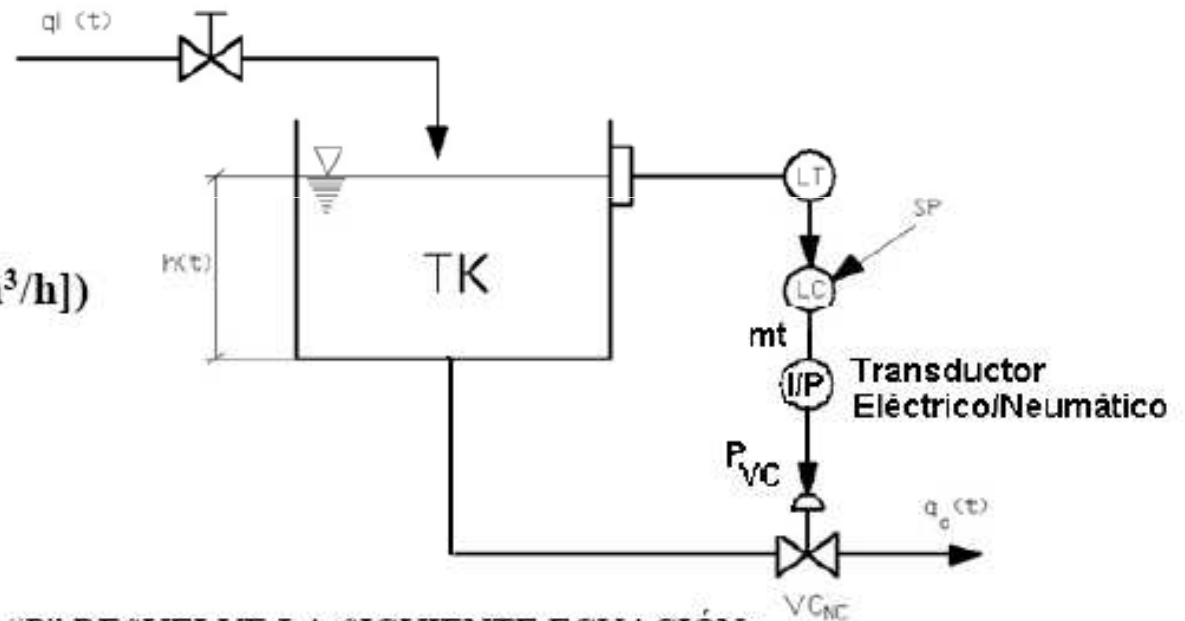
$$q_i = q_o = 150 \text{ [m}^3\text{/h]}$$

$$h(t) = 6 \text{ [m]}$$

$$P_{VC} = 9 \text{ [psig]} \text{ (Presión de aire } p/q_o = 150 \text{ [m}^3\text{/h])}$$

### SUPONGAMOS QUE:

$$\text{Flujo de entrada} = q_i + 20 \text{ [m}^3\text{/h]}$$



### EXISTENCIA DE LA DESVIACIÓN:

- PARA EL CASO EN ESTUDIO, EL CONTROLADOR “P” RESUELVE LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$m(t) = 9 + K_p \cdot e(t)$$

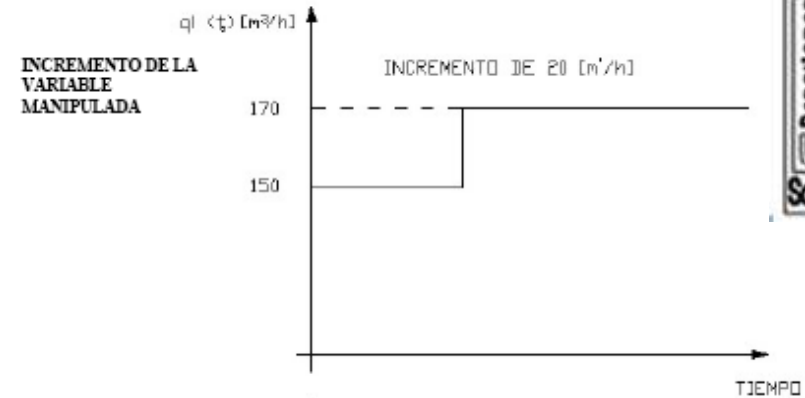
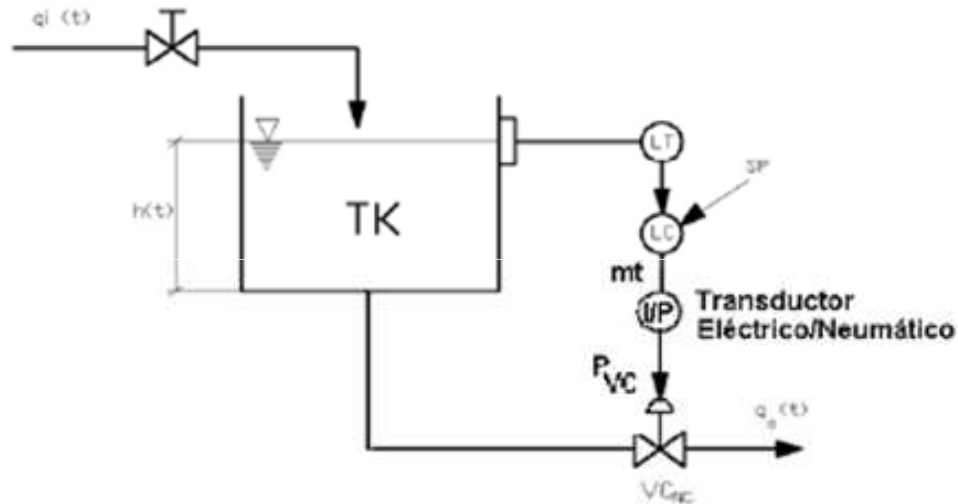
- $P/q = 170 \text{ [m}^3\text{/h]}$ , “L” AUMENTA Y “LC” INCREMENTA SU SALIDA HACIA  $VC_{NC}$ .
- $P/$  ALCANZAR UNA OPERACIÓN ESTACIONARIA, DEBE SER  $q_o = 170 \text{ [m}^3\text{/h]}$ .
- SUPONIENDO QUE  $P/q_o = 170 \text{ [m}^3\text{/h]}$ ,  $P_{VC} = 10 \text{ [psig]}$

COMO:  $m(t) = 9 + K_p \cdot e(t)$ ,

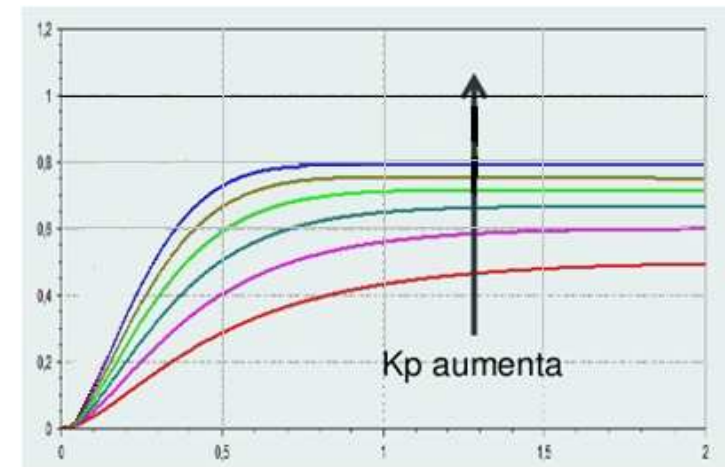
ENTONCES:  $K_p \cdot e(t) = 1 \text{ [psig]}$ , POR LO QUE  $e(t) \neq 0$

**Esto indica que para que haya acción proporcional, debe existir una desviación o error estacionario.**

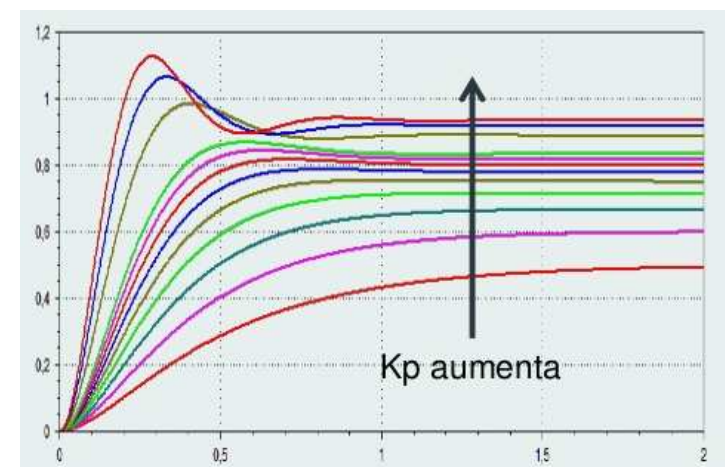
## OBSERVACIONES:



## RESPUESTA AL ESCALÓN EN UN SISTEMA DE 1er ORDEN



## RESPUESTA AL ESCALÓN EN UN SISTEMA DE 2do ORDEN



EN LA CURVA DE RESPUESTA SE PUEDE VER QUE A MAYOR GANANCIA ( $K_p$ ):

- MÁS RÁPIDA ES LA RESPUESTA.
- EL ERROR EN ESTADO ESTABLE ES MENOR.
- AUMENTA EL SOBREPICO P/ SISTEMAS DE 2do ORDEN**

## COMPROMISO DE DISEÑO:

- MAYOR VELOCIDAD DE RESPUESTA A CAMBIOS EN EL SP, TRAE APAREJADO MAYOR SENCIBILIDAD A RUIDOS DE MEDICIÓN Y MAYOR DESGASTE DEL ACTUADOR.

