

CURSOS INTERNACIONALES



**SISTEMAS INDUSTRIALES DE
REGULACION**

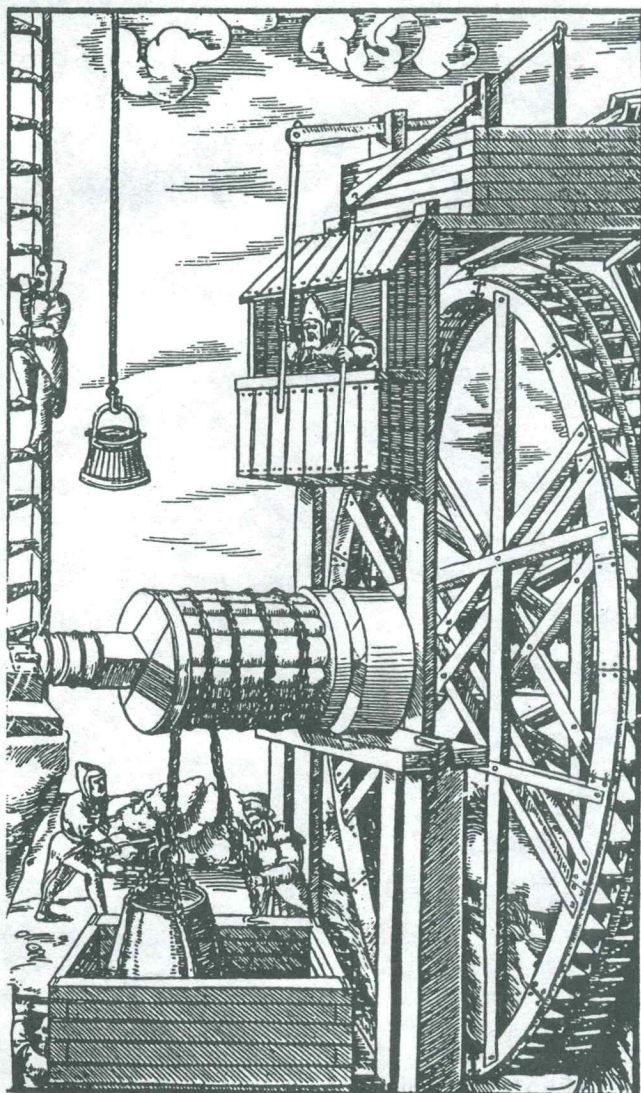
CENTRO INTERNACIONAL COLOMBO ALEMAN



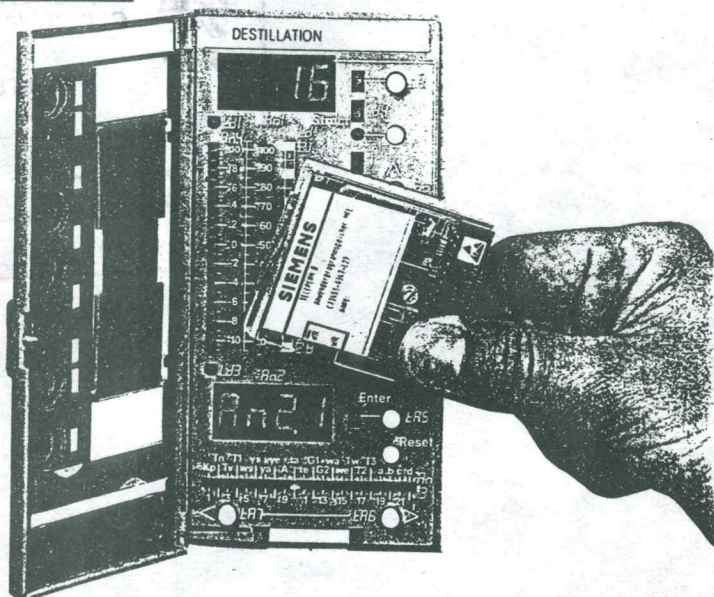
Fundación Alemana
para el Desarrollo Internacional
"D.S.E."

REGULACION

AYER



HOY





PREFACIO

En los tiempos actuales de automatización la expresión *regulación* sugiere propiedades como funcionamiento exacto, alta precisión, calidad extraordinaria o confort superior.

Aunque el principio de regulación se aplica en innumerables procesos y sistemas industriales **no es un invento tecnológico**, sino que el principio de regulación es un **fenómeno natural**, que posibilita que un estado se mantenga automáticamente estable aunque existen influencias perturbadoras. Múltiples procesos biológicos, ecológicos, pero también sociológicos y económicos, funcionan según este principio.

Paralelamente al desarrollo práctico se ha desarrollado la investigación científica de los problemas de regulación, que también tiene mucha importancia.

Desde las primeras aplicaciones técnicas por James Watt (1788) - su regulador de revoluciones en la máquina de vapor - , pasando por la primera descripción matemática de los procesos de regulación a inicios del siglo 20, y luego por los métodos sistemáticos (Oldenbourg y Satorius 1944) hasta llegar hoy en día a los métodos orientados por ordenadores (Kalman 1960 y actualmente la Fuzzy-Logic) la tecnología de regulación se ha independizado y es considerada actualmente como una ciencia autónoma dentro la ingeniería.

Las ciencias técnicas tratan de solucionar los problemas de regulación aplicando un alto nivel matemático - cálculos diferenciales e integrales.

Es un interés de este seminario lograr una comprensión de los problemas complejos de regulación con un nivel matemático muy reducido dando énfasis en los aspectos más pragmático.

Las amplias prácticas previstas deberían dar lugar a obtener experiencias propias con los diferentes modos y sistemas.

Para técnicos resulta a veces difícil ajustar un proceso de regulación en forma exacta. El seminario pretende capacitar a los participantes en los métodos convenientes y en las posibilidades de su aplicación.

Este seminario se dedica a sistemas eléctricos-electrónicos. Dentro de esta categoría nos ocuparemos de un amplio espectro que abarcará desde el circuito de amplificadores operacionales más sencillo hasta un sistema de regulación por microcontroladores con la posibilidad de una autoadaptación.

Para este 4. seminario de capacitación para técnicos y instructores
en cooperación con el
SENA - Centro Colombo Alemán - Barranquilla
y la
FUNDACION ALEMANA PARA EL DESARROLLO INTERNACIONAL

les deseamos a todos mucho éxito
y un buen trabajo en conjunto.



INDICE

Prefacio	
Principio de la regulación	1
El amplificador operacional	5
Elementos de transmisión de un circuito de regulación	12
El tramo de regulación	20
El regulador	25
Diagrama de BODE	43
Conexión de elementos de transmisión	53
Circuito de regulación	58
La regulación óptima	65
Combinaciones convenientes de tramos y reguladores	67
Regulador discontinuo	71
Reguladores tipo digital	77
Mallas superpuestas de regulación	82
Regulador industrial - SIEMENS- SIEPART DR20	85
Sistemas de investigación y adaptación - SIEPID -	100
Sistemas de ordenadores de procesos	103
Proyecto	
Regulador analogo PID	105
Laboratorio	
Regulación de la temperatura con regulador DOS POSICIONES	110
Ejercicios	111

PRINCIPIO DE LA REGULACION

Los sistemas automáticos se dividen fundamentalmente en dos tipos

- Control / mando
- Regulación

No siempre se diferencian bien ambos casos.

Un típico caso de control es el arranque automático de un motor trifásico por un temporizador. El proceso de arranque en dos etapas transcurre siempre de igual modo, no importa si el motor tiene una alta carga o si se encuentra en marcha en vacío.

Un sistema de control transcurre según un modo fijado sin tomar en cuenta el estado presente.

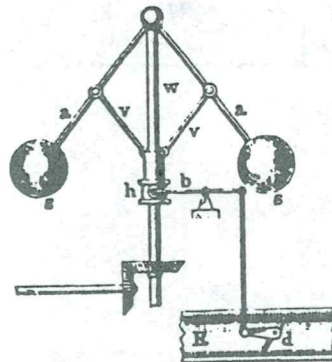
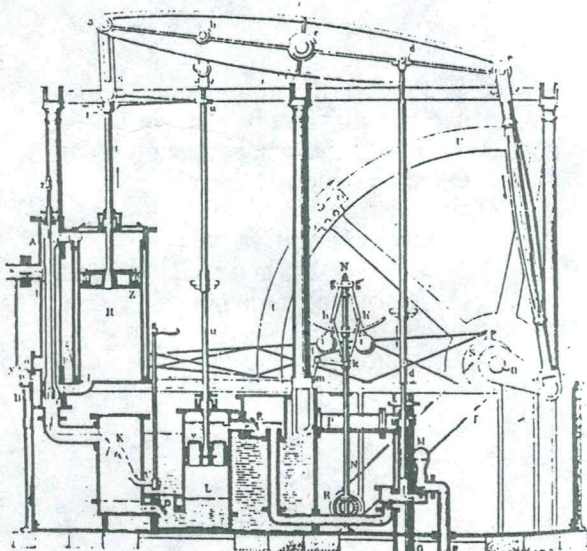
Uno de los más antiguos procesos de regulación realizado por el hombre debe ser el hecho de conducir un barco. El hombre tiene una meta deseada, pero el viento y las corrientes lo desvían de su rumbo. Permanentemente el hombre compara su dirección actual con la dirección deseada y corrige su rumbo por medio del timón y las velas. En este caso existe una regulación manual.

Un sistema de regulación capta la magnitud de regulación y lo compara con el valor de referencia y luego trata de lograr que la desviación tienda a cero, lo que significa que existe un lazo cerrado de acción - una realimentación.

James Watt inventó la máquina a vapor con un movimiento rotativo.

Esta máquina tenía por primera vez en lugar de una regulación manual un sistema mecánico para la regulación automática de las revoluciones de la rueda de transmisión.

MAQUINA A VAPOR DE JAMES WATT CON EL REGULADOR AUTOMATICO



A veces no se puede reconocer la causa de tener un sistema de regulación si tal vez un sistema de mando igualmente funcionará.

En el caso de un motor eléctrico se puede pensar que conectar a la tensión produce un movimiento constante. Pero en realidad la revolución del motor depende de muchas influencias: variación de la carga, variación de la tensión, aumento de la resistencia etc. Son las magnitudes perturbadoras que impiden un movimiento constante del motor y obligan aplicar un sistema de regulación.

La presencia de magnitudes perturbadoras requiere la aplicación de un sistema de regulación.

Un sistema de regulación consiste en dos principales elementos:

- el tramo de regulación
- el regulador

El tramo de regulación es el objeto de regulación en el cual se puede influenciar el suministro de la energía o caudal de la materia hacia el proceso a regular por medio de un elemento de ajuste. En el tramo de regulación se genera la magnitud a regular. Esta magnitud se mide y da el valor real del estado presente.

En el regulador se compara el valor real con el valor de referencia y según la diferencia se da un señal de actuación hacia el elemento de ajuste.

Se fija la magnitud de ajuste de tal modo para que la magnitud a regular se acerque lo máximo hacia el valor de referencia. (negative feedback)

El error de regulación - la diferencia entre el valor de referencia (W) y el valor real (X) de la magnitud a regular- es la magnitud que determina la forma de actuar del regulador hacia la magnitud de ajuste (Y).

($e = X_d$; desviación de regulación)

$$e = W - X$$

$e = 0 \Rightarrow W = X$; ninguna acción hacia la magnitud de ajuste

$e < 0 \Rightarrow X > W$; la actuación hacia el tramo debe reducir el suministro
 Actuación negativa

$e > 0 \Rightarrow X < W$; la actuación hacia el tramo debe aumentar el suministro
 Actuación positiva

Magnitudes de **entrada del tramo de regulación** son:

- la magnitud de ajuste (Y)
- las magnitudes perturbadoras (Z_1 ; Z_2 ..)

Magnitud de **salida del tramo de regulación** es

- la magnitud a regular

Magnitudes de **entrada del Regulador** son:

- el valor real de la magnitud a regular (X)
- el valor de referencia (W)

Magnitud de **salida del Regulador** es:

- la magnitud de ajuste (Y)

En un modo de regulación se pueden distinguir tres tipos:

==> **Regulación con un valor de referencia fijo:**

El sistema de regulación trata de mantener la magnitud a regular fija al valor de referencia instalada.

(Caso típico: Fuente de alimentación estabilizada)

==> **Regulación pilotada:**

El valor de referencia varia según un modo fijado para el proceso a regular. El sistema de regulación trata que la magnitud a regular siga lo más cerca posible el valor de referencia.

(Caso típico: Avión autopilotado)

==> **Regulación en relación con un proceso piloto**

Entre la magnitud de un proceso piloto (X_1) y la magnitud a regular de un otro proceso (X_2) debe establecerse siempre una relación fija.

(Caso típico: Mezcla de dos materiales con un caudal variable pero se debe obtener un producto final con una calidad igual)

Según el modo de actuar se distinguen:

regulación continua

la magnitud de ajuste actúa dentro de sus niveles mínimo y máximo hacia el tramo de regulación.

regulación discontinua

la magnitud de ajuste oscila entre solo dos (tres) valores

- encendido / apagado -.

La tecnología en la cual se realiza el sistema de regulación puede ser ANALOGICO o DIGITAL.

Sistemas electronicos de regulación **análoga** utilizan como elemento principal amplificadores operacionales o amplificadores de instrumentación.

Sistemas de regulación **digital** trabajan con microcontroladores y computadoras individuales o en redes.

CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

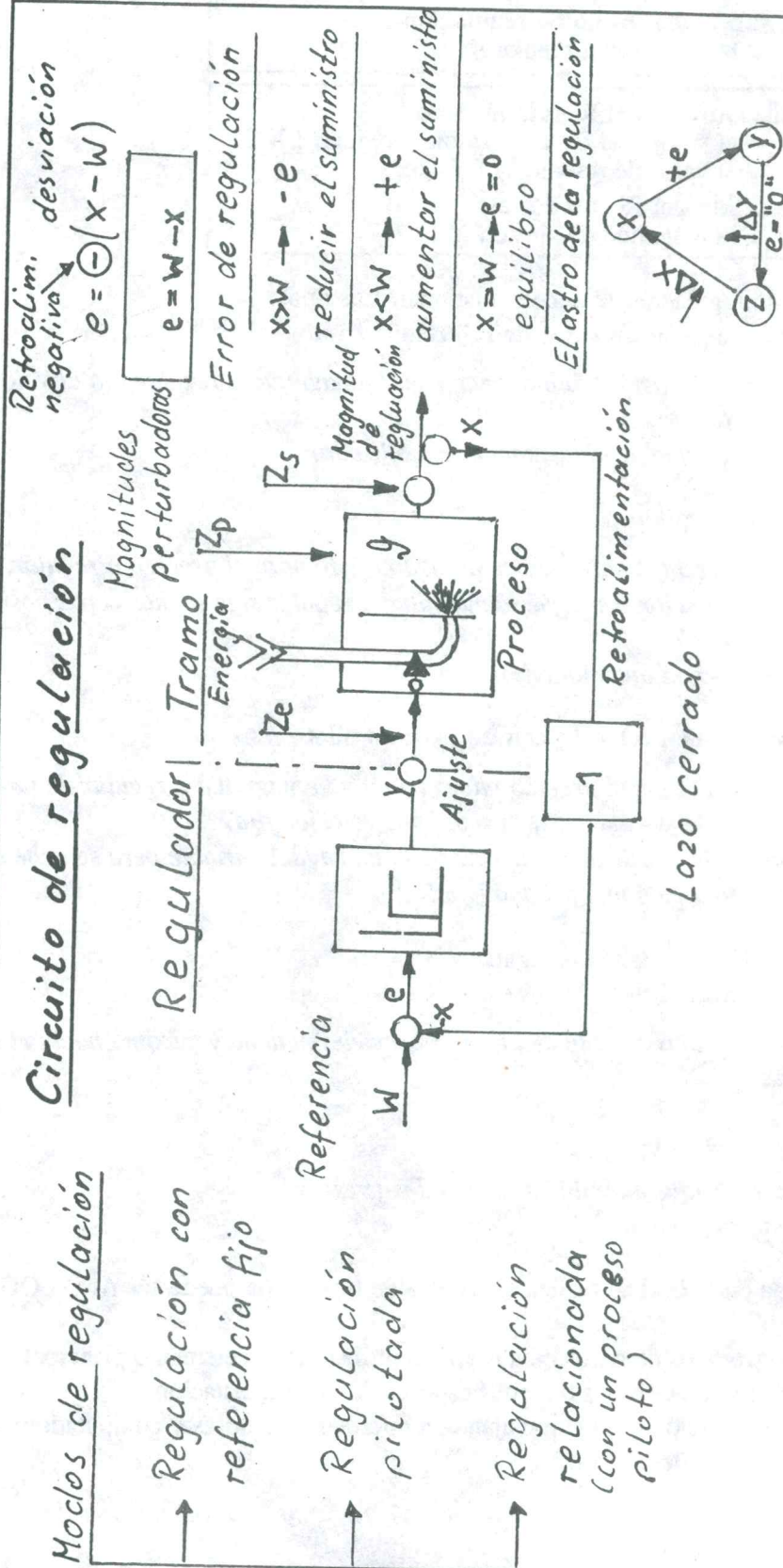
Circuito de regulación

Modos de regulación

Regulación con referencia fija

Regulación pilotada

Regulación relacionada (con un proceso piloto)



EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

El amplificador operacional es el elemento típico de la técnica de regulación electrónica.

El amplificador operacional es un amplificador con un margen amplio de trabajo, el ancho de banda va desde 0 Hz (DC) hasta 2 MHz.

La ganancia de marcha en vacía se encuentra entre 80 a 120 dB.

Con esta gran ganancia solo sirve como comparador.

Otras aplicaciones múltiples se realiza por el principio de retroalimentación.

Así es posible a obtener de un elemento integrado estándar un circuito determinado solo por agregación de componentes externas.

Amplificador NO INVERSOR

amplificador convertidor de impedancia - muy alta impedancia de entrada (G OHM) y baja impedancia de salida (m OHM).

Amplificador INVERSOR

Con impedancia determinada según resistencia de entrada y factor de ganancia $G < 1$

Amplificador sumador

Amplificador inversor con la suma de señales de entrada (con diferentes pesos) en la salida.

Amplificador sustractor

Amplificador inversor amplificando con determinada ganancia la diferencia de las dos señales de entrada.

Amplificador integrado

Amplificador inversor realizando la integración analógica de la señal de entrada.

Amplificador diferencial

Amplificador inversor realizando la diferenciación analógica de la señal de entrada.



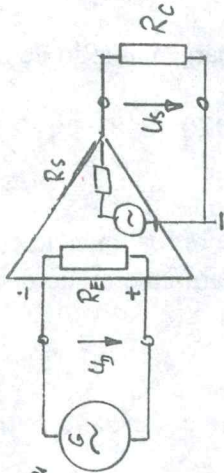
(CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Amplificador operacional I

Características de un OPAMP

¿ Amplificador ideal ?

- La entrada \ominus invierte y la señal de salida
- La entrada \oplus no invierte la señal de salida
- La amplificación es muy alta $A > 10000$ y (90dB)



Ejemplo $\mu A741$:

Impedancia de Entrada $2M\Omega$

Impedancia de Salida 75Ω

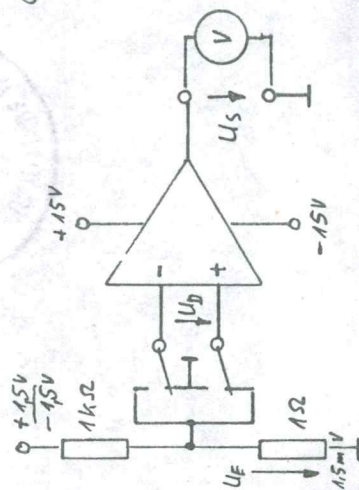
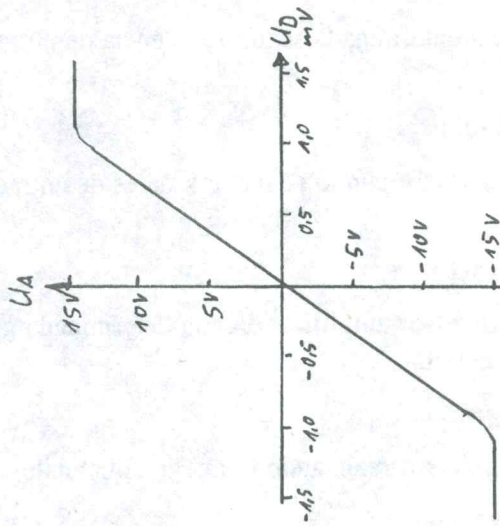
Ganancia $88dB$

Supresión del modo común

V_{CMRR} 90dB

Corriente máxima de salida $18mA$

Flanco de subida $0.5V/\mu s$



Entrada	Salida U_S
+	$-U_B$
-	$+U_B$
+	$+U_B$
-	$-U_B$

QUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Amplificador operacional II

A) Circuito NO INVERSOR

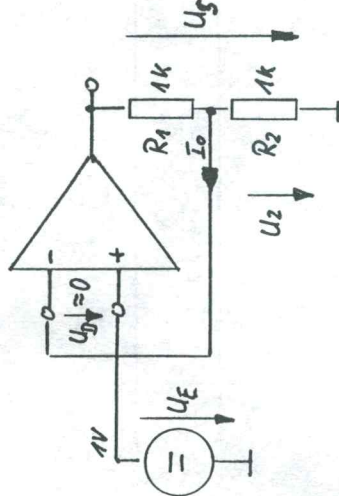
¿Como reducir la alta ganancia?

$U_D \approx 0$
 $U_E \approx U_2$

$U_2 = \frac{U_s \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

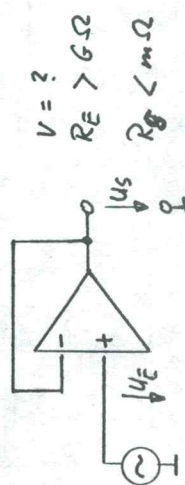
$A = \frac{U_s}{U_E}$

$A = 1 + \frac{R_1}{R_2}$



$R_E = \frac{U_E}{I_E} = \frac{V_0 \cdot r_E}{V}$

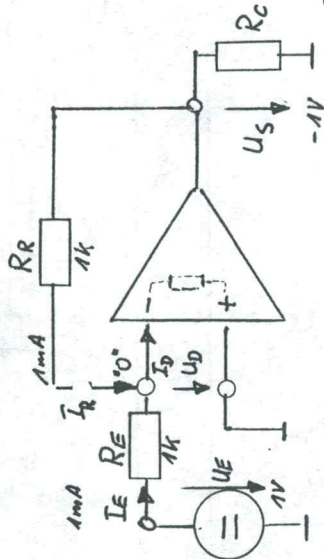
$R_S = \frac{\Delta U_s}{\Delta I_s} = \frac{r_a \cdot V}{V_0}$



$V = ?$ Convertidor de impedancia
 $R_E > 60 \Omega$
 $R_g < 1 m \Omega$

B) Circuito INVERSOR

$I_D \approx 0$
 $I_E = -I_R$
 $I_E = \frac{U_E}{R_E}$
 $I_R = \frac{U_s}{R_R}$
 $\frac{U_s}{R_R} = \frac{U_E}{R_E}$
 $A = \frac{U_s}{U_E} = -\frac{R_R}{R_E}$



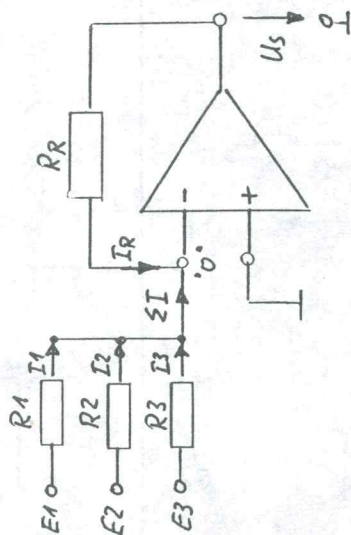
$R_E = R_E$ $R_S = \frac{r_a \cdot V}{V_0}$

→ Con componentes en alrededor del OPAMP se impone al circuito un comportamiento deseado.

CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Amplificador operacional III

c) Sumador analógico



$$U_s = -R_R \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} \right)$$

$$-I_R = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}$$

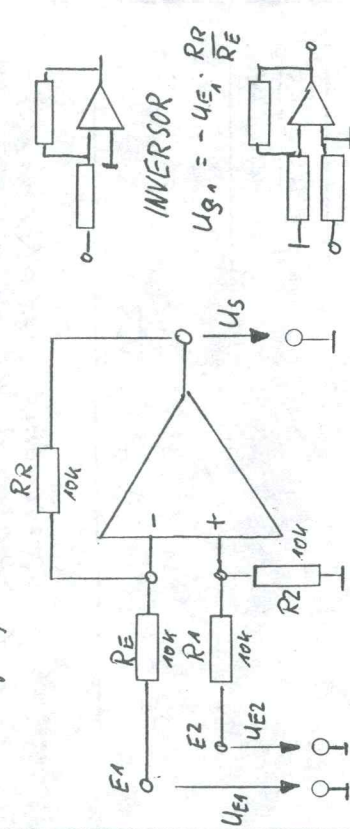
$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3}$$

$$I_R = \frac{U_s}{R_R} = -\sum I_n$$

D) Sustractor analógico

¿ Amplificar la señal de un circuito Puentes?



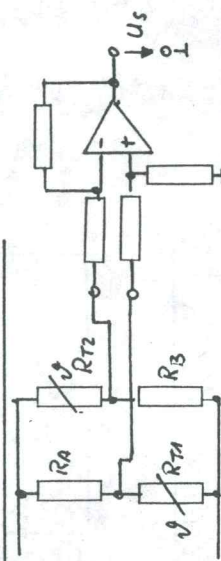
INVERSOR

$$U_{g1} = -U_{E1} \cdot \frac{R_R}{R_E}$$

NO INVERSOR

$$U_{g2} = U_{E2} \cdot \frac{R_R + R_1}{R_2}$$

$$U_s = U_{E2} \cdot V_2 - U_{E1} \cdot V_1$$



MC1741, MC1741C MC1741N, MC1741NC

Device	Alternate	Temperature Range	Package
MC1741CG	LM741CD, μ A741HC	0°C to +70°C	Metal Can
MC1741CP1	LM741CN, μ A741TC	0°C to +70°C	Plastic DIP
MC1741NCP1	—	0°C to +70°C	Plastic DIP
MC1741CU,MCU	—	0°C to +70°C	Ceramic DIP
MC1741G,NG	—	-55°C to +125°C	Metal Can
MC1741U,NU	—	-55°C to +125°C	Ceramic DIP
MC1741CG3	—	0°C to +70°C	Metal Can

INTERNALLY COMPENSATED, HIGH PERFORMANCE OPERATIONAL AMPLIFIERS

... designed for use as a summing amplifier, integrator, or amplifier with operating characteristics as a function of the external feedback components.

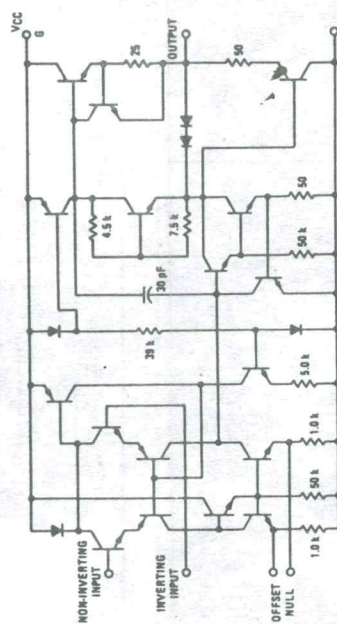
- No Frequency Compensation Required
- Short-Circuit Protection
- Offset Voltage Null Capability
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low-Power Consumption
- No Latch Up
- Low Noise Selections Offered - N Suffix

MAXIMUM RATINGS (T_A = +25°C unless otherwise noted)

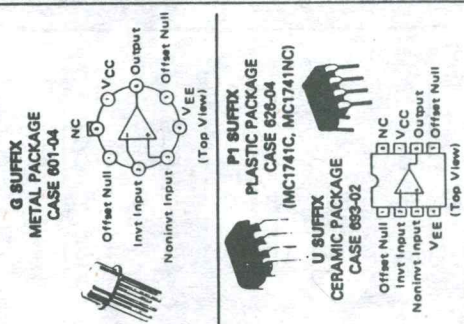
Rating	Symbol	MC1741C	MC1741	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	+18	+22	Vdc
	V _{EE}	-18	-22	Vdc
Input Differential Voltage	V _{ID}	±30		Volts
Input Common Mode Voltage (Note 1)	V _{ICM}	±15		Volts
Output Short Circuit Duration (Note 2)	t _{SC}	Continuous		
Operating Ambient Temperature Range	T _A	0 to +70	-55 to +125	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-65 to +150		°C
Metal and Ceramic Packages		-55 to +125		
Plastic Packages				

Note 1. For supply voltages less than +15 V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
Note 2. Supply voltage equal to or less than 15 V.

EQUIVALENT CIRCUIT SCHEMATIC



OPERATIONAL AMPLIFIER SILICON MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUIT



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, V_{EE} = -15 V, T_A = 25°C unless otherwise noted).

Characteristic	MC1741			MC1741C			Unit	
	Symbol	Min	Typ	Max	Min	Typ		Max
Input Offset Voltage (I _{IS} ≤ 10 k)	V _{IO}	—	1.0	5.0	—	2.0	6.0	mV
Input Offset Current	I _{IO}	—	20	200	—	20	200	nA
Input Bias Current	I _{IB}	—	80	500	—	80	500	nA
Input Resistance	r _i	0.3	2.0	—	0.3	2.0	—	MΩ
Input Capacitance	C _i	—	1.4	—	—	1.4	—	pF
Offset Voltage Adjustment Range	V _{IO} R	—	±15	—	—	±15	—	mV
Common Mode Input Voltage Range	V _{ICR}	±12	±13	—	±12	±13	—	V
Large Signal Voltage Gain (V _O = ±10 V, R _L ≥ 2.0 k)	A _v	50	200	—	20	200	—	V/mV
Output Resistance	r _o	—	75	—	—	75	—	Ω
Common Mode Rejection Ratio (I _{IS} ≤ 10 k)	CMRR	70	90	—	70	90	—	dB
Supply Voltage Rejection Ratio (I _{IS} ≤ 10 k)	PSRR	—	30	150	—	30	150	dB
Output Voltage Swing (R _L ≥ 10 k)	V _O	±12	±14	—	±12	±14	—	V
Output Short-Circuit Current (R _L ≥ 2 k)	I _{OS}	—	20	—	—	20	—	mA
Supply Current	I _D	—	1.7	2.8	—	1.7	2.8	mA
Power Consumption	PC	—	50	85	—	50	85	mW
Transient Response (Unity Gain - Non-Inverting) (V _i = 20 mV, R _L ≥ 2 k, C _L ≤ 100 pF) Rise Time	t _{RLH}	—	0.3	—	—	0.3	—	μs
(V _i = 20 mV, R _L ≥ 2 k, C _L ≤ 100 pF) Overshoot	os	—	15	—	—	15	—	%
(V _i = 10 V, R _L ≥ 2 k, C _L ≤ 100 pF) Slew Rate	SR	—	0.5	—	—	0.5	—	V/μs

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = +15 V, V_{EE} = -15 V, T_A = T_{low} to T_{high} unless otherwise noted).

Characteristic	MC1741			MC1741C			Unit	
	Symbol	Min	Typ	Max	Min	Typ		Max
Input Offset Voltage (I _{IS} ≤ 10 k)	V _{IO}	—	1.0	6.0	—	—	7.5	mV
Input Offset Current	I _{IO}	—	7.0	200	—	—	—	nA
Input Bias Current (T _A = 125°C)	I _{IB}	—	85	500	—	—	—	nA
(T _A = -55°C)		—	—	—	—	—	—	
(T _A = 0°C to +70°C)		—	—	—	—	—	300	
Input Bias Current (T _A = 125°C)	I _{IB}	—	30	500	—	—	—	nA
(T _A = -55°C)		—	—	—	—	—	—	
(T _A = 0°C to +70°C)		—	—	—	—	—	800	
Common Mode Input Voltage Range	V _{ICR}	±12	±13	—	—	—	—	V
Common Mode Rejection Ratio (I _{IS} ≤ 10 k)	CMRR	70	90	—	—	—	—	dB
Supply Voltage Rejection Ratio (I _{IS} ≤ 10 k)	PSRR	—	30	150	—	—	—	dB
Output Voltage Swing (R _L ≥ 10 k)	V _O	±12	±14	—	—	—	—	V
(R _L ≥ 10 k)		±10	±13	—	—	—	—	
(R _L ≥ 2 k)		—	—	—	—	—	—	
Large Signal Voltage Gain (R _L ≥ 2 k, V _{out} = ±10 V)	A _v	25	—	—	15	—	—	V/mV
Supply Currents (T _A = 125°C)	I _D	—	15	25	—	—	—	mA
(T _A = -55°C)		—	2.0	3.3	—	—	—	
Power Consumption (T _A = +125°C)	PC	—	45	75	—	—	—	mW
(T _A = -55°C)		—	60	100	—	—	—	

*T_{high} = 125°C for MC1741 and 70°C for MC1741C
T_{low} = -55°C for MC1741 and 0°C for MC1741C

TYPICAL CHARACTERISTICS
 ($V_{CC} = +15$ Vdc, $V_{EE} = -15$ Vdc, $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)

**FIGURE 6 — POWER BANDWIDTH
 (LARGE SIGNAL SWING versus FREQUENCY)**

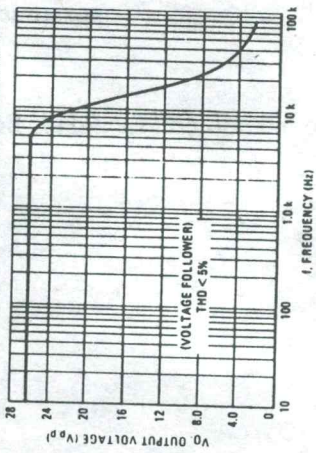
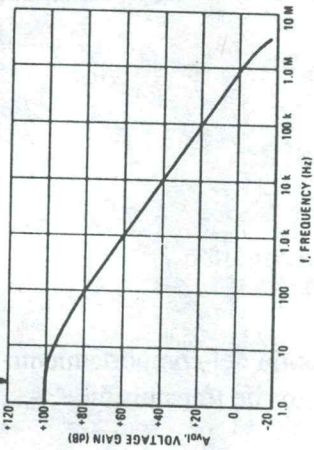
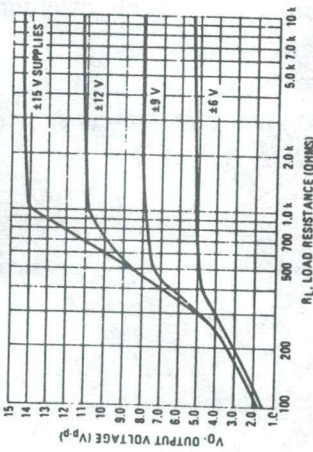


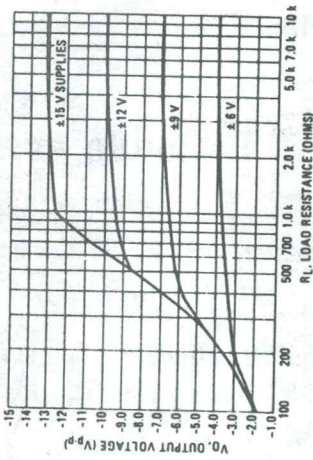
FIGURE 7 — OPEN LOOP FREQUENCY RESPONSE



**FIGURE 8 — POSITIVE OUTPUT VOLTAGE SWING
 versus LOAD RESISTANCE**



**FIGURE 9 — NEGATIVE OUTPUT VOLTAGE SWING
 versus LOAD RESISTANCE**



**FIGURE 10 — OUTPUT VOLTAGE SWING versus
 LOAD RESISTANCE (Single Supply Operation)**

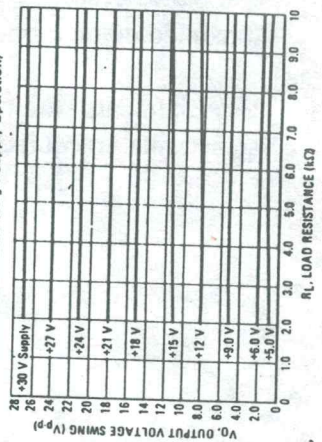


FIGURE 11 — SINGLE SUPPLY INVERTING AMPLIFIER

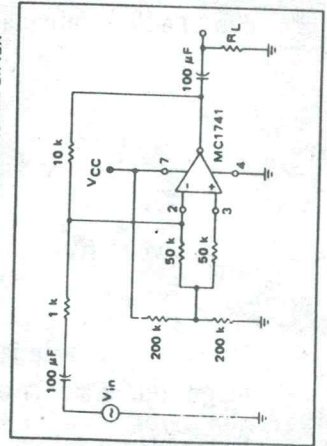


FIGURE 12 — NONINVERTING PULSE RESPONSE

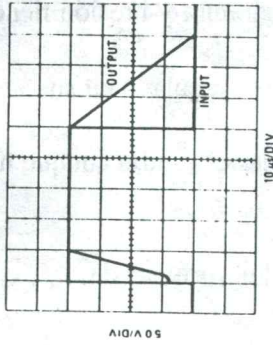
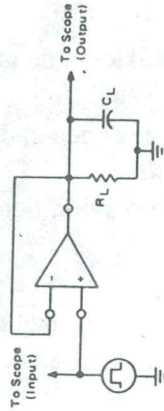
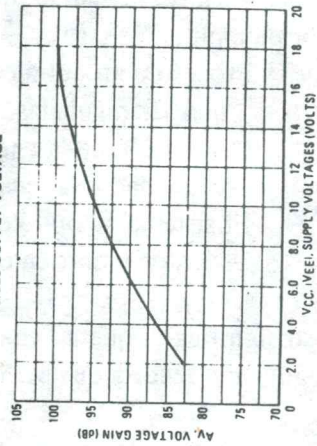


FIGURE 13 — TRANSIENT RESPONSE TEST CIRCUIT



**FIGURE 14 — OPEN LOOP VOLTAGE GAIN
 versus SUPPLY VOLTAGE**



ELEMENTOS DE TRANSMISION DE UN CIRCUITO DE REGULACION

Los sistemas de regulación se encuentran en los procesos industriales de las diferentes ramas y así existe una multitud de tareas y tecnologías para la automatización.

Por ejemplo:

- Proceso petroquímico para la destilación de gasolina; temperatura y presión tienen que ser reguladas.
- Generación de la energía eléctrica; el generador tiene que ser regulado en su velocidad y la tensión generada.
- El sistema autopiloto de un barco o avión tiene que mantener el rumbo aunque haya vientos y corrientes.

Eso significaría que tal vez una persona que se dedica a conocer los sistemas de regulación tendría que ser un experto en cada ramo.

En principio cada proceso tiene una magnitud de entrada y una magnitud de salida. Según las características del proceso hay una determinada relación entre la variación de la entrada y de la salida. Bajo este concepto la multitud indefinida de los procesos a regular se presentan todos iguales porque tienen características en común y entonces es posible clasificarlos. Así, un circuito de regulación está compuesto de elementos de transmisión con una determinada característica.

Estímulo - respuesta

¿ Como investigar las características de un elemento de transmisión ?

