

# **SISTEMAS DE CONTROL**

## **La automatización como el motor del desarrollo**

Cristian D. Cegelski  
Sergio E. Katogui  
Héctor A. Stoisa  
Leandro J. Corrado  
Manuel F. Nuñez



Colección: Cuadernos de Cátedra



Facultad de Ingeniería

EDITORIAL UNIVERSITARIA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES

Coronel José Félix Bogado 2160  
Tel-Fax: 03764-428601

Correos electrónicos:  
direccion@editorial.unam.edu.ar  
Página WEB: www.editorial.unam.edu.ar

Colección: Cuadernos de Cátedra  
Coordinación de la edición: Nélida González  
Preparación para la web: Francisco A. Sánchez

Sistemas de control : la automatización como el motor del  
desarrollo / Cristian Daniel Cegelski ... [et al.]. - 1a ed. - Posadas :  
Universidad Nacional de Misiones, 2019.  
Libro digital, PDF - (Cuadernos de cátedra)

Archivo Digital: descarga  
ISBN 978-950-766-160-0

1. Sistemas de Control. 2. Ingeniería. 3. Automatización Industrial. I.  
Cegelski, Cristian Daniel  
CDD 621

ISBN: 978-950-766-160-0  
Impreso en Argentina  
©Editorial Universitaria  
Universidad Nacional de Misiones  
Posadas, 2019

## **CAPITULO 1**

### **Introducción a los Sistemas de Control**

Primitivamente, el hombre tenía solo sus fuerzas físicas o las de los animales de carga para realizar diferentes tipos de trabajos.

Con la invención de la rueda, el hombre pudo construir: pirámides, carreteras, acueductos romanos, etc.

Las primeras fuentes naturales de energía fueron aparte de las mencionadas, la energía del viento para impulsar embarcaciones y molinos, así como también la energía del agua para mover las ruedas hidráulicas.

Cuando se inventó la máquina de vapor, el hombre pudo contar con una fuente de energía que podía manejar a voluntad. Desde ese momento se han creado diferentes formas de obtener energía.

La ingeniería tiene una función muy importante, lo cual es el aprovechamiento de las formas de energía para el bien común. Esto hace que el ingeniero invente y desarrolle máquinas para poder utilizar la energía.

Los controles de las primeras máquinas eran manuales, y se debían hacer ajustes frecuentes para mantenerlas operativas en los valores deseados. Con el paso del tiempo se fue haciendo necesario el uso del control automático; en primer lugar, este hace que las operaciones al realizarse automáticamente el hombre dediquen ese tiempo a otras actividades; y, en segundo lugar, se pueden realizar funciones que escapan a las posibilidades físicas del hombre y permiten optimizar y llevar a cabo el proceso, que de otra forma no se podrían realizar.

La ingeniería del control es una ciencia que es usada en muchas disciplinas de la ingeniería, por ejemplo: ingeniería química, eléctrica, mecánica y es aplicada a un amplio rango de sistemas físicos, desde circuitos eléctricos hasta misiles guiados.

El campo del control de procesos engloba los principios básicos más usuales; cuando es aplicado a sistemas físico-químicos utilizados por los ingenieros químicos, tales como reactores químicos, intercambiadores de calor etc.-

### **¿Qué hace un sistema de control?**

Tomemos como ejemplo de sistema de control, una persona conduciendo un automóvil. El conductor tiene un objetivo que es permanecer correctamente en la ruta.

En primer lugar, el conductor debe determinar la ubicación del automóvil, lo que hace usando sus ojos para ver la ubicación del automóvil en la posición deseada. Finalmente, el conductor debe cambiar la posición del volante de acuerdo a lo necesario, para efectuar la corrección necesaria.

De esta manera, en forma continua, realizando estas tres funciones, el conductor podrá mantener el Automóvil lo más cerca posible del valor deseado.

Los sistemas de control realimentados se encuentran en toda la naturaleza.

Una persona andando en bicicleta, o esquiando, demuestra el balance del control en el ser humano; o en el pájaro balanceándose en un conductor de energía o una rama, también demuestra que tiene un adecuado sistema de control de equilibrio.

- La combinación entre los ojos y las manos.
- El manejo de un automóvil.

- Las variaciones de la concentración de sales en el cuerpo humano.
- Los **sistemas de control automático** reúnen en gran manera, el modo de vida nuestra y mediante los distintos lazos de control, se puede asegurar la **paz** o la **destrucción** de un país.

La heladera, el aire acondicionado, el reloj despertador, el horno eléctrico, el microondas, y todos los sistemas de control que han mejorado la producción y la calidad de los productos manufacturados han afectado todos ellos en nuestro modo de vivir.

- En el siglo XVIII **WATT** crea el **regulador centrífugo** para el control de la velocidad de una máquina de vapor.
- Un ejemplo de variable a controlar:

En el dibujo vemos que para mantener el caudal en L1, el hombrecito, debe observar continuamente y operar la válvula V1 para lograrlo.

Esto es lo que conocemos como “**sistemas de control a lazo cerrado**” (manual) o sea se constituye un “**sistema de control realimentado**”.

Todo esto constituye lo que conocemos como **sistema de control de lazo cerrado**, puesto que como hemos visto en el sistema, la señal de salida tiene efectos directos sobre la acción de control.

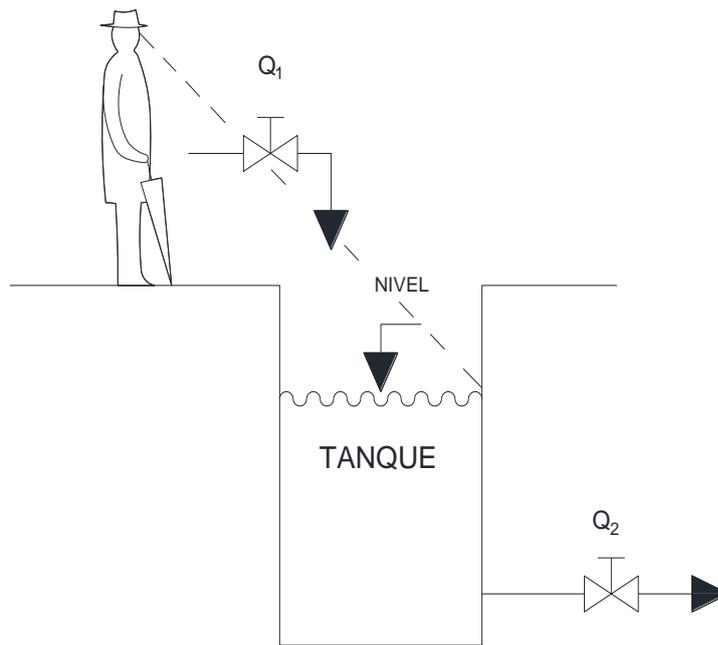


Ilustración 1 “Sistema de control a lazo cerrado”

Entonces agrego instrumentos.

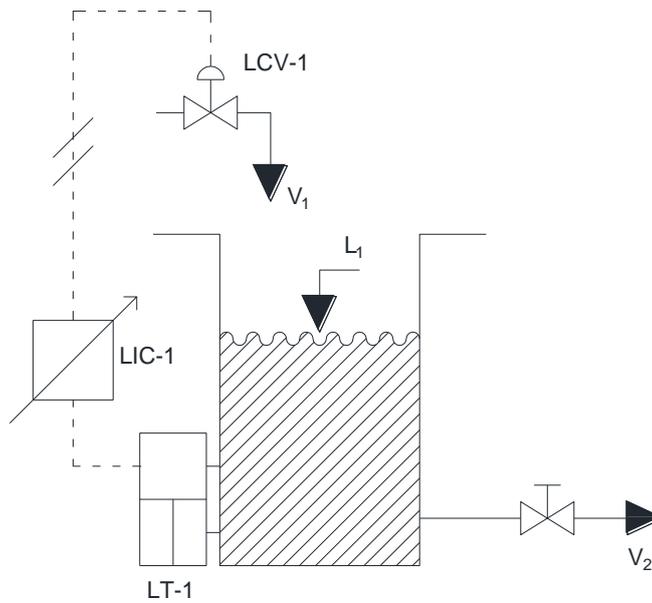


Ilustración 2 “Lazo cerrado automático control de nivel”

Tengo así un **lazo cerrado de control automático**.

Lo importante de estos sistemas es que, la medición de **salida del sistema** se usa para regular la **entrada del sistema**, de manera de conseguir que la **variable controlada** se mantenga próxima a un **valor de referencia** o **set – point**.

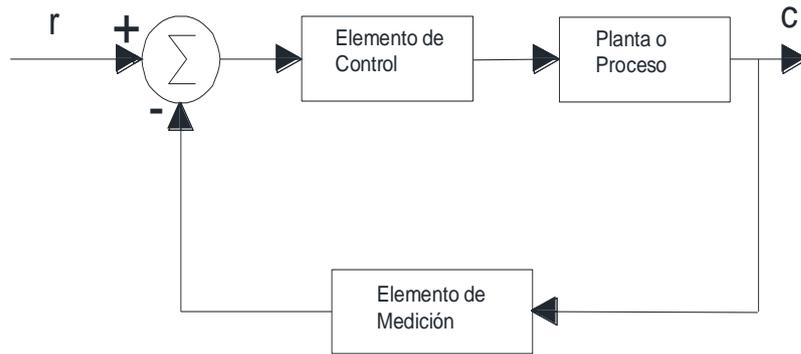


Ilustración 3 “Diagrama de flujo control de nivel”

## Control automático y manual

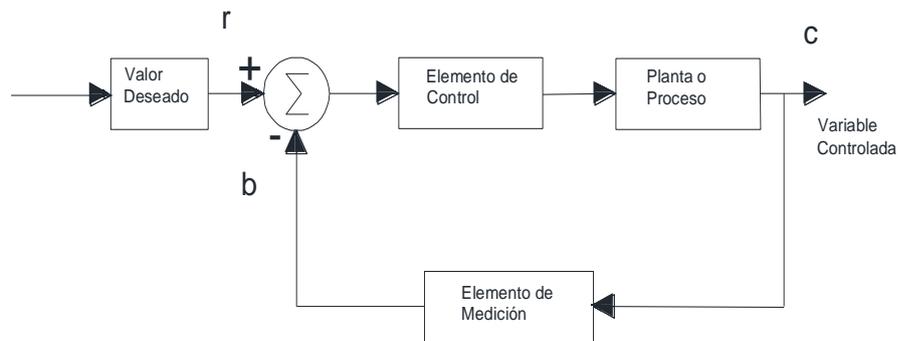


Ilustración 4 “Elemento del control representado en diagrama de bloque”

O sea: “**control**” es la técnica de **medir** o detectar una condición o situación **comparada** con el valor que ella se desea tener, y **actuar** y en consecuencia tratar de reducir la **diferencia** entre ambas.

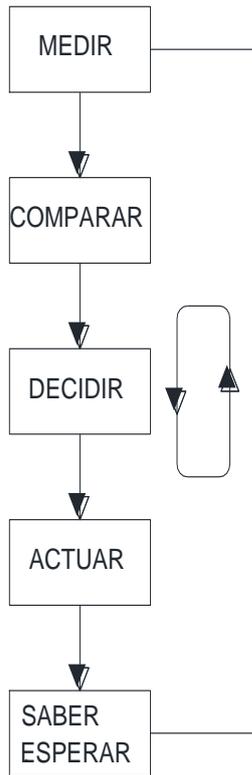


Ilustración 5 “Secuencia de operación de control”

## Lazo abierto y lazo cerrado

### Sistema de calefacción de una casa de departamentos

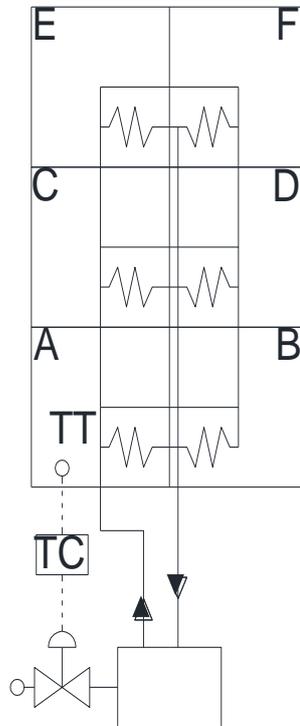


Ilustración 6 “Sistema de calefacción-lazo abierto”

Se plantear el caso de **lazo cerrado y abierto**.

Nota: control en lazo abierto no es control

## Diagrama en bloques del control de temperatura de los departamentos

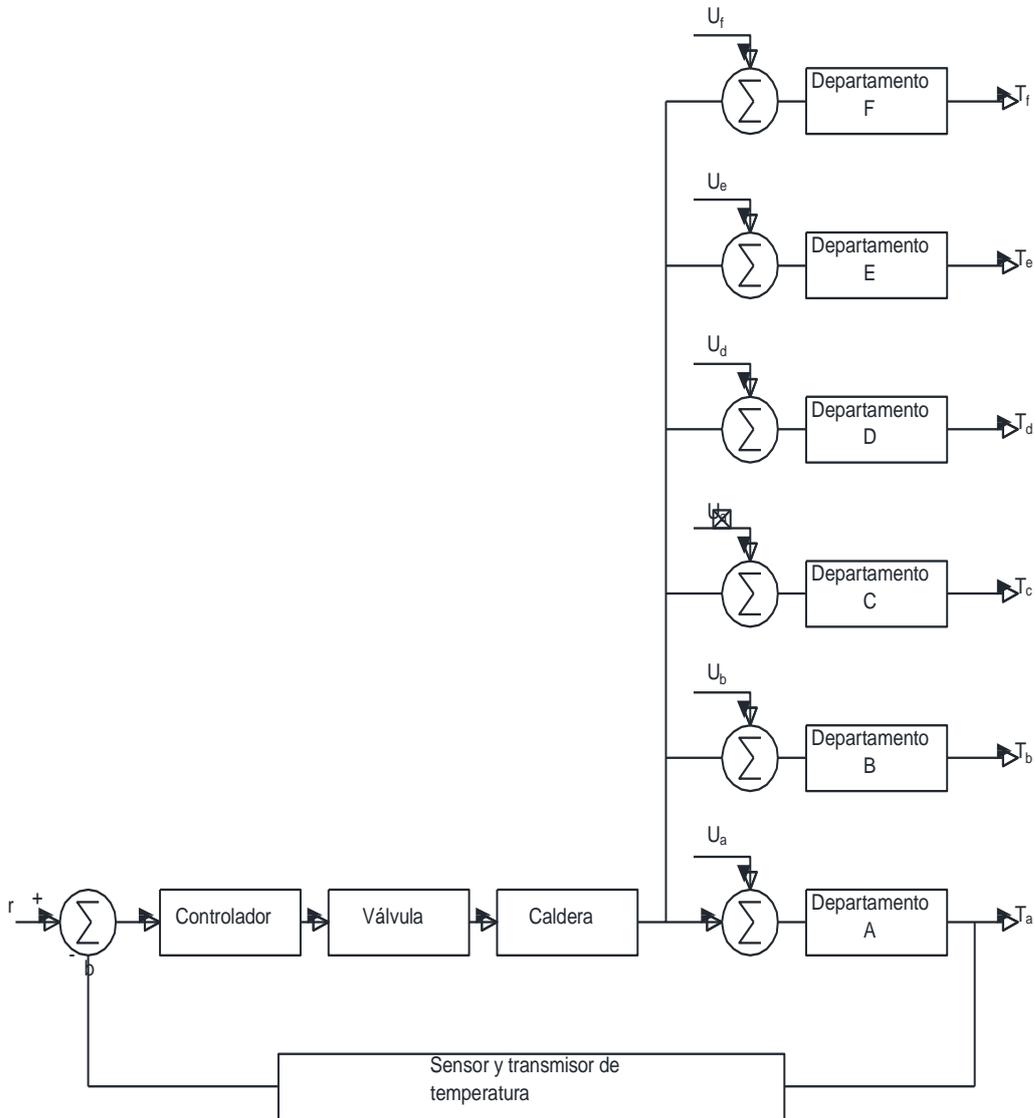


Ilustración 7 “Sistema de calefacción- diagrama de flujo”

En el caso de los departamentos solo el departamento A queda en lazo cerrado, las otras están en lazo abierto y dependen de las perturbaciones que se presenten y que no serán tenidas en cuenta excepto en el departamento A.

**Perturbación:** es toda variable que entra al sistema en forma y magnitud arbitraria y que afecta o tiende a afectar nuestra variable directamente controlada.

La indicamos con **u**, y en el caso de los departamentos serán perturbaciones: la temperatura ambiente exterior, apertura de ventanas, variaciones de presión y del poder calorífico del combustible de la caldera, etc.

El departamento A en lazo cerrado y los demás en lazo abierto.

## **La Realimentación Negativa**

### **Características de la retroalimentación negativa (NEGATIVE FEED BACK)**

Es la conexión fundamental en control Automático.

Si bien al desarrollar la materia veremos cómo aparece la realimentación negativa, haremos algunos comentarios previos para ir estudiando a la misma.

### **Características estructurales**

**La índole de realimentación negativa es** un lazo cerrado, en el cual fluye una información que es tomada de la variable controlada (C) (es función de ella) y luego de operar en los elementos constitutivos del lazo cerrado; incide de nuevo a la entrada del sistema.

La información fluye en un único sentido irreversible, pues el elemento llamado de acción final, recibe la orden cuyo origen se encuentra en la variable controlada "C".

Veamos entonces una estructura cíclica de realimentación, pues la señal que sale de la realimentación y entra en el sistema provocó una parte de la respuesta total "C", que luego vuelve a reintroducirse, en un proceso indefinido.

El signo menos (-) es característico de este tipo de control. Él es impuesto a los elementos tecnológicos de la realimentación. Significa que la acción que se alimenta es opuesta a la que originó, que es “C” (la salida o variable que se quiere controlar)

En esta forma estructural de lazo cerrado, hace que el sistema y su realimentación negativa actúen como un todo único.

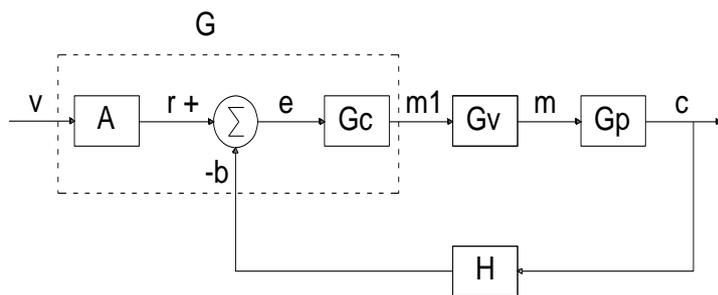


Ilustración 8 “Representación del sistema de control”

$$\text{Error} \gg e = r + (-b) \quad (1)$$

Donde:

- m = Caudal
- v=set point
- c= variable controlada
- m1= señal de actuación a válvula

Si suponemos “C” (variable controlada) Estaba estabilizada en el valor “v”, pero que en el instante “T1” apareció una perturbación cualquiera tal que hizo que “C” se apartara de “v” con un  $e=r-(b)$  mayor que cero esto implica que se introduce a “G” una acción saliente de “H” y con flujo contrario al de la diferencia de  $r-(b)$ , que será aquí menor que cero. De allí resulta una reacción de salida de “G” tendiendo a disminuir el aumento de “C”.

Mientras exista un apartamiento “C” del valor consigna “v”, existirá una reacción debida a la realimentación negativa que hará que “C” vuelva al valor “v” Set-Point.

Esta tendencia es estabilizante y justamente es la cualidad por la cual los sistemas de alimentación son realimentados negativamente.

Como también hablamos de una perturbación que provoca un apartamiento del punto de Estabilidad. Podemos decir que un sistema realimentado constituye un elemento que se opone a cualquier perturbación que tienda a apartar a la variable de su punto de estabilidad.

**Veamos un Sistema Típico una Central Termoeléctrica**

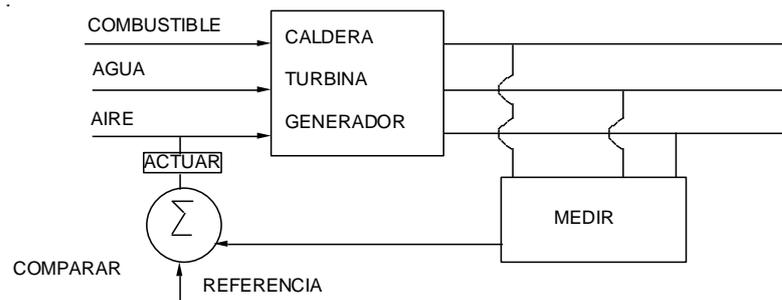


Ilustración 9 "Esquema de central termoeléctrica"

O sea que medimos la salida, comparamos con un valor de referencia decidimos y actuamos.

Actuamos sobre alguna de las válvulas o comandos esperamos los resultados si no se satisfacen los resultados se vuelve a corregir (Es un lazo cerrado).



Ilustración 10 "Representación en diagrama de bloque central termoeléctrica"

## Objetivo del sistema

### Abastecer una demanda

Demanda es dinámica, de perturbación pues cada uno de los consumidores no tiene que decirle a la compañía prestataria del servicio eléctrico que va a hacer funcionar un motor, etc.

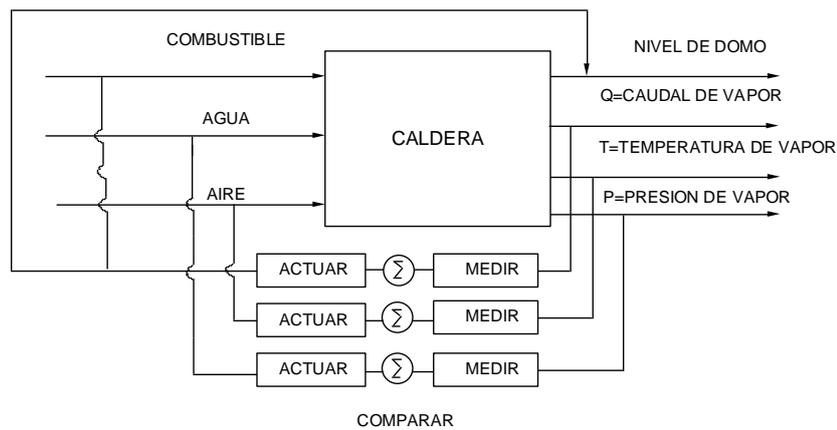


Ilustración 11 “Representación variable controlada y variable manipulada en una central térmica”

O sea, tenemos una variable directamente controlada y tenemos una variable manipulada.

Perturbación: es toda variable que entra al sistema en forma y magnitud arbitraria y que afecta o tiende a afectar nuestra variable controlada.

Tomaremos la caldera y de ella veremos una parte de la misma:

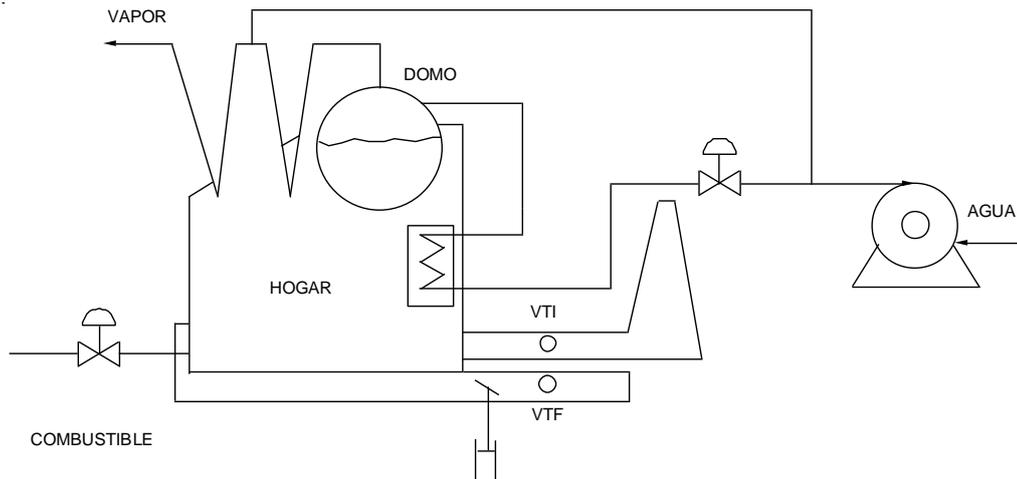


Ilustración 12 “Esquema instalación de caldera y sus partes”

Y ahora tomaremos solo el domo debemos medir y controlar su nivel

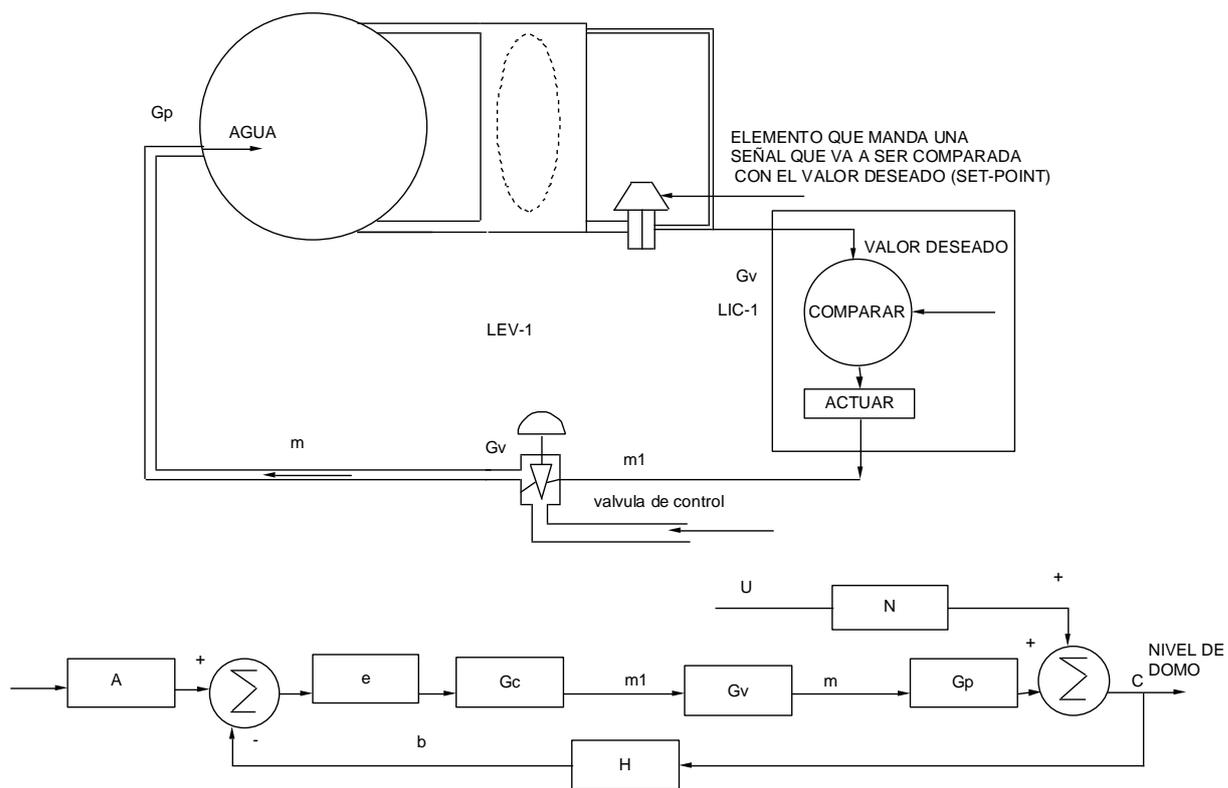


Ilustración 13 “Esquema de instalación de Domo y su respectiva representación de diagrama de flujo”

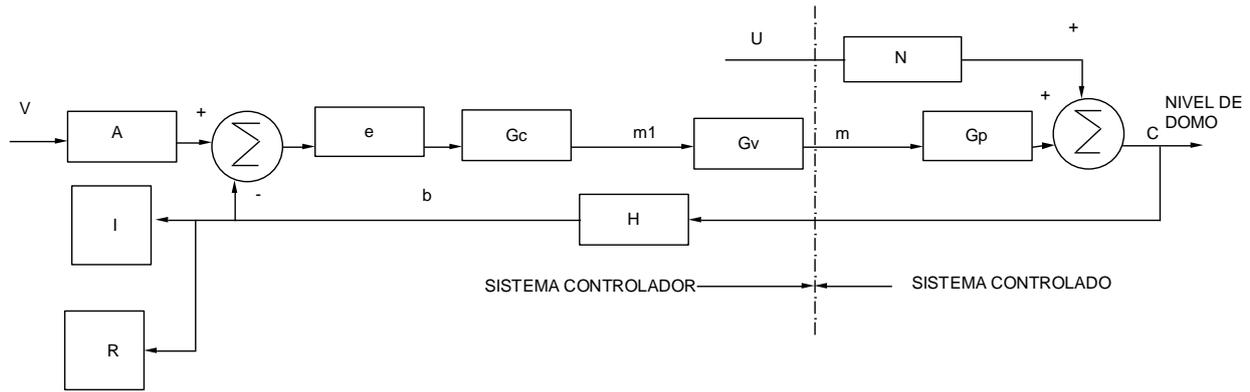


Ilustración 14 “Sistema controlador y controlado circuito de nivel del domo”

Encontramos en el lazo anterior un sistema controlador y un sistema controlado:

Tomemos un elemento industrial.

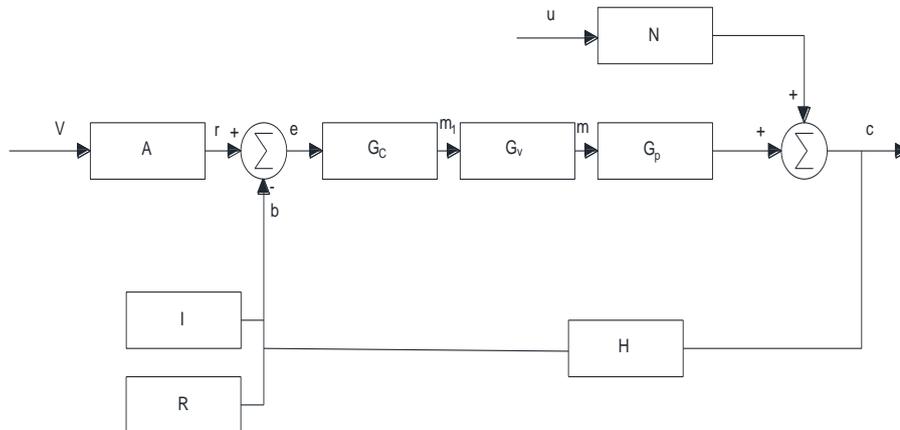


Ilustración 15 “Representación de diagrama de bloque de un proceso industrial”

Encontramos los distintos bloques, sumadores y señales que conforman el diagrama de bloques.

**H:** Elemento de medición y retroacción: en este caso es la transmisión del nivel, censa, traduce y envía la señal al **controlador**, como así también a un **indicador** y a un **registrator**.

**A:** Elemento de entrada de referencia: su función es generar una señal **r** que puede ser interpretada por el sistema controlador en base al valor deseado, **r** consigna o **set – point (V)**.

**$\Sigma$ :** Sumador algebraico: es el componente que efectuará la comparación entre el valor de referencia **r** y la señal de medición o retro acción **b**, es un sumador algebraico que recibe el nombre de detector de error.

**Gc:** Controlador: el controlador de nivel es el que decide actuar y que también sabe esperar. su entrada es la señal error.

**Gv:** Elemento final de control: generalmente para nuestros casos es una válvula que maneja alguna forma de energía o materia que entra al proceso. (En este caso es una válvula que regula el flujo de agua de alimentación).

**Gp:** Elemento de proceso o sistema directamente controlado: en este caso es el domo de la caldera.

**N:** Elemento de perturbación: son bloques del proceso que relacionan las variables de perturbación **u** con la variable directamente controlada **c**.

**I:** Elemento indicador: informa el estado de la variable directamente controlada.

**R:** Elemento registrador: puede ser sobre papel carta o almacenar los distintos estados de la variable controlada en una base de datos, para su posterior supervisión.

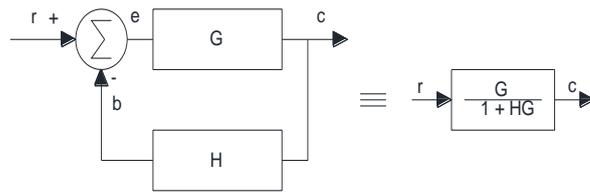


Ilustración 16 "Representacion de diagrama de bloque simplificado elemento de medicion-  
elemento de control"

$$b = H \cdot c \quad (2)$$

$$e = r + (-b) = r - c \cdot H$$

$$c = e \cdot G = r \cdot G - c \cdot H \cdot G$$

$$c \cdot (1 + H \cdot G) = r \cdot G$$

$$\frac{c}{r} = \frac{G}{1 + H \cdot G} \quad (3)$$

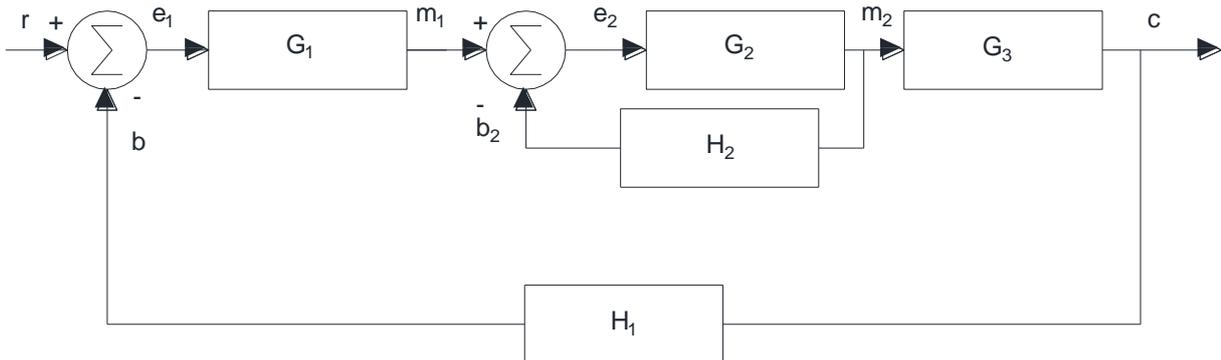


Ilustración 17

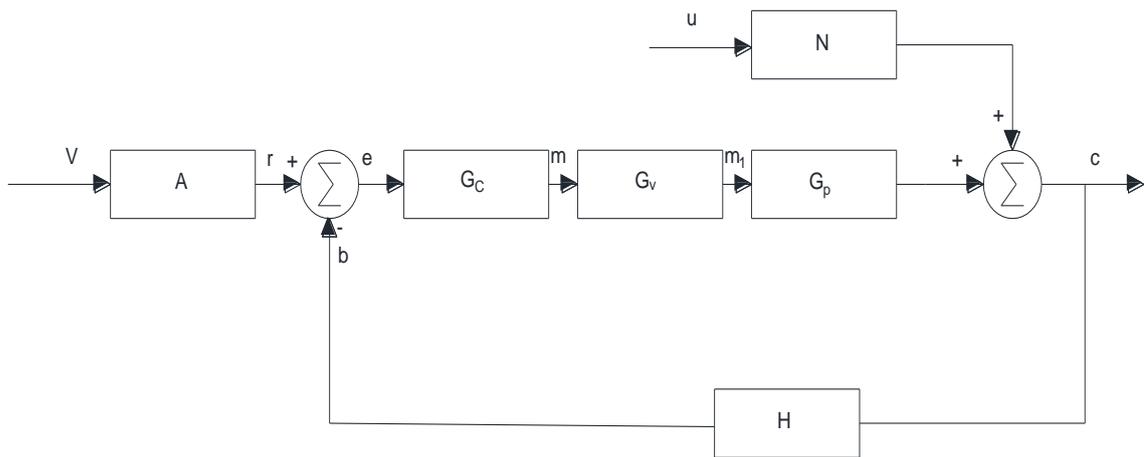


Ilustración 18

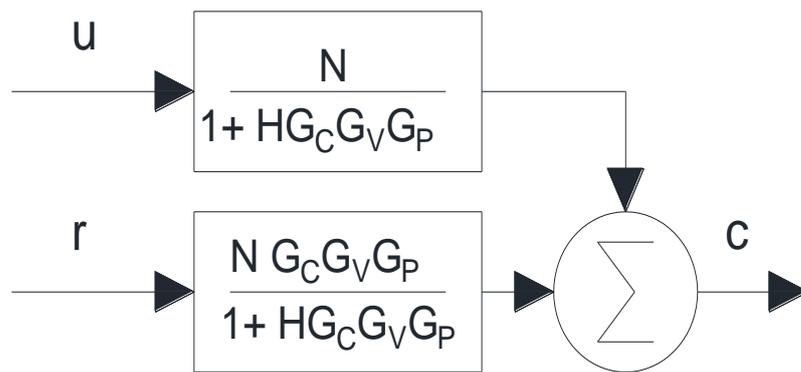


Ilustración 19

$$r = v.A \quad (4)$$

$$e = r + (-b) = vA - b = vA - cH$$

$$b = c.H$$

$$m_1 = e.G_c \quad (5)$$

$$m = m_1.G_v = e.G_c.G_v = v.A.G_c.G_v - c.HG_c.G_v \quad (6)$$

$$m_1 = mG_p + uN \quad (7)$$

$$m_1 = v.A.G_c.G_v.G_p - c.H.G_c.G_v.G_p + uN \quad (8)$$

$$c = v \left( \frac{A.G_c.G_v.G_p}{1 + H.G_c.G_v.G_p} \right) + u \left( \frac{N}{1 + H.G_c.G_v.G_p} \right) \quad (9)$$

Aquí lo más importante es que el segundo término tienda a cero.

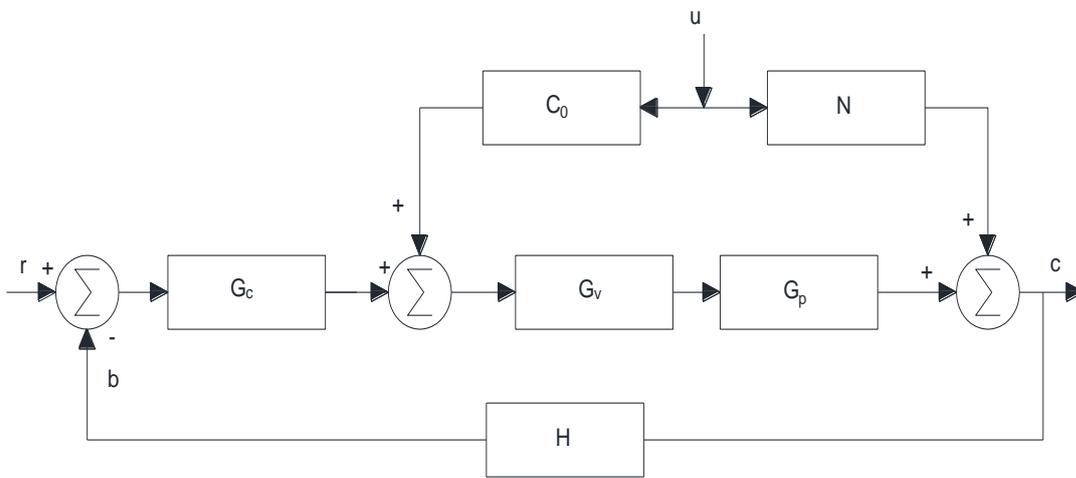


Ilustración 20

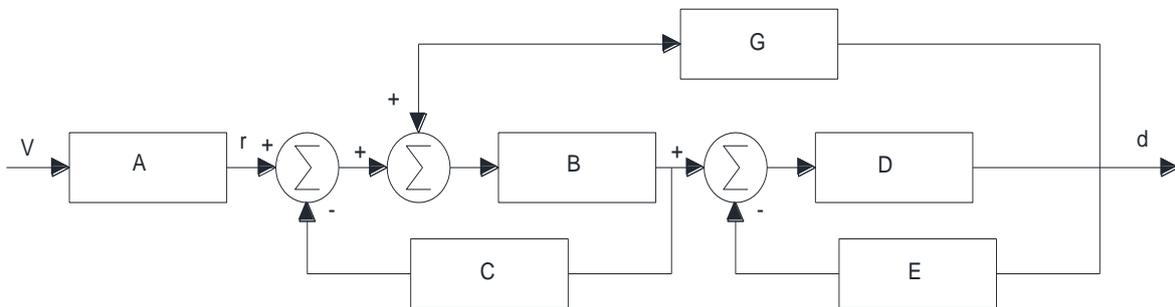


Ilustración 21

## Condiciones que debe cumplir un sistema de control

### Debe ser estable

Entendemos que un sistema es estable cuando para una entrada acotada la salida es también acotada.

## Equilibrio

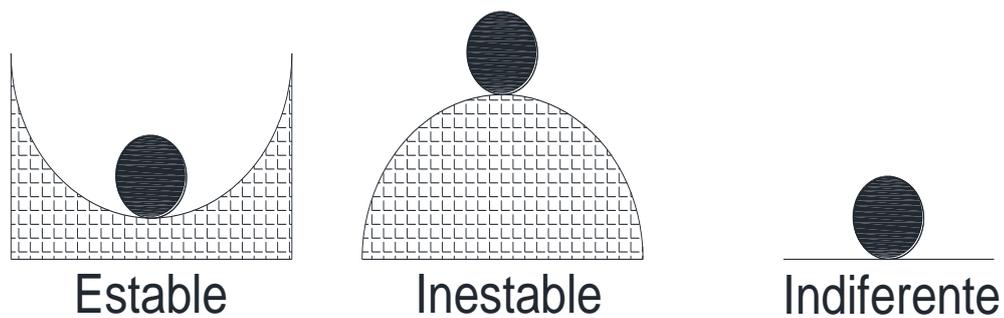


Ilustración 22 "Equilibrio"

Nota: Lo acotado es que no nos salgamos de la concavidad.

### Debe ser preciso

**Exactitud:** es el grado de correspondencia con un valor verdadero. Su valor es absoluto.

**Precisión:** es el resultado de una sucesión de ensayos bajo las mismas condiciones, mismas entradas, y se lo pondera mediante una curva que ilustra la dispersión de los resultados, en base a su variación. Su valor es estadístico.

Si tenemos dos tiradores con arcos y flechas:

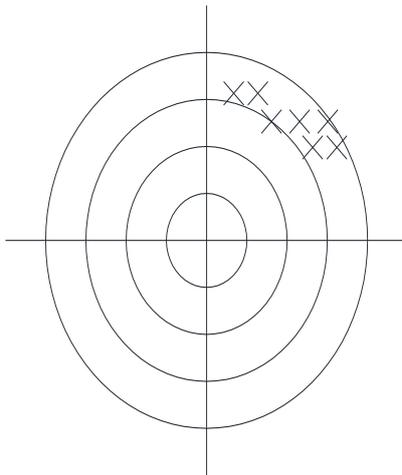


Ilustración 23 “Tirador A”

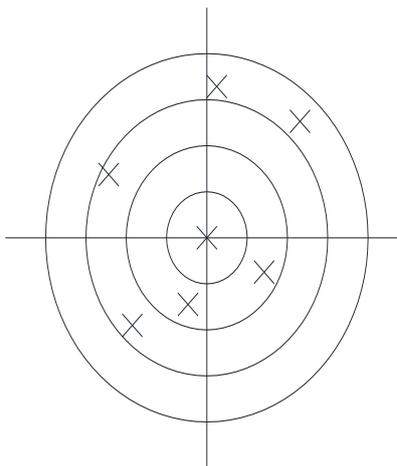


Ilustración 24 “Tirador B”

Un buen tirador va a corregir la falta de exactitud, entonces es más conveniente usar la B, o el tirador A debe corregir su precisión ya que tiene buena repetitividad.

**Repetitividad:** es la permanencia de la precisión en el tiempo.

**Debe ser rápido**

Podríamos decir que no tarde mucho en recuperarse del efecto de una perturbación.

Si queremos mayor velocidad de retorno a la condición en que estaba antes de ser perturbado, debemos aplicar acciones correctivas más fuertes.

Acciones correctivas fuertes, sin saber esperar a que el proceso, por sus propiedades dinámicas responda a nuestra acción, conduce a un mal control que puede ser inestable.

La búsqueda de ese tipo de soluciones es la técnica fundamental del éxito de un sistema de control.

El sistema controlador debe ser mucho más rápido que el sistema controlado.

El tiempo que requiere el sistema controlador, desde que detecta un cambio en la variable directamente controlada, hasta que actúa mediante la válvula de control, debe ser despreciable frente al tiempo necesario para que esta acción se aprecie en la salida del proceso.

Aquí cabe destacar que la mayoría de los procesos de la industria química son lentos, y que la tecnología actual ha mejorado notablemente las velocidades de respuesta de los transmisores, controladores y auxiliares de lazos de control. O sea que en plantas químicas grandes las distancias ya no es un problema.

### **Debe ser inteligente**

Todo lo que se haga en control como en toda otra acción industrial tiene que tener una justificación, entre ellas priman las económicas y las de seguridad (aunque no sea lo adecuado en ese orden).

Siempre es conveniente trabajar en el sistema de control más simple, si no da resultados buscar otro más elaborado.

## Características de los sistemas controlados

Hemos visto que el proceso lo representamos por un bloque, donde  $m$  (variable Manipulada) es la que determina una variación de “ $c$ ” (Variable controlada), aunque todavía no lo hemos puesto que actuamos sobre él, en lazo abierto.



Ilustración 25 “Lazo Abierto”

Un método clásico para el estudio de la dinámica es el de introducir una señal de estudio en forma de escalón, mediante el cambio brusco de la apertura de la válvula de control, y registrar la señal de salida, que representa la respuesta del proceso, o simplemente, la respuesta.

Si aplicamos este método al sistema acumulador de sección A, al que llega un caudal  $Q_e$ , del que sale un caudal  $Q_1$  por la válvula que oprime una resistencia  $R$  al pasaje de flujo.

Vemos en la figura ensayos de caudal de entrada de magnitud creciente y registrando el nivel como variable de salida.

Para una señal pequeña sobre la válvula se tiene el caudal  $Q_{e1}$ , representado en la figura.

Esto es acompañado por una velocidad de cambio de nivel.

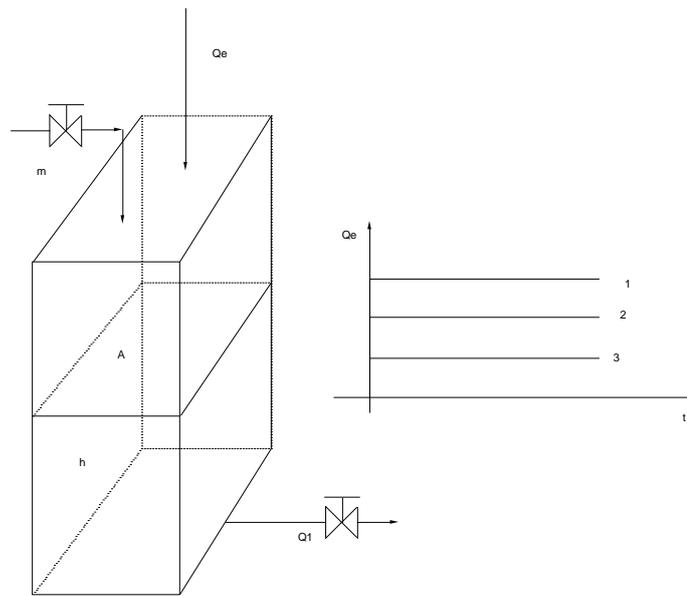


Ilustración 26 “Sistema acumulador”

Repetimos el ensayo con otros caudales, se obtienen curvas similares.

Observemos que, si trazamos las tangentes a cada curva, en el origen, encontraremos al cortar las curvas valores estáticos que nos da un tiempo que se llama constante de tiempo y es un parámetro característico de las propiedades dinámicas del sistema.

Podemos definir a la constante de tiempo como el tiempo que tardaría en llegar al menor valor estático si conservase la velocidad inicial.

La constante de tiempo es el tiempo en el cual la respuesta llega al 63,2% del cambio hacia su nuevo valor estático.

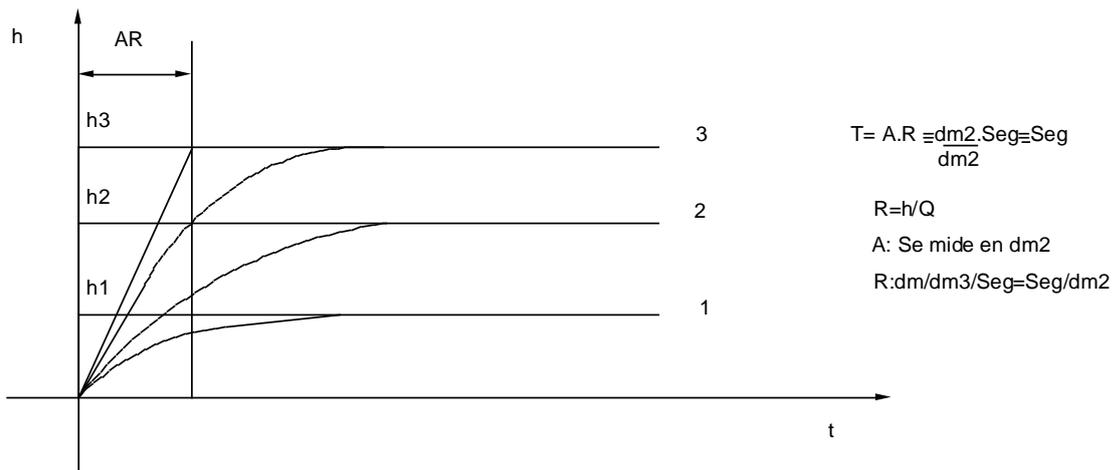


Ilustración 27 “grafica t-h”

O sea, la constante de tiempo está expresada en segundos.