## BANDA PROPORCIONAL

EN LA PRÁCTICA SE UTILIZA LA SIGUIENTE RELACIÓN:

$$BP = 100[\%] / K_p$$

ES LA INVERSA DE LA GANANCIA ESTÁTICA “K<sub>p</sub>” Y REPRESENTA EL PORCENTAJE QUE SE DESPLAZA LA ENTRADA PARA QUE LA SALIDA VAYA AL 100% DE LA ESCALA.

## PUESTA EN MARCHA DE UN CONTROLADOR “P”

SE DEBEN FIJAR LOS SIGUIENTES PARÁMETROS:

- VALOR DESEADO (SP).
- BANDA PROPORCIONAL (BP).
- TIEMPO DE CICLO (TC).

INTERNAMENTE UN CONTROLADOR REALIZA UN CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE SALIDA AUT[%], POR EJEMPLO MEDIANTE LA SIGUIENTE FÓRMULA:

$$AUT [\%] = [100[\%] \cdot e / BANDA]$$

DONDE:

BANDA – BP . SP / 100 [%]; donde BP – BANDA PROPORCIONAL  
 e = (SP – PV); donde PV = MEDIDA DE LA VARIABLE DE PROCESO.



## EJEMPLO PRÁCTICO: CONTROL DEL HORNO ELÉCTRICO DE CALENTAMIENTO DIRECTO.

SI ADOPTAMOS LOS SIGUIENTES PARÁMETROS:

SP = 200 [°C]; BP = 10 [%]

Y RECORDAMOS QUE:

BANDA = BP . SP / 100 [%] =

BANDA = 10[%] . 200[°C] / 100[%] = 20 [°C]

SUPONIENDO ADEMÁS QUE:

T1 ≤ 180 [°C]: AUT [%] = [100 . (200-180) / 20] = 100 [%]

T1 = 190 [°C]: AUT [%] = [100 . (200-190) / 20] = 50 [%]

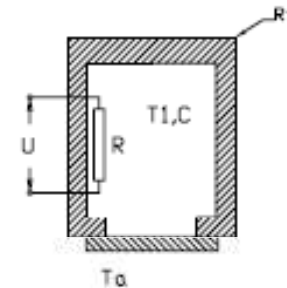
T1 = 200 [°C]: AUT [%] = [100 . (200-200) / 20] = 0 [%]

NO RESULTA DIFÍCIL IMAGINAR UN CONTROL ON-OFF COMO UNO PROPORCIONAL CON BP = 0[%].

PUÉS:

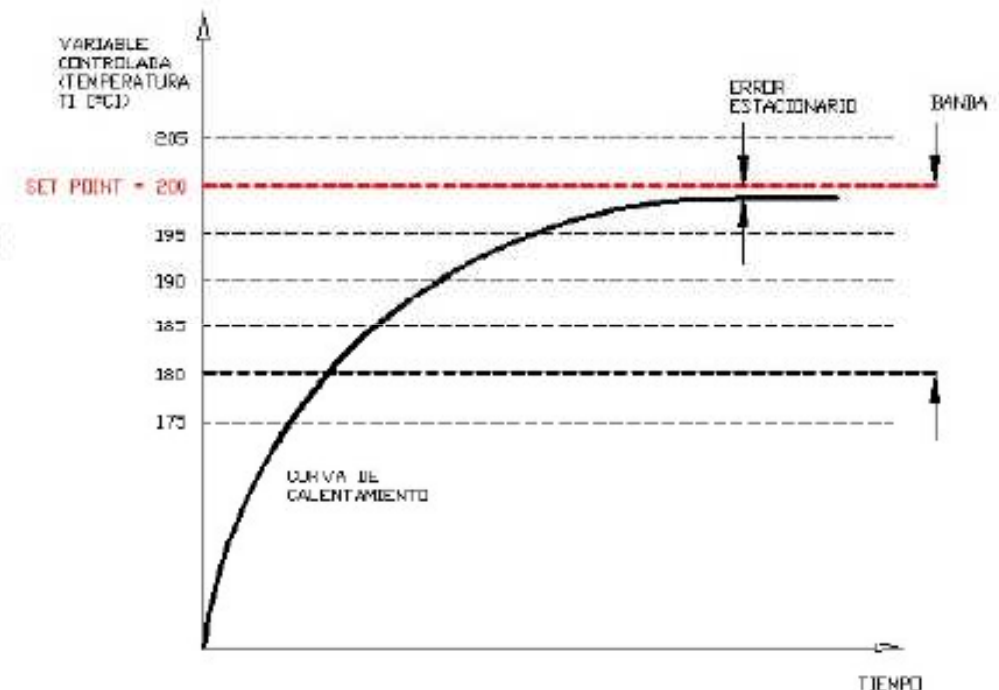
T1 > SP: entonces e < 0, entonces AUT [%] = 0 [%]

T1 < SP: entonces e > 0, entonces AUT [%] = X [%]



T1= TEMPERATURA DEL HORNO.  
 Ta= TEMPERATURA AMBIENTE.  
 U= TENSION APLICADA  
 R= RESISTENCIA CALEFACTORA  
 Rt= RESISTENCIA TERMICA DE LAS PAREDES DEL HORNO.  
 C= CAPACIDAD TERMICA DEL HORNO Y DE LA CARGA.

CARACTERÍSTICA DINÁMICA DEL HORNO DE CALENTAMIENTO DIRECTO CON CONTROL PROPORCIONAL.



## CONCLUSIONES:

- EL ERROR ESTACIONARIO SE PUEDE REDUCIR DISMINUYENDO LA BANDA PROPORCIONAL. REDUCIR DEMASIADO LA “BP” VUELVE AL SISTEMA MÁS OSCILATORIO (MÁS PARECIDO A UN CONTROL ON - OFF).
- AUMENTAR LA “BP” PARA ELIMINAR LAS OSCILACIONES, GENERA UNA PÉRDIDA DE EFECTIVIDAD PARA RESPONDER RÁPIDAMENTE A PERTURBACIONES EXTERNAS.
- EN UN CONTROL “P”, SIEMPRE HABRÁ ALGO DE ERROR ESTACIONARIO.
- ESTE TIPO DE CONTROL SE ADECUA A PLANTAS CON PEQUEÑA Y MEDIANA CAPACITANCIA, CON BAJA RESISTENCIA Y CAMBIOS DE CARGA MODERADOS. POR EJEMPLO: CONTROL DE PRESIÓN, NIVEL Y TEMPERATURA.





