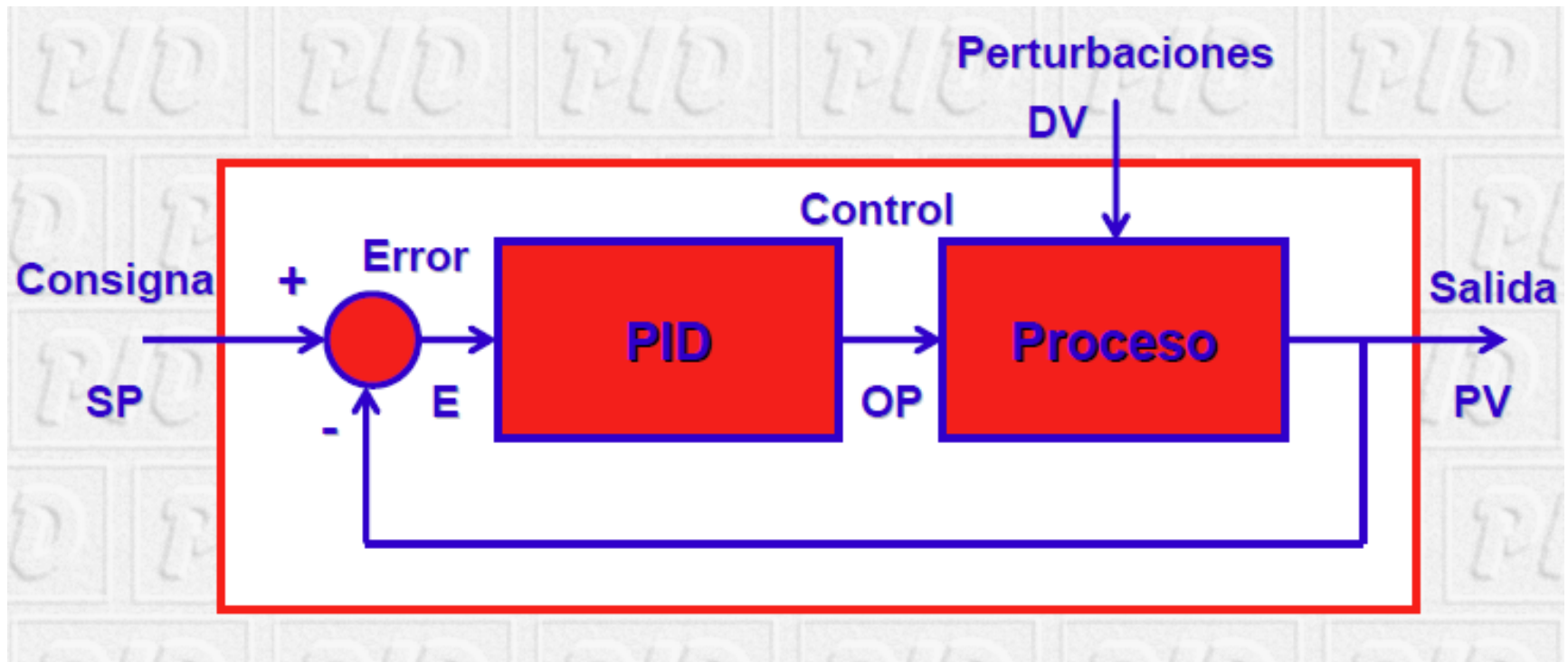


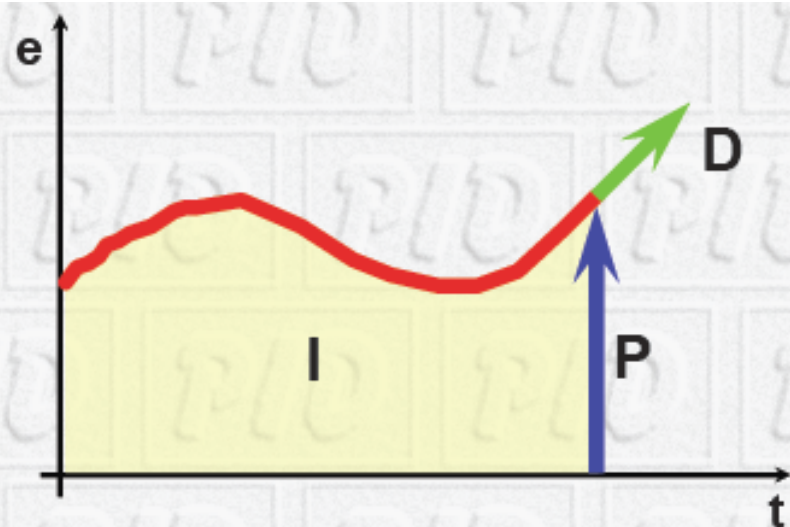
Control PID de Temperatura

Esquema basico de control PID



El control PID combina las tres acciones:

- Proporcional (P)
- Integral (I)
- Derivativa (D)



Controlador PID continuo

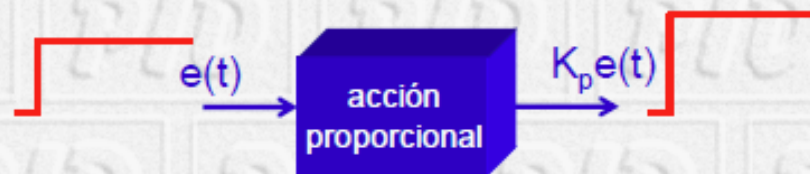
$$u(t) = \underbrace{K_p e(t)}_P + \underbrace{\frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt}_I + \underbrace{K_p T_d \frac{de(t)}{dt}}_D$$

Ganancia proporcional (K_p)

- ◆ Es la constante de proporcionalidad en la acción de control proporcional .

K_p pequeña \Rightarrow acción proporcional pequeña

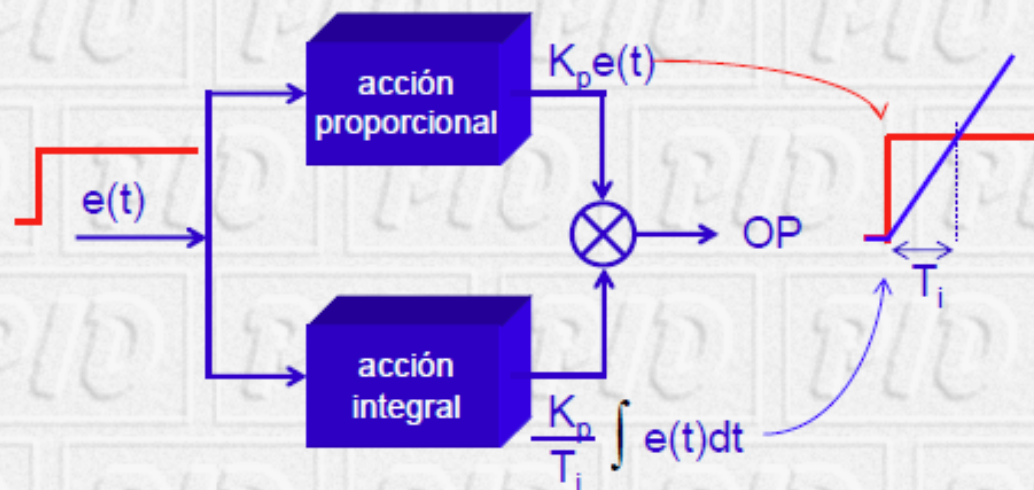
K_p grande \Rightarrow acción proporcional grande



Constante de tiempo integral (T_i)

- ◆ El tiempo requerido para que la acción integral contribuya a la salida del controlador en una cantidad igual a la acción proporcional.