Veamos un caso especial: tomemos únicamente el caso del domo de una caldera. En la caldera podemos observar que si se abre en forma rápida la válvula que representa el consumo de vapor que (para el caudal suministrado de agua en ese momento) hará descender el nivel del domo pero, si el aumento de consumo va sufriendo de un simultáneo descenso de la presión, las burbujas contenidas en los tubos que retornan al domo se expenderán, dando un volumen aparentemente mayor, y así el nivel sube; además está dicho que un control de nivel, que no conozca la situación, tenderá a cerrar la entrada de agua, en lugar de que ingrese más.

## Diagrama en bloques

(Interpretación de la función de cada elemento del sistema de control)

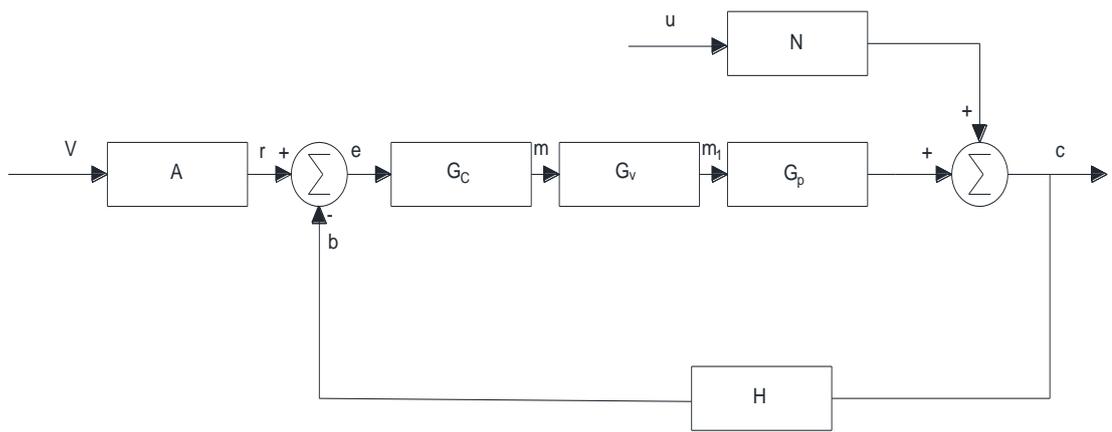


Ilustración 28 “Diagrama de bloque”

## Esquemático de control de domo

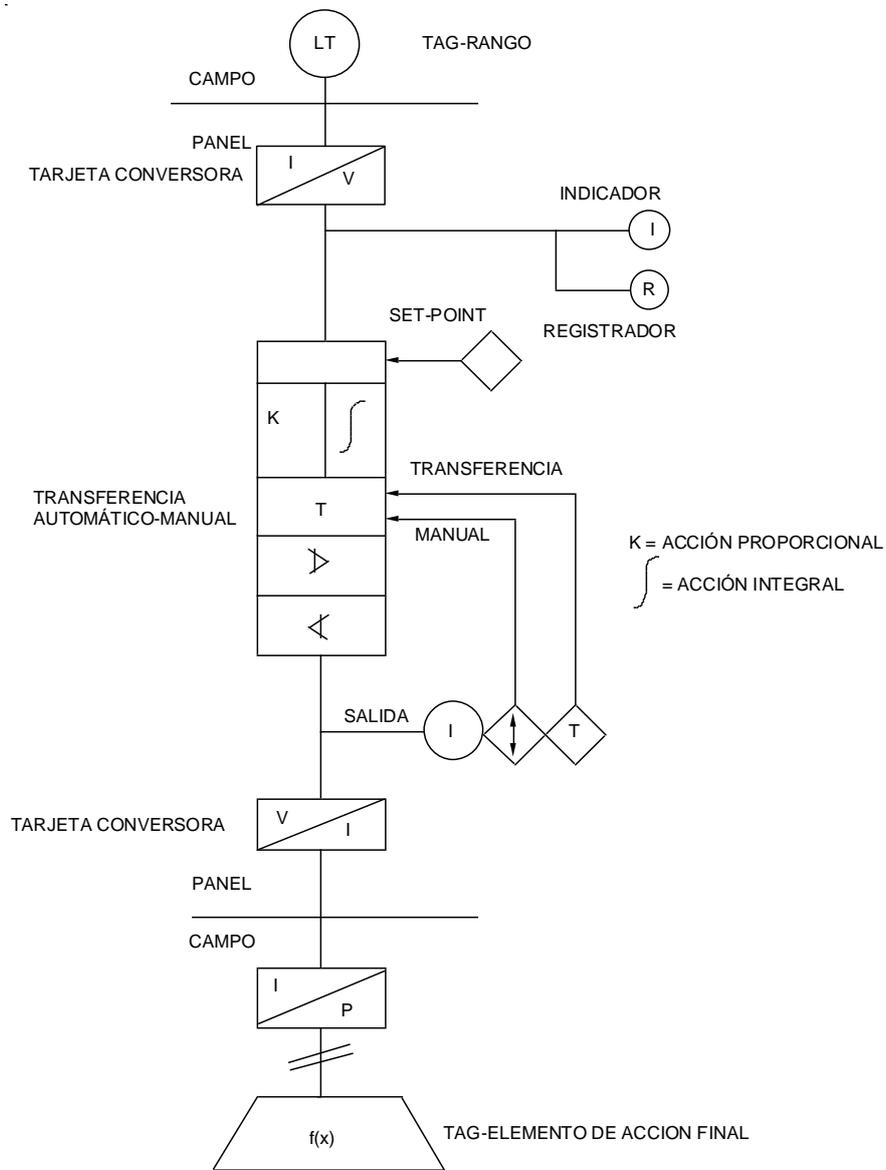


Ilustración 29 “Diagrama de control de domo “

## Simbología, Normas y Sistema de Unidades

En instrumentación y control se emplea un sistema especial de notación, simbología y terminología. El conocimiento de la notación de la simbología implica por sí mismo la expresión de ideas por medios gráficos, esto hace que tales ideas se adoptan como lenguaje. Si

este tipo de lenguaje toma características especiales de una rama de ingeniería, sus expresiones se constituyen como lenguaje industrial. Si el lenguaje industrial se estandariza y normaliza, podrá ser interpretado por cualquier persona sin importar su nacionalidad.

Es importante recalcar que la normalización de la terminología ha sido difícil, debido a que los ingenieros y técnicos usan a menudo varios términos para referirse a un mismo fenómeno ó cosa.

Varias sociedades y organizaciones profesionales han contribuido en la normalización y estandarización de la notación, simbología y terminología que se usan en la instrumentación.

De ellas, 5 son de mayor importancia en esta rama, estas son:

1.- S.A.M.A (Asociación de fabricantes de aparatos científicos)

2.- I.S.A (Sociedad de instrumentistas de América)

3.- A.S.M.E (Sociedad americana de ingenieros mecánicos)

4.- I.E.E.E (Instituto de ingenieros electrónicos y eléctricos)

5.- A.N.S.I (Instituto nacional americano de medidas)

La ISA (Instrumentation, System and Automation Society), es una de las más

Importantes organizaciones de estandarización en el campo del control de procesos.

En particular la ISA S5.1 especifica simbología de instrumentación

Los círculos representan instrumentos de medida individuales. Ej. Sensor, transmisor, etc.

-  El instrumento se encuentra ubicando en una localización primaria principal. Ej Sala de control
-  El instrumento se encuentra ubicando en una localización secundaria. Ej. Modulo "Rack" de instrumentacion
-  El instrumento se encuentra en el campo
-  El instrumento no se encuentra accesible

Ilustración 30 “Representación según normas (ISA)”

Un cuadrado con un círculo interno, representa instrumentos que muestran información y realizan acciones de control.

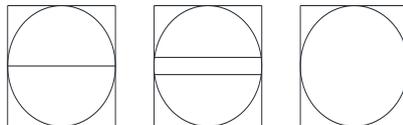


Ilustración 31 “Representación según normas (ISA)”

Un hexágono representa dispositivos con capacidades de cómputo. Ej. Controladores.

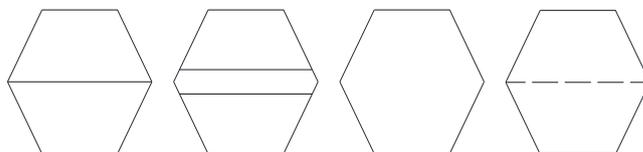


Ilustración 32 “Representación según normas (ISA)”

El siguiente símbolo indica PLCs

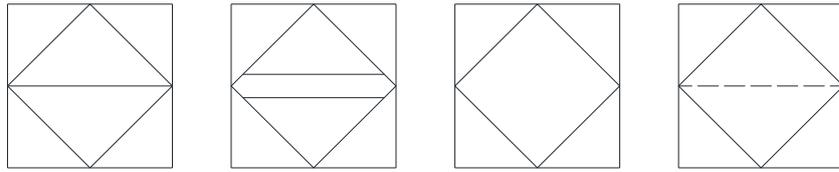


Ilustración 33 “Representación según normas (ISA)”

### Cañerías y conexiones

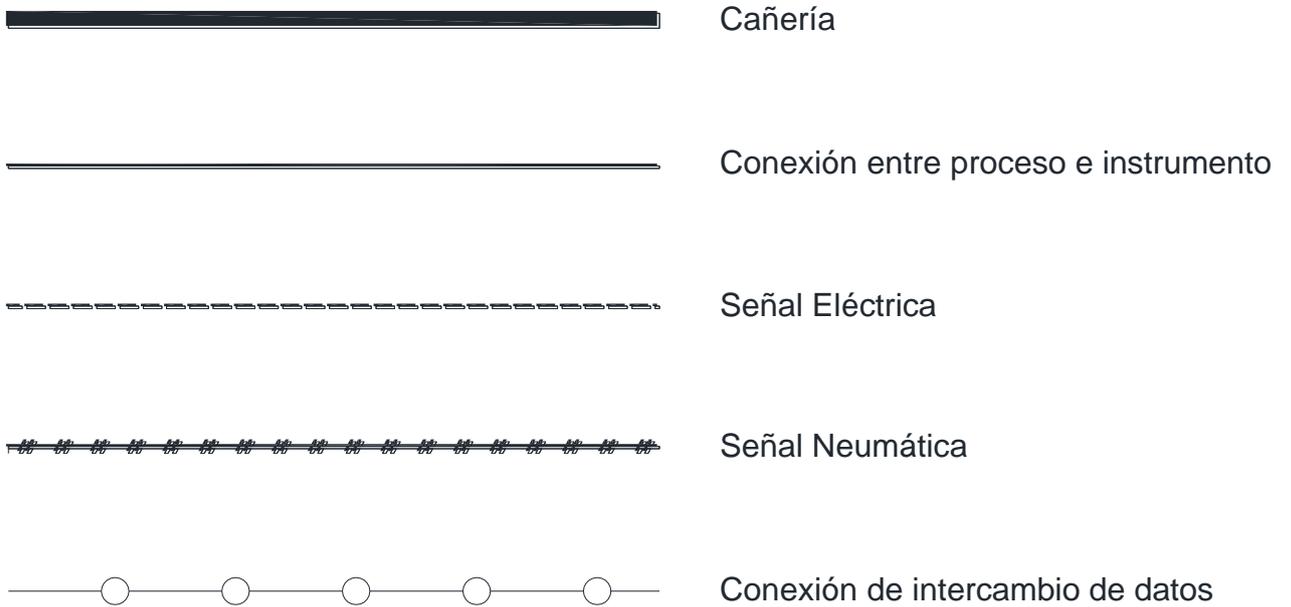


Ilustración 34 “Representación según normas (ISA)”

### Identificación

La primera letra indica la variable medida

- T (temperature)
- F (flow rate)
- P (pressure)

La segunda letra indica la función del dispositivo

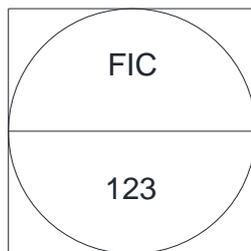
– T (transmitter)

– E (sensor)

– I (indicator)

La tercera letra es un modificador o indica multifunción (función del dispositivo)

Ejemplo:



Instrumento que muestra información en sala de control  
F- Flow  
I- Indicator  
C- Controller

Ilustración 35 “Controlador indicador de flujo Representación según normas (ISA)”

El número representa una etiqueta, frecuentemente relacionada con un lazo de control particular.

Ejemplo:

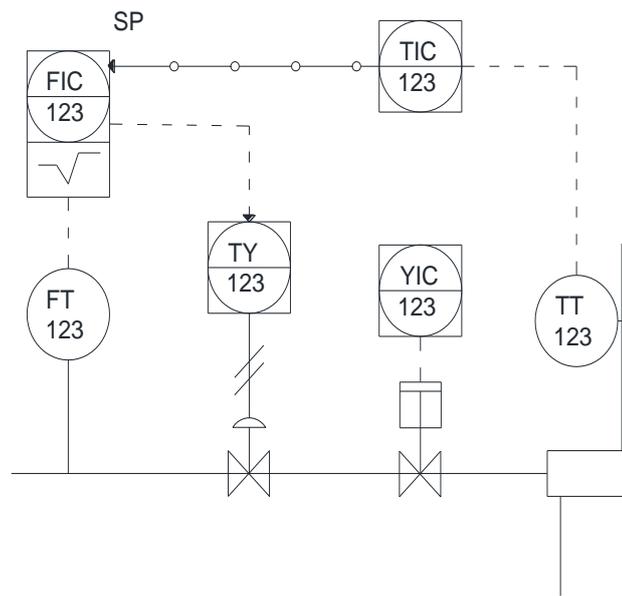


Ilustración 36 “Ejemplo de representación de un lazo”

## Bloque de función - Designaciones de función

Las denominaciones de funciones asociadas con controladores, dispositivos informáticos, convertidores y relés se pueden utilizar individualmente o en combinación.

NO	FUNCTION	SYMBOL	MATH EQUATION	GRAPHIC REPRESENTATION	DEFINITION
1	SUMMING	$\Sigma$	$M = X_1 + X_2 + \dots + X_n$		THE OUTPUT EQUALS THE ALGEBRAIC SUM OF THE INPUTS. (THE INPUTS MAY BE LABELED WITH POSITIVE OR NEGATIVE SIGNS).
2	AVERAGING	$\Sigma/n$	$M = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$		THE OUTPUT EQUALS THE ALGEBRAIC SUM OF THE INPUTS DIVIDED BY THE NUMBER OF INPUTS.
3	DIFFERENCE	$\Delta$	$M = X_1 - X_2$		THE OUTPUT EQUALS THE ALGEBRAIC DIFFERENCE OF THE TWO INPUTS.
4	PROPORTIONAL	$K$ 1:1 2:1	$M = KX$		THE OUTPUT IS DIRECTLY PROPORTIONAL TO THE INPUT. IN THE CASE OF A VOLUME BOOSTER, "K" MAY BE REPLACED BY 1:1 FOR INTEGER GAINS, 2:1, 3:1, ETC., MAY BE SUBSTITUTED FOR K.
5	INTEGRAL	$\int$	$M = \frac{1}{T_I} \int X dt$		THE OUTPUT VARIES IN ACCORDANCE WITH BOTH MAGNITUDE AND DURATION OF THE INPUT; THE OUTPUT IS PROPORTIONAL TO THE TIME INTEGRAL OF THE INPUT.
6	DERIVATIVE	$d/dt$	$M = T_D \frac{dX}{dt}$		THE OUTPUT IS PROPORTIONAL TO THE RATE OF CHANGE (DERIVATIVE) OF THE INPUT.

Ilustración 37 “Bloque de Funciones Gentileza Norma (SAMA)”

NO	FUNCTION	SYMBOL	MATH EQUATION	GRAPHIC REPRESENTATION	DEFINITION
7	MULTIPLYING	$\times$	$M = X_1 X_2$		THE OUTPUT EQUALS THE PRODUCT OF THE TWO INPUTS.
8	DIVIDING	$\div$	$M = \frac{X_1}{X_2}$		THE OUTPUT EQUALS THE QUOTIENT OF THE TWO INPUTS.
9	ROOT EXTRACTION	$\sqrt[n]{\quad}$	$M = \sqrt[n]{X}$		THE OUTPUT EQUALS THE ROOT (I.E., CUBE ROOT, FOURTH ROOT, 3/2 ROOT, ETC.) OF THE INPUT. IF n IS OMITTED, A SQUARE ROOT IS ASSUMED.
10	EXPONENTIAL	$x^n$	$M = X^n$		THE OUTPUT EQUALS THE INPUT RAISED TO A POWER (I.E., SECOND, THIRD, FOURTH, ETC.).
11	NONLINEAR OR UNSPECIFIED FUNCTION	$f(X)$	$M = f(X)$		THE OUTPUT EQUALS SOME NONLINEAR OR UNSPECIFIED FUNCTION OF THE OUTPUT.
12	TIME FUNCTION	$f(t)$	$M = Xf(t)$ $M = f(t)$		THE OUTPUT EQUALS THE INPUT TIMES SOME FUNCTION OF TIME OR EQUALS SOME FUNCTION OF TIME ALONE.
13	HIGH SELECTING	$>$	$M = \begin{cases} X_1 & \text{FOR } X_1 \geq X_2 \\ X_2 & \text{FOR } X_1 \leq X_2 \end{cases}$		THE OUTPUT IS EQUAL TO THE GREATER OF THE INPUTS.

Ilustración 38 “Bloque de Funciones Gentileza Norma (SAMA)”

## CAPITULO 2

### Función de Transferencia

La función de transferencia es la forma básica de describir modelos de sistemas lineales. Basada en la transformación de Laplace, permite obtener la respuesta temporal, la respuesta estática y la respuesta en frecuencia. El análisis de distintas descomposiciones de la respuesta temporal permite adquirir útiles ideas cualitativas, y definir varios conceptos importantes: efectos de las condiciones iniciales, respuesta libre y forzada, régimen permanente y transitorio. También permite definir el concepto central de estabilidad, y establecer un primer criterio para su investigación.

Analicemos la Función de transferencia para un elemento de primer orden.

Tomemos un termómetro de Hg (mercurio), el cual puede formar parte de un lazo de control:

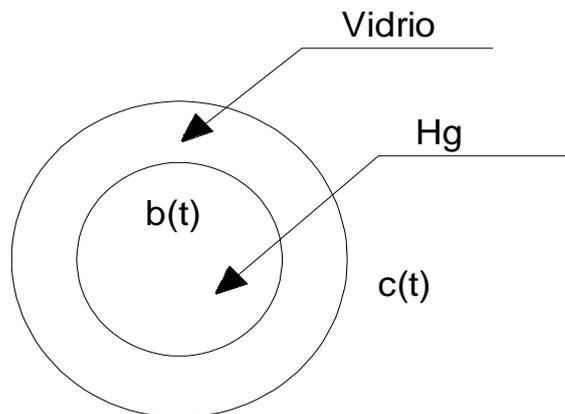


Ilustración 39 “Vista en corte Termómetro de mercurio”

Debemos asumir que:

- 1) La capacidad térmica está en el Hg.

2) La pared de vidrio que contiene el Hg, no se expande ni se contrae durante la respuesta.

Supongamos que el termómetro arriba mencionado es un termómetro de laboratorio:



Ilustración 40 “*Termómetro de Mercurio*”

- 1) Es un elemento de medición H.
- 2) La entrada es la temperatura a medir  $c(t)$ .
- 3) La salida es la temperatura a indicar  $b(t)$ .

El diagrama de bloque es el siguiente:



Ilustración 41 “*Diagrama de flujo*”

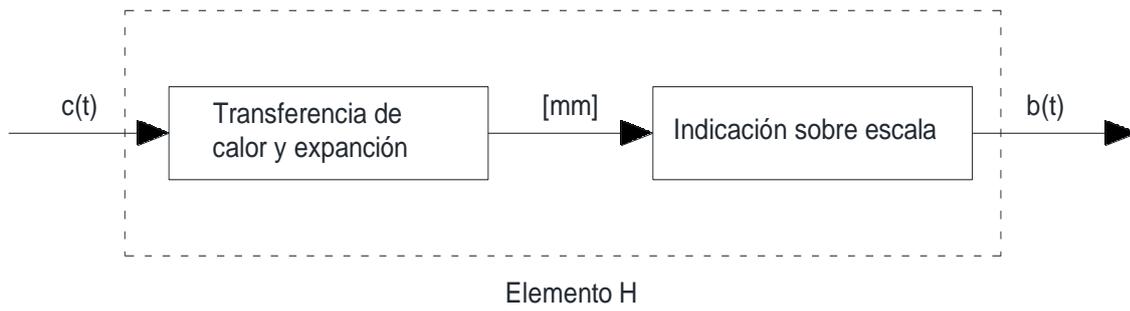


Ilustración 42 “Lazo interno del elemento de control”

Arriba  $c(t)$  y  $b(t)$  son funciones temporales, pero entre ellas hay una relación funcional.

$$b_{\text{estatico}} = f. c_{\text{estatico}} \quad (9)$$

Donde “f” puede no ser precisamente lineal

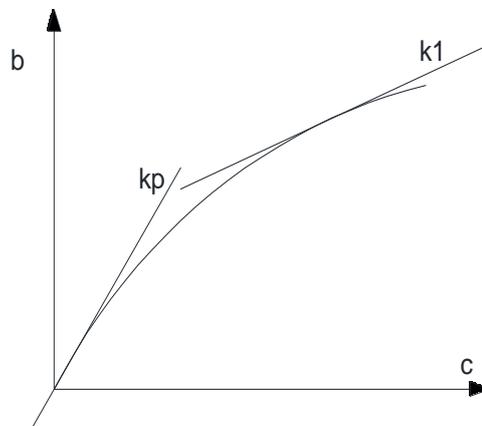


Ilustración 43 “Representación función  $b(c)$ ”

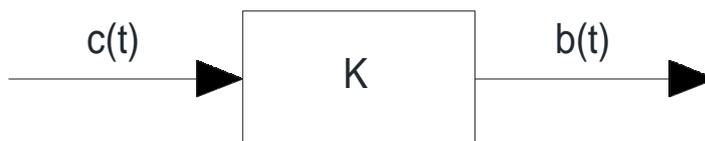


Ilustración 44 "Rediccion a diagrama de bloque de la función"

$$b(t) = K \cdot c(t) \quad (10)$$

Donde "K" es la constante de proporción entre "c" y "b" para todo "t", esta es la ganancia en estado estático o ganancia a frecuencia cero, podemos decir que es como: "La corriente continua es el límite al que tiende la corriente alterna cuando la frecuencia tiende a cero". Saturación: es la llegada de una señal a su valor de contorno.

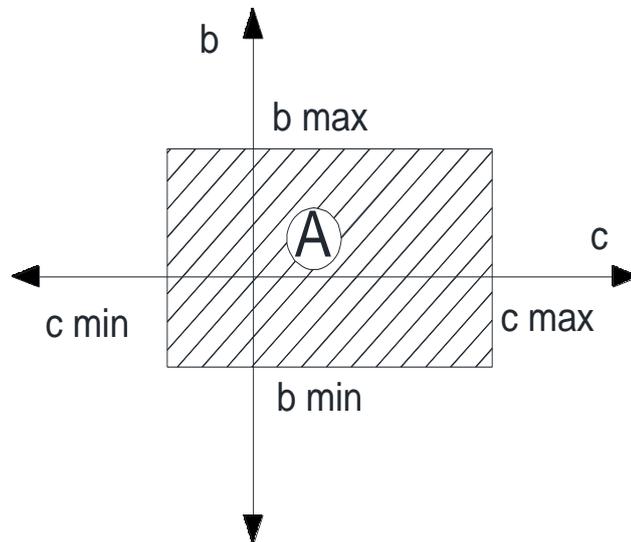


Ilustración 45 "Estabilidad entre b y c"

Los valores de "b" y "c" deben pertenecer al conjunto "A", si " $c > c_{max}$ ", el termómetro se rompe, si " $c < c_{min}$ ", todo el Hg estaría en el bulbo.

La saturación es propia de todo sistema físico, por ejemplo:

- En un transmisor hablamos del alcance de medición.
- En una válvula de control hablamos de válvula totalmente abierta o cerrada

- En un controlador hablamos de saturación cuando llega a extremos de su alcance normal, que para neumática es 3 y 15 psi y para electrónicos es 4 y 20 mA.

En un proceso, hablar de saturación es hablar de:

- Tanque rebalsado o vacío
- Reactor disparado o apagado
- Acumulador o cañería con su válvula de seguridad soplando
- Caldera con su válvula de seguridad soplando.

## Obtención de la función de transferencia

Retomemos el termómetro y apliquemos algunos determinados pasos para su estudio:

1. Plantear la ecuación de balance dinámico:

$$m \cdot c_p b \cdot \frac{dT_b(t)}{dt} = h \cdot A \cdot [T_f(t) - T_b(t)] - 0 \quad (11)$$

$$\text{Acumulado} = \text{Entrada} - \text{salida} \quad (12)$$

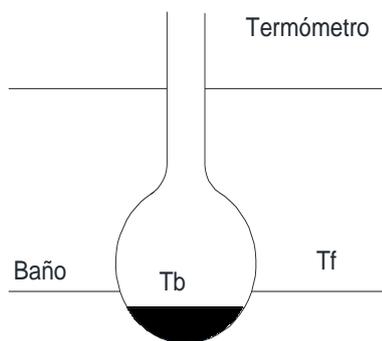


Ilustración 46 “Sistema Termómetro sumergido en líquido”

- $m$ : Masa del Hg
- $c_p b$ : Calor específico del Hg
- $h$ : Coeficiente de transferencia de calor
- $A$ : Área de transferencia

2. Ecuación de balance para estado estático:

$$0 = h.A. [T_f e - T_b e] \quad (13)$$

3. Restamos ambas ecuaciones (ecuación de desviación o apartamiento)

$$m.c_p b. \frac{dT_b(t)}{dt} = h.A. [T_f(t) - T_b(t)] - h.A.$$

$$m.c_p b. \frac{dT_b(t)}{dt} = h.A. [T_f(t) - T_f e] - h.A. [T_b(t) - T_b e]$$

Donde:  $\begin{cases} c(t) = T_f(t) - T_f e \\ b(t) = T_b(t) - T_b e \end{cases}$

$$m.c_p b. \frac{db(t)}{dt} = h.A. c(t) - h.A. b(t) \quad (14)$$

4. Aplicamos Laplace

$$m.c_p b. s. b(s) = h.A. c(s) - h.A. b(s)$$

$$(m.c_p b. s + h.A). b(s) = h.A. c(s)$$

$$\frac{b(s)}{c(s)} = \frac{h.A}{m.c_p b. s + h.A} \quad (15)$$

Esta es la función de transferencia del elemento termómetro, ya que la definición de Función de Transferencia dice: “La Función de Transferencia es el cociente entre la transformada de Laplace de la señal de salida  $b(s)$  y la transformada de Laplace de la señal de entrada”.

$$\frac{b(s)}{c(s)} = \frac{1}{\frac{m \cdot c_p \cdot b \cdot s}{h \cdot A} + 1}$$

Esta es la función de transferencia de 1º orden ya que “s” esta elevado a la primera potencia:

$$H(s) = \frac{b(s)}{c(s)} = \frac{k}{T \cdot s + 1} \quad (16)$$

Donde:

$$T = \frac{m \cdot c_p \cdot b}{h \cdot A} \quad y \quad k = 1$$

“k” es la ganancia estática del elemento y “T” es la constante de tiempo.

$$[T] = \left[ \frac{m \cdot c_p \cdot b}{h \cdot A} \right] = \frac{kg \cdot \frac{Cal}{kg \cdot ^\circ C}}{\frac{Cal}{hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C} \cdot m^2} = hs$$

Es importante destacar que:

$m \cdot c_p \cdot b = C$  (*capacidad térmica*)

$$\frac{1}{h \cdot A} = R \text{ (*resistencia termica*)}$$

O sea que:

$$T = R \cdot C \quad (17)$$

Obtenida la Función de Transferencia se puede:

- A. Elegir la señal de entrada cuyo efecto se desea considerar.
- B. Operar con  $b(s) = H(s).c(s)$ .
- C. Antitransformar con la ayuda de tablas y determinar  $b(t)$  para un  $c(t)$  cualquiera, o sea la respuesta temporal de la salida  $b(t)$  para la señal de entrada  $c(t)$  aplicada.

La ecuación de desviación o apartamiento respecto al estado inicial estático (o de reposo), la llamamos simplemente la Ecuación Dinámica. Esta ecuación dinámica posee varias ventajas:

- A. Matemáticamente: es conveniente trabajar con variables de apartamiento pues equivale a tomar como origen el estado inicial y no tenerlo que hacer intervenir al transformar.
- B. Físicamente: para que la respuesta a considerar sea solo representativa de la señal aplicada, el sistema debe estar previamente en reposo.

## **Tiempo muerto**

Considérese el proceso que se muestra en la Ilustración 8, en este caso lo que

Interesa es conocer cómo responde  $T_1(t)$  a los cambios en la temperatura de entrada y

De ambiente.

Se hacen las siguientes suposiciones acerca del conducto de salida entre el tanque y el punto 1:

Primera, el conducto está bien aislado; segundo, el flujo del líquido a través del conducto es altamente turbulento, de tal manera que básicamente no hay mezcla de retorno en el líquido.

Bajo estas suposiciones, la respuesta de  $T_1(t)$  a los disturbios será la misma que  $T(t)$ , con la excepción de que tiene un retardo de cierto intervalo de tiempo, es decir, existe un lapso finito

entre la respuesta de  $T(t)$  y la respuesta de  $T_1(t)$ , lo cual se ilustra; gráficamente en la figura 2, para un cambio en escalón de la temperatura de entrada  $T(t)$ .

El intervalo entre el momento en que el disturbio entra al proceso y el tiempo en que la temperatura  $T_1(t)$  empieza a responder se conoce como tiempo muerto, retardo de tiempo o retardo de transporte y se representa mediante el término “ $t_0$ ”.

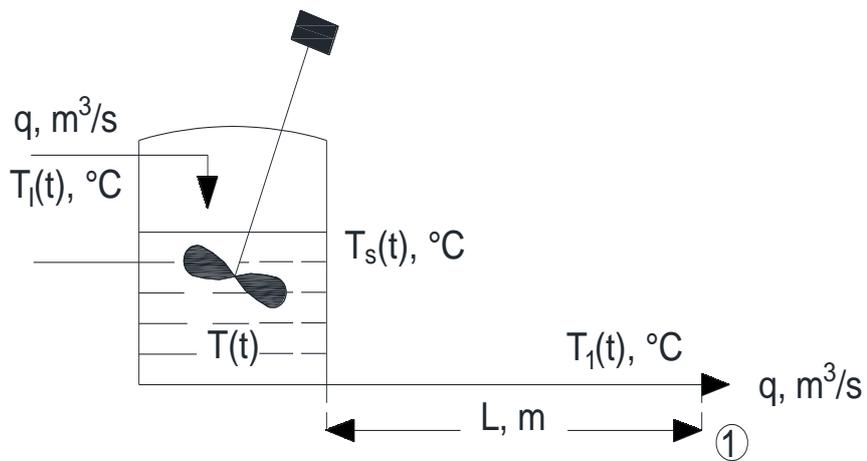


Ilustración 47 “Control de temperatura de salida en el tanque”

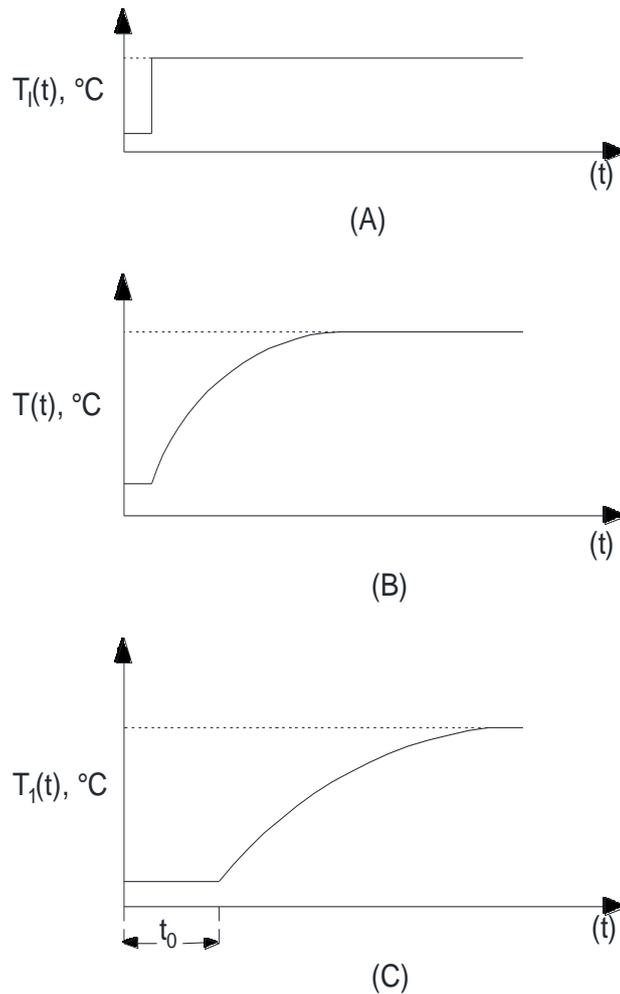


Ilustración 48 “ (A) Señal Entrada aplicada al sistema de control, (B) Señal de la temperatura ambiente, (C) Señal de salida del sistema de control”

## Modelos matemáticos y analogías

Después de lo que hemos visto y de haber denominado señales de estudio a las que nos permiten conocer las características estáticas y dinámicas de los elementos que componen el sistema (proceso y elementos de control). El estudio es interferir la conducta o respuesta de un elemento o sistema para una entrada dada.

El modelo matemático de un elemento o sistema es una representación adecuada de su comportamiento físico.

### Analogías

Tomemos como ejemplo el siguiente sistema mecánico:

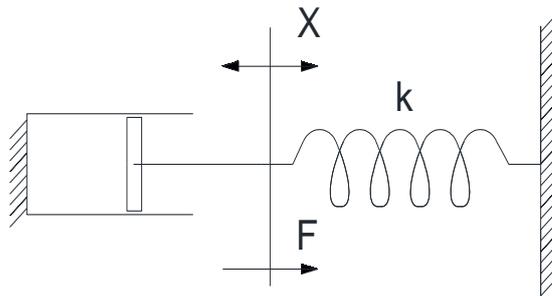


Ilustración 49 “Sistema masa-resorte”

En el estado de reposo ( $X=X_0$ ), aplicamos una fuerza “F” y obtendremos:

$$B \cdot \frac{d\Delta x}{dt} + k \cdot \Delta x = F \quad (18)$$

B: Fricción viscosa del pistón.

K: Constante de elasticidad del resorte.

Transformando:

$$B \cdot S \cdot \Delta x(s) + k \cdot \Delta x(s) = F(s) \quad (19)$$

$$(B \cdot S + k) \Delta x(s) = F(s)$$

La relación salida (x) a entrada (F) es:

$$\frac{\Delta x(s)}{F(s)} = \frac{1}{(B \cdot s + k)} = \frac{\frac{1}{k}}{\left(\frac{B \cdot s}{k} + 1\right)}$$

La constante de tiempo es:

$$T = \frac{B}{k} \quad (20)$$

Tomemos el siguiente sistema eléctrico de 1° orden:

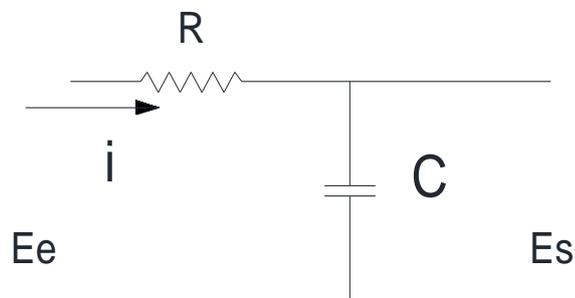


Ilustración 50 "Sistema eléctrico R-C"

$$Ee = R \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{Q}{C} \quad (21)$$

$$Ee = i(t) \cdot R + \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt$$

$$e = R \cdot \frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot q(t)$$

$$Es = \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt, \quad \text{el voltaje a traves de } C \text{ es } Es = \frac{q}{C}$$

$$Ee(s) = i \cdot \left( R + \frac{1}{CS} \right) \quad (22)$$

$$Es(s) = \frac{i}{CS} \quad (23)$$

$$\frac{Es(s)}{Ee(s)} = \frac{i \cdot \left(\frac{1}{CS}\right)}{i \cdot \left(R + \frac{1}{CS}\right)} = \frac{1}{R \cdot CS + 1} = \frac{1}{TS + 1} \quad (24)$$

Esto nos permite decir que la analogía entre modelos matemáticos de distinta naturaleza nos permite tratar de ver el comportamiento de sistemas que aún no se han construido.

$$\frac{Es(s)}{Ee(s)} = \frac{1}{TS + 1} \quad (24)$$

### Respuesta temporal a una señal escalón de un elemento de primer orden

Supongamos una válvula de control y tratemos de escribir su ecuación de transferencia.

Una válvula neumática siempre tiene una demora dinámica o también llamada retraso entre entrada y salida, lo que significa que el movimiento del vástago no responde instantáneamente a un cambio de presión o señal “m1” que viene del controlador. Generalmente podemos asimilar la válvula de control, (o la relación entre la salida “m” y la entrada “m1”) Si la válvula es pequeña a una de 1° orden y la ecuación de transferencia sería parecida a las que vimos anteriormente.

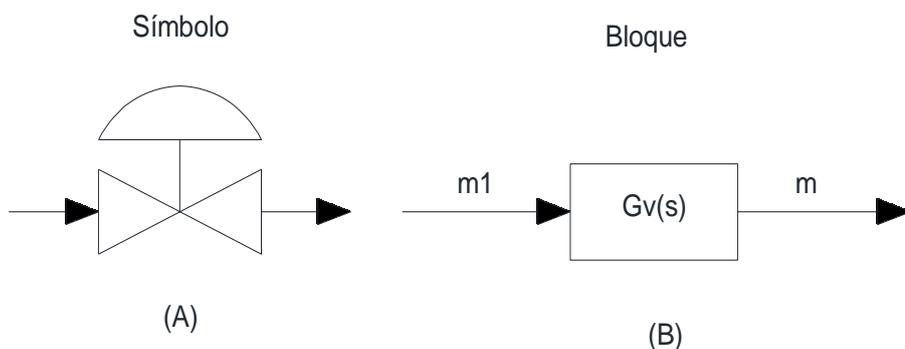


Ilustración 51 “(A) Válvula, (B) Diagrama de bloque “

Esquema tecnológico:

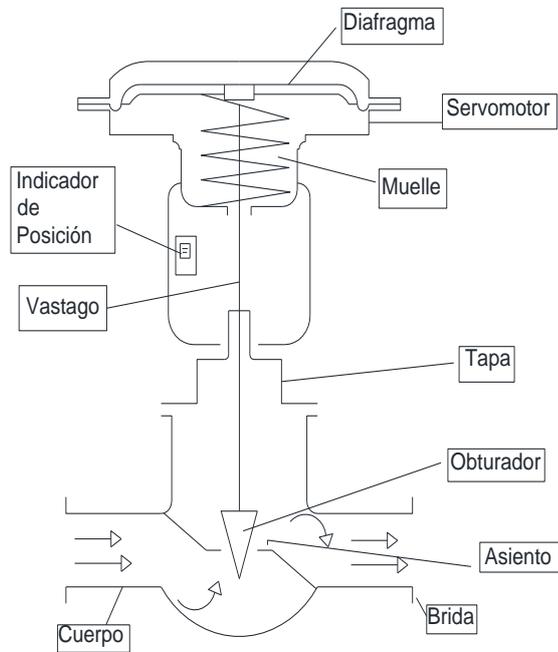


Ilustración 52 “Válvula de control”

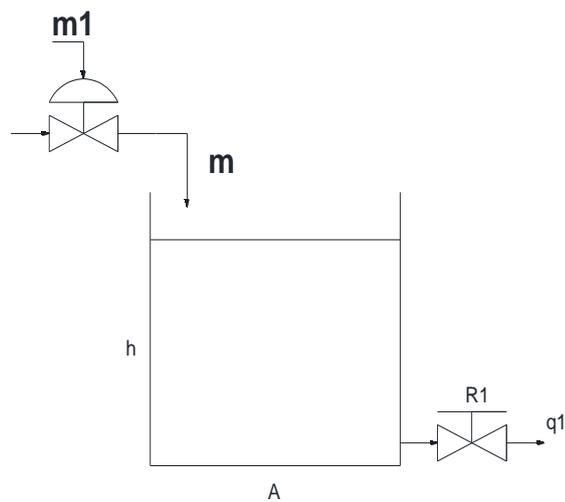


Ilustración 53 “Control de nivel con válvula a la salida”

$$\frac{\Delta m(s)}{\Delta m_1(s)} = Gv(s) = \frac{kv}{Tv.S + 1} \quad (25)$$

Si consideramos además la variación de altura del nivel de agua:

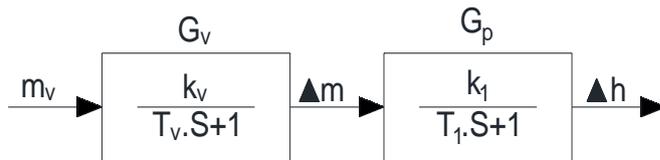


Ilustración 54 “Diagrama del bloque del sistema de control de nivel”

$$G(s) = \frac{\Delta m}{\Delta m_1}(s) = \frac{kv}{Tv.S + 1}$$

Si aplicamos una señal rampa en  $\Delta m_1$  obtendremos:

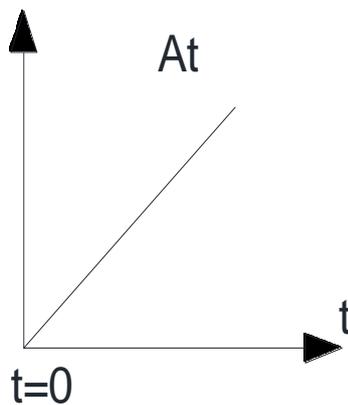


Ilustración 55 “Grafico señal de salida”

$$\mathcal{L}\{At\} = \frac{A}{s^2} = \Delta m_1 \quad (26)$$

$$\Delta m(s) = \{Función\ de\ transf.\} \times \{Señal\} \quad (27)$$

$$\Delta m(s) = \left(\frac{A}{S^2}\right) \cdot \left(\frac{kv}{Tv \cdot S + 1}\right)$$

$$\Delta m(s) = A \cdot kv \cdot \left[\frac{1}{S^2(Tv \cdot S + 1)}\right] \quad (28)$$

La antitransformada en el dominio temporal será:

$$\Delta m(t) = A \cdot kv \cdot Tv \cdot \left(e^{-\frac{t}{Tv}} + \frac{t}{Tv} - 1\right) \quad (29)$$

Esta es la respuesta temporal a una señal rampa de entrada, para graficarlo hacemos lo siguiente:

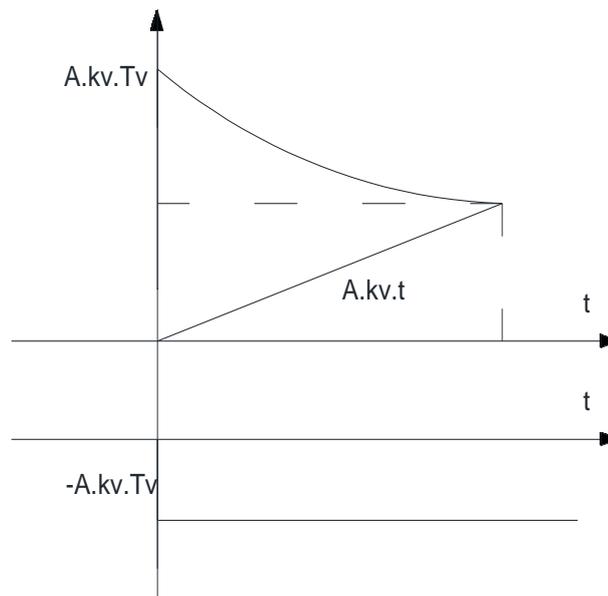


Ilustración 56 “Gráfico  $\Delta m(t)$  por término”

Sumando tendremos:

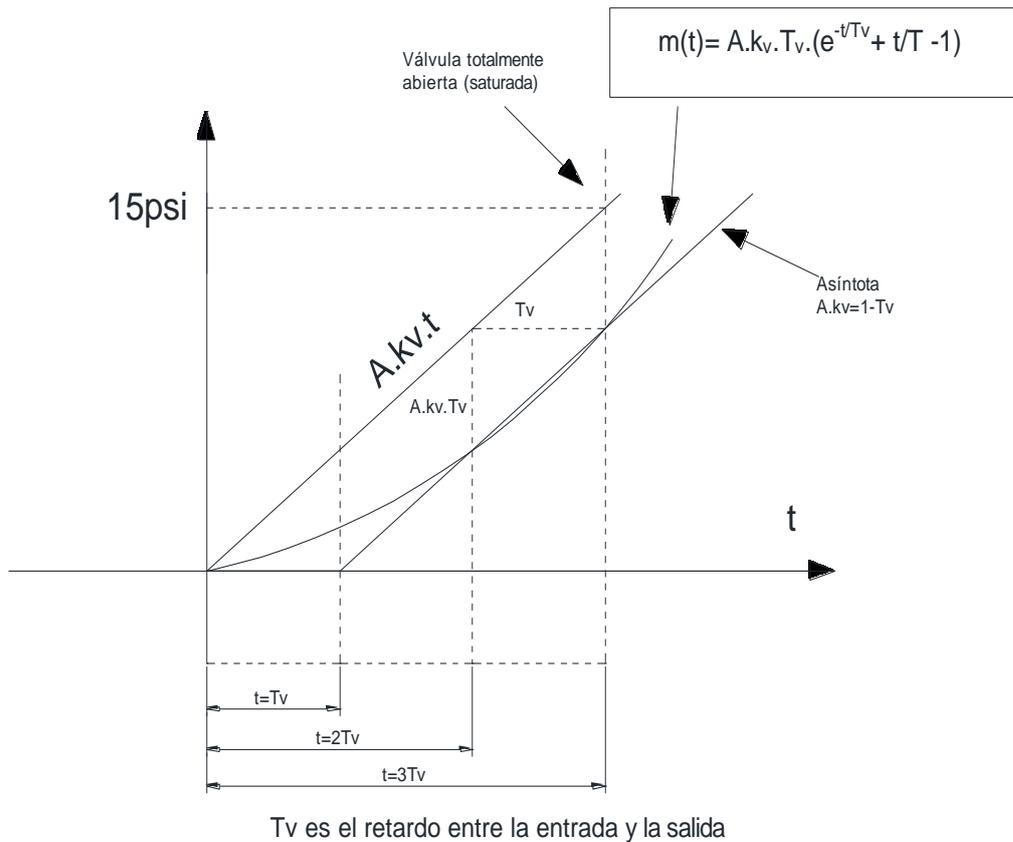


Ilustración 57 “Grafico  $\Delta m(t)$  por término”

Si hemos elegido una válvula normal cerrada, entonces con la máxima salida  $\Delta m_1$ , la válvula se abre totalmente.

En los sistemas físicos reales hay límites de saturación, a partir de ellos estos no responden: caso válvula, estos límites son los puntos de apertura máxima o caudal máximo y cierre total o caudal cero. Aunque pase de 15 psi la válvula satura.

En el gráfico se puede ver que la señal de salida esta retardada de la entrada, una distancia horizontal “ $T_v$ ”, la distancia vertical en un instante dado de tiempo entre una curva y la otra es “ $A.kv.T_v$ ” que es el error dinámico que depende de la constante de tiempo “ $T_v$ ” y de la señal aplicada “ $A$ ”.

Un sistema de primer orden presenta un retardo entre la entrada y la salida igual a “TV” y un error dinámico propio del sistema (la lentitud de reacción del elemento) que depende de la constante de tiempo y de la velocidad de cambio de la señal de entrada “A”.

Para un instante dado hay una diferencia entre lo que aplico y lo que obtengo, es el error dinámico.

La válvula se abre hasta un cierto % de apertura, tiene dos límites concretos de trabajo, si llego a 15 psi, por más que pase de 15 psi la válvula satura (llega al límite de saturación o capacidad). Se debe tratar que el límite físico de saturación este por encima del límite operativo (no llega al límite real).

En el control de procesos, lo importante es analizar el comportamiento de las perturbaciones en las variables controladas, y estudiando los comportamientos transitorios de todos los elementos que forman el lazo de control, diseñar un sistema de control que atenué dichos efectos, o sea todo lo que veamos nos permitirá estar en condiciones de:

- A. Estimar el tipo de respuesta temporal ante las señales de estudio más comunes.
- B. Estimar el tipo de respuesta en frecuencia.
- C. Trabajar sobre la controlabilidad y estabilidad de los lazos de control.

## **Función de transferencia de 2<sup>do</sup> orden**

Para analizar la respuesta temporal de un elemento de 2<sup>do</sup> orden, tomemos al termómetro que analizamos anteriormente y lo protegemos mecánicamente con una vaina.

Suponemos:

1. Que la capacidad térmica de la película del fluido es despreciable.

2. Que las resistencias de la pared de la vaina, de la pared del bulbo y del fluido interno son despreciables.
3. Que la capacidad térmica de la cámara de aire es despreciable.