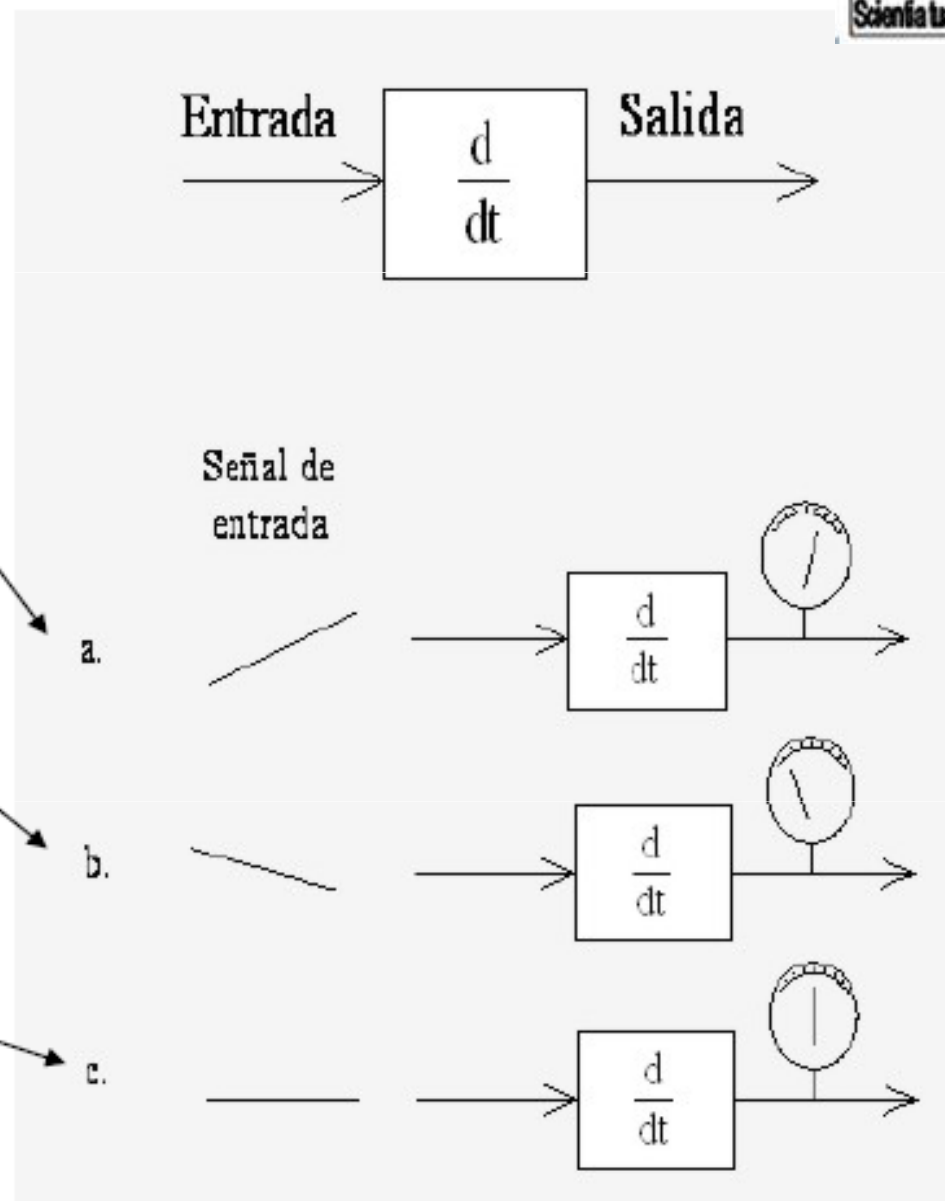
## ALGUNOS CONCEPTOS

### ELEMENTO DERIVADOR

a) SALIDA POSITIVA PARA SEÑAL DE ENTRADA CRECIENTE.

a) SALIDA NEGATIVA PARA SEÑAL DE ENTRADA DECRECIENTE.

a) SALIDA NULA PARA SEÑAL DE ENTRADA CONSTANTE.

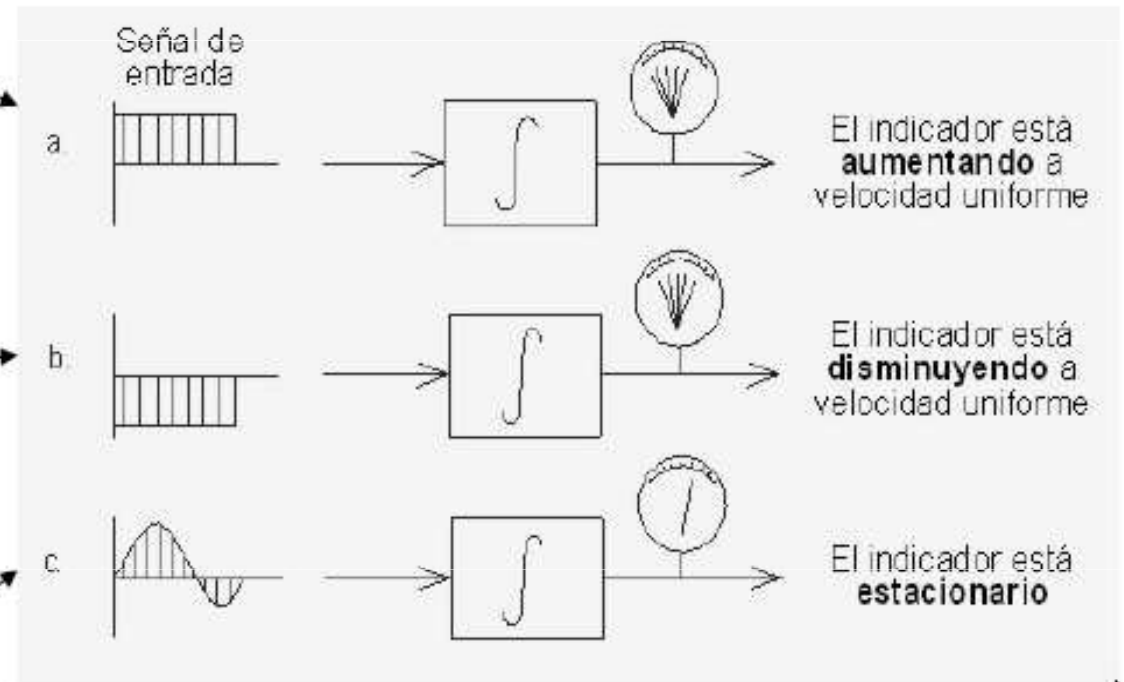


## ELEMENTO INTEGRADOR

a) SI LA ENTRADA ES POSITIVA Y CONSTANTE, LA SEÑAL DE SALIDA CRECIENTE A RITMO CONSTANTE.

a) SI LA ENTRADA ES NEGATIVA Y CONSTANTE, LA SEÑAL DE SALIDA SERÁ DECRECIENTE A RITMO CONSTANTE.

a) SI LA ENTRADA ES ESTACIONARIA MAYORMENTE POSITIVA, LA SEÑAL DE SALIDA SERÁ ESTACIONARIA POSITIVA.



## ● ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL + INTEGRAL

**ESTE ALGORITMO DE CONTROL ELIMINA EL ERROR ESTACIONARIO GENERADO POR LA ACCIÓN “P” Y CORRIGE TOMANDO EN CUENTA LA MAGNITUD DEL ERROR Y EL TIEMPO QUE ÉSTE HA PERMANECIDO.**

MATEMÁTICAMENTE LA ACCIÓN SE DEFINE COMO:

$$m(t) = m_o + K_p \times e(t) + K_p/T_i \cdot \int e(t) \cdot dt$$

DONDE:

$m(t)$  = SEÑAL DE CONTROL.

$m_o$  = SEÑAL INICIAL O POLARIZACIÓN.

$e(t)$  = SEÑAL DE ERROR ACTUANTE.

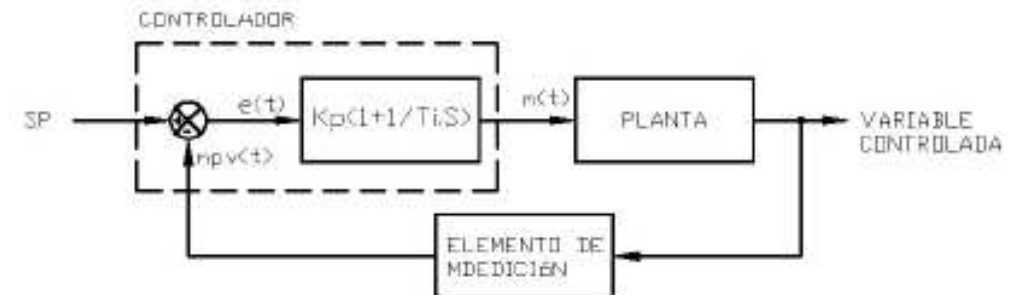
$K_p$  = GANANCIA ESTÁTICA DEL CONTROLADOR.

$T_i$  = TIEMPO INTEGRAL

$1/T_i$  = FRECUENCIA DE REPOSICIÓN.

$\int e(t).dt$  = INTEGRAL DEL ERROR.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL P+I



Sus expresiones matemáticas son:

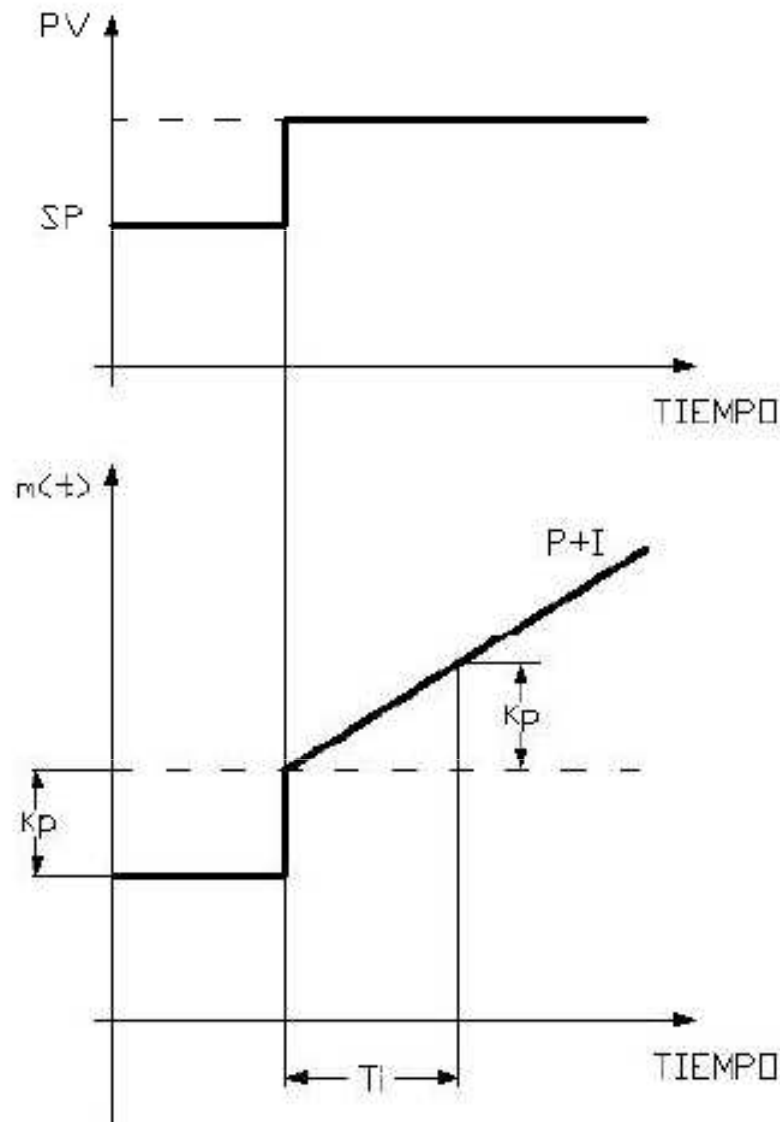
**Ec. Diferencial**

$$m = K_c \left( e + \frac{1}{T_I} \int e dt \right)$$

**Laplace**

$$m = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) E$$

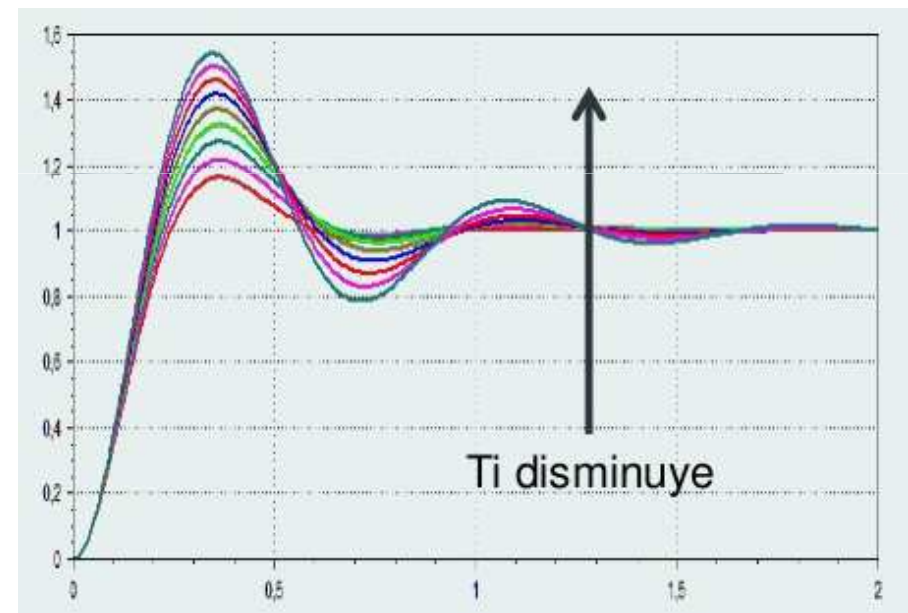
## RESPUESTA DE LA ACCIÓN P+I



### DE LA CURVA DE RESPUESTA:

- ❑ TANTO MENOR ES “ $T_i$ ”, MAS PRONUNCIADA ES LA CURVA, O SEA UNA RESPUESTA MÁS RÁPIDA.
- ❑ PARA VALORES DE “ $T_i$ ” PEQUEÑOS, LA FRECUENCIA DE REPOSICIÓN “ $T$ ”, RESULTA MAYOR, POR LO QUE SE LE DÁ MAYOR PESO A LA ACCIÓN INTEGRAL.

### RESPUESTA AL ESCALÓN EN UN SISTEMA DE 2do ORDEN



● **PUESTA EN MARCHA DE UN CONTROLADOR “P + I”**

**SE DEBEN FIJAR LOS SIGUIENTES PARÁMETROS:**

**VALOR DESEADO (SP).**

**BANDA PROPORCIONAL (BP).**

**FRECUENCIA DE REPOSICIÓN (I).**

**INTERNAMENTE EL CONTROLADOR REALIZA UN CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE SALIDA AUT[%] MEDIANTE LA SIGUIENTE FÓRMULA:**

$$\text{AUT} [\%] = [100[\%] \cdot (e + I \cdot \int e(t).dt) / \text{BANDA}]$$

**DONDE:**

**BANDA = BP . SP / 100 [%] ; BP: BANDA PROPORCIONAL**

**e = (SP – PV) ; PV: MEDIDA DE LA VARIABLE DE PROCESO.**

**I = FRECUENCIA DE REPOSICIÓN EN [1/Seg].**

**$\int e(t).dt$  = INTEGRAL DEL ERROR.**



## EJEMPLO PRÁCTICO: CONTROL DEL HORNO ELÉCTRICO DE CALENTAMIENTO DIRECTO.

$$\text{AUT [\%]} = [100[\%] \cdot (e + I \int e(t).dt) / \text{BANDA}]$$

**ADOPTO LOS SIGUIENTES PARÁMETROS:**

**SP = 200 [°C]; BP = 10 [%]; I = 0,04 [1/Seg]**

**RECORDEMOS QUE:**

**BANDA = BP . SP / 100 [%] =**

**BANDA = 10[%] . 200[°C] / 100[%] = 20 [°C]**

**SUPONGAMOS QUE:**

**P/ TIEMPO = 0 [Seg]; T1 = 195 [°C].**

**P/ TIEMPO = 1 [Seg]; SE ACTIVA LA ACCIÓN "I".**

**LA POTENCIA DE SALIDA IRÁ AUMENTANDO CADA SEGUNDO MIENTRAS  $e = 5[°C]$ , EN:**

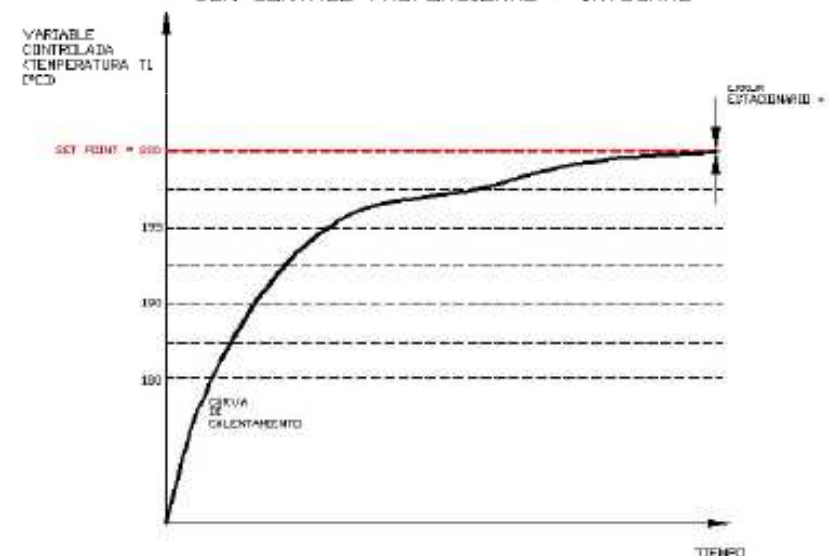
$$100[\%] \cdot 0,04 [1/\text{Seg}] \cdot 5 [°C] / 20 [°C] = 1[\%]$$

**EL ALZA DE LA POTENCIA CONTINUA CADA SEGUNDO MÁS LENTAMENTE EN LA CANTIDAD**

$$100[\%] \cdot 0,04 [1/\text{Seg}] \cdot 4 [°C] / 20 [°C] = 0,8[\%]$$

TIEMPO	PV	e	INTEGRAL	AUT%
0	195	5,0	0	25
1	195	5,0	5,0	26
2	195	5,0	10,0	27
3	195	5,0	15,0	28
4	195	5,0	20,0	29
5	196	4,0	25,0	30
6	196	4,0	29,0	25,8
7	196	4,0	33,0	26,6
8	196	4,0	37,0	27,4
9	196	4,0	41,0	28,2
10	196	4,0	45,0	29
11	197	3,0	48,0	24,6
12	197	3,0	51,0	25,2
13	197	3,0	54,0	25,8
14	198	3,0	57,0	26,4
15	198	2,0	59,0	21,8
16	198	2,0	61,0	22,2
17	198	2,0	63,0	22,6
XX	200	0,0	125	25