T_i pequeño \Rightarrow acción integral grande
 T_i grande \Rightarrow acción integral pequeña

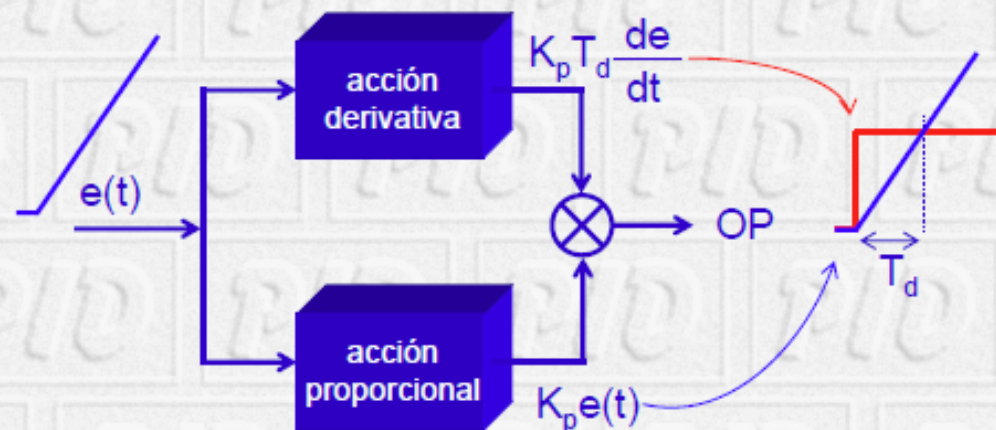


Constante de tiempo derivativa (T_d)

- ◆ El tiempo requerido para que la acción proporcional contribuya a la salida del controlador en una cantidad igual a la acción derivativa.

T_d pequeño \Rightarrow acción derivativa pequeña

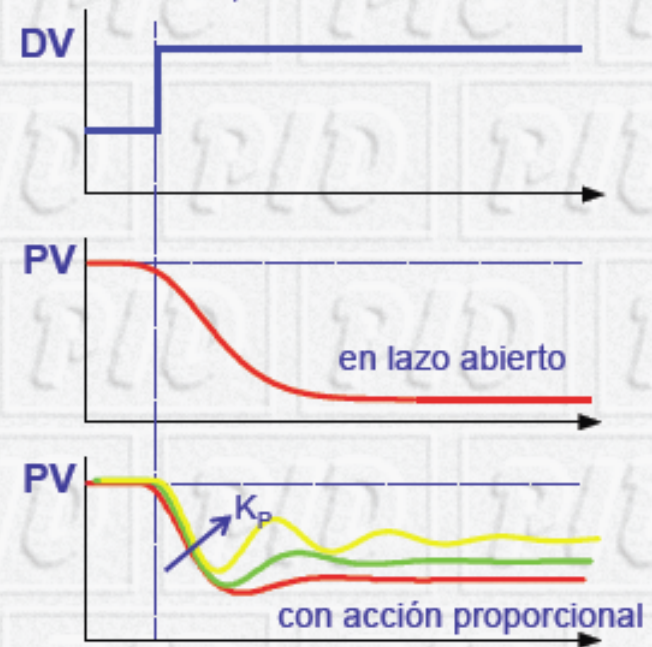
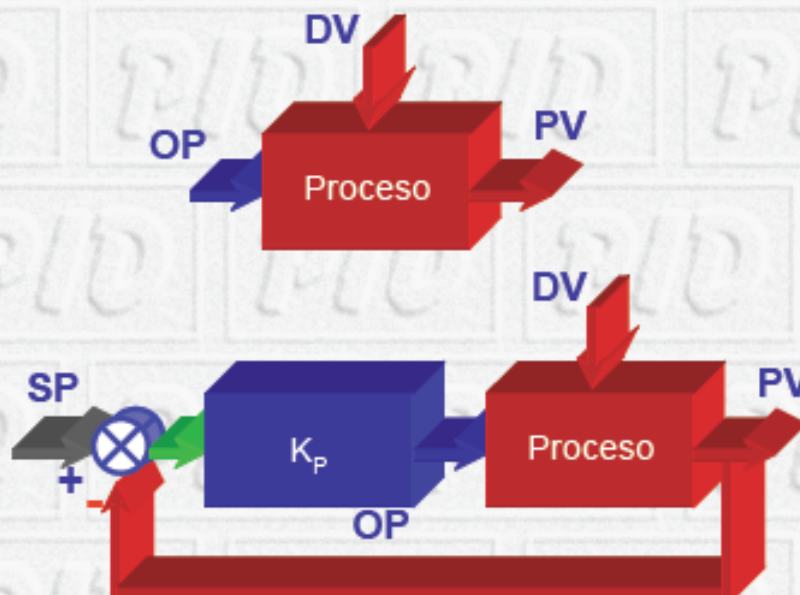
T_d grande \Rightarrow acción derivativa grande



Acción proporcional

- ◆ Produce una señal de control proporcional a la señal de error.

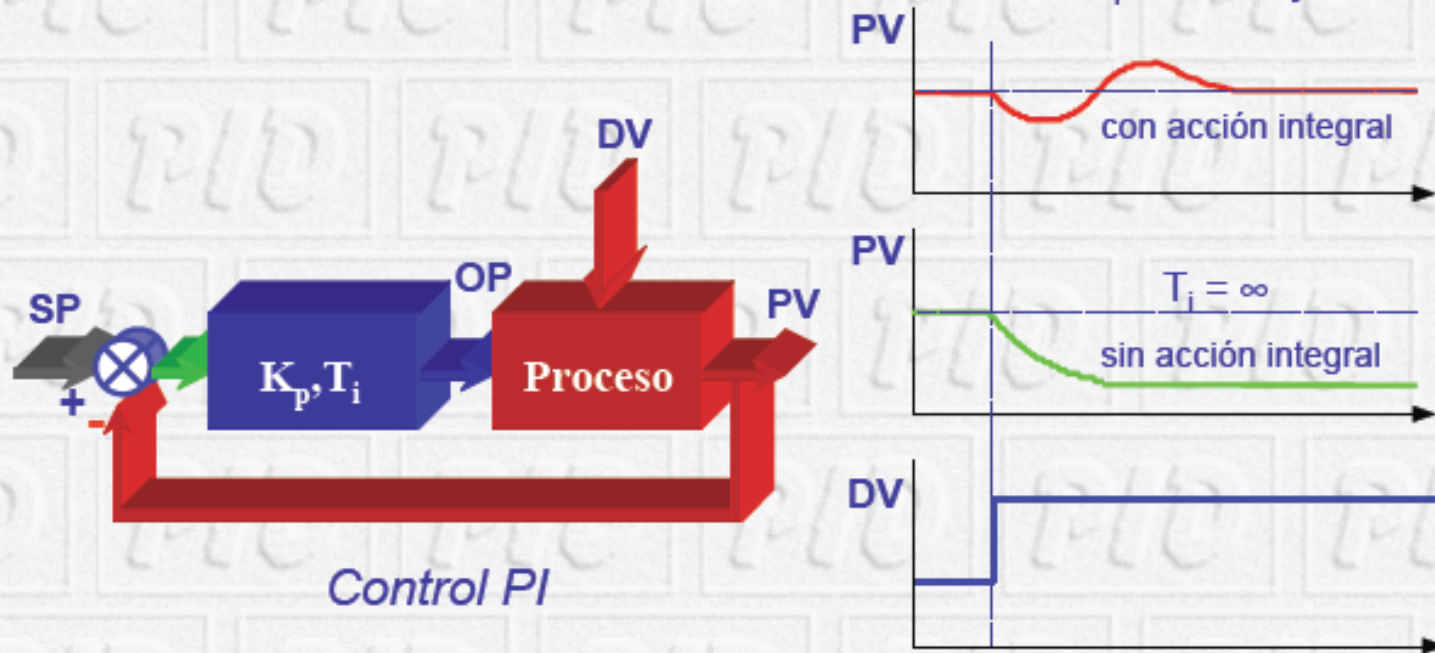
Características: Simple
Fácil de sintonizar (un solo parámetro)
Puede reducir, pero no eliminar, el error en estado estacionario