Los balances de energía son:

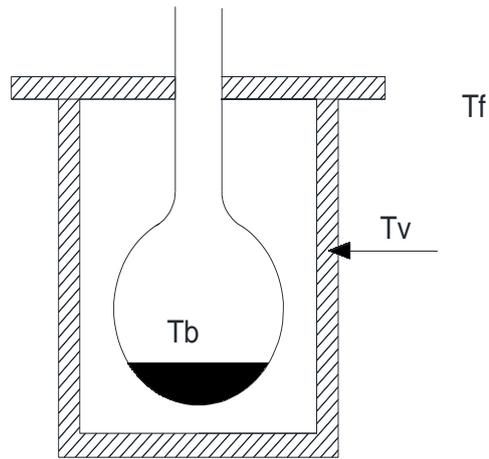


Ilustración 58 "Termómetro"

$$m_v \cdot c_p v \cdot \frac{dT_v}{dt} = h_1 \cdot A_1 \cdot [T_f - T_v] - h_2 \cdot A_2 \cdot [T_v - T_b] \quad (30)$$

$$m_b \cdot c_p b \cdot \frac{dT_b}{dt} = h_2 \cdot A_2 \cdot [T_v - T_b] \quad (31)$$

- $m$ : Masa del Hg
- $c_p$ : Calor específico
- $h$ : Coeficiente de transferencia de calor
- $A$ : Área de transferencia

Resolviendo:

$$m_v \cdot c_p v \cdot S \cdot \Delta T_v(s) = h_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_f(s) - (h_1 \cdot A_1 + h_2 \cdot A_2) \cdot \Delta T_v(s) + h_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_b(s) \quad 32$$

$$m_b \cdot c_p b \cdot S \cdot \Delta T_b(s) = h_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_v(s) - h_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_b(s) \quad (33)$$

Debemos encontrar la ecuación de transferencia

$$\frac{\Delta T_b(s)}{\Delta T_f(s)} \quad (34)$$

$$\Delta T_v(s) \cdot (m_v \cdot c_p v \cdot S + h_1 \cdot A_1 + h_2 \cdot A_2) = h_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_f(s) + h_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_b(s) \quad (35)$$

$$\Delta T_v(s) \cdot h_2 \cdot A_2 = (m_b \cdot c_p b \cdot S + h_2 \cdot A_2) \cdot \Delta T_b(s)$$

$$\Delta T_b(s) \cdot \frac{m_b \cdot c_p b \cdot S + h_2 \cdot A_2}{h_2 \cdot A_2} = \frac{h_1 \cdot A_1}{m_v \cdot c_p v \cdot S + h_1 \cdot A_1 + h_2 \cdot A_2} \cdot \Delta T_f(s) + \frac{h_2 \cdot A_2}{m_v \cdot c_p v \cdot S + h_1 \cdot A_1 + h_2 \cdot A_2} \cdot \Delta T_b(s)$$

Sacando  $\Delta T_b(s)$  factor común y despejando resulta:

$$\Delta T_b(s) = \frac{h_1 \cdot A_1 (m_v \cdot c_p v \cdot S + h_1 \cdot A_1 + h_2 \cdot A_2)}{\left(\frac{m_b \cdot c_p b}{h_2 \cdot A_2} \cdot S + 1\right) - \frac{h_2 \cdot A_2}{m_v \cdot c_p v \cdot S + h_1 \cdot A_1 + h_2 \cdot A_2}} \cdot \Delta T_f(s)$$

Multiplicando numerador y denominador por  $(m_v \cdot c_p v \cdot S + h_1 \cdot A_1 + h_2 \cdot A_2)$

$$\Delta T_b(s) = \frac{h_1 \cdot A_1}{\left(\frac{m_b \cdot c_p b}{h_2 \cdot A_2} \cdot S + 1\right) - \frac{h_2 \cdot A_2}{m_v \cdot c_p v \cdot S + h_1 \cdot A_1 + h_2 \cdot A_2}} \cdot \Delta T_f(s)$$

$$\Delta T_b(s) = \frac{1}{\left(\frac{m_b \cdot c_p b}{h_2 \cdot A_2} \cdot \frac{m_v \cdot c_p v}{h_1 \cdot A_1} \cdot S^2 + \left(\frac{m_b \cdot c_p b}{h_2 \cdot A_2} + \frac{m_v \cdot c_p v}{h_1 \cdot A_1} + \frac{m_b \cdot c_p b}{h_1 \cdot A_1}\right) \cdot S + 1\right)} \cdot \Delta T_f(s)$$

$$\frac{\Delta T_b(s)}{\Delta T_f(s)} = \frac{1}{T_1 \cdot T_2 \cdot S^2 + (T_1 + T_2 + T_{1-2}) \cdot S + 1} \quad (36)$$

De 1 y 2 se puede mediante bloques resolver el problema:

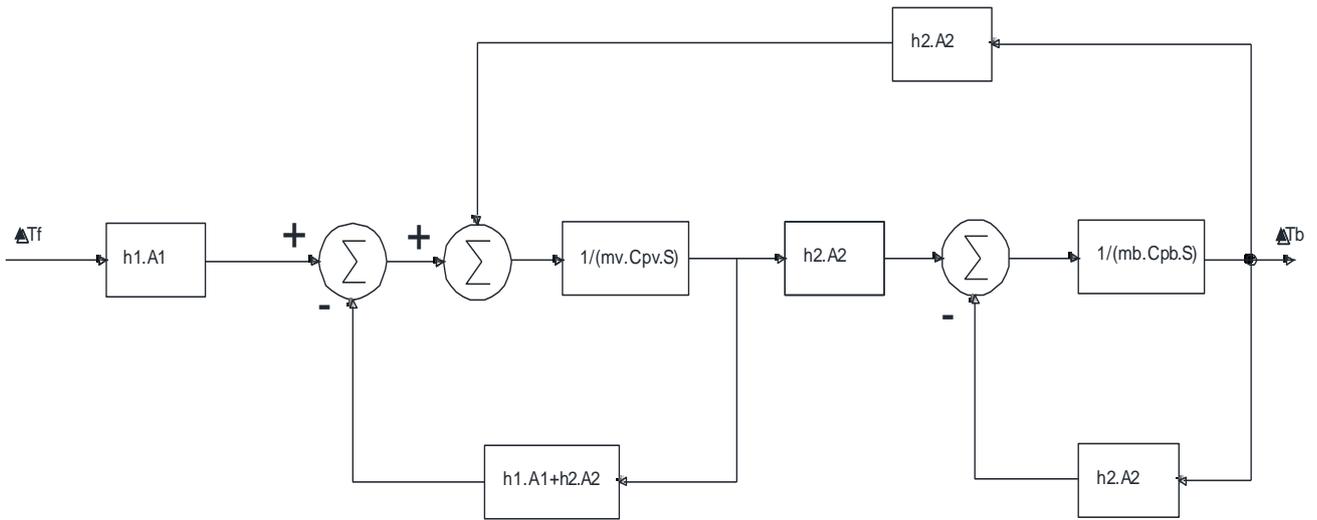


Ilustración 59 “Diagrama en bloque Termómetro”

- 1) Este sistema es interactuante.
- 2) Lo que pasa con la vaina no es independiente de lo que pasa con el bulbo.
- 3) El denominador de la función de transferencia es de 2<sup>do</sup> orden y el sistema también lo será.
- 4) En la función de transferencia de sistemas interactuante aparecen constantes de tiempos mixtas, que hacen que la respuesta temporal se haga más lenta.

## CAPITULO 3

### Acciones De Control

Un control automático compara el valor de salida (*variable controlada*) con el valor deseado (*set-point*) y produce una señal de control que reduce la desviación (*error*) a cero o a un valor pequeño.

- habíamos visto que el mecanismo de regulación básica de los sistemas automáticos es la realimentación negativa.
- Habíamos hablado también de 2 clases de realimentación: positive & negative.
- Positive feedback: la realimentación positiva es una realimentación en la cual el sistema responde en la misma dirección que la perturbación, dando por resultado la amplificación de la señal original en vez de estabilizar la señal, si tenemos un “controlador de temperatura”, y este tuviera positive feedback, y con él calefaccionaríamos una habitación, este controlador incrementaría el color cuando la temperatura estuviese por arriba del set Point y decrementaría el color cuando la temperatura (de la habitación) estuviese por abajo.
- Negative feedback: es la que se opone a la causa que lo dio efecto es un tipo de realimentación en el cual el sistema responde en una dirección opuesta a la señal. El proceso consiste en retro-actuar sobre alguna entrada del sistema una acción (fuerza, voltaje, etc.) proporcional a la salida o resultado del sistema, de forma que se invierte la

- dirección del cambio de la salida. Esto tiende a estabilizar la salida, procurando que se mantenga en condiciones constantes.

### **Las acciones básicas de control son**

- Control de dos posiciones (si/no) u (on/off).
- Control proporcional.
- Control proporcional + integral.
- Control proporcional + derivativo.
- Control proporcional + integral + derivativo.

### **ON – OFF**

- El controlador ON–OFF es el más barato Y el más usado, Es el usado en sistemas de calefacción domésticas, de refrigeración, tanques de agua, etc.

Cuando la variable medida esté por debajo de Set–Point, el controlador está ON y la señal de salida es el valor máximo. Cuando la variable controlada está por arriba del Set, el controlador está OFF y la salida es cero.

El intervalo de un controlador ON–OFF o su diferencial Se pueden incrementar para que baje la frecuencia y así su uso.

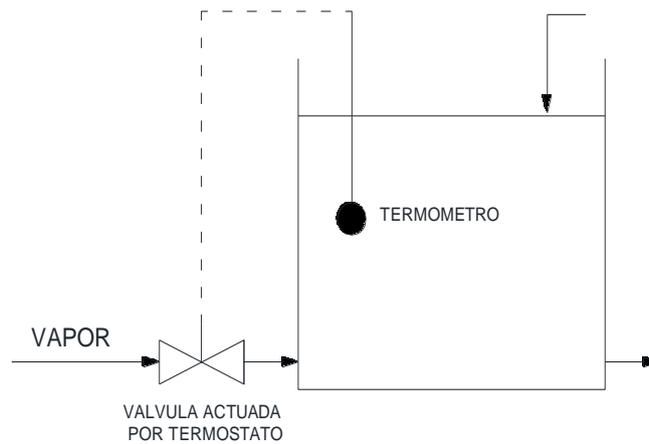


Ilustración 60 “Sistema control de temperatura con inyección de vapor on-off”

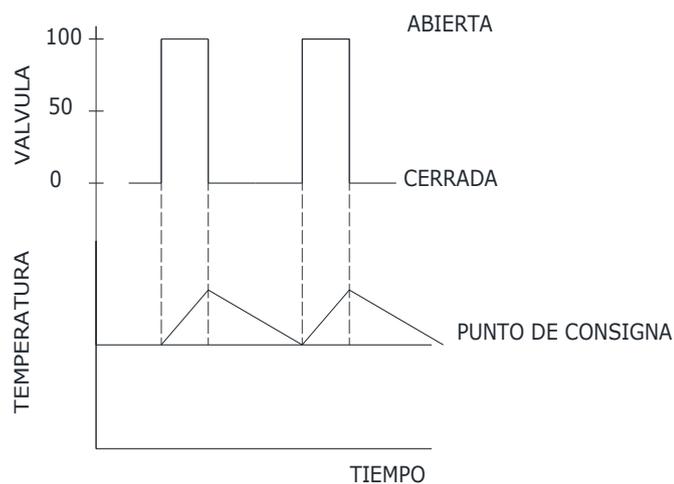


Ilustración 61 ”Grafico-sistema control de temperatura con inyección de vapor on-off”

## Controladores

- Como habíamos hablado, este no es obviamente una función que nos lleve a controlar algo.

En cambio, la negative feedback trabaja como nosotros estamos necesitando que lo haga, o sea si la temperatura sube por sobre el S.P. entonces el calor disminuye, y el calor aumenta si la temperatura (variable controlada) baja de S.P.

Veamos un esquema de este lazo simple:

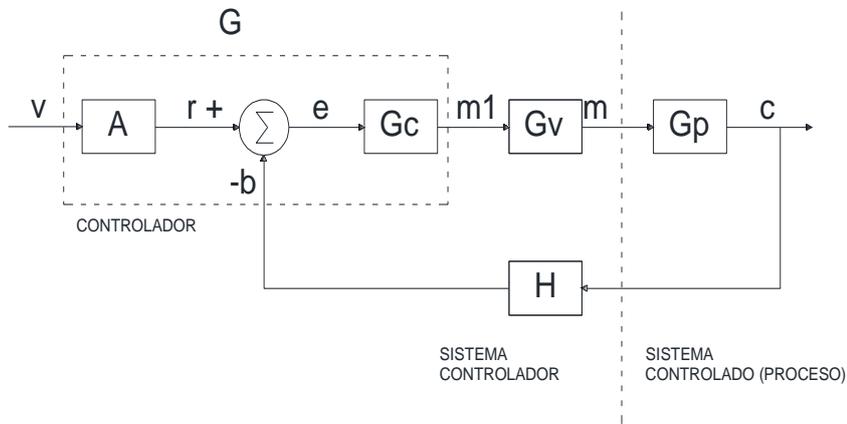


Ilustración 62 “Lazo de control- Negative feedback”

- La función principal de un CONTROLLER es regular (controlar) que nuestra variable controlada (en nuestro caso la temperatura) se mantenga en el S.P.

Si no hay demoras en la transferencia de calor, la salida del proceso es triangular, pero el caso real es:

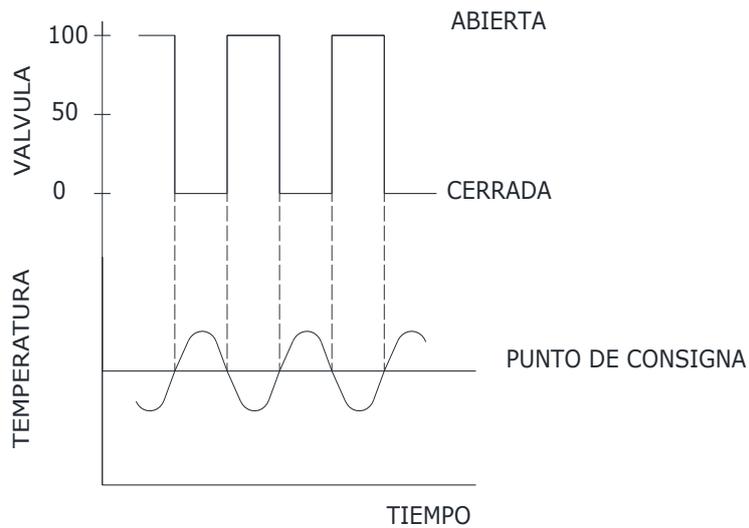


Ilustración 63 “Grafico-sistema control de temperatura - Negative feedback”

Hay un sobre rango causado por la capacidad calorífica de la pared, después que la válvula cierra, el calor continúa suministrándose el fluido en el reactor, hasta que la pared se enfría a la temperatura del proceso. Después que la válvula abre suavemente, le lleva tiempo recalentar la pared y mientras tanto la temperatura cae por debajo del caso ideal.

### **Acción Proporcional**

En control ON – OFF es objetable en la mayoría de los procesos. Lo importante para lograr una operación constante cuando no hay perturbaciones, la VARIABLE CONTROLADA debe ser una función continua del error. Con el control proporcional, la salida es una función lineal de la señal de error.

$$m_1 = k_c \cdot e(t) + m_1(0) \quad (37)$$

Salida  $m_1$  proporcional al error  $e$ .

También se puede expresar como:

$$B = \frac{1}{k_c} \times 100 \rightarrow B: \text{Banda proporcional} \quad (38)$$

Además, Off-Set.

### **Acciones integrales y derivativas**

#### **Con control integral:**

$$I \rightarrow m_1 = \frac{k_c}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + m_1(0) \rightarrow T_i = \text{Tiempo integral} \quad (39)$$

No hay Off-Set con la acción integral.

$$P + I \gg m_1 = k_c \cdot \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \right) + m_1(0) \quad (40)$$

### Acción derivativa:

Esta acción es agregada a menudo a la proporcional + integral para sistemas lentos.

Incrementando la salida cuando el error cambia rápidamente, la acción derivativa anticipa el efecto de los cambios de carga y reduce el error máximo.

Tendremos entonces:

$$P + I + D \gg m_1 = k_c \cdot \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) + m_1(0) \quad (41)$$

$T_D = \text{Tiempo Derivativo}$

### Controlador proporcional:

Habíamos visto:

$$m_1 = k_c \cdot e(t) + m_1(0)$$

Para hablar del contenido proporcional veamos sus componentes:

1. Fuentes y resorte.
2. Palancas
3. Tobera, (flapper) obturador y booster neumático o amplificador.

$m_1(0) =$  Es un valor de error cero, es un valor base puesto que en  $e=0 \Rightarrow m_1(0) = 9$  (psi) o

$m_1(0)$  es el 50% de la salida del controlador, o  $m_1(0) = 12$  (mA).

## Principio Tobera-Obturador

### Principio de Flapper - Nozzle (base de todos los instrumentos neumáticos)

El sistema tobera-obturador consiste en un tubo neumático alimentado a una presión constante  $P_s$ , con una reducción en su salida en forma de tobera, la cual puede ser obstruida por una lámina llamada obturador cuya posición depende del elemento de medida. En la figura 2.1 se presenta el conjunto.

El aire de alimentación de presión normalizada 1,4 bar (20 psi) pasa por la restricción R y llena el volumen cerrado V escapándose a la atmósfera por la tobera  $R_v$ . Ésta tiene un diámetro muy pequeño, de unos 0,25-0,5 mm, mientras que la restricción R tiene un diámetro alrededor de 0,1 mm. Con el obturador abierto la presión posterior remanente es de unos 0,03 bar, lo cual indica que la relación de presiones diferenciales a través de la restricción R es de  $1,4/0,03 = 50$  veces. El consumo de aire del conjunto tobera-obturador es relativamente pequeño, del orden de 3 nlts/min.

El escape de aire a través de la tobera depende de la posición del obturador, es decir, del valor de "x". Debido a este escape, el volumen V se encontrará a una presión  $P_1$  intermedia entre  $P_s$  y la presión atmosférica. En efecto: para  $x = 0$  el obturador tapa casi totalmente a la tobera, con lo cual no hay escape de aire a la atmósfera y  $P_1$  llega a ser casi igual a la presión  $P_s$  del aire de alimentación: para "x" relativamente grande el obturador está bastante separado de la tobera y no limita el escape a la atmósfera siendo la presión  $P_1$  próxima a la atmosférica.

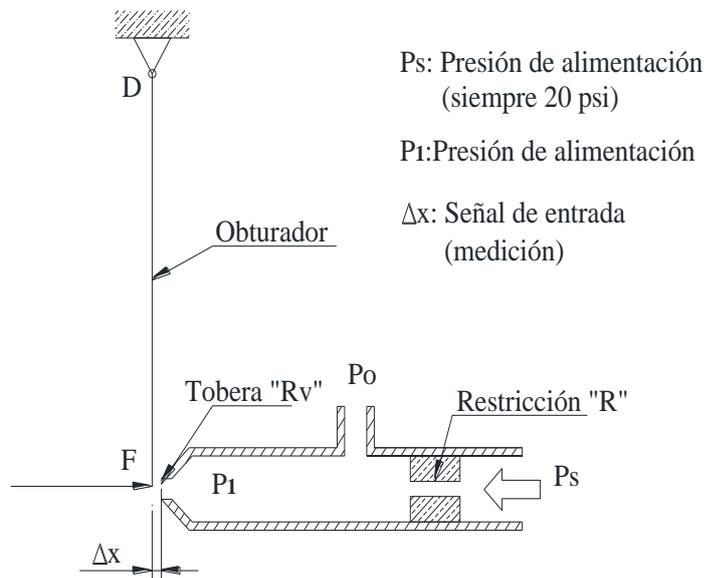


Ilustración 64 “Sistema tobera-obturador”

En la ilustración 5 se representa una tobera ejerce una fuerza sobre el obturador  $F$ ,  $P_1$ ,  $X$ ,  $P_s$ , que tiende a desplazarlo. Esta curva de respuesta típica de un sistema tobera-obturador, pudiendo verse que la misma no es lineal.

El aire que se escapa de la fuerza debe hacerse despreciable con relación a la fuerza del elemento de medida “ $F$ ” que posiciona el obturador.

Con este objeto, en el amplificador de dos etapas se utiliza sólo una parte reducida de la curva, y se disminuye además la sección de la tobera a diámetros muy pequeños de 0,1 a 0,2 mm (no se consideran diámetros más pequeños para evitar que la tobera se tape por suciedad del aire). De este modo, la parte reducida de la curva puede aproximarse a una línea recta con lo cual se consigue una relación prácticamente lineal entre el valor de la variable y la señal transmitida.

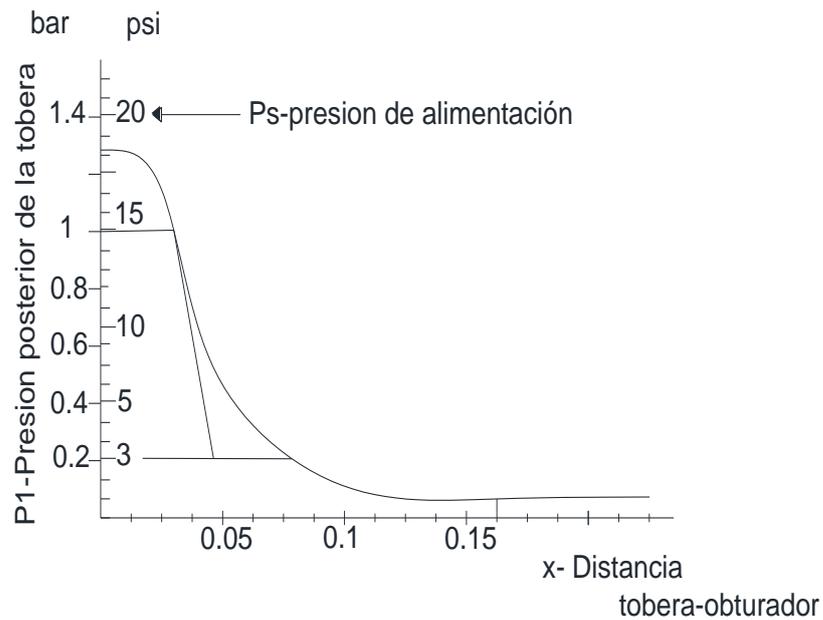


Ilustración 65 "Gráfico Presión-Distancia"

Como la restricción fija R es 3 a 4 veces menor que la tobera Rv, sólo pasa por la misma un pequeño caudal de aire, por lo cual, el volumen V debe ser tan reducido como sea posible para obtener un tiempo de respuesta del sistema inferior al segundo.

- La función primordial del controlador es la de regulación. El controlador está para cambiar su salida tantas veces como sea necesario para conservar la variable controlada en el Set-Point.

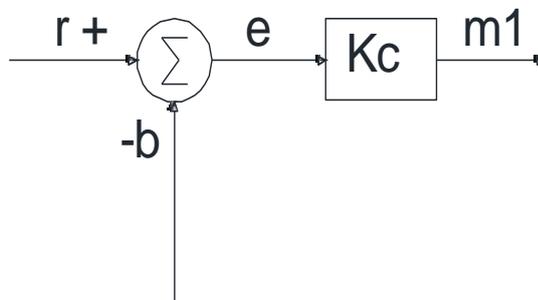


Ilustración 66 "Diagrama de bloque"

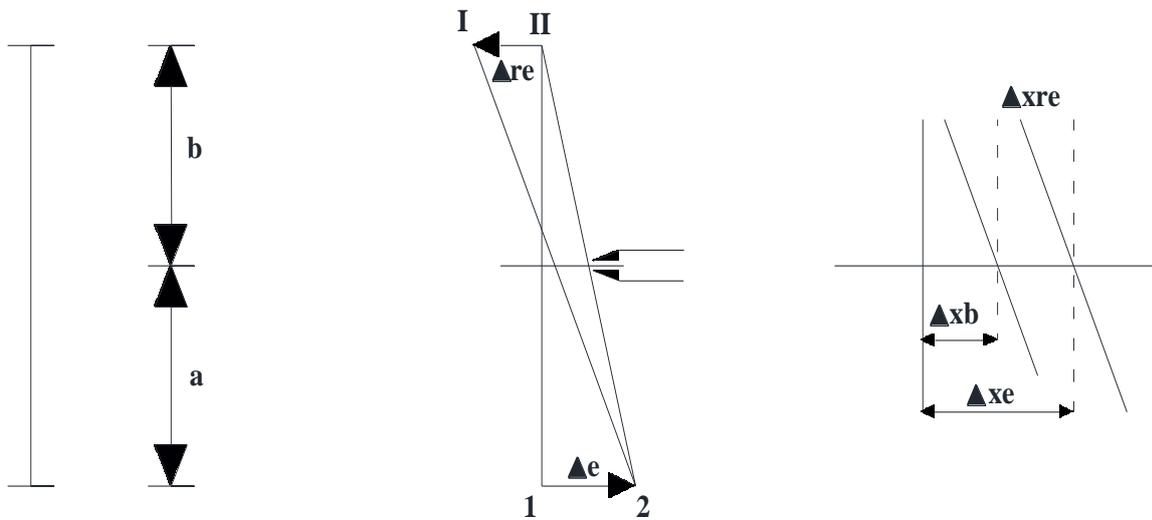


Ilustración 67 “Desplazamiento de Obturador”

- Si aumentamos “r” el (r) va de 1 a 2 y el flapper se arrima a la tobera en  $\Delta xe$ .
- Se incrementa la presión en la tobera y  $\Delta m_1$  crece.

$\Delta m_1$  llega al fuelle (-) y desplaza de II a I, esto que es una realimentación negativa hace que haya un retroceso  $\Delta X_{re}$ , y dejando a la tobera a  $\Delta xb$  del flapper.

Con esto tenemos la ganancia variable puesto que si desplazo la tobera hacia arriba o hacia abajo varía “kc”.

# Controlador P

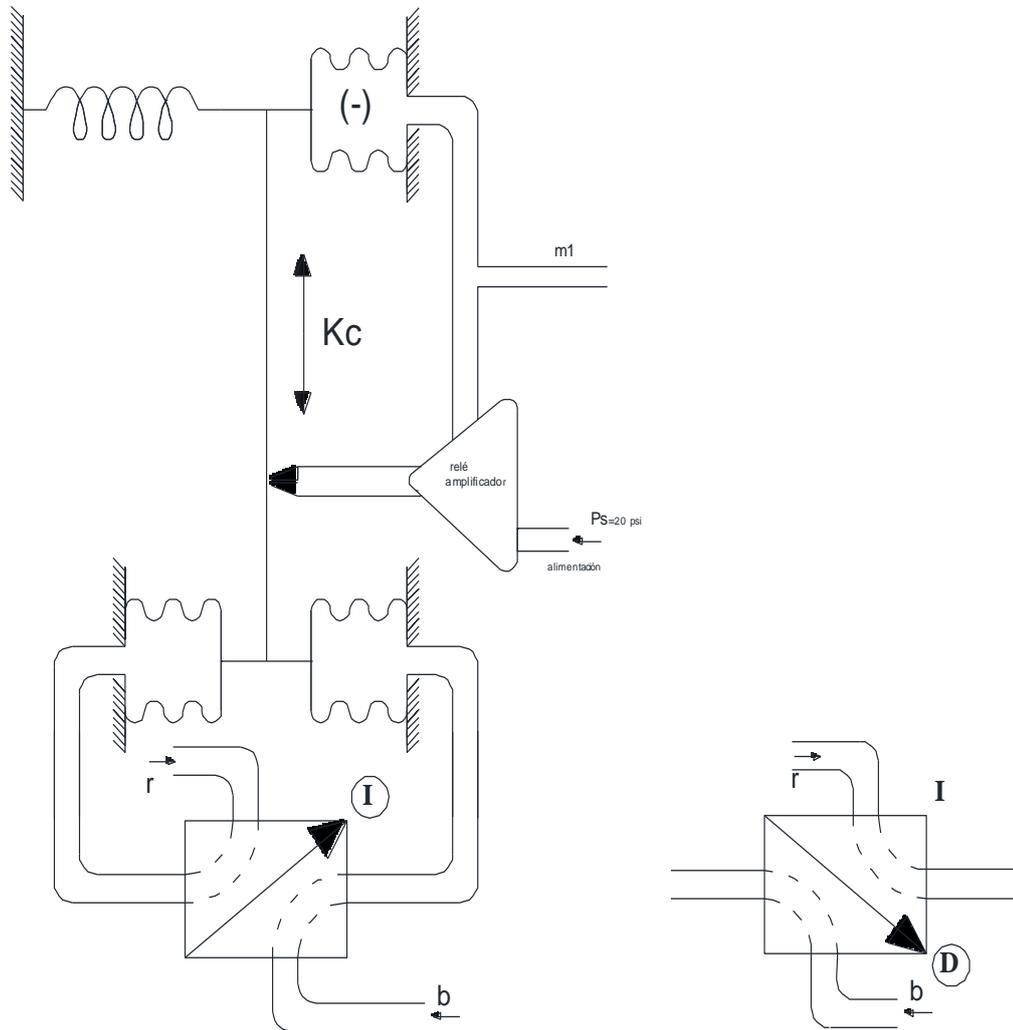


Ilustración 68 "Control Proporcional"

## Respuesta del P ante el escalón

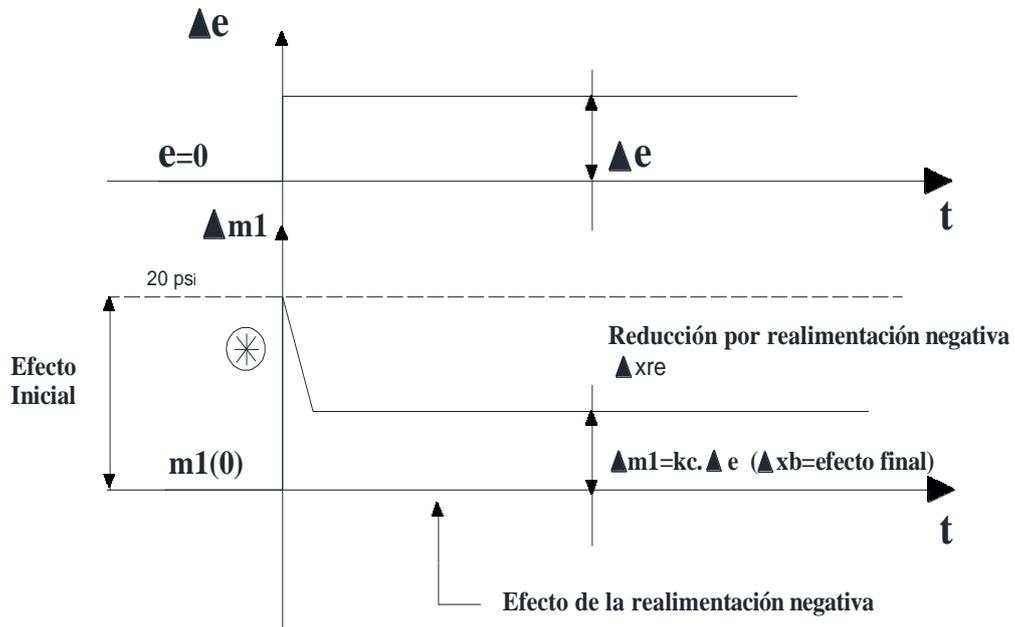


Ilustración 69 "Gráfica del control proporcional-entrada escalón"

Veamos en la figura el efecto inicial de saturación, pero en forma casi instantánea se llega a equilibrar por efecto de la realimentación negativa.

## Diagrama en bloques de P

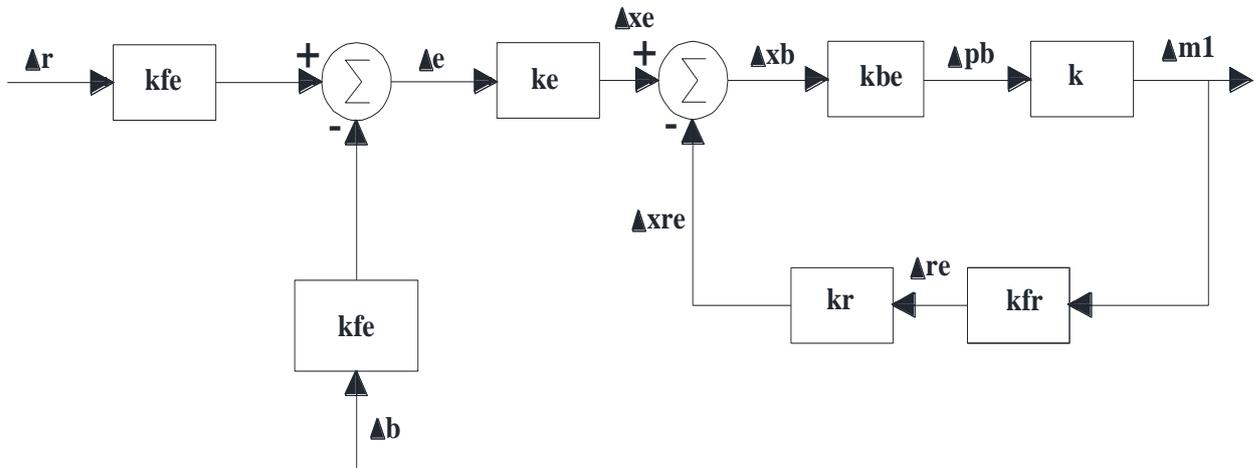


Ilustración 70 “Diagrama de bloque control proporcional”

La ganancia Proporcional ( $k_c$ ) de un controlador puede ser por ejemplo:

$$K_c = 0,5 \Rightarrow k_c = \Delta m_1 / \Delta e = 6 \text{ [psi]} / 12 \text{ [psi]} \Rightarrow K_c = 0,5$$

Esto significa que la válvula se abrirá la mitad de la carrera.

Si tenemos  $k_c = 1 \Rightarrow \Delta m^1 = 12 \text{ (psi)}$

&  $\Delta e = 12 \text{ (psi)}$

Y obtendremos la recta  $45^\circ$

Si  $k_c = 2 \Rightarrow \Delta e = \Delta m^1 / k_c [12/2] \Rightarrow \Delta e = 6 \text{ (psi)}$

De aquí surge que la banda proporcional es:

$$B = \frac{1}{k_c} \times 100 \quad (38)$$

## Relé Neumático

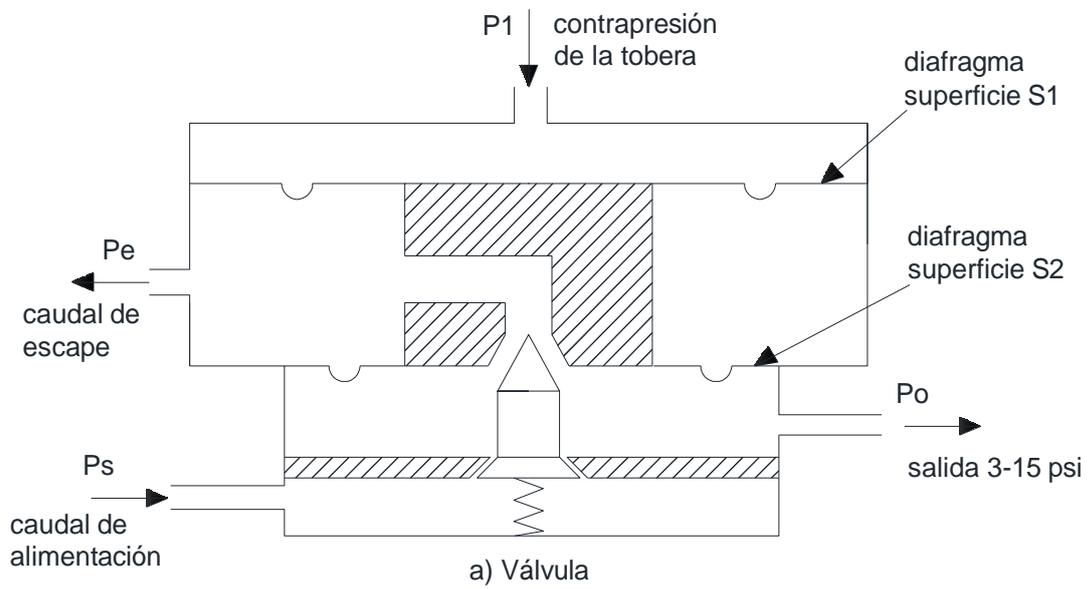


Ilustración 71 “Relé amplificador Neumático”

## Banda proporcional

$$B = \frac{1}{k_c} \times 100 \quad (38)$$

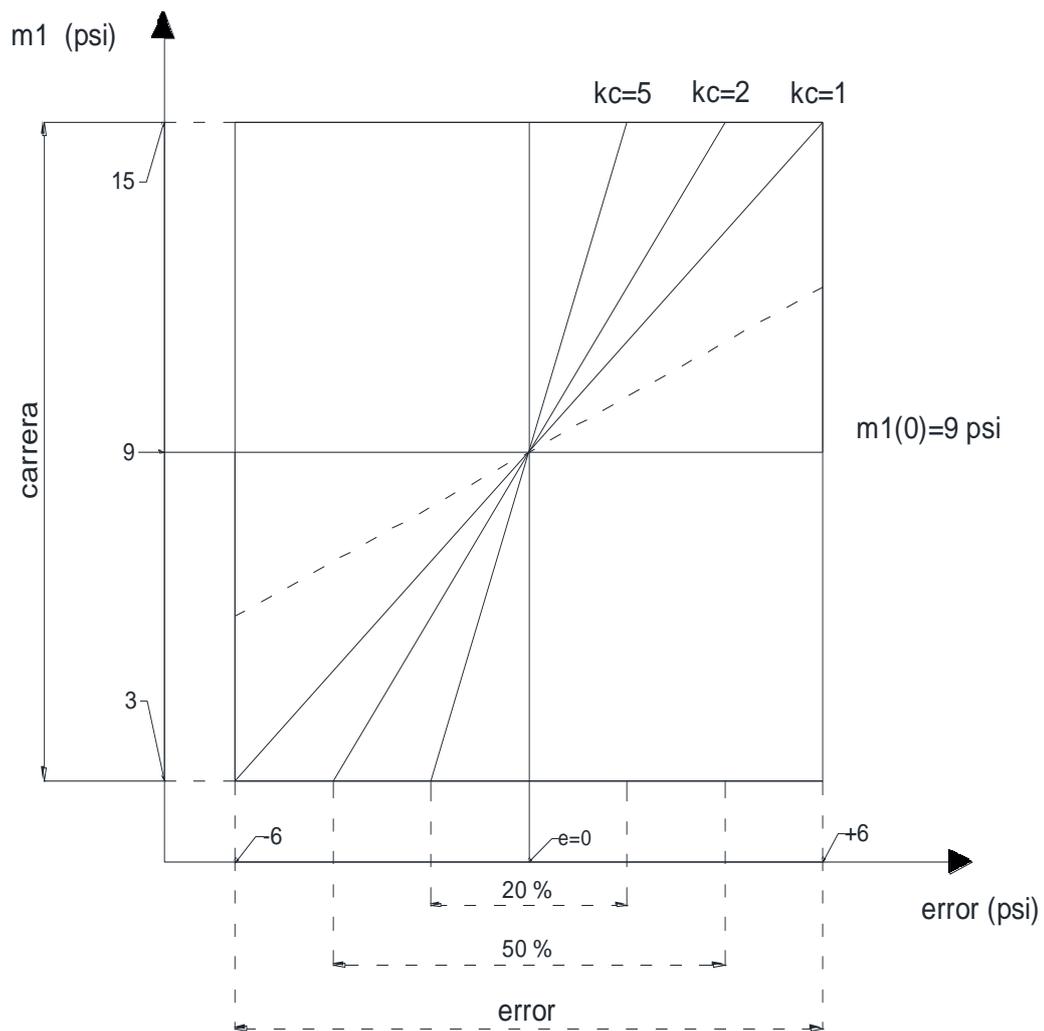


Ilustración 72 “Gráfica de banda proporcional”

### Banda directa e inversa

La acción directa provoca que la salida cambie en la misma dirección que el cambio en el error, lo que implica que un cambio positivo en el error provoca un cambio positivo en la salida de la banda proporcional. La acción inversa crea un cambio inverso en la salida, lo que implica que un cambio positivo en el error genera un cambio negativo en la salida.

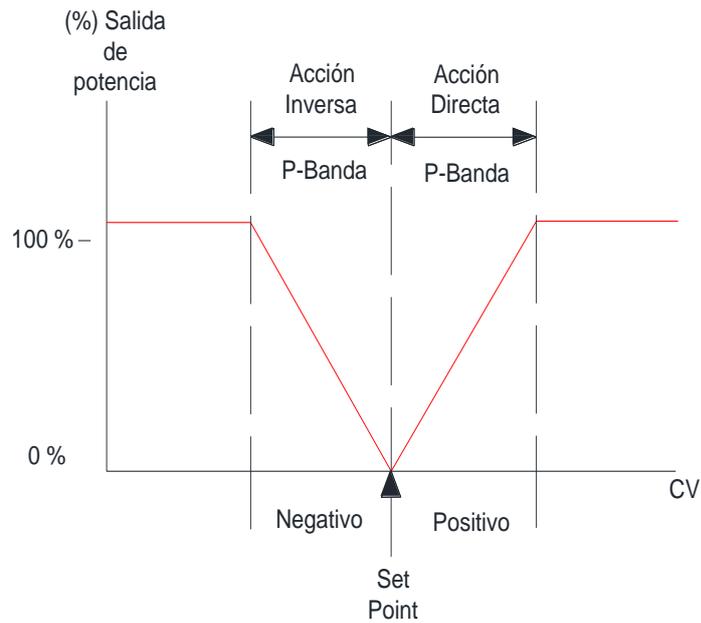


Ilustración 73 “Banda directa-inversa”

Por ejemplo, en un PID de calentar, cuando sube la temperatura la salida debe bajar, por lo tanto la acción es inversa.

En el primer caso la ganancia del proceso es positivo, por lo que un incremento en la variable controlada (medida) y requiere una reducción en la acción de control  $u$  (acción inversa de control). En este caso, el controlador de la ganancia  $K_c$  es positivo, ya que la definición estándar del error ya contiene un signo negativo para  $y$ .

En el segundo caso la ganancia del proceso es negativo, por lo que un incremento en la variable controlada (medida) y requiere un aumento en el control de la acción  $u$  (acción directa de control). En este caso la ganancia del controlador  $K_c$  es negativo.

Un ejemplo típico de un sistema de acción inversa es el control de la temperatura ( $y$ ) por el uso de vapor de agua ( $u$ ). En este caso la ganancia del proceso es positiva, por lo que si la temperatura aumenta, el flujo de vapor se debe disminuir para mantener la temperatura deseada.

Por el contrario, un ejemplo típico de un sistema de acción directa es el control de la temperatura con el agua de refrigeración. En este caso la ganancia del proceso es negativa, por lo que si la temperatura aumenta, el flujo de agua de refrigeración se debe aumentar para mantener la temperatura deseada.

## Controlador P+I

- Este controlador combina 2 acciones de control importantes, la Proporcional y la Integral; con la Integral intentamos eliminar el OFFSET que se quema con la acción proporcional.

Esta acción responde a la:

$$m_1 = k_c \cdot \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \right) + m_1(0) \quad (40)$$

En teoría no hay Off - Set con la acción Integral, puesto que la salida del controlador cambia continuamente hasta que el error se hace cero.

- Cuando se combina el control integral con el control proporcional, se usa a menudo el término “acción de reset”, puesto que el uso integral es como si se manejara manualmente el Set - Point hasta conseguir el cambio deseado.
- En síntesis lo que hace la acción integral es repetir en el tiempo lo hecho en la acción proporcional.

## Respuesta del P+I al escalón

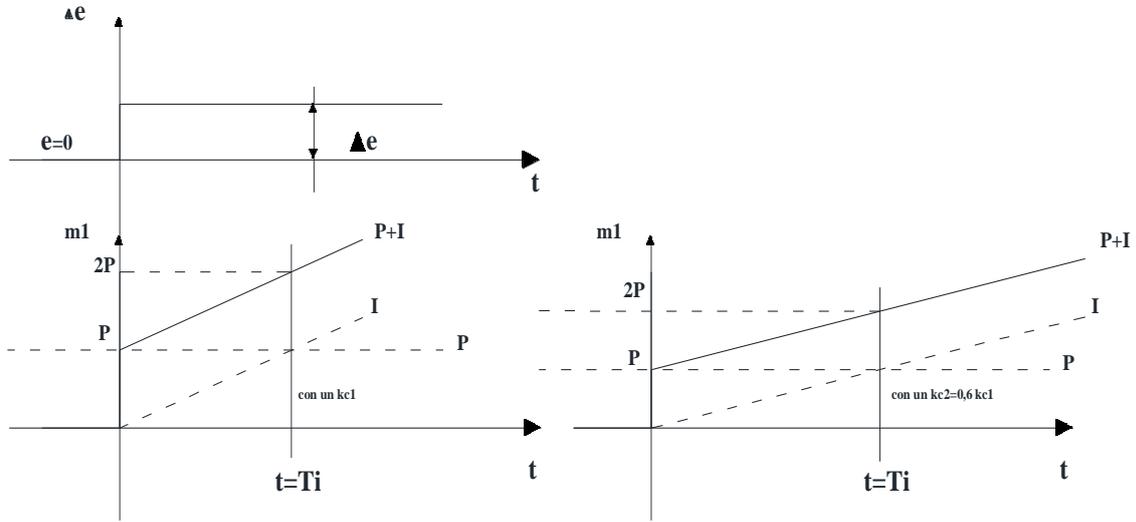


Ilustración 74 "Respuesta control P+I, Señal escalón"

$T_i$  (Tiempo de integración), es el tiempo en que la acción integral iguala a lo realizado por la acción proporcional.

## Respuesta del P+I a una onda rectangular

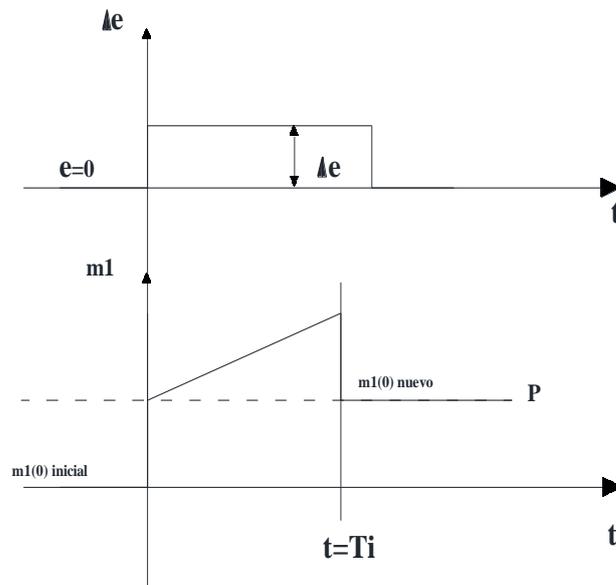


Ilustración 75 “Respuesta control P+I, Señal Rectangular”

Concepto de  $T_i$

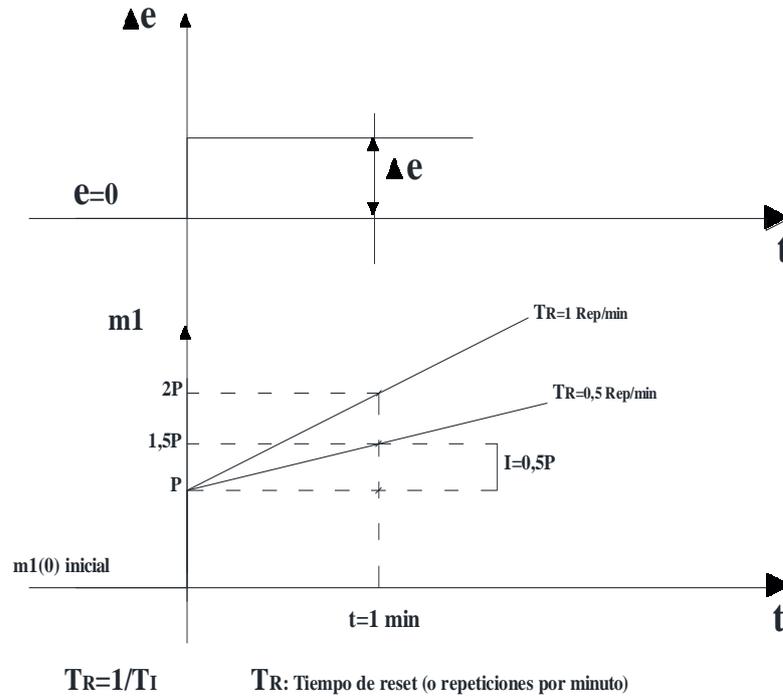


Ilustración 76 “Tiempo Integral”

## Controlador P+I

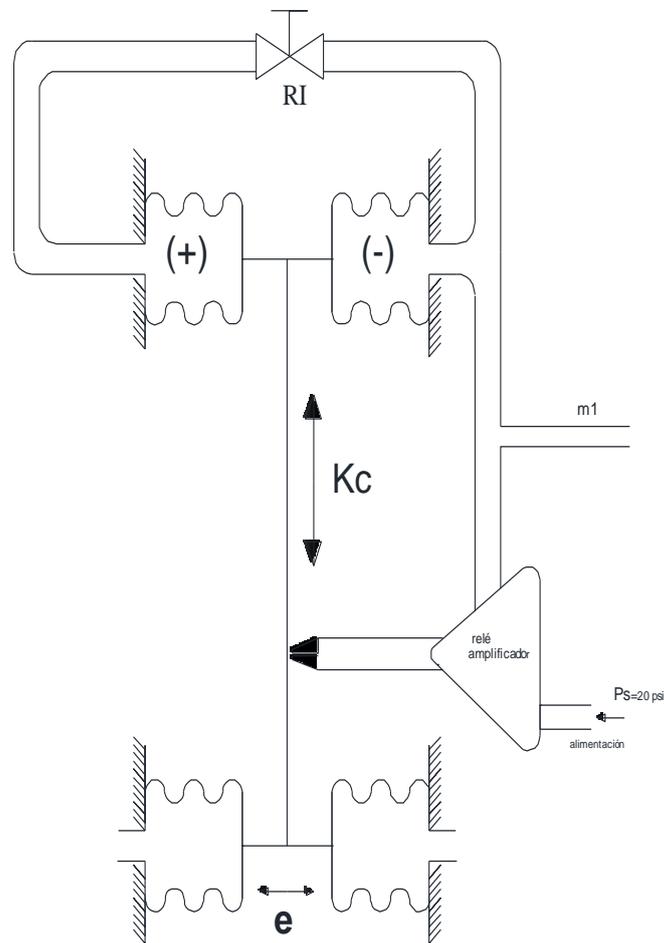


Ilustración 77 “Representación del sistema de control P+I”

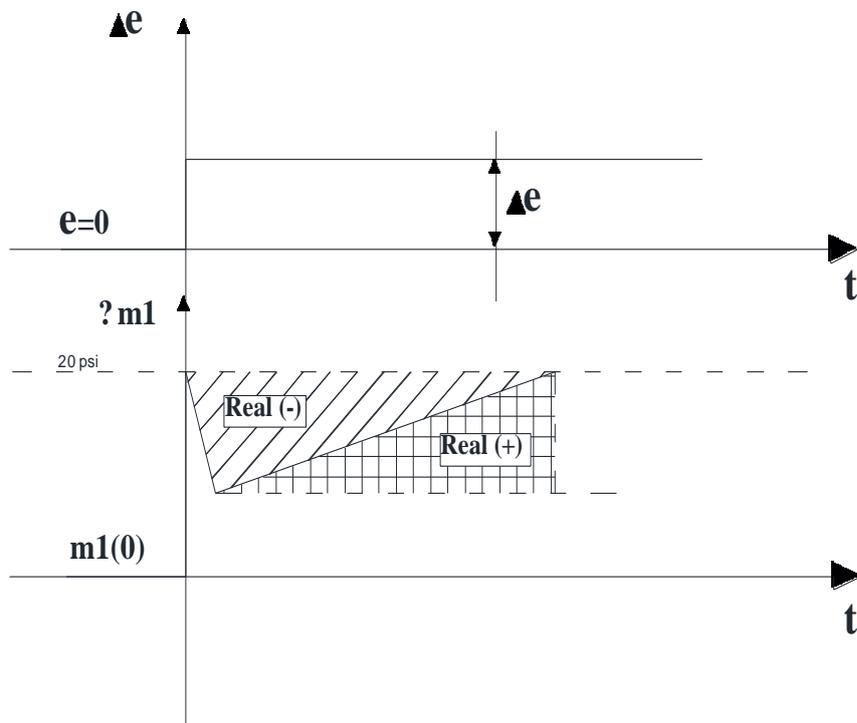


Ilustración 78 “Respuesta control P+I”

O sea que la acción Integral representa un crecimiento de la ganancia con el tiempo logrando corregir el error.