CARACTERÍSTICA DINÁMICA DEL HORNO DE CALENTAMIENTO DIRECTO CON CONTROL PROPORCIONAL + INTEGRAL



## **CONCLUSIONES:**

**DEBIDO A LA ACCIÓN INTEGRAL, LA SALIDA DEL CONTROLADOR CRECE Y DECRECE EN EL TIEMPO HASTA QUE EL ERROR SEA NULO.**

**LA SALIDA DE LA ACCIÓN PROPORCIONAL, SE CORRIGE EN UNA CANTIDAD EQUIVALENTE A LA INTEGRAL DEL ERROR MULTIPLICADA POR “T”.**

**CUANTO MENOR ES “T<sub>i</sub>”, MÁS RÁPIDA RESULTA LA RESPUESTA DEL SISTEMA, YA QUE SE LE DÁ MAYOR PESO A LA ACCIÓN INTEGRAL.**

**AL INCREMENTAL “K<sub>p</sub>”, LA RESPUESTA ES MÁS RÁPIDA PERO MÁS OSCILATORIA. VALORES MUY ALTOS DE “K<sub>p</sub>”, PUEDEN DESESTABILIZAR DICHA RESPUESTA.**

**AL DISMINUIR “T<sub>i</sub>” A “K<sub>p</sub>” CONSTANTE, LA RESPUESTA ES MÁS RÁPIDA PERO MÁS OSCILATORIA.**

**CON ACCIÓN INTEGRAL, UN ERROR PEQUEÑO POSITIVO SIEMPRE NOS DARÁ UNA ACCIÓN DE CONTROL CRESIENTE, Y SI FUERA NEGATIVO, LA SEÑAL DE CONTROL SERÁ DECRECIENTE.**

**ESTE TIPO DE CONTROL ES ADECUADO PARA TODOS LOS PROCESOS DONDE LA DINÁMICA ES ESENCIALMENTE DE PRIMER ORDEN**

**SE APLICA A PLANTAS CON CAPACITANCIA VARIADA, CON BAJAS RESISTENCIAS Y PARA CUALQUIER TIPO DE CAMBIO DE CARGA.**

## ● ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL + DERIVATIVO

ES UN CONTROL “P” AL QUE SE LE AGREGA LA CAPACIDAD DE CONSIDERAR TAMBIÉN LA VELOCIDAD DE LA VARIABLE CONTROLADA EN EL TIEMPO, DE MANERA DE “ADELANTAR” LA ACCIÓN DE CONTROL DEL MANDO DE SALIDA OBTENIENDO UNA RESPUESTA MÁS ESTABLE .

MATEMÁTICAMENTE SE DEFINE COMO:

$$m(t) = m_0 + K_p \times e(t) + K_p \cdot T_D \cdot de(t)/dt$$

DONDE:

$m(t)$  = SEÑAL DE CONTROL.

$m_0$  = SEÑAL INICIAL O POLARIZACIÓN.

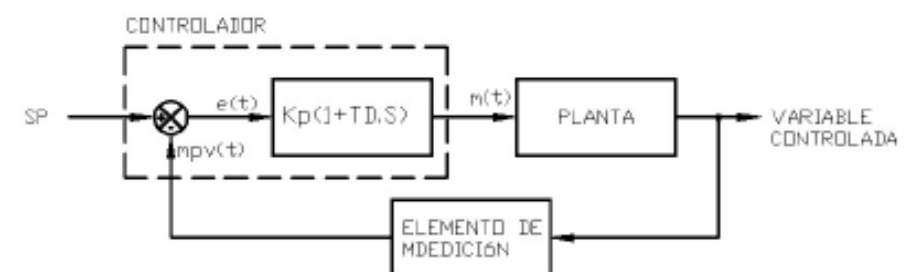
$K_p$  = GANANCIA ESTÁTICA DEL CONTROLADOR.

$e(t)$  = SEÑAL DE ERROR ACTUANTE.

$T_D$  = TIEMPO DERIVATIVO.

$de(t)/dt$  = VELOCIDAD DE CAMBIO DE LA VARIABLE.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL P+D



### Ec. Diferencial

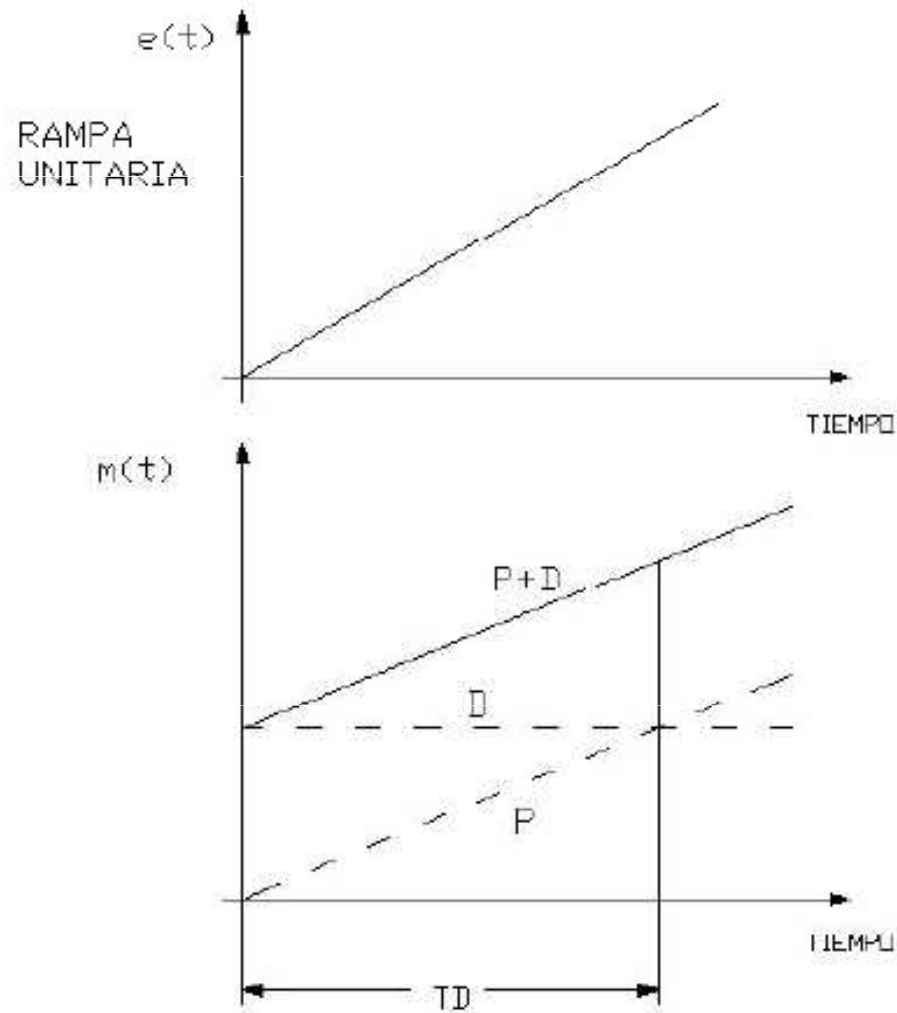
$$m = K_c \left( e + T_D \frac{de}{dt} \right)$$