Acción integral

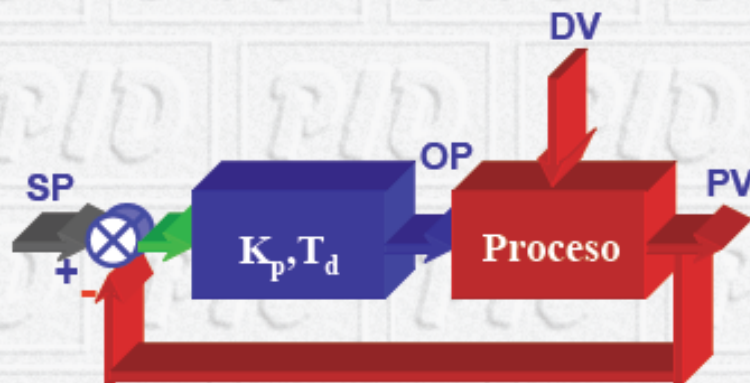
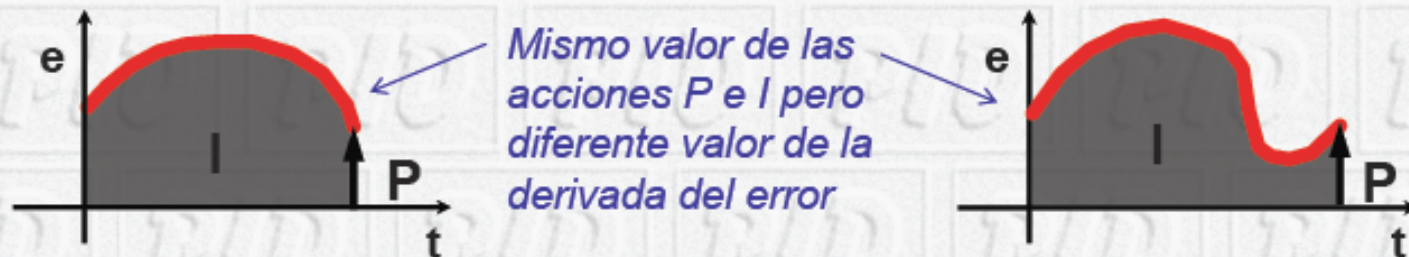
- ◆ Proporciona una corrección para compensar las perturbaciones y mantener la variable controlada en el punto de consigna.

Características: Elimina errores estacionarios
Más del 90% de los lazos de control utilizan PI
Puede inestabilizar al sistema si T_i disminuye mucho

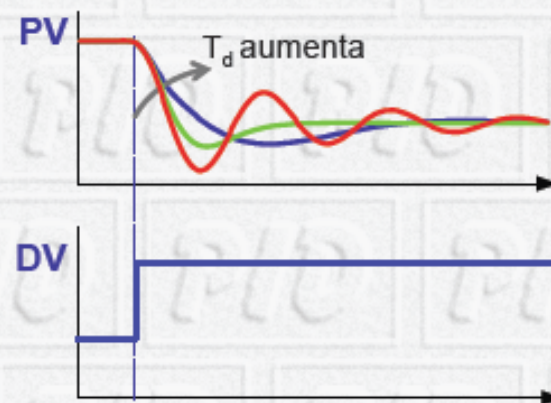


Acción derivativa

- ♦ **Anticipa el efecto de la acción proporcional para estabilizar más rápidamente la variable controlada después de cualquier perturbación.**



Control PD



Reglas Eurísticas de ajuste

	K_p aumenta	T_i disminuye	T_d aumenta
Estabilidad	Se reduce	Disminuye	Aumenta
Velocidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Error estacionario	No eliminado	Eliminado	No eliminado
Área de error	Se reduce	Disminuye hasta cierto punto	Se reduce
Perturbación control	Aumenta bruscamente	Aumenta gradualmente	Aumenta muy bruscamente
Frecuencia lazo	No afecta hasta cierto punto	Disminuye	Aumenta

Reglas.....

◆ Paso 1. Acción Proporcional

- Tiempo integral (TI), a su máximo valor
- Tiempo derivativo (TD), a su mínimo valor
- Empezando con ganancia baja se va aumentando hasta obtener las características de respuesta deseadas

◆ Paso 2. Acción integral

- Reducir el TI hasta anular el error en estado estacionario, aunque la oscilación sea excesiva
- Disminuir ligeramente la ganancia
- Repetir hasta obtener las características de respuesta deseadas

◆ Paso 3. Acción Derivativa

- Mantener ganancia y tiempo integral obtenidos anteriormente
- Aumentar el TD hasta obtener características similares pero con la respuesta más rápida
- Aumentar ligeramente la ganancia si fuera necesario

Efecto Anti *Windup*

Como la integral resulta de la sumatoria de los errores de cada ciclo, se corre el riesgo de saturar la integral para valores de error relativamente grandes, lo que trae aparejado oscilaciones bruscas y el problema de que al tener la sumatoria un valor grande se hace mayor el tiempo necesario para reducir la suma cuando se reduce el error.

Para evitar esto se hace trabajar a la integral solo dentro de valores de posición cercanos a la posición deseada de modo de integrar solo errores pequeños.

Modelado de Sistemas (Primer Orden)

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K_p e^{-S \cdot L}}{1 + T_s s}$$

Donde, siguiendo la notación común a todos los libros de texto

$y(s)$ transformada de Laplace de la **salida** del sistema
(por Ej. temperatura, nivel, etc)

$u(s)$ transformada de Laplace de la **entrada** del sistema
(por Ej. potencia de los calefactores)

- K_p **ganancia estática** (static gain) Es la ganancia o amplificación del sistema para una entrada constante (ganancia DC)
- L **tiempo muerto** (dead time) Es el tiempo que transcurre desde que se provoca un cambio en la entrada hasta que aparece algún cambio en la salida.
- T **tiempo característico** (characteristic time) Como su nombre lo dice, es un tiempo característico del sistema de primer orden.
Se puede pensar como el tiempo que toma a la salida cambiar un 63% de su cambio total, cuando se aplica un cambio en la entrada . Como se vera este corresponde a la constante RC de un filtro pasa bajo o la inercia térmica de un horno.

SINTONIZACION DE CONTROLADOR MEDIANTE ZIEGLER-NICHOLS

Ziegler y Nichols propusieron una serie de reglas para afinar controladores PID con base a una respuesta experimental. Definieron dos métodos.

Primer método. Se obtiene experimentalmente la respuesta de la planta a una entrada escalón y si la respuesta no tiene oscilaciones y además posee un retardo tal que se forma una “ese”, puede obtenerse los parámetros del controlador PID utilizando el primer método. En la figura 2 se observa la respuesta en forma de s.

Esta respuesta se caracteriza con el tiempo de atraso L y la constante de tiempo T . Y se puede aproximar por un sistema de primero orden con atraso de transporte.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

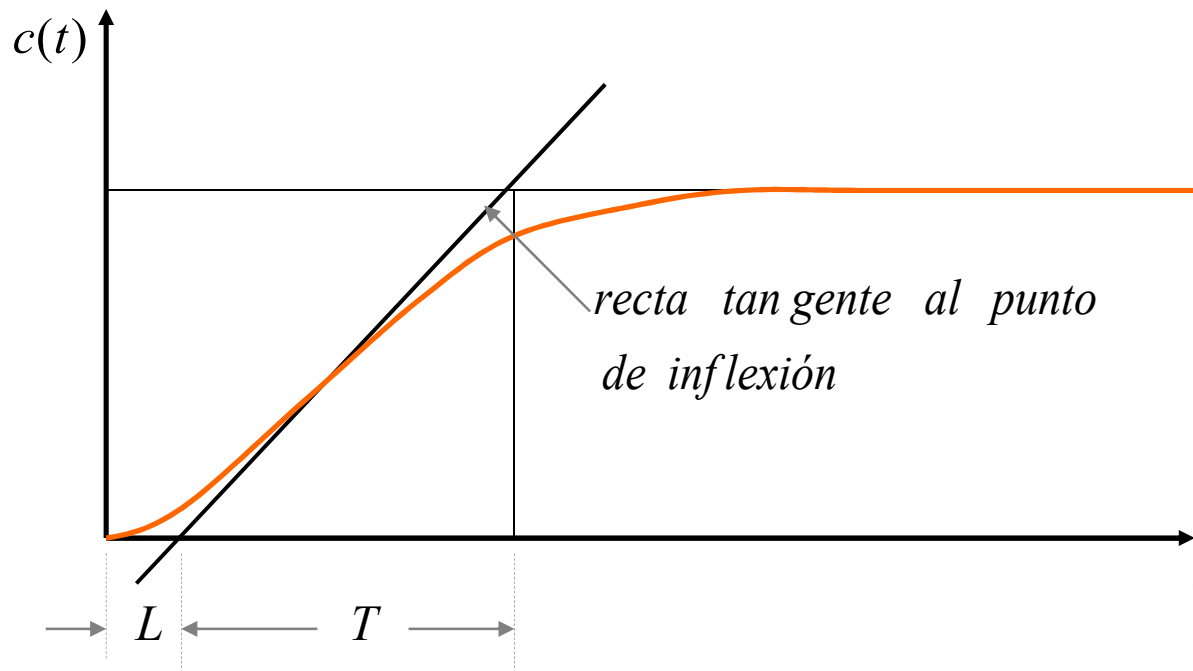


Figura 2. Curva experimental en forma de “ese”