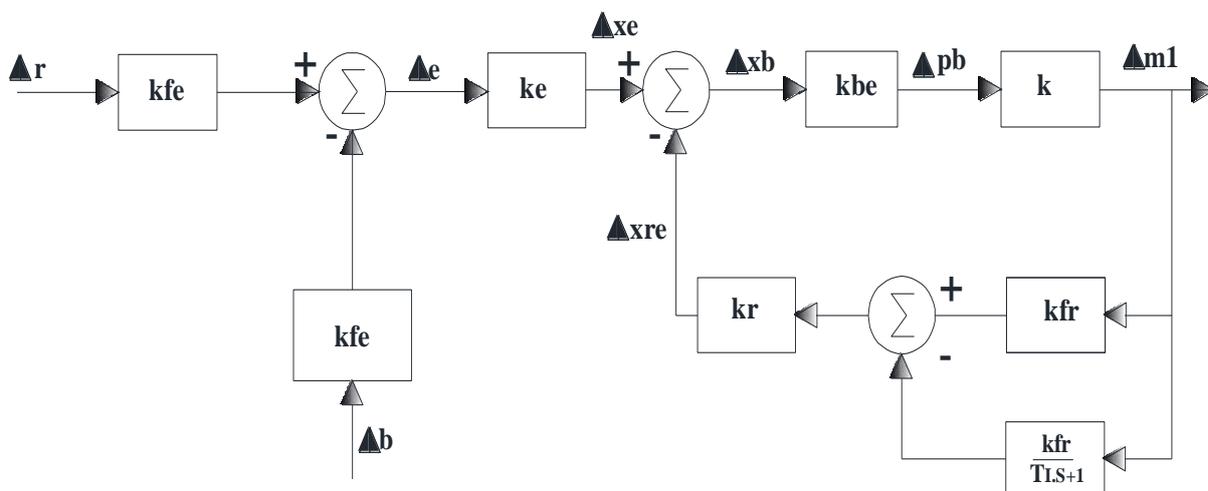


Ilustración 79 “Diagrama en bloques del controlador P+I”

$$m_1 = k_c \cdot \left( e(t) + T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) + m_1(0) \quad (42)$$

## Controlador P+D

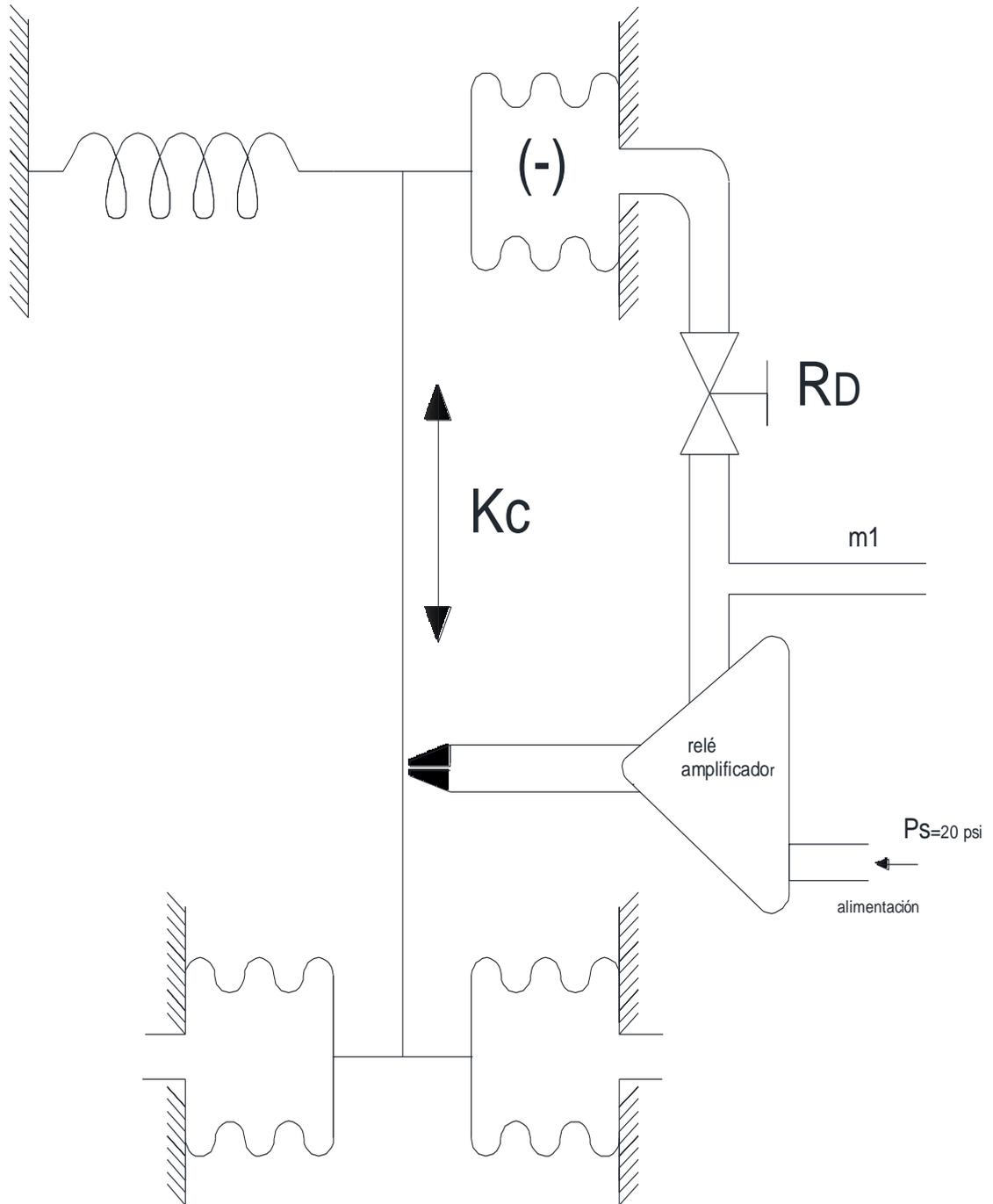


Ilustración 80 "Sistema controlador P+D"

R<sub>d</sub>: identifica la realimentación negativa y aumenta transitoriamente la ganancia.

La acción derivativa no se anticipa a nada, solo provoca un adelanto de fase.

1. El P es de ganancia... (en función del tiempo)
2. El P+I es de ganancia variable (en función del tiempo de error)
3. El P+D es de ganancia variable (en función de la velocidad de cambio del error).

### Respuesta al escalón del P+D

No es la señal indicada para el estudio de la acción derivativa; se nota que la acción derivativa en estado estático o ante un escalón no cumple función alguna.

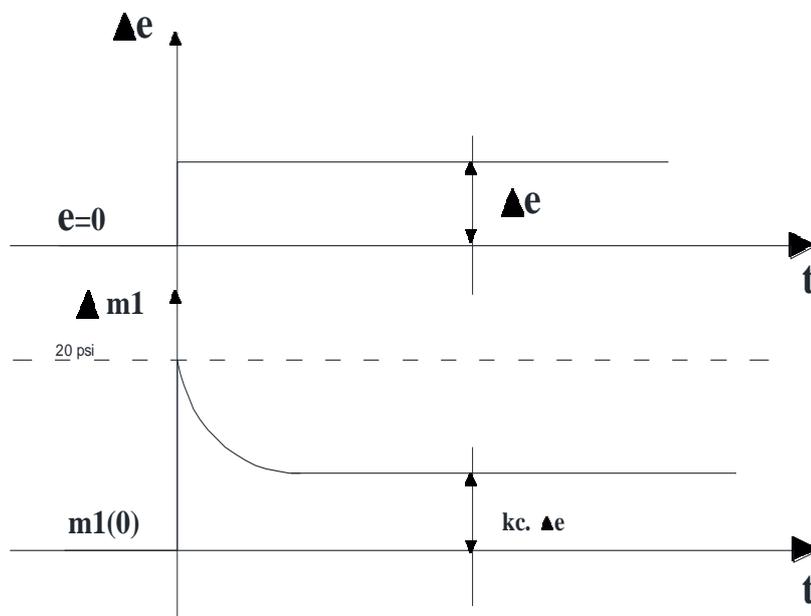


Ilustración 81 “Respuesta control P+D, Señal escalón”

### Respuesta a una rampa del P+D

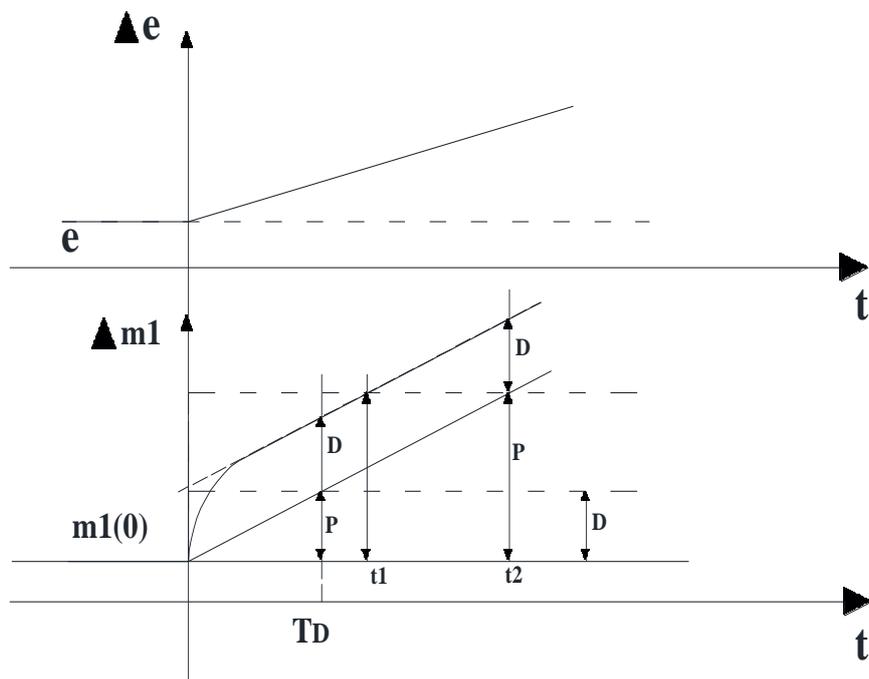


Ilustración 82 “Respuesta control P+D, Señal Rampa”

Acá vemos que a mayor tiempo derivativo  $T_D$ , mayor es la acción derivativa.

## Principio de operación de un controlador P+I+D

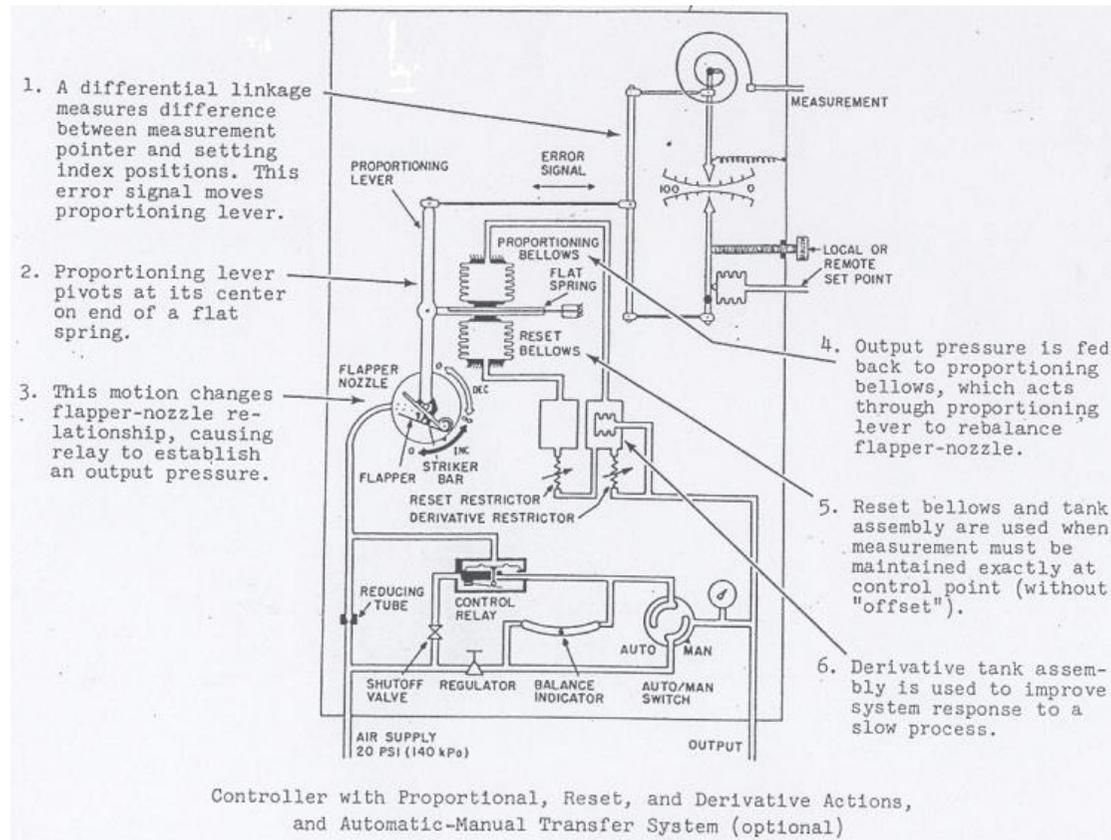


Ilustración 83 "Controlador P+I+D, modelo 43APFA56C, FOXBORO"

## Porque se han agregado las acciones de control Integral y Derivativa

Como hemos dado las funciones de transferencia ideales de las acciones de control Integral y Derivativa, Indicaremos el objetivo práctico para el uso de estas acciones de control.-

En la figura podemos ver el comportamiento de un sistema de control típico usando diferentes clases de control:

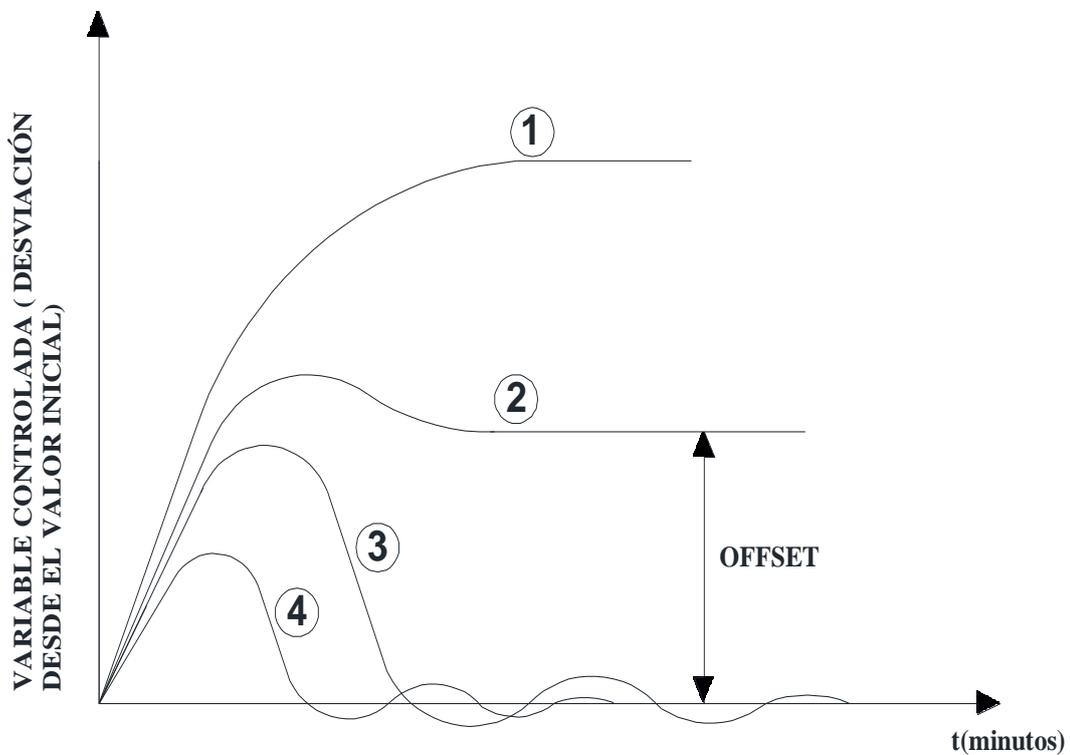


Ilustración 84 “Grafica comparativa”

- La curva 1 muestra como la variable continúa creciendo hasta alcanzar un nuevo valor de estado estático. (todo esto sin ninguna acción de control).
- La 2 muestra la reacción con control proporcional sólo.

La variable va a un nuevo estado pero en lugar de quedar donde deseábamos queda con un diferencial, que es el Off-Set.

- La 3 muestra cómo se elimina el Off-Set con las acciones P+I, y la variable controlada vuelve a su valor original. Esta ventaja de la acción Integral se equilibra con la desventaja de un comportamiento oscilatorio mayor.
- Al agregar la Acción derivativa a la P+I, da lugar a una respuesta como la 4 y la variable controlada vuelve rápidamente a su valor original con muy poca o ninguna oscilación.

La selección de las distintas acciones de control que se muestran en la figura, depende de los distintos casos.

- Si tenemos un Off-Set (con acción proporcional) y adaptamos su valor para nuestro caso, entonces trabajamos con acción P sola.

Si no queremos tener un Off-Set, entonces agregamos Acción I.

Si hay excesivas oscilaciones que deben ser eliminadas, debemos agregar acción derivativa (Tiene la ventaja de tener mayor sensibilidad y como trabaja con la variación del error y puede trabajar antes que el error crezca demasiado). O sea la Acción derivativa se anticipa al error, comienza a corregir y el sistema se hace estable

- El agregado de cada acción de control significa más gastos, por consiguiente si bien la técnica es importantísima para el correcto desarrollo, las decisiones son manejadas por la economía.

## **Ajuste de controladores**

### **Método de la ganancia límite: (Empírico de Ziegler-Nichols)**

Este método permite calcular el ajuste de las 3 acciones con sólo mezclar un estudio de la respuesta del sistema completo con acción proporcional (P) solamente.

Se coloca la acción integral al mínimo ( $T_i$  máx.) y la acción derivativa en cero ( $T_d=0$ ) o su mínimo valor.

Se comienza a incrementar la ganancia en pasos y se produce cada vez una perturbación escalón en el valor consigna (set–point) hasta que comience a oscilar continuamente (oscilaciones sostenidas).

El valor de la ganancia en ese puesto es la ganancia límite =  $K_u$  (también llamada ganancia última) y el período de oscilación se llama período límite

“ $P_u$ ”. **Ziegler y Nichols**, recomiendan para obtener una relación de amplitudes  $R$  de  $A = 0,25$  lo siguiente:

### Control (P)

$$K_c = 0,5 k_u \quad \text{o} \quad B_{Pu} = \frac{200}{k_u} = \frac{1}{0,5k_u} \cdot 100 \quad (43)$$

$K_u$ = ganancia última (a la cual comenzaron las oscilaciones).

$B_{Pu}$ = Banda proporcional del periodo último.

### Control (P+I)

$$K_c = 0,45 k_u \quad BP = \frac{222}{k_u} = \frac{1}{0,45k_u} \cdot 100 \quad (44)$$

$$TI = \frac{P_u}{1,2} (\text{min}) \quad TR = \frac{1}{TI} = \frac{1,2}{P_u} \cdot \left( \frac{\text{Respuesta}}{\text{minutos}} \right) \quad (45)$$

### Control (P+I+D):

$$K_c = 0,6 k_u \quad BP = \frac{166}{k_u} = \frac{1}{0,6k_u} \cdot 100 \quad (46)$$

$$TI = \frac{P_u}{2} (\text{min}) \quad TR = \frac{1}{TI} = \frac{2}{P_u} \cdot \left( \frac{\text{Respuesta}}{\text{minutos}} \right) \quad (47)$$

$$TD = \frac{Pu}{8} (\text{min}) \quad (48)$$

Debe notarse que para él (P+I) se recomienda una ganancia 10% menor que con el proporcional solo.

La acción integral hace que el sistema sea menos estable debido al atraso producido por el controlador.

Cuando se agrega la acción derivativa, el adelanto de fase que produce ayuda estabilizando el sistema, permitiendo ganancia más alta con tiempo de acción integral menor.

Veamos en un flow-sheet lo que hemos hablado.

## **Método Empírico de ajuste optimo**

**Ganancia Límite: Ziegler-Nichols en lazo cerrado**

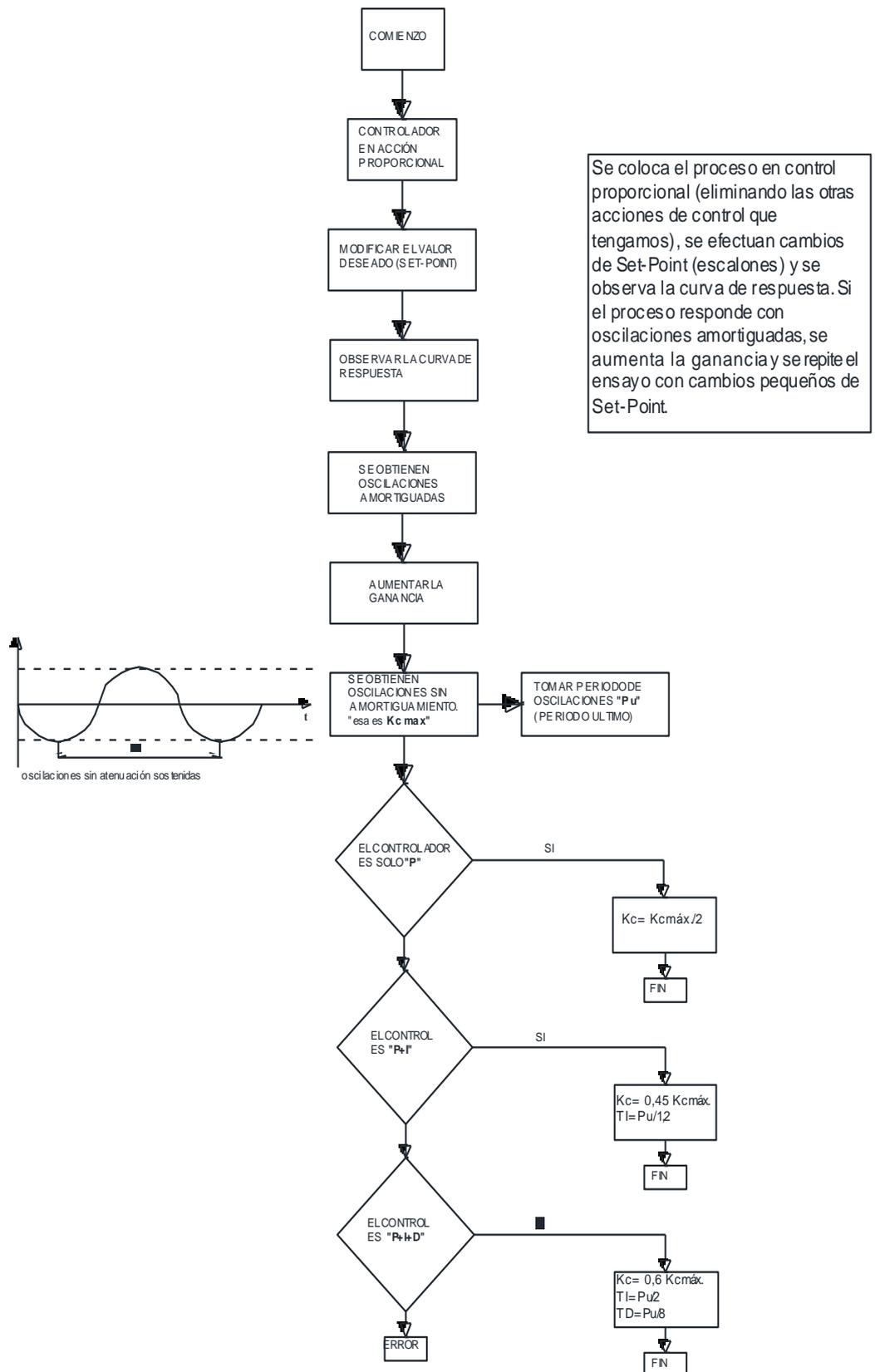


Ilustración 85 “Ganancia Límite Ziegler-Nichols en lazo cerrado”

## Método de la velocidad de reacción y de la curva de respuesta

Este método también propuesto por Ziegler y Nichols se basa en la curva de respuesta frente a una perturbación Escalón en lazo abierto.

La forma más adecuada de hacerlo es abriendo el lazo de control entre el controlador y el elemento de acción final y producir un cambio Escalón en su variable manipulada.

Esto puede hacerse también colocando el controlador en manual y desde el mínimo producir el salto en el elemento de acción final.

Se grafica la variación de la variable controlada en función del tiempo.

Tenemos un diagrama en bloques del proceso:

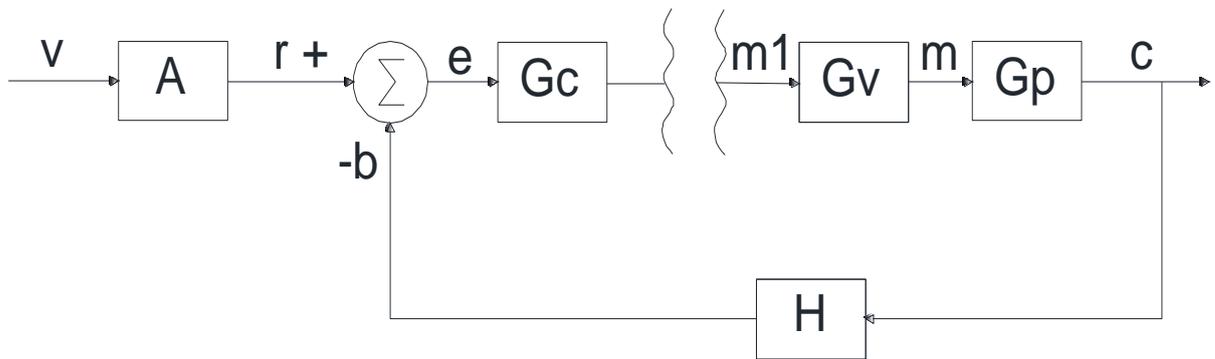


Ilustración 86 "Diagrama bloque de velocidad de reacción"

Finalmente, las curvas de respuesta de los procesos son de forma S y el análisis de la misma será:

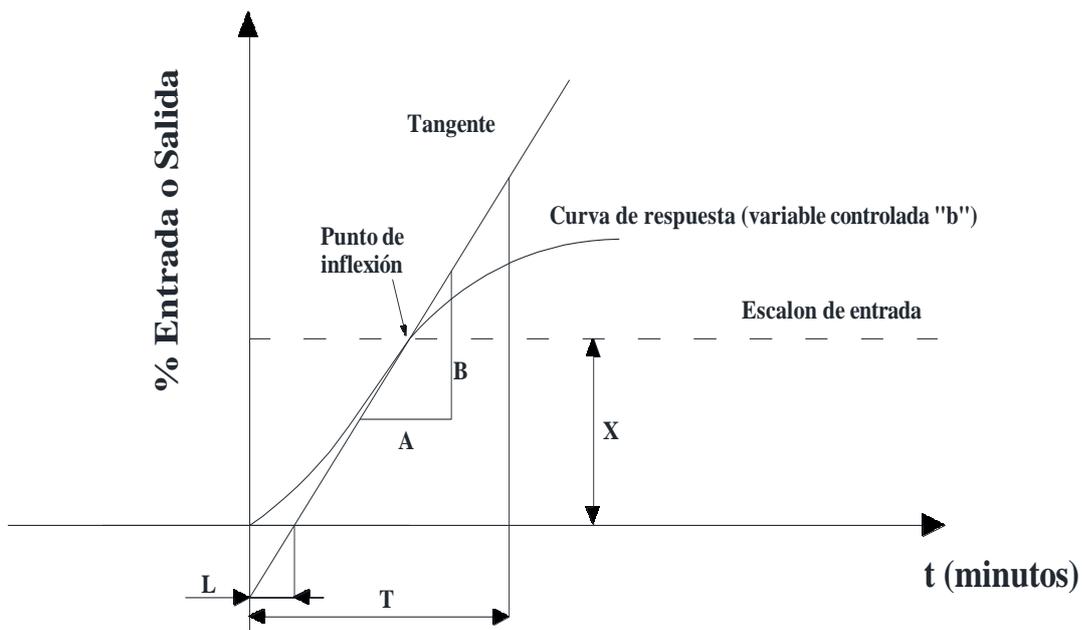


Ilustración 87 "Gráfico de velocidad de reacción"

$$\text{Velocidad de Reacción} = \frac{B}{A} = R \quad (49)$$

$$\text{Velocidad Unitaria de Reacción} = \frac{B}{X(\text{escalón})} = R_1 \quad (50)$$

L: Distancia donde corta el eje horizontal a la tangente (tiempo muerto efectivo).

Con estos datos los valores aconsejables en el ajuste, para diferentes controladores son:

### Proporcional "P"

$$k_c = \frac{1}{R_1 \cdot L} \quad B_P = R_1 \cdot L \cdot 100\% \quad (51)$$

### Proporcional + Integral "P+I"

$$k_c = \frac{0,9}{R_1 \cdot L} \quad B_P = \frac{R_1 \cdot L}{0,9} \cdot 100\% \quad (52)$$

$$T_I = \frac{L}{0,3} \quad T_R = \frac{1}{T_I} = \frac{0,3}{L} \quad (53)$$

### **Proporcional + Integral+ Derivativo “P+I+D”**

$$k_c = \frac{1,2}{R_1 \cdot L} \quad B_P = \frac{R_1 \cdot L}{1,2} \cdot 100\% \quad (54)$$

$$T_I = \frac{L}{0,5} \quad T_D = 0,5 \cdot L \quad (55)$$

### **Método de la velocidad de reacción o de la curva de respuesta (a lazo abierto)**

Este método fue también propuesto por Ziegler-Nichols

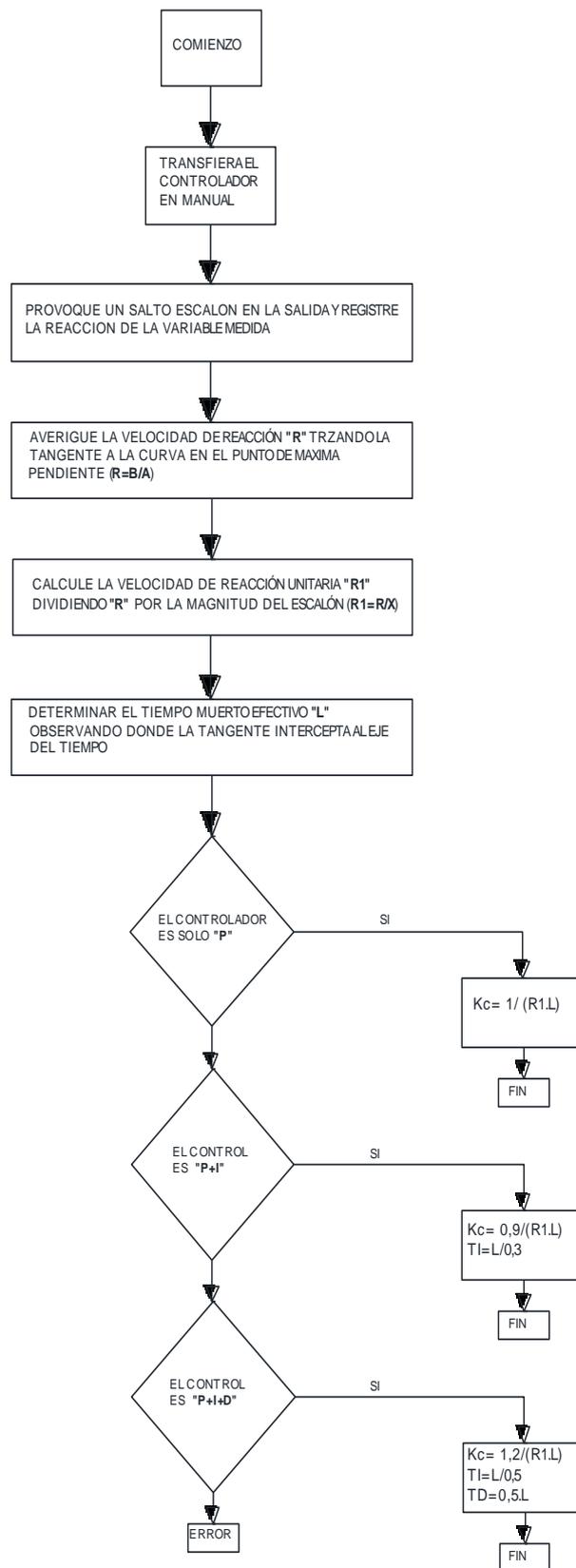


Ilustración 88 " Ganancia Límite Ziegler-Nichols en lazo abierto "

## **CAPITULO 4**

### **Lazo cerrado**

#### **Introducción a la respuesta temporal**

Una vez obtenido el modelo matemático de un sistema, disponemos de varios métodos para analizar el comportamiento del sistema. Los sistemas de control se diseñan para conseguir un determinado comportamiento, tanto en régimen permanente como transitorio. La respuesta en el tiempo de un sistema de control se divide normalmente en dos partes: respuesta transitoria y respuesta estacionaria (permanente o en estado estable).

En sistemas de control, la respuesta transitoria está definida como la “parte de la respuesta temporal que tiende a cero cuando el tiempo se hace muy grande”.

Por el contrario, la respuesta estacionaria “es la parte de la respuesta temporal que permanece, una vez que la transitoria ha desaparecido”.

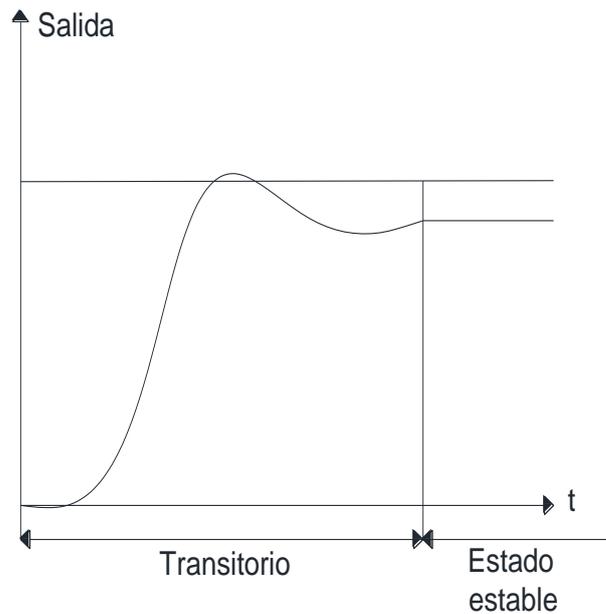


Ilustración 89 “Gráfico respuesta del sistema”

La respuesta transitoria es originada por la propia característica dinámica del sistema, y determina el comportamiento del sistema durante la transición de un estado a otro. La respuesta estacionaria depende fundamentalmente de la señal de excitación del sistema, y, si el sistema es estable, es la respuesta que presentara el sistema cuando el tiempo crece infinitamente.

Un sistema realimentado tiene capacidad inherente de poder ajustar sus parámetros para obtener tanto su respuesta transitoria como permanente.

Todos los sistemas de control estables reales presentan un fenómeno transitorio antes de alcanzar la respuesta en estado estable; ello es debido a que la masa, la inercia y la inductancia, son inevitables en los sistemas físicos, por lo que sus respuestas no pueden seguir cambios bruscos en la entrada de forma instantánea y, normalmente, se observarán transitorios.

En consecuencia, la respuesta transitoria es normalmente importante, ya que es una parte significativa del comportamiento dinámico del sistema; y la desviación entre la respuesta de la

salida y la entrada (o respuesta deseada) se debe controlar cuidadosamente antes de alcanzar el estado estable.

La respuesta en estado estable de un sistema de control es también muy importante, ya que indica en donde termina la salida del sistema cuando el tiempo se hace grande. En general, si la respuesta en estado estable de la salida no coincide exactamente con la deseada, se dice que el sistema tiene un error de estado estacionario (Off-Set).

El estudio de un sistema de control en el dominio del tiempo involucra esencialmente la evaluación de sus respuestas transitoria y estacionaria. Si se conoce la respuesta impulsional de un sistema, mediante la integral de convolución podremos obtener la respuesta a cualquier tipo de señal. Por desgracia, esta operación no está exenta de complejidad, por lo que resulta más interesante el conocer la respuesta temporal de un sistema a las entradas típicas escalón, rampa y parábola.

Cuando la respuesta de un sistema lineal e invariante con el tiempo se analiza en el dominio de la frecuencia, se emplea una entrada senoidal con frecuencia variable. Cuando la frecuencia de entrada se barre desde cero hasta el valor significativo de las características del sistema, las curvas en términos de la relación de amplitudes y fases entre la entrada y la salida se dibujan como funciones de la frecuencia. Es posible predecir el comportamiento del sistema en el dominio del tiempo a partir de sus características en el dominio de la frecuencia.

Para facilitar el análisis en el dominio del tiempo, se utilizan las siguientes señales de prueba determinísticas:

## Entrada función escalón

Representa un cambio instantáneo en la entrada de referencia:  $r(t) = A \cdot u(t)$  siendo  $u(t)$  el escalón unitario

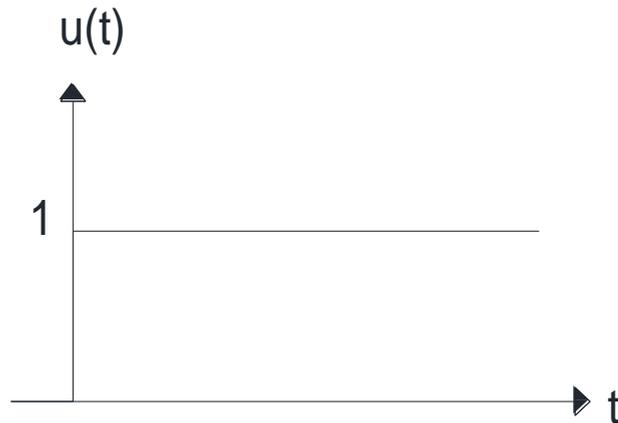


Ilustración 90 “Entrada escalón”

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (56)$$

Esta señal es muy útil como señal de prueba, ya que su salto instantáneo inicial de amplitud revela cómo de rápido responde un sistema a entradas con cambios abruptos.

## Entrada función rampa

Es una señal que cambia constantemente con el tiempo. Matemáticamente se representa mediante:

$$r(t) = A * t * u(t) \quad (57)$$

Esta señal nos dice cómo responde el sistema a señales que cambian linealmente con el tiempo.

### Entrada función parabólica

Esta función representa una señal que tiene una variación más rápida que la función rampa.

Matemáticamente se representa por:

(el factor  $\frac{1}{2}$  se añade por conveniencia matemática, para que la transformada de Laplace de la señal sea simplemente  $A/s^3$ ).

### Respuesta en el tiempo de un sistema de control

$$r(t) = A * \frac{t^2}{2} * u(t) \quad (58)$$

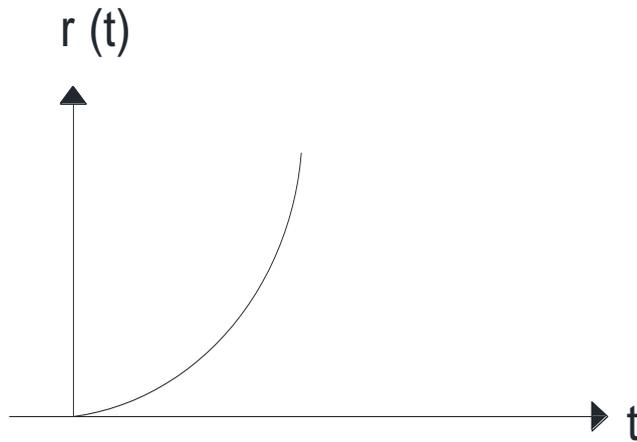


Ilustración 91 “Respuesta del sistema de control”

Sea el siguiente sistema de control



Ilustración 92 “Diagrama de bloque sistema de control”

La función de transferencia del sistema es

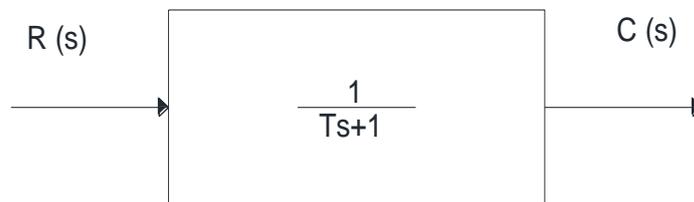
$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) \quad (59)$$

$$C(s) = G(s) \cdot R(s)$$

La respuesta en el tiempo  $C(t)$  es obtenida tomando la transformada de Laplace inversa de  $C(s)$

$$C(t) = \mathcal{L}^{-1} C(s) = \mathcal{L}^{-1} [G(s) R(s)] \quad (60)$$

Respuesta en el tiempo de un sistema de primer orden



$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (61)$$

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} R(s) \quad (61)$$

### Respuesta al escalón unitario

La entrada escalón unitario es:

$$R(s) = \frac{1}{s} \quad (62)$$

La respuesta en el tiempo es:

$$C(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{Ts + 1} \frac{1}{s} \right] = 1 - e^{-\frac{1}{T}t} \quad (63)$$

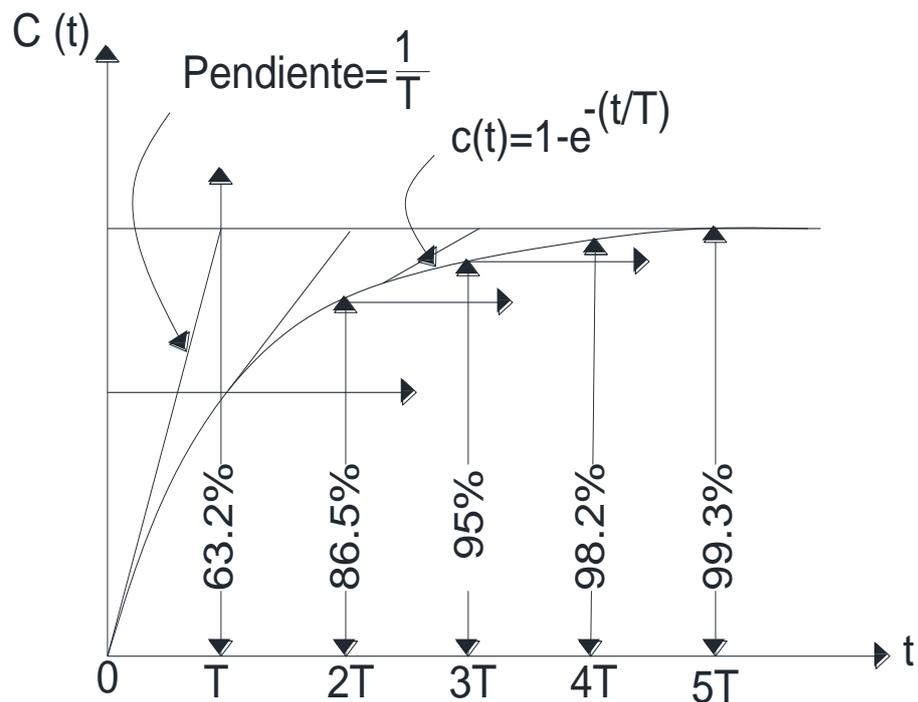


Ilustración 93 "Grafica C(t)"

Constante de tiempo, es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar del 63.2% de su cambio total.

$$t = T \quad (64)$$

Tiempo de estabilización, o tiempo de respuesta es el tiempo que necesita la curva de respuesta para alcanzar la línea de 2% del valor final, o cuatro constantes de tiempo.

$$t_s = 4T \quad (65)$$

Respuesta al impulso unitario de un sistema de primer orden.

La entrada impulso unitario es:

$$R(s) = 1 \quad (66)$$

La respuesta en el tiempo es:

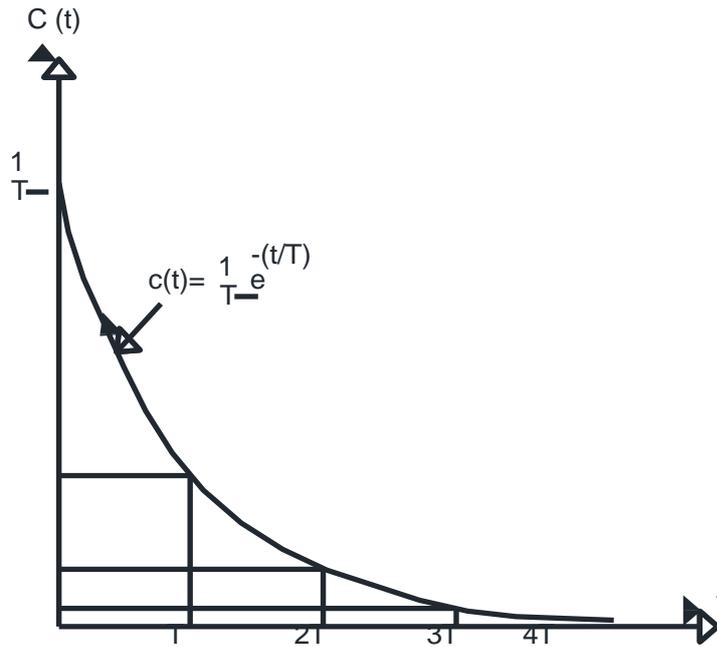


Ilustración 94 “Grafica C(t)”

$$C(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{Ts + 1} \right] = \frac{1}{T} e^{-\frac{1}{T}t} \quad (67)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(T_1s + 1)}{Ts + 1} \quad (68)$$

Forma general de la función de transferencia de primer orden, donde G es la ganancia del sistema.

Polos Son los valores de “s” que hacen que el polinomio del denominador sea cero. Son las raíces del polinomio del denominador.

Ceros Son los valores de s que hacen que el polinomio del numerador sea cero. Son las raíces del polinomio del numerador.