Un estímulo hacia la magnitud de entrada y luego la observación del comportamiento de la magnitud de salida permite identificar y clasificar los elementos de transmisión.

Respuesta a saltos

Dar saltos bruscos con una amplitud diferente es el modo de investigar el comportamiento dinámico de un tramo de transmisión.

Especialmente para tramos con una gran inercia se aplica este método con facilidad. Sólo se necesita un equipo registrador.

Respuesta con diferentes frecuencias

La aplicación de señales senoidales en la entrada permite conocer la función de transmisión en relación con diferentes frecuencias.

Resultado directo es la relación de las amplitudas de salida con la entrada y el grado de desfase entre ambas señales.

Muy útil es la representación en el diagrama de BODE, que es la relación de las amplitudas expresado en dB (Decibel) sobre una escala logarítmica de frecuencias, junto con el diagrama del ángulo del desfase entre la magnitud de salida y entrada.

La investigación del comportamiento con frecuencias diferentes da un conocimiento más profundo sobre un tramo de transmisión.

Pero este método requiere mucho tiempo y un equipo de medición más amplio. Generalmente se investigan tramos veloces por medio de un generador de señales y un osciloscopio.

En el caso de tramos con gran inercia es casi imposible aplicar este modo de investigación.

Clasificación de elementos de transmisión

Elemento proporcional (P)

Un elemento P da una respuesta inmediata y correspondiente a la magnitud de entrada.

Su dato característico es el coeficiente proporcional

$$C_P = \Delta X_s / \Delta X_e$$

El elemento P existe sólo en teoría, porque en realidad un salto siempre demora un determinado tiempo, sólo es cuestión de la escala de tiempo con la cual se mira. En el caso de un transistor por ejemplo, el incremento de la corriente demora unos nano-segundos (ns). Cada elemento posee una determinada inercia, por lo tanto existen sólo elementos P - T1.

Los elementos P tienen la característica que aún sin regulación alcanzan un valor final de la magnitud de salida; el tramo por sí mismo logra un nivel de equilibrio. (Energía suministrada igual a la energía consumida) => tramo con equilibrio final.

Los tramos reales pertenecen en su mayoría a esta categoría.

Elemento integral (I)

Un elemento integral tiene un efecto sumatorio, tanto que una señal de entrada esta presente, influye aumentando (ó disminuyendo) el valor de la señal de salida.

La velocidad con la cual varía la señal de salida depende de la magnitud de entrada y del coeficiente integral del elemento de transmisión.

$$C_I = v_s / x_e = \Delta x_s / \dot{x}_e * \Delta t = 1/T_I \quad [1/s]$$

En lugar del coeficiente integral C_I se aplica también el tiempo de la integración como dato característico. El tiempo de integración es el tiempo que demora el incremento de la señal de salida hasta que alcance el mismo valor que la magnitud de entrada ($x_e = \Delta x_s$).

El típico caso de un tramo integral es llenar un recipiente con un chorro constante. El nivel del tanque sube permanente porque el volumen se acumula.

Tramos del tipo I no alcanzan un valor final equilibrado, en los casos reales se necesitan instalaciones de seguridad (interruptor final de carrera etc.)

Elemento diferencial

Un elemento diferencial sólo actúa cuando en la señal de entrada se nota una variación. La magnitud de la señal de salida depende directamente de la velocidad del cambio en la entrada y del coeficiente diferencial.

$$C_D = x_s / v_e = x_s \Delta t / \Delta x_e \quad [s]$$

Elemento de retardo

Un elemento de retardo representa un almacén de energía. Cada tramo real actúa con cierta inercia porque almacena energía durante el proceso antes de reaccionar hacia la magnitud de salida.

En un tramo real hay generalmente una gran cantidad de almacenes de energía, por ejemplo un horno.

Según el numero de elementos acumulados varía la curva de respuesta, y así se les diferencia

T1 un almacén de energía (una constante de tiempo)

T2 dos almacenes de energía (dos constantes de tiempo)

Tn n almacenes de energía (n constantes de tiempo)

Elemento T1

La respuesta sobre un salto en la entrada es una variación según la función e.
 El dato característico es la constante de tiempo (τ). En el momento en que la magnitud de salida ha subido a 63% del máximo, ha pasado un tiempo que corresponde a la constante de tiempo .

$$X_s = X_e (1 - e^{-t/\tau})$$

Aplicando señales de diferentes frecuencias la señal de salida también tiene la forma senoidal pero con desfase de -90° .

La atenuación de la señal de salida aumenta con mayor frecuencia. Así un elemento T1 se comporta como un filtro de pasa bajos.

Elemento T2

La curva de respuesta de un elemento T2 puede ser muy variable. Como hay dos almacenes de energía puede presentarse el caso de que haya dos almacenes del mismo tipo, entonces el tiempo de retardo aumenta.

Pero en el caso de que los almacenes actúen en contrafase pueden ocurrir diferentes casos de oscilación:

- oscilación permanente
- oscilación amortiguada

El grado de amortiguación D es el dato que determina el comportamiento del tramo T2:

$$D = \frac{T1}{2 T2}$$

T1 = Constante de tiempo del primer elemento

T2 = Constante de tiempo del segundo elemento

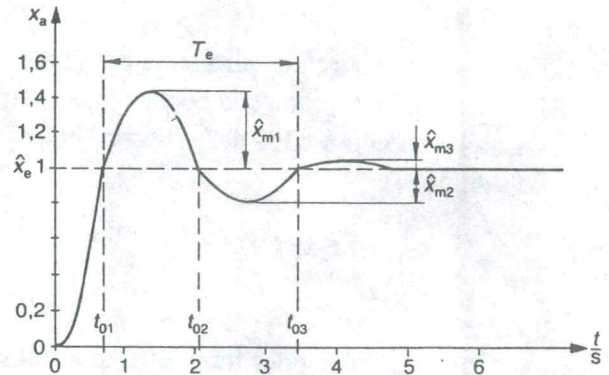
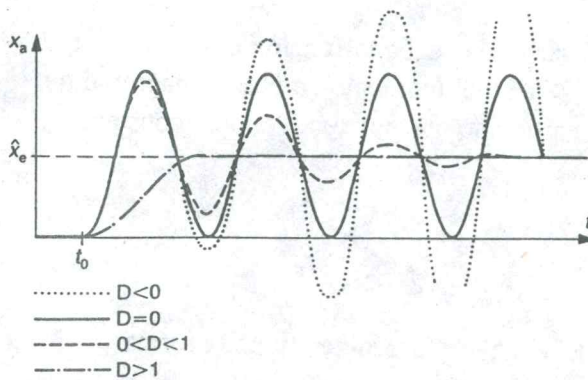
D = 0 Oscilación permanente con la frecuencia $w_0 = 1/T2$

0 < D < 1 Oscilación amortiguada con la frecuencia momentana $w_m = 1/T_m$
 $w_m = w_0 / \sqrt{1-D^2}$

D ≥ 1 Ninguna oscilación - aperiodico

D < 0 Oscilación con la amplitud en aumento

Analizando la curva de respuesta es posible obtener los datos característicos del tramo T2, la constante de tiempo T1 y T2.



Curva de respuesta con oscilación

La curva muestra que con cada oscilación se reduce la amplitud de la onda, la amortiguación corresponde a una curva de potencia sobre e. La relación entre las dos amplitudes siguientes $\hat{X}_{m i}$ y $\hat{X}_{m i+1}$ es una constante:

$$\frac{\hat{X}_{m i+1}}{\hat{X}_{m i}} = e^{-A} \quad i = 1; 2; 3 \dots$$

$$A = - \frac{\pi * D}{\sqrt{1 - D^2}}$$

Tanto como se disminuya la amplitud se reduce el tiempo de duración de la amplitud. Los momentos en que la amplitud es cero corresponden a:

$$t_{0K} = \frac{K * \pi - \delta}{\omega_E} \quad \delta = \arccos D \text{ [rad]}$$

K = 1; 2; 3...

Esta relación es algo muy práctico para identificar los datos característicos de un tramo real y desconocido.

Con esta relación se logra calcular el dato característico de un tramo de transmisión que es el factor de la amortiguación D.

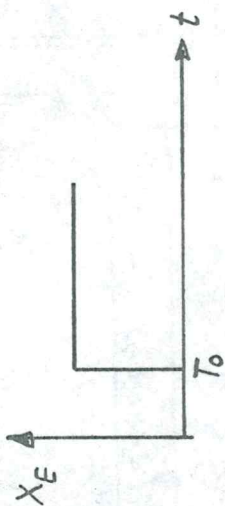
Las amplitudes de la señal de salida se miden con la curva de respuesta y se calcula el factor D, con el cual ahora es posible identificar la constante de tiempo T1 y T2

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\pi}{\ln(\hat{X}_{m i} / \hat{X}_{m i+1})} \right]^2}}$$

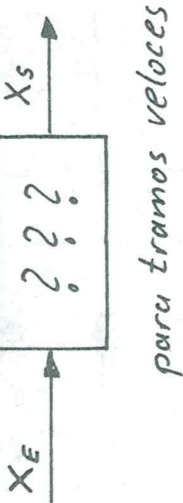
Seguidamente el trabajo para investigar los datos característicos de un tramo desconocido consistirá en:

- 1 - Medición de $\hat{X}_{m i}$ y $\hat{X}_{m i+1}$
- 2 - Calculo del factor de amortiguación D
- 3 - Calculo de $T2 = \left[Tm \sqrt{(1-D^2)} / 2 * \pi \right]$
- 4 - Calculo de $T1 = 2 * T2 * D$

Elementos de transmisión



Señal a salto

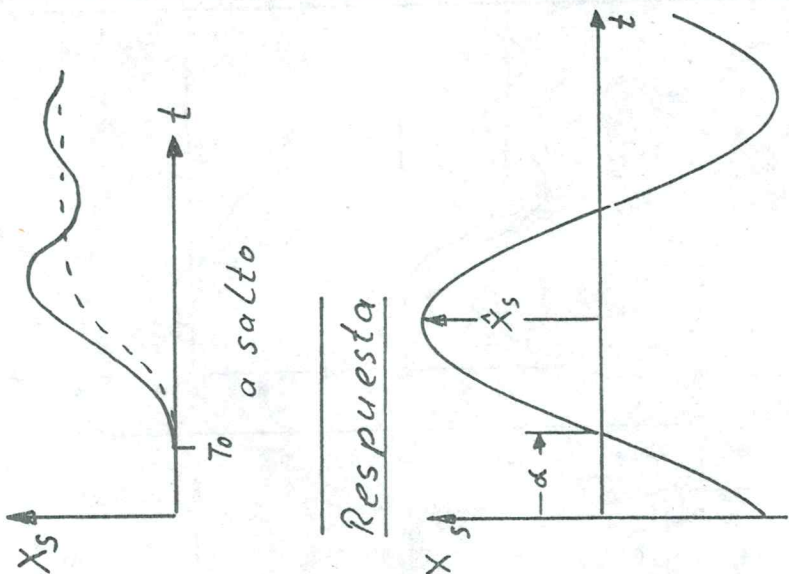


Comportamiento dinámico

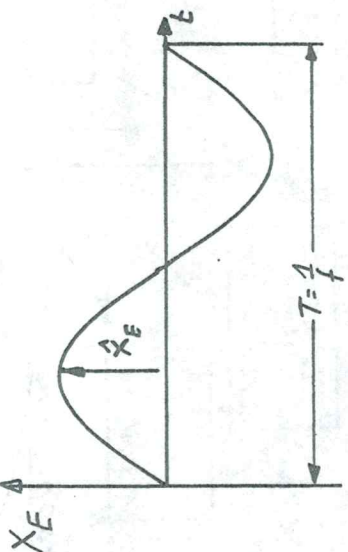
para tramos lentos

para tramos veloces

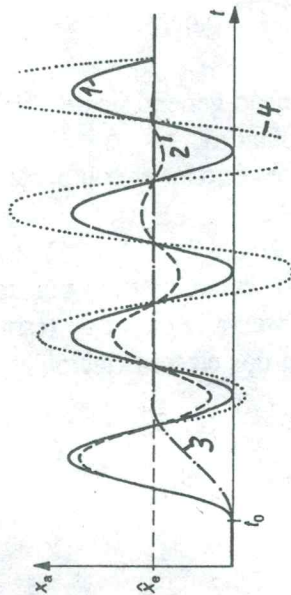
Respuesta



Estimulo
 Señal senoidal



Tramo T2

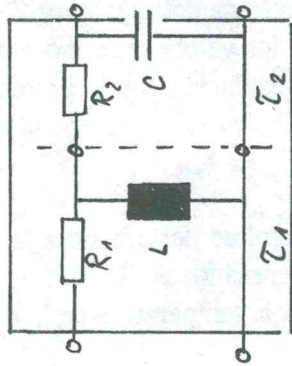


Grado de amortiguación

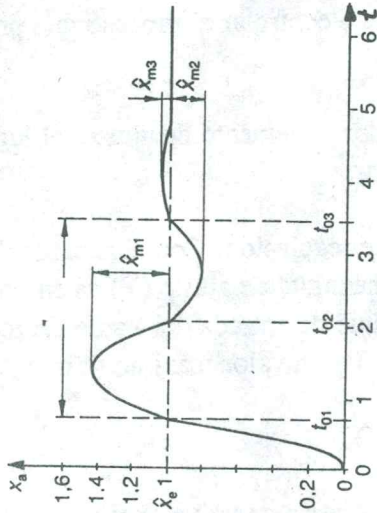
$$D = \frac{T_1}{2T_2}$$

- 1- $D = 0$ Oscilación constante con $\omega_0 = \frac{1}{T_2}$
- 2- $0 < D < 1$ amortiguada con $\omega_m = \omega_0 \sqrt{1-D^2}$
- 3- $D \geq 1$ aperiodico - ninguna Oscilación
- 4- $D < 0$ Oscilación con amplitud aumentando - Energía ajena -

Elemento retardador T2



$$T_2 = T_1 \cdot C$$



La relación entre dos amplitudulas es constante

$$\frac{x_{mi+1}}{x_{mi}} = e^A \quad i = 1; 2; 3$$

$$A = - \frac{\pi \cdot D}{1-D^2}$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\pi}{\ln \left(\frac{x_{mi}}{x_{mi+1}} \right)} \right]^2}}$$

$$\text{tok} = \frac{k\pi - \delta}{\omega_0}$$

$k = 1; 2; 3 \dots$
 $\delta = \text{arc cos } D$

$$3. T_1 = 2T_2 \cdot D$$

$$2. T_2 = \frac{T_m \sqrt{1-D^2}}{2\pi}$$

Calculo de T2 y T1 A. D

por datos medidos:

EL TRAMO DE REGULACION

El tramo de regulación es el objeto donde se quiere controlar el proceso que produce la magnitud a regular (X).

Las partes del tramo de regulación son: el actuador o elemento de ajuste, el lugar de ajuste y el lugar de la captación de la magnitud a regular.

El actuador se encuentra al principio del tramo de regulación. Con el actuador se ajusta el flujo de la masa o energía hacia el proceso. La magnitud de ajuste (Y) es entonces la magnitud de salida del regulador o bien la magnitud de entrada del tramo de regulación. La magnitud de ajuste tiene un valor mínimo (Y_{min}) y un valor máximo (Y_{max}) entre los cuales se la puede variar.

Este margen de ajuste se indica con Y_h (= 100%)

La magnitud a regular X debe lograr llegar lo más cerca de un valor fijado y mantenerlo. La magnitud a regular es entonces la magnitud de salida del tramo de regulación que se obtiene en el lugar de medición por una permanente captación de la magnitud a regular. La magnitud a regular (X) es a la vez la magnitud de entrada del regulador.

El margen de regulación X_h está determinado por los valores mínimo y máximo de la magnitud a regular. Con él es posible realizar una regulación con la presencia de las magnitudes de perturbación extremas (Z_h).

Un ejemplo puede aclarar el significado:

Para proyectar una cámara es la más importante magnitud perturbadora la temperatura de ambiente y se supone que su valor máximo no sobrepasa los 50°C .

Con 50°C de temperatura externa es posible regular la temperatura en la cámara refrigeradora desde -5 hasta -25°C .

Si la temperatura externa sube más ya no es posible mantener el margen de regulación.

$$X_h = -25^{\circ}\text{C} ; Y_h = 100\% \text{ de potencia} ; Z_h = +50^{\circ}\text{C}$$

El proceso a regular depende de muchos factores y por lo general no se conocen los datos característicos del tramo de regulación en forma matemática.

Para obtener una regulación óptima es muy importante conocer el comportamiento dinámico del tramo.

En la mayoría de los casos se trata de obtener los datos característicos por un estímulo de salto con la magnitud de ajuste (10% o 100%) y se observa la curva de respuesta.

Según esto los tramos a regular pueden clasificarse en dos clases principales:

tramo a regular compensado

Compensado quiere decir que el tramo llega después de un tiempo infinito a un valor final: la energía suministrada se compensa con la energía consumida. *Un tramo compensado se regula por sí mismo.*

Dato característico del tramo compensado es el coeficiente de transmisión en el momento estable
 ($t \rightarrow \infty$)

$$C_T = \frac{\Delta X}{\Delta Y}$$

tramo a regular no compensado - integral

Un tramo del tipo integral tiene un efecto acumulador, se asume en el proceso a regular la magnitud a regular con una aceleración constante cuando se da un salto a la magnitud de ajuste.

Tramos del tipo integral no llegan a un equilibrio y por lo tanto necesitan un elemento de seguridad para parar el suministro hacia el proceso. Un caso típico es el de cargar un tanque.

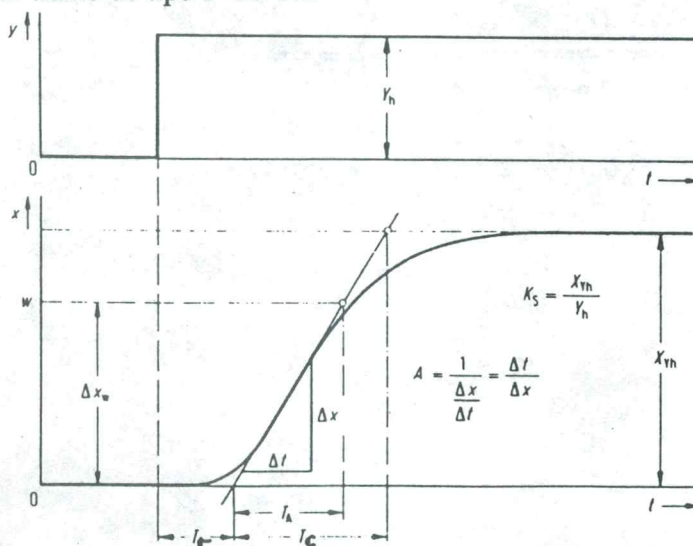
Una buena regulación se obtiene más fácilmente con un tramo del tipo compensado.

Una regla fija indica que cuando se logra regular un tramo integral satisfactoriamente se logra la regulación del tramo compensado con un mejor resultado.

Comportamiento dinámico

La inercia del proceso a regular depende de múltiples almacenes de energía, por lo tanto, la mayoría de los tramos se presentan como un elemento Tn con un numero desconocido de constantes de tiempo.

Para simplificar el análisis se supone que un tramo a regular puede representarse como un tramo con un determinado momento de tiempo muerto y una sola constante de tiempo reemplazante - un tramo de tipo P-T1-Tm



La curva de respuesta de un tramo tipo T_n muestra un punto de inflexión. Cuando se constuye una tangente en este punto se supone que esta recta representa suficientemente bien la subida de la magnitud a regular.

Por medio de esta recta se pueden obtener diferentes datos:

- T_r - Tiempo de retardo - no es realmente un tiempo muerto por que ya hay una variación en la magnitud a regular (X)
- T_c - Tiempo de establecimiento - que se toma como constante de tiempo reemplazante

Un dato interesante es el **valor de arranque A** ; el valor recíproco de la máxima velocidad de subida de la magnitud a regular cuando se varía al máximo la magnitud de ajuste (Y_h) o máximo valor perturbador (Z_h).

$$A = \frac{t_A}{\Delta X_w} \quad \text{con } Y = Y_h \quad \text{o} \quad Z = Z_h$$

La unidad depende de la magnitud a regular; por ejemplo $\text{min}/^\circ\text{C}$ o s/V .

El **tiempo de arranque T_A** es el momento en el que por primera vez la magnitud a regular llega al valor de referencia W con la condición que se de el margen máximo de ajuste (Y_h). Se simplifica el caso suponiendo que eso continúa de la misma forma que la recta.

En muchos casos reales no se puede actuar con el máximo margen de ajuste por peligros en el proceso, por lo tanto se da un salto de 10% por ejemplo. El valor de arranque se calcula en la relación de:

$$A = \frac{\Delta t}{\Delta X} * \frac{Y}{Y_h}$$

Ejemplos de datos dinámicos de tramos reales:

Tipo de tramo	T_r	A
Horno eléctrico	3 min	0,4 $\text{min}/^\circ\text{C}$
Motor eléctrico 1.4 kW	0	2,1 10^{-4} s/rev.por min

El diagrama muestra diferentes magnitudes que tienen la misma relación:

$$A = \frac{\Delta t}{\Delta X} = \frac{X_{yh}}{T_c} = \frac{\Delta X_w}{T_A} = \frac{W}{T_A}$$

La regulabilidad de un tramo depende de la relación entre el tiempo de retardo T_r y el tiempo de establecimiento T_c .

Un tramo con un largo tiempo de retardo y un corto tiempo de establecimiento es difícil de regular.

El grado de dificultad a regular es la relación:

$$GR = T_r/T_A \quad \text{o} \quad GR = T_r/A*W$$

<i>GR</i>	<i>regulabilidad</i>
=====	
0 - 0,1	<i>muy buena</i>
0,1 - 0,2	<i>buena</i>
0,2 - 0,4	<i>todavía posible</i>
0,4 - 0,8	<i>mala</i>
> 0,8	<i>imposible</i>

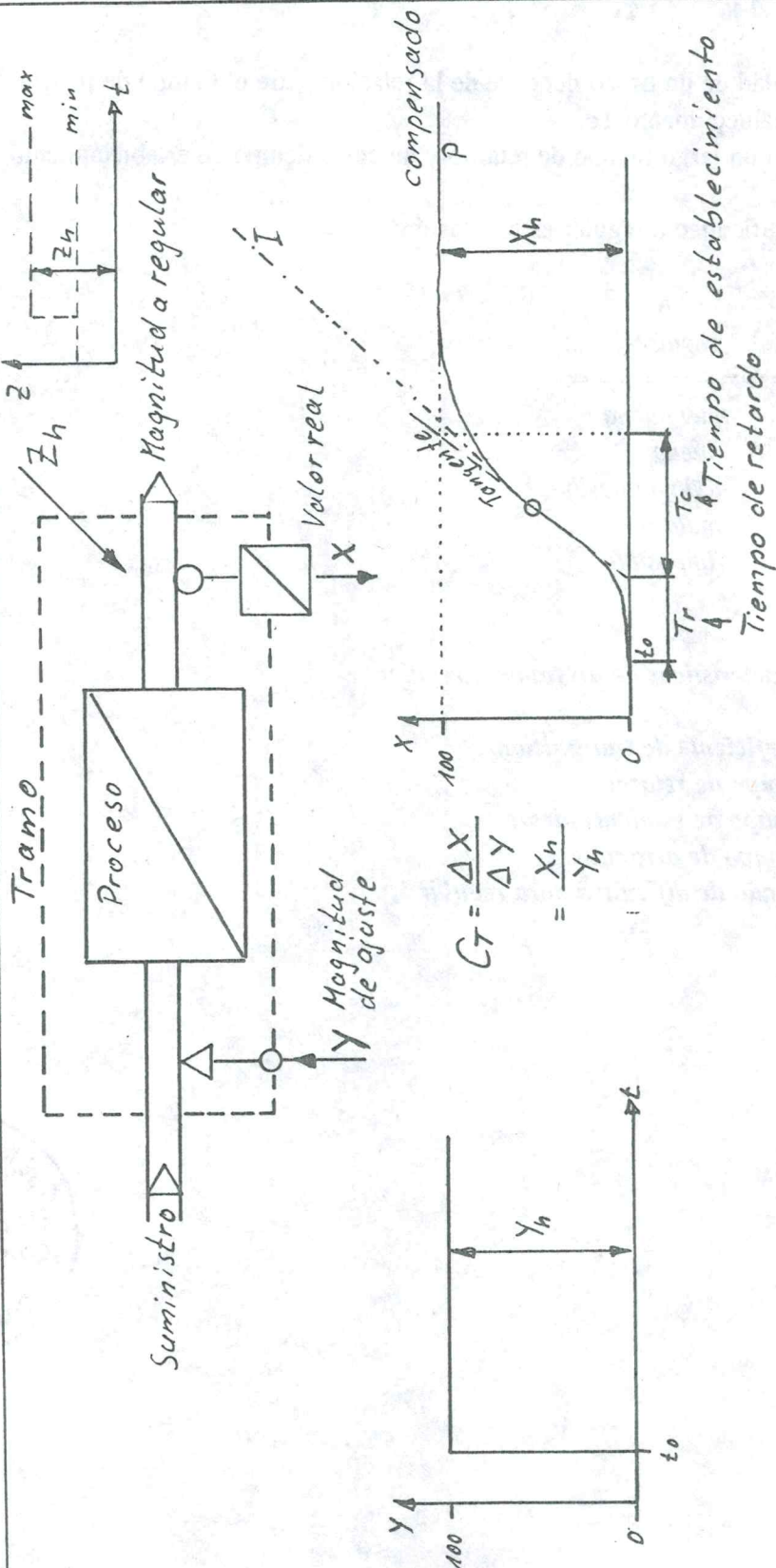
Resumen:

Datos característicos de un tramo a regular

- C_T - *Coficiente de transmisión*
- T_r - *Tiempo de retardo*
- T_c - *Tiempo de establecimiento*
- T_A - *Tiempo de arranque*
- GR - *Grado de dificultad para regular*



Tramo a regular



EL REGULADOR

Conociendo las características del tramo a regular es posible elegir el dispositivo de regulación más adecuado.

Partes del dispositivo de regulación son:

- el elemento de ajuste para el valor de referencia
- el comparador
- el regulador

Con el dispositivo de ajuste se varía el valor de referencia que manda al regulador - se ajusta el valor deseado de la magnitud a regular en el proceso.

Dos magnitudes llegan al comparador: la magnitud a regular y la magnitud de referencia. La diferencia

- el error de regulación (e) -

que forma el comparador entre ambos es el error de regulación. Según esta diferencia entre el valor de referencia y la magnitud a regular debe actuar el regulador.

$$e = - (X - W) = W - X$$

↑
acción inversa

El regulador recibe la magnitud a regular X como una señal retroalimentada desde la salida del tramo a regular. El regulador entonces debe accionar hacia el tramo en forma inversa - retroalimentación negativa (negativ feedback). Este desfase de 180° es producido por el comparador.

La magnitud -error de regulación- es la señal de entrada para el regulador. Según su característica envía su señal de salida - la magnitud de ajuste Y - que interviene en el proceso.

Según su manera de actuar se diferencian dos clases principales:

Regulador

- > discontinuo
 - > dos posiciones
 - > tres posiciones
 - > dos posiciones con retroalimentación
- > continuo
 - > tipo P
 - > tipo PI
 - > tipo PD
 - > tipo PID

El regulador discontinuo varía la magnitud de ajuste en forma abrupta
 - encender / apagar -
 cuando el error de regulación sobrepasa un cierto nivel

Un regulador continuo varía con cualquier valor la magnitud de ajuste dentro de su margen Y_h .

Regulador continuo

Regulador tipo - P -

Un regulador tipo P reacciona sobre un salto de la magnitud de entrada (e) con un salto sin retardo. El valor de la magnitud de salida es **proporcional** a la magnitud de entrada:

La ganancia o coeficiente de transmisión C_{PR} del regulador P es su dato más importante.

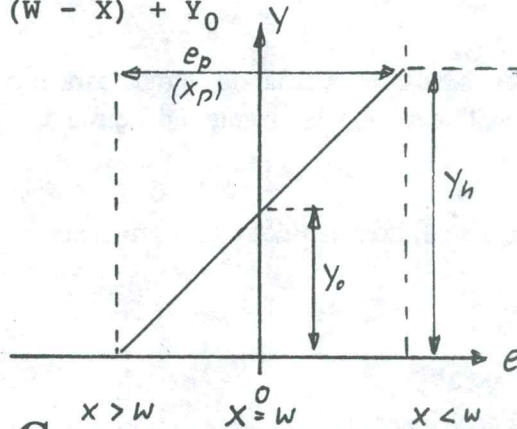
$$C_{PR} = \frac{Y}{e}$$

La magnitud de ajuste Y - la señal de salida - corresponde a la formula:

$$Y_P = C_{PR} * e + Y_0$$

Y_0 = Punto de trabajo del dispositivo de ajuste

$$Y = C_{PR} * (W - X) + Y_0$$



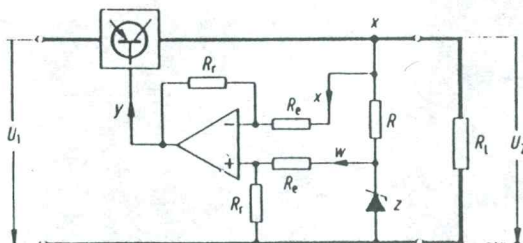
CURVA CARACTERISTICA DE REGULADOR P

La relación proporcional de la señal de salida (Y) con el error de regulación (e) no llega al infinito, el margen de ajuste es limitado con Y_h , cuando sobrepasa la señal de entrada el margen de proporcionalidad e_p o sea X_p se llega al nivel de saturación del regulador.

$$C_P = \frac{Y_h}{e_p} = \frac{Y_h}{X_p}$$

Cuánto mayor sea el margen e_P o X_P menor será la ganancia del regulador P. En lugar de indicar el coeficiente de transmisión también es posible mencionar el margen de proporcionalidad de la magnitud a regular.

EJEMPLO DE REGULADOR P - REGULACION DE VOLTAJE



En el momento en que el regulador P actúa sobre un tramo hay que suministrar la energía. Con $X = W$ el error de regulación es 0 y la magnitud de ajuste también. No hay suministro de energía - el proceso no puede mantenerse. Solo con una **desviación remanente** de regulación se logra un equilibrio en el sistema.

Cuánto mayor sea la magnitud perturbadora, mayor será la desviación remanente de regulación. El regulador P no logra ajustar la magnitud a regular hacia el valor de referencia.

Aumentando la ganancia del regulador P se disminuye la desviación remanente pero el sistema se puede desestabilizar y comienza a oscilar.

Resumen:

Regulador - P -

C_P coeficiente de transmisión

X_P Margen de proporcionalidad

180° de desfase

Regulador P es un regulador rápido pero su desventaja es la desviación remanente de regulación

Regulador tipo - I -

El regulador tipo integral reacciona sobre un salto de la magnitud de entrada con una aceleración constante de la magnitud de salida. La velocidad de cambio de la magnitud de ajuste es proporcional al salto de la entrada (e).

$$C_{IR} = \frac{v_Y}{\hat{e}} \quad [1/s] \quad v_Y = \frac{\Delta Y}{\Delta t}$$

$$C_{IR} = \frac{\Delta Y}{\Delta t e}$$

La magnitud de ajuste se calcula:

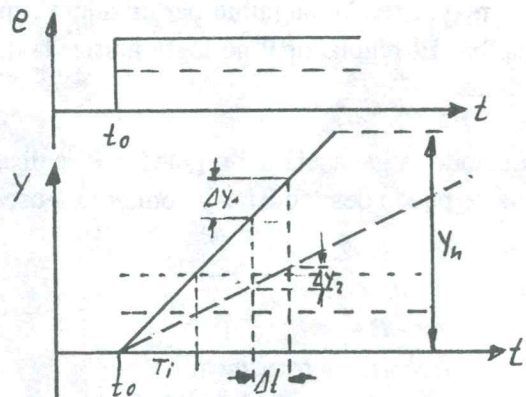
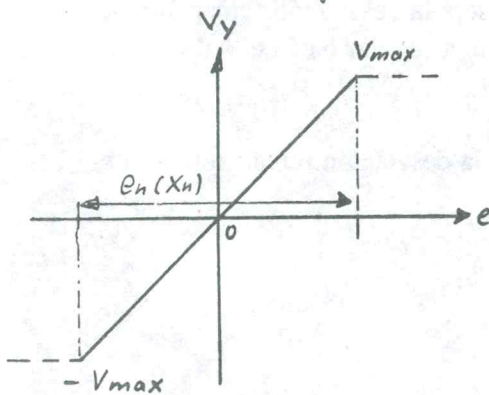
$$v_Y = C_{IR} * \hat{e}$$

$$\Delta Y_I = C_{IR} * \hat{e} * \Delta t$$

Siempre que haya una diferencia entre X y W el regulador I actúa sobre la magnitud de ajuste, recién con e = 0 hay estabilidad.

Eso significa que el regulador logra llegar justo al valor de referencia pero se demora.

Velocidad de ajuste



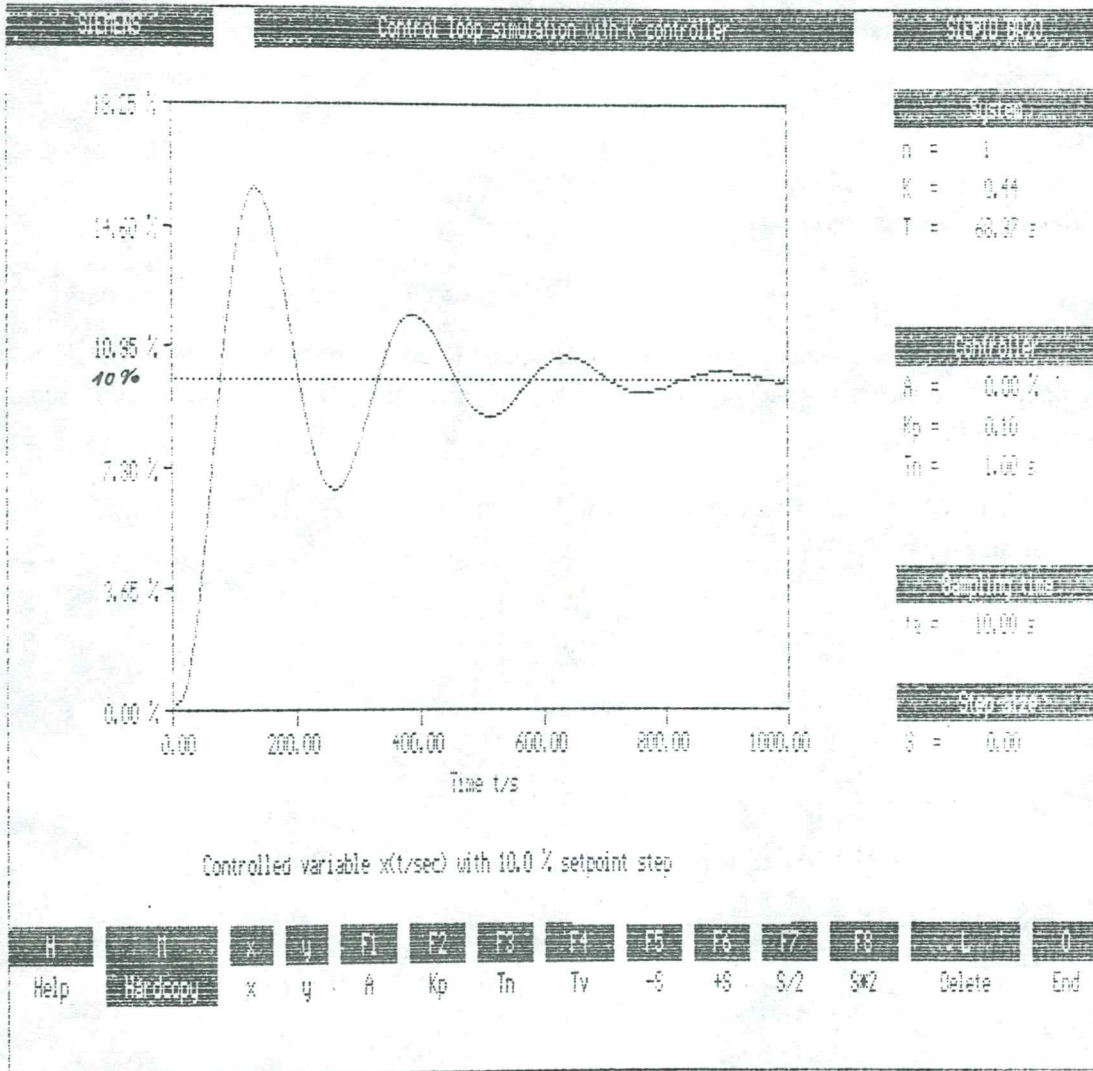
CURVA CARACTERISTICA DEL REGULADOR I

Otro dato característico puede ser el tiempo de integración.

Es el tiempo en que corre la magnitud de ajuste por el margen máximo Y_h con la más alta velocidad de cambio que produce el salto con X_h .

$$T_I = \frac{Y_h}{C_{IR} * X_h} \quad \text{con } Y_h = X_h \quad T_I = 1/C_{IR}$$

El comportamiento con señales de frecuencias diferentes muestra el diagrama de BODE tal como se ha visto con los elementos de transmisión - una recta de la relación de amplitud con una reducción de 20dB/Dec con la única diferencia que al desfase se le adicionan los 180° del comparador, en total 270° o +90° por adelantado.



Actuacion regulador I con 10% (W)

Resumen:

Regulador tipo - I -

C_{IR} constante de integración

$T_I = 1/C_{IR}$ tiempo de de integración

- 20 dB/Dec

+ 90° desfase

Un regulador I actúa lentamente pero logra llegar al valor de referencia con precisión.

Regulador tipo - D -

Una variación en la entrada produce en un regulador D una magnitud de salida. Un regulador D no puede lograr una regulación porque en un momento de estabilidad la señal de salida es 0.

Un regulador D sólo tiene sentido cuando se le adiciona a otro regulador lento para acelerar su efecto.

$$C_{DR} = \frac{Y}{v_X}$$

$$v_X = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

$$C_{DR} = \frac{Y * \Delta t}{\Delta X} \quad [s]$$

$$Y_D = C_{DR} * \Delta X / \Delta t$$

$$T_D = \frac{C_{DR} * X_h}{Y_h} \quad \text{Tiempo de diferenciación}$$

{ $X_h = Y_h - T_D = C_{DR}$ }

El comportamiento con señales de frecuencias diferentes nos da el diagrama de BODE - una recta de la relación de amplitud con una ampliación de 20dB/Dec y con el desfase de -180° del comparador más los +90° del diferenciador, en total -90° atraso.

Resumen:

Regulador tipo - D -

C_{DR} coeficiente diferencial

+ 20 dB/Dec

- 90° desfase

Sólo no logra una regulación, sirve como componente para acelerar la acción de otros.

Combinaciones de los tipos básicos

Regulador tipo -PI-

El regulador tipo P es veloz pero tiene una desviación remanente y el regulador tipo I es preciso, pero lento.

La combinación de ambos podría tener como efecto la obtención de un regulador veloz y preciso.