para obtener L y T , se traza una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta, la intersección con el eje del tiempo y con el valor final de la amplitud forman las distancias L y T .

Con L y T , se obtienen los parámetros del controlador PID utilizando la tabla 1.

Tipo de controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Tabla 1. Valores de sintonización, método uno.

Método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols

Muchas plantas en la práctica pueden describirse satisfactoriamente con un modelo de la forma (3). Una versión linealizada quantitativa de este modelo puede obtenerse mediante un experimento a lazo abierto con el siguiente procedimiento:

1. Llevar manualmente la planta a lazo abierto a un punto de operación normal manipulando $u(t)$. Supongamos que la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para $u(t) = u_0$.
2. En un instante inicial t_0 aplicar un cambio escalón en la entrada, de u_0 a u_∞ (el salto debe estar entre un 10 a 20% del valor nominal).
3. Registrar la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. La Figura 2 muestra una curva típica.

4. Calcular los parámetros del modelo (3) de las fórmulas

$$(4) \quad k_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \quad \tau_0 = t_1 - t_0, \quad \gamma_0 = t_2 - t_1.$$

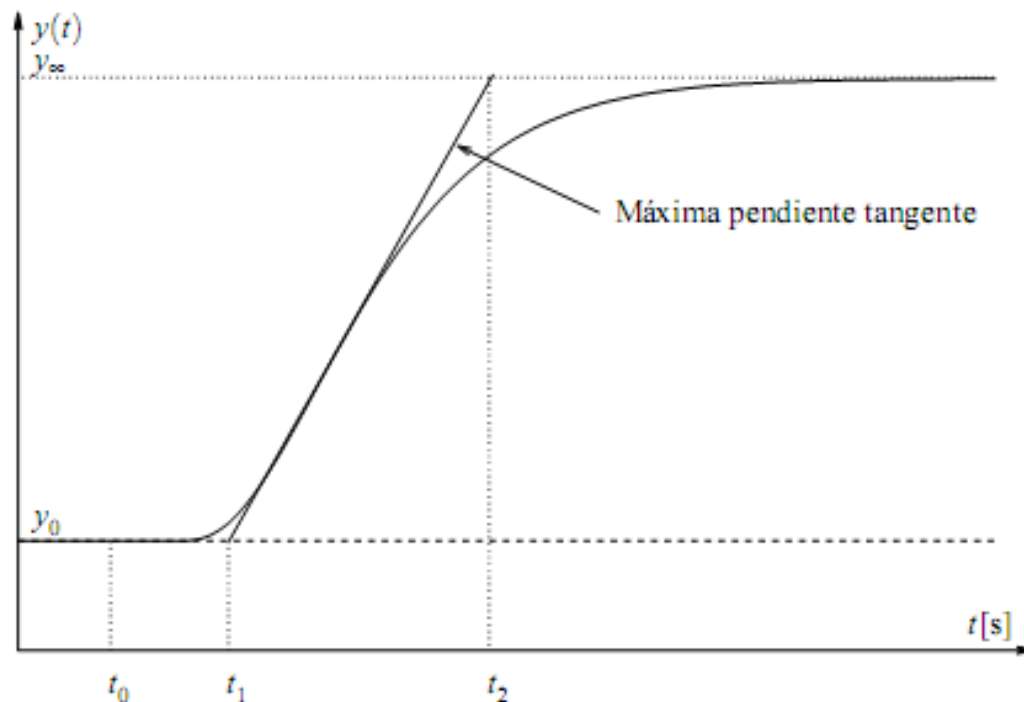


Figura 2: Respuesta al escalón (**curva de reacción**) en lazo abierto de la planta

Los parámetros del controlador PID propuestos por Ziegler y Nichols a partir de la curva de reacción se determinan del Cuadro 2.

	K_p	T_r	T_d
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0}$		
PI	$\frac{0,9\gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$3\tau_0$	
PID	$\frac{1,2\gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$2\tau_0$	$0,5\tau_0$

Cuadro 2: Parámetros de controladores PID según el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols

Sistema de control de temperatura

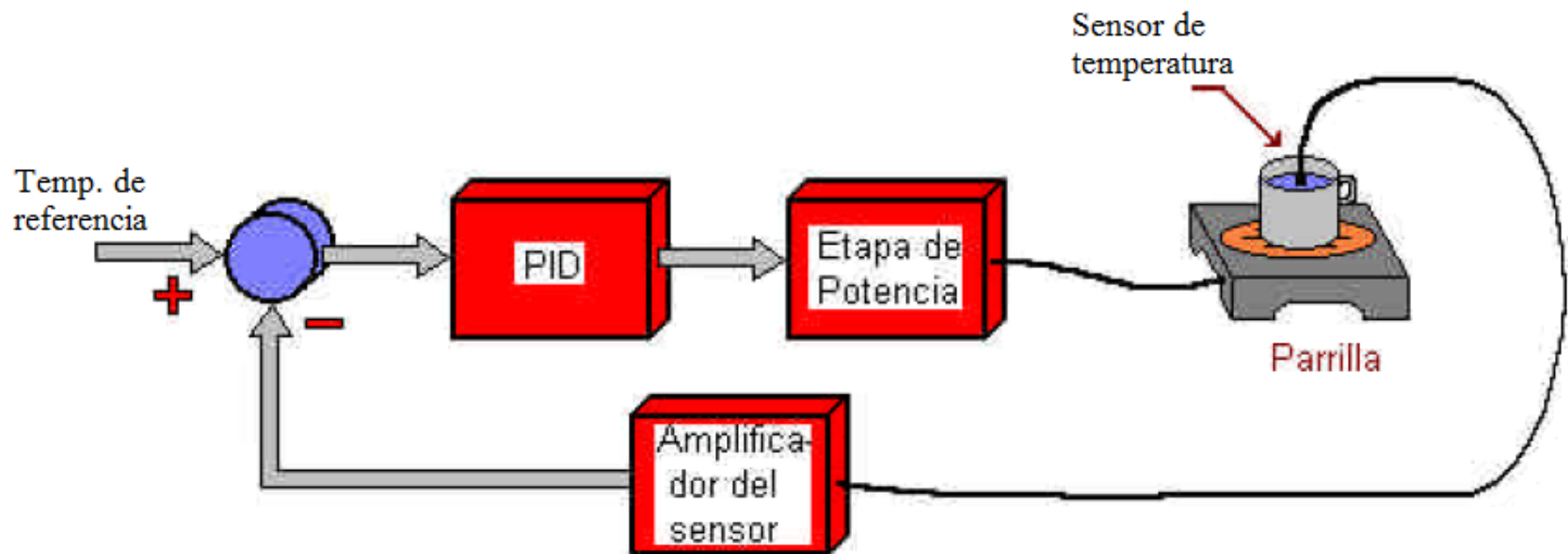
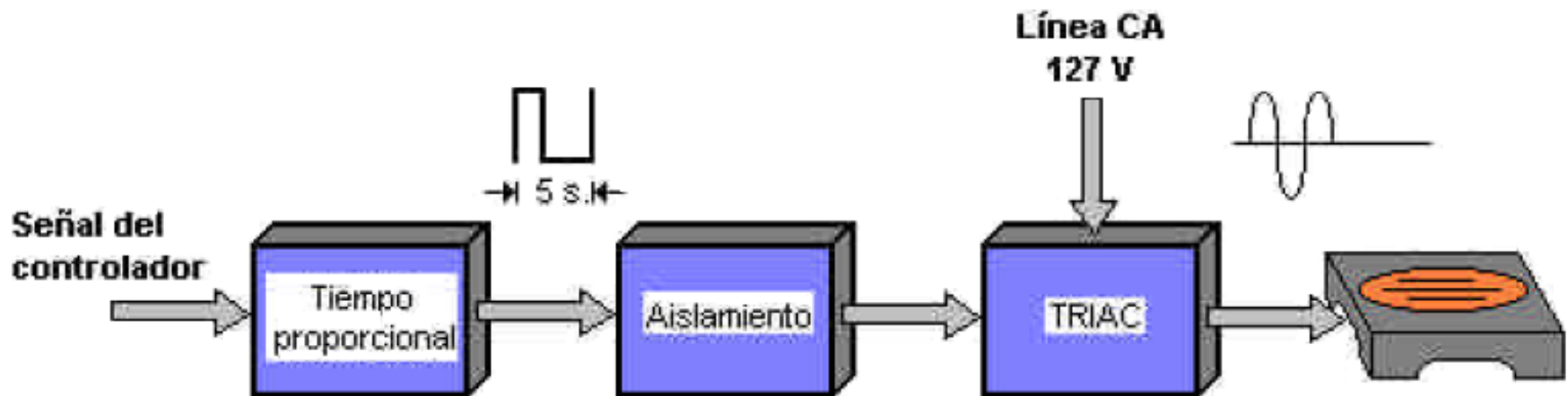
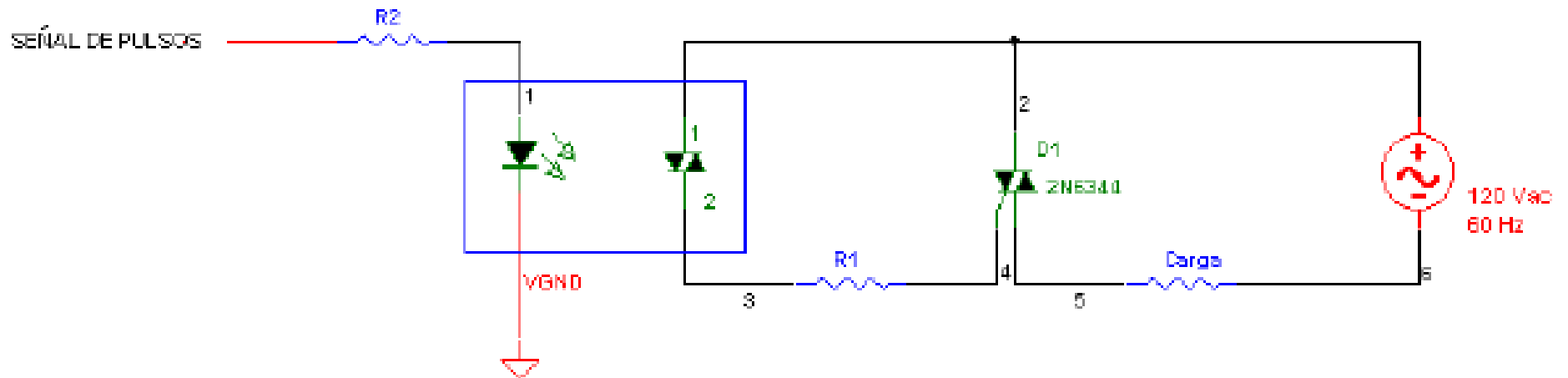


Diagrama de bloque de la etapa de potencia



Señal del controlador	Tiempo encendido. En segundos	Tiempo apagado. En segundos
0%	0	5
20%	1	4
40%	2	3
60%	3	2
80%	4	1
100%	5	0