### Laplace

$$m = K_c \left( 1 + T_D s \right) E$$



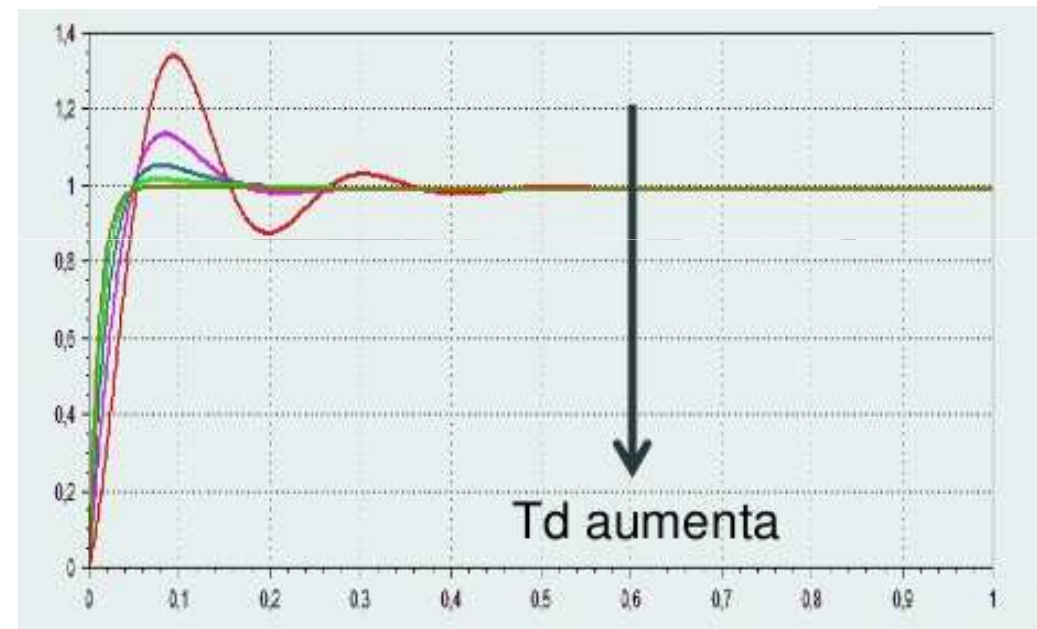
## RESPUESTA DE LA ACCIÓN P+D



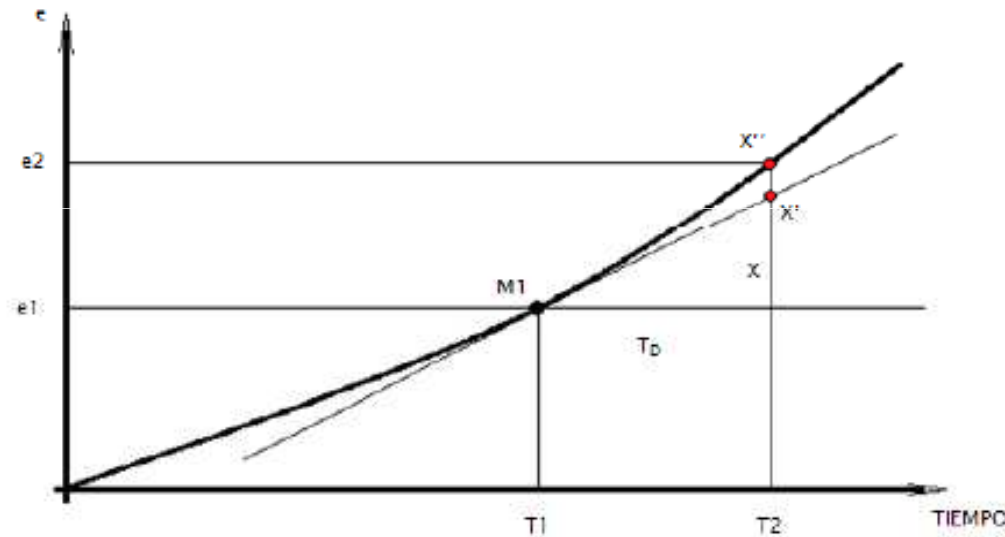
### DE LA CURVA DE RESPUESTA:

- ❑ “TD” ES EL INTERVALO DE TIEMPO EN EL QUE LA ACCIÓN DE LA VELOCIDAD SE ADELANTA AL EFECTO DE ACCIÓN PROPORCIONAL.
- ❑ PARA VALORES DE “TD” PEQUEÑOS, LE QUITA PESO A LA ACCIÓN DERIVATIVA, ANULÁNDOLA COMPLETAMENTE PARA  $TD = 0$ .

### RESPUESTA AL ESCALÓN EN UN SISTEMA DE 2do ORDEN



# SIGNIFICADO DEL EFECTO DE ADELANTAMIENTO DE LA ACCION “D”



LOS PUNTOS  $X'$  Y  $X''$  SE ENCUENTAN TAN CERCA QUE PUEDE DECIRSE QUE  $X' \approx X''$ .

ENTONCES EL PUNTO  $M1$  ADELANTADO  $T_D$  SEGUNDOS MEDIANTE LA RECTA TANGENTE ES PÁCTICAMENTE EL PUNTO  $X''$ .

CON LO QUE, SIN CONOCER EXACTAMENTE LA POSICION DEL PUNTO  $X''$ , EL CONTROLADOR ADELANTÓ SATISFACTORIAMENTE LA ACCION CORRECTIVA UTILIZANDO EL PUNTO  $X'$ .

## ● PUESTA EN MARCHA DE UN CONTROLADOR “P + D”

SE DEBEN FIJAR LOS SIGUIENTES PARÁMETROS:

VALOR DESEADO (SP).

BANDA PROPORCIONAL (BP).

CONSTANTE DERIVATIVA (TD).

**INTERNAMENTE EL CONTROLADOR REALIZA UN CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE SALIDA AUT[%] MEDIANTE LA SIGUIENTE FÓRMULA:**

$$\text{AUT [\%]} = [100[\%] \cdot (e - T_D \cdot C) / \text{BANDA}]$$

**DONDE:**

**BANDA = BP . SP / 100 [%] ; BP: BANDA PROPORCIONAL**

**e = (SP – PV) ; PV: MEDIDA DE LA VARIABLE DE PROCESO.**

**T<sub>D</sub> = TIEMPO O CONSTANTE DERIVATIVA EN [Seg].**

**C = de/dt = VELOCIDAD DE CAMBIO DE LA VARIABLE CONTROLADA.**



## **EJEMPLO PRÁCTICO: CONTROL DEL HORNO ELÉCTRICO DE CALENTAMIENTO DIRECTO.**

### **ADOPTO LOS SIGUIENTES PARÁMETROS:**

**SP = 200 [°C]; BP = 10 [%]; TD = 5 [Seg]**

### **SUPONGAMOS QUE:**

**T1 = 185 [°C].**

**C = 2 [°C/Seg] (ASCENDENTE).**

### **RECORDEMOS QUE:**

**BANDA = BP . SP / 100 [%] =**

**BANDA = 10[%] . 200[°C] /100[%] = 20 [°C]**

### **EN UN CONTROLADOR “P” LA SALIDA ES:**

**AUT [%] = [100[%] . e / BANDA]**

**AUT [%] = [100[%] . (200-185) [°C] / 20[°C]] = 75 [%]**

### **EN UN CONTROLADOR “P+D” LA SALIDA ES:**

**AUT [%] = [100[%] . (e – TD . C) / BANDA]**

**AUT [%] = [100[%] . ((200 – 185) [°C] – 5[Seg]. 2[°C/Seg]) / 20[°C]] = 25 [%]**

## **EJEMPLO: (CONTROL DEL HORNO ELÉCTRICO)**

### **SUPONGAMOS QUE:**

**SP = 200 [°C]; BP = 10 [%]; T<sub>D</sub> = 5 [Seg]; C = 2 [°C/Seg] y T<sub>1</sub> = 170 [°C]**

**ENTONCES:**

$$\text{AUT [\%]} = [100\%] \cdot (\mathbf{e} - T_D \cdot C) / \text{BANDA}$$

$$\text{AUT [\%]} = [100\%] \cdot ((200 - 170) [\text{°C}] - 5[\text{Seg}] \cdot 2[\text{°C/Seg}]) / 20[\text{°C}] = 100 [\%]$$

### **AHORA SI:**

**SP = 200 [°C]; BP = 10 [%]; T<sub>D</sub> = 5 [Seg]; C = 2 [°C/Seg] y T<sub>1</sub> = 171 [°C]**

**ENTONCES:**

$$\text{AUT [\%]} = [100\%] \cdot (\mathbf{e} - T_D \cdot C) / \text{BANDA}$$

$$\text{AUT [\%]} = [100\%] \cdot ((200 - 171) [\text{°C}] - 5[\text{Seg}] \cdot 2[\text{°C/Seg}]) / 20[\text{°C}] = 95 [\%]$$

### **AHORA SI:**

**SP = 200 [°C]; BP = 10 [%]; T<sub>D</sub> = 5 [Seg]; C = - 1 [°C/Seg] y T<sub>1</sub> = 201 [°C]**

**ENTONCES:**

$$\text{AUT [\%]} = [100\%] \cdot (\mathbf{e} - T_D \cdot C) / \text{BANDA}$$

$$\text{AUT [\%]} = [100\%] \cdot ((200 - 201) [\text{°C}] - 5[\text{Seg}] \cdot (-1)[\text{°C/Seg}]) / 20[\text{°C}] = 20 [\%]$$

**LA ACCIÓN “D” OCURRE TAMBIÉN FUERA DE LA “BP”**

## TABLA DE COMPARACIÓN

**POTENCIAS A DISTINTAS TEMPERATURAS PARA LOS CASOS DE CONTROL “P”, CONTROL “P+D”, CONTROL “P+D” CON C(+) Y CONTROL “P+D” CON C(-).**

**PARA SP = 200 [°C] y BP = 10 [%]:**

ACCIÓN DE CONTROL PV [°C]	"P"; TD = 0 ; C = 0 AUT [%]	"P+D"; TD = 5 [Seg]; C = 2 [°C/Seg] AUT [%]	"P+D"; TD = 5 [Seg]; C = -1 [°C/Seg] AUT [%]
204	0	0	5
201	0	0	20
200	0	0	25
199	5	0	30
198	10	0	35
195	25	0	50
190	50	0	75
185	75	25	100
182	90	40	100
181	95	45	100
180	100	50	100
171	100	95	100
170	100	100	100