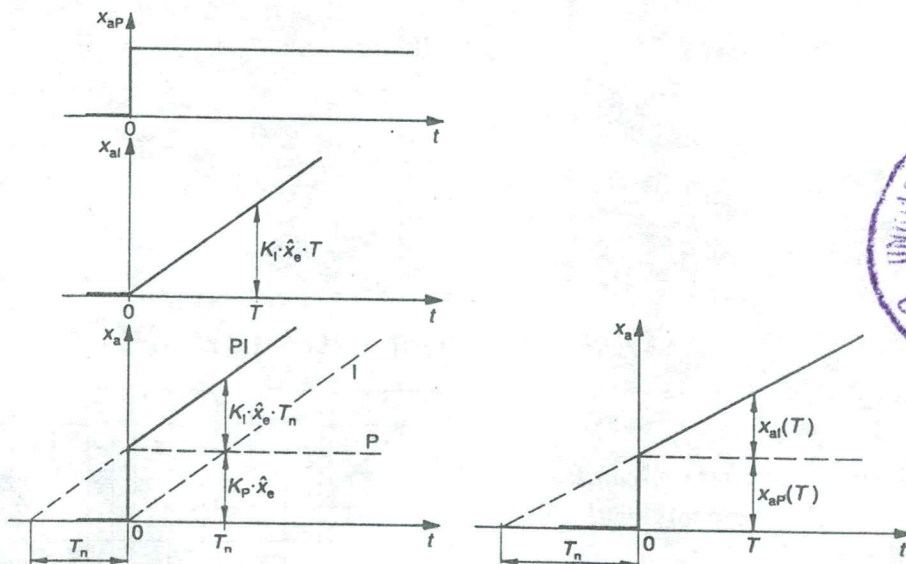
Un regulador PI se considera principalmente como regulador P con un efecto integral adicional.

La unión se obtiene por una conexión en paralelo, la curva de respuesta sobre un salto de la magnitud de entrada (e) es la suma del elemento P y I.

$$Y_{PI} = Y_P + Y_I$$

$$Y_P = C_{PR} * e + Y_0$$

$$\Delta Y_I = C_{IR} * e * t$$



CURVAS DE RESPUESTAS P Y I

$$Y_{PI} = [C_{PR} * e + Y_0] + [C_{IR} * e * \Delta t]$$

$$= Y_0 + e [C_{PR} + (C_{IR} * \Delta t)]$$

$$Y_{PI} = Y_0 + e * C_{PR} [1 + \left(\frac{C_{IR}}{C_{PR}} * \Delta t\right)]$$

con $\frac{C_{IR}}{C_{PR}} * \Delta t = 1 \quad \Delta t = T_N = \frac{C_{PR}}{C_{IR}}$

$T_N = \Rightarrow$ tiempo de inercia

El tiempo de reajuste T_N necesita el regulador I para obtener la misma variación de Y que desde el inicio tiene el regulador P. Esta relación es una constante.

$$Y_{PI} = Y_0 + e * C_{PR} [1 + \Delta t / T_N]]$$

Analizando este conjunto con señales senoidales se obtiene el diagrama BODE. La función de transmisión es la adición del elemento P y del elemento I.

$$F_{PIR} = F_{PR} + F_{IR} = C_{PR} - j C_I / \omega$$

$$A_{PIR} = 20 \lg [C_{PR} * \sqrt{1 + (1/\omega T_N)^2}] \quad \omega_E = 1/T_N$$

Analizando esta relación de amplitud se ve que con bajas frecuencias se obtiene una recta con el coeficiente de -20dB por década.

En caso de altas frecuencias la curva corresponde al comportamiento P con $A = 20 \lg C_{PR}$.

DIAGRAMA BODE - ELEMENTO PI-

Resumen:

Elemento - PI -

T_N Tiempo de inercia o reajuste

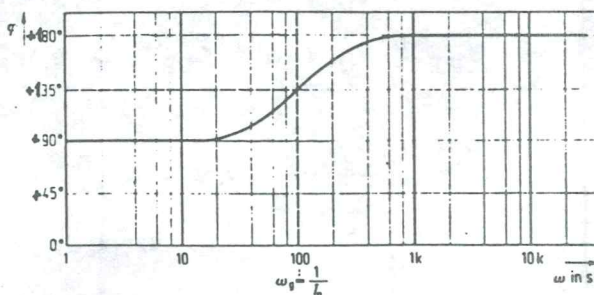
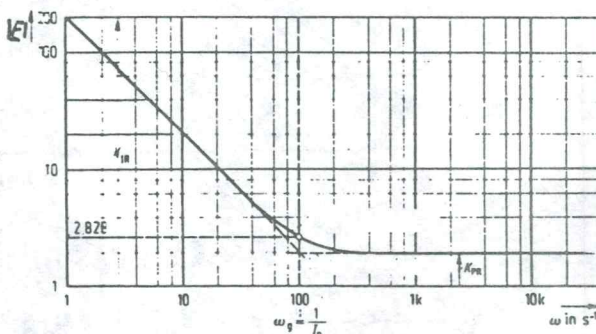
C_{PR} Coeficiente proporcional

-20 dB/Dec

+90° ... +180°

$\omega_E = 1/T_N$

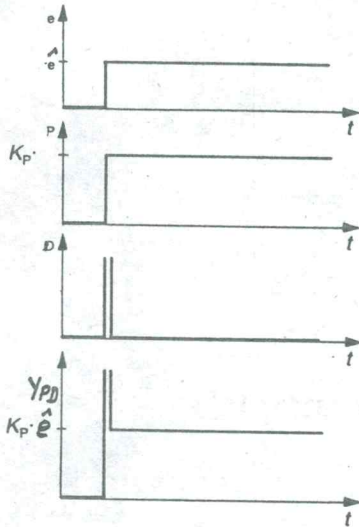
Regulador de precisión



Regulador tipo - PD -

Ambos reguladores P y D son reguladores deficientes porque no logran ajustar la magnitud a regular al valor de referencia, tampoco en conjunto.

Para investigar el comportamiento dinámico no conviene aplicar una señal de salto con la magnitud de entrada. Mejor es una señal con una subida constante. Entonces la diferenciación por el regulador D da una señal con valor constante y el regulador P tiene como señal de salida una recta con un coeficiente constante.



$$Y_{PDR} = Y_P + Y_D$$

$$Y_D = C_{DR} * \Delta e / \Delta t$$

$$Y_P = C_{PR} * e + Y_0$$

$$Y_{PDR} = [C_{PR} * e + Y_0] + [C_{DR} * \Delta e / \Delta t]$$

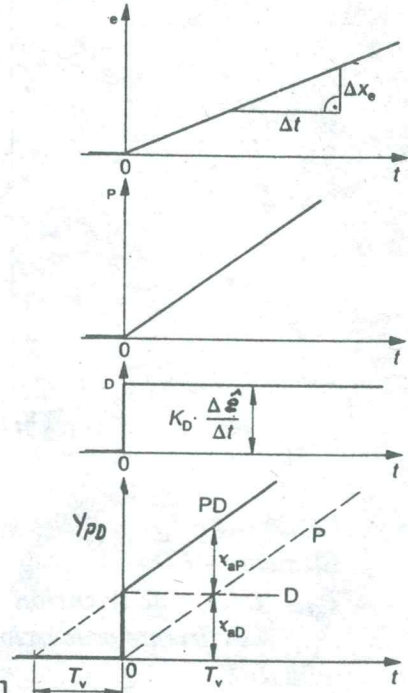
$$= Y_0 + C_{PR} * e \left[1 + \frac{C_{DR}}{C_{PR} * \Delta t} \right]$$

con

$$\frac{C_{DR}}{C_{PR} * \Delta t} = 1 \implies \Delta t = T_V = \frac{C_{DR}}{C_{PR}}$$

$T_V =$ Tiempo de retención (Acción derivativa)

$$Y_{PDR} = Y_0 + C_{PR} * e [1 + T_V / \Delta t]$$



El tiempo T_V indica cuánto tiempo necesita la magnitud de salida del regulador P para alcanzar el mismo valor que por la diferenciación tiene el elemento D. Este dato indica entonces el adelanto de la señal D en relación a la señal P. Su valor es una constante y depende sólo de la relación entre el coeficiente C_{DR} y C_{PR} .

Para señales senoidales vale la función de transmisión:

$$E_{PDR} = E_{PR} + E_{DR} = C_{PR} + j C_D * w$$

$$A = 20 \lg [C_{PR} * \sqrt{1 + (T_V * w)^2}]$$

Analizando esta relación de amplitud se ve que con bajas frecuencias ($f = 0$) la curva corresponde al comportamiento P con $A = 20 \lg C_{PR}$.
 En caso de altas frecuencias se obtiene una recta con el coeficiente de $+20\text{dB}$ por década.
 Ambas líneas se cruzan en el punto con la frecuencia w_E .

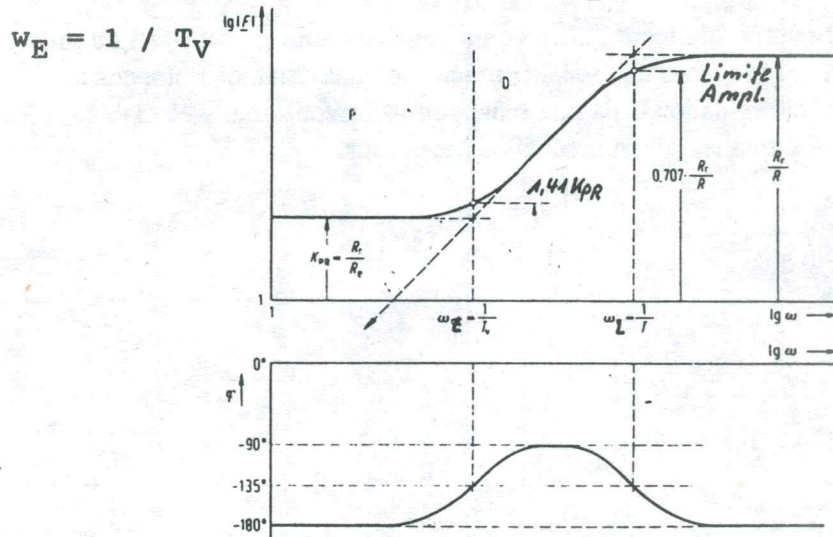


DIAGRAMA BODE DEL REGULADOR PD

Resumen:

Elemento - PD -

T_V Tiempo de retención

C_{PR} Coeficiente proporcional

$+20 \text{ dB/Dec}$

$-180^\circ \dots -90^\circ$

$w_E = 1/T_V$

Regulador sin aplicación por deficiencia en mantener el valor de referencia.

(Sólo conviene en tramos del tipo P-T2 para lograr una estabilidad en el sistema)

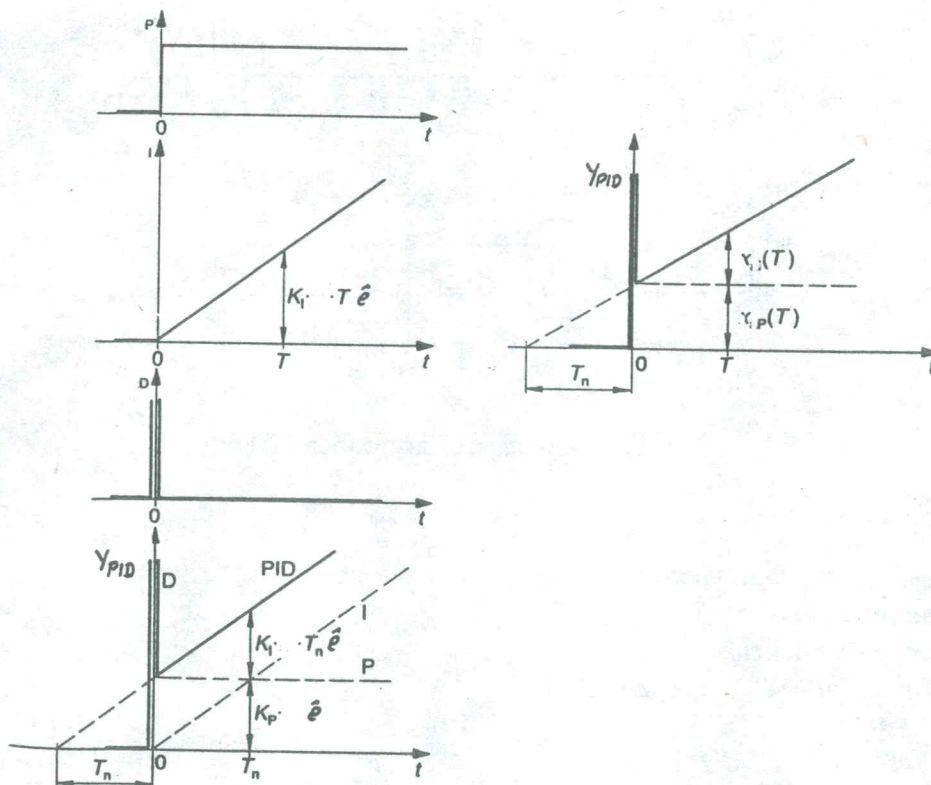
Regulador tipo PID

El regulador PI logra una regulación con precisión pero a veces no suficientemente veloz.
 La agregación del elemento D puede acelerar la acción de regulación.

El regulador PID dispone ahora de tres parámetros que interfluyen la señal de salida:

- coeficiente de ganancia C_{PR}
- Tiempo de inercia T_N
- Tiempo de retención T_V

$$Y_{PID} = Y_0 + C_{PR} [\hat{e} + \hat{e} * \Delta t / T_N + e * T_V / \Delta t]$$



CURVA DE RESPUESTA DEL REGULADOR PID

Para señales senoidales la función de transmisión es la siguiente:

$$E_{PDIR} = E_{PR} + E_{IR} + E_{DR} = C_{PR} - j \frac{1}{C_I w} + j C_D w$$

$$A = 20 \lg [C_{PR} * \sqrt{1 + (T_V * w - 1/T_N w)^2}]$$

El diagrama muestra el comportamiento. Con bajas frecuencias domina el componente integral (-20dB/Dec.). Con frecuencias medianas se logra una relación de amplitud constante por el efecto P y con mayores frecuencias interviene el comportamiento diferencial.

El diagrama de desfase del regulador muestra una amplia variación desde +90° a 180° por el centro hacia +270° (o -90°) al final.

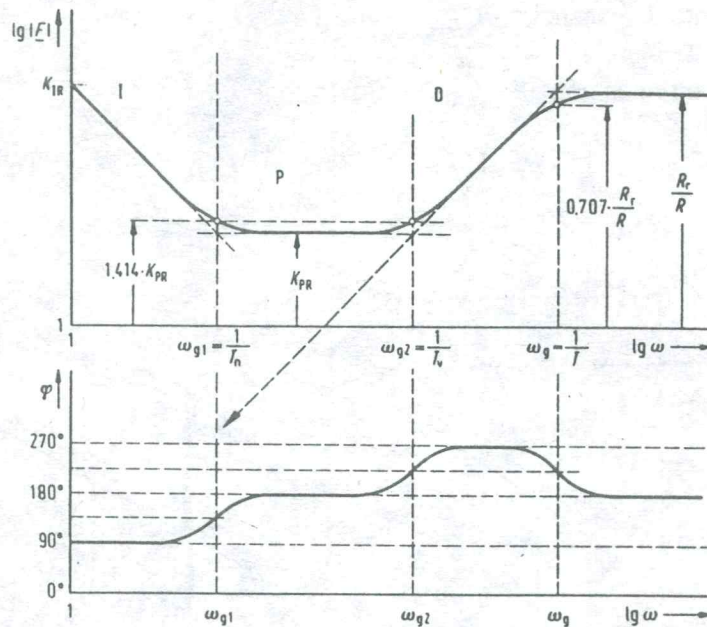


DIAGRAMA BODE DE UN REGULADOR PID REAL

Resumen:

Elemento - PID -

C_{PR} Coeficiente proporcional

T_N Tiempo de inercia

T_V Tiempo de retención

-20 dB/Dec ... 20 lg C_P ... + 20 dB/Dec

+90° ... +180° ... +270°

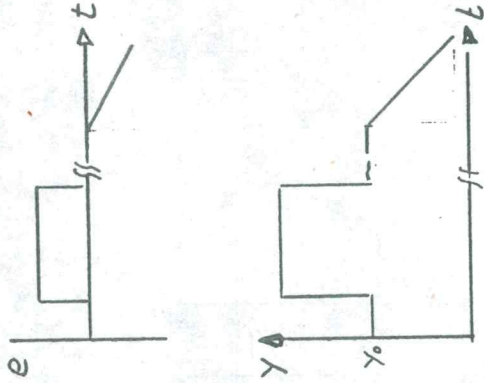
$w_{E1} = 1/T_N$ $w_{E2} = 1/T_V$

Regulador de precisión con aplicación universal, pero es necesario ajustar los tres parámetros con cuidado.

CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Regulador proporcional

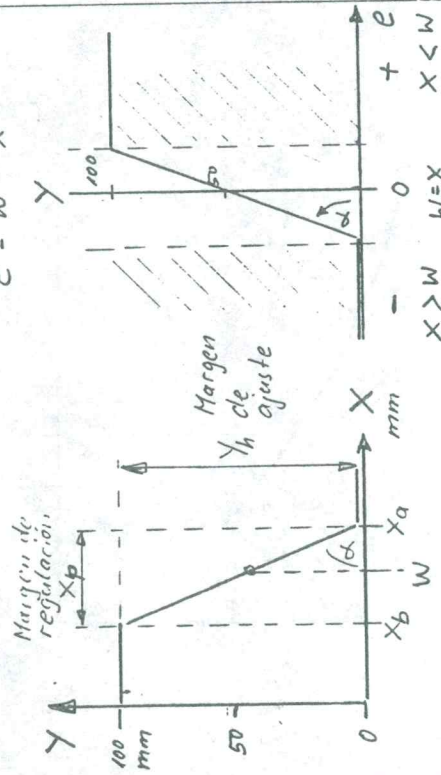
Curva de respuesta



$$Y = K_{RP} \cdot e + Y_0$$

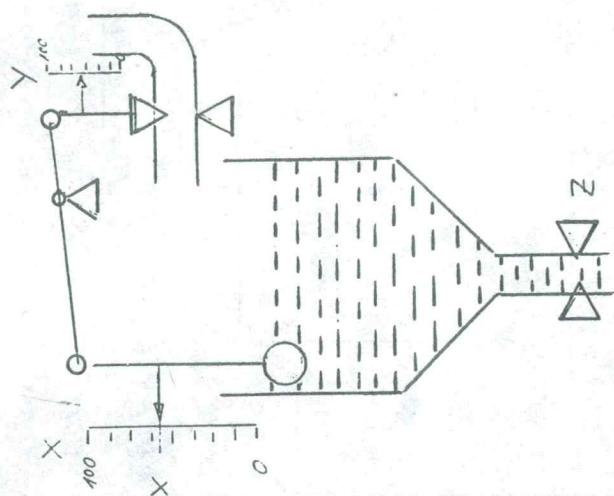


Curva característica



Coeficiente (ganancia) $K_{RP} = \frac{\Delta Y}{\Delta e} = \frac{Y_h}{X_p}$
 del regulador

La magnitud de ajuste es $K_{RP} \cdot X_p$
 proporcional al valor de error
 de regulación

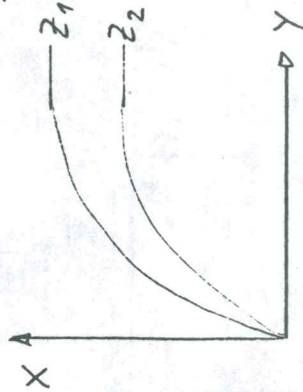
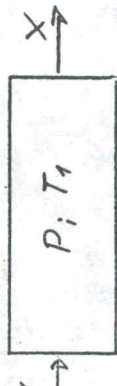


Ejemplo de regulación:
 Nivel de relleno

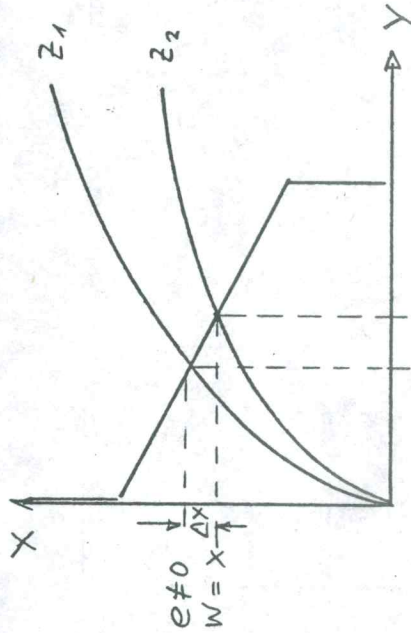
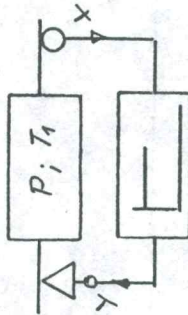
CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Accion de conjunto - Tramo de regulacion y regulador P

Tramo de regulacion

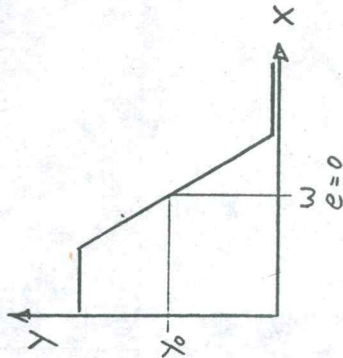


¡Importante! P no logra con la presencia de una perturbación obtener el valor nominal.



$\Delta X \neq$ Desviación remanente de regulación $\rightarrow e \neq 0$

Regulador P



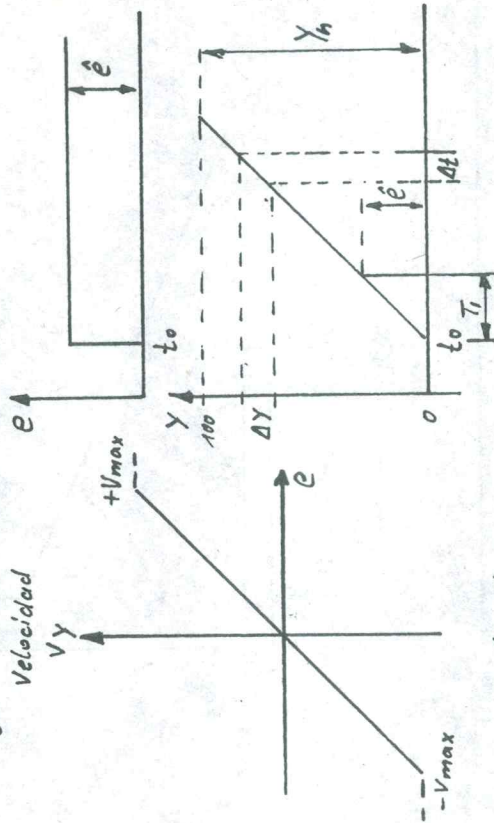
Mayor la perturbación mayor es la desviación remanente

CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Regulador integral (I)

Problema Regulador P → desviación remanente

→ Regulador I actúa hasta $e = 0$!!

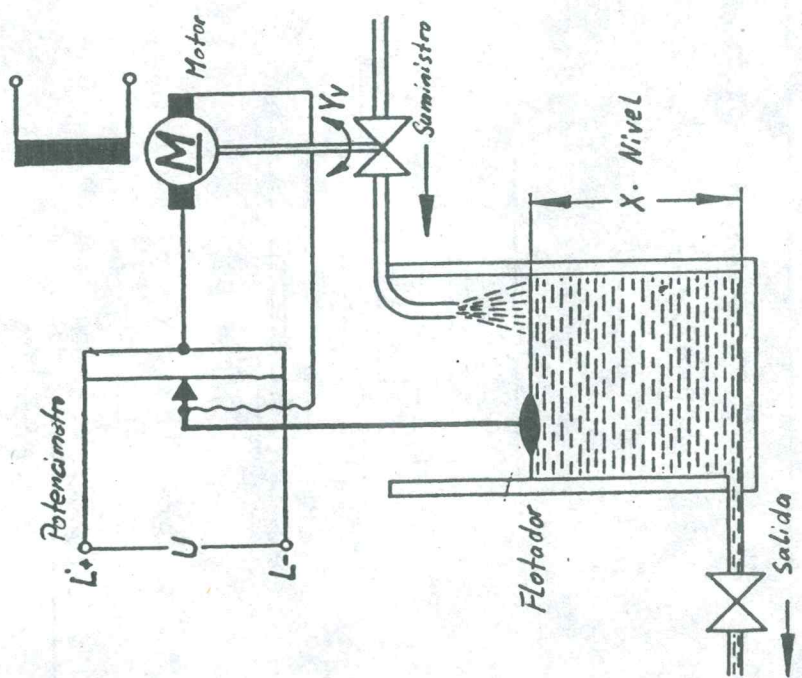


$$\Delta Y = V_y \cdot \Delta t$$

$$\Delta Y = \frac{1}{T_I} \cdot \hat{e} \cdot \Delta t$$

$$V_y = \frac{1}{T_I} \cdot \hat{e}$$

$$C_I = \frac{1}{T_I} = \frac{\Delta Y}{\Delta t \cdot \hat{e}}$$



CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

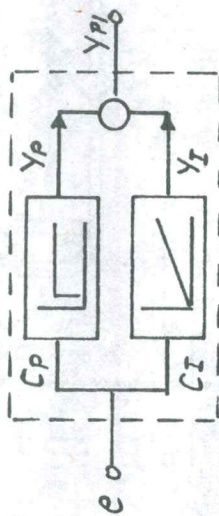
Regulador PI

Desventaja P → desviación remanente

I → lento

Ventaja: P → rápido

I → preciso



PI - Regulador

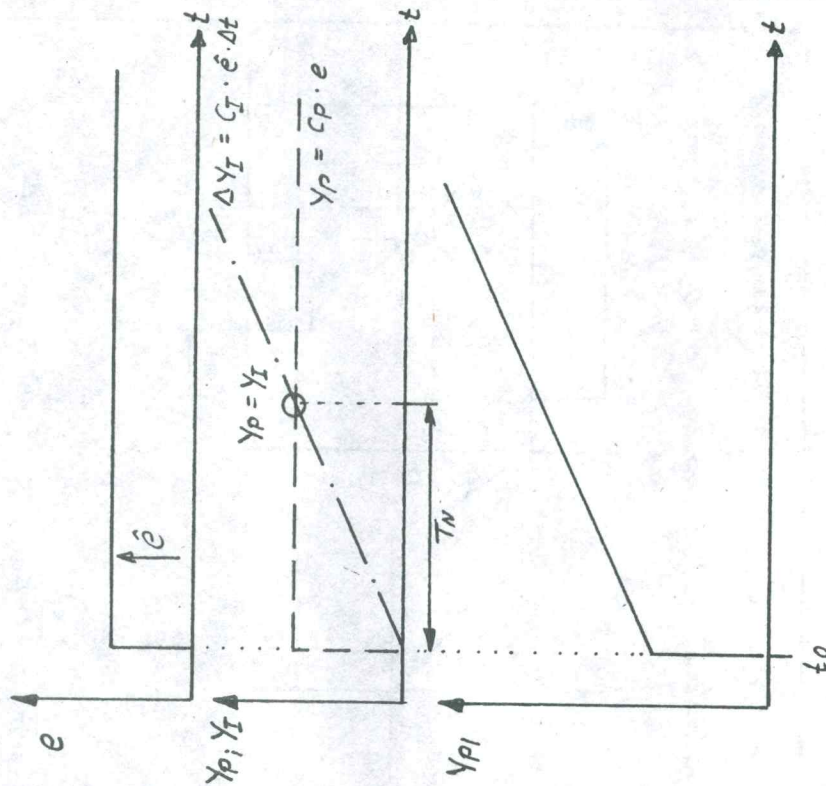
→ Dos Parámetros C_p y T_N (tiempo de inercia)

$$T_N = \frac{C_p}{C_I} = T_i \cdot C_p$$

Ajuste depende:

$Y \sim e$ (error)

$\sim t$ (duración)



$$\Delta Y_I = Y_p$$

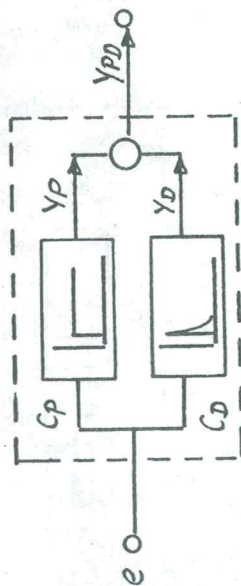
$$C_I \cdot e \cdot \Delta t = C_p \cdot e$$

$$\Delta t = \frac{C_p}{C_I} = T_i \cdot C_p = T_N$$

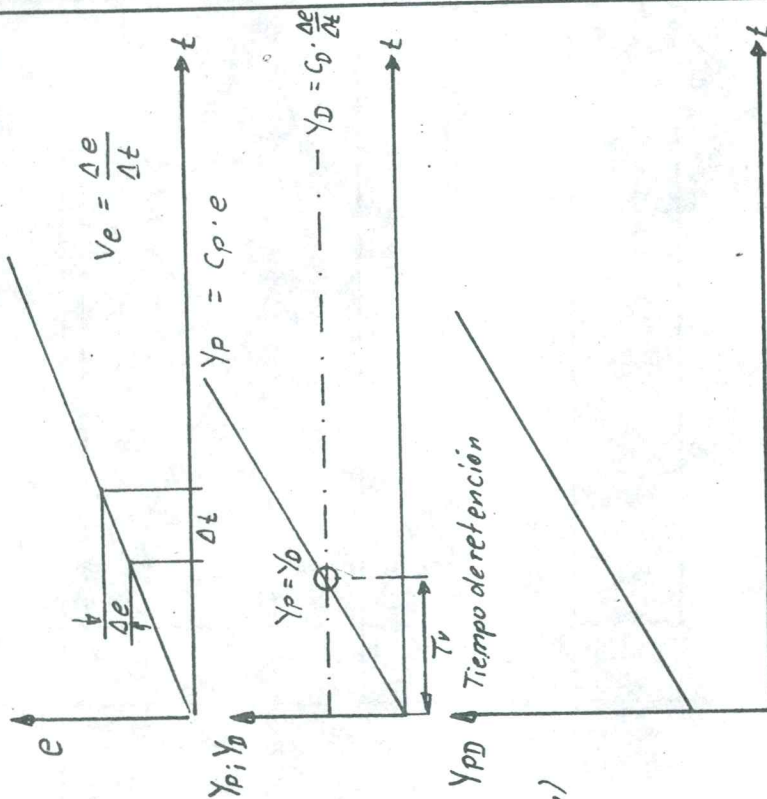
CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Regulador PD

Regulador P → desviación remanente
 Regulador D → actúa solo a cambios
 → PD no logra mantener el valor de referencia



Dos parámetros: C_p y T_v (tiempo de retención)
 $T_v = \frac{C_D}{C_P}$



$$Y_p = Y_D$$

$$C_p \cdot e = C_D \cdot \frac{\Delta e}{\Delta t}$$

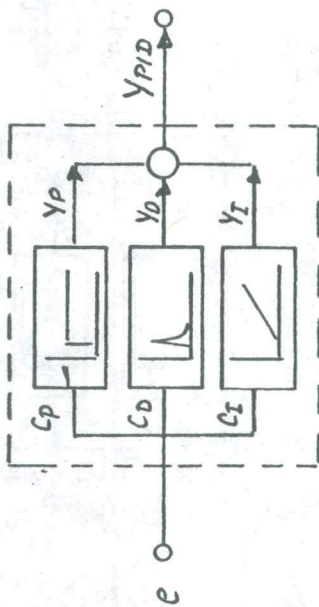
$$\Delta t = \frac{C_D}{C_P} = T_v$$



CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Regulador PID

P → actua inmediato
 D → actua con mas fuerza a cambios
 I → ajuste con precision



Regulador PID

4 Parámetros: C_p - Coeficiente prop.
 T_N - tiempo de inercia
 T_V - tiempo de retención
 V_v - Ganancia de retención

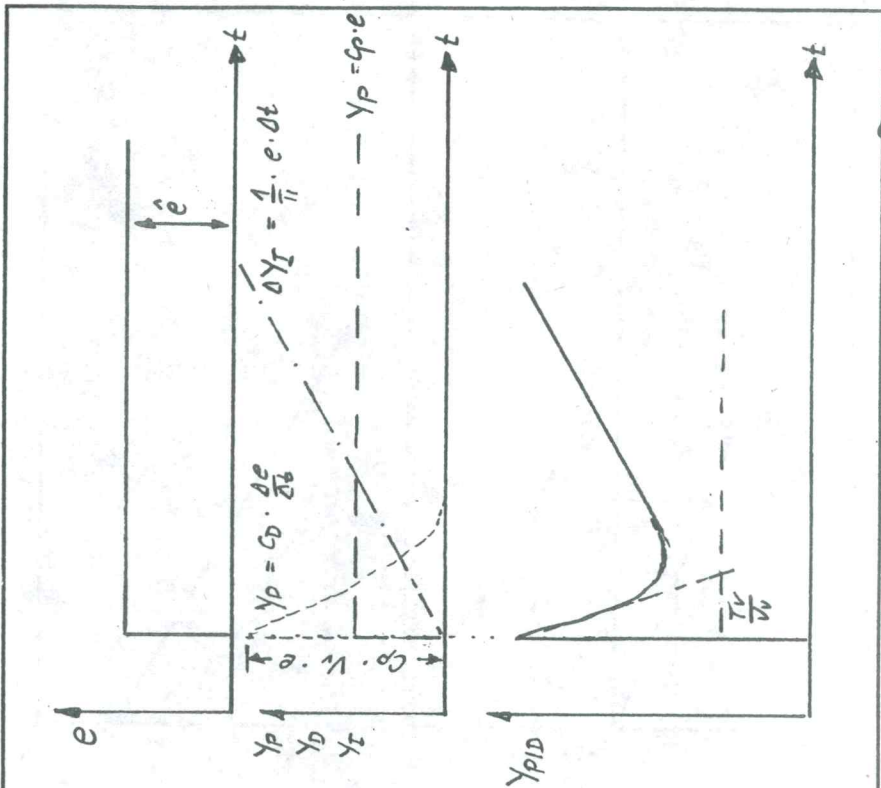
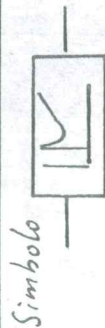


DIAGRAMA DE BODE

En el momento en que se aplica a un tramo de transmisión una señal senoidal con frecuencias diferentes se observa que la señal de salida también es de tipo senoidal pero con un desfase y una amplitud diferente.

La función de Transmisión \underline{F} es entonces una relación vectorial entre la magnitud de salida \underline{X}_S y la magnitud de entrada \underline{X}_E .

$$\underline{F} = \frac{\underline{X}_S}{\underline{X}_E}$$

La función de transmisión \underline{F} indica tanto la amplitud como la fase en relación con frecuencias diferentes.

Para facilitar el manejo matemático es conveniente separar la relación de la amplitud y la fase de ambas magnitudes.

Un vector tiene su parte real y su parte imaginaria.

El valor absoluto de un vector se calcula con:

$$|F| = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$$

El ángulo de desfase se logra calcular con:

$$\tan \alpha = \frac{\text{Im}}{\text{Re}} \quad \text{ó} \quad \alpha = \text{arc tan} \frac{\text{Im}}{\text{Re}}$$

El diagrama de BODE representa la relación del valor absoluto de la función de transmisión $|F|$ en la medida de dB (deci Bel) sobre un eje logarítmico de la frecuencia

$$A(f) = 20 \lg |F| = 20 \lg (\hat{X}_S / \hat{X}_E)$$

$$\alpha = \text{arc tan} (\text{Im}/\text{Re})$$

Para obtener un diagrama de BODE hay que hacer una amplia serie de mediciones.

Por medio de un generador de frecuencia variable (generador de función) se aplica una señal de entrada (X_E) con una amplitud fija.

Con un Osciloscopio (ó Registrador) se observa la magnitud de salida X_S y la magnitud de entrada X_E . Se miden ambas amplitudes y se calcula su relación en dB, luego se mide el grado de desfase entre ambas señales.

Después se instala una señal con otra frecuencia y se repite la medición.
 En tramos de poca inercia, o sea en tramos veloces, la duración de las mediciones es aceptable y necesaria para conocer el comportamiento del tramo con diferentes señales.

En el caso de una gran inercia (minutos) la aplicación de este método representa demasiada demora en el transcurso del trabajo.

Casos elementales representado en el diagrama de BODE

Elemento proporcional (P)

Para derivar el diagrama de BODE se parte de la función de transmisión del elemento P:

$$\underline{F}_P = C_P$$

La función representa sólo una parte real, la parte imaginaria es cero.

La relación de amplitud se muestra (teóricamente) como una constante, que no varía por la frecuencia aplicada. Tampoco hay un desfase entre la magnitud de salida y de entrada por la ausencia de la parte imaginaria.

$$A = 20 \lg C_P \quad [\text{dB}]$$

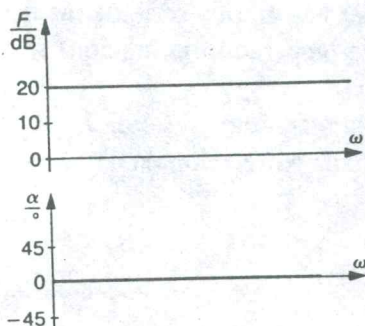
$$\tan \varphi = \text{Im } \underline{F} / \text{Re } \underline{F} = 0$$

$$\varphi = \text{arc tan } 0 = 0^\circ$$

Resumen Elemento P

$$A = 20 \lg C_P \quad [\text{dB}]$$

$$\varphi = 0^\circ$$



Elemento integral (I)

La función de transmisión indica que el vector sólo tiene una parte imaginaria (-j). Entonces hay siempre un desfase de 90° atrasado - sólo la amplitud varía inversamente a la frecuencia.

$$E_I = -j C_I / w$$

$$A = 20 \lg (C_I / w) \quad [\text{dB}]$$

$$\tan \alpha = - \frac{C_I / w}{0} = - \infty$$

$$\alpha = \text{arc tan}(- \infty) = - 90^\circ$$

Se observa que la relación de amplitud sólo depende de la frecuencia aplicada. Para saber en qué forma varía esta relación de amplitud es interesante averiguar cual es la relación con una frecuencia 10 veces mayor, lo que significa una variación por una década (2 veces = 1 octava).

$$A (10w) = 20 \lg (C_I / 10 * w) \quad [\text{dB}]$$

$$\begin{aligned} &= 20 \lg [(C_I / w) * (1/10)] \\ &= 20 \{ \lg (C_I / w) + \lg (1/10) \} \\ &= 20 \lg (C_I / w) + 20 \lg (1/10) \end{aligned}$$

$$A (10w) = A (w) - 20 \text{ dB}$$

Esta derivación indica que un elemento de transmisión del tipo integral tiene un bajada característica y constante de la relación de amplitud de

20 dB por década

Dónde esta línea se cruza con la coordenada de 0 dB ($\hat{X}_S = \hat{X}_E$) depende del coeficiente de integración, o sea el tiempo de integración T_I ($C_I = 1/T_I$).

$$0 = 20 \lg (C_I / w) \quad [\text{dB}]$$

$$1 = C_I / w_E$$

$$C_I = w_E = 1/T_I$$

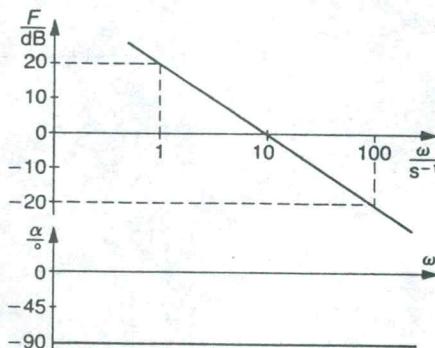
Resumen:

Elemento integral

$A \approx -20 \text{ dB / Dec}$

$\alpha = -90^\circ$

$w_E = C_I$



Elemento diferencial (D)

La función de transmisión de un tramo tipo diferencial corresponde a:

$$E_D = j \omega C_D$$

También es un vector con sólo un componente imaginario, lo que da un constante desfase de 90° adelantado, sólo la relación de la amplitud varía con la frecuencia ω .

$$A = 20 \lg(\omega * C_D) \quad [\text{dB}]$$

$$\tan \alpha = \omega C_D / 0 = \infty$$

$$\alpha = \arctan(\infty) = +90^\circ$$

Aumentando la frecuencia aumenta también la relación de amplitud constantemente por 20 dB por década:

$$A(10\omega) = 20 \lg(10 * \omega * C_D) \quad [\text{dB}]$$

$$= 20 \lg(\omega * C_D) + 20 \lg 10$$

$$A(10\omega) = A(\omega) + 20 \text{ dB}$$

El cruce con la coordenada de 0 dB se encuentra donde la frecuencia esquina ω_E que depende del coeficiente diferencial C_D :

$$A = 0 \text{ dB}$$

$$1 = \omega_E * C_D$$

$$\omega_E = 1/K_D$$

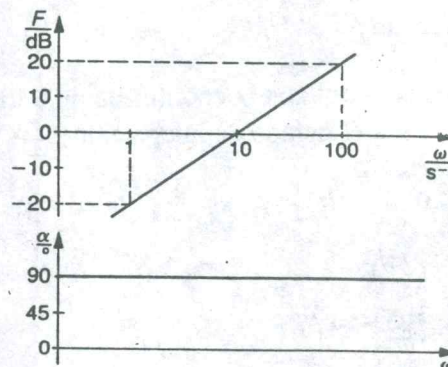
Resumen:

Elemento diferencial - D -

$$A \approx + 20 \text{ dB/Dec}$$

$$\alpha = +90^\circ$$

$$\omega_E = 1/K_D$$



Elemento T1

Un elemento de retardo con un almacén o constante de tiempo T1 corresponde a la función de transmisión:

$$\underline{F} = \frac{1}{1 + j \omega T1} \quad \circ = \frac{1}{1 + (\omega T1)^2} - j \frac{\omega T1}{1 + (\omega T1)^2}$$

$$A = 20 \lg [1/\sqrt{1+(\omega T1)^2}]$$

$$\tan \alpha = - \omega T1$$

$$\alpha = \text{arc tan } (-\omega T1)$$

Para darse cuenta del comportamiento principal es oportuno averiguar el elemento con las frecuencias extremas - frecuencias muy bajas (0)- y frecuencias muy altas (∞).