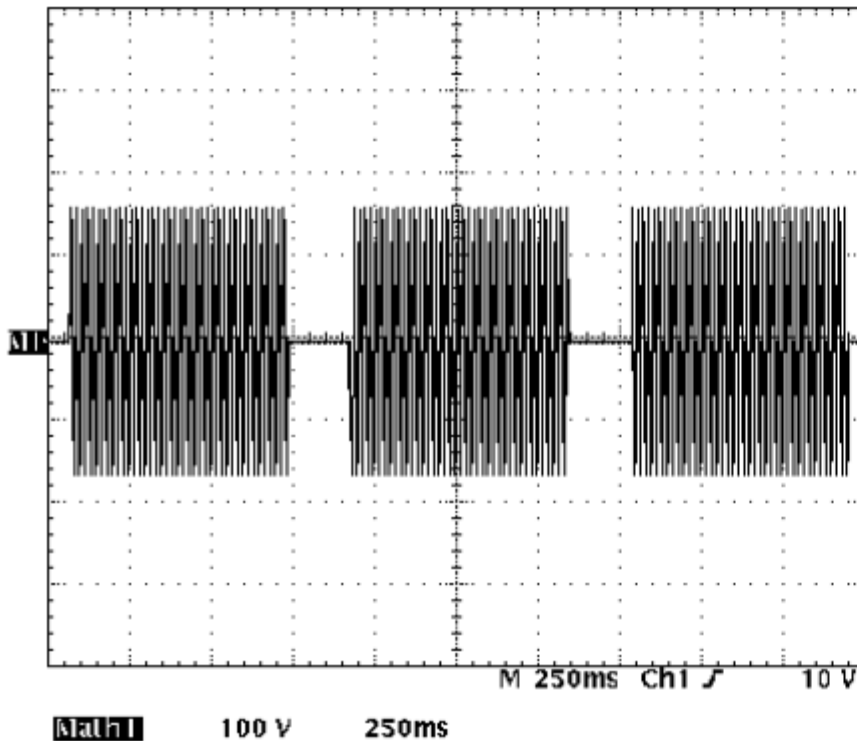
Etapa de aislamiento y Triac



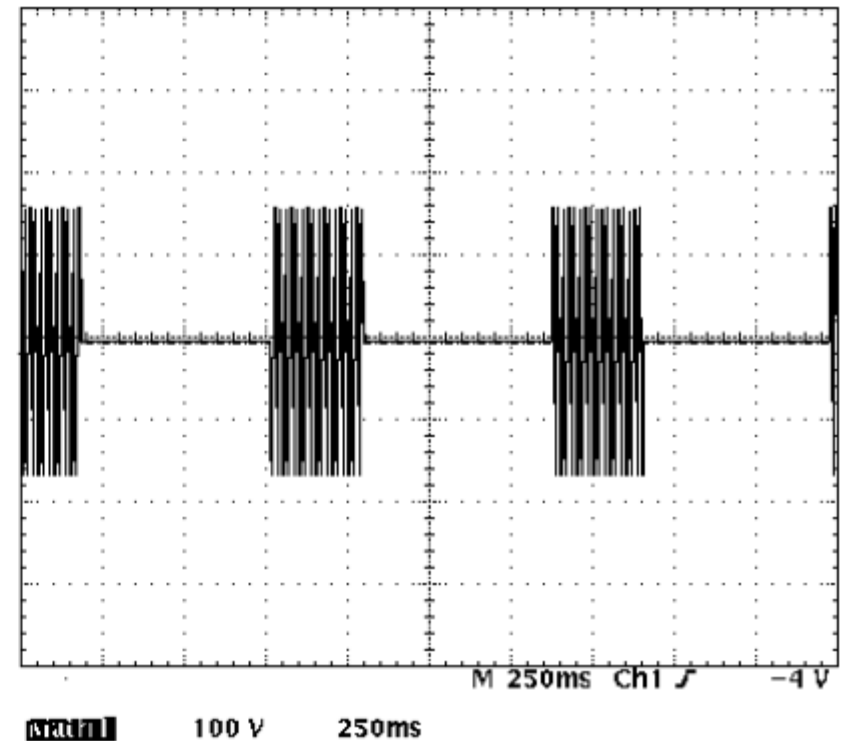
MOC3030

2N6344

Oscilogramas del Voltaje Aplicado a la parrilla



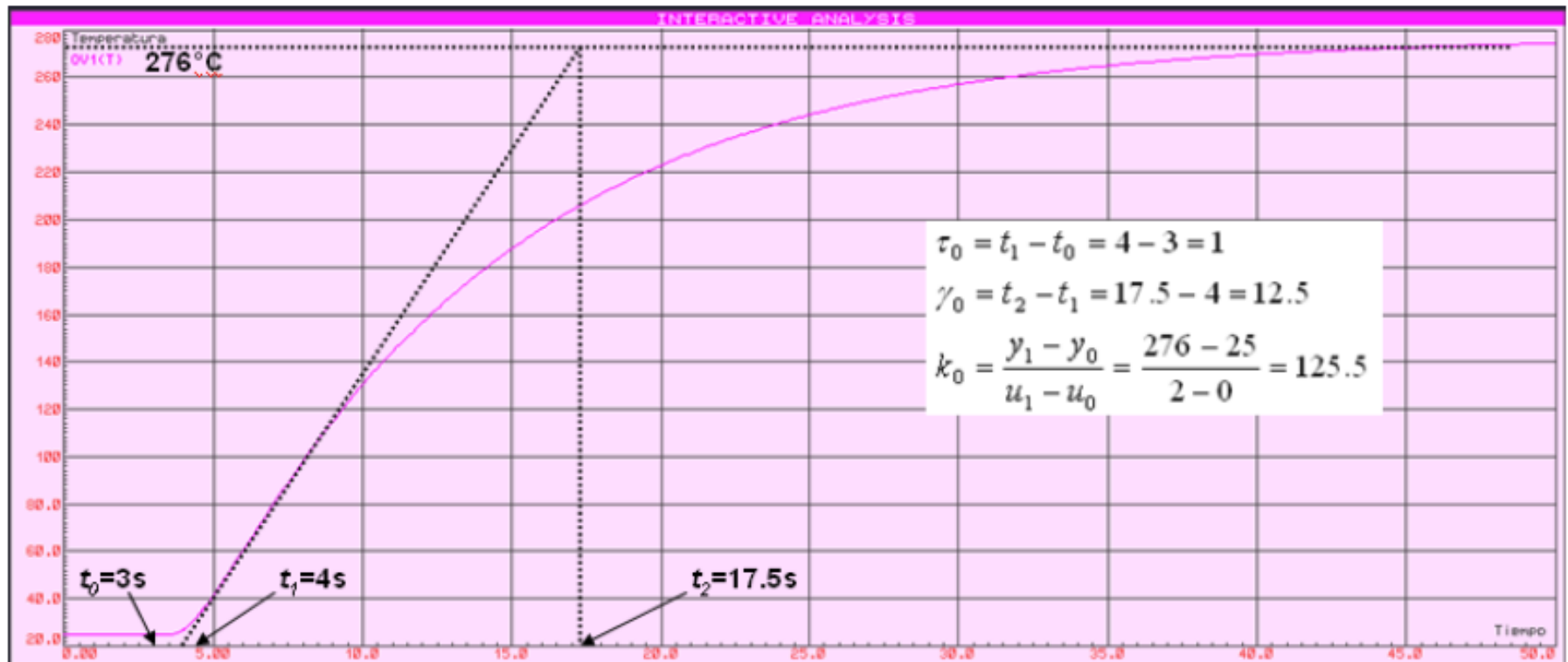
a)



b)

Metodo recta maxima pendiente

De la recta de máxima pendiente se deducen los parámetros τ_0 , γ_0 y k_0 definidos por el análisis en lazo abierto de Ziegler-Nichols.



Determinación de los parámetros por método de curva de reacción.

El modelo del sistema de calefacción queda definido así:

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{1 + \gamma_0 s} = 125.5 \frac{e^{-s}}{1 + 12.5s}$$

Los parámetros K_p , T_i y T_d se calculan según la Regla de Sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta al escalon [1]:

$$K_p = 1.2 \frac{\gamma_0}{k_0 \tau_0} = 0.1195 \quad T_i = 2\tau_0 = 2 \quad T_d = 0.5\tau_0 = 0.5$$

Reemplazando los valores de K_p , T_i y T_d en las ecuaciones dadas en (8), y estableciendo un periodo de muestreo $T=0.1s$ según criterio $T < \tau_0 / 4$, los parámetros del controlador discreto son:

$$a = K_p = 0.1195 \quad b = \frac{K_p T}{T_i} = 0.0062 \quad c = \frac{K_p T_d}{T} = 0.6215$$

Controlador Digital PID

La función de transferencia para el controlador PID digital se convierte en :

$$U(z) = K_p \left[1 + \frac{T}{T_i(1 - z^{-1})} + T_d \frac{(1 - z^{-1})}{T} \right] E(z)$$

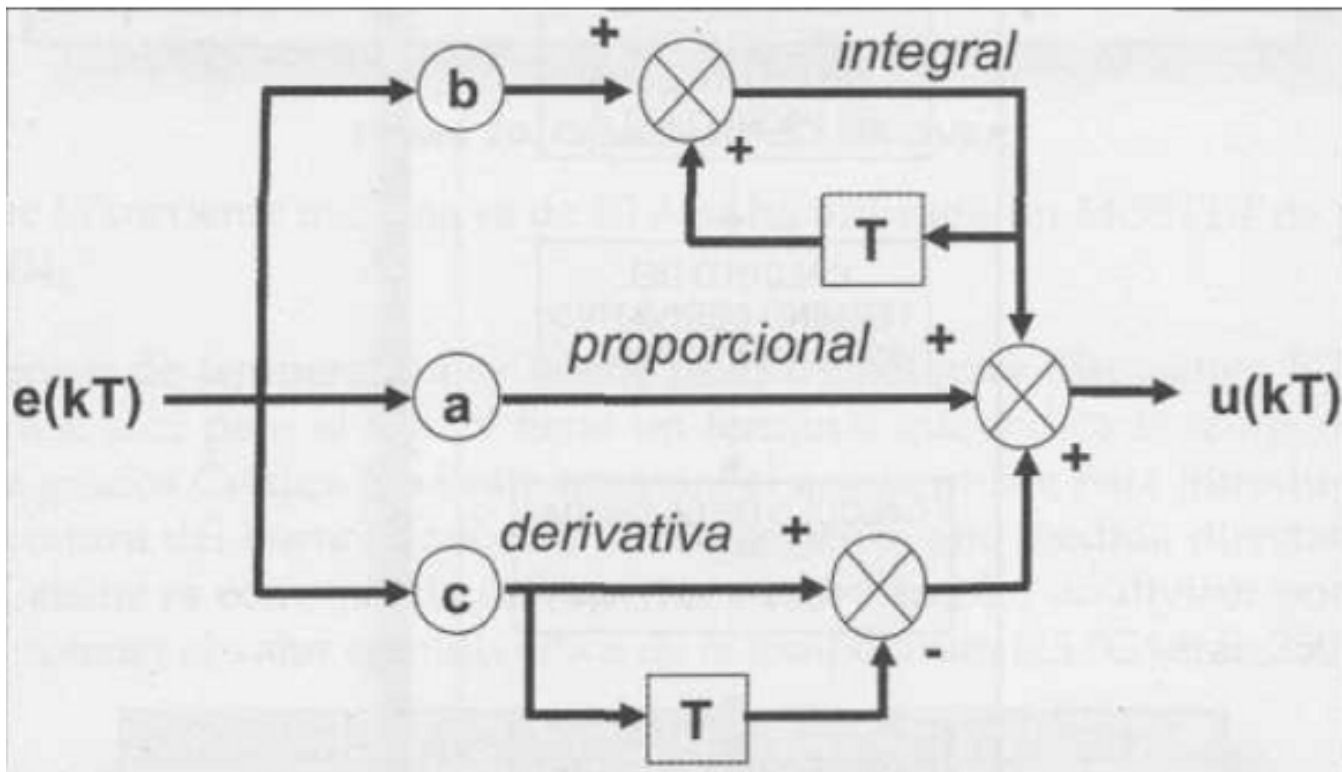
La función de transferencia discreta , también puede ser representada como :