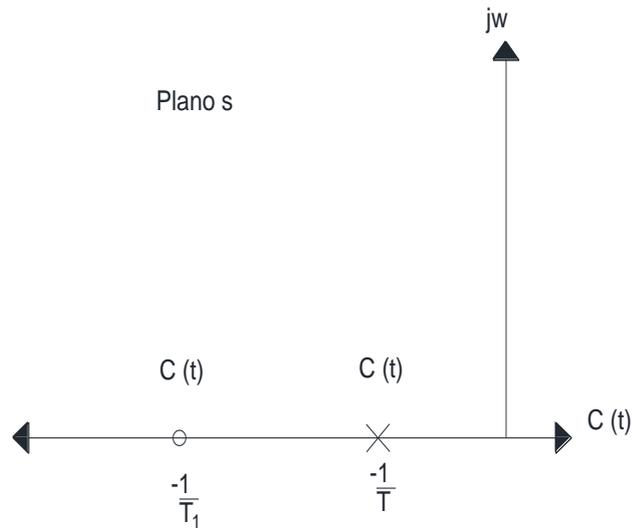
El Polo de la función es:

$$s = -\frac{1}{T} \quad (69)$$

El cero de la función es:

$$s = -\frac{1}{T_1} \quad (70)$$

Ubicación del polo y cero del sistema en el plano s:



*Ilustración 95 "Representación en el plano imaginario"*

## **CAPITULO 5**

### **Válvula de control**

#### **Elemento final de control**

Este es el elemento que ejecuta los cambios sobre alguna forma de balance de energía o materia, a fin de lograr una determinada condición en el sistema.

En general encontramos:

- VÁLVULA DE CONTROL (Utilizadas en la Industria)
- BOMBA DOSIFICADORA PERISTALTICAS (Utilizadas en Electromedicina)

#### **La válvula de control**

Es el elemento de control final destinado a regular el caudal del fluido de control, variando el área de pasaje interna de acuerdo a la señal de comando que viene del controlador.

Las válvulas de control son operadas por señales que pueden ser neumáticas, eléctricas, hidráulicas, etc. O sea que las válvulas de control tienen por función manejar la variable manipulada variando la variable controlada, actuando como una resistencia variable, siendo en este caso una resistencia deseada en el sistema.

La válvula de control tiene la posibilidad de comportarse en forma muy flexible, porque se pueden variar diámetros, actuadores, cuerpos, materiales, etc.

Es importante remarcar dos propiedades que hacen a la esencia misma de la función de la válvula, ellas son: el coeficiente de descarga y la relación de caudales controlables.

Se entiende por coeficiente de descarga ( $C_v$ ) o coeficiente de caudal, al caudal que es capaz de pasar por el cuerpo de la válvula cuando se tiene una caída de presión unitaria y el fluido es agua a temperatura ambiente, presumiblemente peso específico también unitario.

La otra propiedad importante es la relación de caudales controlables, se la define como la relación entre el caudal máximo controlable respecto del mínimo.

Las válvulas automáticas para control de procesos tienen 6 (seis) componentes básicos:

Cuerpo: elemento que contiene la presión.

Guarnición: elemento de control propiamente dicho que generalmente comprende un obturador y su asiento.

Actuador: fuente de potencia para posicionar el obturador.

Tapa: une el cuerpo al actuador de la válvula. A través de la tapa se desplaza el obturador. Para impedir que el fluido escape a través de la tapa se utilizan empaquetadoras que varían con el tipo de fluido y la temperatura de trabajo.

Obturador y asiento: en su selección se tienen en cuenta:

- Materiales normales y los esenciales adecuados para la corrosión, erosión y desgaste producidos por el fluido.
- Características de caudal en función de la carrera.
- El tamaño que puede ser normal o reducido.

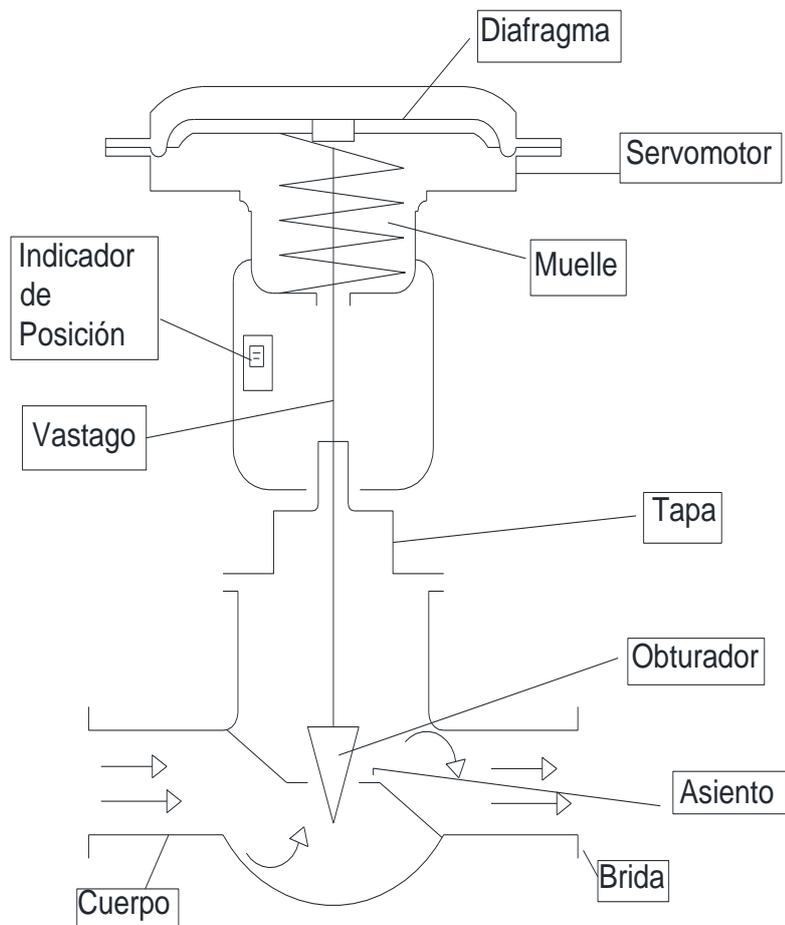


Ilustración 96 “Representación de las Partes Principal de la válvula”

### **Elección del tamaño correcto de una y válvula**

El primer paso en la elección de una válvula debe consistir en una cuidadosa determinación de las propiedades del medio fluido en el que se trabajará, con la finalidad de que los materiales elegidos puedan soportar la corrosión, erosión, etc.

### **Diseño de las cañerías:**

Es importante que la instalación esté bien diseñada, teniendo en cuenta los esfuerzos debidos a las diferentes secciones de cañerías, como así también se deben conexas correctamente las válvulas y accesorios.

**Servicio:**

Es importante también tener en cuenta que servicio prestarán las diferentes válvulas, si éstas serán sistemas si/no o estarán encargadas de regular el caudal. ¿La válvula estará destinada a instalaciones de alta o baja presión/temperatura? ¿Las condiciones de trabajos serán exigentes o moderadas?

**Tamaño de válvulas:**

Es de importancia considerar las pérdidas acumuladas por fricción en las válvulas.

**Caída de presión:**

Las válvulas en un conducto producen una caída de presión que se origina por cambios en la forma y dirección del flujo, y obstrucciones en las proximidades de los asientos y conexiones en los extremos.

**Temperatura y Presión:**

Los materiales para una válvula de control dependen de la temperatura y presión de trabajo de la válvula. Por ejemplo, podemos decir que válvulas para baja presión, pueden ser utilizadas sin inconvenientes si la temperatura de operación es baja, pero si ésta subiera no sería adecuada y habría que buscar una de mayor presión.

En cuanto a la temperatura se deben tener en cuenta las altas temperaturas y las bajas temperaturas.

Por ejemplo, a 300 °C, se elimina la posibilidad de utilizar cualquier válvula cuyas partes en contacto con el fluido sean de materiales elastómeros.

En cambios de temperatura tales como 350°C o más, se necesita especificar tipos especiales de construcción además de materiales especiales.

Y cuando se trabaja a temperaturas bajísimas (-50°C) o menos, se exigen consideraciones especiales en cuanto a materiales y construcción de la válvula de control.

### **Fluido:**

El fluido tiene mucha importancia en la elección de la válvula. Las propiedades corrosivas, erosivas, abrasivas y viscosas del fluido inciden significativamente en la válvula a elegir. Entre ellas se mencionan a las que manejan líquidos con sólidos en suspensión, las que, debido a su capacidad de erosión y abrasión, se destacan a las que tienen sus cuerpos revestidos internamente por forros de neopreno. También están las que tienen sus partes internas (sectores con mayor desgaste por erosión y abrasión) fabricadas con materiales de altísima dureza, como acero inoxidable, stellite, etc.

Es importante al elegir una válvula considerar sus piezas por separado: cuerpo, bonete, vástago, asientos, etc. A fin de llegar a las especificaciones adecuadas del material para las condiciones de servicios requeridas.

Los materiales más frecuentemente utilizados en la construcción de válvulas son el hierro fundido, bronce, acero inoxidable y aluminio.

El obturador y los asientos se fabrican normalmente en acero inoxidable porque este material es muy resistente a la corrosión y a la erosión del fluido

Cuando la velocidad del fluido es baja, pueden utilizarse PVC, fluorocarbonos y otros materiales blandos, solos o reforzados con fibras de vidrio o grafito. En algunas válvulas pueden utilizarse obturadores y asientos de cerámica.

Las válvulas de plástico son muy utilizadas para fluidos corrosivos de baja presión de trabajo; para presiones altas se prefieren las válvulas de acero revestido.

### **Modo de accionamiento**

El actuador es el elemento responsable en proporcionar la fuerza motriz necesaria para el funcionamiento de la válvula de control. El actuador debe proporcionar a la válvula de control una operación estable y suave, contra la acción variable de las fuerzas dinámicas y estáticas originadas en la válvula a raíz de la acción del fluido de proceso.

Los actuadores pueden ser neumáticos, eléctricos, hidráulicos o mecánicos, si bien se emplean generalmente los dos primeros por ser más simples, de actuación rápida y tener una gran capacidad de esfuerzo. Puede afirmarse que el 90 % de las válvulas utilizadas en la industria son accionadas neumáticamente.

Los actuadores hidráulicos consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servo válvula. La señal del instrumento de control actúa sobre la servo válvula que dirige el fluido hidráulico a los dos lados del pistón actuador hasta conseguir, mediante una retroalimentación, la posición exacta de la válvula. Se caracterizan por ser extremadamente rápidos, potentes y suaves, si bien su costo es elevado, por lo que sólo se emplean cuando los actuadores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio.

Un elemento importante que debe ser tenido en cuenta es que el actuador seleccionado debe ser compatible con la señal de salida del controlador. Actualmente el uso de la instrumentación electrónica da señales de salida del controlador normalmente de 4 – 20 mA no sería compatible con un actuador neumático, lo que haría necesario utilizar un Transductor de corriente a neumática.

## **Actuadores neumáticos**

El actuador neumático (Ilustración 97) consiste en un diafragma flexible de neoprene con resorte que trabaja (con algunas excepciones) entre 3 y 15psi (0,2-1 bar), es decir, que las posiciones extremas de la válvula corresponden a 3 y 15 psi (0,2 y 1 bar).

Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y sigue moviéndose hasta que se llega a un equilibrio entre la fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y la fuerza ejercida por el resorte.

El actuador de resorte y diafragma se presenta en dos tipos:

Acción directa: con presión empuja el vástago hacia abajo

Acción inversa: con presión empuja el vástago hacia arriba

Idealmente, con una señal de 3 psi (0,2 bar) la válvula debe estar en la posición 0 de su carrera y para una señal de 15 psi (1 bar) en la posición 100. Asimismo, debe existir una proporcionalidad entre las señales intermedias y sus correspondientes posiciones. En la práctica las válvulas de control se desvían de este comportamiento debido a las causas siguientes:

1. Rozamientos en la estopada.

2. Histéresis y falta de linealidad del resorte que son poco importantes desde el punto de vista de este estudio práctico.
3. Área efectiva del obturador que varía con la carrera del vástago de la válvula.
4. Esfuerzo en el obturador de la válvula creado por la presión diferencial del fluido.
5. Fuerza adicional del servomotor necesaria para conseguir un cierre efectivo entre el obturador y el asiento (fuerza de asentamiento).

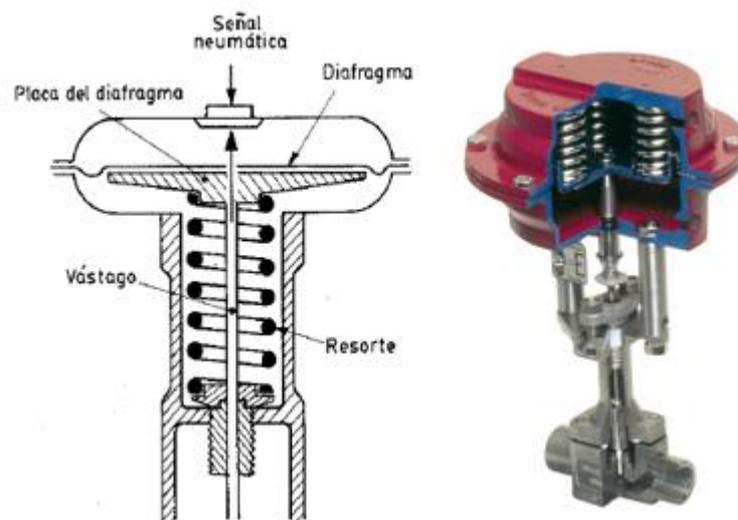


Ilustración 98 “Actuador neumático (Creus Sole , 1997)”

### Actuador eléctrico

El actuador eléctrico es un motor eléctrico acoplado al vástago de la válvula a través de un tren de engranajes (Ilustración. 3). El motor se caracteriza fundamentalmente por su par y por el tiempo requerido (usualmente 1 minuto) para hacer pasar la válvula de la posición abierta a la cerrada o viceversa.

Este tipo de actuador se utiliza mucho en instalaciones remotas para apertura y cierre de válvulas, no para control modulante; lo importante es que se puede usar para accionar válvulas globos, esclusas o mariposa.

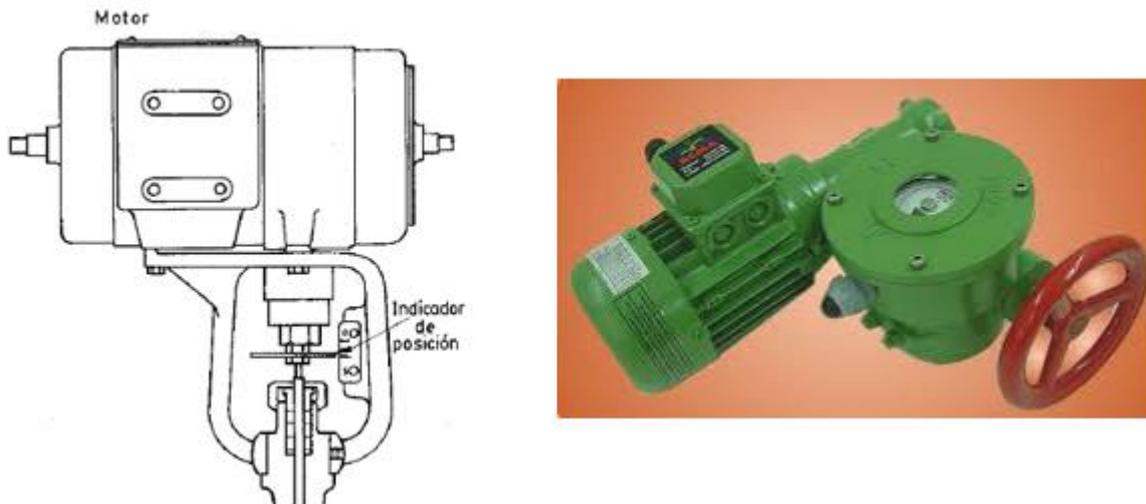


Ilustración 99 “Accionador electromecánico montado en una válvula de mariposa. (Fisher)”

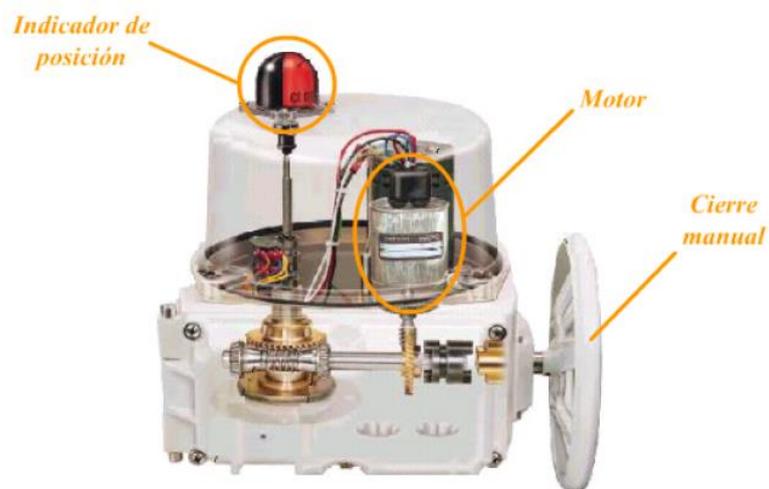


Ilustración 100 “Accionado electromecánico montado en una válvula de mariposa (Fisher)”

### **Actuador Hidráulico**

Los actuadores hidráulicos consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servoválvula. La señal del instrumento de control actúa sobre la servoválvula que dirige el fluido hidráulico a los dos lados del pistón actuador hasta conseguir,

mediante una retroalimentación, la posición exacta de la válvula. Se caracterizan por ser extremadamente rápidos, potentes y suaves, si bien su costo es elevado, por lo que sólo se emplean cuando los servomotores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio.



Ilustración 101 " *Actuador hidráulico (Valbia)* "

### **Cavitación en válvulas**

En la estrangulación de la vena del líquido, llamada zona de vena contraída, el fluido alcanza su máxima velocidad y su mínima presión. Si en esta zona, la velocidad es suficiente, la tensión de vapor del líquido llega a ser inferior a la presión del vapor saturado, formando pues burbujas de vapor que colapsan (implosión) si a la salida de la válvula la presión es superior a la presión de saturación del líquido. Este fenómeno de formación continua de burbujas de vapor y su desaparición a la salida de la válvula recibe el nombre de cavitación. El intercambio continuo entre la presión y la velocidad del líquido a lo largo de su recorrido a través de la válvula se denomina "recuperación depresión" y juega un papel importante en la determinación precisa del tamaño de la válvula cuando trabaja en estas condiciones.

La cavitación se inicia a presiones estáticas algo superior a la tensión de vapor del líquido. Las cavidades que nacen dentro del líquido y que colapsan súbitamente limitan la capacidad de la válvula a partir de un determinado caudal crítico y pueden generar ruidos y vibraciones excesivos con el peligro de causar daños mecánicos graves provocados por el impacto de las burbujas de vapor en implosión con alguna parte sólida de la válvula o de la tubería incluso; la energía liberada por las burbujas es lo suficientemente grande como para destruir el material o la superficie de protección en poco tiempo. La cavitación debe pues evitarse y desaparece cuando la presión en la vena contraída es superior a la tensión de vapor. En la ilustración 6 puede verse la caída de presión que sufre el fluido al atravesar la válvula y la formación de la vena contraída.

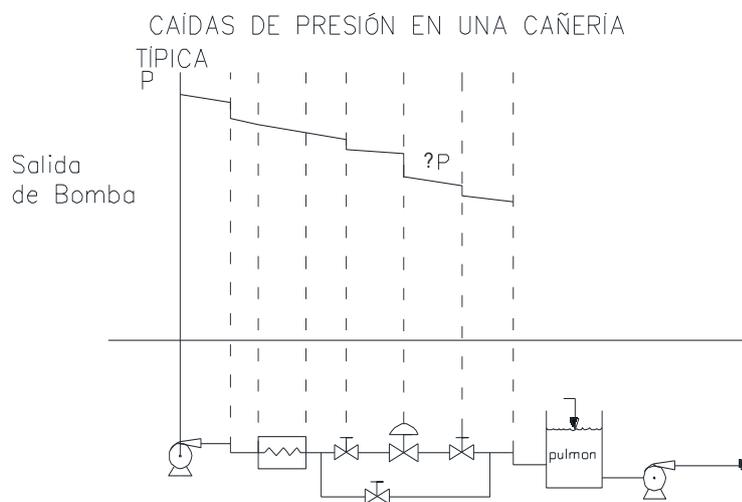


Ilustración 102 "Caída de presión en válvula de control"

## CAIDAS DE PRESIÓN EN VÁLVULAS DE CONTROL

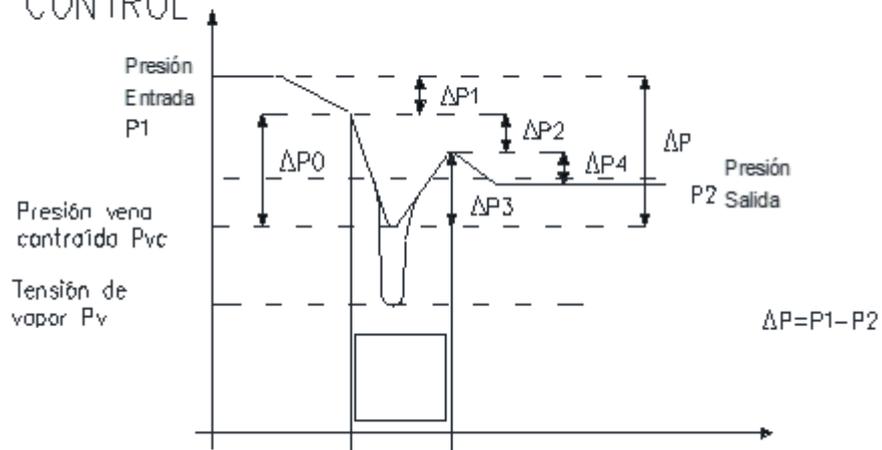


Ilustración 103 “Caída de presión en la válvula”

$\Delta P_1$ = Pérdidas en la entrada.

$\Delta P_0$ = Es el valor al punto de máxima velocidad o vena contraída.

$\Delta P_3$ =Es la recuperación de presión por disminución de velocidad.

$\Delta P_2$ =Es el remanente de salto interno luego de la recuperación.

$\Delta P_4$ = Es la pérdida por la salida

## **Cuerpo de las válvulas**

El cuerpo de la válvula debe resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o a la corrosión producida por el fluido.

El cuerpo y las conexiones a la tubería (bridadas o roscadas) están normalizados de acuerdo con las presiones y temperaturas de trabajo en las normas DIN y ANSI, entre otras, según puede verse en la ilustración 8.

Cabe señalar los puntos siguientes:

- a) Las conexiones roscadas se utilizan hasta 2";
- b) Las bridas pueden ser planas, con resalte, machihembradas, machihembradas con junta de anillo.

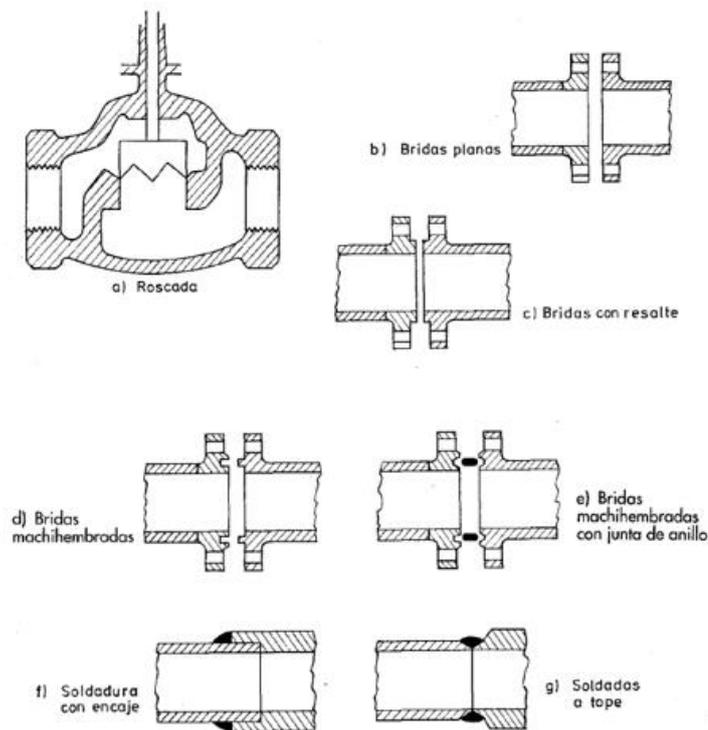


Ilustración 104 “Tipos de Bidas Cortesía de (Masoneilan)”

La tapa de la válvula de control tiene por objeto unir el cuerpo al servomotor. A su vez desliza el vástago del obturador accionado por el motor.

Según las temperaturas de trabajo de los fluidos y el grado de estanquidad deseada existen los siguientes tipos de tapas:

- Tapa normal (ilustración 8a) adecuada para trabajar a temperaturas del fluido variables entre 0° y 220° C.
- Tapa con columnas de extensión (ilustración 8b). Las columnas son adecuadas cuando el flujo está a temperaturas muy bajas.
- Tapa con fuelle de estanqueidad (ilustración 8c) para temperaturas de servicio entre 20 y 450° C.
- Tapa con aletas de radiación (ilustración 8d) circulares o verticales que pueden trabajar entre 20° a 450° C, recomendándose por encima de los 350° C, la válvula se monte invertida para facilitar el enfriamiento de la empaquetadura. para facilitar el enfriamiento de la empaquetadura.

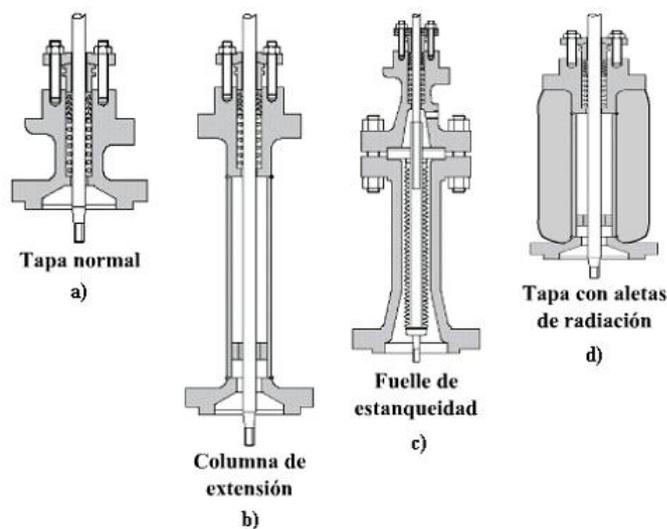


Ilustración 105 “Tapas (Creus Sole , 1997)”

## Empaquetaduras

Caja de protección entre la tapa y el vástago que tiene por función impedir que el fluido se escape a través de la tapa. La caja de empaquetadura de la válvula consiste en unos anillos de estopada comprimidos por medio de una tuerca (ilustración 105a) o bien mediante una brida de presión regulable con dos tuercas (ilustración 105b). La empaquetadura puede ser apretada manualmente de modo periódico o bien puede ser presionada elásticamente por un muelle apoyado interiormente en la tapa (ilustración. 106).

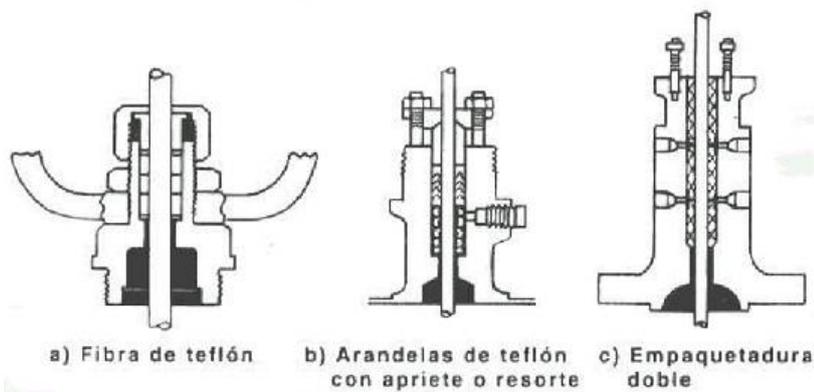


Ilustración 106 “Empaquetadura (Creus Sole , 1997)”

La empaquetadura normal puede ser de aros de teflón, de sección en V, comprimidos con un resorte con la ventaja de que el teflón es auto lubricante y no necesita engrase. Cuando el fluido y las condiciones de servicio no permiten el empleo aislado del teflón se utiliza grafito en forma de filamento, laminado y cinta. El grafito sustituyo al amianto que fue dejado de utilizar por razones de salud humana.

## **Tipos de válvulas**

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador.

Las válvulas de movimiento lineal en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje se clasifican como se especifica a continuación.

### **Válvula de globo**

Puede verse en la ilustración 107 a, b y e siendo de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado respectivamente. Las válvulas de simple asiento precisan de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso. Por lo tanto, se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas. El cierre estanco se logra con obturadores provistos de una arandela de teflón. En la válvula de doble asiento o de obturador equilibrado la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Por este motivo se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. En posición de cierre las fugas son mayores que en una válvula de simple asiento.

## Válvula en ángulo

Esta válvula representada en la ilustración 107 d, permite obtener un flujo de caudal regular sin excesivas turbulencias y es adecuada para disminuir la erosión cuando ésta es considerable por las características del fluido o por la excesiva presión diferencial.

El diseño de la válvula es idóneo para el control de fluidos que vaporizan

(flashing), para trabajar con grandes presiones diferenciales y para los fluidos que contienen sólidos en suspensión.

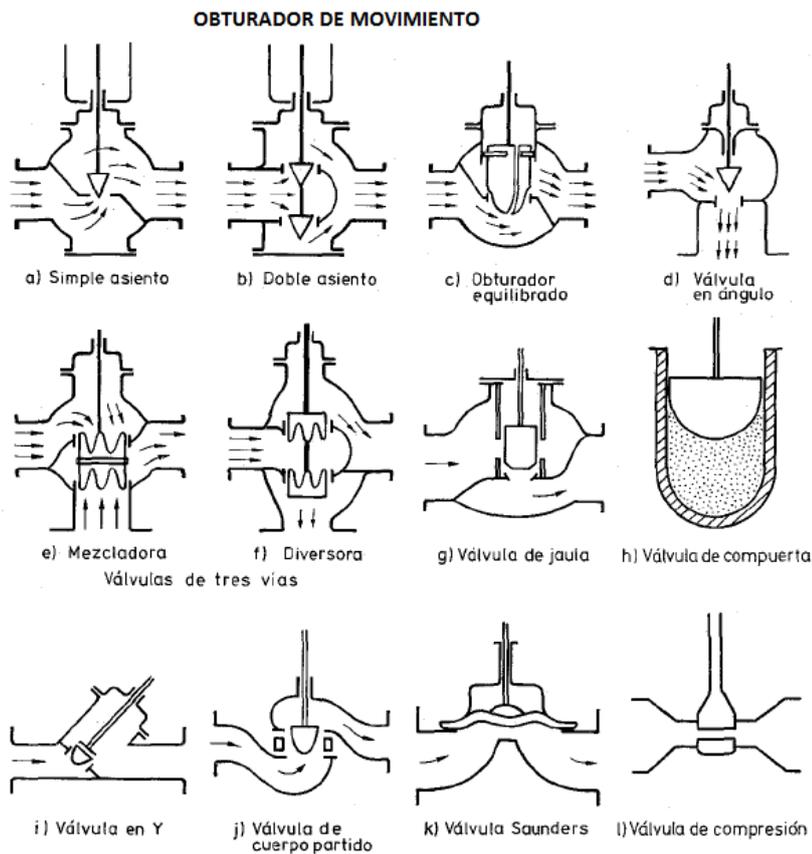


Ilustración 107 “Tipos de Obturadores cortesía (Creus Sole , 1997)”

### **Válvula de tres vías**

Válvulas mezcladoras (ilustración 107 e), este tipo de válvula se emplea generalmente para mezclar fluidos.

Válvulas diversoras (ilustración 107 f), sirven para derivar de un flujo de entrada dos de salida

Las válvulas de tres vías intervienen típicamente en el control de temperatura de intercambiadores de calor.

### **Válvula de jaula**

### **Válvula de compuerta**

Esta válvula efectúa su cierre con un disco vertical plano, o de forma especial, y que se mueve verticalmente al flujo del fluido. Por su disposición es adecuada generalmente para control todo-nada, ya que en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Tiene la ventaja de presentar muy poca resistencia al flujo de fluido cuando está en posición de apertura total (ilustración 11 h).

### **Válvula en Y**

En la ilustración 107 i, puede verse su forma. Es adecuada como válvula de cierre y de control. Como válvula todo-nada se caracteriza por su baja pérdida de carga y como válvula de control presenta una gran capacidad de caudal. Posee una característica de autodrenaje cuando está instalada inclinada con un cierto ángulo.

Se emplea usualmente en instalaciones criogénicas.

### **Válvula de cuerpo partido**

Esta válvula (ilustración 107 J) es una modificación de la válvula de globo de simple asiento teniendo el cuerpo partido en dos partes entre las cuales está presionado el asiento.

Esta disposición permite una fácil sustitución del asiento y facilita un flujo suave del fluido sin espacios muertos en el cuerpo. Se emplea principalmente para fluidos viscosos y en la industria alimentaria.

### **Válvula Saunders**

En la válvula Saunders (ilustración 107 k), el obturador es una membrana flexible que, a través de un vástago unido a un servomotor, es forzada contra un resalte del cuerpo cerrando así el paso del fluido.

La válvula se caracteriza porque el cuerpo puede revestirse fácilmente de goma o de plástico para trabajar con fluidos agresivos.

Tiene la desventaja de que el servomotor de accionamiento debe ser muy potente. Se utiliza principalmente en procesos químicos difíciles, en particular en el manejo de fluidos negros o agresivos o bien en el control de fluidos conteniendo sólidos en suspensión.

### **Válvula de compresión**

Esta válvula funciona mediante el pinzamiento de dos o más elementos flexibles, por ejemplo, un tubo de goma. Igual que las válvulas de diafragma se caracterizan porque proporcionan un óptimo control en posición de cierre parcial y se aplican fundamentalmente en el manejo de fluidos negros corrosivos, viscosos o conteniendo partículas sólidas en suspensión (ilustración 107 L).

Las válvulas en las que el obturador tiene un movimiento circular se clasifican como se detalla a continuación.



Ilustración 108 “Tipos de Obturadores Circulares (Creus Sole , 1997)”

### Válvula de obturador excéntrico rotativo

Consiste en un obturador de superficie esférica que tiene un movimiento rotativo excéntrico y que está unido al eje de giro por uno o dos brazos flexibles,

El eje de giro sale al exterior del cuerpo y es accionado por el vástago de un servomotor. El par de éste es reducido gracias al movimiento excéntrico de la cara esférica del obturador.

La válvula puede tener un cierre estanco mediante aros de teflón dispuestos en el asiento y se caracteriza por su gran capacidad de caudal, comparable a las válvulas mariposa y a las de bola y por su elevada pérdida de carga admisible.

### **Válvula de obturador cilíndrico excéntrico**

Esta válvula tiene un obturador cilíndrico excéntrico que asienta contra un cuerpo cilíndrico. El cierre hermético se consigue con un revestimiento de goma o teflón en la cara del cuerpo donde asienta el obturador.

### **Válvula de mariposa**

El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular. La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo. Un servomotor exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta (en control todo-nada se consideran  $90^\circ$  y en control continuo  $60^\circ$ , a partir de la posición de cierre ya que la última parte del giro es bastante inestable), siempre que la presión diferencial permanezca constante.

En la selección de la válvula es importante considerar las presiones diferenciales correspondientes a las posiciones de completa apertura y de cierre; se necesita una fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada.

Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.

### **Válvula de bola**

El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o de bola (de ahí su nombre). La bola tiene un corte adecuado (usualmente en V) que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un servomotor exterior.

La válvula de bola se emplea principalmente en el control de caudal de fluidos negros, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.

Una válvula de bola típica es la válvula de macho (Ilustración 108 q) que consiste en un macho de forma cilíndrica o troncocónica con un orificio transversal igual al diámetro interior de la tubería.

### **Válvula de orificio ajustable**

El obturador de esta válvula consiste en una camisa de forma cilíndrica que está perforada con dos orificios, uno de entrada y otro de salida y que gira mediante una palanca exterior accionada manualmente o por medio de un servomotor. El giro del obturador tapa parcial o totalmente las entradas y salidas de la válvula controlando así el caudal.

### **Válvula de flujo axial**

Las válvulas de flujo axial consisten en un diafragma accionado neumáticamente que mueve un pistón, el cual a su vez comprime un fluido hidráulico contra un obturador formado por un material elastómero. De este modo, el obturador se expansiona para cerrar el flujo anular del fluido. Este tipo de válvulas se emplea para gases y es especialmente silencioso

### **Tipos de acciones en las válvulas de control**

Según su acción, los cuerpos de las válvulas se dividen en válvulas de acción directa, cuando tienen que bajar para cerrar, e inversa cuando tienen que bajar para abrir. Esta misma división se aplica a los servomotores, que son de acción directa cuando aplicando aire, el vástago se mueve hacia abajo, e inversa cuando al aplicar aire el vástago se mueve hacia arriba. Acción directa: con el servomotor desexcitado la válvula está abierta.

Acción inversa: con el servomotor desexcitado la válvula está cerrada.

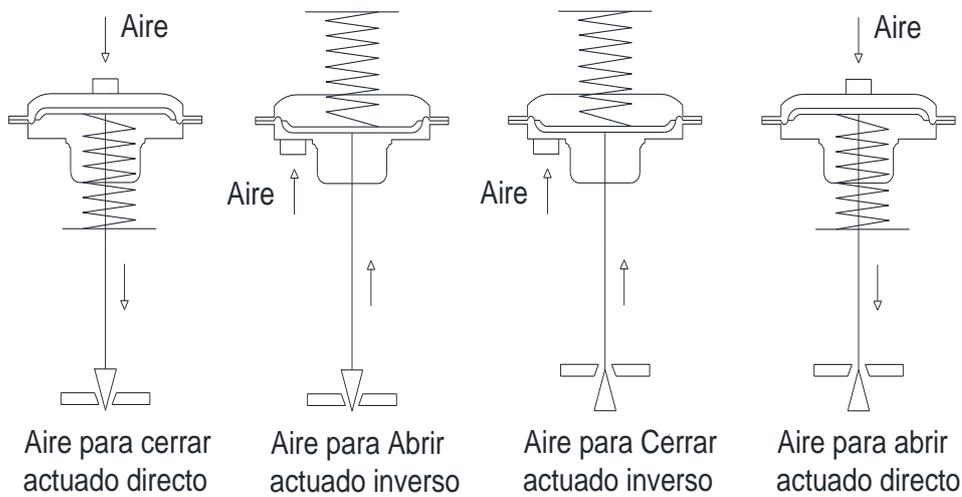


Ilustración 109 "Tipos de acciones en la válvula de control"

Al seleccionar la válvula es importante considerar estos factores desde el punto de vista de seguridad. Ninguna instalación está exenta de averías y una de ellas puede ser un fallo de aire o de corriente de alimentación con lo cual la válvula pasa naturalmente a una de sus posiciones extremas y ésta debe ser la más segura para el proceso

## Recomendaciones en válvula

### Válvulas de compuerta

#### Recomendada para:

- Servicio con apertura total o cierre total, sin estrangulación.
- Para uso poco frecuente.
- Para resistencia mínima a la circulación.
- Para mínimas cantidades de fluido o líquido atrapado en la tubería.

## Aplicaciones

Servicio general, aceites y petróleo, gas, aire, pastas semilíquidas, líquidos espesos, vapor, gases y líquidos no condensables, líquidos corrosivos

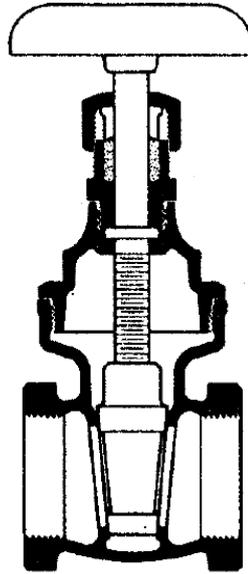


Ilustración 109 “Válvula compuerta (Creus Sole , 1997)”

## Ventajas

- Alta capacidad.
- Cierre hermético.
- Bajo costo.
- Diseño y funcionamiento sencillos.
- Poca resistencia a la circulación.

## Desventajas

- Control deficiente de la circulación.

- Se requiere mucha fuerza para accionarla.
- Produce cavitación con baja caída de presión.
- Debe estar cubierta o cerrada por completo.
- La posición para estrangulación producirá erosión del asiento y del disco.

### **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- Lubricar a intervalos periódicos.
- Corregir de inmediato las fugas por la empaquetadura.

Enfriar siempre el sistema al cerrar una tubería para líquidos calientes y al comprobar que las válvulas estén cerradas.

- No cerrar nunca las llaves a la fuerza con la llave o una palanca.
- Abrir las válvulas con lentitud para evitar el choque hidráulico en la tubería.
- Cerrar las válvulas con lentitud para ayudar a descargar los sedimentos y mugre atrapados.

### **Especificaciones para el pedido**

- Tipo de conexiones de extremo.
- Tipo de cuña.
- Tipo de asiento.
- Tipo de vástago.
- Tipo de bonete.

- Tipo de empaquetadura del vástago.
- Capacidad nominal de presión para operación y diseño.
- Capacidad nominal de temperatura para operación y diseño.

### **Válvulas de macho**

#### **Recomendada para:**

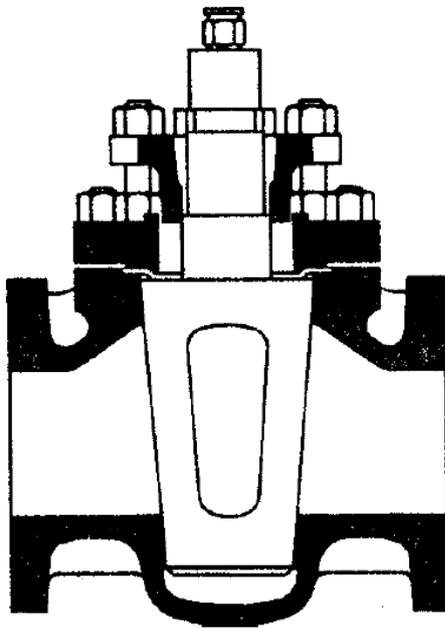


Ilustración 110 “*Válvula de macho* (Creus Sole , 1997)”

Servicio con apertura total o cierre total.

- Para accionamiento frecuente.
- Para baja caída de presión a través de la válvula.
- Para resistencia mínima a la circulación.
- Para cantidad mínima de fluido atrapado en la tubería.

## **Aplicaciones**

- Servicio general, pastas semilíquidas, líquidos, vapores, gases, corrosivos.

## **Ventajas**

- Alta capacidad.
- Bajo costo · Cierre hermético.
- Funcionamiento rápido.

## **Desventajas**

- Requiere alta torsión (par) para accionarla.
- Desgaste del asiento.
- Cavitación con baja caída de presión.

## **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- Dejar espacio libre para mover la manija en las válvulas accionadas con una llave.
- En las válvulas con macho lubricado, hacerlo antes de ponerlas en servicio.
- En las válvulas con macho lubricado, lubricarlas a intervalos periódicos.

## **Especificaciones para pedido**

- Material del cuerpo.
- Material del macho.
- Capacidad nominal de temperatura.

- Disposición de los orificios, si es de orificios múltiples.
- Lubricante, si es válvula lubricada.

### Válvulas de globo

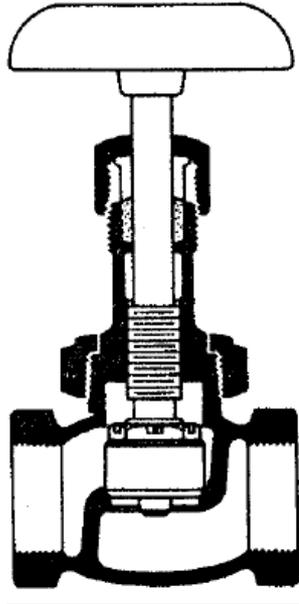


Ilustración 111 “Válvula de globo (Creus Sole , 1997)”

### **Recomendada para:**

- Estrangulación o regulación de circulación.
- Para accionamiento frecuente.
- Para corte positivo de gases o aire.
- Cuando es aceptable cierta resistencia a la circulación.

### **Aplicaciones**

Servicio general, líquidos, vapores, gases, corrosivos, pastas semilíquidas.

### **Ventajas**

- Estrangulación eficiente con estiramiento o erosión mínimos del disco o asiento
- Carrera corta del disco y pocas vueltas para accionarlas, lo cual reduce el tiempo y desgaste en el vástago y el bonete.
- Control preciso de la circulación.
- Disponible con orificios múltiples.

### **Desventajas**

- Gran caída de presión.
- Costo relativo elevado.

### **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

Instalar de modo que la presión este debajo del disco, excepto en servicio con vapor a alta temperatura.

### **Registro en lubricación.**

Hay que abrir ligeramente la válvula para expulsar los cuerpos extraños del asiento.

Apretar la tuerca de la empaquetadura, para corregir de inmediato las fugas por la empaquetadura.

### **Especificaciones para el pedido**

- Tipo de conexiones de extremo.
- Tipo de disco.
- Tipo de asiento.

- Tipo de vástago.
- Tipo de empaquetadura o sello del vástago.
- Tipo de bonete.
- Capacidad nominal para presión.
- Capacidad nominal para temperatura.

### Válvulas de bola

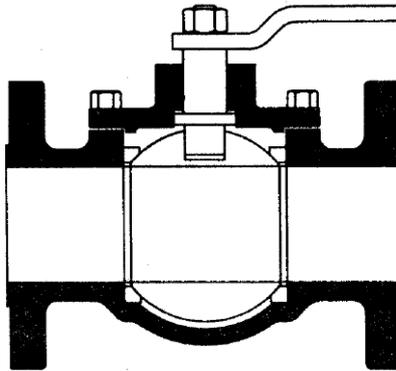


Ilustración 112 “Válvula de bola (Creus Sole , 1997)”

### **Recomendada para:**

- Para servicio de conducción y corte, sin estrangulación.
- Cuando se requiere apertura rápida.
- Para temperaturas moderadas.
- Cuando se necesita resistencia mínima a la circulación.

### **Aplicaciones**

Servicio general, altas temperaturas, pastas semilíquidas

### **Ventajas**

- Bajo costo.
- Alta capacidad.
- Corte bidireccional.
- Circulación en línea recta.
- Pocas fugas.
- Se limpia por si sola.
- Poco mantenimiento.
- No requiere lubricación.
- Tamaño compacto.
- Cierre hermético con baja torsión (par).

### **Desventajas**

- Características deficientes para estrangulación.
- Alta torsión para accionarla.
- Susceptible al desgaste de sellos o empaquetaduras.
- Propensa a la cavitación.

Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento

Dejar suficiente espacio para accionar una manija larga.

### **Especificaciones para el pedido**

- Temperatura de operación.
- Tipo de orificio en la bola.
- Material para el asiento.
- Material para el cuerpo.
- Presión de funcionamiento.
- Orificio completo o reducido.
- Entrada superior o entrada lateral

### Válvulas de mariposa



Ilustración 113 “*Válvula Mariposa* (Creus Sole , 1997)”

### **Recomendada para:**

- Servicio con apertura total o cierre total.

- Servicio con estrangulación.
- Para accionamiento frecuente.
- Cuando se requiere corte positivo para gases o líquidos.
- Cuando solo se permite un mínimo de fluido atrapado en la tubería.
- Para baja caída de presión a través de la válvula.

### **Aplicaciones**

Servicio general, líquidos, gases, pastas semilíquidas, líquidos con sólidos en suspensión.

### **Ventajas**

- Ligera de peso, compacta, bajo costo.
- Requiere poco mantenimiento.
- Número mínimo de piezas móviles.
- No tiene bolas o cavidades.
- Alta capacidad.
- Circulación en línea recta.
- Se limpia por si sola.

### **Desventajas**

- Alta torsión (par) para accionarla.
- Capacidad limitada para caída de presión.

- Propensa a la cavitación.

### **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

Se puede accionar con palanca, volante o rueda para cadena.

Dejar suficiente espacio para el movimiento de la manija, si se acciona con palanca.

Las válvulas deben estar en posición cerrada durante el manejo y la instalación.

### **Especificaciones para el pedido**

- Tipo de cuerpo.
- Tipo de asiento.
- Material del cuerpo.
- Material del disco.
- Material del asiento.
- Tipo de accionamiento.
- Presión de funcionamiento.
- Temperatura de funcionamiento.

### **Válvulas de diafragma**

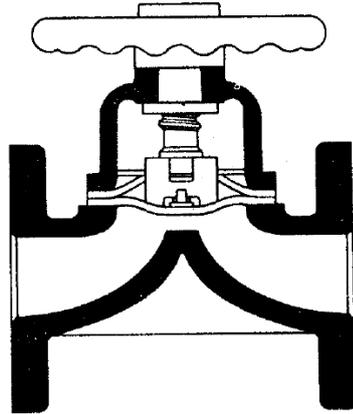


Ilustración 114“Válvula de diafragma (Creus Sole , 1997)”

### **Recomendada para:**

- Servicio con apertura total o cierre total.
- Para servicio de estrangulación.
- Para servicio con bajas presiones de operación.

### **Aplicaciones**

Fluidos corrosivos, materiales pegajosos o viscosos, pastas semilíquidas fibrosas, lodos, alimentos, productos farmacéuticos.

### **Ventajas**

- Bajo costo.
- No tienen empaquetaduras.
- No hay posibilidad de fugas por el vástago.
- Inmune a los problemas de obstrucción, corrosión o formación de gomas en los productos que circulan.

### **Desventajas**

- Diafragma susceptible de desgaste.
- Elevada torsión al cerrar con la tubería llena.

### **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

Lubricar a intervalos periódicos.

No utilizar barras, llaves ni herramientas para cerrarla.