Relaciones con frecuencias bajas $\omega * T1 \ll 1$:

$$A = 20 \lg 1 \quad \alpha = \text{arc tan } 0$$

$$A = 0 \text{ dB} \quad \alpha = 0^\circ$$

Relaciones con frecuencias altas $\omega * T1 \gg 1$:

$$A(\omega) = 20 \lg (1/\omega T1) \quad \alpha = \text{arc tan } (-\infty)$$

$$A(10\omega) = 20 \lg (1/10 * \omega T1) \quad \alpha = -90^\circ$$

$$A(10\omega) = A(\omega) - 20 \text{ dB}$$

En el caso de que $A = 0 \text{ dB}$ se puede hacer la relación:

$$A = 0 \approx 20 \lg (1/\omega_E T1) \quad \alpha = \text{arc tan } (-\omega_E T1)$$

$$1 = 1/\omega_E T1 \quad \alpha = \text{arc tan } (-1)$$

$$\text{Frecuencia de esquina } \omega_E = 1/T1 \quad \alpha = -45^\circ$$

Tomando en cuenta la relación exacta se muestra la relación de amplitud como

$$A(\omega_E) = 20 \lg [1/\sqrt{1 + (\omega_E T1)^2}]$$

$$A(\omega_E) = 20 \lg [1/\sqrt{1 + 1}] = 20 \lg [1/\sqrt{2}]$$

$$A(\omega_E) = -3 \text{ dB}$$

El ángulo de desfase varía según la frecuencia aplicada entre 0° hasta -90° . Con la frecuencia de esquina se presenta una bajada de la relación de amplitud de 3 dB junto con un desfase de 45° .

**Resumen:
Elemento T1**

$$w_E = 1/T1$$

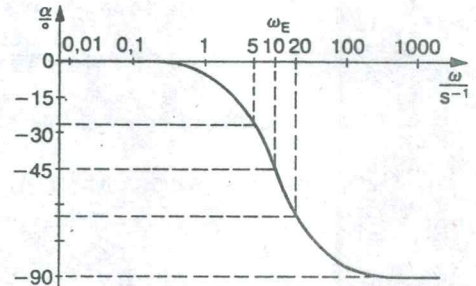
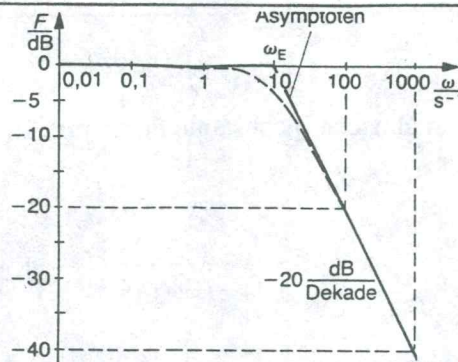
$$A(w_E) = -3 \text{ dB}$$

$$\alpha(w_E) = -45^\circ$$

Con frecuencias mayores de w_E

$$A = -20 \text{ dB/Dec}$$

$$\alpha = -90^\circ$$



Elemento T2

El elemento T2 presenta como dato característico dos constantes de tiempo T1 y T2 - lo que representa dos almacenes de energía.

La función de transmisión corresponde a:

$$F = \frac{1}{1 - (w T2)^2 + j w T1}$$

$$|F| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (w T2)^2]^2 + [w T1]^2}}$$

$$\alpha = - \text{arc tan} \{ w T1 / [1 - (w T2)^2] \}$$

Con muy bajas frecuencias se observa:

$$|F| = 1$$

$$A = 0 \text{ dB}$$

$$\alpha = \text{arc tan} (0)$$

$$\alpha = 0^\circ$$

Con muy altas frecuencias influye mucho en la fórmula de transmisión el factor de la segunda potencia.

$$|F| \approx 1/(w T2)^2$$

$$A \approx 20 \text{ lg} [1/(w T2)^2]$$

$$\alpha = \text{arc tan} (0)$$

$$\alpha = -180^\circ$$

$$A(10w) = 20 \text{ lg} [1/(10 * w T2)^2]$$

$$= 20 \text{ lg} [1/(w T2)^2] - 20 \text{ lg} 100$$

$$A(10w) = 20 \text{ lg} [1/(w T2)^2] - 40 \text{ dB}$$

La recta con el coeficiente de 40 dB/Dec. se cruza con la coordenada a la frecuencia w_E :

$$A(w_E) = 0 \text{ dB}$$

$$1 = 1/(w_E T_2)^2$$

$$w_E = 1/T_2$$

$$\alpha = - \arctan \{ w_E T_1 / [1 - (w_E T_2)] \}$$

$$\alpha = - \arctan [(T_1/T_2)/0]$$

$$\alpha = - \arctan$$

$$\alpha = - 90^\circ$$

La relación de amplitud en caso de la frecuencia de esquina w_E depende del factor de amortiguación D.

$$D = T_1/2 * T_2$$

$$A(w_E) = 20 \lg (T_2/T_1)$$

$$= 20 \lg (1/2D)$$

Resumen:

Elemento T2

$$w_E = 1/T_2$$

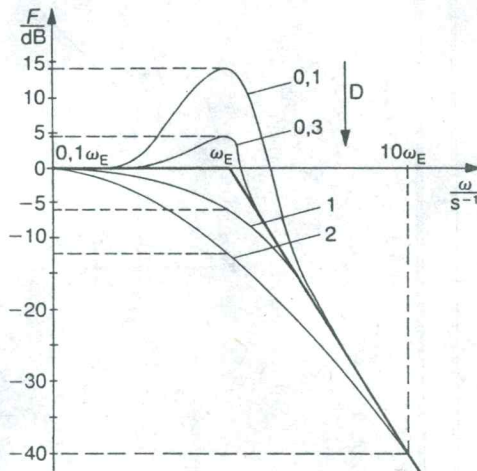
$$A(w_E) = 20 \lg (T_2/T_1)$$

$$\alpha(w_E) = -90^\circ$$

Con frecuencias mayores de w_E

$$A = -40 \text{ dB/Dec}$$

$$\alpha ==> -180^\circ$$



Se nota que con el número de almacénes o sea las constante de tiempo T_n de que dispone un elemento de transmisión aumenta el coeficiente de relación de amplitud A de 20 dB/Dec por cada almacén como también el ángulo de desfase por $\alpha = n * 90^\circ$.

Por ejemplo: Elemento T3 ==> $A = 3 * 20 \text{ dB/Dec} = 60 \text{ dB/dec}$

$$==> \alpha = 3 * 90^\circ = 270^\circ.$$

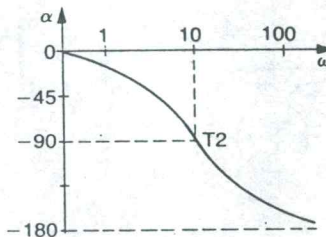
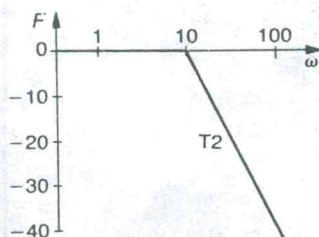
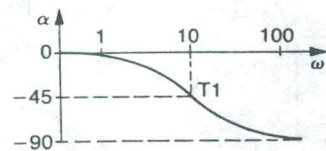
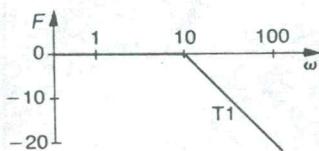
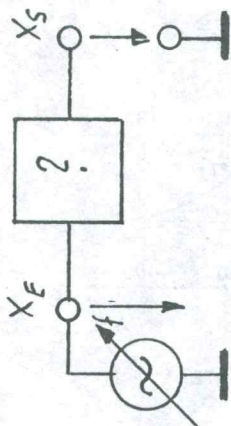
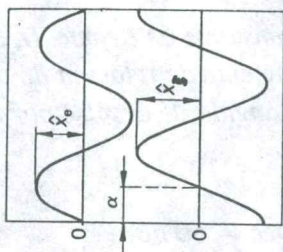
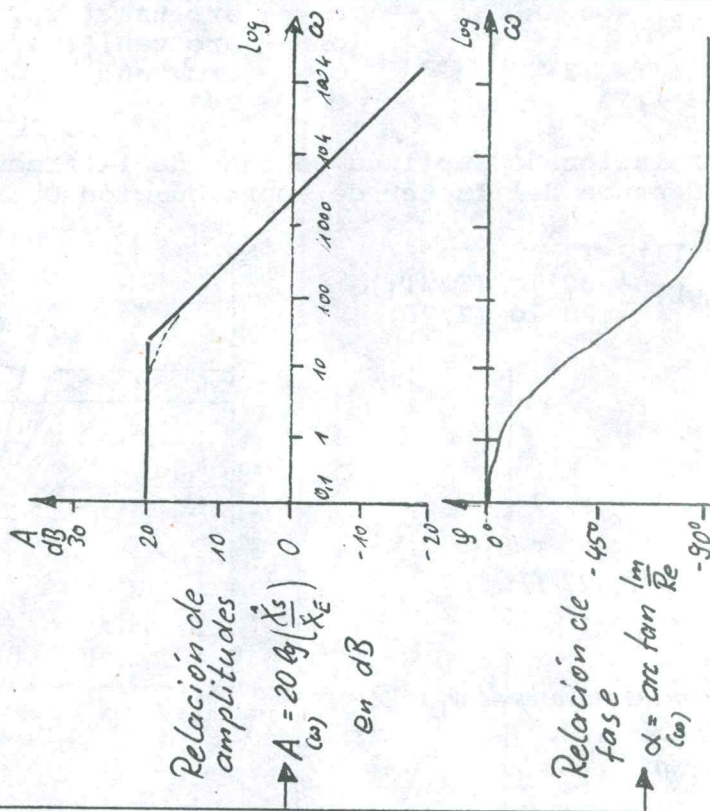


Diagrama de BODE

Diagrama BODE



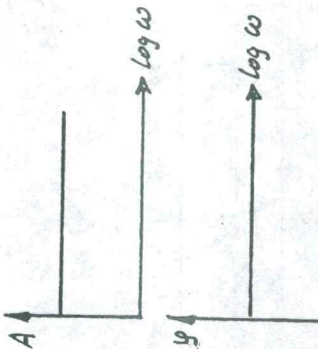
Función de transmisión

$$\underline{F} = \frac{X_s}{X_E} = \text{Re} + j \text{Im} \quad \text{Unidad compleja}$$

$$|F| = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \quad \tan \varphi = \frac{\text{Im}}{\text{Re}}$$

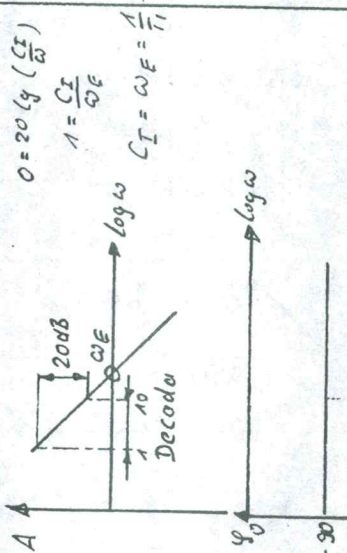
Diagrama de BODE
 - Elementos basicos -

Elemento P
 $F = C_P$
 $A = 20 \lg C_P$ [dB]



$\alpha = \arctan \frac{\text{Im } F}{\text{Re } F} = 0^\circ$

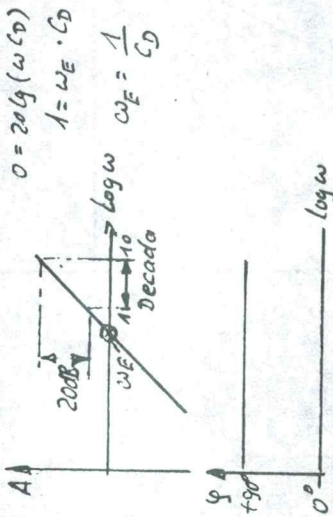
Elemento I
 $F = -j \frac{C_I}{\omega}$
 $A = 20 \lg \left(\frac{C_I}{\omega} \right)$ [dB]
 $A_{(10\omega)} = 20 \lg \left(\frac{C_I}{\omega} \right) + 20 \lg \frac{1}{10}$
 $A_{(10\omega)} = A_\omega - 20 \text{ dB}$



$0 = 20 \lg \left(\frac{C_I}{\omega} \right)$
 $1 = \frac{C_I}{\omega F}$
 $C_I = \omega F = \frac{1}{11}$

$\alpha = \arctan \left[-\frac{C_I/\omega}{0} \right] = -90^\circ$

Elemento D
 $F = j \omega C_D$
 $A = 20 \lg (\omega C_D)$ [dB]
 $A_{(10\omega)} = 20 \lg (\omega C_D) + 20 \lg 10$
 $A_{(10\omega)} = A_\omega + 20 \text{ dB}$



$0 = 20 \lg (\omega C_D)$
 $1 = \omega F \cdot C_D$
 $C_D = \frac{1}{\omega F}$

$\alpha = \arctan \left[\frac{\omega C_D}{0} \right] = +90^\circ$



CONEXION DE ELEMENTOS DE TRANSMISION

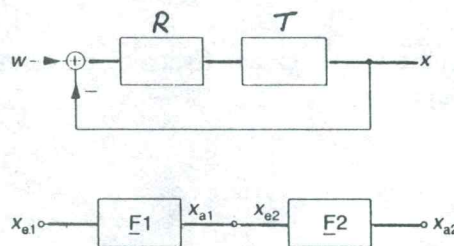
Un circuito de regulación consiste siempre en una combinación de múltiples elementos de transmisión que en su conjunto poseen las características de transmisión.

Los elementos de transmisión pueden combinarse de diferentes modos. La combinación mas sencilla es la conexión en serie y en paralelo. Una combinación de ambas es la conexión mixta.

La conexión en serie

Una conexión en serie existe cuando un elemento actúa sobre un otro.

En el caso de un circuito de regulación se presenta el caso en que el regulador actúa con su magnitud de ajuste Y hacia el tramo de regulación - el caso típico de una conexión en serie.



Cada elemento de transmisión presenta una función de transmisión F_1 y F_2 :

La magnitud de salida del primer elemento X_{S1} es a la vez la magnitud de entrada X_{E2} del siguiente.

$$F_{res} = \frac{X_{S2}}{X_{E1}} = \frac{F_2 * X_{E2}}{X_{E1}} = \frac{F_2 * X_{S1}}{X_{E1}}$$

$$F_{res} = F_1 * F_2$$

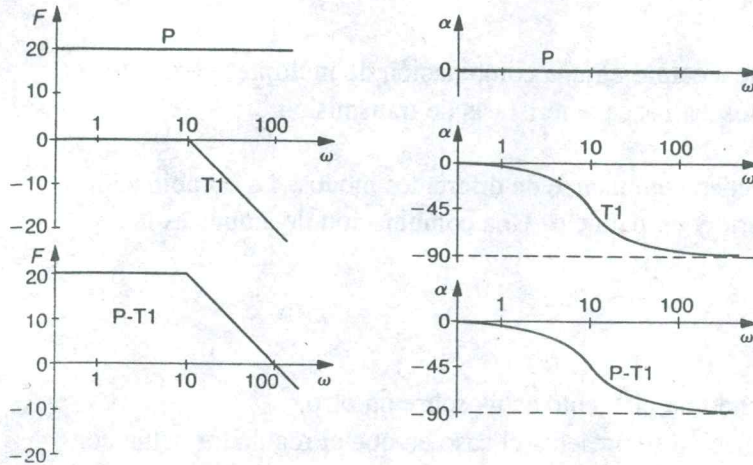
La multiplicación en valores logarítmicos es una simple adición. Eso significa para la representación en el diagrama de BODE que sólo se suman las curvas características de la relación de amplitud y de la fase.

$$A_{res} = 20 \lg[|F_1| * |F_2|]$$

$$A_{res} = A_1 + A_2$$

$$\alpha_{res} = \alpha_1 + \alpha_2$$

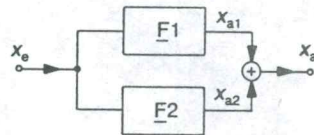
Ejemplo: elemento de transmisión P - T1



Elemento de transmisión P en serie con T1

La conexión en paralelo

En una conexión en paralelo se sobrepone la característica de un elemento sobre el otro. El resultado es la suma de ambos elementos.



El diagrama muestra un punto de adición donde las diferentes magnitudes de salida forman la magnitud resultante.

$$F_{res} = F_1 + F_2$$

Obtener un diagrama de BODE de la conexión en paralelo es más complejo, porque son datos logarítmicos que no se pueden sumar.

Es necesario formar la función de transmisión completa.

Ejemplo: Elemento de transmisión PI

Elemento de transmisión P $E_P = K_P$

Elemento de transmisión I $E_I = -j K_I/w = -j 1/T_I w$

$E_{res} = K_P -j K_I/w$

$|F|_{res} = \sqrt{(K_P)^2 + (K_I/w)^2}$

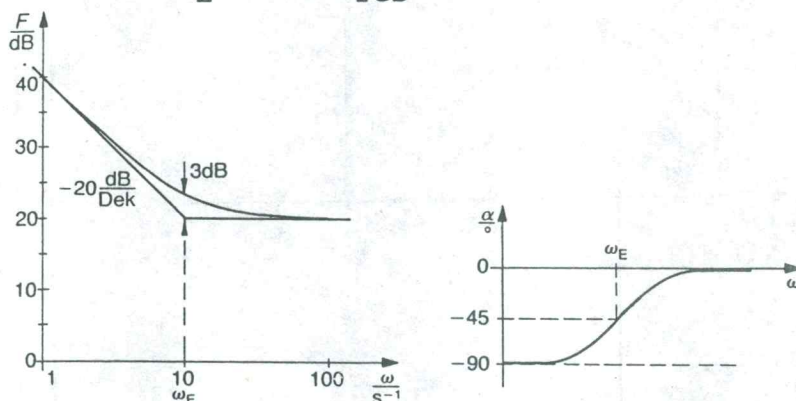
$A_{res} = 20 \lg [\sqrt{(K_P)^2 + (K_I/w)^2}]$

con $w = \infty \implies A_{res} = 20 \lg K_P$

con $w = w_E \implies K_P = K_I/w_E$
 $\implies A_{res}(w_E) = 20 \lg [\sqrt{(K_P)^2 + (K_P)^2}]$
 $= 20 \lg K_P * \sqrt{2} = A_P + 3 \text{ dB}$

$w_E = K_I/K_P = 1/T_I * K_P = 1/T_N$

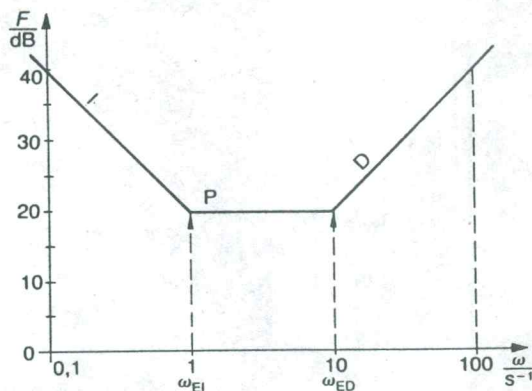
con $w \ll w_E \implies A_{res} \approx -20 \text{ dB/Dec}$



En el caso de una conexión de un elemento de transmisión tipo P y tipo I y tipo D se obtiene un elemento PID.

Su característica en el diagrama de BODE es la siguiente:

$A_{res} = 20 \lg [K_P * \sqrt{1 + (wT_V - 1/T_N w)^2}]$

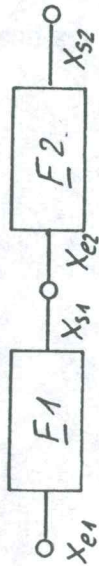


CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Conexión de elementos de transmisión

I

Conexión en serie



$$\underline{F}_{res} = \frac{\underline{X}_{s2}}{\underline{X}_{e1}} = \frac{\underline{F}_2 \cdot \underline{X}_{e2}}{\underline{X}_{e1}} = \frac{\underline{F}_2 \cdot \underline{X}_{s1}}{\underline{X}_{e1}}$$

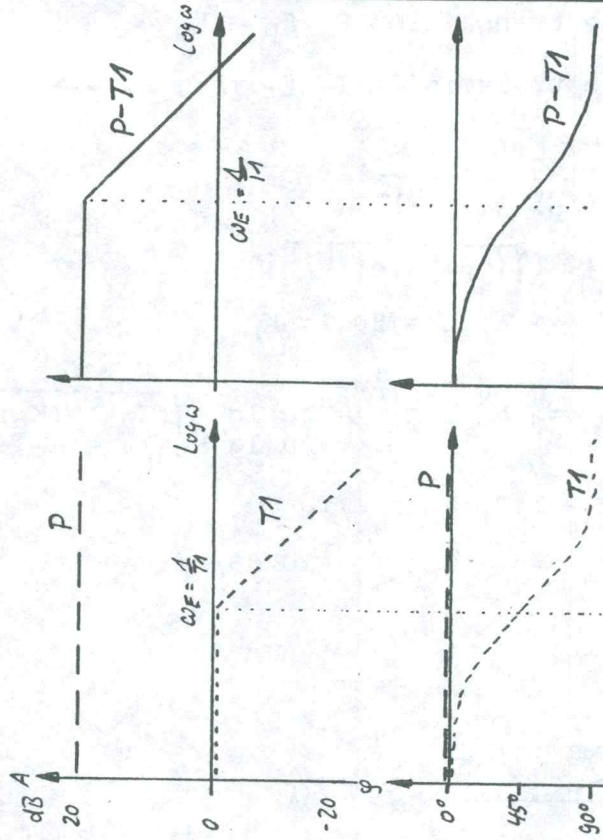
$$\underline{F}_{res} = \underline{F}_1 \cdot \underline{F}_2$$

$$A_{res} = 20 \text{ Lg} [|F_1| \cdot |F_2|]$$

$$A_{res} = A_1 + A_2$$

$$\alpha_{res} = \alpha_1 + \alpha_2$$

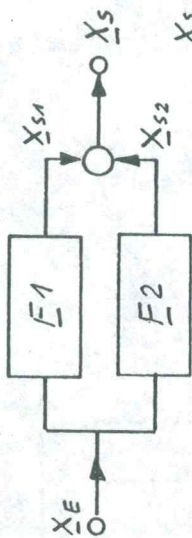
Ejemplo: P-T1



CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Conexión de elementos de transmisión
 II

Conexión en paralelo



$$\underline{F}_{res} = \frac{\underline{X}_S}{\underline{X}_E} = \frac{\underline{X}_{S1} + \underline{X}_{S2}}{\underline{X}_E} = \frac{\underline{X}_{S1}}{\underline{X}_E} + \frac{\underline{X}_{S2}}{\underline{X}_E}$$

$$\underline{F}_{res} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2$$

Ejemplo: PI

$$\left. \begin{aligned} \underline{F}_P &= C_p \\ \underline{F}_I &= -j \frac{1}{T_I \omega} \end{aligned} \right\} \underline{F}_{res} = C_p - j \frac{1}{T_I \omega}$$

$$|\underline{F}_{res}| = \sqrt{(C_p)^2 + \left(\frac{1}{T_I \omega}\right)^2}$$

$$A_{res} = 20 \lg \left[\sqrt{(C_p)^2 + \left(\frac{1}{T_I \omega}\right)^2} \right]$$

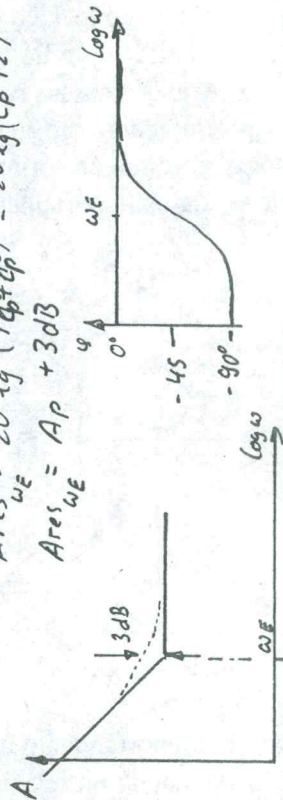
$$\omega \rightarrow \infty \quad A_{res} = 20 \lg [C_p + 0]$$

$$\text{Frecuencia baja} \quad A_{res} = 20 \lg \left(\frac{1}{T_I \omega}\right) \Rightarrow -20 \text{ dB/DEC}$$

$$C_p = \frac{1}{T_I \omega} \rightarrow \omega_E = \frac{1}{C_p T_I}$$

$$A_{res}_{\omega_E} = 20 \lg (\sqrt{C_p^2 + C_p^2}) = 20 \lg (C_p \sqrt{2})$$

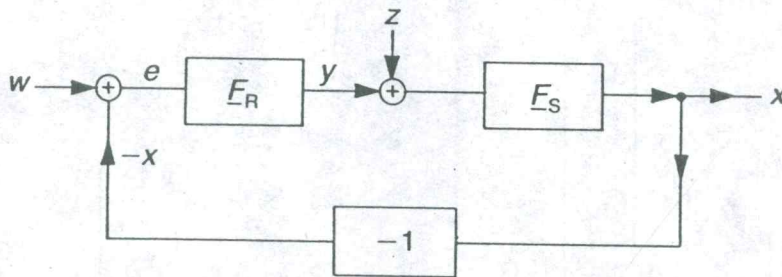
$$A_{res}_{\omega_E} = A_p + 3 \text{ dB}$$



CIRCUITO DE REGULACION

Tarea importante de un tecnico de sistemas de regulaci3n es elegir y adaptar un regulador con sus caracteristicas a un tramo a regular.

El proceso a regular dicta las condiciones de la regulaci3n, sus datos y su comportamiento son fijos y por lo general no se dispone de sus datos en forma matemática. Entonces hay que investigar el tramo en forma empírica - con el osciloscopio o registrador - para poder determinar los datos importantes.



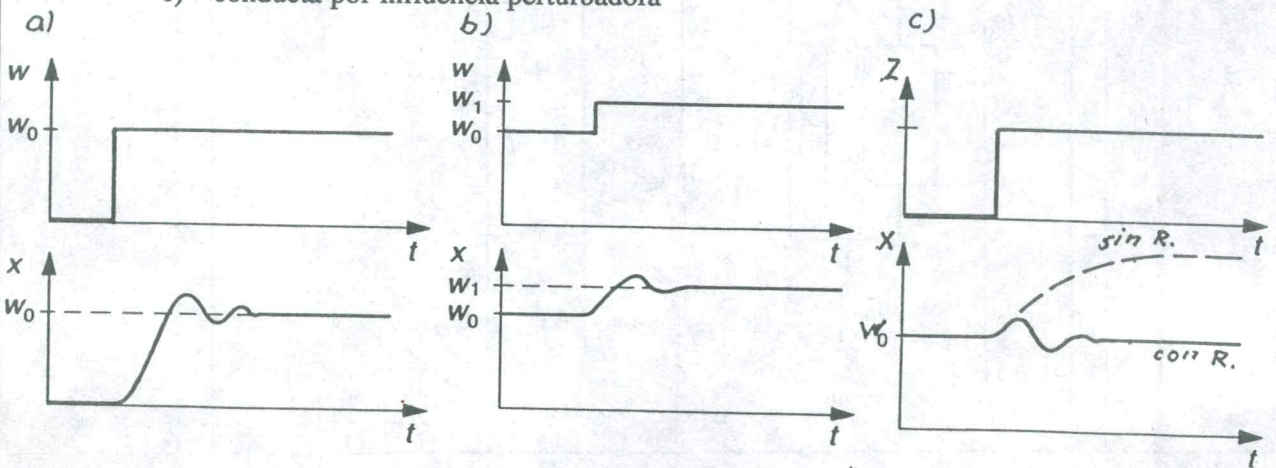
Para juzgar el comportamiento de un circuito de regulaci3n hay que determinar criterios de calidad. Las exigencias en relaci3n con el regulador dependen del caso.

Por ejemplo, en el caso de la regulaci3n de la temperatura en un horno - para alcanzar lo m1s pronto la temperatura deseada se acepta una oscilaci3n de la temperatura por encima del valor fijado.

En el caso de la regulaci3n de la altura de un avi3n en el momento de aterrizar se debe eliminar cualquier exceso por encima del valor fijado.

El dispositivo de regulaci3n tiene que lograr tres tareas principales :

- a) - conducta de arranque
- b) - conducta con la referencia pilotada
- c) - conducta por influencia perturbadora



El método matemático para describir el comportamiento del tramo y del regulador es la función de transmisión de cada uno.

Tramo:

$$X = \underline{F}_T * (Y + Z)$$

$$X = \underline{F}_T * [(\underline{F}_R * (W - X) + Z)]$$

Regulador:

$$Y = \underline{F}_R * e = \underline{F}_R * (W - X)$$

$$X = \frac{\underline{F}_R * \underline{F}_T}{1 + \underline{F}_R * \underline{F}_T} * W + \frac{\underline{F}_T}{1 + \underline{F}_R * \underline{F}_T} * Z$$

conducta
con la referencia
pilotada

conducta por
influencia
perturbadora

La conducta con la referencia pilotada

Para obtener una afirmación sobre la conducta con la referencia pilotada se ignora la influencia perturbadora ($Z = 0$) y se observa la variación de la magnitud a regular (X) con una variación del valor de referencia (W).

$$X = \frac{\underline{F}_R * \underline{F}_T}{1 + \underline{F}_R * \underline{F}_T} * \Delta W$$

La función de transmisión con la referencia pilotada

$$\underline{F}_W = \frac{\Delta X}{\Delta W} = \frac{\underline{F}_R * \underline{F}_T}{1 + \underline{F}_R * \underline{F}_T}$$

La conducta por influencia perturbadora

Para este caso se calcula la variación de la magnitud a regular (X) por un cambio en la magnitud perturbadora (Z) y se mantiene el valor de referencia fijo ($W = 0$).

$$\Delta X = \frac{\underline{F}_T}{1 + \underline{F}_R * \underline{F}_T} * \Delta Z$$

La función de transmisión por influencia perturbadora

$$\underline{F}_Z = \frac{\Delta X}{\Delta Z} = \frac{\underline{F}_T}{1 + \underline{F}_R * \underline{F}_T}$$

La desviación remanente

Con estas relaciones es posible calcular la desviación remanente en un circuito de regulación sin elemento integral en el momento de llegar al equilibrio de sistema ($w = 0$).

Ejemplo: Característica Tramo C_T
 Regulador P C_P

$$e_r = W - X$$

$$e_r = W - \left[\frac{C_P * C_T}{1 + C_P * C_T} * W + \frac{C_T}{1 + C_P * C_T} * Z \right]$$

$$e_r = \frac{1}{1 + C_P * C_T} * W - \frac{C_T}{1 + C_P * C_T} * Z$$

Esta relación muestra que una desviación remanente siempre existe en este circuito de regulación aunque la magnitud perturbadora no intervenga ($Z = 0$).

$$e_r = \frac{1}{1 + C_P * C_T} * W \quad \text{con } Z = 0$$

El factor en esta relación es algo significativo y se llama

factor de regulación $R = \frac{1}{1 + C_P * C_T}$

Cuanto menor es este factor, mas pequeña es la desviación remanente de regulación. En el caso ideal tendría que ser $R = 0$.

Como generalmente no se puede variar el coeficiente del tramo sólo queda la posibilidad de aumentar la ganancia del regulador.

La conducta del circuito con una magnitud perturbadora es diferente.

Sin regulador la variación de la magnitud a regular ΔX se muestra amplificada por el coeficiente C_T del tramo.

$$\Delta X = C_T * \Delta Z \quad \text{sin regulador}$$

con regulador con C_P se reduce la variación por el factor de regulación:

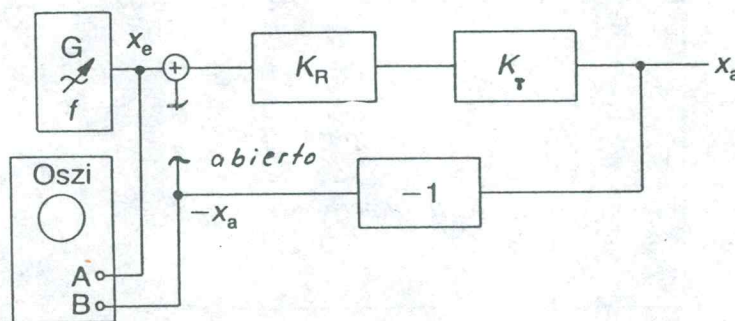
$$\Delta X = \frac{C_T}{1 + C_P * C_T} * \Delta Z = R * C_T * \Delta Z$$

Oscilación y estabilidad del circuito de regulación

Un circuito de regulación representa un lazo cerrado, la magnitud de salida del tramo - la magnitud a regular X_S - esta realimentada hacia el regulador.

Bajo determinadas condiciones es posible que se produzca una oscilación en el proceso a regular. La tarea fundamental de un regulador es mantener el proceso a regular en condiciones fijas e impedir cualquier tipo de oscilación.

Un modo para investigar la conducta del circuito - regulador y tramo - es abrir el lazo (open loop) y excitar la entrada con un generador senoidal. A la vez se observan la señal de entrada y salida (con un osciloscopio).



Lazo abierto del circuito de regulación.

Un momento crítico se presenta cuando con una determinada frecuencia f_0 la amplitud de entrada es igual a la amplitud de salida:

Ganancia del lazo

$$G_O = \frac{X_S}{X_E} = F_R * F_T \quad \text{con } X_S = X_E \quad G_O = 1$$

Si a la vez la magnitud realimentada ($-X_S$) tiene el mismo sentido que la señal de entrada, un desfase de 0° ó sea 360° , es posible que el circuito oscile con una frecuencia constante, la frecuencia propia del circuito f_0 . Ahora se puede desconectar el generador. La oscilación continúa.

Este es el principio fundamental de un oscilador. La condición que produce la oscilación es el cumplimiento de dos condiciones a la vez:

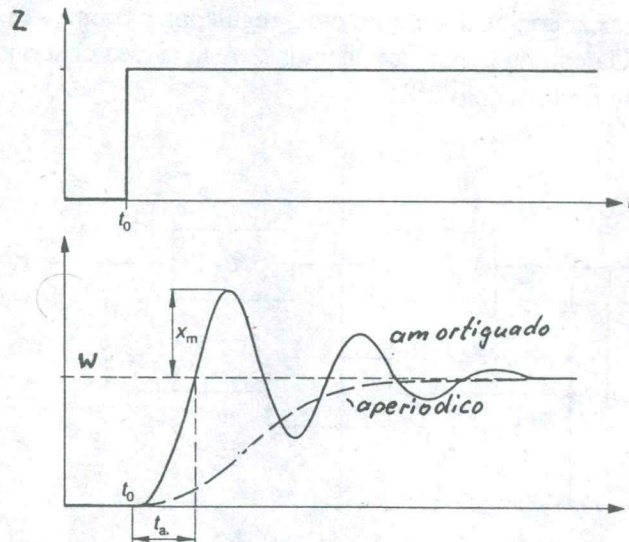
- 1- $G_O = 1$
- 2- $\alpha = 0^\circ$ (ó 360° ó $n * 360^\circ$)

Para un circuito de regulación se puede afirmar que no llega a oscilar:

- 1- si $G_O \geq 1$ pero $\alpha \neq n * 360^\circ$
- 2- si $\alpha = n * 360^\circ$ pero $G_O < 1$

Un salto con la magnitud de entrada actúa teóricamente como un generador con frecuencias indefinidas. Una de estas frecuencias es igual a la frecuencia propia del circuito. Si el sistema comienza a oscilar depende del cumplimiento de las condiciones de oscilación.

La investigación de este asunto es una de las más importantes tareas del técnico.



Criterios de estabilidad

Una magnitud a regular sólo debe producir una oscilación con una amplitud amortiguada y tiene que llegar a un estado estable.

Un sistema que mantiene una oscilación se encuentra en el límite de estabilidad. Un circuito que produce una oscilación aumentando es un sistema inestable e inapto para lograr una regulación.

Para el técnico de regulación existen múltiples métodos de investigación. Muy práctico y posible de medir es la investigación de criterios de estabilidad por los diagramas de BODE.