# CONCLUSIONES

**PERMITE MANTENER LA VARIABLE CONTROLADA MUY ESTABLE (SIN OSCILACIONES), YA QUE AÑADE AMORTIGUAMIENTO AL SISTEMA, POR LO QUE MEJORA LA EXÁCTITUD DEL ESTADO DE RÉGIMEN.**

**POR SU CARÁCTER DE ANTICIPACIÓN, SE OBTIENE UN MEDIO DE CONTROL DE ALTA SENSIBILIDAD.**

**PRODUCE UNA CORRECCIÓN SIGNIFICATIVA ANTES QUE EL VALOR DEL ERROR ACTUANTE SE HAGA EXCESIVO.**

**EL TÉRMINO “D” DA PROPIEDADES PREDICTIVAS A LA ACTUACIÓN, GENERANDO UNA ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL A LA VELOCIDAD DE CAMBIO DEL ERROR.**

**TIENDE A DAR MÁS ESTABILIDAD AL SISTEMA, PERO SUELE GENERAR GRANDES VALORES EN LA SEÑAL DE CONTROL DEBIDO A QUE AMPLIFICA SEÑALES DE RUIDO Y PUEDE PRODUCIR EFECTOS DE SATURACIÓN EN EL ELEMENTO FINAL DE CONTROL.**

**ESTE TIPO DE CONTROL SE ADECUA A PLANTAS CON CAPACITANCIA MEDIA, CON BAJA RESISTENCIA Y PARA CUALQUIER TIPO DE CAMBIOS DE CARGA.  
SE APLICA CUANDO ES NECESARIO UNA GRAN ESTABILIDAD CON OFFSET MÍNIMO Y SIN NECESIDAD DE ACCIÓN INTEGRAL.**

## ● ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL + INTEGRAL + DERIVATIVO

LA SALIDA ES PROPORCIONAL A UNA COMBINACIÓN LINEAL DE LA ENTRADA, DE SU INTEGRAL RESPECTO AL TIEMPO Y DE SU DERIVADA. EL ALGORITMO DE CONTROL COMBINA LAS ACCIONES PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVATIVA, REUNIENDO LAS VENTAJAS DE CADA UNA DE LAS TRES ACCIONES INDIVIDUALES.

MATEMÁTICAMENTE SE DEFINE COMO:

$$m(t) = m_0 + K_p \times e(t) + K_p/T_i \int e(t) \cdot dt + K_p \cdot T_D \cdot de(t)/dt$$

DONDE:

$m(t)$  = SEÑAL DE CONTROL.

$m_0$  = SEÑAL INICIAL O POLARIZACIÓN.

$e(t)$  = SEÑAL DE ERROR ACTUANTE.

$K_p$  = GANANCIA ESTÁTICA DEL CONTROLADOR.

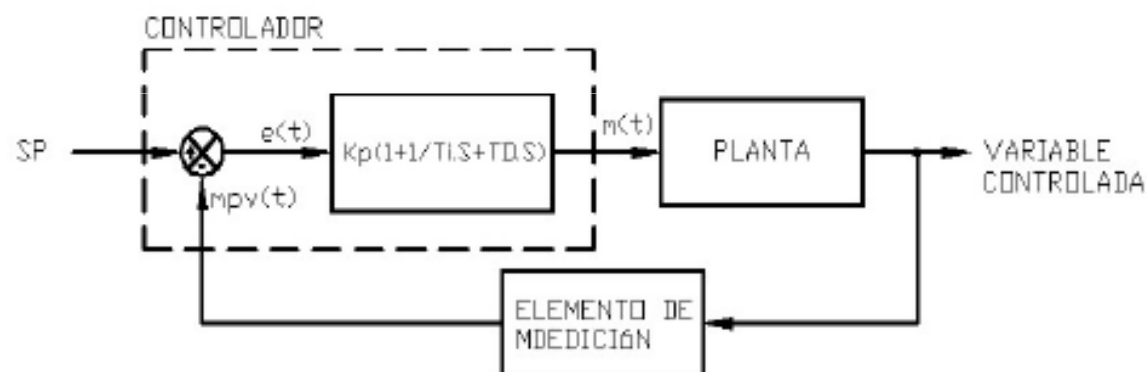
$T_i$  = TIEMPO INTEGRAL

$\int e(t) \cdot dt$  = INTEGRAL DEL ERROR.

$T_D$  = TIEMPO O CONSTANTE DERIVATIVO.

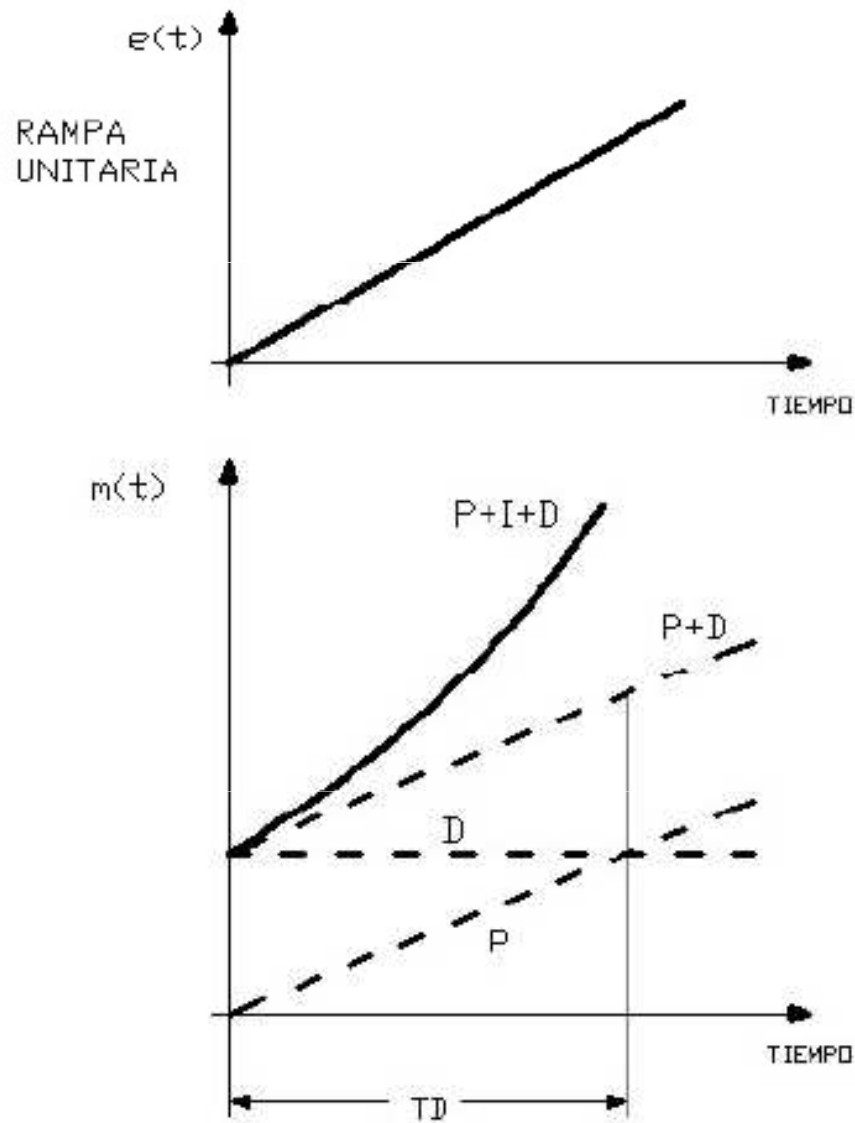
$de(t)/dt$  = VELOCIDAD DE CAMBIO DE LA VARIABLE.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL P+I+D





## RESPUESTA DE LA ACCIÓN P+I+D



### DE LA CURVA DE RESPUESTA:

- ❑ TANTO MENOR ES “TD”, MAS PRONUNCIADA ES LA CURVA, O SEA UNA RESPUESTA MÁS RÁPIDA.
- ❑ PARA VALORES DE “TD” GRANDES, LA ACCIÓN DERIVATIVA DISMINUYE. EN COMBINACIÓN CON LA ACCIÓN “P”, AÑADE AMORTIGUAMIENTO AL SISTEMA.



● **PUESTA EN MARCHA DE UN CONTROLADOR “P + I + D”**

SE DEBEN FIJAR LOS SIGUIENTES PARÁMETROS:

VALOR DESEADO (SP).  
 BANDA PROPORCIONAL (BP).  
 CONSTANTE DERIVATIVA (TD).  
 FRECUENCIA DE REPOSICIÓN (I).