### **Especificaciones para el pedido**

- Material del cuerpo.
- Material del diafragma.
- Conexiones de extremo.
- Tipo del vástago.
- Tipo del bonete.
- Tipo de accionamiento.
- Presión de funcionamiento.
- Temperatura de funcionamiento

### **Válvulas de retención**

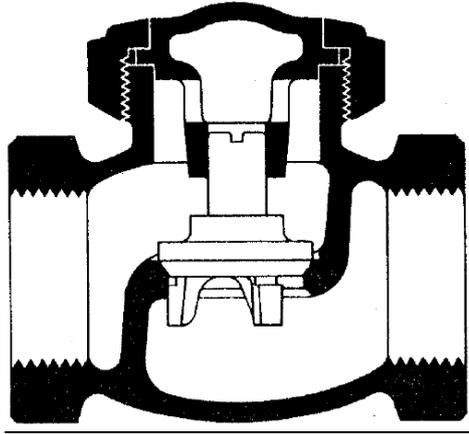


Ilustración 115 *Válvula de retención* (Creus Sole , 1997)”

**Recomendada para:**

- Cuando hay cambios frecuentes de circulación en la tubería.
- Para uso con válvulas de globo y angulares.
- Para uso cuando la caída de presión a través de la válvula no es problema.

**Aplicaciones**

**Ventajas**

- Recorrido mínimo del disco a la posición de apertura total.
- Acción rápida.

**Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- La presión de la tubería debe estar debajo del asiento.
- La válvula horizontal se instala en tuberías horizontales.
- La válvula vertical se utiliza en tubos verticales con circulación ascendente, desde debajo del asiento.
- Si hay fugas de la circulación inversa, examinar disco y asiento.

Válvulas de desahogo (alivio)

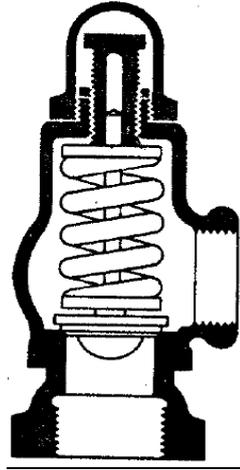


Ilustración 116 “Válvula de desahogo (Creus Sole , 1997)”

La válvula de seguridad es similar a la válvula de desahogo y se abre con rapidez con un "salto" para descargar la presión excesiva ocasionada por gases o líquidos comprimibles

### **Recomendada para**

Sistemas en donde se necesita una gama predeterminada de presiones.

### **Aplicaciones**

Agua caliente, vapor de agua, gases, vapores.

### **Ventajas**

- Bajo costo.
- No se requiere potencia auxiliar para la operación.

### **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

Se debe instalar en lugares de fácil acceso para inspección y mantenimiento

### **Característica de caudal inherente**

El obturador determina la característica de caudal de la válvula; es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso del fluido.

La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina característica de caudal inherente y se representa usualmente considerando como abscisas la carrera del obturador de la válvula y como ordenadas el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante. Las curvas características más significativas son la de apertura rápida, la lineal y la isoporcentual, siendo las más importantes estas dos últimas.

Otras curvas son las parabólicas y las correspondientes a las válvulas de tajaderas, mariposa, Saunders, y con el obturador excéntrico rotativo.

Las curvas características se obtienen mecanizando el obturador para que al variar la carrera el orificio de paso variable existente entre el contorno del obturador y el asiento configure la característica de la válvula. En la pueden verse varios tipos de obturadores cuya forma y mecanización determina esta característica.

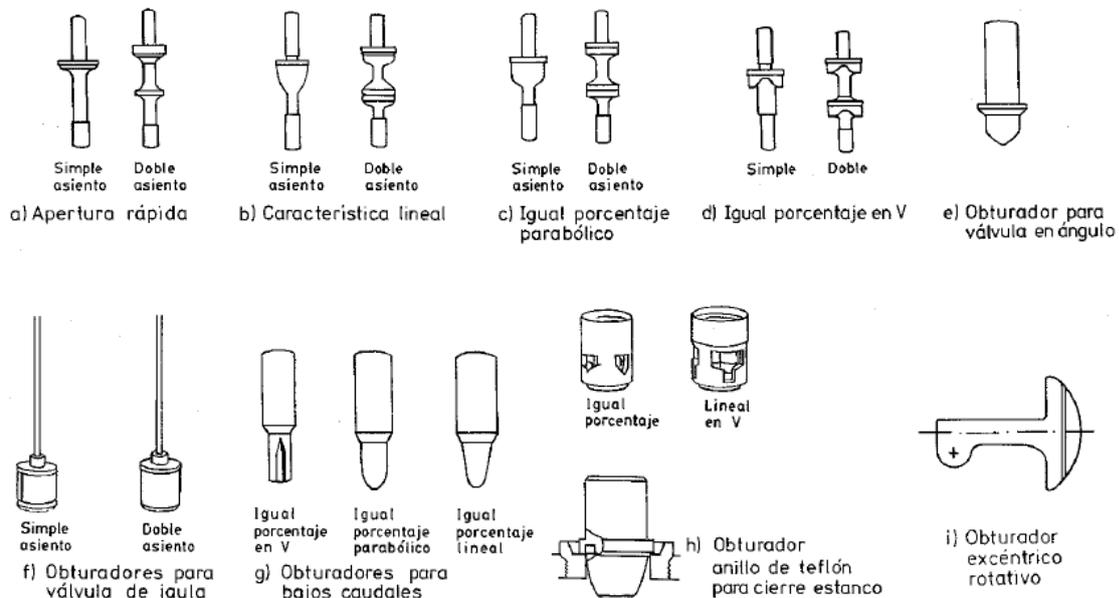


Ilustración 117 “Tipos de Obturadores cortesía (Creus Sole , 1997)”

El obturador con característica de apertura rápida (Ilustración 31 a) tiene la forma de un disco plano. En la Ilustración 32 (a) puede verse que el caudal aumenta mucho al principio de la carrera llegando rápidamente al máximo.

El obturador con característica lineal (Ilustración 31 b, f, g, i), el caudal es directamente proporcional a la carrera según la ecuación:

$$q = kl$$

*q = caudal a pérdida de carga constante*

*k = constante*

*l = carrera de la válvula*

Gráficamente se representa por la línea recta de la Ilustración 32 (b).

En el obturador con característica isoporcentual (Ilustración 31 c, d, f, g) cada incremento de carrera del obturador produce un cambio en el caudal que es proporcional al caudal que fluía antes de la variación. La ecuación correspondiente es:

$$\frac{dq}{dl} = aq$$

*q = caudal a pérdida de carga constante*

*a = constante*

*l = carrera de la válvula*

De aquí:

$$\frac{dq}{q} = a dl \quad (71)$$

Integrando:

$$\int \frac{dq}{q} = a \int dl \quad (72)$$

Luego:

$$q = be^{al} \quad (73)$$

Donde a y b son constante; e= base de logaritmo neperiano

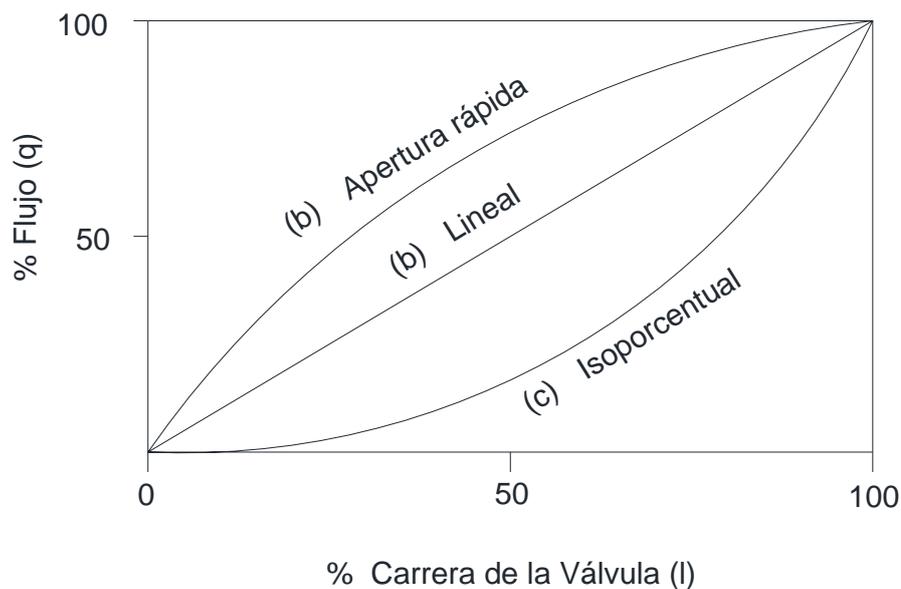


Ilustración 118 “Tipos de características inherentes de la válvula”

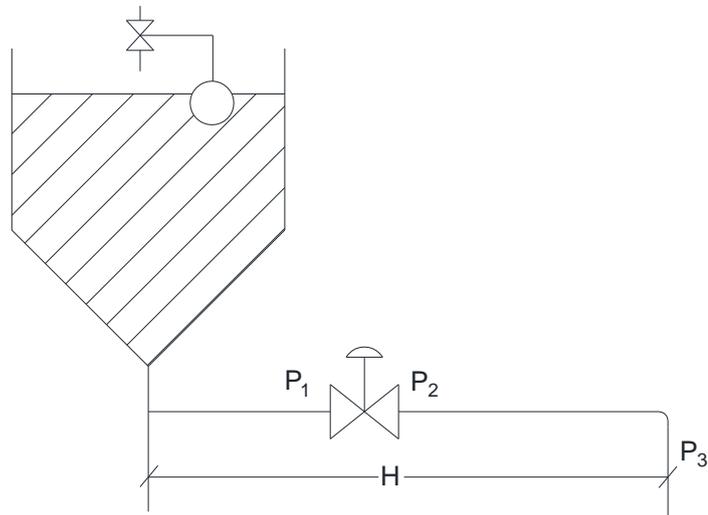
### Características de caudal efectiva

Por lo general, en la mayor parte de las válvulas que trabajan en condiciones reales, la presión diferencial cambia cuando varía la apertura de la válvula, por lo cual la curva real que relaciona la carrera de la válvula con el caudal, se aparta de la característica de caudal inherente. Esta nueva curva recibe el nombre de característica de caudal efectiva.

Como la variación de presión diferencial señalada depende de las combinaciones entre la resistencia de la tubería, y las características de las bombas y tanques del proceso, es evidente

que una misma válvula instalada en procesos diferentes presentará inevitablemente curvas características efectivas distintas.

Una forma adecuada para representar la característica de caudal efectiva es a través del coeficiente, que expresa la relación entre la caída de presión en la válvula respecto de la caída de presión total del sistema, tal como se muestra en el ejemplo de la Ilustración 33, en donde la pérdida total del sistema es constante (caso de un depósito que descarga a un nivel más bajo a través de una válvula de control Ilustración 34).



Sistema con pérdida de carga constante

Ilustración 119 “ Caída de presión en la válvula respecto de la caída de presión total del sistema”

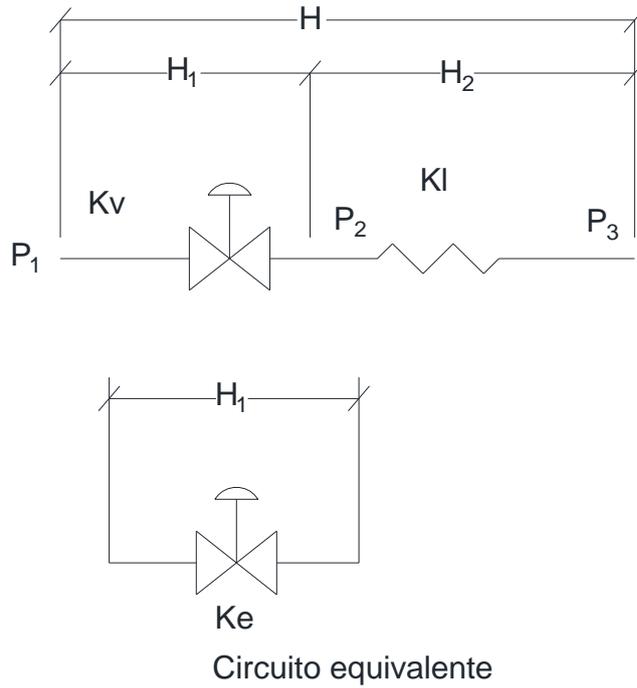


Ilustración 120 “Circuito equivalente para análisis de pérdidas”

$$r = \frac{H_1}{H} \quad (74)$$

De modo general, el caudal que pasa por la válvula corresponde a la ecuación

$$Q_V = K A \sqrt{P_2 - P_1} \quad (75)$$

$Q_V =$  caudal a través de la válvula

$K =$  constante

$A =$  área de paso

$\Delta P =$  presión diferencial a través de la válvula

Si consideramos una pérdida de carga de 1 bar y llamamos  $K$  al caudal que circula al caudal que circula

$$K_V = K.A.1 \quad (76)$$

$$Q_V = K_V \sqrt{\Delta P} \quad (77)$$

En la puede verse que, la característica isoporcentual se desplaza gradualmente hacia una curva característica lineal al ir disminuyendo  $r$ , es decir al bajar la pérdida de carga disponible para la válvula y al aumentar simultáneamente el porcentaje de pérdida de presión en la línea.

Asimismo, en la curva característica inherente lineal se va aproximando a una curva rápida al ir disminuyendo el valor de  $r$ .

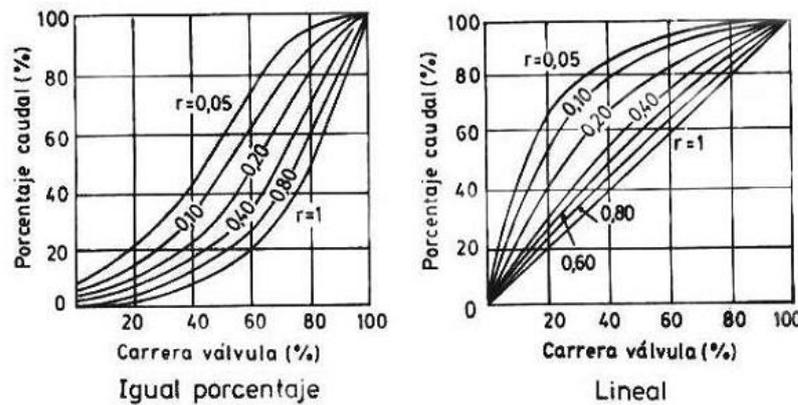


Ilustración 121 “Curva característica inherente (Creus Sole , 1997)”

## Dimensionamiento de la válvula. Cálculo de $K_v$ y $C_v$

La necesidad universal de normalizar el cálculo de dimensiones de las válvulas, no sólo en cuanto a tamaño sino también en cuanto a capacidad de paso del fluido ha llevado a los fabricantes y a los usuarios a adoptar un coeficiente que refleja y representa la capacidad de las válvulas de control.

El primer coeficiente de dimensionamiento de válvula que se utilizó fue el denominado  $C_v$ , cuya definición es la siguiente: “caudal en galones USA por minuto que pasa a través de la

válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de carga de una libra por pulgada cuadrada (psi)“.

En los países que se emplean unidades métricas se suele utilizar además el coeficiente Kv, que la norma internacional IEC-534-1987 sobre Válvulas de Control de Procesos industriales define del siguiente modo: “caudal de agua (de 5 a 40° C) en m<sup>3</sup>/h que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 bar.

El coeficiente Kv para la válvula totalmente abierta se denomina Kvs mientras que el mínimo valor recibe el nombre de Kv0. Por lo tanto la relación Kvs/Kv0 es la denominada “rangeability” o “campo de control” que expresa la relación de caudales que la válvula puede controlar. En las válvulas de control isoporcentual, esta relación suele ser 30 a 1 y en las lineales de 15 a 1 o 30 a 1. La equivalencia entre los coeficientes Kv y Cv para la válvula completamente abierta es:

$$Kv = 0.86 Cv \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$$C = 1.16 Kv \text{ (galones por minuto)}$$

## Posicionadores de válvulas



Ilustración 122 “*Posicionado de válvula* (Valdes, 2019)”

Las fuerzas de desequilibrio que actúan en la válvula de control influyen en la posición del vástago de la válvula y hacen que el control sea errático e incluso inestable.

Estas fuerzas son esencialmente las siguientes:

1. Fuerza de rozamiento del vástago al deslizarse a través de la empaquetadura.
2. Fuerza estática del fluido sobre el obturador que depende de la presión diferencial existente.

El posicionador compara la señal de entrada con la posición del vástago y si ésta no es correcta (existe una señal de error) envía aire al servomotor o bien lo elimina en el grado necesario para que la posición del vástago corresponda exactamente o bien sea proporcional a la señal neumática recibida; en este último caso el posicionador actúa además como un amplificador, por ejemplo señal de entrada 3-9 psi, señal de salida 3--15 psi, es decir, la válvula efectuará toda su carrera para la señal 3-9 psi del controlador.

Cuando se desea acelerar la velocidad de respuesta de una válvula de control. Es un controlador de posición (constituye un servomecanismo). Es un lazo en cascada con el lazo de control donde se encuentra inserto.

De uso beneficioso para sistemas lentos con grandes constantes de tiempo: Control de temperatura, de nivel de líquidos, de presión, de grandes volúmenes de gas, etc.

También muy usado en los siguientes casos:

- A) Desbalance de fuerzas en la válvula por:
  - 1) Alta presión del fluido circulante.
  - 2) Gran fricción de la empaquetadora.
  - 3) Alta viscosidad del fluido circulante o con sólidos en suspensión.
- B) Cuando se debe disminuir la constante de tiempo de la línea de transmisión y de válvula.  
Por ejemplo: Cuando tengo válvulas de grandes cabezales.
- C) Cuando se trabaja con válvulas de alcance partido, donde un solo controlador opera con 2 válvulas:  
Nº1 -----→ 3 – 9 (p.s.i.)  
Nº2 -----→ 9 – 15 (p.s.i.)
- D) Cuando la válvula necesita mayores presiones en su accionamiento:  
Por ejemplo:  
6 -----→ 30 (p.s.i.)

Veamos un diagrama en bloques del posicionador:

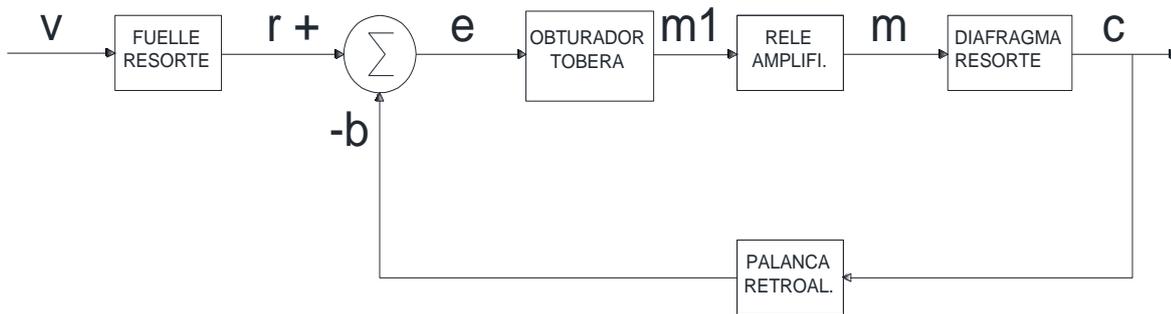


Ilustración 123 “Diagrama en bloque posicionador de válvula”

### Posicionador de válvula Neumático

El posicionador es del tipo de vástago de válvula (Ilustración 125) que tiene por objetivo eliminar o disminuir los efectos producidos por 1) Fricción del vástago 2) Retraso de actuadores de gran capacidad con extensas líneas de transmisión 3) Cambios de presión en la línea de proceso y 4) fricciones del émbolo debido a fluidos altamente viscosos, residuos gomosos o sedimentación.



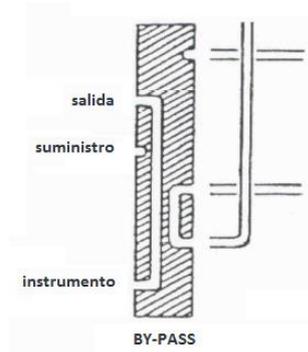


Ilustración 125 “Conexiones del Posicionado de válvula tipo C (Foxboro, 2002)”

## Posicionador inteligente

El posicionador está mandado por un microprocesador y asegura una correspondencia prefijada entre la posición de la válvula y la señal de mando. Compara la señal de mando digital, enviada cíclicamente desde un sistema de control o de regulación a través de los hilos del Bus, con la carrera de una válvula de control y envía como señal de salida una presión de mando neumática.

La elaboración digital de datos ofrece las siguientes ventajas respecto a los posicionadores convencionales:

- De fácil operación, ajuste automático del cero y del span.
- Detección automática de anomalías en el accionamiento
- Función de cierre hermético configurable para ambas posiciones finales
- Fácil modificación de los parámetros de regulación, incluso durante el funcionamiento
- Funciones de comprobación y diagnóstico
- Mínimo consumo propio de aire
- A fallo de tensión todos los parámetros quedan memorizados en una memoria EEPROM

## **Principio de funcionamiento**

El detector de recorrido inductivo (1), libre de contacto, toma la carrera de la válvula de control y la transmite al microprocesador (2) a través de un convertidor. Éste compara la carrera con el punto de consigna y en caso de existir una desviación, activa una de las dos electroválvulas neumáticas de 2/2 vías (3, 4).

Las electroválvulas airean (3) o desairean (4) el accionamiento neumático a través de los correspondientes amplificadores según la desviación.

Un segundo microprocesador (5) se hace cargo del intercambio digital de datos según profibus.

Unos diodos luminosos integrados en la cara interior de la tapa del posicionador señalizan: listo para funcionamiento, en regulación y eventuales anomalías de regulación.

Mediante un paquete de software se ajustan, se seleccionan y se transmiten al posicionador profibus todos los parámetros necesarios.

El posicionador profibus tiene en su versión estándar una entrada binaria, a través de la cual puede señalizarse una información adicional.

Por medio de un interruptor protector de datos situado en la cara interior de la tapa se puede impedir que por un descuido se cambie erróneamente la configuración memorizada.

### Leyenda

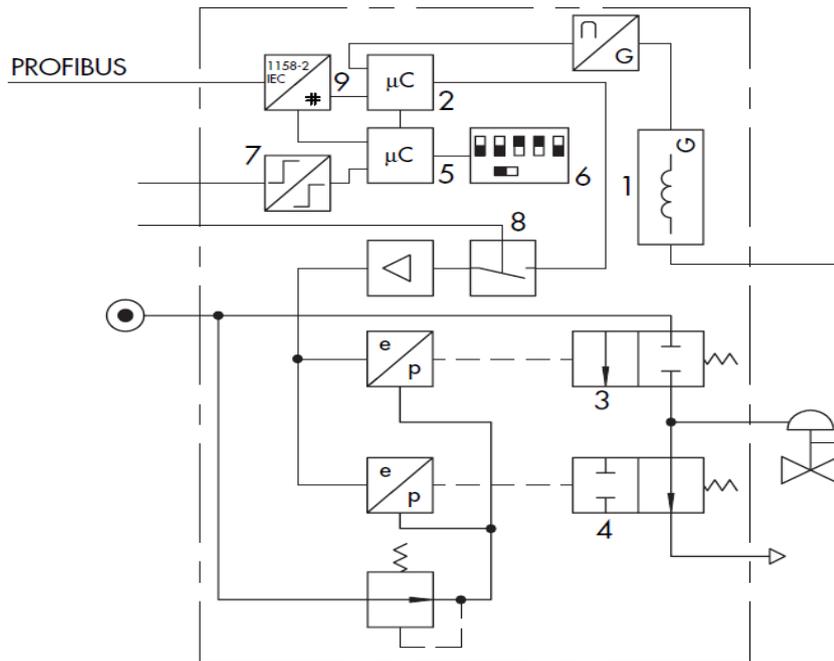


Ilustración 126 “*Funcionamiento interno Foxboro - SRD960 Universal Positioner (Foxboro, 2002)*”

1 Detector de recorrido inductivo

2 Microprocesador

3 Electroválvula para aire de alimentación

4 Electroválvula para aire de escape

5 Microprocesador

6 Microinterruptor para direcciones del Bus y protección de los parámetros

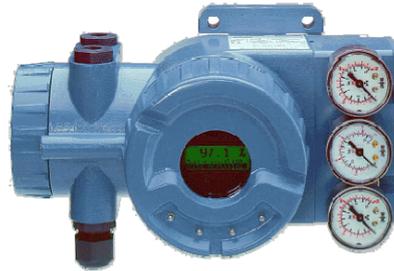
7 Entrada binaria

8 Desaireación forzosa

9 Módulo Interface

## Posicionador Inteligente Características

Entrada:	Analógica 4-20 mA Digital: Hart Foundation FieldBus FoxCom Profibus PA
Operación:	Simple Efecto Doble Efecto
Opciones:	Finales de Carrera (T) Retransmisión 4-20 mA (Q) Entradas Binarias (B) Salidas Binarias (P) Display LCD (V02) Manómetros
Kits de Montaje:	Lineal y Rotativo



“Universal” Positioner

Ilustración 127 “*Posicionado inteligente Foxboro - SRD960 Universal Positioner (Foxboro, 2002)*”

### **Ruido en las válvulas de control:**

En las industrias de procesos existen diversos elementos y mecanismos que dan por resultado altos niveles de ruido, uno de ellos los produce las válvulas de control que están en cañerías de transporte de gas, vapor y líquidos de todo tipo.

El cálculo del nivel de ruido en las válvulas de control es un problema que actualmente no puede resolverse en forma adecuada debido a que no se conocen los parámetros que intervienen.

El ruido en la válvula de control es generado por turbulencias en la válvula radiado a sus alrededores por la cañerías aguas abajo.

Las causas de ruido en válvulas de control tienen origen en:

- 1) Vibraciones mecánicas.
- 2) Ruido hidrodinámico.
- 3) Ruido aerodinámico.

El ruido mecánico puede ser el resultado de vibraciones causadas por las fluctuaciones de la presión en el cuerpo de la válvula y el impacto del fluido sobre el obturador de la válvula.

También las vibraciones pueden producirse por los componentes de las válvulas resonando a su frecuencia natural. La vibración resonante produce altos niveles de tensión (stress), que pueden producir fallas por fatiga de las partes.

El ruido mecánico, en general, puede ser eliminado a través de un diseño adecuado de válvulas y usualmente no es encontrado en el servicio de una válvula de control.

El ruido hidrodinámico por la turbulencia del flujo líquido, cavitación y flashing.

El ruido del flujo de líquido se genera por las fluctuaciones de velocidad turbulenta que resultan de la desaceleración rápida del fluido que ocurre a medida que el área de flujo se incrementa aguas abajo de la vena contracta. El ruido del flujo de líquido es generalmente bajo y no es considerado un problema de ruido.

El ruido es también producido por la Implosión de las burbujas de gas o vapor retornando al estado de líquido en el proceso de cavitación.

El ruido de cavitación puede ser descrito como un sonido agudo rápido (uno detrás del otro), como si pequeñas piedras fuesen arrastradas por el fluido.

Usualmente, el ruido de cavitación es altamente localizado inmediatamente agua debajo de la vena contracta. La reducción o eliminación de la cavitación es usualmente necesaria para reducir el daño físico a las partes de la válvula y a las cañerías y para reducir el nivel de presión de sonido.

El ruido del Flashing ocurre cuando una porción del fluido vaporiza sin el subsecuente colapso de la burbuja que ocurre en la cavitación. El ruido es el resultado de la desaceleración y expansión del flujo de las dos fases generalmente el ruido del Flashing es significativamente más bajo que el ruido de la cavitación, pero la erosión es a menudo un problema serio.

El ruido aerodinámico es la fuente mayor de ruido para servicio gaseoso, (o sea cuando circulan vapor, aire y gases). Es creado a través de mecánicas complejas. El nivel de ruido es generalmente una función de velocidad de flujo.

El gas fluyendo a través de una válvula de contrato específicamente una aceleración a medida que se aproxima a la vena contracta.

Vemos en la Ilustración 128 el perfil de la velocidad y el de presión pasando a través de la válvula:

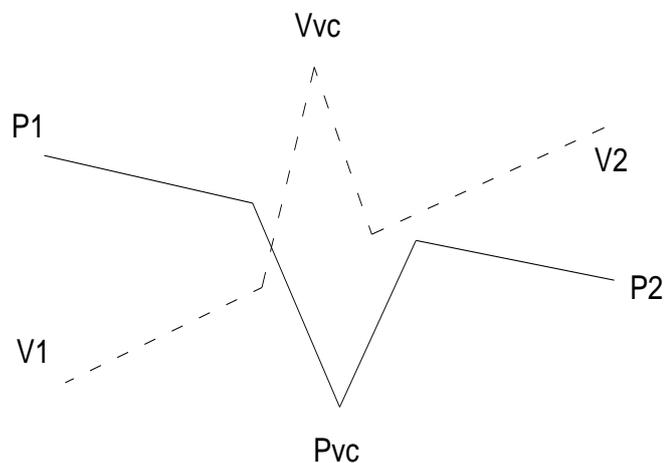


Ilustración 129 "Perfil de velocidad y presión en la válvula"

Los niveles de sonido alto pueden ser generados aunque la velocidad de salida pueda sean bajas.

Los niveles de ruido aerodinámicos pueden ser de 100 dB o más y pueden llegar a 150dB en algunos casos.

El ruido puede variar dependiendo de las dimensiones y espesor de cañerías, y de la distancia desde donde se escucha el ruido.

## Especificaciones de las Válvula de control

Para especificar válvulas de control se deben completar datos que cumplen un papel preponderante.

- 1) **Tipo de fluido:** Es conveniente dar la composición química, el estado (líquido, vapor) la presencia de sólidos o partículas erosivas.
- 2) **Caudales:** Tanto el caudal máximo como las unidades son imprescindibles en válvulas de control. Cuando el Caudal mínimo que se quiere controlar está muy alejado del máximo, debe definirse en la especificación.
- 3) **Presión de entrada:** Se debe conocer la presión aguas arriba de la válvula y es importante la presión diferencial a través de la válvula. Así como debemos conocer la presión a máximo caudal, es conveniente conocer la presión a cierre completo (Shut-off), porque con este valor se puede dimensionar el actuador.
- 4) **Presión de salida:** Para el cálculo de la presión diferencial.
- 5) **Temperatura de entrada:** Importante en gases y vapores también en líquidos cerca del punto de ebullición o en válvulas con caídas importantes de presión (tema cavitación). También por problemas mecánicos o de materiales en el caso de temperaturas menores -20°C (válvula criogénicas), o -100/120°C.
- 6) **Presión de vapor:** Para líquidos por el problema de cavitación.
- 7) **Ruido:** Se debe pedir que el fabricante lo calcule y al mismo tiempo establecer límites mecánicos.

Para gases: (ruido fenómeno aerodinámico) se acepta un nivel de hasta 90dB para servicio continuo.

En líquido: (ruido es fenómeno asociado a cavitación) hasta  $\approx 85$  dB.

- 8) **Tamaño y clase ANSI:** El tamaño es responsabilidad del fabricante, en el caso de válvulas de control.
- 9) **Tipo:** (esférica, mariposa, globo, etc.) salvo que el usuario defina por sí una preferencia, el fabricante es el que debe definir el tipo.
- 10) **Máxima presión y temperatura:** en casos  $\neq$  a lo planteado anteriormente.
- 11) **Material del cuerpo:** Entre el usuario y el vendedor.
- 12) **Conexiones:** Por el usuario. En el caso de BRIDAS especificar norma (ANSI, DIN, JIS)
- 13) **Características:** Igual porcentaje, lineal, apertura rápida. Generalmente dado por el usuario.

- 14) **Materiales internos:** Asientos, jaula/guías, vástago: generalmente entre el usuario y el fabricante.
- 15) **Tipo de actuador:** definir si debe ser neumático, eléctrico, hidráulico o manual y a su vez si es a pistón, a diafragma, etc.
- 16) **Posición por seguridad:** N.A. o N.C.
- 17) **Señal de entrada al actuador:** Importante para su diseño.

Neumática: 3-15 psi/3- 27 psi.

Eléctrica: 4-20mA dc.

- 18) **Posicionador:** sí o no (definir)
- 19) **Switches:** Funciones para apertura y cierre.
- 20) **Reguladora / Filtro:** Con o sin manómetros.
- 21) **Prueba hidráulica:** Los fabricantes de válvulas las realizan en todos los casos. El usuario debe prever enviar algún inspector para presenciar esta prueba.

Todos estos datos deberán ingresar a una planilla para efectuar el pedido correspondiente

### **Un pequeño resumen sobre mantenimiento de válvulas de control:**

- En general una planta de procesos automatizada tiene alrededor de un empleado por cada 5 válvulas de control.
- Las válvulas de control afectan económicamente a un planta en cuatro áreas básicas:
  1. Eficiencia del proceso.
  2. Confiabilidad del proceso.
  3. Pérdida del fluido.
  4. Costos de mantenimiento.

1) En muchos procesos una variación en el desempeño de la válvula acarrea problemas graves (baja eficiencia).

2) En muchos procesos de producción continua, la confiabilidad del proceso es crítica.

La pérdida de tiempo de la producción genera un costo normalmente alto, es por ello, que en muchas plantas existen en lugares críticos válvulas en paralelo con otras para dar continuidad a la producción.

De todas maneras estos sistemas paralelos dan un costo fijo de instalación más caro y un mantenimiento más costoso

3) la pérdida de fluido puede ser:

Interna: a través de obturador y asiento, resultan en pérdidas de producto (válvula cerrada).

Externa: a través de empaquetadura y/o juntas, también generan pérdida del producto en el ambiente y se vuelve riesgosa (dependiendo del fluido que estemos hablando). Por ejemplo: que se pierda un gramo/minuto a través de una empaquetadura, significan  $\approx$  500 kilogramos/año.

Si multiplicamos este número por el número de válvulas de control de planta tendremos una pérdida muy grande en dinero, y además contaminando el medio ambiente laboral.

4) Costos de mantenimiento: En toda planta se desea mayor confiabilidad y eficiencia con menor mantenimiento.

Sin embargo, gastar poco o en forma ineficiente en mantenimiento puede que se generen grandes pérdidas (paradas de planta, pérdidas de fluidos, inadecuado comportamiento de la válvula, etc.)

Ya sabemos que una válvula de control cumple 3 funciones básicas:

1-Regular caudal.

2-Interrumpir caudal.

3-Contener el fluido de proceso.

En las válvulas rotativas: esféricas, tapón y mariposas: hay problemas en el sello entre el cuerpo y el elemento rotante (hay fricción y continuo desgaste).

En las globo (vástago deslizante). Los problemas están en las empaquetaduras y/o juntas.

El actuador de la válvula también debe ser chequeado periódicamente.

Revisar: diafragma – resorte.

También todos los auxiliares de válvulas de control como ser: Posicionador, transductor y reguladora.

## **Programa de mantenimiento**

Correctivo o reactivo: sólo cuando la válvula tiene o presenta un problema obvio.

Preventivo: Un plan típico puede ser el de examinar 1/3 de todas las válvulas de planta (anualmente, o en el tiempo que se estime conveniente) haciéndolo alternativa y sistemáticamente.

Predictivo: se cree que es el más efectivo, Para las válvulas, una manera es con un dispositivo que mide la carrera del vástago de la válvula y la señal del instrumento y también simultáneamente mide el aire del instrumento al posicionador, el suministro de aire y la presión al actuador, con esto se pueden determinar:

- Ajuste en banco y cte. del resorte.
- Fricción y recorrido de la válvula.
- Velocidad de recorrido.
- Fuerzas de cierre.
- Presión de suministro de aire.
- Calibración, linealidad e histéresis del posicionador.
- Calibración, linealidad e histéresis del transductor I/P.
- Fricción de la empaquetadura.

Los servicios que prestan los fabricantes de válvulas de control son muy importantes pero los usuarios generalmente los utilizan. En general el usuario trata de resolver por sí solo el problema que se le plantea.

El objetivo de un programa de mantenimiento predictivo es usar la información para predecir la vida útil que todavía le queda al equipo que se está considerando.

Se deben tomar los datos de funcionamiento de la válvula y las fallas de la misma. Y se debe tener en cuenta que de salir de servicio una o más válvulas de control compromete la producción, significando pérdida de dinero, o sea que es conveniente gastar en el mantenimiento mencionado, pues la productividad de la planta lo justifica plenamente.

## CAPITULO 6

### Transmisores

#### Elementos neumáticos

Como elementos neumáticos consideramos los instrumentos transmisores neumáticos.

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática.

El sistema tobera-obturador consiste en un tubo neumático alimentado a una presión constante ( $P_{si}$ ), con una reducción en su salida en forma de tobera, la cual puede ser obstruida por una lámina llamada obturador, cuya posición depende del elemento de medida. En la ilustración 131 se presenta el conjunto.

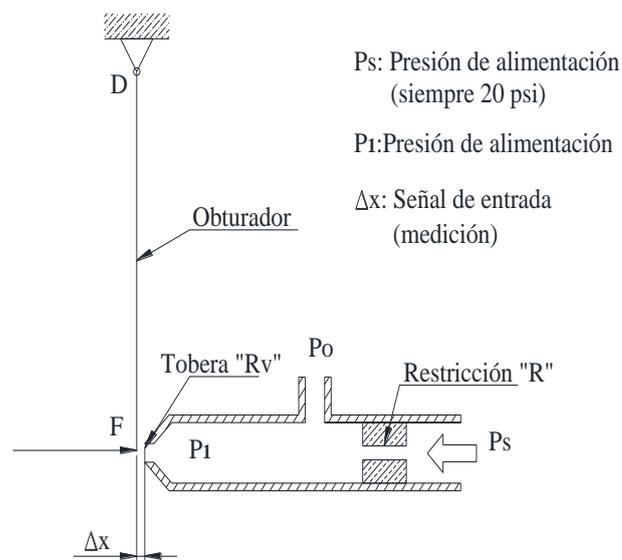


Ilustración 130 " Sistema Tobera-obturador "

El aire de alimentación de presión normalizada 1,4 bar (20 psi) pasa por la restricción R y llena el volumen cerrado V escapándose a la atmósfera por la tobera Rv. Ésta tiene un diámetro muy pequeño, de unos 0,25-0,5 mm, mientras que la restricción R tiene un diámetro alrededor de 0,1 mm. Con el obturador abierto la presión posterior remanente es de unos 0,03 bar, lo cual indica que la relación de presiones diferenciales a través de la restricción R es de  $1,4/0,03 \approx 50$  veces. El consumo de aire del conjunto tobera-obturador es relativamente pequeño, del orden de 3 Lts/min.

El escape de aire a través de la tobera depende de la posición del obturador, es decir, del valor de “ $\Delta x$ ”. Debido a este escape, el volumen V se encontrará a una presión P1 intermedia entre Ps y la presión atmosférica. En efecto: para  $x = 0$  el obturador tapa casi totalmente a la tobera, con lo cual no hay escape de aire a la atmósfera y P1 llega a ser casi igual a la presión Ps del aire de alimentación: para “x” relativamente grande el obturador está bastante separado de la tobera y no limita el escape a la atmósfera siendo la presión P1 próxima a la atmosférica.

En la ilustración 2 se representa la curva de respuesta de un Sistema Tobera-obturador, donde se ejerce una fuerza sobre el obturador F, P1,  $\Delta X$ , Ps, que tiende a desplazarlo. Esta curva de respuesta típica de un sistema tobera-obturador, pudiendo verse que la misma no es lineal.

De esta curva se utiliza la parte lineal, la cual luego será amplificada y se disminuye además la sección de la tobera a diámetros muy pequeños de 0,1 a 0,2 mm (*no se consideran diámetros más pequeños para evitar que la tobera se tape por suciedad del aire*). De este modo, la parte reducida de la curva puede aproximarse a una línea recta con lo cual se consigue una relación prácticamente lineal entre el valor de la variable y la señal transmitida.

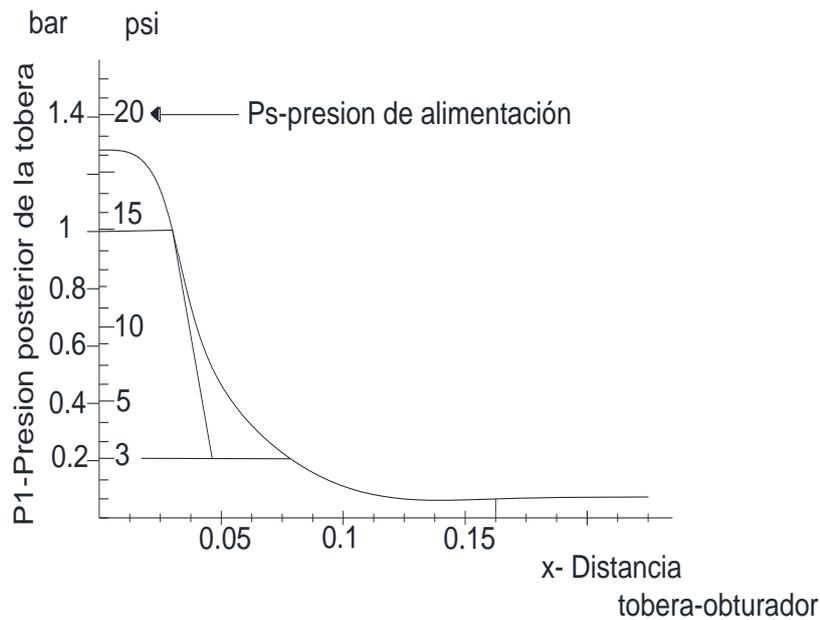


Ilustración 131 “*Grafico Presión-Distancia*”

Como la restricción fija R es 3 a 4 veces menor que la tobera Rv, sólo pasa por la misma un pequeño caudal de aire, por lo cual, el volumen V debe ser tan reducido como sea posible para obtener un tiempo de respuesta del sistema inferior al segundo.

La válvula piloto (amplificador neumático) empleada en el amplificador de dos etapas ilustración 3 cumple las siguientes funciones:

1. Aumento del caudal de aire suministrado, o del caudal de escape para conseguir tiempos de respuesta inferiores al segundo.
2. Amplificación de presión (ganancia) que suele ser de 4 a 5, en general, para obtener así la señal neumática estándar 3-15 psi (0,2-1 bar).



Ilustración 132 “Diagrama de bloque, del amplificador en dos etapas”

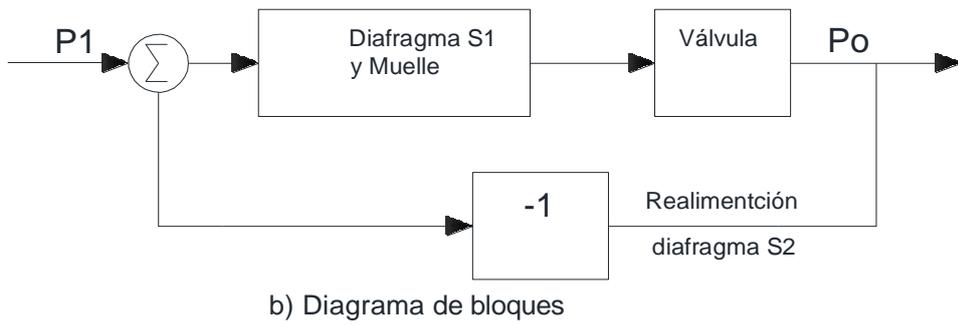
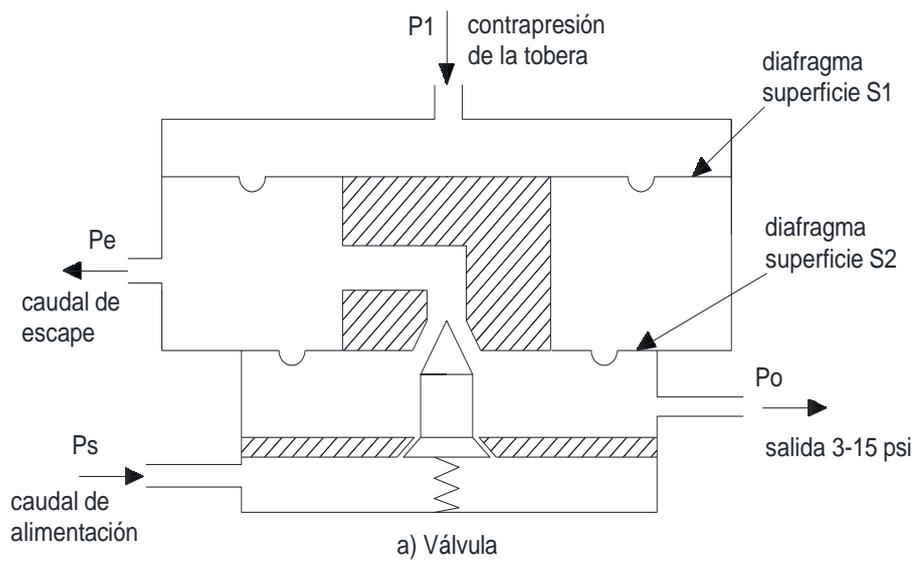
En la válvula piloto con realimentación, sin escape continuo (Ilustración 134 a), la presión posterior P1 de la tobera actúa sobre la membrana de superficie S1 mientras que la presión de salida Po lo hace sobre la membrana S2. El conjunto móvil de las dos membranas tiende al equilibrio y cuando éste se establece se verifica la siguiente ecuación:

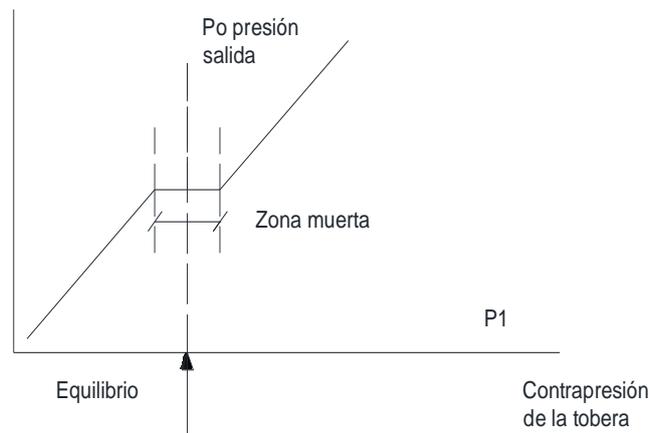
$$P_0 * S_1 = P_1 * S_2$$

$$K = P_0 * S_1 = P_1 * S_2 \quad (78)$$

La relación es el factor de amplificación o de ganancia de la válvula piloto.

En la posición de equilibrio y ante un aumento de la presión posterior P1 de la tobera, el aire de alimentación entra en la válvula aumentando el valor de Po. Por el contrario, si P1 disminuye, el aire contenido en el receptor escapa a través del orificio de escape, con lo cual Po baja. Entre estas dos reacciones del sistema existe una zona muerta debida a la histéresis mecánica de las partes móviles que está representada en las curvas características de presión y caudal de la válvula en las Ilustraciones 134 c y d.





c) Característica de presión

Ilustración 133 “(A) Válvula piloto con realimentación, (B) Diagrama de bloque de la válvula, (C) Grafico característica de presión “

El sistema descrito compuesto por el conjunto tobera-obturador y la válvula piloto presenta todavía las siguientes desventajas:

- Las variaciones en la presión del aire de alimentación influyen en la señal de salida.
- Las vibraciones que pueden existir en el proceso influyen en el juego mecánico entre el obturador y el elemento de medida y dan lugar a pulsaciones en la señal de salida, ya que el factor de amplificación del sistema tobera-obturador es muy grande.

Estos inconvenientes se evitan disminuyendo la ganancia del conjunto por realimentación negativa de la señal posterior de la tobera  $P_o$  sobre el obturador. Se utilizan así tres sistemas de transmisión, el transmisor de equilibrio de movimientos, el de equilibrio de fuerzas y el de equilibrio de momentos.

## Transmisor de equilibrio de movimientos

El transmisor de equilibrio de movimientos (Ilustración. 135) compara el movimiento del elemento de medición asociado al obturador con un fuelle de realimentación de la presión posterior de la tobera. El conjunto se estabiliza según la diferencia de movimientos alcanzando siempre una posición de equilibrio tal que existe una correspondencia lineal entre la variable y la señal de salida. Hay que señalar que, en este tipo de transmisores, las palancas deben ser livianas, pero bastante fuertes para que no se doblen.

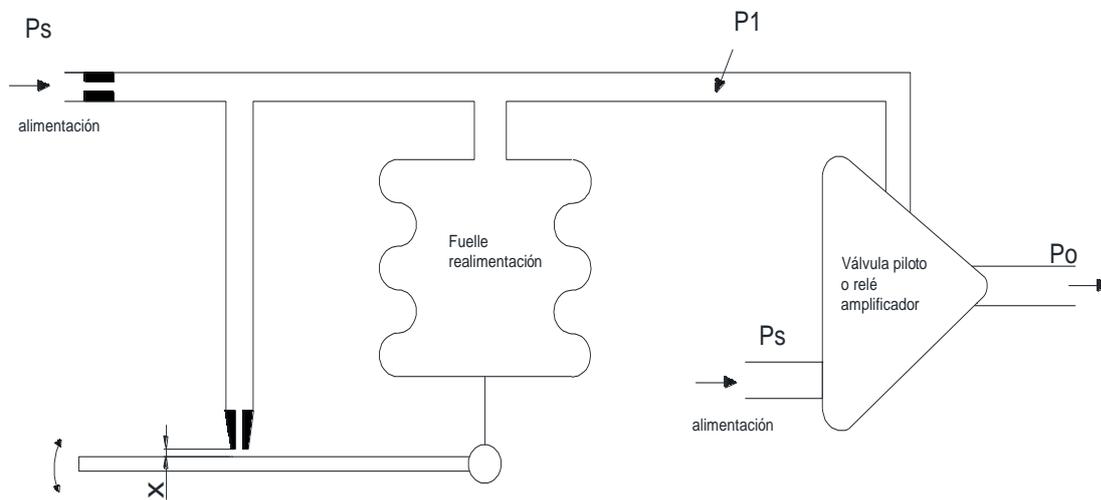


Ilustración 134 “*Transmisor de equilibrio de movimiento*”

Estos instrumentos se utilizan, en particular, en la transmisión de presión y temperatura donde los elementos de medida tales como tubos Bourdon, manómetros de fuelle, elementos de temperatura de bulbo y capilar son capaces de generar un movimiento amplio, sea directamente o bien a través de palancas con la suficiente fuerza para eliminar el error de histéresis que pudiera producirse. Si la fuerza disponible es pequeña, aparte de la histéresis, el tiempo necesario para el movimiento es grande y el transmisor es lento en responder a los cambios de la variable. En este caso, se acude a los transmisores de equilibrio de fuerzas en los que

básicamente el elemento primario de medida genera una fuerza que se equilibra con otra igual y opuesta producida por el transmisor.