Un circuito de regulación con lazo abierto se presenta como una conexión en serie del regulador con el tramo. La función de transmisión es la simple multiplicación de la función de transmisión del regulador y del tramo.

$$E_O = - 1 * E_R * E_T$$

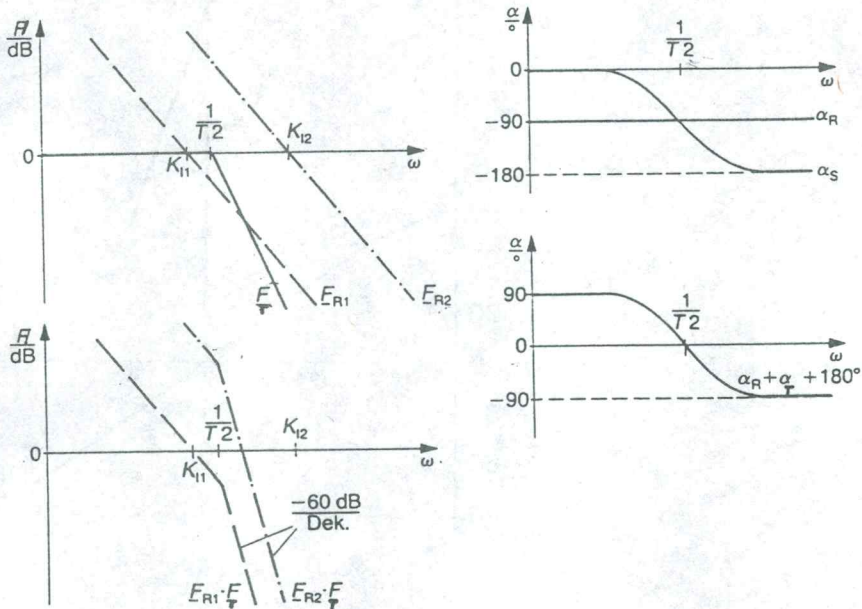
La relación de amplitud del conjunto se logra muy fácilmente con el diagrama de BODE por la simple adición de ambos diagramas.

La inversión por la retroalimentación negativa se toma en cuenta por la adición de 180° a la suma del desfase de ambos elementos de transmisión.

Los puntos críticos son:

- 1- $A_O = 0 \text{ dB}$ ($G_O = 1$)
- 2- $\alpha_O = 0^\circ$

Ejemplo con un tramo tipo P-T2 con regulador I



Con el regulador C_{I1} se logra estabilidad porque con el desfase de 0° la ganancia del lazo es inferior de 0 dB - no hay oscilación -.

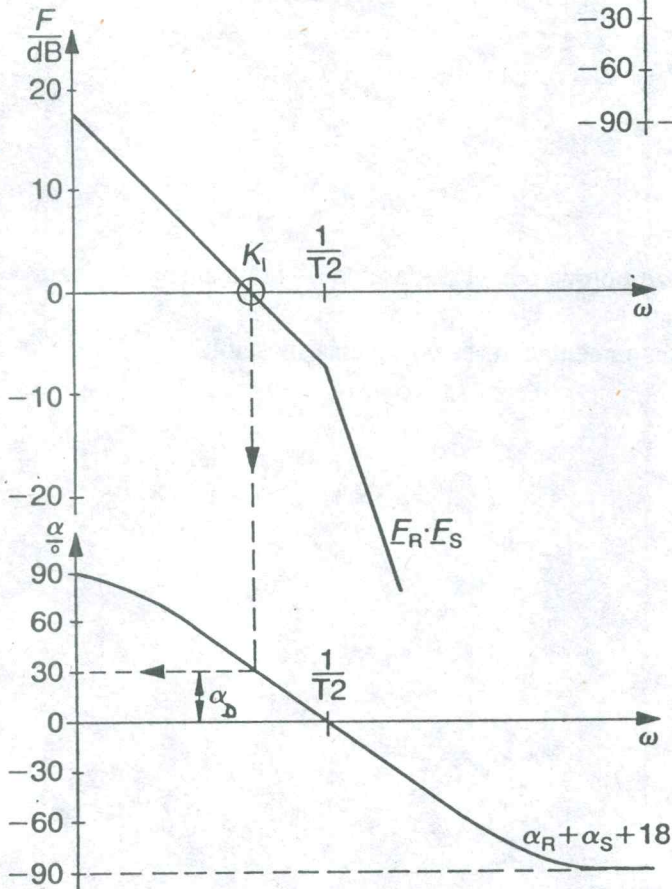
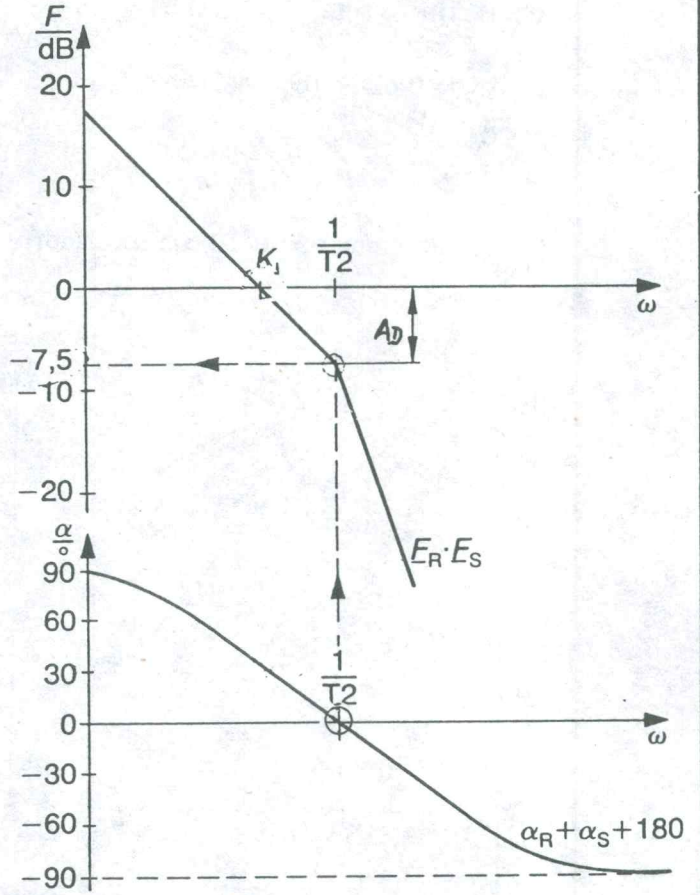
El regulador C_{I2} produce una oscilación aumentando, es un sistema inestable.

Criterios de estabilidad

Un criterio para el grado de estabilidad en un circuito de regulación es:

- > la distancia de la amplitud A_D
- > la distancia de la fase α_D

del punto crítico .



LA REGULACION OPTIMA

¿ Existe una instalación óptima de un regulador ?

Cada circuito de regulación real tiene sus exigencias particulares. No es posible adaptar el regulador a cada exigencia.

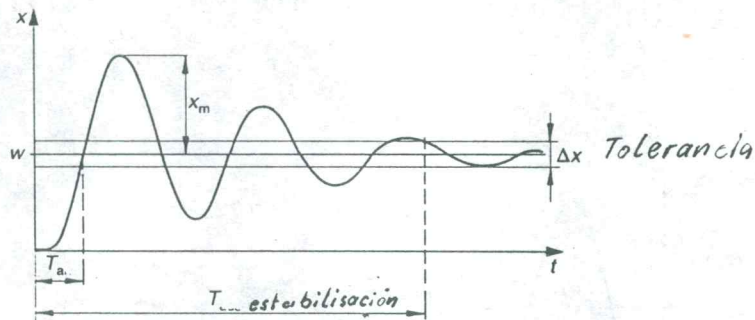
Primero es importante determinar si se exige una buena conducta pilotada o si se prefiere una excelente conducta por interferencias perturbatorias. Cada exigencia requiere una instalación diferente del regulador.

Para obtener un buen comportamiento en ambos hay que buscar un compromiso.

También el objetivo de la regulación interfiere en la característica de regulación. Hay casos que no permiten un exceso por encima del valor de referencia pero no importa el tiempo que demora en alcanzar la referencia. (Regulación de carrera de la fresadora)

En otro caso se da más importancia al rápido alcance del valor de referencia y se acepta que la magnitud sobrepase por pocos momentos el nivel deseado (Regulación de motores)

Criterios para una regulación de calidad



Tres datos sirven para determinar la calidad de regulación

- amplitud de exceso X_m
- tiempo de arranque T_a
- tiempo de estabilización T_{EST}

Primero se determina el margen de tolerancia para la magnitud a regular X .

La amplitud de exceso X_m :

es el valor máximo que sobrepasa la magnitud a regular el valor de referencia.

El tiempo de arranque T_a :

El tiempo de arranque transcurre hasta por primera vez la magnitud a regular llega a alcanzar el valor de referencia.

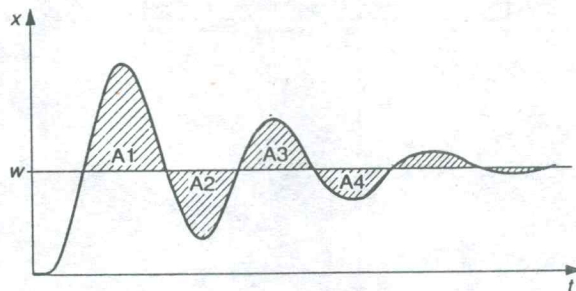
El tiempo de estabilización T_{EST} :

Es el tiempo que dura el proceso a regular hasta que la magnitud a regular se mantiene dentro del margen de tolerancia fijado.

Para lograr una buena instalación del sistema de regulación, el tiempo de arranque y de estabilización deben ser cortos, y la amplitud de exceso debe mantenerse pequeña. Por lo general una pequeña amplitud de exceso produce un tiempo de arranque y un tiempo de estabilización amplios.

Otro criterio de calidad de regulación es obtener un mínimo de áreas que incluya la curva de respuesta después un salto.

$$|A1| + |A2| + |A3| + \dots = \text{mínimo}$$



Con el criterio del mínimo de áreas se logran los mejores resultados para la amplitud de exceso, tiempo de arranque y tiempo de estabilización cuando el grado de amortiguación del sistema corresponde a:

$$D = 1/\sqrt{2}$$

en este caso corresponde

$$X_m = 4.3 \% * \Delta W \text{ con variación del valor de referencia}$$

$$X_m = 4.3 \% * \Delta Z \text{ con influencia perturbadora}$$

COMBINACIONES CONVENIENTES DE TRAMOS Y REGULADORES

La mayoría de los procesos industriales a regular se presentan como tramos del tipo P-Tn. En principio no se dispone de datos precisos de los tramos reales, tramos que tienen un cierto retardo en su reacción por tener desconocidos almacenes de energía en el proceso. Pero los tres datos obtenidos de la curva de respuesta por un salto con la magnitud de entrada logran suficientemente bien describir el comportamiento del tramo.

- Coeficiente de transmisión C_T .
- Tiempo de retardo T_r
- Tiempo de establecimiento T_c

Para seleccionar un regulador adecuado hay que saber las ventajas y desventajas de cada uno.

Regulador tipo P

- El regulador actúa inmediatamente pero produce una desviación remanente, que depende de la ganancia del regulador.
- Con una alta ganancia se reduce la desviación remanente pero a la vez existe el peligro de inestabilidad.

Regulador tipo PD

- Permite aumentar la ganancia del regulador P sin correr el peligro que el sistema pierda la estabilidad. El elemento D produce un desfase de $+90^\circ$. Por lo tanto se produce una desviación remanente inferior al regulador P.
- Con variaciones lentas de la magnitud piloto o perturbadora el sistema reacciona más rápido que con regulador P.

Regulador tipo I

- Desaparece la desviación remanente pero la acción es muy lenta y produce una oscilación amortiguada de la magnitud a regular.

Regulador tipo PI

- También desaparece la desviación remanente y reacciona más rápido que el regulador I solo.

Regulador tipo PID

- El regulador PID actúa más rápido que el regulador PI. El elemento D permite dar un coeficiente integral C_I más grande sin correr el riesgo de la inestabilidad del sistema. A causa de la presencia del elemento integral también es posible aumentar el coeficiente diferencial C_D , lo que tiene como efecto que la actuación sobre desviaciones lentas es más fuerte.
- Un ajuste preciso de las tres partes C_P ; T_N y T_V para obtener una regulación de calidad es difícil.

Según el objetivo del sistema de regulación - buena conducta pilotada o buena conducta por interferencias - resultan valores diferentes para las magnitudes del regulador.

Procedimiento de adaptación óptima CHR - para tramos con datos conocidos

Según CHIEN, HRONES y RESWICK (CHR) existe un procedimiento para acercarse a los datos óptimos que en la práctica tiene gran valor.

Hay que diferenciar dos tipos de regulación :

- Proceso de regulación aperiódico de más corta duración
- Proceso de regulación con 20% sobresalto y muy corto tiempo de arranque.

Tipo	<i>Optima conducta a perturbaciones</i>		<i>optima conducta con referencia pilotada</i>	
	<i>Regulación aperiodica</i>	<i>Regulación periodica con 20% de sobresalto</i>	<i>Regulación aperiodica</i>	<i>Regulación periodica con 20% de sobresalto</i>
P	$K_{PR} = 0,3 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$	$K_{PR} = 0,7 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$	$K_{PR} = 0,3 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$	$K_{PR} = 0,7 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$
PI	$K_{PR} = 0,6 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$	$K_{PR} = 0,7 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$	$K_{PR} = 0,35 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$	$K_{PR} = 0,6 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$
	$T_N = 4 \cdot T_{IE}$	$T_N = 2,3 \cdot T_{IE}$	$T_N = 1,2 \cdot T_g$	$T_N = T_g$
PID	$K_{PR} = 0,95 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$	$K_{PR} = 1,2 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$	$K_{PR} = 0,6 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$	$K_{PR} = 0,95 \cdot \frac{T_g}{K_{PS} \cdot T_{IE}}$
	$T_v = 0,42 \cdot T_{IE}$	$T_v = 0,42 \cdot T_{IE}$	$T_v = 0,5 \cdot T_{IE}$	$T_v = 0,4 T_{IE}$
	$T_N = 2,4 \cdot T_{IE}$	$T_N = 2 \cdot T_{IE}$	$T_N = T_g$	$T_N = 1,35 T_g$

Procedimiento de adaptación óptima ZIEGLER y NICHOLS - para tramos con datos desconocidos

ZIEGLER y NICHOLS tienen desarrollado un método de adaptación de reguladores para tramos desconocidos. En muchos casos no es posible investigar un tramo con un salto en la magnitud de entrada por aspectos de seguridad.

La condición para aplicar el método de ZIEGLER y NICHOLS es que el sistema a regular logre una oscilación.

Con el lazo de regulación cerrado hay que aumentar la ganancia C_P del regulador P hasta un nivel en el que se produzca una oscilación continua cuando se da un cambio del valor de referencia. El sistema oscila con la frecuencia propia f_0 . Los componentes I y D se anulan ($T_N = \infty$; $T_V = 0$).

- La ganancia en este caso es la ganancia crítica $C_{P\ CR}$
- la oscilación tiene la duración de período crítico T_{CR} .

Los datos para los reguladores se calculan de la forma indicada:

Regulador Tipo P

$$C_P = 0,5 * C_{P\ CR}$$

Regulador Tipo PD

$$C_P = 0,8 * C_{P\ CR}$$

$$T_V = 0,12 * T_{CR}$$

Regulador Tipo PI

$$C_P = 0,45 * C_{P\ CR}$$

$$T_N = 0,83 * T_{CR}$$

Regulador Tipo PID

$$C_P = 0,6 * C_{P\ CR}$$

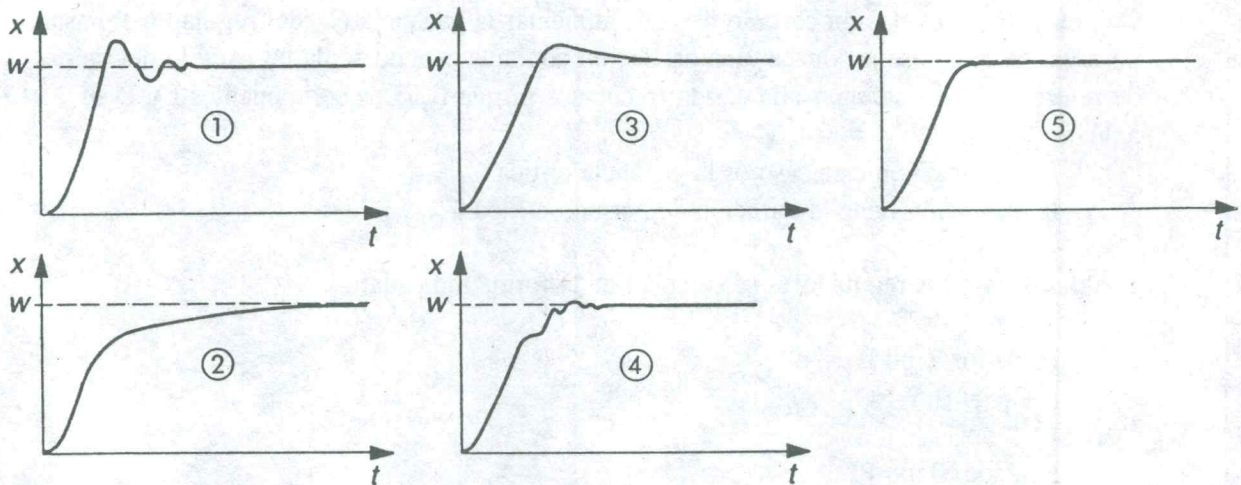
$$T_N = 0,5 * T_{CR}$$

$$T_V = 0,125 * T_{CR}$$

Verificación de la adaptación óptima

No se debe esperar que con el primer ajuste del regulador el proceso de regulación trabaje perfectamente. Especialmente tramos que son difíciles de regular ($T_C/T_R < 3$) necesitan reajustes.

La curva de respuesta de la magnitud a regular X sobre un salto en el valor de referencia muestra muy bien un error en la adaptación del regulador. Según el modo como se estabiliza el proceso se pueden determinar las correcciones en el ajuste.



- 1- El componente I domina, el componente D es débil:
aumentar T_N y T_V
- 2- El componente I es débil, el componente D domina:
reducir T_N y T_V
- 3- El componente P es débil:
aumentar C_P
- 4- El componente P domina:
reducir C_P
- 5- Ajuste correcto - regulación óptima

REGULADOR DISCONTINUO

Con la magnitud de ajuste el regulador controla el flujo de la energía hacia el proceso a regular.

La magnitud de ajuste tiene que actuar en forma continua para mantener el equilibrio deseado - quiere decir que cualquier valor entre 0% y 100% es posible.

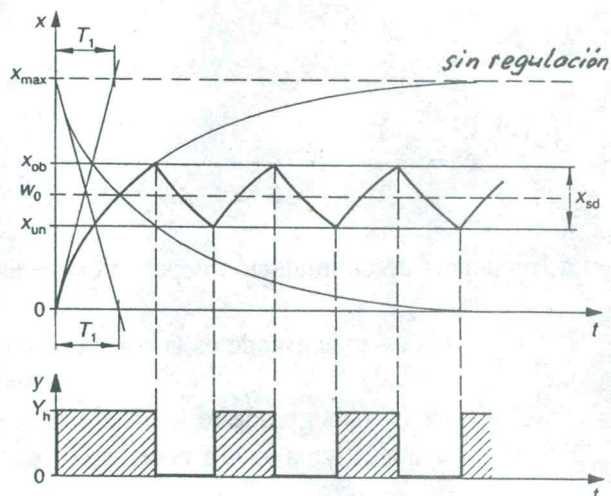
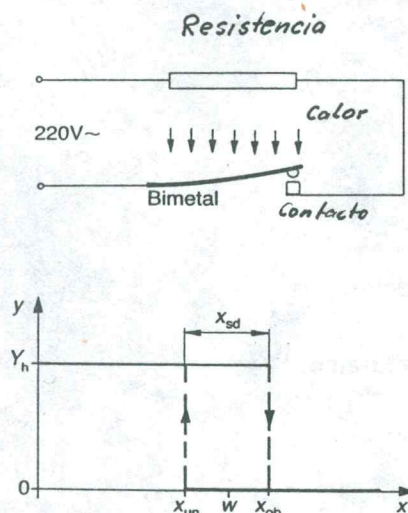
En caso de una reacción lenta del tramo también es posible realizar saltos súbitos con la magnitud de ajuste para variar la magnitud a regular - el regulador reacciona en forma

discontinua -

- apagado - encendido -
 → dos posiciones o

- apagado - mitad de potencia - plena potencia -
 → tres posiciones

Regulación de un tramo P-T1 con regulador de dos posiciones



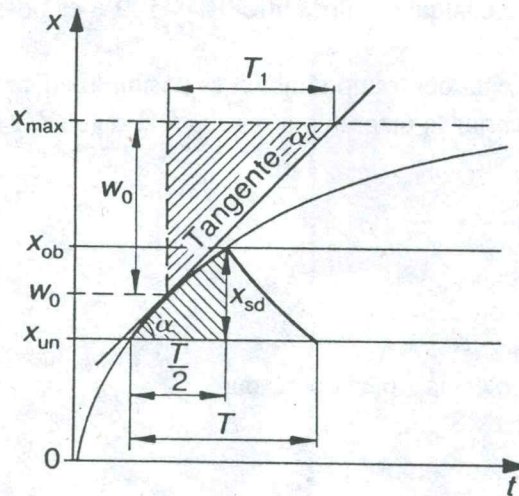
En el momento en que la magnitud a regular sobrepasa un determinado nivel interviene el regulador y apaga la potencia - punto de intervención superior -

Con la característica del tramo baja la magnitud a regular hasta que pasa por debajo del nivel mínimo.

El regulador tiene una histeresis X con la cual la magnitud a regular oscila alrededor del valor de referencia.

Frecuencia de conmutación

La frecuencia de conmutación de la magnitud de ajuste se logra calcular con $W_0 = 1/2 X_{max}$.



T_1 - Constante de tiempo del tramo
 T - Período de conmutación

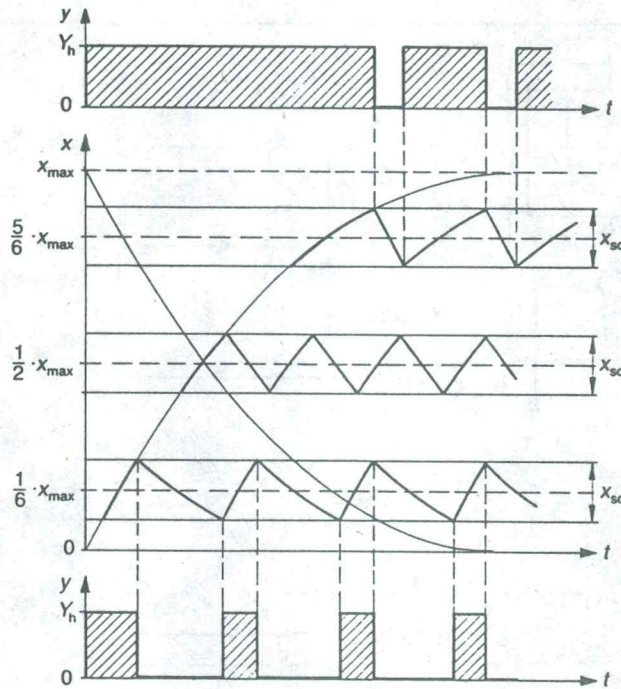
La tangente en el punto W_0 se aproxima satisfactoriamente a la curva real. Entonces los dos triángulos tienen la misma relación.

$$\frac{W_0}{T_1} = \frac{\Delta X}{T/2}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{W_0}{2 * T_1 * \Delta X}$$

La frecuencia de conmutación depende entonces de tres factores

1. $f \approx 1/T_1$ - más grande es la constante de tiempo del tramo,
2. $f \approx 1/\Delta X$ - más grande es la histeresis
 más lenta es la frecuencia de conmutación
3. $f \approx W_0$ - el valor de referencia



Para que una regulación sea efectiva se necesita una cierta sobrepotencia. Cuanto más grande es la sobrepotencia que se suministra al tramo, más rápido se llega al nivel deseado de la magnitud a regular.

Suministrando la plena potencia el tramo llega a un valor máximo de la magnitud a regular - X_{max} .

El factor de sobrepotencia que se presenta depende entonces de la posición de la referencia.

$$F_P = \left(\frac{X_{max}}{W} - 1 \right) 100 \%$$

Ejemplo:

con $W = 5/6 X_{max}$ $\implies F_P = 20\%$

con $W = 1/2 X_{max}$ $\implies F_P = 100\%$

con $W = 1/6 X_{max}$ $\implies F_P = 500\%$

Sobrepotencia de las referencias
 disminuye la regulación con

CUADRO SINOPTICO DE LA PIZARRA

Sistema de regulacion con
 Regulador de dos posiciones

Regulador
 continuo discontinuo
 dos posiciones
 tres posiciones

$f = \frac{1}{T}$
 $f \sim \frac{1}{\Delta X}$
 Duración de vida
 $D \sim \Delta X$

Esquema de bloques

Curva característica

Potencia sobrante

Factor de sobrepotencia $sp = \frac{Xh - W \cdot 100}{W}$

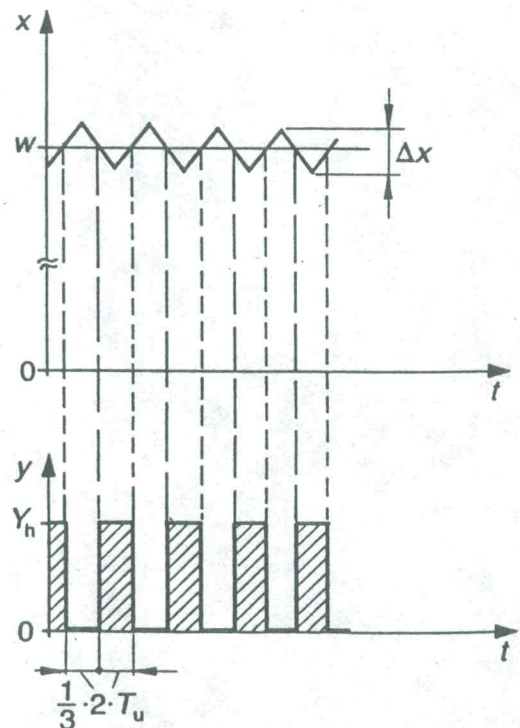
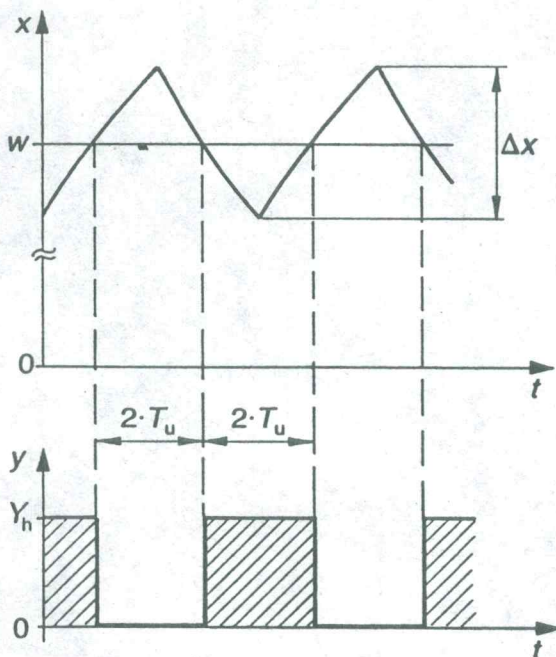
Regulador discontinuo con retroalimentación

Un regulador del tipo dos posiciones se encuentra en innumerables casos de aplicación, porque es un regulador de bajo costo con un rendimiento suficientemente bueno cuando no se exige un proceso con precisión.

El problema principal de un regulador discontinuo es la oscilación de la magnitud a regular.

El tramo recibe en el momento de encender un empuje de energía que dura hasta que la magnitud a regular sobrepasa el nivel de intervención por la histeresis del regulador. Cuanto más grande es la inercia del tramo, más abruptamente varia la magnitud a regular.

Una retroalimentación directa agiliza la acción. El empuje de energía es más corto pero más frecuente y así se logra una disminución de la amplitud de oscilación.

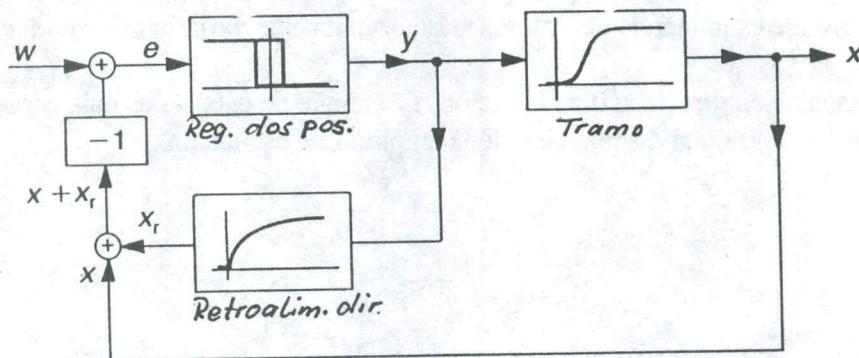


El error de regulación se compone ahora por la suma de dos señales - del tramo y de la retroalimentación.

$$e = W - (X + X_r)$$

Según el caso real se da una importancia diferente a X_r , que solo debe ser una magnitud de corrección, generalmente se aplica un valor de 10 - 20% de la magnitud a regular X .

Según el ajuste de esta retroalimentación se logra una calidad de regulación bastante buena, parecida a una regulación continua.



REGULADORES TIPO DIGITAL

¿ Por qué reguladores digitales ?

En una regulación de alta calidad interfieren diferentes factores:

- > la No linealidad de reguladores
- > la desviación del punto de trabajo a largo plazo.

En el momento en que se aplica un sistema digital se trata de la manipulación de datos binarios, que por sí son invariables y no alterables, sólo por el proceso que esta fijado en el algoritmo del programa.

Para un regulador digital entonces no existe el problema de la Nolinealidad ni tampoco la desviación del punto de trabajo.

Fuentes de interferencia del proceso a regular sólo se encuentran ahora en la captación de la magnitud a regular y en el ajuste del proceso.

El desarrollo tecnológico todavía va hacia una completa digitalización - medición de la magnitud a regular con método digital (sensores inteligentes) - ajustar el proceso con señales digitales (actuadores de control digital).

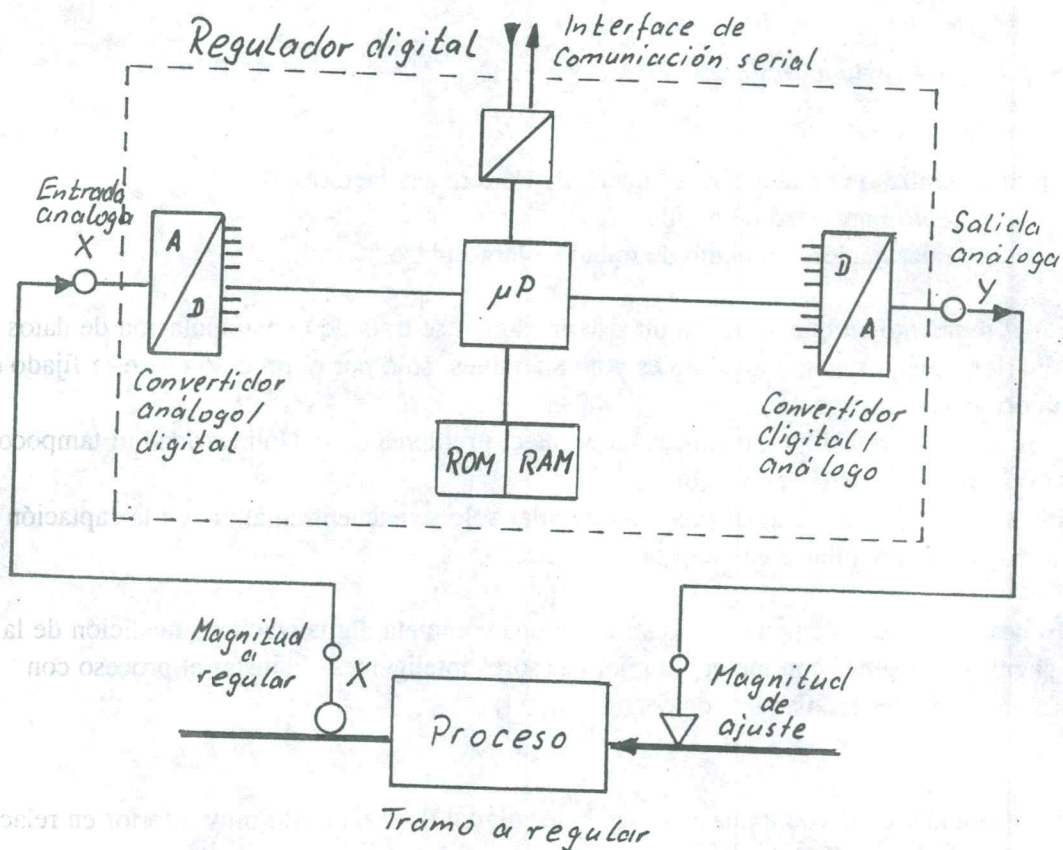
El otro punto es la economía. Un regulador digital tiene un costo muy inferior en relación con un sistema análogo.

- > se utilizan circuitos integrados comunes de un sistema de microprocesador
- > no se necesita ningún ajuste o calibración de los circuitos
- > fácil integración en sistemas superiores - Bus control / control remoto
- > documentación de producción fácil y completa



Elementos principales de un regulador digital son:

- > Sistema microprocesor / microcontroller
- > Interface análogo
 - convertidor análogo-digital - entrada X
 - convertidor digital-análogo - salida Y
- > Interface digital
 - comunicación con sistemas superiores
- > Software - programa del algoritmo de regulación



¿ Como funciona el regulador digital ?

El modo de trabajar se repite en ciclos:

====> tomar prueba de la magnitud a regular X

====> conversión analógico/digital (digitalización)

====> tratamiento de datos /algoritmo de regulación

====> entrega de la magnitud de ajuste

====> conversión digital-análogo de Y

Según tipo y caso de aplicación varía la duración del ciclo. Generalmente se utilizan 100 ms, lo que son 10 ciclos por segundo.

Digitalización

En el momento de convertir una señal análoga en una señal digital se transforma una magnitud continua en una magnitud discontinua, lo que es forzosamente diferente. La conversión produce un error principal

- el error de la digitalización.

Dos factores influyen fundamentalmente:

la frecuencia de tomar pruebas

(Sample rate)

Para que una señal digital represente suficientemente bien una señal continua tienen que tomarse dos pruebas en un período de frecuencia más alta de la magnitud continua.

(Teorema de Shanon/Nyquist)

Ejemplo: Duración del ciclo del microprocesor 100ms,
son 10 pruebas por segundo.

La frecuencia más alta de la señal a convertir es 5 Hz.

Error de cuantificación

(Disolución)

Convertir una magnitud continua en una señal digital significa hacer escalones y asignar un determinado valor digital.

Cuanto más grande es el numero de escalones, menor es el error de cuantificación.

Ejemplo: Disolución 11 Bit.

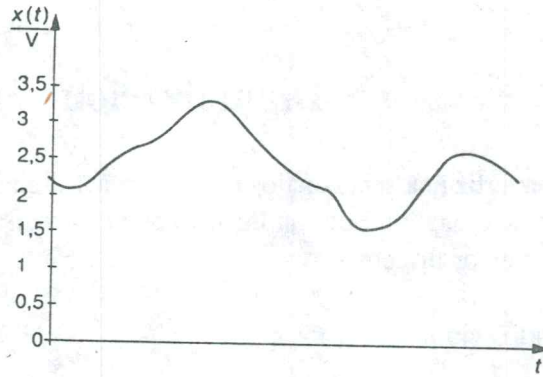
Número de escalones $2^{11} = 2048$

Margen máximo 100% (Full scale FS)

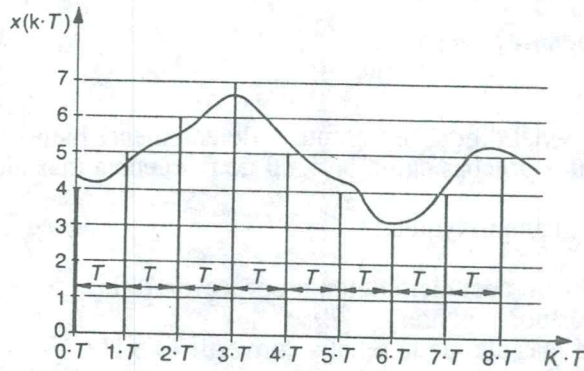
Error de cuantificación

$$Q = \frac{FS}{2^n} = \frac{100\%}{2048} = 0,048828 \% \\ 0,5 \text{ por mil}$$

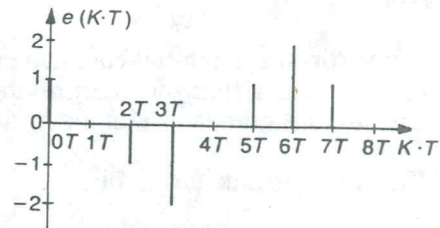
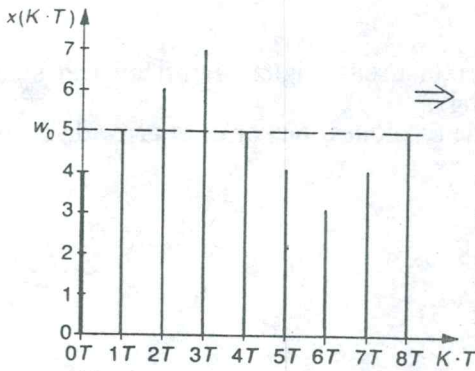
Señal
 análoga
 (Entrada)



Tomar
 pruebas
 "sample"

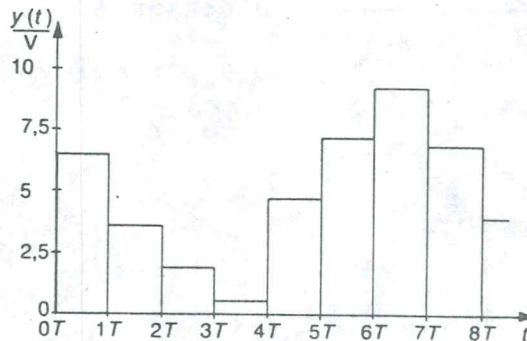


Pulsos
 con
 amplitud
 diferente



Error de regulación

Magnitud
 de ajuste
 (Salida)



Reguladores auto-adaptivos

Los reguladores digitales facilitan la adaptación del regulador a un tramo de regulación desconocido.