$$\frac{U(z)}{E(z)} = a + \frac{b}{1 - z^{-1}} + c(1 - z^{-1})$$

Donde:

$$a = K_p \quad b = \frac{K_p T}{T_i} \quad c = \frac{K_p T_d}{T}$$

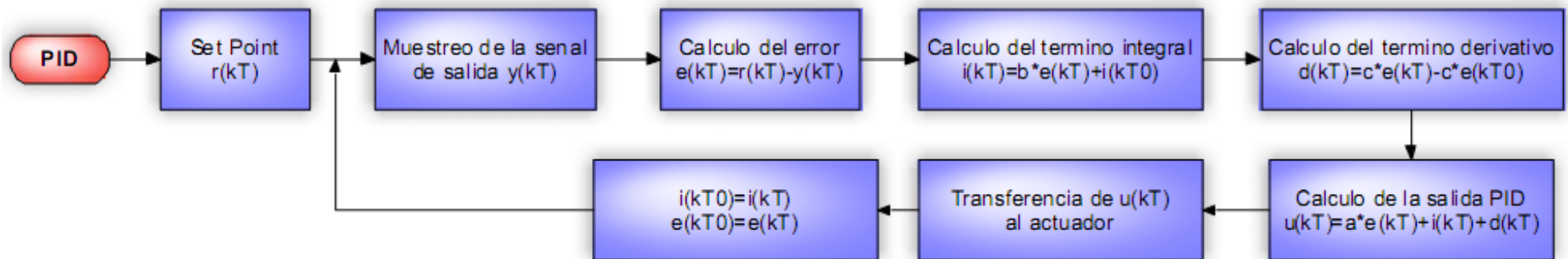
Implementacion en paralelo



Algoritmo de programacion

El muestreo (T) debe ser mayor que el tiempo de establecimiento del sistema en lazo abierto.

En el modelo Ziegler-Nichols se toma un valor $T < \tau_0 / 4$



EjemplosCodigo Fuente

```
#INCLUDE <16F877A.H>
#DEVICE ADC=10
#USE DELAY(CLOCK=4000000)
#FUSES XT,NOWDT
```

```
VOID MAIN(){
```

```
    INT16 valor, control;           //Variables para lectura de ADC y señal de Control a modulo CCP
    FLOAT a,b,c;                   //Constantes para parámetros de controlador PID
    FLOAT TEMPERATURA_LIMITE;       //Referencia de Temperatura
    FLOAT rt,eT,iT,dT,yT,uT,iT0,eT0; //Variables de controlador PID
    FLOAT max,min;                 //Variables para anti-windup
```

```
    min=0.0;
    max=1000.0;
    iT0=0.0;
    eT0=0.0;
    a=0.1243;
```

```
    b=0.0062;
    c=0.6215;
    TEMPERATURA_LIMITE=1200.0;      //Set Point r(kT)= 120°C
```

```
    setup_timer_2(t2_div_by_4,249,1); //Configuracion de Timer 2 para establecer frec. PWM a 1kHz
    setup_ccp1(ccp_pwm);               //Configurar modulo CCP1 en modo PWM
    setup_adc_ports(all_analog);        //Configurar ADC
    setup_adc(adc_clock_internal);
    set_adc_channel(0);                //Seleccionar Canal 0 para sensor de Temperatura
```

```

while(true){

    valor=read_adc();           //Leer ADC
    yT=5000.0*valor/1024.0;     //Escalizar señal de salida y(kT)
    rT=TEMPERATURA_LIMITE;
    eT=rT-yT;                   //Calcular senal de error e(kT)
    iT=b*eT+iT0;                //Calcular termino integrativo i(kT)
    dT=c*(eT-eT0);              //Calcular termino derivativo d(kT)
    uT=iT+a*eT+dT;              //Calcular senal de control u(kT)

    if (uT>max){                 //Anti-windup
        uT=max;
    }
    else {
        if (uT<min){
            uT=min;
        }
    }

    control=uT;

    set_pwm1_duty(control);      //Transferencia de senal de control al actuador
    iT0=iT;
    eT0=eT;
    delay_ms(100);               //Periodo de muestreo T=0.1s

    }
}

```

Caracterizacion del sistema (Metodo C.L. Smith)

Para caracterizar el sistema se puede seleccionar el método de la curva de reacción, debido a que el sistema térmico presenta características dinámicas que permiten aproximarlos a un sistema de primer orden con tiempo muerto como el dado por la siguiente expresión:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

K - constante de ganancia del proceso

T - constante de tiempo

L – tiempo muerto.

El método de la curva de reacción consiste de los siguientes pasos:

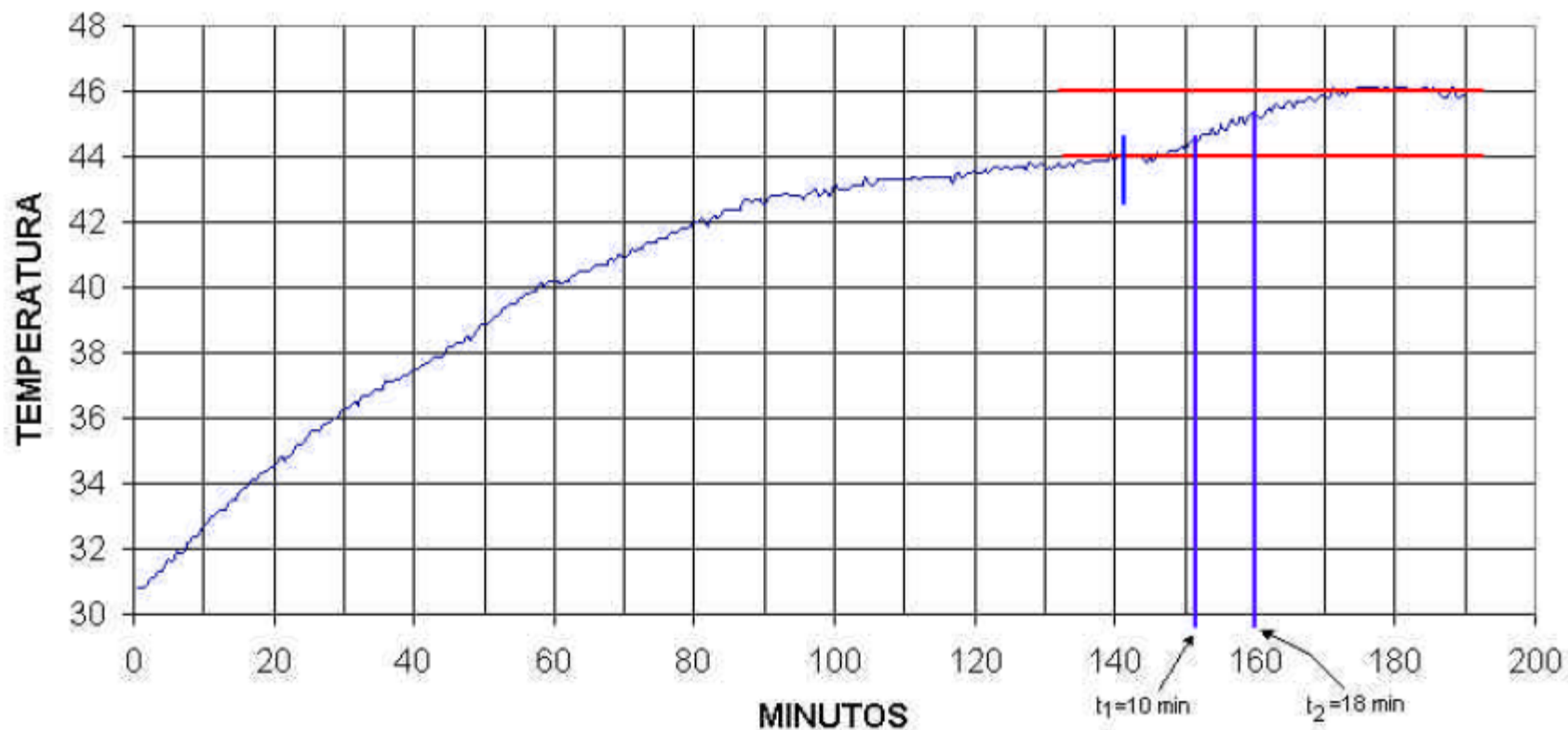
- Permitir que el proceso alcance estado estacionario.
- Introducir un cambio tipo escalón en la variable de entrada.
- Recolectar datos de la entrada y respuesta de salida hasta que el proceso nuevamente alcance estado estacionario.
- Realizar el calculo gráfico de los parámetros a partir de la curva de reacción.