### Transmisor de equilibrio de fuerzas

En la Ilustración 136 puede verse que el elemento de medición ejerce una fuerza en el punto A sobre la palanca AC que tiene su punto de apoyo en D. Cuando aumenta la fuerza ejercida por el elemento de medición, la palanca AC se desequilibra, tapa la tobera, la presión aumenta y el diafragma ejerce una fuerza “F” hacia arriba alcanzándose un nuevo equilibrio. Hay que señalar, como se ha dicho, que en este transmisor los movimientos son inapreciables.

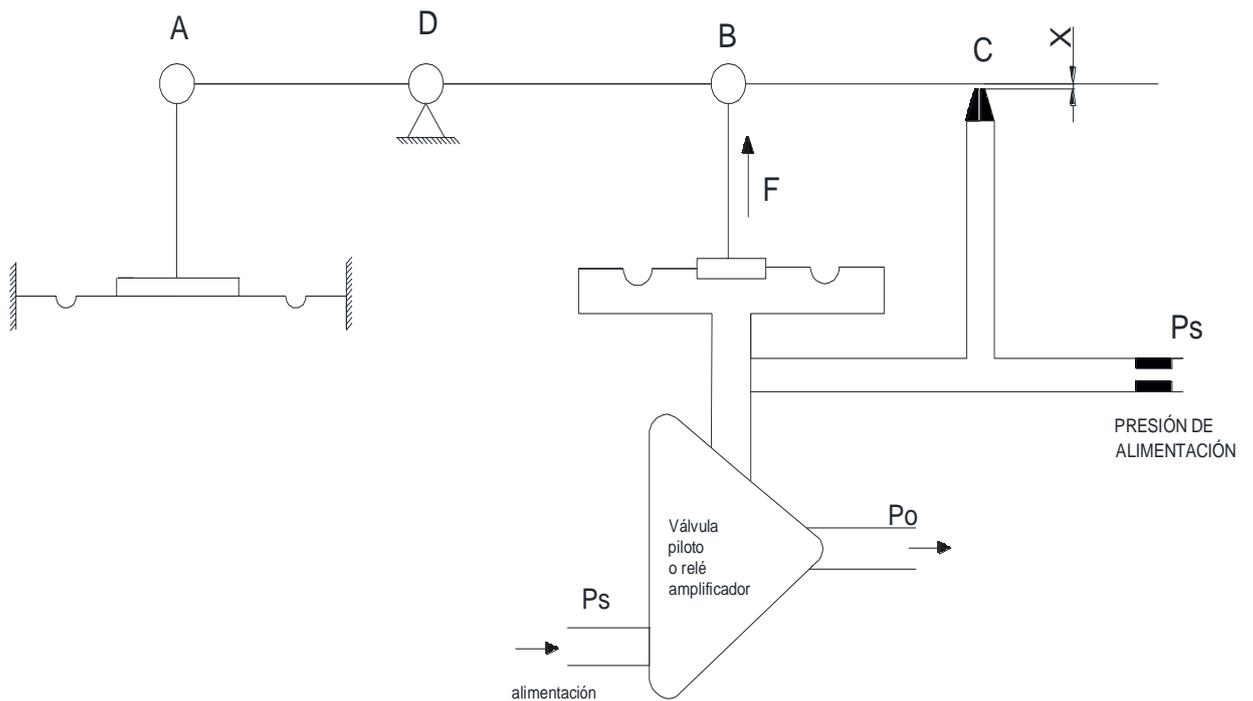


Ilustración 135 “Transmisor de equilibrio de fuerza”

### Transmisor de equilibrio de momentos

Utilizado generalmente en la medida de la Presión diferencial (Caudal), el desequilibrio de

fuerzas producido crea un par al que se opone el generado por el fuelle de realimentación a través de una rueda de apoyo móvil situada en el brazo del transmisor.

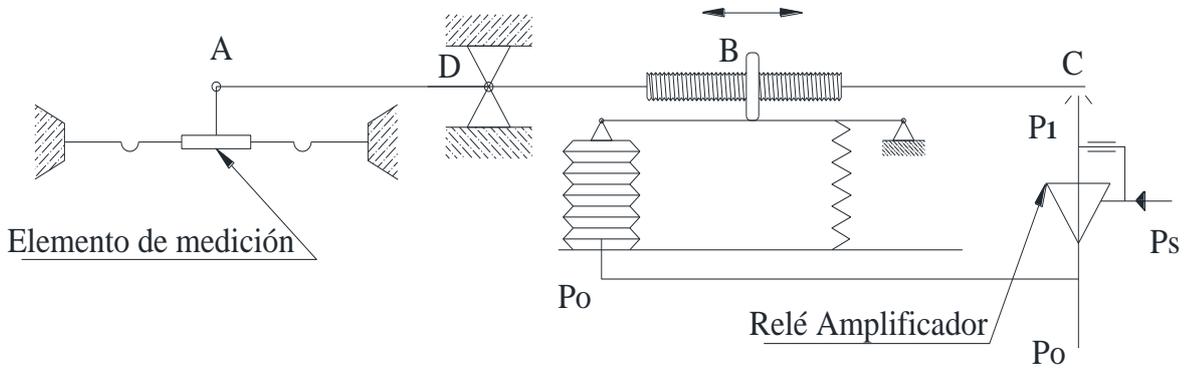


Ilustración 136 “Transmisor de equilibrio de momento”

## Transmisor de celda diferencial (Neumático)

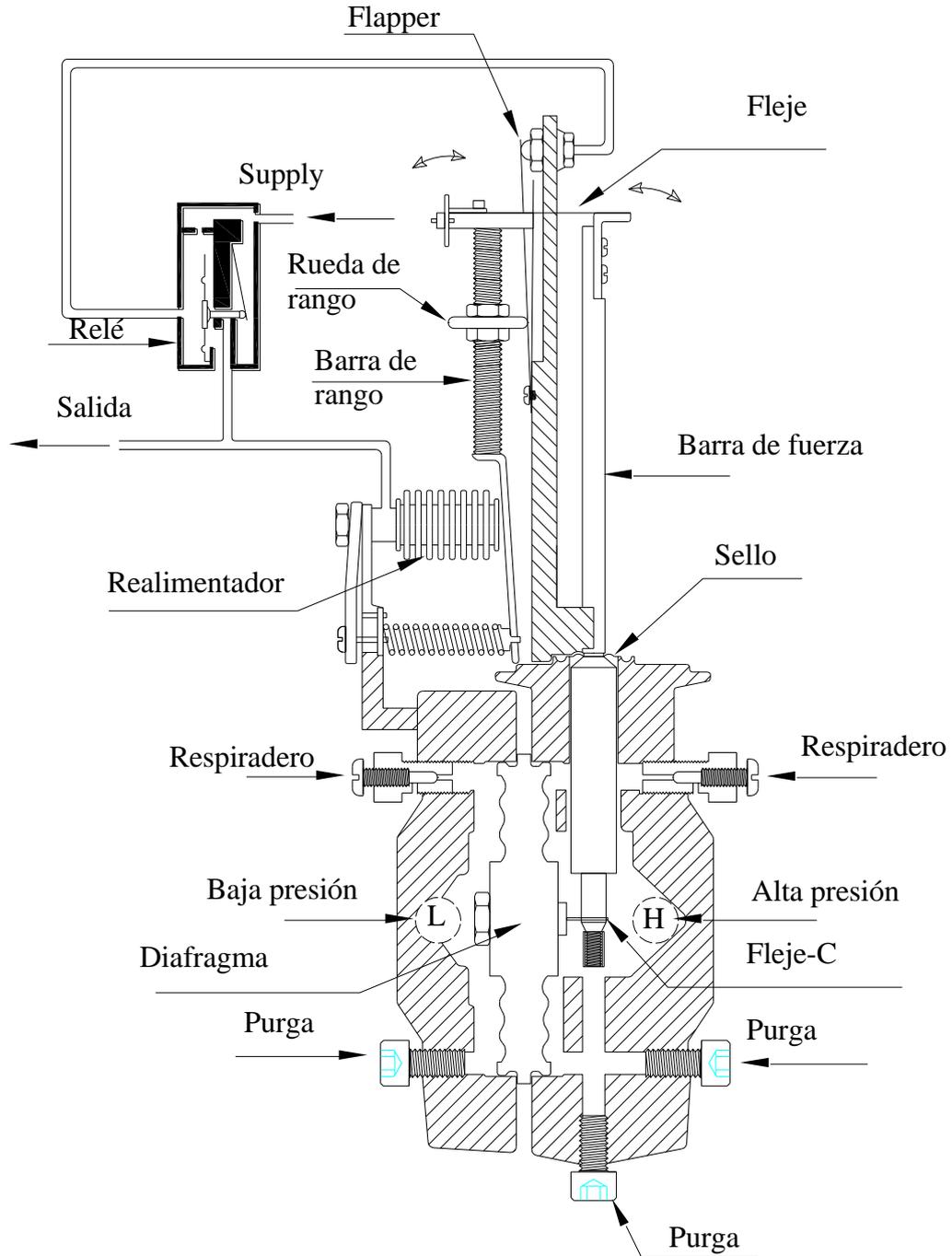


Ilustración 137 "Transmisor Neumático, modelo 11GM-BSA; (Foxboro, 2002)"

Este transmisor de celda diferencial es un dispositivo que opera basado en el principio de balance de fuerza. Está diseñado para usarlo en aplicaciones que requieran la medida de presiones diferenciales bajas, nivel de líquidos, y la gravedad específica de 0 – 125 a 0 – 635 mm de agua.

Las presiones de proceso son aplicadas a los lados opuestos del diafragma (F) a través de las conexiones de presiones de Alta y baja. La presión diferencial resultantes ejerce una fuerza sobre el diafragma, el cual está conectado rígidamente a la barra de fuerzas (C) mediante el fleje (E). El diafragma (D) actúa como un sello y como un fulcrum para la barra de fuerza. La barra de fuerza transmite una fuerza, la cual es exactamente proporcional a la presión diferencial que actúa sobre el diafragma (F), por medio del fleje (E) a la barra de rango (E), haciendo que la barra de rango pivote en la rueda de rango (J).

Cualquier movimiento de la barra de rango es detectado por el flapper (A), produciendo de esta manera una relación tobera-flapper la oval establece, d-relé (K) una presión de salida la cual es la señal neumática transmitida. La presión de salida es transmitida simultáneamente a los fuelles de realimentación (G). La fuerza ejercida por el fuelle de realimentación es exactamente proporcional a la fuerza aplicada a la barra de rango (H) por la barra de fuerza (C).

Dado que la fuerza ejercida por la barra de fuerza es exactamente proporcional a la presión diferencial, la presión en el fuelle de realimentación y a la salida es exactamente proporcional a la presión diferencial. En operación el movimiento de la barra de rango está continuamente ajustando el flapper- tobera para mantener una condición de balance de fuerza entre las fuerzas ejercidas por el fuelle de realimentación y por la barra de fuerza.

La salida es transmitida a un receptor neumático Standard, para registrar, indicar, y/o controlar la presión diferencial.

Dos tornillos de venteo (L) y dos tornillos de drenaje (N) son provistos para quitar aire atrapado o líquidos.

Filtros de malla de acero o metálica son provistos en ambas tapas de presión alta y baja para evitar que las materias sólidas penetren a la celda.

Flapper: Obturador.

Fulcrum: Pivote.

### **Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas**

En la siguiente figura está representado un transmisor de este tipo. En este instrumento el elemento mecánico de medición ejerce una fuerza sobre una barra rígida del transmisor.

Para cada valor de la presión, la barra adopta una posición determinada excitándose un transductor de desplazamiento tal como un detector de inductancia, un transformador diferencial o bien un detector fotoeléctrico. Un circuito oscilador asociado con cualquiera de estos detectores alimenta una unidad magnética y la fuerza generada reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas. Se completa así un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de presiones del proceso.

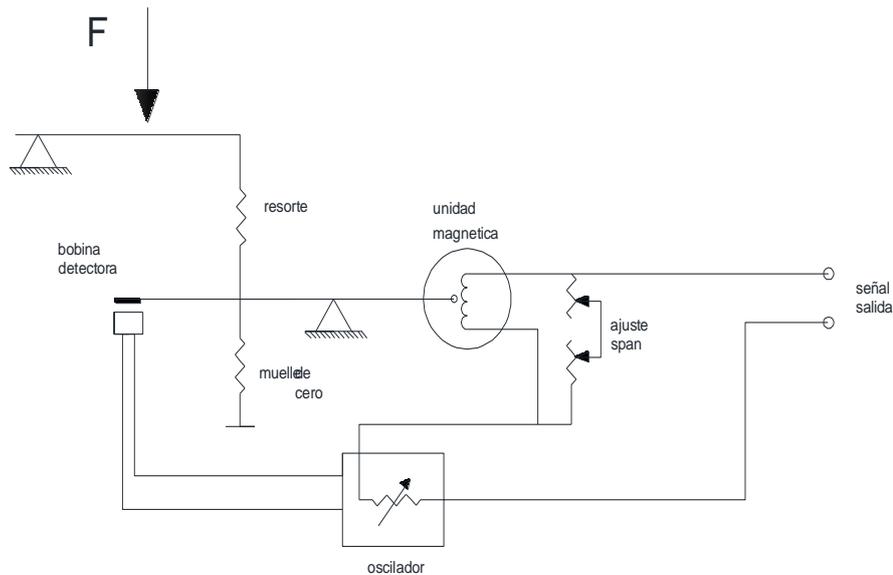


Ilustración 138 “Transmisor electrónico de equilibrio de fuerza”

Diagrama en Bloques:

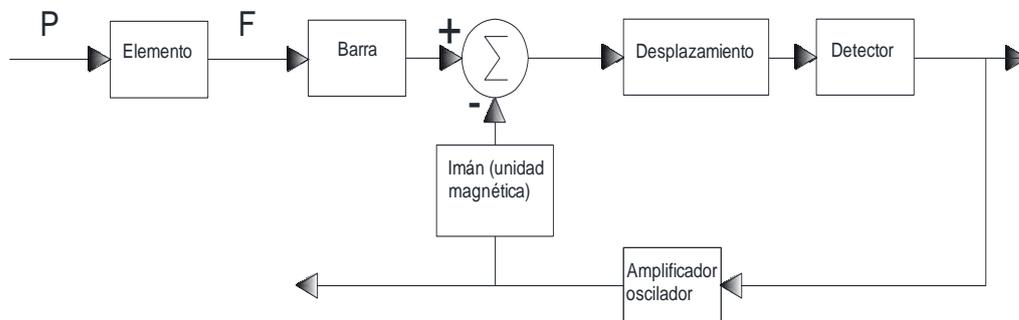


Ilustración 139 “Diagrama de bloque del transmisor electrónico”

En el transmisor de equilibrio de fuerzas con detector fotoeléctrico, la barra rígida tiene en su extremo una ventanilla ranurada que interrumpe total o parcialmente un rayo de luz que incide en una célula fotoeléctrica de dos elementos. Esta célula forma parte de un circuito de puente de Wheatstone auto equilibrado y por lo tanto, cualquier variación de presión que cambie la barra de posición, moverá la ventanilla ranurada y desequilibrará el puente. La señal diferencial

que se produce en los dos elementos de la célula es amplificada y excita un servomotor. Éste, al girar, atornilla una varilla roscada la cual comprime un resorte de realimentación que a su vez aprieta la barra de equilibrio de fuerza con una fuerza tal que compensa la fuerza desarrollada por el elemento de presión. De este modo, el sistema se estabiliza en una nueva posición de equilibrio.

Los transductores electrónicos de equilibrio de fuerzas se caracterizan por tener un movimiento muy pequeño de la barra de equilibrio, poseen realimentación, una elasticidad muy buena y un nivel alto en la señal de salida. Por su constitución mecánica presentan un ajuste del cero y del alcance (span) complicado y una alta sensibilidad a vibraciones y su estabilidad en el tiempo es de media a pobre.

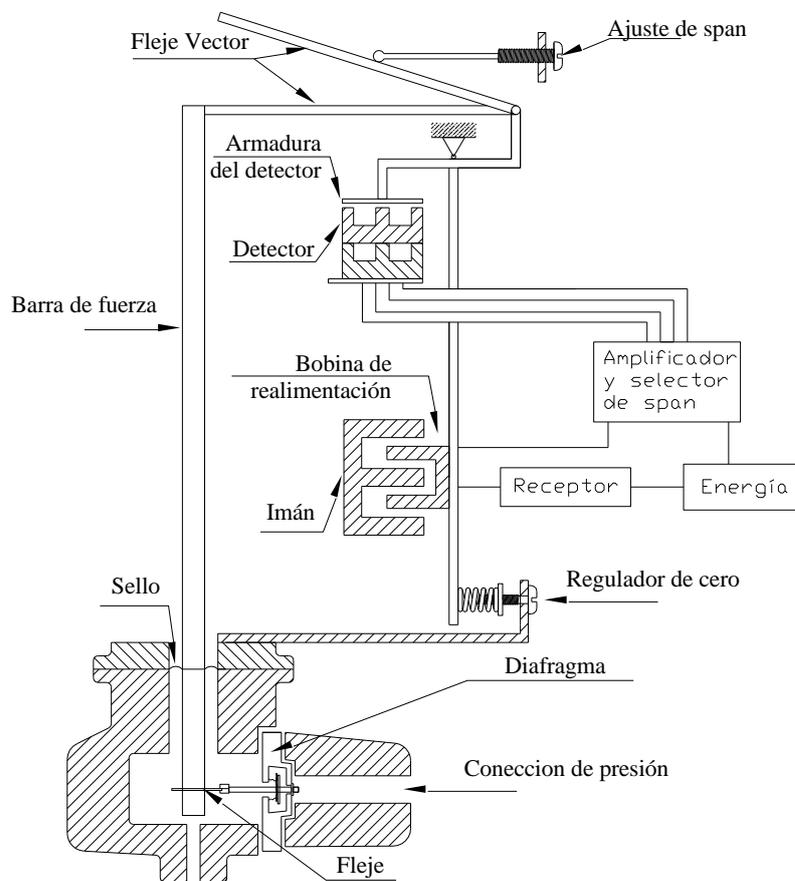


Ilustración 140 “Transmisor electrónico diferencial, serie E10, (Foxboro, 2002)”

El transmisor mostrado en la siguiente figura es del tipo diferencial y encuentra múltiples aplicaciones en diferentes lazos de control industriales.

## Transmisores de nivel

En la siguiente figura se muestra el esquema de un transmisor de nivel E17B que puede medir nivel, densidad o nivel de interferencia y transferir la medición a través de una señal de 4 a 20 mA. o de 10 a 50 mA. en continua.

El transmisor se instala de manera que el cilindro cuya densidad es siempre mayor que la del fluido, que de suspendido en el fluido del proceso. Entonces por el principio de Arquímedes al variar el nivel o la densidad la altura de suspensión del cilindro varía proporcionalmente.

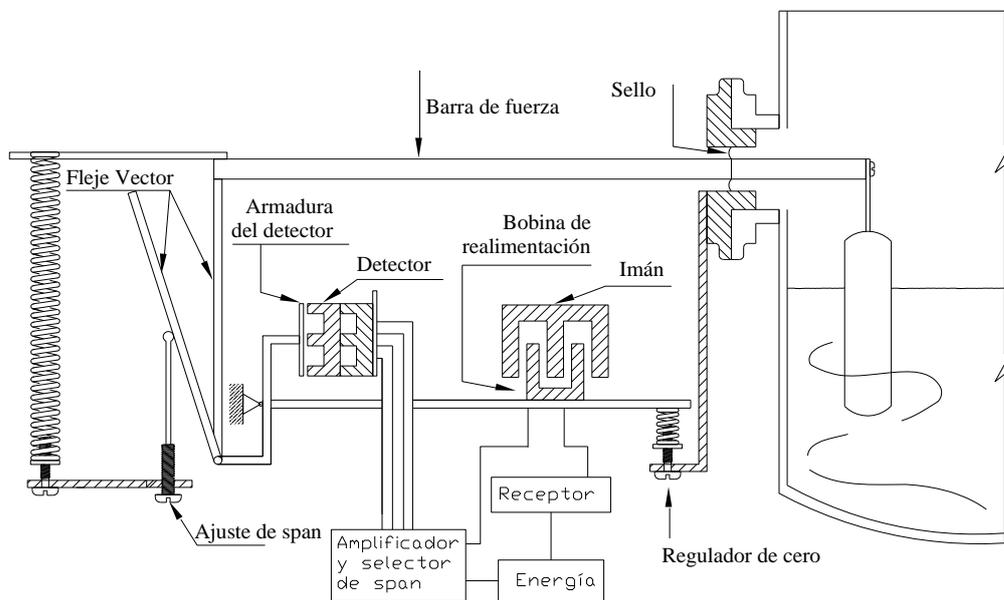


Ilustración 141 “Transmisor de nivel diferencia, Serie E17B, (Foxboro, 2002)”

Por todo lo que hemos visto hasta el momento, sabemos que un transmisor está compuesto por dos partes principales: un sensor y un transductor.

El sensor, tanto en neumáticos como en electrónicos genera una señal relacionada con la variable medida y el transductor por corriente esta señal en una normalizada.

La relación entre la variable medida y la señal generada por el sensor se conoce como su

### **Curva característica**

Esta relación puede presentar linealidades, que son indeseables en la salida del transmisor.

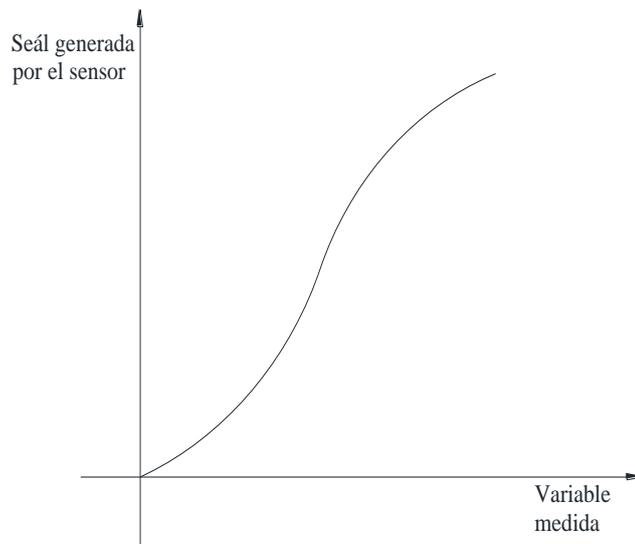


Ilustración 142 “*Curva variable medida-senál generada*”

### **Alinealidad**

Para muchos usuarios, la alinealidad es la indicación más significativa y por eso es mencionada más a menudo. Sin embargo, muchas veces la alinealidad es llamada linealidad. La alinealidad

describe el grado de curvatura de una curva característica o su grado de desviación de la linealidad. Describe la desviación máxima de la curva característica de una recta de referencia.

Principalmente hay tres métodos para determinar esta recta de referencia: el ajuste del valor límite, el ajuste del valor mínimo (BFSL [Best Fit Straight Line = línea recta de adaptación óptima]) y el ajuste del origen, siendo la última la menos frecuente.

En caso de alinealidad según ajuste del punto límite, la recta de referencia pasa por el comienzo y final de la curva característica. Con el método BFSL, la recta de referencia es la recta cuya máxima desviación positiva y negativa es idéntica. La alinealidad según ajuste del punto límite produce el mayor error en comparación al ajuste del valor mínimo, pero es la más comprobable para el usuario. La alinealidad según ajuste del valor mínimo, sin embargo, es el valor más significativo en muchos casos. Describe el potencial de la curva característica.

La diferencia actual entre la alinealidad según punto límite y según método BFSL depende de la forma típica de la curva característica de un sensor de presión. La alinealidad según punto límite puede alcanzar hasta el doble.

Desgraciadamente, no puede constatarse en muchas hojas técnicas según qué método se ha determinado la alinealidad. Por eso, los datos muchas veces no pueden compararse sin contactar al fabricante.

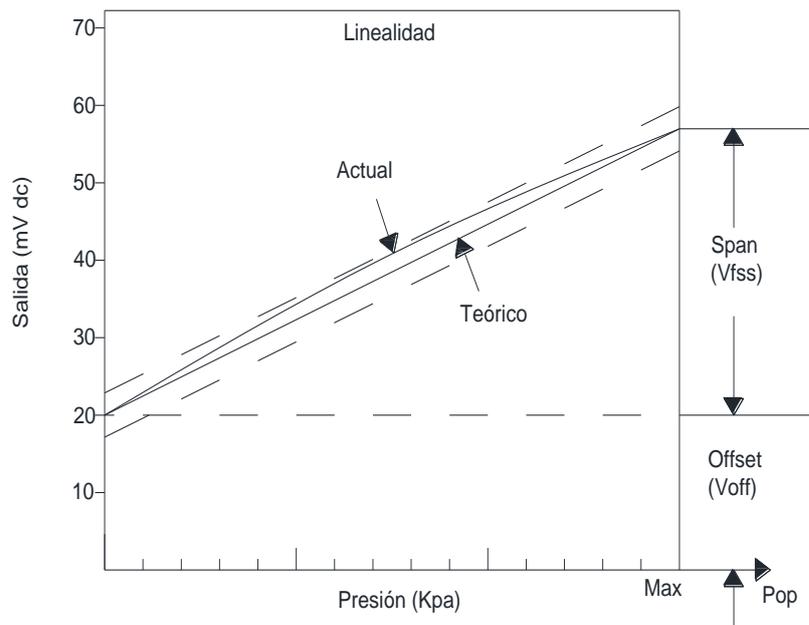


Ilustración 143 “Gráfica presión- señal de salida”

Una de las funciones del transductor es linealizar la curva de la señal generada por el sensor.

El rango, del que ya habíamos hablado es una zona entre cuyos límites una cantidad se mide, recibe o transmite.

El rango está caracterizado por un límite inferior y uno superior, o sea tomamos el 0%  $\rightarrow$  200 % y tenemos 3 psi  $\rightarrow$  15 psi,  $\delta$  4 mAdc  $\rightarrow$  20 mAdc.

La diferencia algebraica entre el rango superior y el rango inferior es el alcance.

En esta figura podemos ver que la respuesta no es lineal, sino una curva, y se ve que hay una histéresis o sea una desviación entre el ascenso y el descenso.

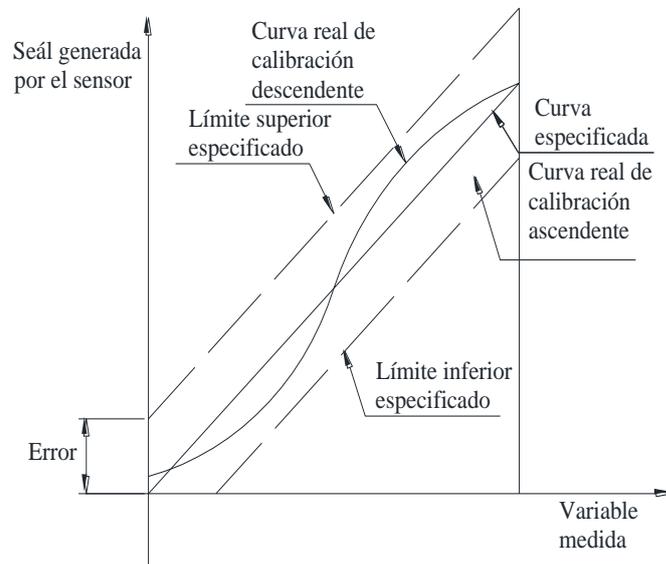


Ilustración 144 “Gráfica Variable medida- señal de salida”

Hemos hablado que existe una relación entre la variable de entrada y la de salida del transmisor, tratamos de que esta relación sea lineal, y encontramos una serie de parámetros que definen la calidad con que el transmisor cumple esta función y son:

- La exactitud.
- La rangeabilidad (Rangeability)
- Temperatura ambiente
- El turndown.

### La exactitud

La exactitud se puede expresar en términos de porcentaje de la variable medida, porcentaje del alcance, o porcentaje del límite superior del rango.

Veamos esto con un ejemplo:

Supongamos que estamos midiendo un caudal con un caudalímetro que tiene un rango inferior de 100m<sup>3</sup>/h y un rango superior de 1000 m<sup>3</sup>/h; el caudal que medimos es de 250 m<sup>3</sup>/h y en otro momento de 750 m<sup>3</sup>/h. La exactitud de nuestro caudalímetro es de 1%.

De acuerdo a esto las mediciones pueden ser de 250 m<sup>3</sup>/h  $\pm$ 2,5 m<sup>3</sup>/h si el error relativo es referido al valor medido (variable medida), 250 m<sup>3</sup>/h  $\pm$ 9 m<sup>3</sup>/h si el error es expresado como porcentaje del alcance; y de 250 m<sup>3</sup>/h  $\pm$ 10 m<sup>3</sup>/h si el error esta expresado como porcentaje del límite superior del rango.

Lo mismo sucede en la medición de 750 m<sup>3</sup>/h.

Los resultados se resumen en la tabla N°1.

Primera medición				Segunda medición			
Valor m <sup>3</sup> /h	Error como porcentaje de			Valor m <sup>3</sup> /h	Error como porcentaje de		
	Variable	Alcance	Limite Sup.		Variable	Alcance	Limite Sup.
250	$\pm$ 2,5	$\pm$ 9	$\pm$ 10	750	$\pm$ 7,5	$\pm$ 9	$\pm$ 10

*Tabla 1*

En general la exactitud de un transmisor se especifica como porcentaje del Alcance.

En un transmisor de uso común en una planta industrial los valores de exactitud son del orden de 0,2% al 0,5%.

### **Rangeabilidad**

Los transmisores no cumplen con una exactitud especificada en todo su rango es decir desde el 0% al 100% del alcance. Contrariamente dicha exactitud es cumplida entre el límite superior

del rango y un límite inferior determinado, que es superior al límite inferior del rango por ejemplo un transmisor podría cumplir una especificación entre el 10% y el 100% de su alcance.

La relación entre el 100% del alcance y el porcentaje del alcance por debajo del cual el transmisor no cumple con la especificación de exactitud, se conoce como Rangeabilidad (rangeability).

En el ejemplo dado la Rangeabilidad es  $100\%/10\%=10/1$ . Un transmisor convencional tiene una Rangeabilidad de  $6/1$   $10/1$ .

### **Temperatura ambiente**

Las condiciones extremas pueden variar la respuesta de un transmisor.

Se puede apreciar que, si a un transmisor le inyectamos una entrada constante, al variar la temperatura ambiente, la salida variara, esto lo conocemos como efecto de la temperatura ambiente, y es un porcentaje por grado centígrado, por ejemplo  $0,05\%/^{\circ}\text{C}$ , en la exactitud, por ejemplo: si  $T1= 35^{\circ}\text{C}$  de día y  $T2$  es igual a  $15^{\circ}\text{C}$  de noche la diferencia de temperatura será de  $20^{\circ}\text{C}$  lo que producirá un error entre las dos temperaturas de:

$$20^{\circ}\text{C} \cdot 0,05 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} = 1\%$$

### **Turndown**

En los transmisores de alcance ajustable, es lo que definimos como la relación entre el máximo valor y el mínimo valor que puede tomar el alcance.

Un transmisor con un Turndown auto, se puede usar para variadas aplicaciones, reduciendo la cantidad de modelos de transmisores con distintos sensores que se necesitan en una planta industrial.

## **Transmisores inteligentes**

Son los transmisores basados en microprocesador.

El primero en su tipo que fue presentado, lo hizo la firma Honey Well en el año 1983, aunque a un precio muy elevado que lo hacía casi inaccesible excepto para usos muy especiales.

Con el tiempo se fue abaratando y sus mejores prestaciones lo hicieron entrar en innumerables industrias.

### **Características de un transmisor inteligente**

1. Se incluye un transductor a base de microprocesador con electrónica digital.
2. Se debe poder modificar su rango, tanto superior como inferior, sin tener que desmontarla y sin tener que recalibrarlo.
3. Podrá ser utilizado como FUENTE DE SEÑAL de 4 a 20 mAdc. en lazos e instrumentos de corriente.
4. Se puede hacer un chequeo continuo de sus componentes.
5. Se lo puede configurar por software
6. Contiene en su memoria una base de datos.
7. Este transmisor se comunica digitalmente con el sistema de control.

a) Veamos una descripción de un transmisor inteligente de presión con sensor analógico

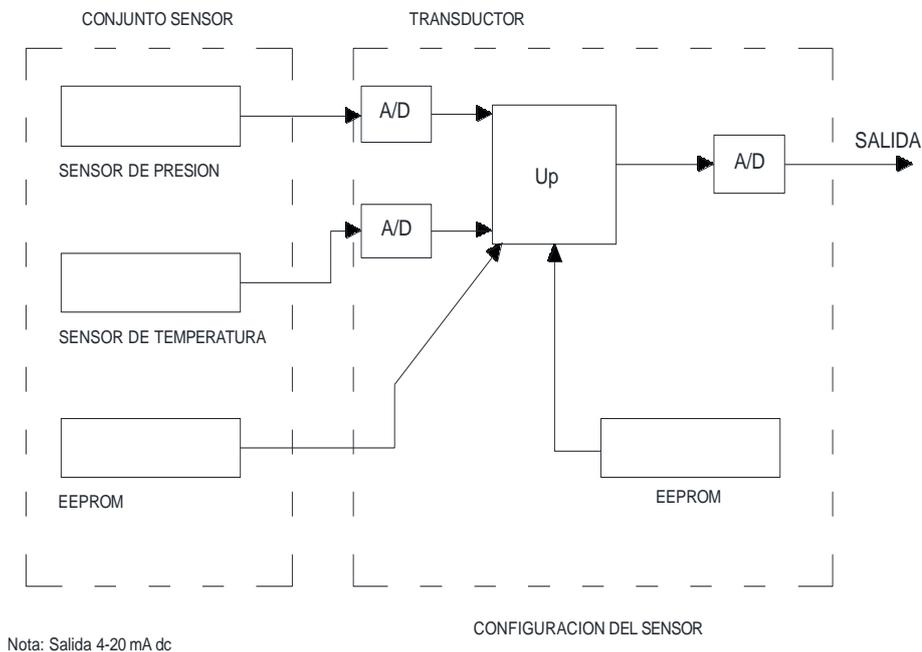


Ilustración 145 “*Transmisores inteligentes*”

- Sensor de presión (analógico): se traduce con un conversor analógico – digital.
- Sensor de temperatura: (Para compensar la temperatura ambiente que afecta el comportamiento del Transmisor)
- Memoria EEPROM: está en el sensor para almacenar su tabla de caracterización.

Es importante destacar que cuanta menos cantidad de conversores haya, habrá menos cantidad de errores acumulados, si fuera sensor digital salida digital al sistema de control y los errores serían menores.

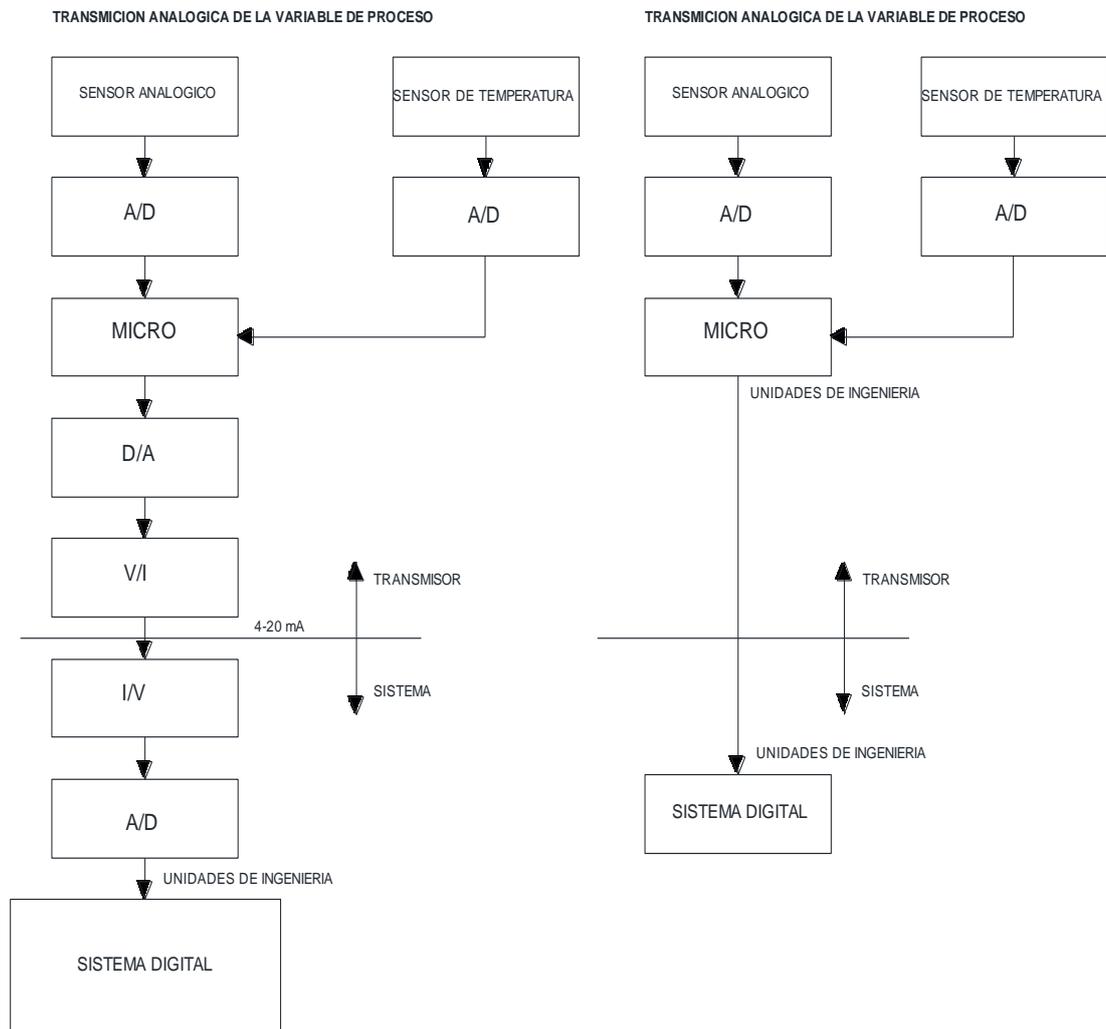


Ilustración 146 "Diagrama de flujo Transmisor inteligente"

Podemos observar una menor cantidad de operaciones (conversiones) en el digital respecto del analógico, lo que resulta en un menor error del conjunto transmisor – sistema de control.

b) Modificación del rango:

Los transmisores sean los convencionales de siempre o los inteligentes deben ser calibrados al rango deseado. En el transmisor inteligente si puede variar el rango sin llevarlo al laboratorio,

se lo hace en el lugar donde está montado, mediante el re-rango, que consista en variar el valor dentro del transmisor.

Esto es una ventaja desde el punto de vista operativo

c) Fuente de señal: 4 a 20 mAdc

Se lo puede utilizar al transmisor como fuente de señal de 4 a 20 mAdc. En un transmisor convencional, se debe apuntar una fuente para el chequeo y generación de la seña; en el inteligente se indica al transmisor la salida que se desea y se ingresa con ella a los  $\neq$  instrumentos de panel, registradores, etc.

d) Chequeo continuo de sus componentes:

Los transmisores inteligentes son capaces de identificar una FALLA y comunicar esta situación al sistema.

Por ejemplo: en un transmisor de temperatura con un sensor a termorresistencia o termocuplas, si éstas fallaran el transmisor enviará una señal comunicando esto. Suelen tener 2 RTD O 2 termopares, para que una actúe como respaldo de la otra

Se pueden encontrar entre otros, los siguientes mensajes:

- Error de configuración
- Falla de comunicaciones
- Falla del sensor principal

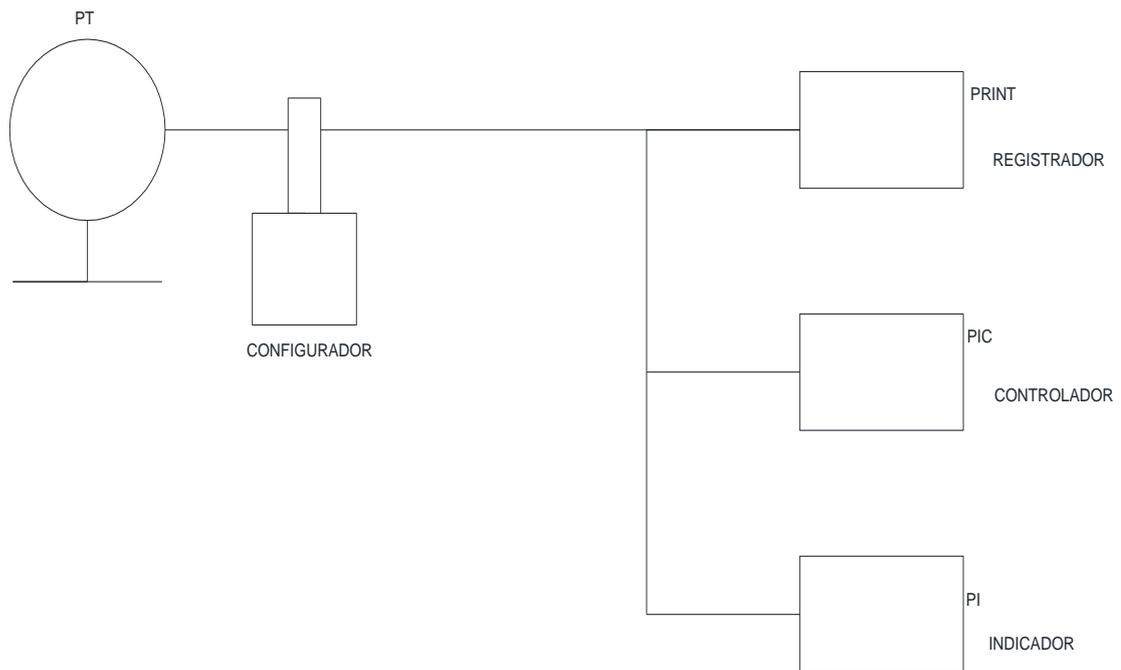


Ilustración 147 “*Transmisor inteligente-chequeo de componente*”

- Con el configurador se indica al transmisor que la señal de salida debe ir al 80% del rango.
- El transmisor fija su salida en 80% del rango (16,8mA) esto es independiente de la variable de proceso.
- Se verifica que todos los instrumentos conectados señalan el 80%
- Se envía un mensaje al transmisor indicándole que terminó la verificación del LAZO, el transmisor da salida en función de la variable de proceso.

e) Configuración por SOFTWARE:

- En un transmisor Inteligente los límites de rango, se pueden configurar desde el sistema de control.
- En el caso de transmisores de presión diferencial (caudales) se puede extraer la raíz cuadrada.

- En transmisiones de temperatura se puede seleccionar la curva de compensación a utilizar para obtener una señal proporcional a la temperatura: RTD, Pt100, termocuplas: J, K, R,S,etc.
- La información de la configuración es almacenada en una memoria no volátil del transmisor.

f) El transmisor contiene una base de datos en su memoria

- Tiene como ya hemos hablado:
- Límites superior e inferior de RANGO.
- Extracción de Raíz cuadrada
- Salida digital o analógica.
- Identificación del instrumento.
- Función del transmisor
- Modelo y número de serie del transmisor
- Aplicación del transmisor
- Ubicación en planta del transmisor
- Última fecha de calibración.
- Nombre del instrumentista que lo calibró

g) El Transmisor se comunica con el controlador por medio de una señal de 4 – 20 mA.d.c, esto es porque los sistemas son analógicos.

Pero también el transmisor se comunica digitalmente con el sistema de control, esto se lleva a cabo mediante un protocolo de comunicaciones. Este protocolo permite la transmisión de la variable de proceso, como así también la transmisión de las demás variables del transmisor y su configuración.

## **Conclusión**

Los instrumentos industriales de medición de presión son una parte muy importante para las industrias de proceso en general de hoy en día.

Tienen su campo de aplicación que es amplio y abarca desde valores muy bajos (vacío) hasta presiones muy altas. Los instrumentos de presión se dividen en tres grupos: Mecánicos, Neumáticos, Electromecánicos Electrónicos.

Los Mecánicos se dividen en dos grupos: Los Elementos primarios de Medida Directa que mide la presión comparándola con la ejercida por un líquido, densidad y altura conocida, el desplazamiento puede indicarse por un sistema de flotador y palanca indicadora y mueve un indicador de una escala.

Los Elementos primarios Elásticos miden la presión cuando en su parte interior tiende a enderezarse y el movimiento transmitido a la aguja indicadora por un sector dentado y un piñón.

Los Elementos Neumáticos, la función de medida queda establecido por su campo de medida del elemento. Utilizará componentes de elementos mecánicos consiste un transmisor de equilibrio de fuerzas de tubo Bourdon mientras que uno de 3-15 psi será de equilibrio de movimientos con elementos de fuelle.

Los Elementos Electromecánicos-Electrónicos, utiliza elementos mecánicos Elásticos combinado con un traductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente.

El Electrónico ocupa los mismos componentes que el Electromecánico su medición ejerce una fuerza sobre una barra rígida del transmisor, la señal pasa a un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de presiones de proceso.

## **CAPITULO 7**

### **Controladores lógicos programables PLC**

#### **Antecedentes**

Como es sabido, el autómeta nació como un paso adelante de los antiguos automatismos basados en relés. Incluso los primeros lenguajes de programación estaban basados en el simbolismo de contactos. No obstante, esta idea se quedó corta para expresar todo su potencial de operaciones lógicas combinacionales y secuenciales y aritméticas que son capaces de ejecutar cualquier autómeta. Si tenemos en cuenta que se define automatización, como el proceso productivo que tiene como consecuencia la liberación física y mental del hombre de dicha labor, y el progreso que han sufrido las instalaciones industriales en su automatización y control desde la aparición de los PLC's en el mercado; nos daremos cuenta la importancia e influencia que este campo tiene en la mejora de la producción y por tanto en la economía de una empresa actualmente. Todo ello conlleva a una demanda de técnicos formados en este campo y una formación continuada de éstos, por los constantes cambios (en PLC's, redes de comunicación, etc.) existentes.

Todo proceso industrial se compone de secuencias de acciones que deben ser controladas. En los procesos sencillos, un operario es el que se encarga de este control y de vigilar la marcha correcta del sistema, pero en la mayoría de las ocasiones, esto no es posible debido al tamaño del proceso.

La mejor opción para el control de procesos industriales es el empleo de autómetas programables. Estos aparatos se basan en el empleo de un microprocesador para el manejo de las entradas y salidas. La memoria del aparato contendrá tanto el programa de usuario que le

introduzcamos como el sistema operativo que permite ejecutar secuencialmente las instrucciones del programa.

Así pues, hoy en día, en las industrias, todos los procesos de producción tienden a estar controlados mediante sistemas automatizados. Esta tendencia puede llegar a ocasionar, en casos de gran cantidad de estaciones de producción, problemas de coordinación y sincronismo entre las diferentes máquinas que intervienen en el proceso. Para solventar este problema actualmente se utilizan sistemas de control que permiten un rápido intercambio de información entre ellos. Dentro de este sector, los automatismos que más se ajustan a estas especificaciones son los Automatas Programables o PLC's, y el sistema que permite el flujo de información entre ellos es el Bus de Comunicaciones.

Un controlador lógico programable es un dispositivo digital utilizado para el control de máquinas y operaciones de procesos. Se trata de una plaqueta electrónica con una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones, permitiendo la implementación de funciones específicas como ser: lógicas, secuencias, temporizados, conteos, aritméticas, etc. con el objeto de controlar dichas máquinas y procesos.

El controlador lógico programable es utilizado en donde se requiera control de procesos secuenciales. Puede ser utilizado también donde se implemente un control regulatorio sencillo. Puede utilizarse en envasadoras, inyectoras, hornos, secaderos, seguridad, transporte de materiales, etc.

El controlador lógico programable es el primer equipo digital de aplicación independiente de la computadora. Pero pueden trabajar en forma complementaria.

## **Opciones para la automatización**

Para automatizar el proceso podemos utilizar cualquier sistema que nos permita actuar sobre las salidas. Hoy en día los sistemas de control existentes son los siguientes:

### **Lógica cableada o electromecánica**

La lógica cableada fue la primera que se utilizó, consiste en interconectar relés con los elementos de entrada y salida a fin de, a partir de conexiones en serie y en paralelo de elementos, al fin obtener el automatismo deseado.

Este tipo de automatismo tiene el inconveniente del gran volumen ocupado por el automatismo, además su modificación pasa por desmontar una buena parte y cablearlo de nuevo. Además, a causa de la presencia de contactos móviles, necesitan un mantenimiento importante.

En caso de automatismos sencillos esta solución continúa teniendo ventajas, ya que la lógica cableada no requiere forzosamente un cambio de los niveles de tensión entre el automatismo y los elementos a controlar.