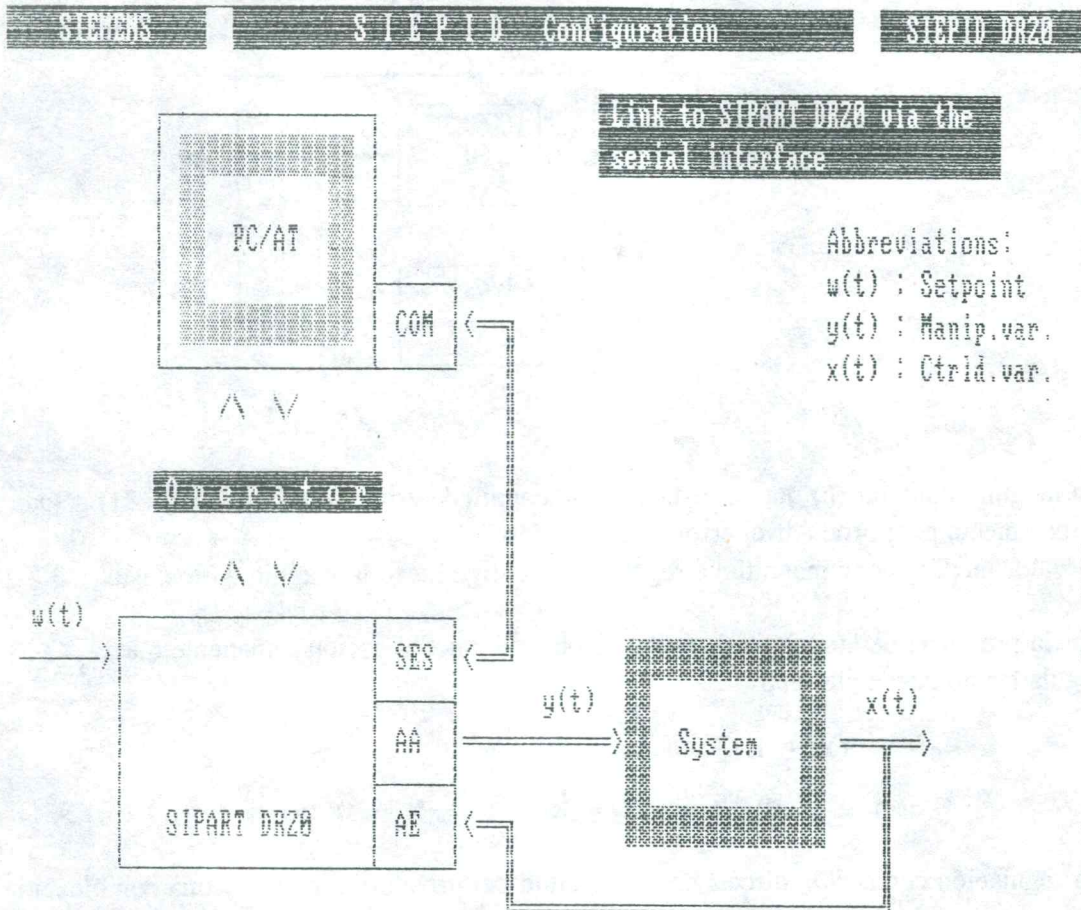
El programa en el microcontroller es capaz de identificar el tramo y ajustar las características del regulador de manera óptima para obtener una regulación de alta calidad.

Se da un estímulo hacia el circuito de regulación

- > salto de la magnitud de referencia W (10%) ó
- > salto de la magnitud de ajuste Y (10%)

y se mide la reacción del circuito.

El algoritmo del programa de adaptación exige un amplio manejo matemático, que a veces no se incluye en el regulador mismo. En este caso se conecta el regulador a un ordenador que realiza la adaptación. El regulador digital sirve como convertidor de medición.

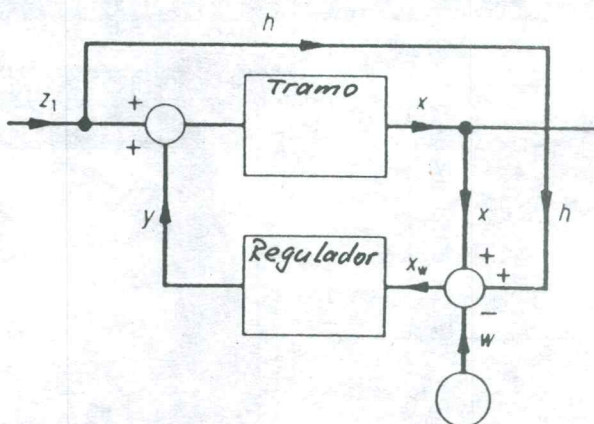


MALLAS SUPERPUESTAS DE REGULACION

Para obtener una mejor calidad de regulación y especialmente para lograr regular tramos con un gran tiempo de retardo (T_r) o tiempo muerto (T_t) se sobreponen mallas de regulación con diferentes tareas.

En muchos casos reales se conoce la magnitud principal perturbadora del proceso a regular. En lugar de esperar hasta que esta magnitud perturbadora tenga su efecto en la salida del tramo - en magnitud a regular - se trata de captar esta magnitud perturbadora en el lugar de origen y con una parte de su valor actúa directamente en la entrada del regulador. Se anticipa el efecto perturbador y el sistema ya reacciona antes que por el retraso del tramo se note en la salida.

Regulación con acción directa de la magnitud perturbadora



La magnitud auxiliar (h) que se deduce de la magnitud perturbadora principal (Z_1) actúa directamente para producir el error de regulación.

El valor medido de la magnitud a regular (X) corrige luego la magnitud de ajuste.

Por la presencia de la magnitud auxiliar se obtiene una desviación remanente que el regulador no puede eliminar.

$$e = W - (X + h)$$

$$\text{con } e = 0 \implies X = W - h \quad X = W \text{ solo con } h = 0 !$$

La regulación con acción directa de la magnitud perturbadora representa una combinación de un circuito de control con un circuito de regulación.

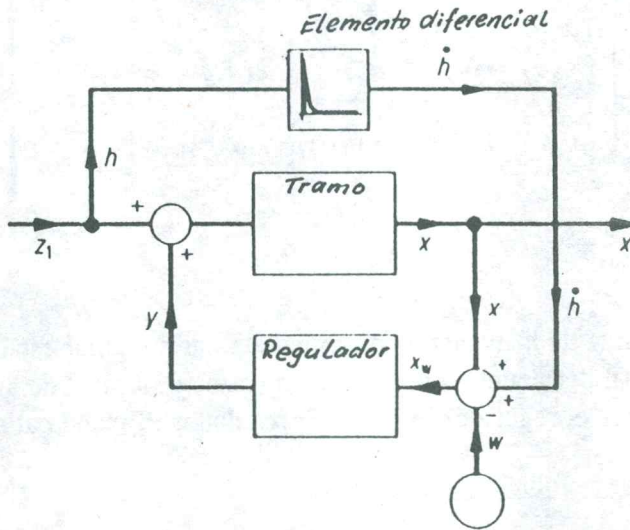
Con este principio es posible lograr una regulación suficientemente buena con tramos de alta inercia, que con un simple circuito regulador no se logra manejar.

Regulación con acción directa con la variación/tendencia de la magnitud perturbadora

Si la magnitud perturbadora pasa por un elemento diferencial sólo actúa el regulador en el momento de cambio en la magnitud perturbadora. Un valor estable no tiene efecto. Por lo tanto no se produce una desviación remanente en el sistema de regulación.

$$e = W - (X + V_h) \quad \text{Velocidad de cambio de } Z_1$$

$$V_h = \Delta Z_1 / \Delta t$$



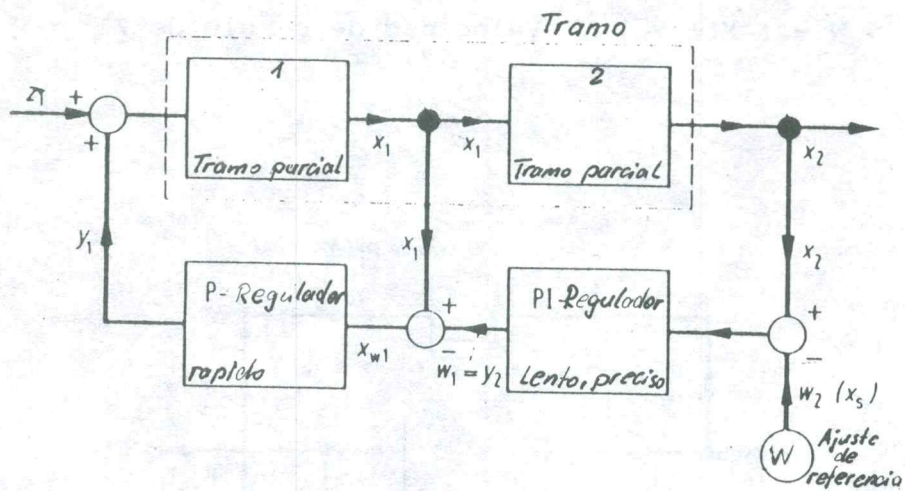
Conexión en cascada

Tramos con gran inercia son difíciles de regular. En este caso se trata de seccionar el proceso a regular en un tramo parcial veloz y otro lento.

Sobre este proceso se aplican dos reguladores superpuestos, maestro y esclavo.

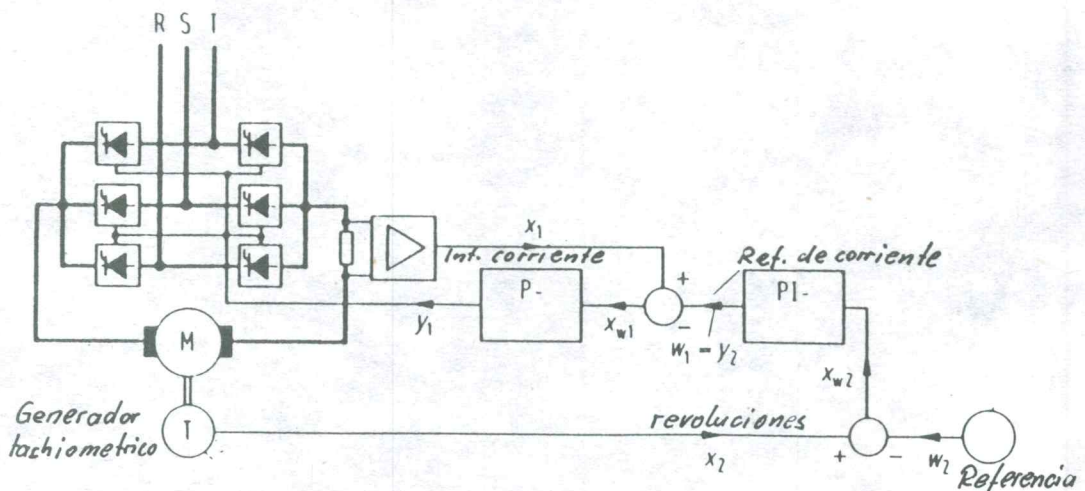
El regulador esclavo es del tipo P, rápido pero menos preciso.

El regulador principal es del tipo PI, lento pero con precisión.

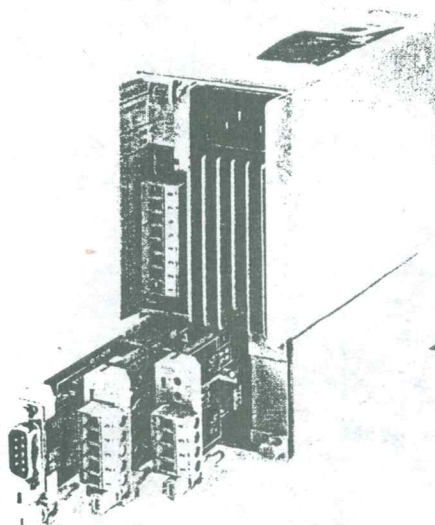
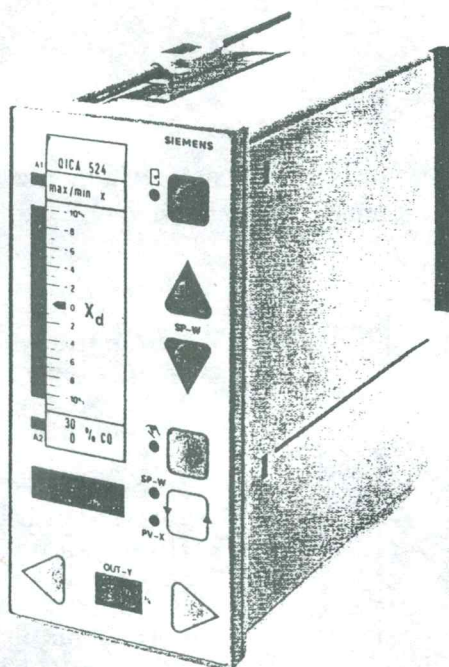
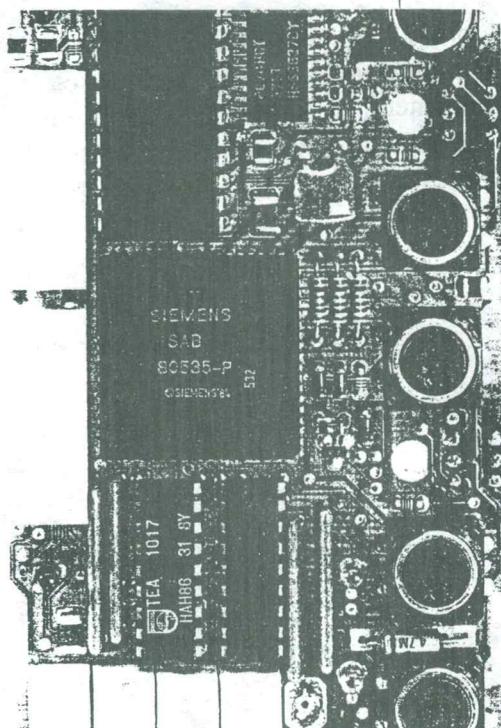
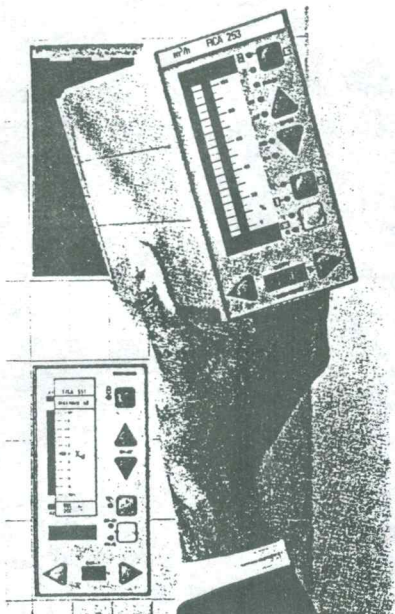


El regulador esclavo trata de mantener su magnitud auxiliar a regular estable. La desviación en la magnitud principal detecta el regulador superpuesto, y su señal de ajuste actúa como valor de referencia sobre el regulador inferior. El regulador PI manda al regulador P.

Ejemplo: Regulación de revoluciones de un motor.



REGULADOR INDUSTRIAL SIEMENS SIEPART DR 20



REGULADOR DIGITAL SIEMENS DR 20

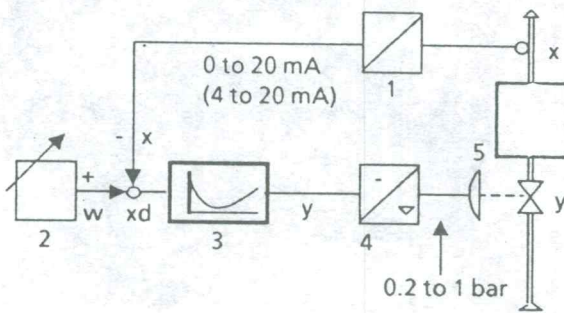
El regulador SIEMENS DR 20 es un regulador autónomo de procesos industriales con un amplio espectro de aplicaciones en la ingeniería de procesos, ingeniería mecánica y ingeniería de construcción de aparatos.

El regulador digital SIEMENS DR 20 está a disposición en dos formas:

> **Regulador continua (Tipo K)**

La salida (magnitud de ajuste Y) es controlado por una señal normalizada del lazo de corriente de 0 (4) a 20 mA.

Para aplicar a elementos de ajuste con acción neumática ó hidraulica.



w Command variable
 x Controlled variable
 xd Negative deviation

1 Transmitter
 2 Setpoint adjuster
 3 Control amplifier
 4 Electropneumatic signal converter
 5 Pneumatic final control element

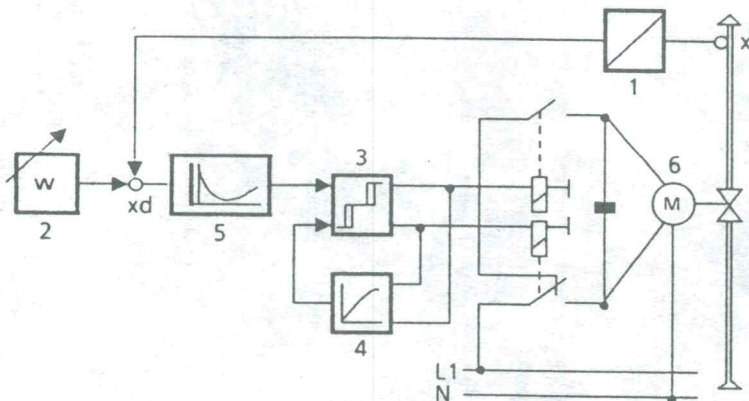
Fig. 1/5 Continuous controller, functional diagram

> **Regulador discontinua (Tipo S)**

programable para el modo

TRES POSICIONES para accionar elementos de ajuste con fuerza motriz.

DOS POSICIONES con dos salidas para calefacción y refrigeración

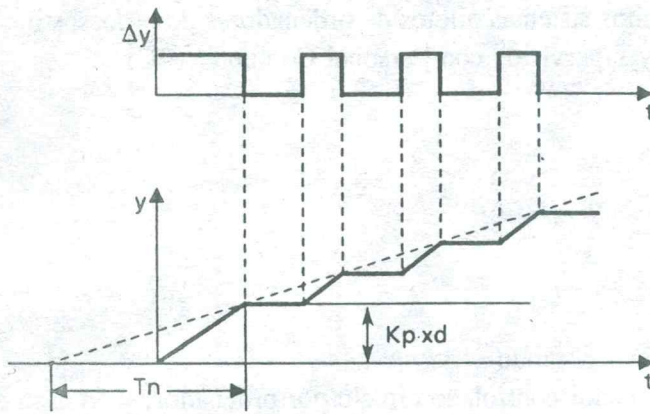


w Command variable
 x Controlled variable
 xd Negative deviation
 y Manipulated variable

1 Transmitter
 2 Setpoint adjuster
 3 Three-point switch
 4 Feedback with time response
 5 Control amplifier
 6 Final control element

Fig. 1/3 Three-position step controller, functional diagram

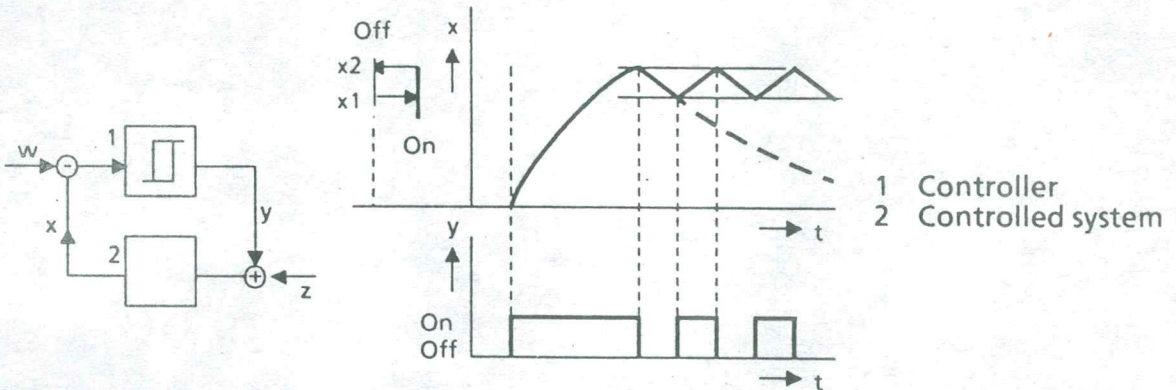
En el caso de que se aplica el modo TRES POSICIONES a un ajuste con moteres para accionar el elemento de ajuste (valvula) se logra un comportamiento integral.



- K_p Proportional gain
- T_n Reset time
- x_d Negative deviation
- Δy Manipulated variable (controller)
- y Manipulated variable (motor)

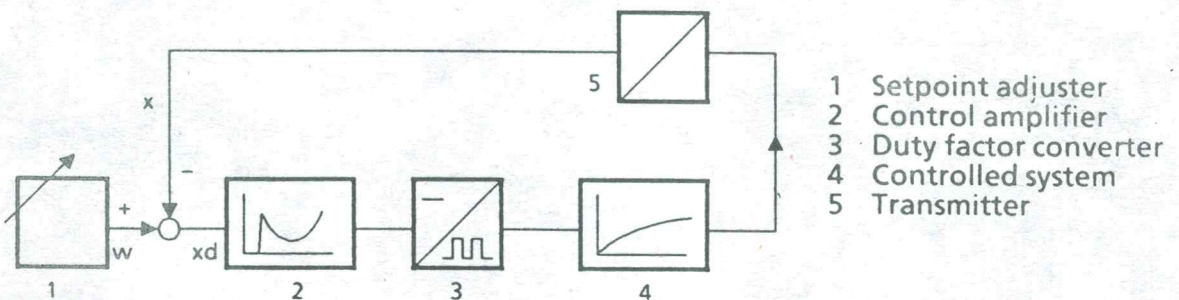
Fig. 1/4 Three-position step controller, transient function and parameters

Regulador tipo DOS POSICIONES



- 1 Controller
- 2 Controlled system

Fig. 1/6 Two-position controller without feedback



- 1 Setpoint adjuster
- 2 Control amplifier
- 3 Duty factor converter
- 4 Controlled system
- 5 Transmitter

Fig. 1/7 SIPART DR20 two-position controller

Por su alto grado de flexibilidad el regulador SIEMENS DR 20 puede ser aplicado en circuitos simples de regulación como también en sistemas complejas.

El regulador puede integrarse en amplios sistemas pilotos de ordenadores de procesos o hace parte de una central de manejo y supervisión con Personal Computer (PC).

El aparato puede estructurarse como

- estación de relación
- indicador de proceso
- regulador piloto
- regulador manual.

Con el interface serial es posible realizar el modo

- DDC (direct digital control) regulador controlado directo por ordenador, y en caso de ausencia del sistema superior la autoacción.
- SPC (set point control) ajuste de la referencia remoto con PC.

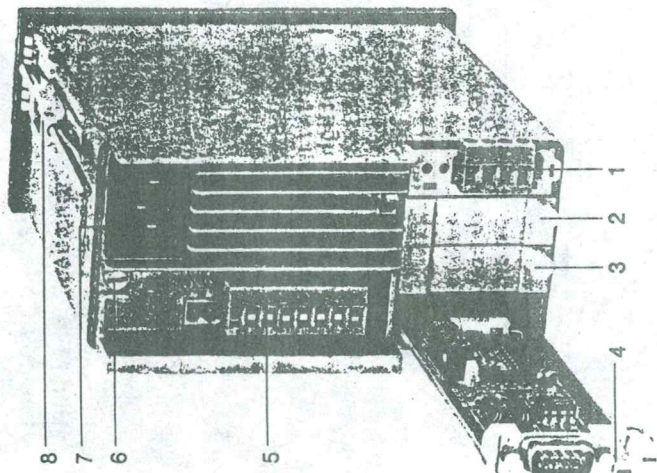


Fig 2/2 Rear view of SIPART DR20

- 1 Slot AE3, fitted with module
- 2 Slot AE4, unfitted, with dummy panel
- 3 Slot GW, unfitted, with dummy panel
- 4 Slot SES, module pulled out
- 5 Terminal block of standard controller
- 6 Earthing screw
- 7 Mains plug
- 8 Clamp for fixing the device in a panel; second clamp underneath device

Indicación de la diferencia de regulación $x_d = w - x$, véase el conmutador de estructuras S25.

Letrero descriptivo representado en la figura 16.
 Aviso de alarma A1 } Véanse los conmutadores de estructuras S22,
 Aviso de alarma A2 } S23 y S24

Indicación digital para $w - x - A2 - A1 - SH$, véanse los conmutadores de estructuras S20 y S21. Mediante el LA y el LE es preseleccionado el margen de indicación. Para la conmutación de la función de indicación véase el pulsador 8. SH aparece sólo en el ciclo de indicación, cuando el S1 = 5, 10 y el S18 = 1 (a partir de la versión A05 del Software).

Variación de la magnitud de ajuste en servicio manual. } El sentido de la acción γ o $\Delta\gamma$, depende de la posición del conmutador de estructuras S33.
 Indicación y, en dirección hacia el 0 %
 Variación de la magnitud de ajuste en servicio manual, }
 en dirección hacia el 100 %

Indicación digital de la magnitud de ajuste en el margen del -9 al ± 109 %. Para ello se presentan los números 100 al 109 como h0 al h9 (véase el S32). Además muestra "A2", "A1" y dado el caso "SH" cuando en el indicador digital 4 muestre el valor de alarma ó valores límites de seguridad.

El punto luce en los reguladores S cuando se conecta la salida $-\Delta\gamma$.
 El punto luce en los reguladores S cuando se conecta la salida $+\Delta\gamma$.

Commutador para el indicador digital 4. La conmutación a la próxima magnitud se efectúa al soltar el pulsador. Si se acciona durante más de 5 segundos se efectúa la comprobación de las lámparas. Si se pulsa adicionalmente la tecla 13 se indicará en el indicador 4 la versión del Software. El acuse de recibo de los avisos de perturbaciones γ y de la indicación intermitente tras la vuelta de la tensión de red, después de un fallo de la misma, se efectúa pulsando una sola vez.

Luce cuando es indicado el valor w en el display 4.
 Luce cuando es indicado el valor x en el display 4.

Comutación sin saltos de servicio manual-automático.
 Luce de manera fija en servicio manual, y de manera intermitente en acción externa (N, Si, B).

Variación de la consigna interna dirección hacia el final } sólo cuando lucen los LED del margen de medida.
 Variación de la consigna interna dirección hacia el } 9.1 y 14
 comienzo del margen de medida.

Comutación de valor de consigna interno/externo, SPC, DDC. (siempre que sea posible en el tipo de funcionamiento seleccionado, véase el conmutador de estructuras S1).

Luce de manera fija en el caso de valor de consigna interno, e intermitentemente en determinados estados de servicio SPC y DDC.

Tapa de cierre para el cambio de escala. Se extrae lateralmente mediante una herramienta con punta.
 En caso de fuerte riego de agua sobre las capas de protección, éstas deberán ser selladas con la cinta adhesiva que se encuentra en el paquete adjunto.

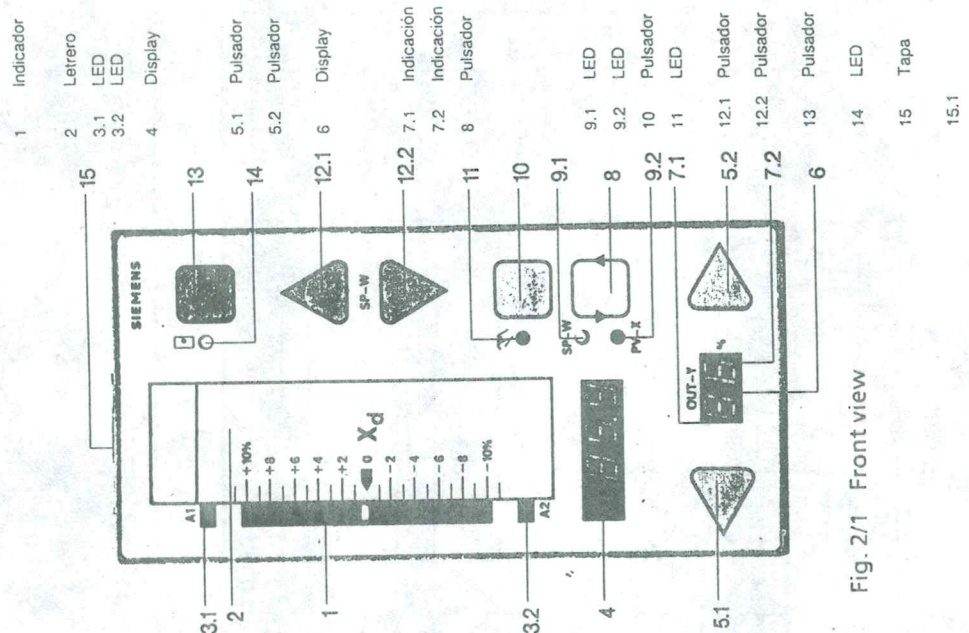


Fig. 2/1 Front view

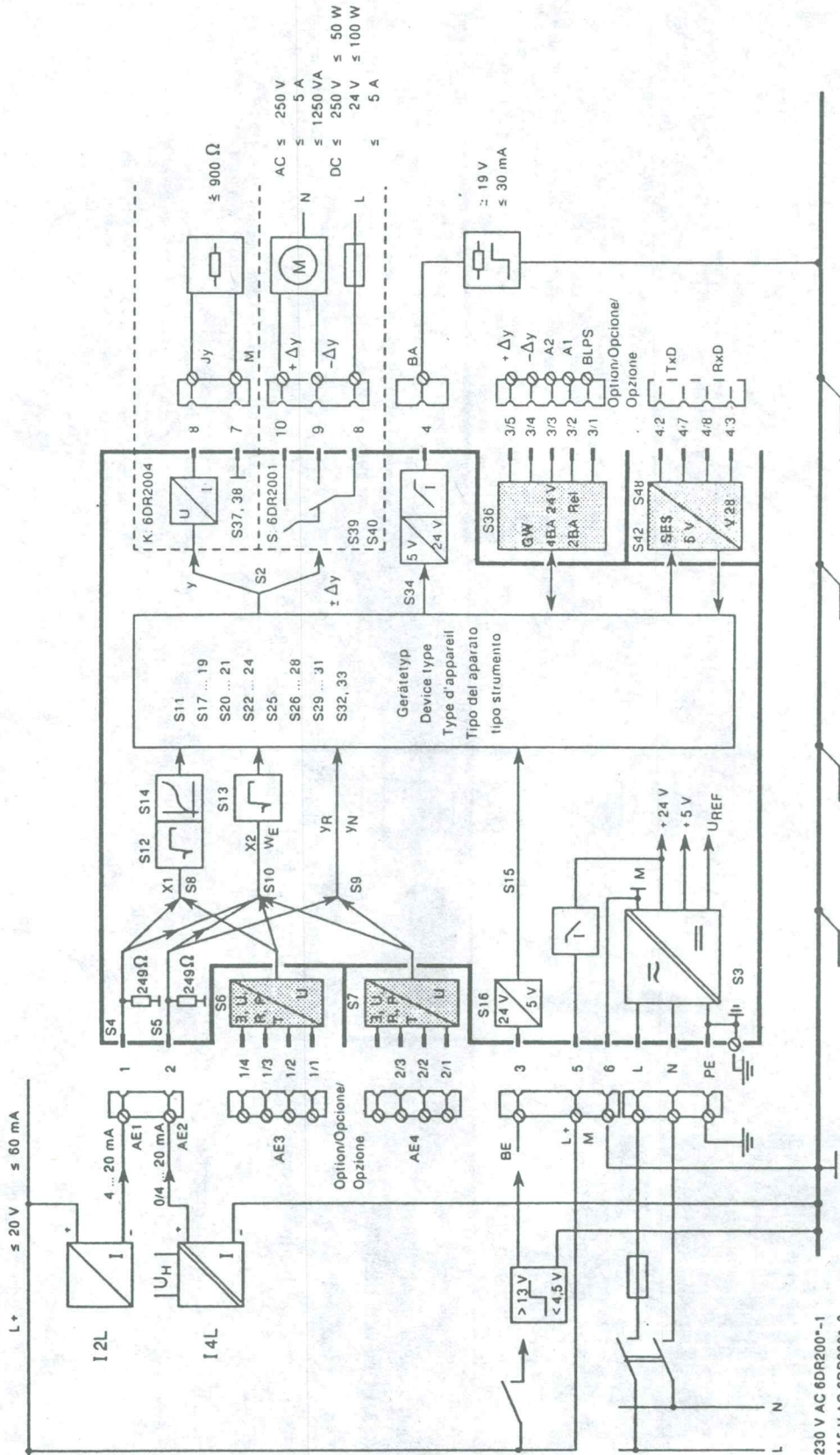


Bild / Fig. 3 Beschaltungen Grundgerät / Connections of the basic unit / Branchements de l'appareil de base / Conexiones del aparato básico / Collegamenti dello strumento

Construcción y forma de trabajo

El regulador de proceso SIPART DR20 es un aparato moderno de automatización con procesamiento digital de los datos. Esta técnica y la utilización de componentes altamente integrados, permiten un amplio campo de aplicación con un pequeño volumen de montaje y una fácil adaptación a las más diversas tareas. Para ello, en la memoria del programa del aparato, se hayan depositadas una gran cantidad de funciones. Estas son llamadas de la memoria al estructurar o activadas al parametrizar, en función de la tarea específica a realizar en cada caso. Para ello no son necesarios conocimientos de programación, ni un aparato de programación adicional. En los textos siguientes se hace referencia a los conmutadores de estructuras correspondientes S1 al S48.

El ajuste de fábrica de los conmutadores de estructuras, existente al suministrar el aparato, corresponde de forma general a la posición "0". De esta manera, el regulador en la ejecución K (salida continua, 6DR2004), puede ponerse de inmediato en servicio en un lazo de acción normal como regulador de valor fijo, con entradas de corriente de 0 a 20 mA, margen de medida de 0 al 100 %. Si son necesarias funciones adicionales, o han de modificarse las existentes, o se trata de la ejecución S (salida de impulsos, 6DR2001), han de efectuarse varios ajustes antes de la puesta en marcha.

Como medida de seguridad, recomendamos comprobar siempre la idoneidad de los ajustes de fábrica para el comportamiento deseado del regulador, y adaptar éste modificando las estructuras (tabla 2), y ajustando los parámetros (tabla 1).

El regulador de proceso SIPART DR20, contiene en su ejecución básica los siguientes elementos:

- 1 Entrada analógica AE1 sin separación de potencial, para 0/4 a 20 mA en 249 Ω (S4).
- 1 Entrada analógica AE2 sin separación de potencial para 0/4 a 20 mA en 249 Ω (S5).
- 1 Entrada binaria BE (0/24 V) para diversas funciones (S15 y S16).
- 1 Salida binaria BA (0/24 V), para diversas funciones (S34 y S35).
- 1 Salida de la magnitud de ajuste Iy para 0/4 a 20 mA en el regulador K, (con salida continua 6DR2004), (S2 y S37).
- o
- 1 Salida de la magnitud de ajuste $\pm \Delta y$ con 2 relés, (máx. 250 V/5 A) en el regulador S (con salida de impulsos, 6DR2001), (S2, S39 y S40).

Además pueden enchufarse 4 módulos adicionales opcionales en puestos de enchufe ubicados en la parte trasera del regulador, para ampliar las funciones (figura 18).

Puesto de enchufe 1: AE3 (S6) Módulo de entrada 6DR2800-8J con separación electrónica de potencial para 0/4 a 20 mA en 49,9 Ω , también 0/0,2 a 1 V, o hasta 10 V, (figura 4).

- o Módulo de entrada 6DR2800-8R para transmisor de resistencia con valores nominales desde 100 a 1000 Ω , también para transmisor de corriente sin separación de potencial, (ajustable), (figura 5)
- o Módulo de entrada 6DR2800-8P para P_t100 en conexión a 2, 3 o 4 hilos (figura 6), lineal con la temperatura. El principio de escala y el margen de medida son ajustables en el propio módulo, (tabla 4).
- o Módulo de entrada 6DR2800-8T con separación electrónica de potencial para termoelementos, con punto de comparación interno o externo, y vigilancia de rotura del termoelemento con comportamiento seleccionable (figura 7). El principio de escala y el margen de medida son ajustables en el propio módulo, (tabla 3). Linealización con S8 = 1 mediante los parámetros L1 al L7, (tabla 1 y Página 57).

Puesto de enchufe 2: AE4 (S7) Pueden enchufarse las mismas opciones que en el puesto de enchufe 1 (AE3).

Puesto de enchufe 3: GW (S36) Módulo de salida 6DR2801-8D (figura 8), con 2 contactos de interruptor conmutador libres de potencial (máx. 35 V/5 A), para la señalización de valores límite de alguna de las magnitudes de proceso, (S22, S23 y S24).

- o Módulo de salida 6DR2801-8B (figura 9), con 4 salidas binarias para señalización del valor límite A1, A2 de alguna de las magnitudes del proceso (S22, S23 y S24) y de la salida de ajuste $\pm \Delta y$ en el regulador S, así como una entrada binaria BLPS para el bloqueo de los conmutadores de estructuras y de los ajustes de los parámetros.

Puesto de enchufe 4: SES Módulo de interfase 6DR2803-8A para la transmisión en serie de datos a sistemas supraordenados, mediante una línea de bus, (S42 al S48). Para mayores aclaraciones véase el instrucciones de servicio C73000-B7476-C128.

El regulador elabora 3 señales de entrada analógicas como máximo. La correspondencia de las entradas analógicas AE1 a AE4 a las señales de entrada posibles x_1 , x_2/W_E y y_N/Y_R se fija mediante el conmutador de

Conexión de las señales del proceso

Todas las líneas de entrada y de salida del aparato básico, son conectadas mediante un conector enchufable de 8 ó 10 polos, (figura 18 Pos. 18), según el esquema de conexión de la figura. La conexión de los módulos opcionales se efectúa según los esquemas de las figuras 4 a 9, mediante bornas de conexión separadas. Los puestos enchufables 1 a 4 han de identificarse en los esquemas de conexión y en las bornas.

Para evitar interferencias en los cables de medición deben de ser instalados separados de los de fuerza. En caso de que esto no fuese posible o, por motivo de la instalación no se puedan evitar interferencias, los cables deberán ser apantallados. El apantallamiento deberá ser conectado a tierra o a masa dependiente del punto de referencia que tenga la fuente de interferencias. En caso de conexión a tierra del apantallado, ésta se deberá hacer únicamente en un lado para evitar corrientes de derivación.

La conexión de cero voltios M, está disponible por duplicado en las bornas 6 y 7, además de las bornas de los módulos opcionales. A este punto de conexión de cero voltios, están referidas todas las señales de entrada y salida. En instalaciones con lazos de regulación no concatenados, no han de ser conectados los reguladores entre si. En todos los demás casos deben conectarse las conexiones M de todos los reguladores de manera individual y aislados a un colector común de cero voltios, o a un punto de estrella. Este punto de estrella puede conectarse con algún punto de la tierra de protección.

Si hay conductividades conectadas, han de instalarse circuitos de protección de acuerdo a las instrucciones del fabricante.

INSTRUCCIONES DE SERVICIO

Niveles de manejo

- Manejo del proceso El manejo del aparato en servicio con el proceso, es fácilmente identificable, gracias a la disposición y colores de los distintos elementos de manejo del panel frontal y sus correspondientes leyendas.
- Parametrizar Los distintos parámetros para adaptación del aparato a las características del tramo, son llamados y ajustados en servicio en línea, es decir, el regulador permanece en la forma de servicio seleccionada.
- Estructurar En la memoria del programa del aparato, están depositadas una gran cantidad de funciones de aplicación en instalaciones de procesos técnicos. El regulador es programado en servicio fuera de línea, en función de la tarea a realizar, seleccionando las funciones deseadas mediante el ajuste de conmutadores de estructuras. El regulador bloquea entre tanto su salida. Para ello no son necesarios conocimientos de programación.

La conmutación desde manejo del proceso a parametrización o estructuración, se realiza por motivos de seguridad en varios pasos, que han de ejecutarse en un plazo inferior a 20 segundos. En caso contrario se produce un salto automático al manejo del proceso.