**INTERNAMENTE EL CONTROLADOR REALIZA UN CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE SALIDA AUT[%] MEDIANTE LA SIGUIENTE FÓRMULA:**

$$\text{AUT [\%]} = [100[\%] \cdot (e + T_D \cdot C + I \cdot e(t) \cdot dt) / \text{BANDA}]$$

**DONDE:**

**BANDA = BP . SP / 100 [%] ; BP: BANDA PROPORCIONAL**

**e = (SP – PV) ; PV: MEDIDA DE LA VARIABLE DE PROCESO.**

**T<sub>D</sub> = TIEMPO O CONSTANTE DERIVATIVA EN [Seg].**

**C = de/dt = VELOCIDAD DE CAMBIO DE LA VARIABLE CONTROLADA.**

**I = FRECUENCIA DE REPOSICIÓN O CONSTANTE DE INTEGRACIÓN EN [1/Seg].**





## ● CARÁCTERÍSTICAS DEL CONTROL “P + I + D”

UN CONTROL PID CONTRIBUYE A OBTENER LAS SIGUIENTES CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA TRANSITORIA:

TIEMPO DE CRECIMIENTO RÁPIDO ( $t_r$ ).

MÍNIMO SOBREPULSO ( $M_p$ ).

ELIMINACIÓN DEL ERROR ESTACIONARIO.

LOS EFECTOS DE CADA UNA DE LAS ACCIONES  $K_p$ ,  $T_i$  Y  $T_d$  EN UN SISTEMA DE LAZO CERRADO, CON RESPECTO A LAS ESPECIFICACIONES DE RESPUESTA TRANSITORIA, SE MUESTRAN EN LA SIGUIENTE TABLA:

Controlador	T. Crecimiento	Sobrepico	T. Establecimiento	Error Estacionario
$K_p$	Disminuye	Aumenta	Poco cambio	Disminuye
$1/T_i$	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Elimina
$T_d$	Poco cambio	Disminuye	Disminuye	Poco cambio

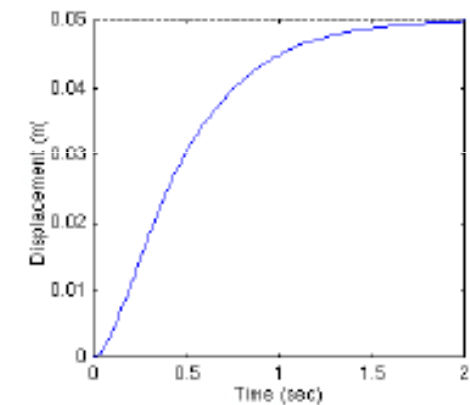
- Una acción proporcional tendrá el efecto de reducir el tiempo de crecimiento y reducirá (pero no elimina) el error estacionario.
- Una acción integral tendrá el efecto de eliminar el error estacionario, pero podría empeorar la respuesta transitoria.
- Una acción derivativa tendrá el efecto de aumentar la estabilidad del sistema al disminuir el sobre pico, mejorando la respuesta transitoria.

## ● EFECTO DE LAS ACCIONES PID

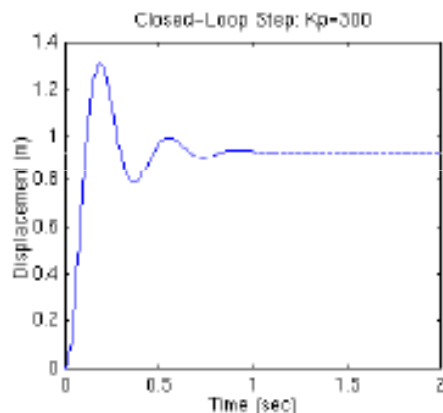
**LOS EFECTOS SOBRE LAS ESPECIFICACIONES DE LA RESPUESTA TRANSITORIA PODRÍAN NO SER EXACTAMENTE PRECISAS, YA QUE EL EFECTO DE CADA ACCIÓN SERÁ DEPENDIENTE DE LOS OTROS.**

**EJEMPLO: DISEÑO DE UN CONTROL PID QUE REDUCE EL TIEMPO DE CRECIMIENTO Y EL TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO, AL MISMO TIEMPO QUE ELIMINA EL ERROR ESTACIONARIO.**

RESPUESTA DE LAZO ABIERTO AL ESCALÓN

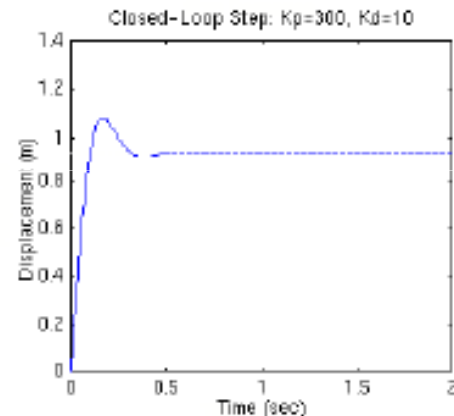


ACCIÓN "P"



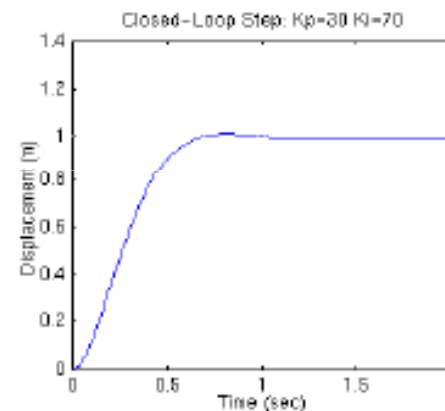
El control proporcional reduce el tiempo de crecimiento y el error estacionario, mientras aumenta el sobrepico y disminuye ligeramente el tiempo de establecimiento.

ACCIÓN "P+D"



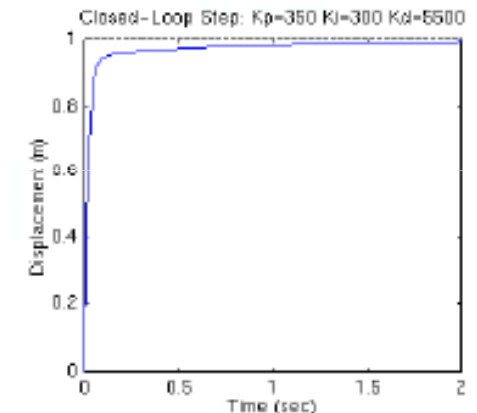
La parte derivativa reduce el sobrepico y el tiempo de establecimiento, con poca influencia en el tiempo de crecimiento y el error estacionario.

ACCIÓN "P+I"



La respuesta muestra como la acción integral elimino el error estacionario.

ACCIÓN "P+I+D"



Respuesta del sistema sin sobrepico, con rápido tiempo de establecimiento y crecimiento, y sin error estacionario.

# SELECCIÓN ORIENTATIVA DE LAS ACCIONES DE CONTROL



POR LO GENERAL LOS LAZOS DE CONTROL DE PROCESOS SE ENCUENTRAN EN LAS SIGUIENTES CATEGORÍAS:

**□ PRESIÓN:**

LÍQUIDOS: CONTROL "PI".

GASES: C/ VOLUMEN DE ACUMULACIÓN PEQUEÑO: CONTROL "PI".

C/ VOLUMEN DE ACUMULACIÓN GRANDE: CONTROL "P".

VAPORES: C/ MANIPULACIÓN DIRECTA DE VAPOR: CONTROL "P" O "PID".

C/ MANIPULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGÍA: CONTROL "PID".

**□ TEMPERATURA:** (PROPIEDAD INTENSIVA ASOCIADA AL BCE DE ENERGÍA): CONTROL "PID".

**□ CAUDAL:** (VARIABLE ASOCIADA AL BCE DE MATERIA): CONTROL "PI".

**□ NIVEL:** (MEDIDA DE LA ACUMULACIÓN DE MATERIA)

P/ TANQUES PULMONES C/ RANGO HOLGADO (CONTROL PROMEDIANTE): CONTROL "P".

P/ TANQUES DE PROCESO C/ RANGO ACOTADO (CONTROL ESTRICTO): CONTROL "PI"

**□ COMPOSICIÓN:** (VARIABLE ASOCIADA EL BCE DE MATERIA): CONTROL "PI" O "PID".

CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS	VARIABLES DE PROCESO				
	CAUDAL Y PRESIÓN DE LÍQUIDOS	PRESIÓN DE GAS	NIVEL DE LÍQUIDO	TEMPERATURA Y PRESIÓN DE VAPOR	COMPOSICIÓN
CONTROLADOR	(P + I)	(P) o (P + I)	(P) o (P + I)	(P + I + D)	(P + I) o (P + I + D)
TIEMPO MUERTO	NO	NO	NO	NORMALMENTE	SIEMPRE
CAPACIDAD	MÚLTIPLES NO INTERACTUANTES	UNA DOMINANTE	INTEGRADOR	MÚLTIPLES INTERACTUANTES	UNA O VARIAS INTERACTUANTE
PERIODO NATURAL	1 a 10 [seg]	0,1 a 2 [min]	2 a 20 [seg]	20 [seg] a 1 [hr]	1 [min] a 8 [hs]
Kv.Kp.Kt	1 a 5	2 a 10	-	1 a 10	10 a 1000
RUIDO	SIEMPRE	NINGUNO	SIEMPRE	NINGUNO	GENERALMENTE