Para el cálculo de los parámetros se utiliza el método de los dos puntos (propuesto por C.L. Smith). El método consiste en determinar los instantes de tiempo t_1 y t_2 en los cuales la respuesta alcanza el 0.283 y el 0.632 del cambio producido en la salida debido a un escalón en la variable de entrada. A partir de ellos se determina la constante de tiempo y el tiempo muerto mediante las siguientes expresiones:

$$T = 3/2(t_2 - t_1)$$

$$L = t_2 - T$$

En la siguiente, se muestra la curva de temperatura de la parrilla. Una vez que se ha estabilizado la temperatura de la parrilla, lo cual ocurre alrededor de los 44 °C, se incrementa la acción de control un 33% y a partir de ahí se genera una curva de reacción mediante la cual se definen los parámetros de aproximación del proceso. De acuerdo con la figura se pueden estimar $t_1 = 10$ minutos y $t_2 = 18$ minutos; por lo tanto, aplicando las expresiones anteriores se tienen $t = 12$ minutos y $\theta = 6$ minutos.



Curva de Reaccion

PWM y tiempo de ciclo.

Para poder controlar la temperatura con menos fluctuaciones, se debe poder entregar al horno una potencia gradual, en la medida requerida para mantenerlo a la temperatura deseada .

Es posible modular de 0% a 100% la potencia que recibe un horno eléctrico mediante el mismo contactor que se usaría para un control on/off.

La idea es modular el tiempo de activación del contactor durante un lapso de tiempo fijo t_c , llamado “tiempo de ciclo”, menor al tiempo característico de respuesta del horno de modo que el horno reciba finalmente un promedio de la potencia.

Para ilustrar esta técnica conocida como modulación por ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation) recurrimos al siguiente ejemplo:

Suponiendo que un horno tiene una gran inercia térmica tal que tarda varios segundos en reaccionar subiendo la temperatura.

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.

Supongamos que nuestro horno funciona con un calefactor de 1000W, si se requiere una potencia de 500W, equivalente a 50% del total, entonces el relé se activa 2 segundos y desactiva otros 2, para luego empezar otro ciclo.

El efecto neto será que el horno recibe 50% de la potencia pero la temperatura no fluctúa al ritmo del “tiempo de ciclo” pues el horno no alcanza a responder a ciclos tan rápidos.

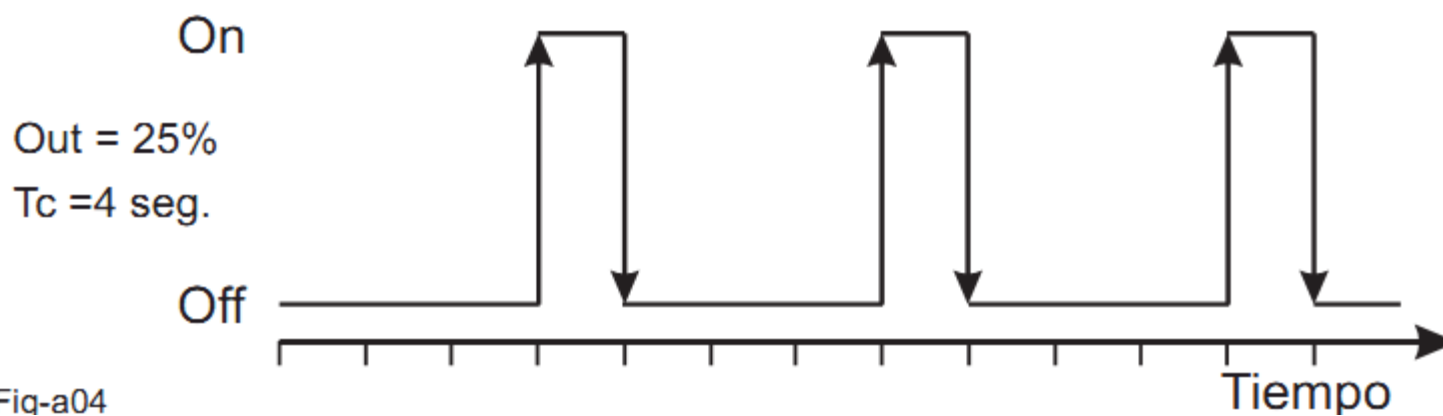
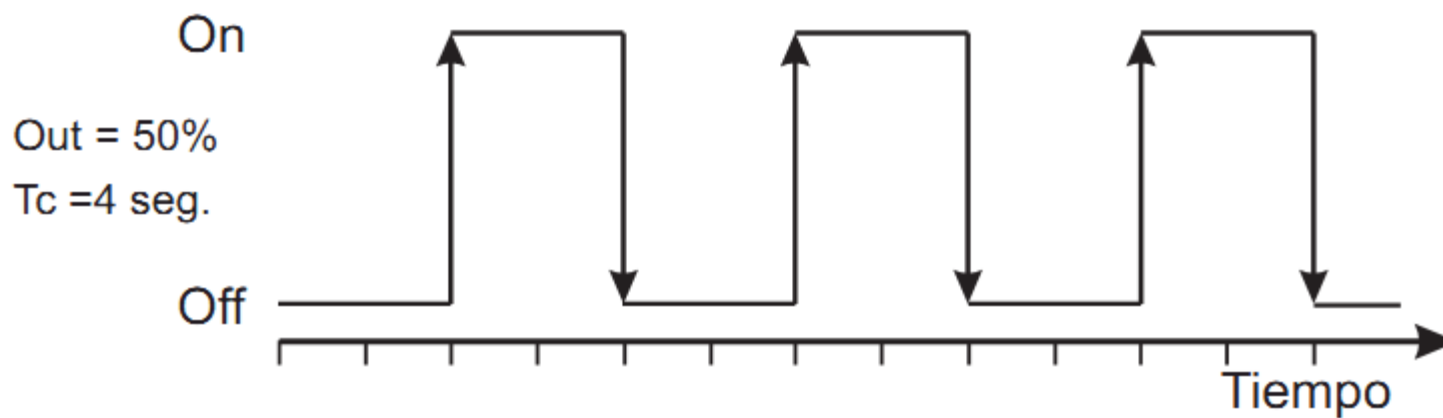
Siguiendo con el ejemplo, si hace falta 250W, es decir 25% de la potencia basta con tener el relé 1 segundo activado y 3 segundos desactivado.

Para sistemas típicos el “tiempo de ciclo” se ajusta entre 1 y 200 segundos según sea el caso.

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 (Constante de tiempo).

Salida Modulada PWM



Modulación por ancho de pulso

En algunos casos, como con el triac, existe una cuantización extrema en el sentido de que el actuador sólo acepta dos valores, on u off. En estos casos, se especifica un tiempo de ciclo T_{ciclo} y el controlador proporciona un pulso cuyo ancho está dado por:

$$T_{pulso}(t) = \frac{y(t) - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} T_{ciclo}$$