- Preparación para la conmutación para parametrizar y estructurar. Accionar el pulsador 8 hasta que en el display de dos dígitos luzcan intermitentemente las letras "PS". Soltar el pulsador. La indicación "PS" luce de manera fija.
- Conmutación al nivel de parametrización Cuando luzca "PS", accionar el pulsador 12.1 mediante impulsos individuales, hasta que en el display de cuatro dígitos 4 hayan aparecido las letras "PAR". En el caso de que por descuido se hayan pasado las letras "PAR", aparecerán las letras "Str" y después de nuevo "PAR". Accionar el pulsador 5.1 ó el 5.2 una vez: aparecerá el parámetro seleccionado en último lugar, el nombre aparece en el display 6 y el correspondiente valor en el display 4. El indicador 1 muestra ahora como antes la diferencia de regulación para la observación del proceso.
- Selección del parámetro Mediante los pulsadores 5.1 ó 5.2 se pasa la lista de los parámetros hacia adelante o hacia atrás. (Tabla 1)
- Ajuste del parámetro El parámetro seleccionado en cada caso, puede ajustarse mediante los pulsadores 12.1 y 12.2; el valor indicado es operativo.
- Vuelta al servicio del proceso. Durante las operaciones de ajuste puede devolverse el aparato en cualquier momento al servicio del proceso accionando el pulsador 8.

Breves datos técnicos ³⁾

Temperatura ambiente admisible: 0 a 50 °C
 Protección: Frontal IP 64
 Carcasa IP 30
 Posición de montaje: Cualquiera.

Aparato básico.

- Alimentación.
 Márgenes de la tensión de alimentación
 6DR200* -1 230 V AC 187 a 276 V AC
 -2 115 V AC 93,5 a 138 V AC
 -4 24 V UC 20 a 30 V AC
 20 a 35 V DC
 Margén de frecuencia 47 a 63 Hz.
 Potencia aparente/ activa 21 VA/13 W.
- Alimentación de los convertidores de medida L +.
 Tensión nominal, ¹⁾ +20 V a +26 V.
 Corriente de carga ≤ 60 mA, protegida contra cortocircuitos ⁵⁾.
- Entradas analógicas AE1 y AE2.
 Señal de entrada, ¹⁾ 0/4 a 20 mA.
 Carga 249 Ω ± 0,1 %.
- Entrada binaria BE.
 Estado de la señal 0, ¹⁾ -35 V a +4,5 V.
 o abierto.
 Estado de la señal 1, ¹⁾ +13 V a +35 V.
 Resistencia de entrada ≥ 27 kΩ.
- Salida binaria BA.
 Estado de la señal 0, ¹⁾ ≤ 1,5 V o abierto residual ≤ 50 μA.
 Estado de la señal 1, ¹⁾ +19 V a +26 V.
 Corriente de carga ≤ 30 mA, protegida contra cortocircuitos.
- Magnitud de ajuste ly, regulador K.
 Señal de salida, ¹⁾ 0/4 a 20 mA.
 Tensión de carga -1 a 18 V.
 Carga inductiva ≤ 0,1 H.
- Magnitud de ajuste ± Δy, regulador S. relé
 Material del contacto Plata-Niquel.
 Capacidad de carga del contacto
 AC ≤ 250 V
 ≤ 5 A
 ≤ 1250 VA
 DC ≤ 250 V ≤ 50 W
 24 V ≤ 100 W
 ≤ 5 A

Opciones.

- I/U** 6DR2800-8J Entradas para I/U.
 Señal de entrada 0/4 a 20 mA.
 Carga 49,9 Ω ± 0,1 %.
 Señal de entrada 0 a 10 V.
 Resistencia de entrada 200 kΩ.
- R** 6DR2800-8R Entrada para potenciómetro, ²⁾.
 Señal de entrada
 R_N = 200, 500, 1000 Ω
 R = R_A + ΔR + R_E = 100 ... 1200 Ω
 Margen mínimo ΔR ≥ 0,3 R_N.
 Máxima supresión del cero R_A ≤ 0,2 R_N.
 Corriente de alimentación 5 mA ± 5 %.
 Señal de entrada corriente 0/4 a 20 mA en 49R9 Ω
- P** 6DR2800-8P Entrada para Pt100, ²⁾.
 Margen mínimo ΔR ≥ 19 Ω (50 K).
 Máxima supresión del cero R₀ ≤ 5ΔR.
- T** 6DR2800-8T Entrada para termoelementos, mV ²⁾.
 Tipo U Cu-CuNi DIN 43 710
 T Cu-CuNi IEC 584
 L Fe-CuNi DIN 43 710
 J Fe-CuNi IEC 584
 E NiCr-CuNi IEC 584
 K NiCr-Ni IEC 584
 R Pt13Rh-Pt IEC 584
 S Pt10Rh-Pt IEC 584
 B Pt30Rh-pt6Rh⁴⁾ IEC 584
 Margen mínimo ΔU ≥ 10 mV.
 Máxima supresión del cero U₀ ≤ 5ΔR.
 Tensión máxima ± 10 V.
- GW** 6DR2801-8B 4 BA, 1 BE
 (4 salidas binarias, 1 entrada binaria), véanse salidas y entradas binarias.
 Aparato básico.
- GW** 6DR2801-8D 2 salidas de relés.
 Material de los contactos Plata-Niquel.
 Capacidad de carga de los contactos
 AC ≤ 35 V
 ≤ 5 A
 ≤ 150 VA
 DC ≤ 35 V ≤ 80 W
 24 V ≤ 100 W
 ≤ 5 A

1) Referido a M.

2) Márgenes de medida preseleccionables y ajustables.

3) A partir de la ejecución nr. 2 de los aparatos (con una etiqueta amarilla o con una letra en la place de características)

4) Selección en E

5) con S23 = 3 hasta 5 sólo ≤ 30 mA a partir de software -B01

LISTA DE PARAMETROS

	Parámetro	Identificación	Indicación en el (6)	Min.	Max.	Ajuste de fábrica	Dim.	Resolución	Observaciones
Comportamiento en relación con el tiempo	Amplificación previa	Vv	"uu"	1.00	10.0	5.000	-	128 valores por octave	
	Coefficiente de proporcionalidad	Kp	"cP"	0.100	100.0	0.100	-		
	Tiempo de inercia (Acción integral)	Tn	"tn"	1.00	9984	9984	s		En el regulador PI (D), S28 = 0
	Punto de trabajo	Yo	"Yo"	Auto 0,0	99,5	Auto	%	0,1%	En el regulador P(D), S28 = 1 1)
	Tiempo de retención. (Acción derivativa)	Tv	"tu"	oFF 1.00	1000	oFF	s	128 valores por octave	Tv = Td · Vv En "oFF" son desconectados el miembro D, el filtro y la rampa del valor de consigna
	Constante del tiempo de filtro para xd.	TF	"tF"	oFF 1.00	1000	oFF	s		con S1 ≠ 7/8 con S1 = 7/8
	Rampa del valor de consigna	Tw	"tS"	oFF 1.00	9984 100	oFF	s		
	Tiempo de ajuste de la válvula/Periodo y +	Ty T+	"ty"	1.00	1000	60.00	s		Sólo en reguladores S, T +/- son válidos para ambos canales de salida en el regulador por pasos, S2 = 1.
	Periodo y-	T-	"t-"	1.00	1000	60.00	s		
Margen de indicación - linealización	Principio del margen de medida = 0 %	LA	"LA"	-1999	9999	0.0	-	1 punto decimal véase el S20)	Cuando S14 = 0 y S1 = 7,8 quedan los parámetros L1 a L7 sin efecto. (Véase la Página 57)
	Punto de la curva 1/8 = 12,5 %	L1	"L1"	-1999	9999	0.0	-		
	Punto de la curva 2/8 = 25 %	L2	"L2"	-1999	9999	0.0	-		
	Punto de la curva 3/8 = 37,5 %	L3	"L3"	-1999	9999	0.0	-		
	Punto de la curva 4/8 = 50 %	L4	"L4"	-1999	9999	0.0	-		
	Punto de la curva 5/8 = 62,5 %	L5	"L5"	-1999	9999	0.0	-		
	Punto de la curva 6/8 = 75 %	L6	"L6"	-1999	9999	0.0	-		
	Punto de la curva 7/8 = 87,5 %	L7	"L7"	-1999	9999	0.0	-		
Final del margen de medida: 100 %	LE	"LE"	-1999	9999	100.0	-			
Valor de consigna	Limitación del valor de consigna: Principio	wa wva	"SA"	-1999	9999	-5.0	-	1 dígito. (Punto decimal véase el S20)	Sólo pueden ajustarse valores wa/wva ≤ we/wve
	Limitación del valor de consigna: Final	we wve	"SE"	-1999	9999	105.0	-		
	Valor de consigna de seguridad	ws	"SH"	-1999	9999	0.0	-		
Valor límite	Valor límite-Valor mínimo	a2	"A2"	-1999	9999	-5.0	-	1 dígito. (Punto decimal véase el S20)	Sólo pueden ajustarse valores a2 ≤ a1. Con el S24 = 1 el a1 y el a2 son ajustables en el nivel de manejo
	Valor límite-Valor máximo	a1	"A1"	-1999	9999	5.0	-		
	Umbral de conexión del xd	A	"A"	0.0	10.0	0.0	%	0,1 % del valor final	En S2 = 2 y 3 ajustar A > 0
Magnitud de ajuste	Limitación del principio del valor de ajuste ya	ya	"yA"	-10.0	110.0	-5.0	%	0,1 % del valor final	Sólo pueden ajustarse valores ya ≤ ye. Particularidades: S2 = 1: ya e ye fijan la zona muerta S2 = 2: ya ye inactivos; ys sólo 0/100 % S1 = 10: ya/ye para 2 valores límite mín. máx.
	Limitación del final del valor de ajuste ya	ye	"yE"	-10.0	110.0	105.0	%		
	Valor de ajuste de seguridad	ys	"yS"	-10.0	110.0	0.0	%		
Con-stantes	Constante 1 (punto cero)	c1	"c1"	-199.9	199.9	0.0	%		
	Constante 2 (factor)	c2	"c2"	-199.9	199.9	0.0	%		

1) En el caso de Yo = Auto, el punto de trabajo en servicio manual se ajustará automáticamente, de manera que la conmutación a servicio automático se efectúa sin saltos. En los reguladores de pasos de tres puntos ha de trabajarse con retroacción externa de la posición (S2 = 3).
A partir de la versión A05 del Software.

LISTA DE ELEMENTOS DE ESTRUCTURA

Commutadores de estructuras y su posición	Función	Commutadores de estructuras y su posición	Función	
Ajustes básicos	S 1 Tipo del aparato: Véanse los Página 54 y 55. 0 Regulador de valor fijo. 1 Regulador de valor fijo con conexión de magnitudes perturbadoras en la entrada. 2 Regulador de valor fijo con conexión de magnitudes perturbadoras en la salida. 3 Regulador de valor fijo para servicio DDC, (control digital directo). 4 Regulador de seguimiento sin conmutación del valor de consigna interno/externo. 5 Regulador de seguimiento con conmutación del valor de consigna interno/externo y servicio SPC a través de la interfase serie. 6 Regulador sincronizado sin conmutación del valor de consigna interno/externo. 7 Regulador de relación. 8 Estación de relación (sólo salida continua). 9 Aparato de mando y estación automático/manual, aparato de mando manual DDC. 10 Indicador de proceso K: con salida continua del valor de consigna. Indicador de proceso S: con 2 avisadores de valores limite.	Entradas analógicas	S 10 Asignación de las entradas analógicas para la magnitud auxiliar de regulación x_2 , magnitud guía x_2 , (regulación de relación) o valor de consigna externo w_E : -2 AE1 (0/4 a 20 mA sin separación de potencial). -1 AE2 (0/4 a 20 mA sin separación de potencial). 0 AE3 (Opción para I/U, R, P, T). 1 AE4 (Opción para I/U, R, P, T).	
	S 2 Estructura de la salida: Véase la Página 60. 0 Salida continua (0/4 a 20 mA). 1 Salida de impulsos. Regulador de 2 pasos con 2 salidas para calentar/enfriar. 2 Salida de impulsos. Regulador de 3 pasos para accionamientos motorizados, con retroacción interna de posición. 3 Salida de impulsos. Regulador de 3 pasos para accionamientos motorizados, con retroacción externa de posición.		S 11 Vigilancia de los convertidores de medida: 0 Sin vigilancia. 1 x_1 - - 2 x_2/w_E - - 3 x_1 x_2/w_E - - 4 - - YR/YN 5 x_1 - YR/YN 6 - x_2/w_E YR/YN 7 x_1 x_2/w_E YR/YN	
	S 3 Filtrado de la frecuencia de la red: 0 para 50 Hz 1 para 60 Hz		S 12 Radicación de la magnitud principal de regulación x_1 : 0 No 1 Si	
	S 4 Entrada de señal de la AE1: 0 0 a 20 mA 1 4 a 20 mA		S 13 Radicación de la x_2 : 0 No 1 Si	
	S 5 Entrada de señal de la AE2: 0 0 a 20 mA 1 4 a 20 mA		S 14 Linealización de la magnitud principal de regulación x_1 : 0 No 1 Si Véase la Página 57	
	S 6 Entrada de señal de la AE3: 0 0 a 20 mA o U, R, P, T 1 4 a 20 mA		Entradas binarias	
	S 7 Entrada de señal de la AE4: 0 0 a 20 mA o U, R, P, T 1 4 a 20 mA			S 15 Función de las entradas binarias BE: ¹⁾ véase la Página 46 0 BL Bloqueo de la magnitud de ajuste. 1 Si Valor de ajuste de seguridad $y = y_S$. CB sin acuse de recibo 2 N Seguimiento de la salida $y = y_N$. 3 CB Señal de disponibilidad del computador. 4 BE a interfase serie. 5 BLPS Bloquear/Parametrizar/Estructurar
	S 8 Asignación de las entradas analógicas a la magnitud principal de regulación x_1 : 0 AE1 (0/4 a 20 mA sin separación de potencial) 1 AE3 (Opción para I/U, R, P, T).			6 BL Bloqueo de la magnitud de ajuste. 7 Si Valor de ajuste de seguridad $y = y_S$. CB con acuse de recibo 8 N Seguimiento de la salida $y = y_N$. 9 CB Señal de disponibilidad del computador. 10 BE a interfase serie. 11 BLPS Bloquear/Parametrizar/Estructurar
	S 9 Asignación de las entradas analógicas a la retroacción de posición, (entrada de posición) y_R o seguimiento de la posición y_N . 0 AE2 (0/4 a 20 mA sin separación de potencial) 1 AE4 (Opción para I/U, R, P, T).			S 16 Sentido de la acción de la entrada binaria BE: 0 13 a 30 V = 1 lógico 1 0 V/abierto = 1 lógico
				S 17 x-tracking, (seguimiento de x): ($w = x$, $wv = xv$) en servicio H-, N-, DDC-, BI- y Si 0 No 1 Si
	S 18 Valor de consigna W en caso de fallo de CB: 0 Internò w. 1 Valor de consigna de seguridad w_S			
	S 19 Seguimiento del valor de consigna interno w_i al valor de consigna efectivo, (externo) w: 0 Si 1 No			

Commutadores de estructuras y su posición	Función	Commutadores de estructuras y su posición	Función
Indicación	S 20 Indicación 4 Punto decimal en el display 4 para w-x-A2-A1-SH (inactivo en el caso de S1 = 7 y 8) -1 x x x x 0 x x x. x 1 x x. x x 2 x. x x x	Commutación de la salida	S 29 Prioridad N (DDC), BL ó H: 0 N (DDC), BL 1 H
	S 21 Tiempo de refresco de la indicación digital: -3 0,1 s -2 0,2 s -1 0,5 s 0 1 s 1 2 s 2 5 s oFF Indicador 4 desconectado, indicador 6: 0,1 s		S 30 Servicio manual en caso de rotura del convertidor de medida (S11): 0 Sin conmutación a servicio manual 1 Servicio manual con el último valor de ajuste 2 Servicio manual con valor de salida de ajuste de seguridad.
Avisadores de valores límite	S 22 Entrada de los avisadores de valores límite: S 1 = 0 a 6, 9, 10 | 7, 8 0 $\frac{xd(f)/xw(f)}{w}$ | $\frac{wv - xv/xv - wv}{wv}$ 2)3) 1 x | xv 2 w | wv	Indicador de y	S 32 Indicación de la magnitud de ajuste: 0 Salida y del regulador 1 Señal de retroaviso y _R oFF Sin indicación. 2 Splitrange y +, y- 3)
	S 23 Función de los avisadores de valores límite: A1 A2 | 6DR2801-8B: 0 máx. min. | si A1 = 0 1 mín. mín. si A2 = Hi será A1 = Lo | A2 = Hi 2 máx. máx. si A1 = Hi será A2 = Lo | BA = +24 V		S 33 Sentido de la acción del indicador de posición: 0 Normal (indicación de y = y o a y _R) 1 Revertido indicación de y = 100 % - y o a 100 % -y _R)
	3 3) máx. min. | si A1 = 0 4 mín. mín. si A2 = Hi A1 queda | A2 = Hi 5 máx. máx. si A1 = Hi A2 queda | BA = 0 V	Salida binaria	S 34 Función de la salida binaria BA: 0 RC Regulador en servicio sin computador. 1 H Regulador en servicio manual. 2 RB Regulador no dispuesto para servicio con computador 3 MuSt Rotura del convertidor de medida. 4 BA Es activada mediante la interfase serie.
	S 24 Ajuste de los valores límite A1 y A2: 0 Sólo en el nivel de parametrización. 1 También en el nivel de manejo del proceso.		S 35 Sentido de la acción de la salida binaria BA: 0 1 lógico: 24 V 1 1 lógico: 0 V
Indicador de xd	S 25 Margen de indicación del indicador 1: -2 ± 2,5 % -1 ± 5 % 0 ± 10 % 1 ± 20 % 2 ± 40 % oFF Indicador desconectado. 3 ± 40 % 4 ± 20 % 5 ± 10 % 6 ± 5 % 7 ± 2,5 %	Dotación del módulo GW	S 36 Dotación del módulo opcional GW: Salidas de valores límite: 0 El regulador está equipado con el módulo 6DR2801-8D = 2 relés para las A1/A2 o no está equipado con GW. 1 El regulador está equipado con el módulo 6DR2801-8B = 4 salidas binarias para las A1, A2 y ± Δy así como 1 salida binaria para el bloqueo de la parametrización/estructuración, (las salidas de relés ± Δy del aparato básico quedan sin función).
	S 26 Sentido de la acción del regulador en el tramo de regulación: 0 Normal (K _p > 0) 1 Revertido (K _p < 0) } referido a xd = w - x		
Algoritmos	S 27 Entrada del miembro D: 0 xd (f) 1 x 2 x2/we (r) Sentido de la acción en sentido contrario al la x 3 x2/we(r) Sentido de la acción en el sentido de la x		
	S 28 Algoritmo de regulación: 0 PI (D) 1 P (D) Ver página 43 Indice 1)		

1) a partir de la versión A08 del Software.

2) a partir de la versión A09 del Software.

3) a partir de la versión B01 del Software.

Conmutadores de estructuras y su posición		Función	Conmutadores de estructuras y su posición		Función	
Regulador K	S 37	Salida de corriente Iy del regulador K, (sólo en el caso de S2 = 0):	Interfase serie (SES)	S 42 0	Transmisión de datos El regulador emite todas las magnitudes y no recibe ninguna	
	0	0 a 20 mA		1	El regulador emite todas las magnitudes y recibe los parámetros y las estructuras	
1	4 a 20 mA	2		El regulador emite todas las magnitudes y recibe los parámetros y las estructuras así como las magnitudes de proceso y el registro de estado	CB _{ES} y CB _{BE} juntos el función O	
S 38	Desconexión de la Iy en servicio DDC, (sólo en el caso de S2 = 0 y S1 = 3 o 9):	3		El regulador emite todas las magnitudes y recibe los parámetros y las estructuras así como las magnitudes de proceso y el registro de estado	CB _{ES} y CB _{BE} juntos el función Y	
0	No	S 43		Velocidad de transmisión:		
1	Si	0		9600 bit's		
Regulador S	S 39	Duración mínima del impulso de ajuste te		1	4800 bit's	
	S 40	Duración mínima de la pausa ta		2	2400 bit's	
	-9	20 ms		3	1200 bit's	
	-8	40 ms		4	600 bit's	
	-7	60 ms	5	300 bit's		
	...	...	S 44	Paridad cruzada:	
	...	...	0	Lineal.	
	-1	180 ms	1	No lineal.		
	0	200 ms	S 45	Posición de la paridad longitudinal:		
	1	220 ms	0	Sin.		
...	...	1	Después del ETX.			
...	...	2	Antes del ETX.			
Premisas de partida	S 41	Condiciones de re arranque después de la recuperación de la tensión y Autoreset	S 46	Paridad longitudinal:		
	0	Servicio automático, externo con el último w o wv; y comienza con ys, para reguladores S (S2 = 2 y 3) con la última posición	0	Normal		
	1	Servicio automatico e interno con w = ws o wv + wvs; y como en S41 = 0	1	Invertida.		
	2	Servicio manual, externo con el último w o wv e y = ys, para reguladores S (S2 - 2 y 3) con la última posición	S 47	Número de la estación (dirección):		
	3	Servicio manual e interno con w = ws o wv = wvs, y como en S41 = 2	0	0		
	4	Servicio automático, externo con el último w o wv; y comienza con ys, para reguladores S (S2 = 2 y 3) con la última posición	1	1		
	5	Servicio automatico e interno con w = ws o wv + wvs; y como en S41 = 0	2	2		
	6	Servicio manual, externo con el último w o wv e y = ys, para reguladores S (S2 - 2 y 3) con la última posición	...	...
7	Servicio manual e interno con w = ws o wv = wvs, y como en S41 = 2	31	31			
		S 48	Vigilancia del tiempo CB _{ES} :			
		0	Sin.			
		1	1 s			
		2	2 s			
		3	3 s			
				
		24	24 s			
		25	25 s			

Tabla 2: Conmutadores de estructuras

1) Las señales BL, Si, N, BLPS y BE son Lo cuando no han sido seleccionadas. La CB es Hi cuando el S42 = 0/1, y Lo con el S42 = 2, siempre que no esté conectada con la BE. En el caso de S15 = 0 hasta 5 se conmutará automáticamente a servicio con ordenador siempre que se reciba la señal CB y la tecla 13 se encuentre en posición de servicio externo. En el caso del S15 = 6 hasta 11 se conmutará a servicio interno cuando se reciba la señal CB y siempre que la tecla 13 se encuentre en la posición de servicio externo, y sólo se accederá al servicio con ordenador, efectuando una conmutación manual a servicio externo (acuse de recibo).

Posición S15 = 6...11 a partir de la versión A05 del Software.

2) a partir de la versión A09 del Software.



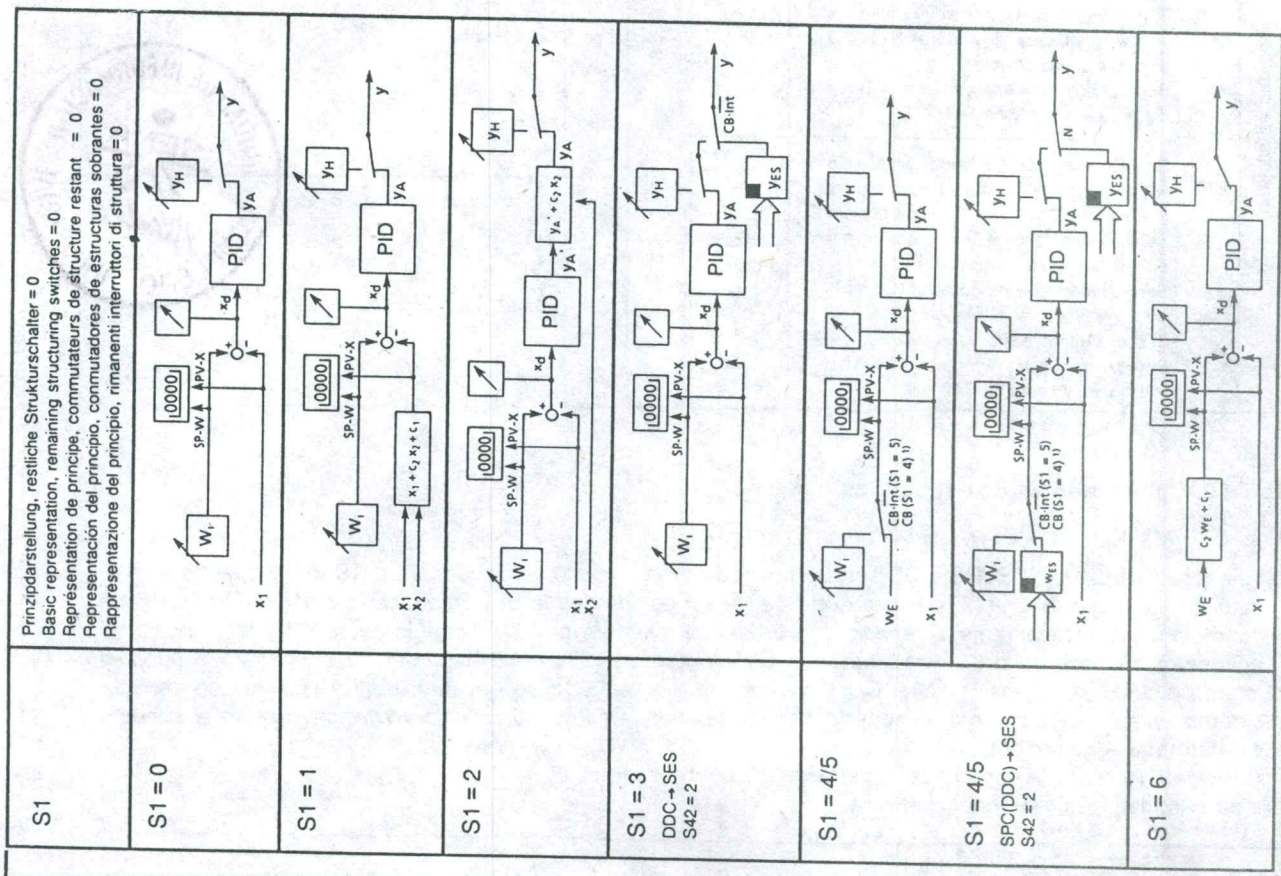


Bild / Fig. 11 Gerätetyp / Device type / Type d'appareil / Tipo del aparato / Tipo strumento
 1) Software/logiciel ≥ A10

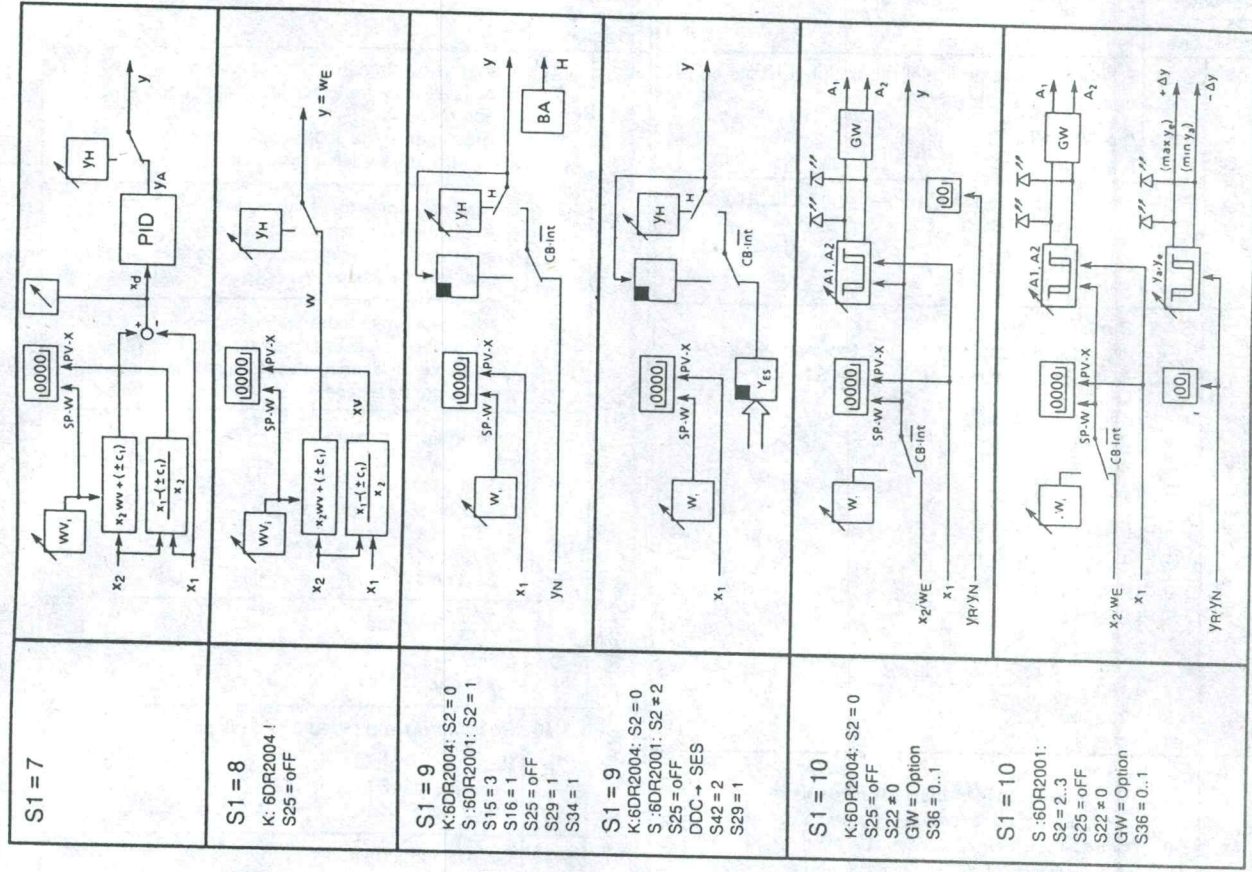


Bild / Fig. 11 Gerätetyp / Device type / Type d'appareil / Tipo del aparato / Tipo strumento

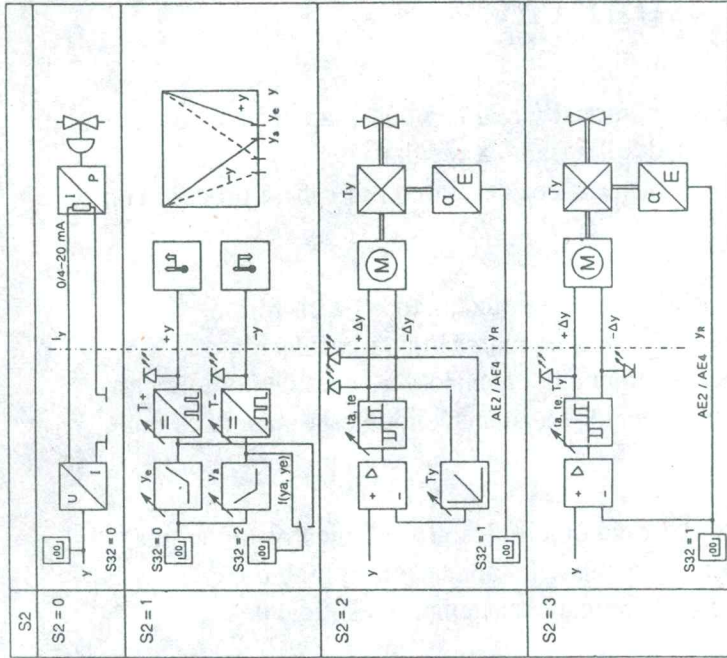


Bild / Fig. 12 Ausgangsstrukturen / Output structures / Structures de sortie / Estructuras de la salida: Structure di uscita

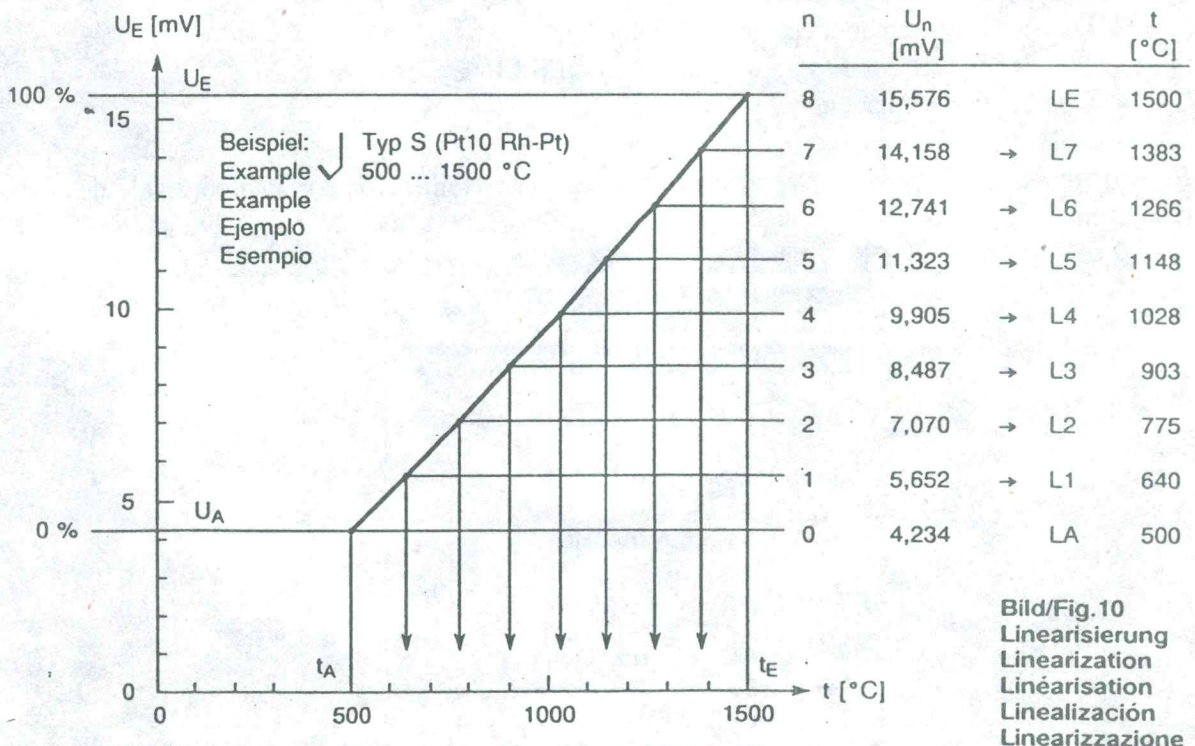
Externe Vergleichsstelle mit I_0 , $U_0 = U_{IA} - U_{IG}$, mV-Geber: $U_0 = U_A$ Rangierung Thermoelementtyp einpolig auf stecken.
 Rangierung des Meßanfangs U_0 :
 Polarität: $U_0 \geq 0$: Brücke 0 = P, $U_0 < 0$: Brücke 0 = N.
 Wert: mV 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 additiv stecken. Brücken der nicht benötigten Teilspannungen einpolig auf Stifte der Reihe 0 stecken.
 Rangierung der Meßspanne ΔU : siehe Tabelle $\Delta U = U_{IG} - U_{IA}$
 Thermoelementbruchverhalten: \downarrow festliegen: - || x=0 oder + || x=100 %
 Anmerkung (gilt auch für Tabelle 4): nur 1 Buchstabe in den Tabellen bedeutet Brücke einpolig aufstecken.
 Internal cold junction: reference temperature is 0 °C, $U_0 = U_{IA}$ (U_{IA} = start of measuring range), take directly from D IEC tables. Connect for thermocouple type. Adjust with mV transmitter in TEST position, operation in NORMI position
 External cold junction with I_0 : $U_0 = U_{IA} - U_{IG}$, mV transmitter: $U_0 = U_A$ connect for single-pole thermocouple type to I
 Connections for start of measurement U_0 :
 Polarity: $U_0 \geq 0$: Jumper 0 = P, $U_0 < 0$: Jumper 0 = N.
 Value: Connect mV 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 accumulatively. Connect single-pole jumpers of component voltages which is not required to pin of row 11.
 Connections for span ΔU : see Table $\Delta U = U_{IG} - U_{IA}$
 Determine reaction of sensor break: \downarrow - || x=0 or + || x=100 %
 Note: (only valid for Table 4): only 1 character in the tables means connect single-pole jumper

S14=1 Linealización

1. Dividir el margen de medida U_A a U_E en ocho partes iguales. Inscribir las tensiones parciales en la tabla:

$$U_n = \frac{U_E - U_A}{8} \cdot n + U_A \text{ con } 0 \leq n \leq 8$$

2. Calcular para cada U_n la temperatura correspondiente, tomándola de las tablas de termoelementos DIN/IEC, y darlas como LA; L1 hasta L7; LE.



SISTEMA DE INVESTIGACION Y ADAPTACION

Para poder regular al óptimo un proceso industrial y real hay que adaptar preciso las características del regulador a la propiedades del tramo a regular.

Por lo general no se conocen los datos característicos del tramo por ser un proceso con innumerables imponderables efectos.

La adaptación óptima del regulador hacia el tramo se efectua todavia en forma experimental y empirica al momento de la puesta en marcha de la instalación. El logro depende mucho de la experiencia amplia del técnico y a veces demora mucho hasta que el sistema funciona satisfactoriamente. La adaptación de esta manera es muy fastidioso y demora mucho.

Por otra parte existen por la teoría de regulación múltiples procedimientos modernos para lograr una adaptación óptima del sistema a regular. La aplicación es muy compleja y generalmente los técnicos no disponen de habilidades matemáticas suficientes.

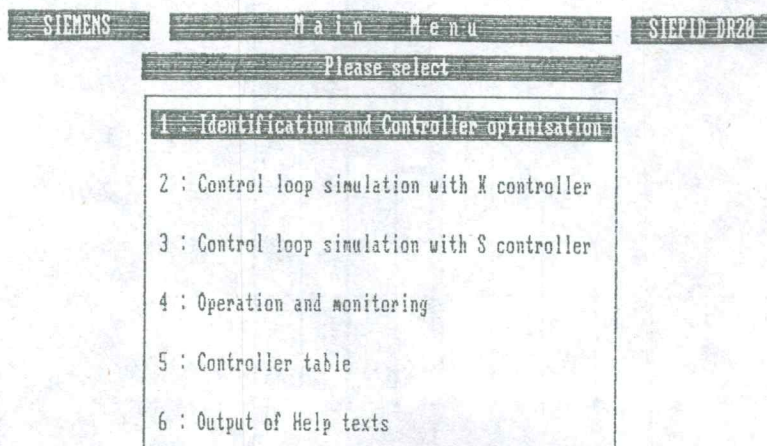
Un procedimiento orientado por la practica utiliza el poder de los ordenadores y junto con un regulador digital existe ahora la posibilidad de que la teoría y la práctica se acercan y estara una herramienta muy valioso para el técnico de regulación.

SIEPID es un producto software de la casa SIEMENS especialmente diseñando para el regulador digital SIEPART DR 20.

La adaptación de un tramo de regulación con SIEPID se realiza en cuatro pasos:

1. Identificación del proceso
2. Diseñar las características del regulador
3. Simulación del circuito de regulación en OFF LINE
4. Operación y vigilancia del proceso

El programa SIEPID puede ser aplicado en tramos con estabilisación con una constante de tiempo mayor que 2,5 s.



La identificación del tramo puede realizarse con lazo abierto o lazo cerrado.

Estimulo para la identificación

La variación de la magnitud a regular se tiene controlado

Lazo cerrado

=== > Regulador SIEPART DR 20 en posición automática

Salto en la magnitud de referencia W

Variación de la magnitud de ajuste
según el proceso

La variación de la magnitud a regular depende del proceso

Lazo abierto

=== > Regulador SIEPART DR 20 en posición manual

Salto en la magnitud de ajuste Y

Variación de la magnitud de ajuste
no hay - curva recta constante

Al momento que el proceso se encuentra en un estado estable se da el arranque del estímulo.

El proceso será observado y registrado por el programa software SIEPID hasta que nuevamente se logra un equilibrio.

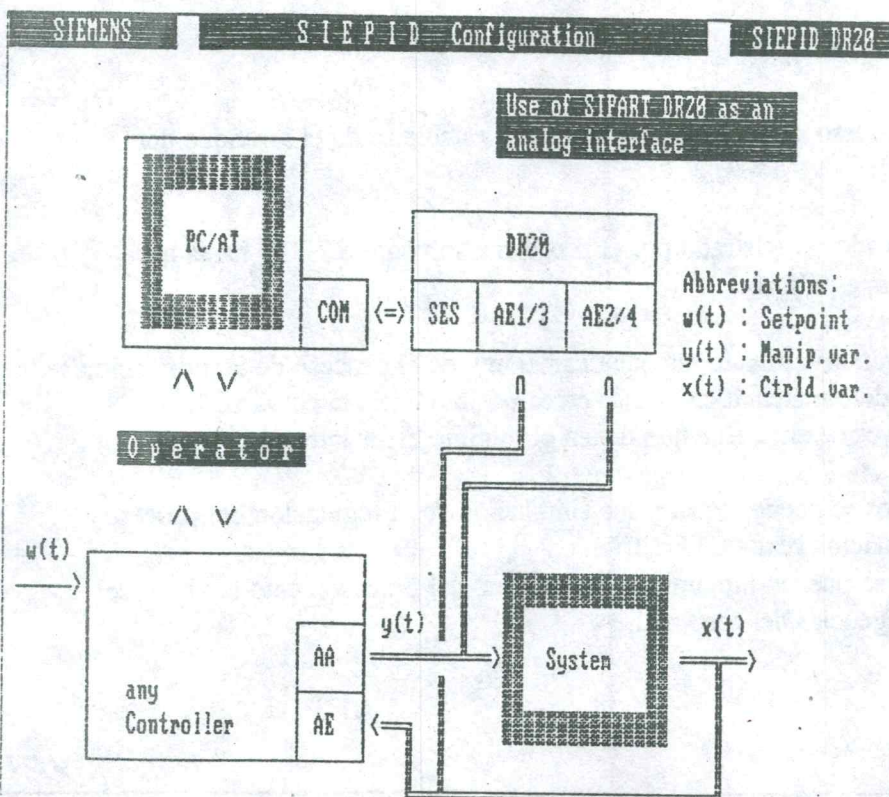
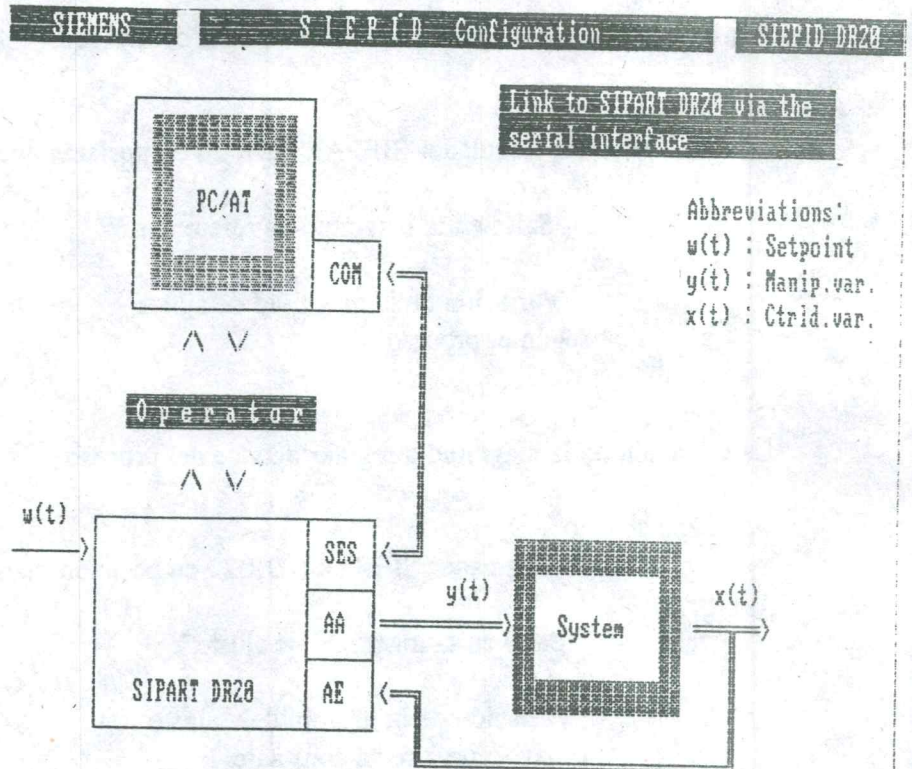
Los datos medidos serán investigados matemáticamente y en el proceso de identificación se trata a calcular un modelo matemático lo más cerca posible hacia la curva real. De los múltiples ensayos se elige este que tienen el mínimo error integral.

Con los datos obtenidos se puede realizar una simulación de la regulación del proceso desconectado de la situación real - OFF LINE.

En este modo todavía se pueden mejorar los parámetros del proceso como también del regulador según las exigencias del caso real.

Los datos obtenidos para instalar el regulador serán transmitidos directamente hacia el regulador SIEPART DR 20 con el interface serial.

Con el ordenador conectado se pone en marcha el proceso y ahora es posible operarlo y vigilarlo realizando los reajustes en el proceso real. - ON LINE -



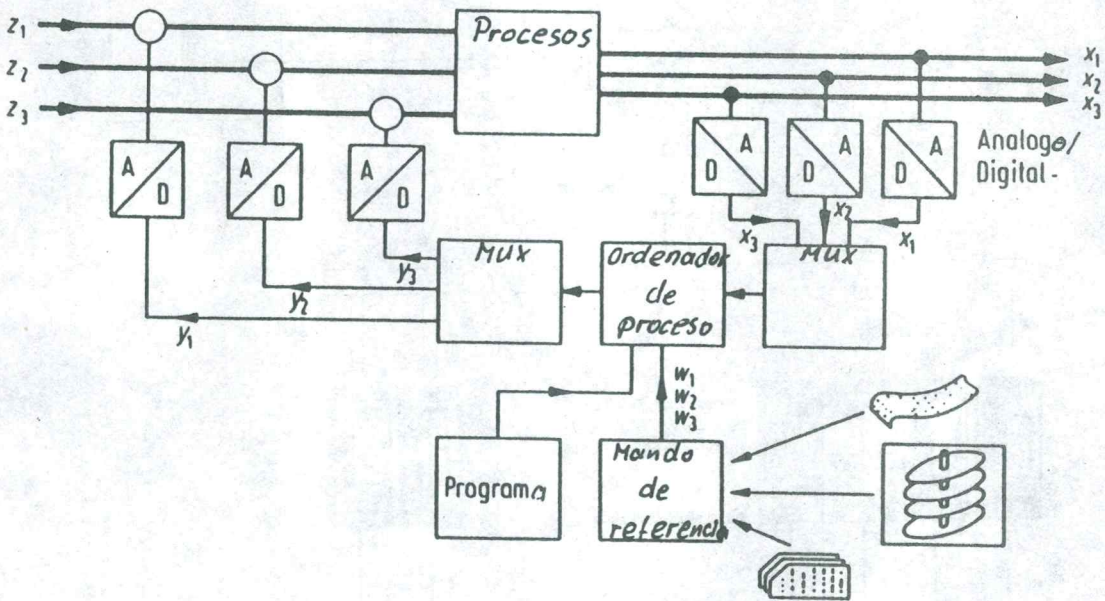
SISTEMAS DE ORDENADORES DE PROCESOS

Procesos de producción industrial - tal como la industria alimenticia, química o procesos de generación de energía - son procesos muy complejos en los cuales uno depende de otro. Para obtener una producción de alta calidad y con el mejor rendimiento económico hay que lograr una regulación del conjunto al óptimo.

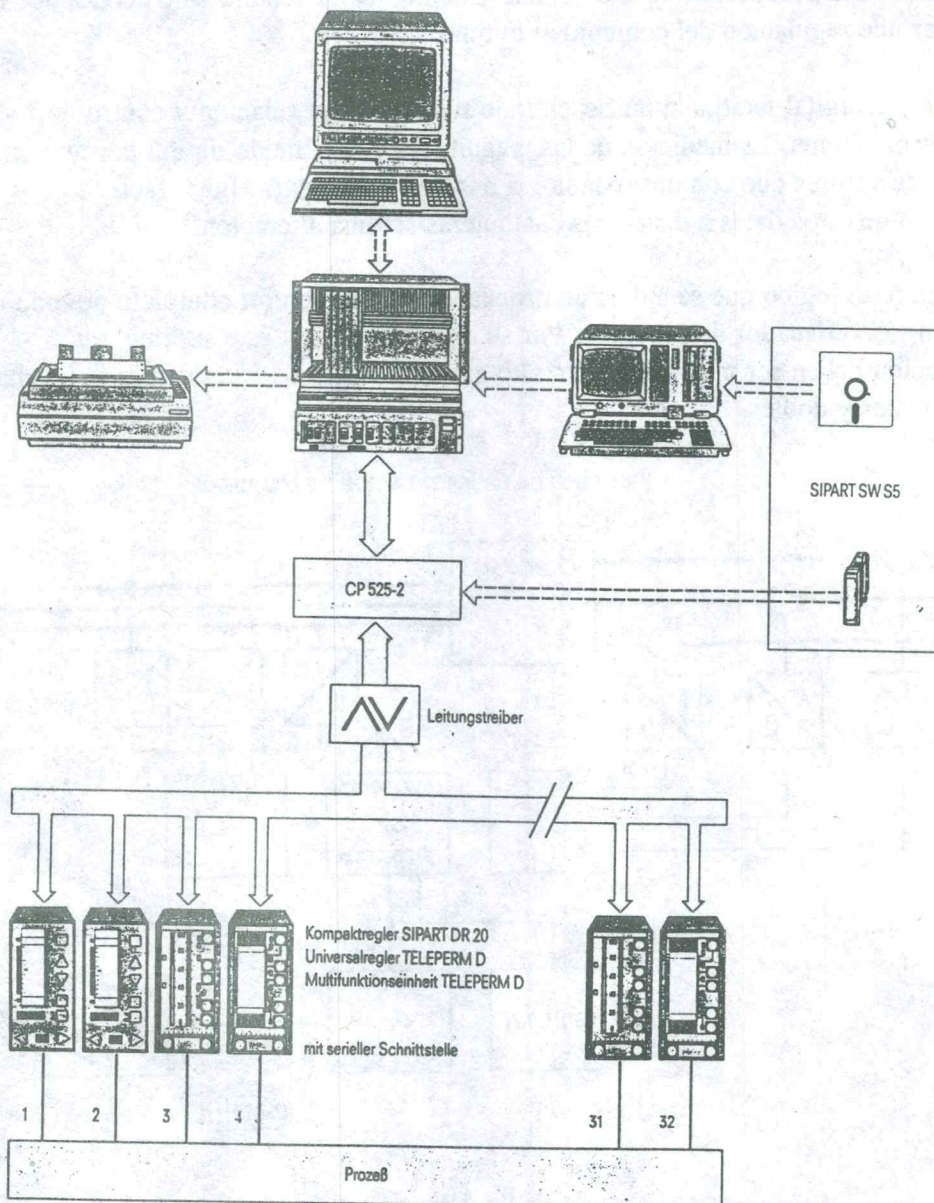
La tecnología digital facilita la unificación de sistemas de regulación y control por sistemas superpuestos pilotos. La medición de las magnitudes con el modo digital permite una exactitud de valores que con una tecnología analógica no se logra. Igual fácil es la transmisión de estos datos a distancias cualesquiera sin una alteración.

Es solo un paso lógico que se aplica un ordenador para el control completo de toda una fabricación - el ordenador de procesos. Por su alta importancia este sistema y la programación deben ser muy fiable. Un alto grado de seguridad se logra con sistemas independientes y dobles.

PRINCIPIO DE LA REGULACION DE PROCESOS



Un otro ejemplo es el sistema de interconexión de reguladores independientes de la casa SIEMENS - reguladores digitales DR 20 con un sistema de Bus para la comunicación. Este sistema permite manejar y supervisar hasta 32 reguladores digitales de tipos diferentes.



Proyecto:

Regulador análogo PID

A- Descripción general

El circuito regulador PID de aplicación general se ha realizado a base de amplificadores operacionales.

La señal de entrada - la magnitud a regular X - es normalizada y varia entre 0 V a 10V , lo que corresponde a 0% y 100% .

La salida - la magnitud de ajuste Y - tiene tres opciones:

- Salida de tensión (Vout) (0 - 10 V) con 10 mA maximo
- Salida de potencia (Pout) (0 - 10 V) con 1 A maximo
- Salida de corriente (Iout) (0 - 20 mA) (10 V maximo ó 500 Ohm)

Por medio de tres potencímetros se pueden ajustar los parámetros de cada etapa de los reguladores, tales como son Cp; Tn y Tv.

Para la entrada X se ha previsto un adaptador de impedancias, lo que permite amplificar la entrada por un factor determinado.

B - Funcionamiento

En la entrada W se conecta la señal de referencia, que puede variar entre 0-10V. En la entrada X se coloca el valor real X de la magnitud a regular (0-10V).

La primera etapa es un sustractor (AMPL U1B). La señal de salida es el error de regulación $e = W - X$. La ganancia de esta etapa es 1.

La señal de error de regulación (U_DIFF) se entrega a la segunda etapa a los tres circuitos - P, I, D - .

La ganancia del amplificador P se ajusta con el potencímetro y puede variarse entre 1 a 10 con el puente colocado. Para otras ganancias se saca el puente y se colocan las resistencias adecuadas.

El dato característico del integrador es el tiempo de integración . T_I

$$T_I = R * C$$

Variando P2 se pueden ajustar diferentes valores para T_I .

El diferenciador tiene un adaptador de impedancias para separar la acción de esta etapa de las otras. También hay una combinación RC para ajustar el coeficiente diferencial.

Las tres partes P- I - D se suman en la siguiente etapa, el sumador. Colocando las puentes se pueden elegir los componentes deseados.

Con P4 se puede ajustar la ganancia de esta etapa final.

La salida es la magnitud de ajuste Y.

Existen dos opciones usar esta señal de salida en un lazo de corriente 0-20mA por medio de un convertidor U/I o tomar la salida de potencia colocando directamente el circuito de regulación.

C- Medición y ajuste

1. Control de la primera etapa

- Conecte 5 V como señal de referencia en W.
- En la entrada X se coloca lo mismo.
La salida e tendría que ser , 0V.
- Con una variación de +/- 1V en U_x ,
debería variar igual la señal en e.

2. Calibración de la escala de ganancia

Anulando I, D se verifica la ganancia en las diferentes posiciones del potencímetro P1 (0%; 10%... 100%)

A la vez se puede verificar la fuente de corriente Y_i .

3. Calibración del integrador

Anulando P, D se verifica la constante de integración T_I en las diferentes posiciones del potencímetro P2 (0%; 10%... 100%)

Para eso se aplica en la entrada X una señal de onda rectangular y con el osciloscopio se mide el tiempo que demora la señal de salida Y_V hasta que alcance el valor de la entrada.

4. Calibración del diferenciador

Anulando P, I se verifica la constante de diferenciación T_D en las diferentes posiciones del potencímetro P2 (0%; 10%... 100%)

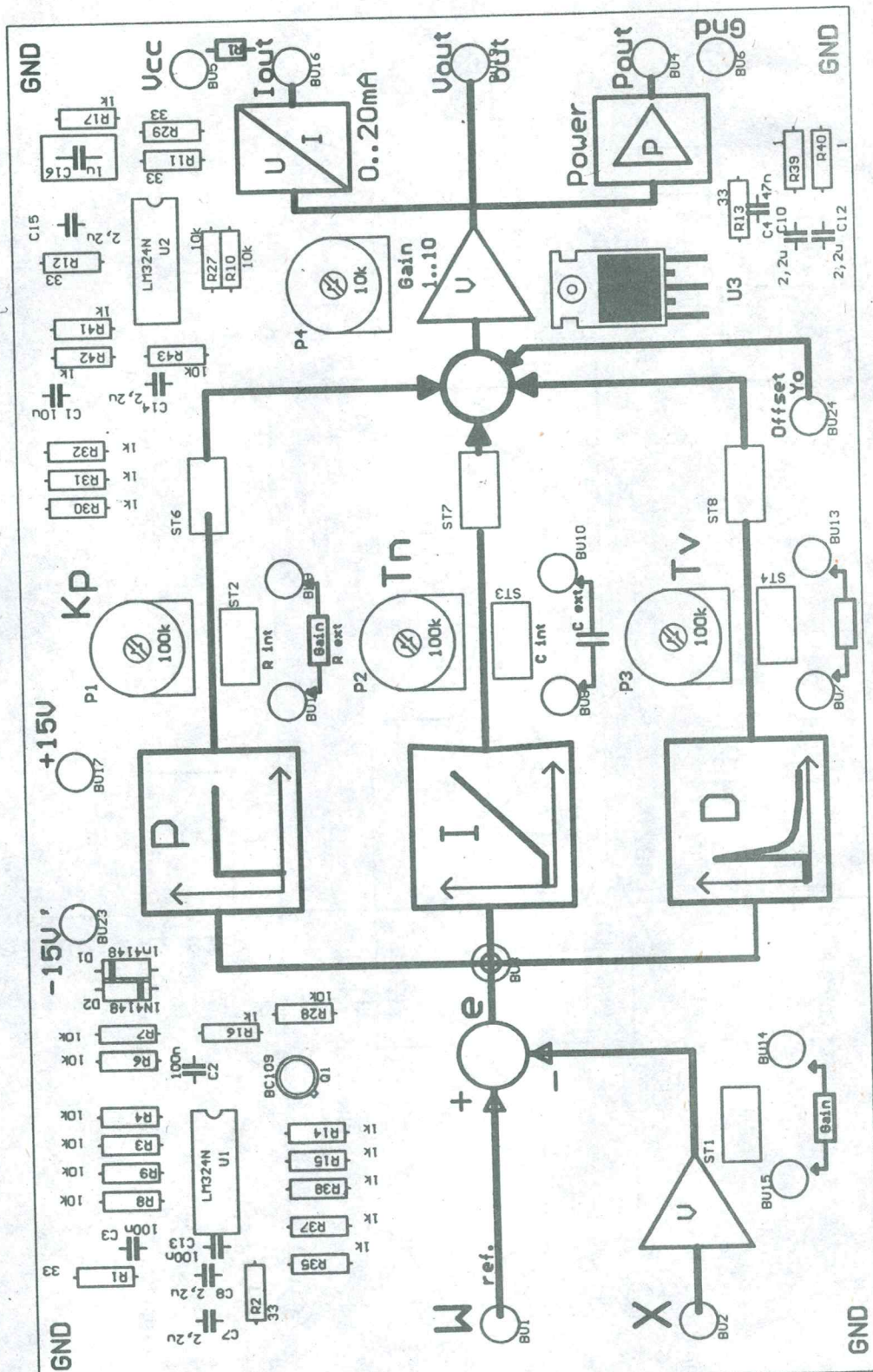
Para eso se aplica en la entrada X una señal de onda triangular y con el osciloscopio se mide el tiempo que demora la señal de entrada X hasta que alcance el valor de la salida Y_V .

5. Ajuste del regulador PID a datos preconcebidos

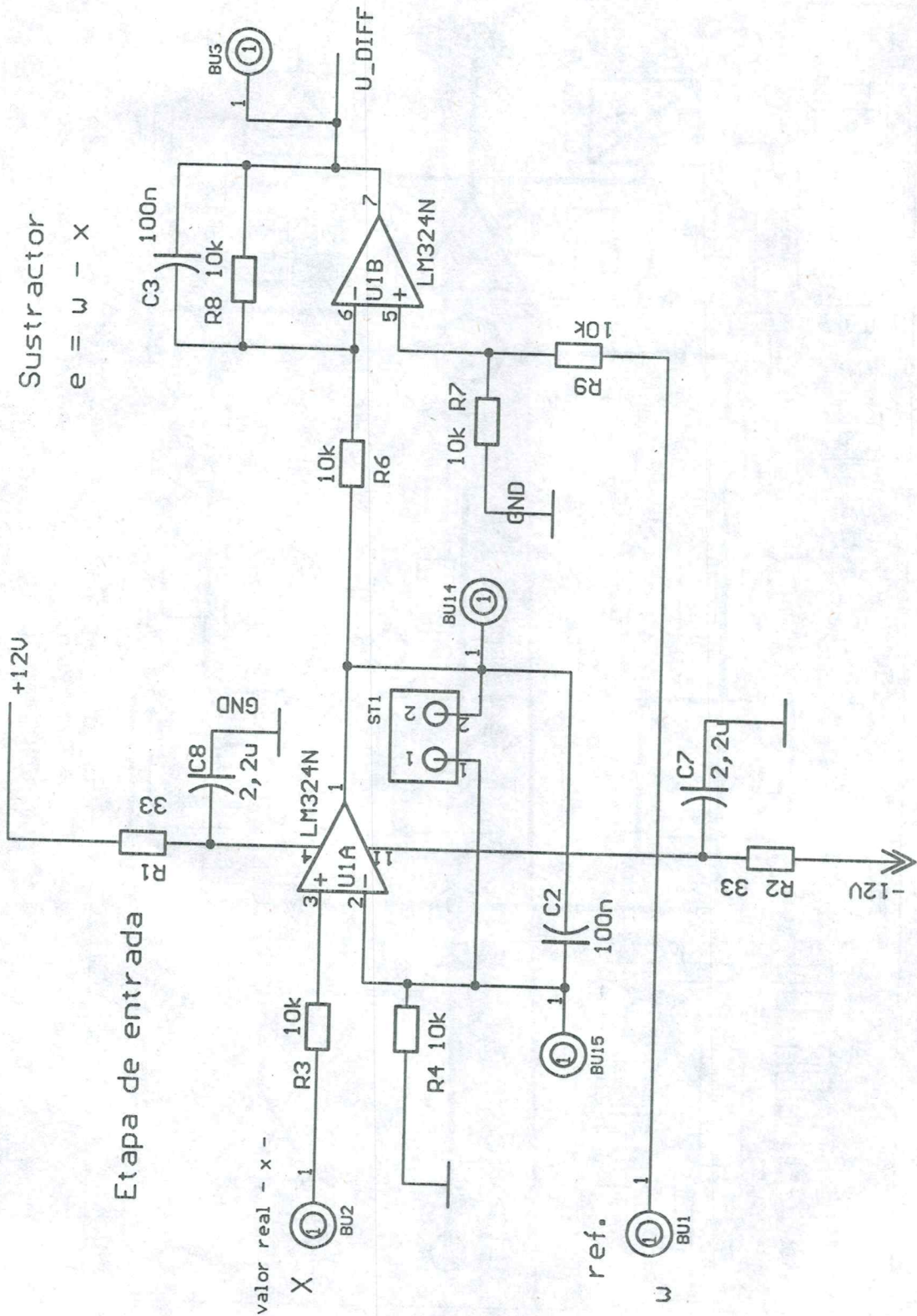
El regulador PID debe poseer de los siguientes datos:

$$K_p = 5; T_N = 1s; T_V = 1s$$

Placa - Regulador análogo P-I-D
 vista de arriba



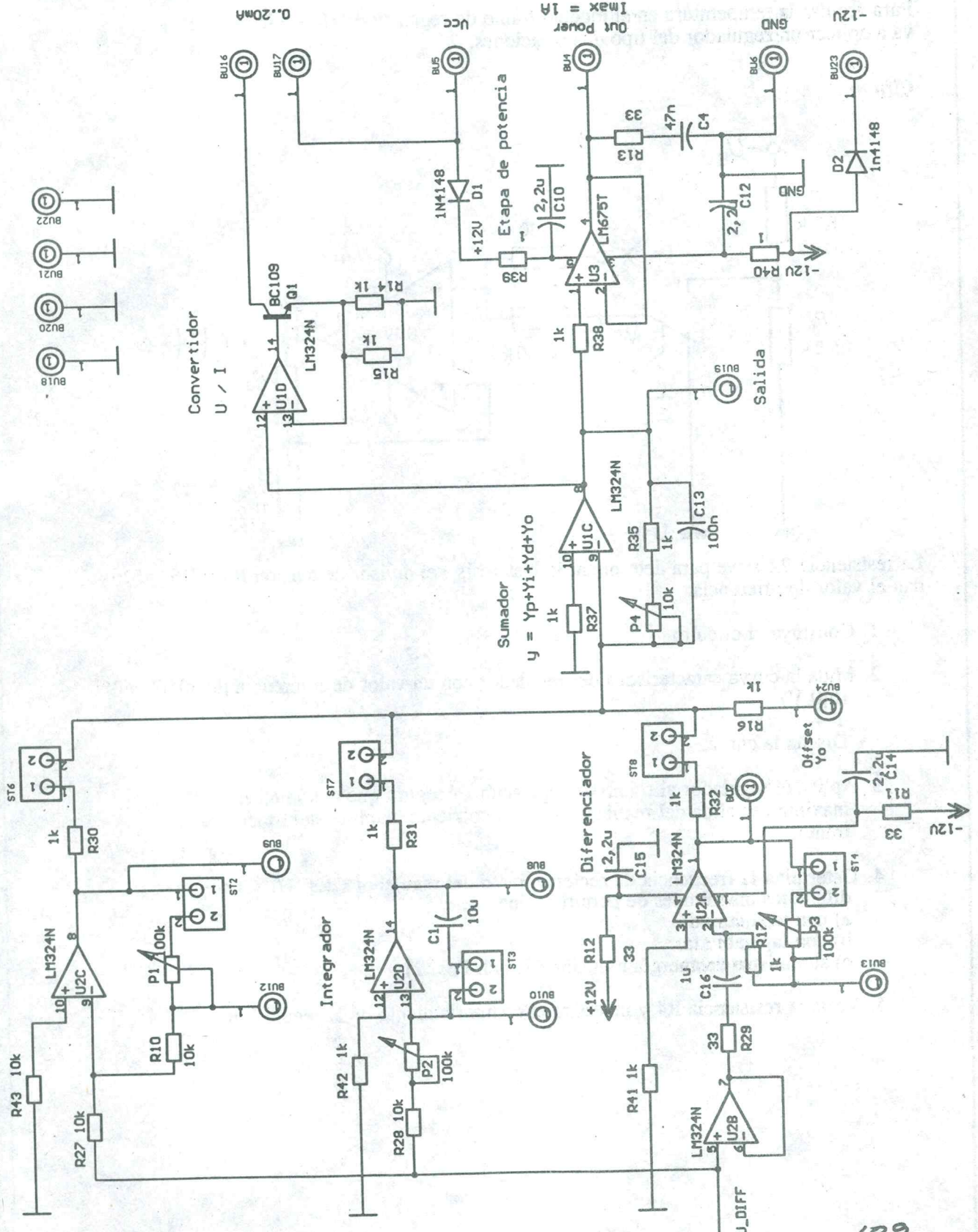
Regulador análogo P-I-D
 Esquema electrico - Etapa de entrada
 - Adaptador de impedancias y sustractor



Regulador análogo P-I-D

Esquema electrico - segunda etapa y etapa de salida

- Componente P-I-D - sumador -
- Amplificador de potencia - convertidor U/I -

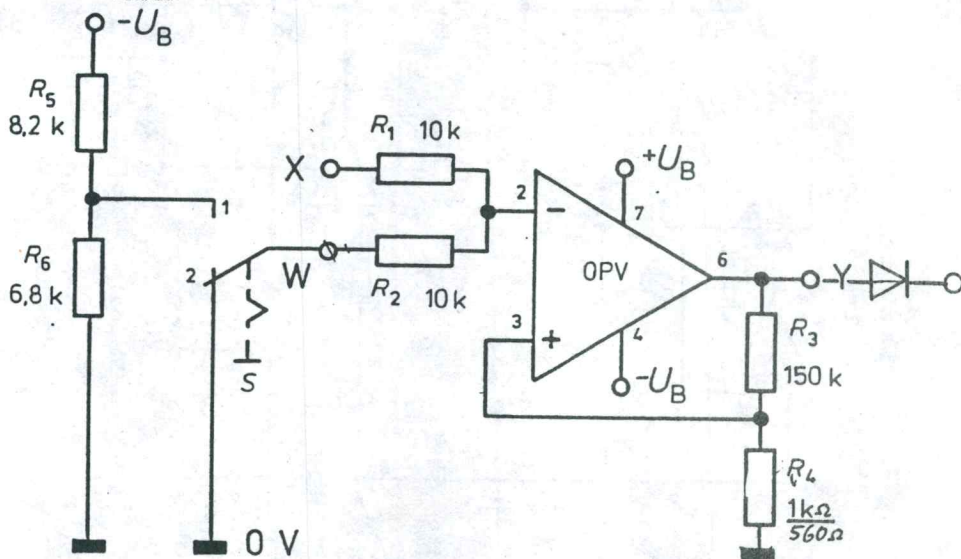


Laboratorio

REGULACION DE LA TEMPERATURA

Para regular la temperatura en el modelo tramo de regulación "Horno industrial" se va a aplicar un regulador del tipo dos posiciones.

Circuito



La resistencia R4 sirve para determinar la histeresis - el divisor de tensión R5 y R6 dan el valor de referencia.

1. Constuya el circuito
2. Mida la curva característica del regulador con un valor de referencia de 60°C (6,0 V)
 $Y = f(x)$
 Diseña la curva.
3. Aplica el regulador al tramo de regulación. Asegura que con la tensión máxima de salida del regulador haya la corriente máxima en el foco del tramo.
4. Determina la frecuencia de accionamiento del regulador (Ref. 60°C) con diferentes magnitudes de perturbación:
 - a) con tapa cerrada
 - b) con tapa abierta
 - c) suministro de energía reducida (Switch Pos. 2)
5. Varía la resistencia R4 y investiga el comportamiento de la regulación

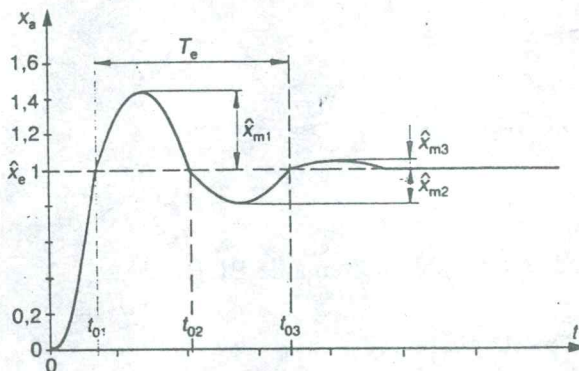
EJERCICIOS

1.

A un salto en la entrada un elemento T2 muestra en la salida el comportamiento dibujado con un registrador X-t.

Los datos son $T_e = 0,56$ s; $\hat{X}_{m1} = 0,4$; $\hat{X}_{m2} = 0,2$

- Calcule el factor de amortiguación y la constante de tiempo
- ¿ Cual es el valor de la amplitud \hat{X}_{m3} ?
- ¿ En que momentos se cruza la línea \hat{X}_e ?



2

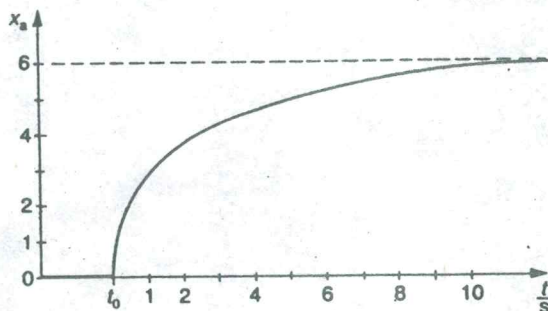
Un elemento P-T1 tiene el coeficiente $C_p = 0,5$, el tiempo de retardo es $T = 2,5$ s. En la entrada se realiza un salto de 10V.

¿ Cual es el valor de la tensión de salida 1 s; 2,5s; 4s y 12,5s despues del salto. Dibuje la respuesta en la salida.

3.

El elemento de transmisión tiene la siguiente curva de respuesta a un salto $\hat{X}_e = 2$ en la entrada.

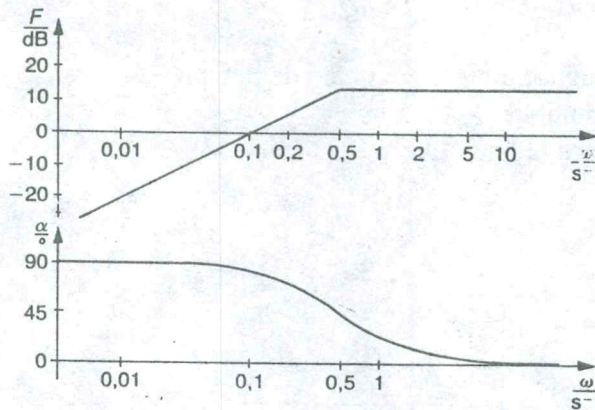
- ¿ Cual es el comportamiento de este elemnto ?
- Determine los parámetros del tramo.



4.

Un elemento de transmisión tiene el siguiente diagrama de BODE.

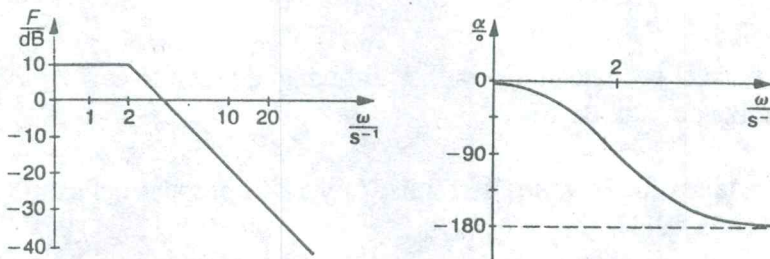
- ¿ Cual es el comportamiento de este elemnto ?
- Determine los parámetros del tramo.



5.

Un elemento de transmisión tiene el siguiente diagrama de BODE.

- ¿ Cual es el comportamiento de este elemnto ?
- Determine los parámetros del tramo.



6.

El elemento de ajuste ha dado un salto de Y_h . La velocidad máxima de cambio se observa con $3^\circ\text{C}/\text{min}$

Calcule

- el valor de arranque A
- el tiempo de arranque cuando se quiere realizar una variación de la magnitud a regular de $W = 35^\circ\text{C}$.

7.

Un motor eléctrico tiene 3000 1/min revoluciones nominales. Esta velocidad logra despues de 10s al momento de conectarlo a 220V.

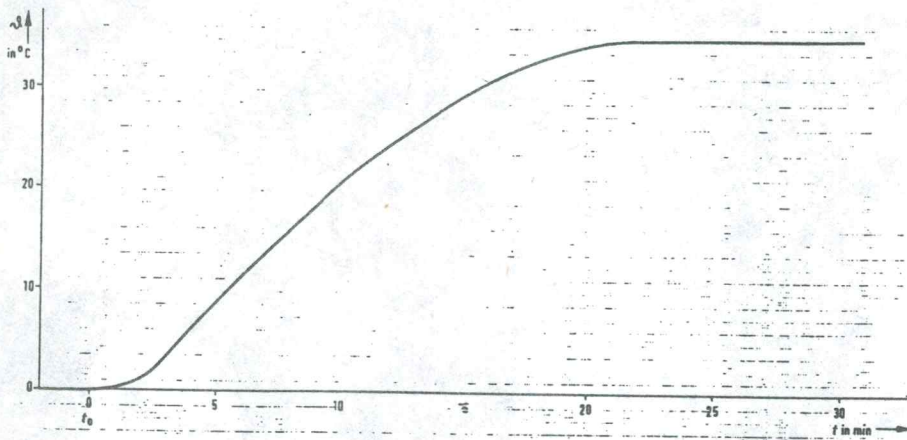
- a) ¿Cuál es el valor de arranque ?
- b) ¿Cuál es el coeficiente de transmisión ?
- c) ¿ Cuanto tiempo demora el motor para alcanzar 2500 1/min ?

8.

El diagrama muestra la respuesta a un salto de un tramo de temperatura que se suministra la potencia máxima de 5 kW.

El valor de referencia es $W = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

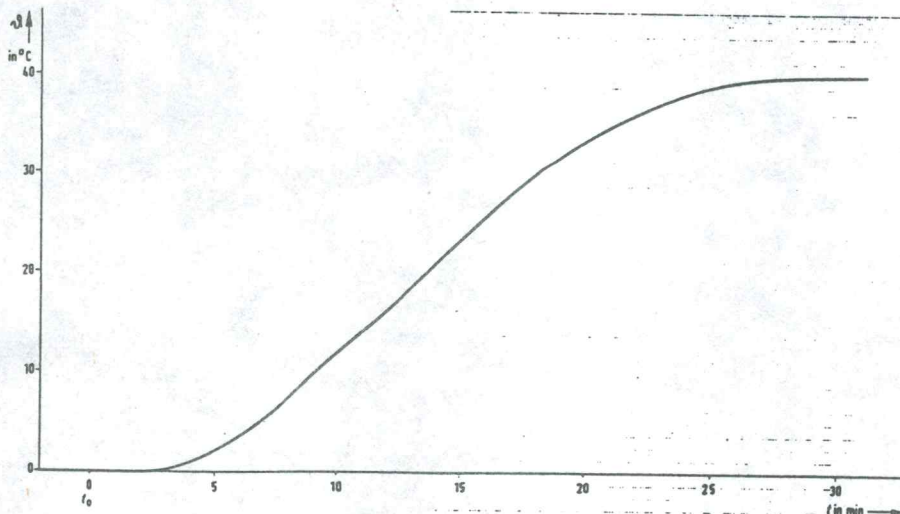
- a) Determine los datos dinamicos del tramo.
- b) ¿Cuál es el grado de dificultad de regular ?



9.

El diagrama muestra el comportamiento de un tramo de temperatura suministrando 50% de potencia ($Y_h = 5\text{ kW}$). El valor de referencia es $W = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Calcule los datos dinamicos y el grado de dificultad a regular.



SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE

SENA

**CENTRO INDUSTRIAL Y DE AVIACION
PROGRAMA DE ARTES GRAFICAS**

**FOTOMECANICA MONTAJE Y DIAGRAMACION
ALUMNOS EN FORMACION**

**INSTRUCTOR FOTOMECANICO
MANUEL A. CARPINTERO O.**

**IMPRESION Y ENCUADERNACION
ALUMNOS EN FORMACION**

**INSTRUCTOR IMPRESION OFFSET
JAVIER E. CANTILLO OLIVARES**

**DAGOBERTO CASTRO MALDONADO
JEFE DE CENTRO**

**LUIS SILVA MARQUEZ
JEFE DE PROGRAMA**

**IMPRESO EN LOS TALLERES DE
ARTES GRAFICAS**

SENA

REGIONAL ATLANTICO

BARRANQUILLA - COLOMBIA MARZO / 1.998

**SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE
"SENA"
UNIDAD DE INFORMACION**



*"Formamos la Gente
que quiere Colombia"*