### **Lógica neumática**

Se basa en utilizar aire comprimido y diferentes tipos de elementos: válvulas distribuidoras, detectores, pulsadores y pilotos neumáticos, válvulas biestables, etc.

Tiene la ventaja de que no se ve afectada por las interferencias electromagnéticas, pero necesita mucho espacio, crea un ruido importante, necesita mantenimiento elevado y obliga a realizar grandes modificaciones en el caso de cambio de proceso.

### **Lógica estática discreta**

Apareció con los transistores. Corresponde al montaje de circuitos con resistencias, transistores y diodos a fin de controlar los automatismos.

Este modo tiene el inconveniente que hace falta un cambio de niveles de tensión entre la potencia y la lógica, pero significa una gran reducción de volumen. Este sistema también reduce los problemas, ya que no hay ningún contacto móvil que se pueda desgastar, permitiendo también una más grande velocidad de respuesta.

### **Lógica estática integrada**

Nació con la aparición de los circuitos integrados, de modo que permite una más grande reducción del volumen respecto a la lógica estática discreta.

Existen en el mercado circuitos integrados con las principales funciones: puertas lógicas, biestables, contadores, etc.

Este sistema, igual que su predecesor, presenta dos inconvenientes importantes. Por un lado, la necesidad de un cambio de niveles de tensión; y por otro, la imposibilidad de modificación. En caso de necesidad de realizar un cambio en el automatismo se debe tirar el circuito impreso y realizar uno de nuevo.

### **Lógica estable programada**

Este sistema utiliza sistemas basados en microprocesadores, que permiten reducir más el circuito electrónico y que son programables, de este modo la modificación de las relaciones lógicas es relativamente sencilla.

Aunque continúa presentando el inconveniente de la dificultad de modificación, ya que, si es necesario añadir una entrada o salida adicional, implicará confeccionar un nuevo circuito impreso.

## **Ordenador de proceso**

Como mejora de los sistemas basados en microprocesadores, aparece el ordenador de proceso; parecido al ordenador de gestión, pero preparado para funcionar en ambiente industrial y equipado con entradas y salidas. Presenta la ventaja de estar capacitado para realizar cálculos complejos.

Tiene un inconveniente importante derivado de la necesidad de personal informático, pero con conocimientos de automatización industrial y del proceso que se quiere automatizar para su programación.

## **Autómata programable industrial**

Delante la problemática del ordenador de proceso, han aparecido los autómatas programables o PLC's. Pueden realizar prácticamente todas las funciones que nos presenta el ordenador basado en la industria, pero de modo que la programación y el mantenimiento son posibles sin una formación informática del personal. La inmensa mayoría de equipos permiten una programación a base de reproducir un diagrama de relés.

De todo este seguido de opciones, si queremos conseguir una planta donde el control sea de reducido formato, con posibilidades de fácil modificación del proceso y con fácil programación y mantenimiento, queda claro que la opción más favorable hoy por hoy es el autómata programable.

El hecho de escoger el autómata programable nos da una serie de ventajas tales como:

- Menor tiempo utilizado en la elaboración de proyectos
- Posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado ni insertar aparatos.
- Mínimo espacio de ocupación.
- Menor coste de mano de obra de instalación.

- Economía de mantenimiento, además de aumentar la fiabilidad del sistema, en eliminar contactos móviles, los mismos autómatas pueden detectar e indicar averías.
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con el mismo PLC.
- Menor tiempo para la puesta en funcionamiento del proceso al quedar reducido el tiempo de cableado.
- Facilidad de realizar comprobaciones.
- Memorización de los datos.
- Posibilidad de representación de gráficos (mediante sistema SCADA).

## **Estructura**

Para interpretar la estructura de un PLC utilizaremos un diagrama sencillo en bloques. En la figura se muestran las tres partes fundamentales, las entradas, la CPU o unidad de procesos y las salidas.

Lo más importantes es la CPU, ya que es el cerebro del PLC, es la unidad donde se procesa el programa desarrollado por el usuario. Puede estar compuesto por uno o varios microprocesadores, un buen banco de memoria, los puertos de comunicación y la fuente de alimentación.

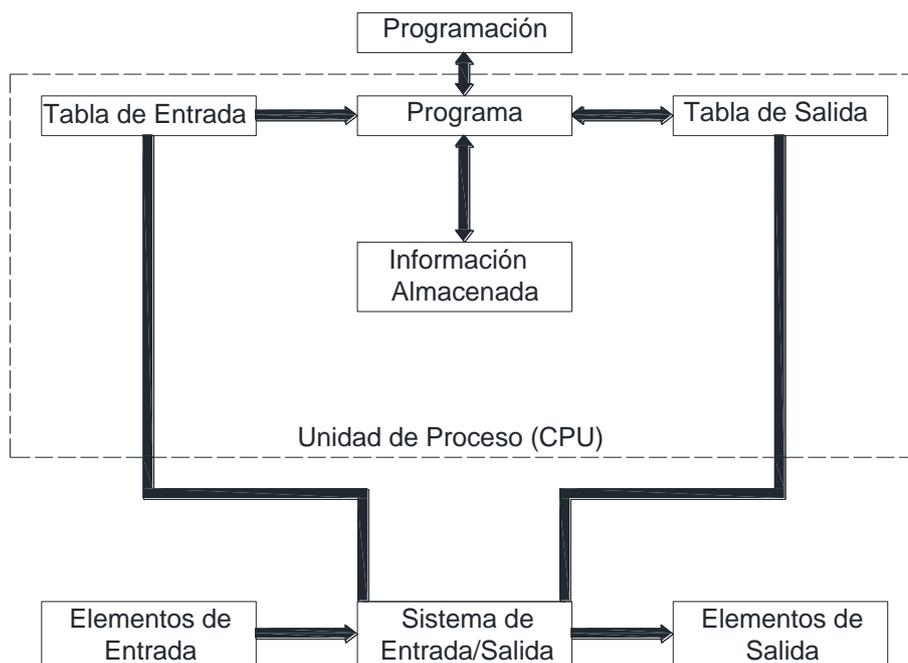


Ilustración 148 “Diagrama de bloque del plc”

Las entradas (o interfaces) son las que se encargan de adaptar las señales provenientes de campos, planta o niveles que la CPU puede interpretar como información. Las señales de campo o planta pueden implementar niveles de señales diferentes a las que pueda interpretar la CPU.

- Las salidas (o interfaces) son las señales en función de la información que envía la CPU y que comandan los distintos dispositivos en campo o planta.
- La CPU se comunica con las interfaces mediante un bus o puerto paralelo

A las entradas se conectan sensores que pueden ser: pulsadores, llaves, termostatos, presostatos, humidistatos, limitadores de carrera, sensores de distancia, otros sensores que generan señales binarias.

Las salidas comandan distintos equipos como ser: lámparas, sirenas, contactos de motores, válvulas, y otros comandados por señales binarias.

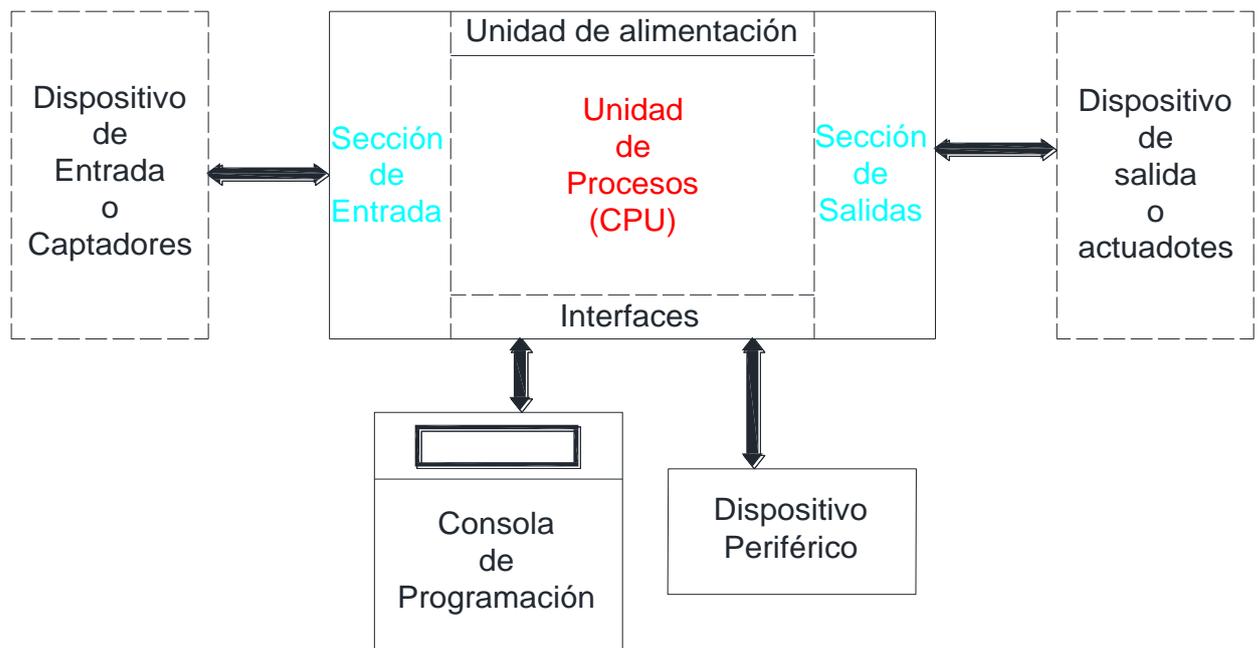


Ilustración 149 “Estructura del PLC”

## Clasificación

Se puede establecer una clasificación de los PLC según distintos aspectos:

- Por su construcción
- Por su capacidad
- Por su cantidad de entradas/salidas

Por su construcción:

Se denomina PLC integral a aquel que tiene todas sus partes en una misma caja o gabinete. Se los conoce también como compactos. Son de pequeño tamaño y bajo costo suelen tener muy baja cantidad de E/S. Son difíciles de modificar para conseguir una mejor prestación.

Se denomina PLC modular a aquel que tiene una estructura en módulos. El equipo se arma sobre un bastidor o (rack) donde se instala la CPU, los módulos de entradas, módulos de salidas, fuente de alimentación y otros periféricos. Los chasis son los que contienen los buses apropiados donde se conectan los módulos. Los módulos se conocen como tarjetas, semejantes

a las de las PC. La principal ventaja es que el usuario puede componer su equipo como más lo necesite, y su gran capacidad de programación. Su principal desventaja es su costo para prestaciones pequeñas.

#### Por su capacidad:

La clasificación de los PLC por su capacidad de procesamiento distingue dos niveles de acuerdo a las instrucciones que pueda manejar. Se refiere a Nivel 1 cuando procesa instrucciones sencillas o no muy potentes, y Nivel 2 cuando procesa instrucciones de mayor complejidad.

Las principales operaciones que soporta un Nivel 2 son: extracción de raíz cuadrada, logaritmos, antilogaritmos, punto flotante, trigonométricas, diferenciación e integración, lazos PID, etc.

#### Por su cantidad de E/S:

Podría decirse que los PLC se clasifican como de Nivel 1 asociado a la poca cantidad de E/S e integrales, con un bajo comportamiento en cuanto a procesamiento de datos.

Y podría decirse que los PLC que tienen una gran cantidad de E/S son de Nivel 2 dado que se desempeñan con un mejor procesador de mayor velocidad y con mayor capacidad de operaciones aritméticas.

## **Entradas y Salidas**

Las entradas y salidas con los elementos del PLC que enlazan a la planta con el controlador.

Las entradas adaptan las señales de los sensores (termostatos, nivel, presostatos, etc.) del campo para que la CPU las lea. Las salidas son las respuestas de la CPU que se adaptan para activar

un circuito de conexión a los elementos de acción final en la planta (válvulas, bombas, alarmas, etc)

En la mayoría de los casos las señales deben acondicionarse para que la CPU las pueda interpretar, por lo que es necesario generalmente utilizar transductores de neumáticos a eléctricos, de eléctricos a digitales, de digitales a eléctricos, y de eléctricos a neumáticos. También se utilizan multiplexores para el transporte de las señales.

Las señales más comúnmente utilizadas son las analógicas y las digitales o discretas.

Las analógicas pueden tomar una cantidad de valores intermedios dentro de un cierto límite. Por ejemplo, de 4 a 20 mA, 0 a 10 V o de 3 a 15 psi.

Las digitales o discretas solo pueden tomar dos valores o dos estados 0 y 1.

También suelen ser identificadas como lógicas, binarias u on-off.

#### Entradas digitales:

Los fabricantes ofrecen una gran variedad de alternativas. Hay módulos de distinta cantidad de entradas y distintas cantidades de tensiones 5 Vcc, 24 V 110 V y 220 V.

La estructura de una entrada puede pasar por varios estados hasta convertirse en un 0 o un 1 y sea leído por la CPU.

Las señales de planta pasan por la siguiente estructura: un rectificador, un acondicionador, un indicador de estado, aislación y un circuito lógico de entrada, Ilustración 151.

El paso de la señal por toda la estructura implica un tiempo que se conoce como de respuesta de entrada y debe ser tenido en cuenta en el diseño del sistema.

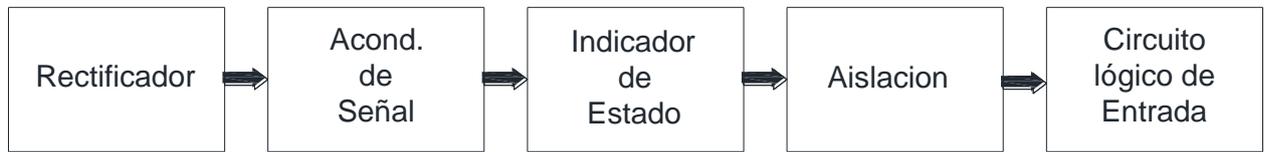


Ilustración 150 “Diagrama en bloque de las señales de entradas digitales”

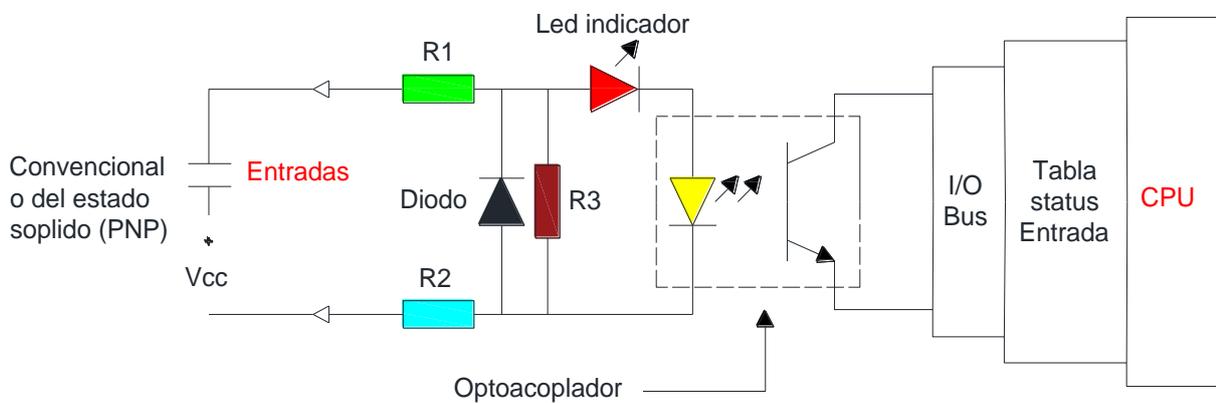


Ilustración 151 “Esquema simplificado de un circuito de entrada digital”

Salidas digitales:

las señales de salida de la CPU que van a planta pasan por la siguiente estructura: un circuito lógico de salida, aislación, indicador de estado, circuito de conexión y protección.

Igual que a la entrada, el tiempo de respuesta de salida es el que insume una señal que pasa por toda la estructura.

Tipo	Voltaje Max.	Corriente Max.
Relé	250 Vca	1 A
Transistor NPN	12 Vcc	50 mA

Transistor NPN aislado	30 Vcc	1 A
Transistor PNP aislado	30 Vcc	100 mA
TRIAC	250 Vca	1 A

Tabla 2 – Tipo de entradas mas comunes

Entradas analógicas:

Un PLC fue originalmente diseñado con tecnología digital para el control de estados lógicos. Por lo que, para trabajar con señales analógicas, es que estas se representan por medio de números en formato binario.

Una tarjeta de entrada analógica tiene como principal función, la de convertir una señal analógica en un valor binario por medio de un conversor A/D.-

Generalmente el conversor A/D se especifica indicando su resolución en bits, expresando así el menor cambio de tensión que tiene capacidad de distinguir. La exactitud de la tarjeta debe ser especificada por separado, normalmente como porcentaje de alcance.

El componente más caro de una entrada analógica es el conversor A/D, y este resulta más caro cuanto mayor resolución tiene. Los PLC integrales trabajan con conversores de 8 bits, mientras que los modulares trabajan con conversores de 16 o más bits.

Generalmente se trabaja con un solo conversor A/D para todas las señales del campo que entran al módulo, de a una por vez y se almacenan en una memoria buffer en el mismo módulo desde donde la CPU los lee y procesa.

Las señales de planta vienen por canales distintos y se utilizan un circuito llamado multiplexor que selecciona un canal por vez y lo envía al conversor A/D.-

La estructura de una entrada analógica se puede conformar como sigue: protección, filtro analógico, multiplexado, conversor a/d, aislación y buffer.

Las señales de entrada pueden ser por intensidad o por tensión. Los valores más comunes son 4 a 20 mAcc, de 1 a 5 Vcc, -5 Vcc, -10 a + Vcc, -15 a + Vcc

Salidas Analógicas:

La identificación de las salidas se realiza igual que en las entradas, OUTPUT o SALIDA; incluye un indicador luminoso LED de activado.

Las analógicas se basan en la conversión del código binario a señal analógica mediante un convertidor digital - analógico (D/A).

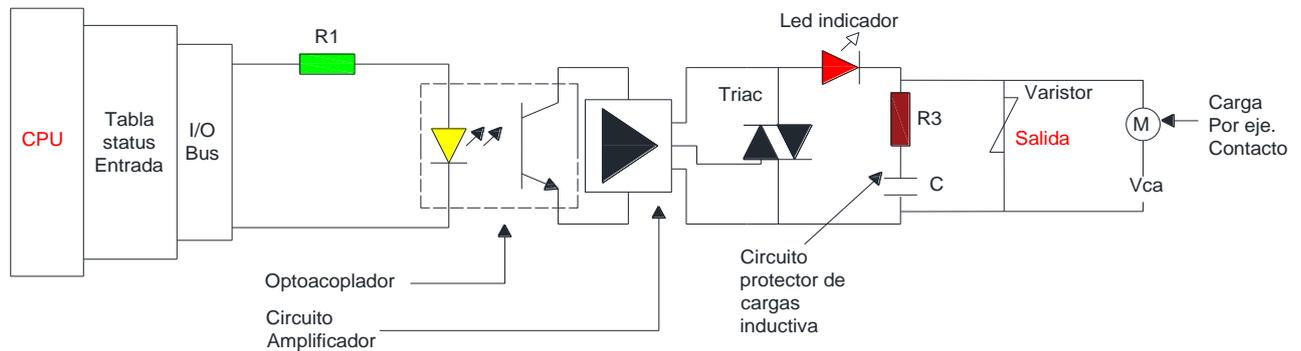


Ilustración 152 “Esquema simplificado de un circuito de salida digital”

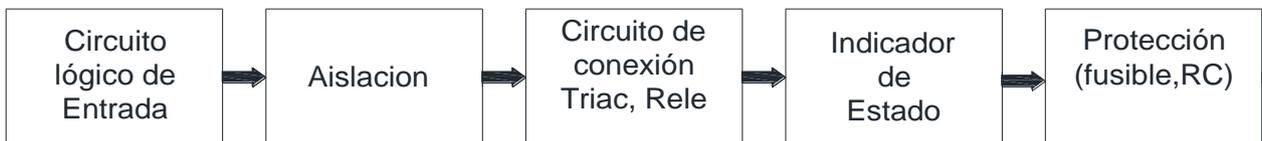


Ilustración 153 “Diagrama en bloque de las señales de salida digitales”

## **La CPU de un PLC**

Está compuesta de dos partes: El procesador y la Memoria.

El procesador:

Tiene como tarea principal la de ejecutar el programa de aplicación escrito por el programador usuario, también administra las tareas de comunicaciones.

Los PLC más sencillos poseen un solo procesador, pero los más complejos poseen varios dedicados a tareas específicas.

El procesador trabaja con un programa escrito por el fabricante y es almacenado en una memoria ROM, inaccesible al usuario, es su sistema operativo. Las tareas asignadas al procesador son ejecutadas por éste en forma secuencial y permanente mientras el equipo esté encendido. Esto generalmente es conocido como scan o barrido (Ilustración 154). En forma permanente el procesador consulta las señales de entradas, las carga en memoria, resuelve los programas de aplicación, se comunica con los módulos inteligentes e independientes, carga en memoria los resultados de los algoritmos, comunica los resultados a las salidas, comunica los mensajes o alarmas establecidos, ejecuta un autodiagnóstico, se reajusta y recomienza el ciclo.

El tiempo que tarda el procesador para realizar un ciclo completo, es denominado tiempo de barrido o tiempo de scan y se mide en milisegundos por Kbites de programa.

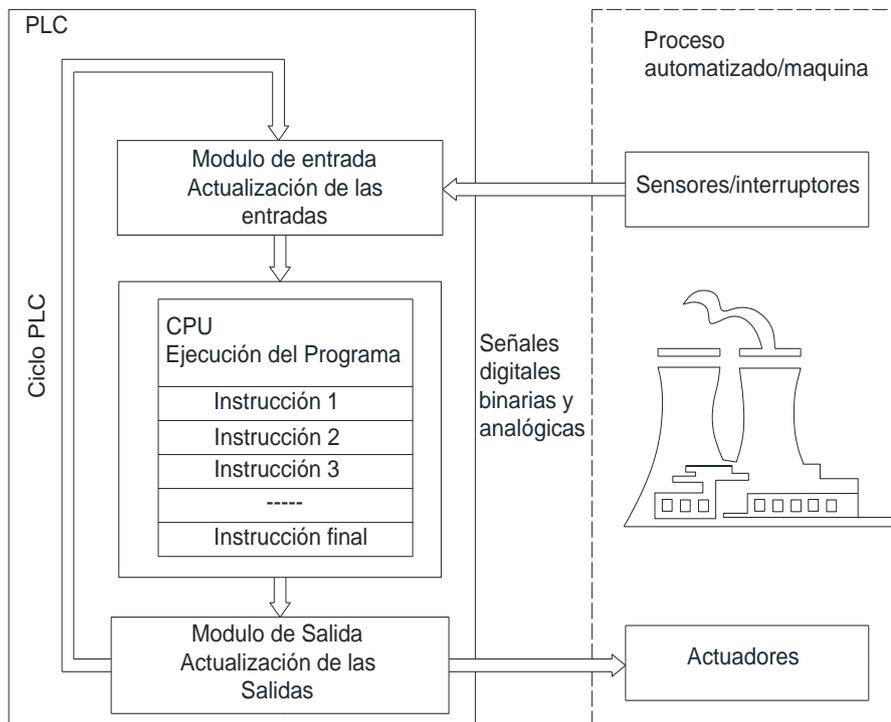


Ilustración 155 “Funcionamiento del Ciclo de un PLC”

## Memoria

Todos los datos que el PLC maneja, su sistema operativo, programa, tablas, entradas y salidas, parámetros de autoajuste, mensajes, etc. se almacenan en memoria. Los fabricantes generalmente especifican la memoria disponible para los programas, los mensajes y los datos. Los sistemas operativos se radican en memorias (ROM) que no están accesibles al usuario en general, y deben resguardar el funcionamiento del PLC. Los programas de aplicaciones o algoritmos de cálculos se almacenan en una memoria (RAM) de acceso directo al programador. Los datos de entradas y/o salidas se almacenan en memoria fija o móvil según el caso al igual que los mensajes o indicaciones.

Tipo de Memoria	Sistema de Programación	Sistema de Borrado	Ante el corte de tensión la memoria
RAM (o memoria de solo lectura-escritura)	Eléctrica	Eléctrica	Se pierde, es volátil
ROM (o memoria de solo lectura)	Durante su proceso de fabricación	Es imposible su borrado	Se mantiene
PROM (o memoria programable )	Eléctrica	Es imposible su borrado	Se mantiene
EPROM (o memoria modificable)	Eléctrica	Por Rayos UV	Se mantiene
EEPROM (o memoria modificable)	Eléctrica	Eléctrica	Se mantiene

Tabla 3 “Tipos de memorias”

## Instrucciones y Programas

Programa: es una secuencia de funciones introducidas en el Controlador a ser ejecutadas por la CPU con el propósito de controlar una máquina o un proceso.

Instrucción u orden de trabajo: es la parte más pequeña de un programa y consta de dos partes principales: operación y operando; a su vez el operando está dividido en símbolo y parámetro.

<b>Instrucción</b>		
Operación Que?	Operación Donde ?	
	Símbolo	Parámetro

Tabla 4 “Parte de la instrucción”

<b>Instrucción</b>		
Operación "NC"	Operación Donde ?	
	%I	O.O

Tabla 5 “Parte de la instrucción del interruptor normalmente cerrado”

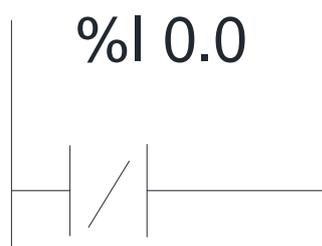


Ilustración 156 “Instrucción interruptor normalmente cerrado”

### Ejecución de programas

En función de cómo se efectúe la ejecución o barrido del programa, se distinguen los siguientes sistemas:

Ejecución lineal: cuando el ciclo de barrido de la memoria del usuario se realiza línea tras línea, sin alterar el orden.

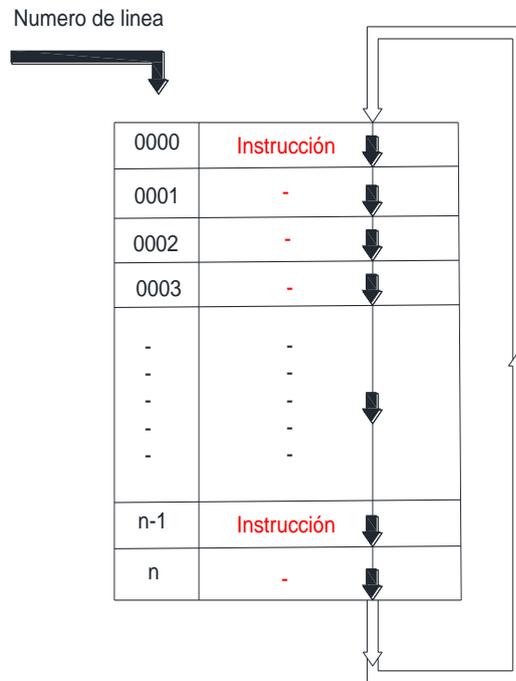


Ilustración 157 “Ejecución del programa”

Salto condicional: cuando el ciclo de ejecución de un programa tiene la posibilidad de alterar la secuencia lineal y dar un salto a otras líneas de programa, dejando un número de líneas sin ejecutar.

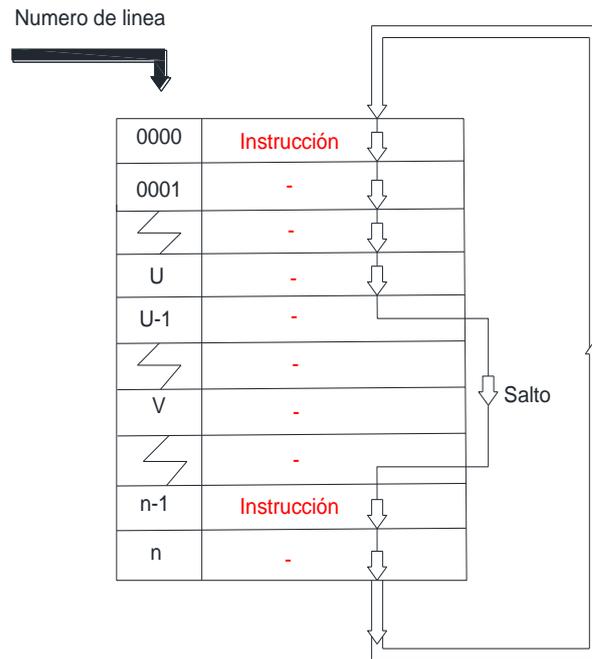


Ilustración 158 “Representación salto condicional”

Si al llegar a la instrucción U, se cumple la condición en ella indicada, se salta a V continuando el barrido en V+1 hasta n. Si por el contrario al llegar a U no se cumple la condición, el programa se ejecuta linealmente continuando en U+1.

Salto a subrutina: En algunas ocasiones ocurre que en un programa hay uno o más grupos de secuencias de instrucciones idénticas que se repiten y que habrá que reescribir tantas veces como éstas se repitan en dicho programa principal. En estos casos, es muy útil escribir una sola vez esta secuencia o subrutina, e ir a ella cuando se requiera.

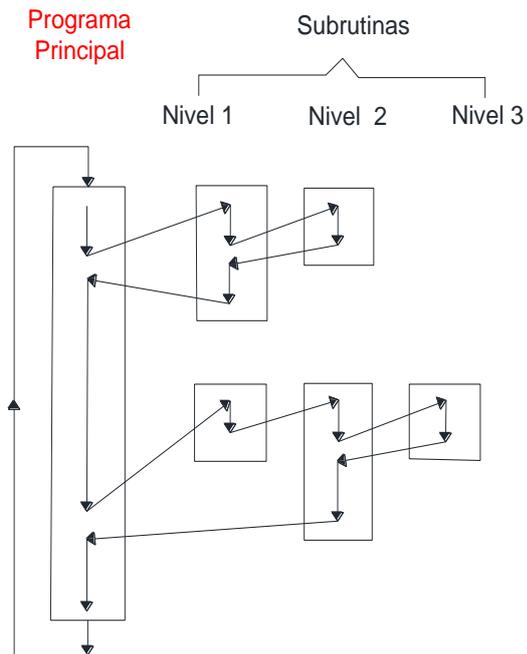


Ilustración 159 “Salto de Rutina”

## Controlador programable

### Twido - Schneider Electric

- El PLC Twido está diseñado para instalaciones pequeñas y medianas.
- Cubre aplicaciones estándares alcanzando de 10 a 100 E/S (con un máximo de 264 E/S).
- Disponible en versiones compactas y modular.
- Software de programación gratuito.



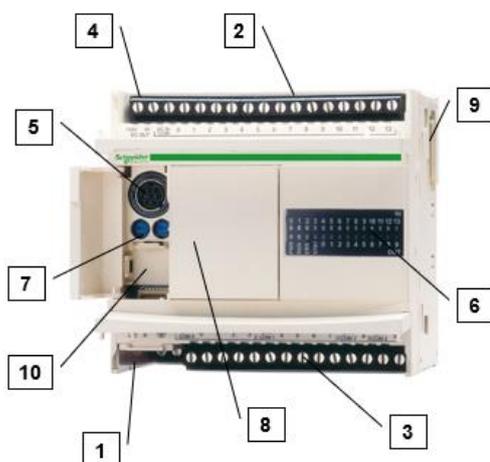
Ilustración 160 “Controlador TWIDO–Gentileza SCHNEIDER”

### Controlador Twido compacto

- Automata Programable Todo en Uno: Fuente alimentación para sensores + procesador + E/S + HMI (opcional)

### Características:

- Alimentación AC (100...240 VAC) o DC (19.2...30 VDC)
- E/S: 10, 16, 24 o 40 E/S
- Salidas tipo relé (2 salidas a transistor en modelos de 40 E/S)
- Hasta 264 E/S digitales usando módulos de expansión
- Ajuste analógico (1 o 2 potenciómetros)
- Posibilidad de visualización



1	Alimentación de 110/240 VAC o 24VDC
2	Terminales de Entrada
3	Terminales de salida
4	Fuente de 24 VDC para sensores
5	Puerto #1 comunicaciones y programación (mini DIN)
6	Bloque de LEDs (estado y E/S)
7	Potenciómetros analógicos
8	Ranura para HMI
9	Conector para expansión
10	Conector para puerto #2
	Puerto Ethernet (TWDLCAE40DRF)
	Batería externa

Ilustración 161“Controlador TWIDO Compacto–Gentileza SCHNEIDER (Schneider, 2007)”

## Controlador Twido Modular

- Autómata Programable con procesador + E/S. Sin fuente alimentación para sensores ni HMI

### Características:

- Alimentación 24 VDC
- Salidas tipo transistor (un modelo con 2 salidas a transistor y 6 salidas a relé)
- 20 E/S (12/8) o 40 E/S (24/16)
- Hasta 264 E/S digitales usando módulos de expansión
- Ajuste analógico (1 potenciómetro)
- Entrada analógica integrada 0-10 V

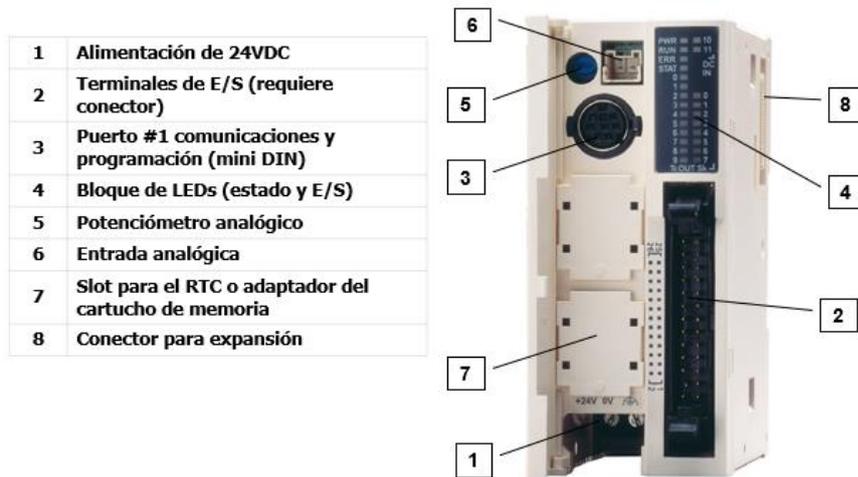


Ilustración 162 “Controlador TWIDO Modular –Gentileza SCHNEIDER (Schneider, 2007)”

## Conexión de E/S

Entradas positivo común

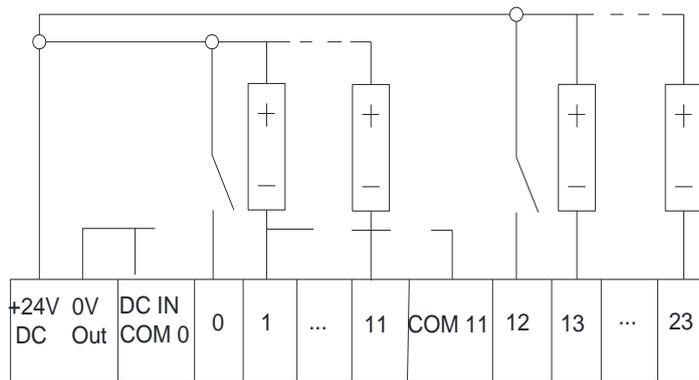


Ilustración 163 "Conexión entrada/ salida positivo común"

Entradas negativo común

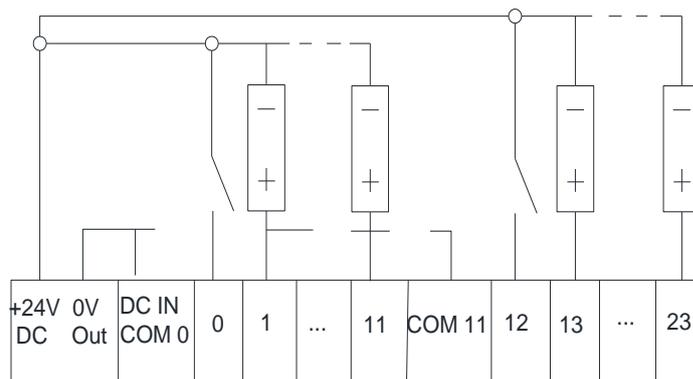


Ilustración 164 "Conexión entrada/ salida negativo común"

## Lenguajes de programación

### Introducción

El programa es como un conjunto de instrucciones, órdenes y símbolos reconocibles por el autómata a través de su unidad de programación, que le permiten ejecutar la secuencia de control deseada. Al conjunto total de estas instrucciones, órdenes y símbolos que están disponibles se le llama lenguaje de programación del autómata.

Sería deseable que la misma simbología utilizada para representar el sistema de control pudiera emplearse para programar el autómatas, el ahorro de tiempo y documentación y la seguridad en el programa obtenido serían considerables.

Sin embargo, esta solución no es siempre posible, el lenguaje depende del autómatas empleado y de su fabricante, que decide el tipo de unidad de programación (literal, gráfica) y el intérprete (firmware) que utiliza su máquina, mientras que el modelo de representación depende del usuario, que lo elige según sus necesidades o conocimientos.

Pese a ello, los lenguajes de programación de autómatas intentan ser lo más parecidos posibles a los modelos de presentación usuales. Los lenguajes pueden ser:

- Gráfico secuencial de funciones (Grafcet).
- Lista de instrucciones (LDI o AWL).
- Texto estructurado.
- Diagrama de bloques.
- Diagrama de contactos (Ladder).

#### Gráfico secuencial de funciones (Grafcet)

El gráfico secuencial de funciones (SFC o Grafcet) es un lenguaje gráfico que proporciona una representación en forma de diagrama de las secuencias del programa. Soporta selecciones alternativas de secuencia y secuencias paralelas. Los elementos básicos son pasos y transiciones.

Los pasos consisten de piezas de programa que son inhibidas hasta que una condición especificada por las transiciones es conocida. Como consecuencia de que las aplicaciones industriales funcionan en forma de pasos, el SFC es la forma lógica de especificar y programar el más alto nivel de un programa para PLC.

#### Lista de instrucciones

La lista de instrucciones (IL o AWL) es un lenguaje de bajo nivel, similar al lenguaje ensamblador.

Con IL solo una operación es permitida por línea (ej. almacenar un valor en un registro). Este lenguaje es adecuado para pequeñas aplicaciones y para optimizar partes de una aplicación.

### Texto estructurado

El texto estructurado (structured text o ST) es un lenguaje de alto nivel estructurado por bloques que posee una sintaxis parecida al PASCAL. El ST puede ser empleado para realizar rápidamente sentencias complejas que manejen variables con un amplio rango de diferentes tipos de datos, incluyendo valores analógicos y digitales. También se especifica tipos de datos para el manejo de horas, fechas y temporizaciones, algo importante en procesos industriales. El lenguaje posee soporte para bucles iterantes como REPEAT UNTIL, ejecuciones condicionales empleando sentencias IFTHEN-ELSE y funciones como SQRT () y SIN ().

### Diagrama de bloques

El diagrama de funciones (function block diagram o FBD) es un lenguaje gráfico que permite programar elementos que aparecen como bloques para ser cableados entre sí de forma análoga al esquema de un circuito. FBD es adecuado para muchas aplicaciones que involucren el flujo de información o datos entre componentes de control.

### Diagrama de contactos (Lenguaje Ladder)

El Ladder, también denominado lenguaje de contactos o en escalera, es un lenguaje de programación gráfico muy popular dentro de los autómatas programables debido a que está basado en los esquemas eléctricos de control clásicos. De este modo, con los conocimientos que todo técnico eléctrico posee, es muy fácil adaptarse a la programación en este tipo de lenguaje.

El lenguaje de contactos expresa las relaciones entre señales binarias como una sucesión de contactos en serie y en paralelo.

Adoptado por muchos fabricantes de autómatas (norteamericanos y japoneses, principalmente) como lenguaje base de programación, el diagrama de contactos ("Ladder Diagram") puede ser introducido directamente en la unidad de programación mediante un editor de símbolos gráficos. Normalmente este editor incluye restricciones en cuanto al número de contactos o bobinas a representar en cada línea, la ubicación de los mismos, la forma de las conexiones, etc.

Sin embargo, el diagrama de contactos de origen norteamericano no nació como una posible herramienta de visualización de programa ya escritos en lista de instrucciones, sino como transcripción directa de los esquemas eléctricos de relés (circuitos de mando) de uso común en la automatización previa a la aparición de los sistemas programables.

Por esta razón, los diagramas de contactos incluyen desde sus orígenes bloques funcionales que ya aparecían como elementos propios en aquellos esquemas, los temporizadores y los contadores.

Utilizando estos bloques sobre los cuales pueden definirse la base de tiempo y el tiempo final en el caso de temporizadores y el módulo de contaje y condiciones de paro y reset en el caso de contadores, el lenguaje de contactos permite programar directamente cualquier esquema eléctrico de relés. También en este se desarrollan bloques funcionales complejos que permiten la manipulación de datos y las operaciones con variables digitales de varios bits.

La presencia de estos bloques de ejecución dependiente de una o más condiciones binarias, multiplica la potencia de programación sin dejar de mantener las ventajas de la representación

gráfica del programa. Así, pueden programarse situaciones de automatización compleja que involucren variables digitales, registros, transferencias, comparaciones, señales analógicas, etc.

### Elementos gráficos del lenguaje Ladder

Para programar un autómata con Ladder, además de estar familiarizado con las reglas de los circuitos de conmutación, es necesario conocer cada uno de los elementos de que consta este lenguaje. A continuación, se describen de modo general los más comunes.

### Contactos

Nombre	Elemento gráfico	Instrucción	Función
Contacto normalmente abierto		LD	Establece contacto cuando el objeto de bit de control está en estado 1.
Contacto normalmente cerrado		LDN	Establece contacto cuando el objeto de bit de control está en estado 0.

Ilustración 165 "Símbolos en el lenguaje Ladder-Contactos"

### Bobinas

Nombre	Elemento gráfico	Instrucción	Función
Bobina directa		ST	El objeto de bit asociado toma el valor del resultado del área de comprobación.
Bobina inversa		STN	El objeto de bit asociado toma el valor del resultado en negativo del área de comprobación.
Establecer bobina		S	El objeto de bit asociado se establece en 1 cuando el resultado del área de comprobación es 1.
Restablecer bobina		R	El objeto de bit asociado se establece en 0 cuando el resultado del área de comprobación es 1.
Bobina creciente		I	El objeto de bit asociado crece cuando el área de comparación es 1.
Bobina decreciente		D	El objeto de bit asociado decrece cuando el área de comparación es 1.

Ilustración 166 "Símbolos en el lenguaje Ladder-Bobinas"

## Bloques de función

Nombre	Elemento gráfico	Función
Temporizadores, contadores, registros, etc.		Cada bloque de función utiliza entradas y salidas que permiten conexiones con otros elementos gráficos. Nota: Las salidas de los bloques de función no pueden conectarse entre sí (conexiones verticales).

Ilustración 167 "Símbolos en el lenguaje Ladder-Bloque de función"

## Bloques de operación y comparación

Nombre	Elemento gráfico	Función
Bloque de comparación		Compara dos operandos y la salida cambia a 1 cuando se comprueba el resultado. Tamaño: una fila por dos columnas
Bloque de operación		Realiza operaciones aritméticas y lógicas. Tamaño: una fila por cuatro columnas

Ilustración 168 "Símbolos en el lenguaje Ladder-Bloque de operación y comparación"

## Los Objetos "Bits":

son variables binarias internas del PLC y pueden ser 0 o 1 (falso o verdadero).

## Bits de E/S:

Las entradas estarán direccionadas con la letra "%I" y las salidas "%Q" en el caso de los PLC de la línea Schneider y "I" o "O" para la línea FESTO.

## Bits internos:

Una memoria interna "%M" es aquella donde se almacenan los resultados provenientes de las combinaciones de entradas y salidas y, este valor almacenado, puede tomar diferentes denominaciones tales como:

Bits (B)

Marca (M)

Bandera (F), etc.

Una memoria interna se considera desde el punto de vista técnico, como una salida virtual, esto quiere decir que físicamente no activa una salida como un contactor, sino, es un dato que se encuentra almacenado en la memoria y puede tomar los valores de 0 y 1.

Sus ventajas se reflejan en:

- Simplifica la solución de los problemas.
- Rápido diagnóstico de fallas, etc.

## **Ejemplos de Programación**

Actividad N°1: Programación Digital “Festo software tolos - FESTO”

Actividad N°2: Programación Analógica “TWIDO Suite - Schneider”

Actividad N°1: montaje, instalación y diseño del programa de control de un brazo automático mediante el programa FST (Festo Software Tools).

El siguiente ejemplo muestra cómo funcionan y como se instalan los distintos elementos neumáticos y eléctricos que entran en juego en el automatismo. Además, como se diseña el programa en el software de la línea de autómatas programables FESTO.

La utilización de brazos automáticos usando el aire comprimido como fluido de trabajo es un claro ejemplo en la utilización de equipos industriales convencionales que nos acerca a la realidad industrial del entorno, donde se pueden integrar el mayor número posible de técnicas de control.

Control electroneumático

El control electroneumático es uno de los controles de trabajo más rápidos, y reúne las ventajas de los dos medios (electricidad y neumática). El sistema eléctrico se utiliza en el apartado de la información para la transmisión y proceso de las señales. El sistema neumático se utiliza en el apartado energético para la amplificación y el trabajo propiamente considerado. El elemento de unión es la electroválvula que se puede utilizar como órgano de control u órgano de control y regulador combinado. Al mismo tiempo, la electroválvula representa la función de amplificación. El apartado eléctrico en este control trabaja normalmente con tensiones continuas o alternas de 12 o 24 Voltios (en nuestro caso trabaja con tensión continua de 24 V. Además de la rapidez de paso de la señal, este tipo de control permite enlazar elementos que pertenecen a un mismo equipo, aunque estén separados por grandes distancias. No obstante, en aquellos recintos con peligro de fuego o explosión es preferible el control neumático exclusivamente prescindiendo del control eléctrico ya que sus elementos requieren una protección especial.

### Sistema Neumático

El sistema está formado de los siguientes grupos de elementos:

- a) Abastecimiento de energía.
- b) Elementos de entrada (Sensores).
- c) Elementos de proceso (Procesadores).
- d) Órganos de maniobra y accionamiento (Actuadores)

### Elección del autómata programable

Se entiende por autómata programable o PLC (Controlador Lógico Programable), a toda máquina electrónica, programable por personal no informático, diseñada para controlar en tiempo real y en medio industrial procesos secuenciales.

El presente apartado tiene por objeto ofrecer un método para escoger el autómata más correspondiente para nuestra aplicación.

La regla más general a aplicar para seleccionar un autómata programable se basa en que las características del PLC tendrán de satisfacer las normas existentes, y en su defecto, a acercarse a las características más comúnmente reconocidas por fabricantes y usuarios, así como conseguir una buena relación calidad-precio.

Debido a que nuestra aplicación no requiere ni una gran velocidad de proceso ni de memoria, además no es necesario utilizar entradas o salidas analógicas se decide por un PLC de la gama media de los diferentes existentes.

Estos autómatas debido a la necesidad de intercambio de información serán imprescindibles que incluyan un sistema de comunicación con bus. Se decide en este caso, por los autómatas que lo llevan incluido en la CPU.

De todos estos requerimientos vemos que la mayoría de autómatas existentes en el mercado los cumplen, de modo que nos hemos decidido por el que presenta una mejor relación servicio técnico y precio, además para seguir en la misma línea de fabricación y marca se ha optado por utilizar el siguiente PLC:

The CPU I/O Module FESTO “FEC FC34-FST”

- Powerful AMD processor AM186 (20 Mhz, 2 Mips) with 16-bit memory access, 512 Kbytes of RAM.
- Flash disk Approx. 100 Kbytes free
- Ethernet 10BASE T Telnet, TFTP, TCP/IP, Web Server

Las características básicas del “FEC Compact” son típicas para un control pequeño y sencillo:

- 20 entradas/Salidas digitales para 24 V DC.

- 2 interfaces serie en cada variante del FEC Compact para una eficiente transmisión de datos.
- Contador rápido para uso en tareas de posicionamiento sencillas.

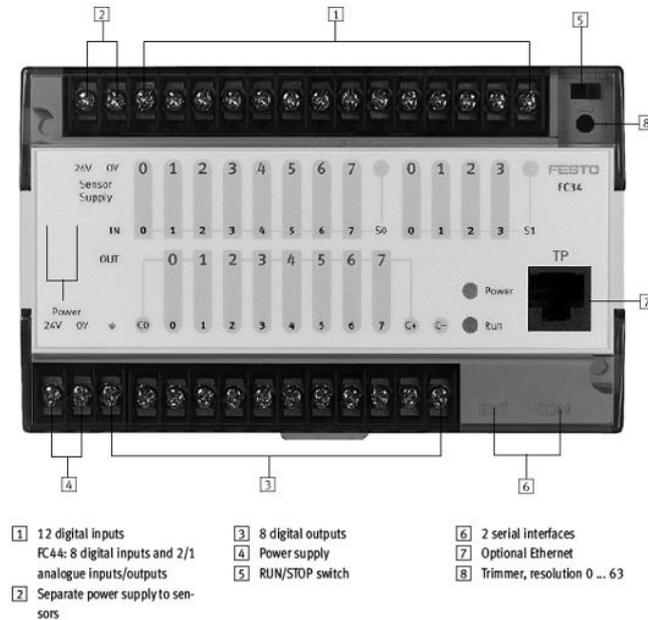


Ilustración 169”Controlador EC FC34-FST-Gentileza FESTO (Festo, Festo, 2019)”

### Tablas de asignaciones

En este apartado se muestran las variables a las cuales se deben acceder para controlar las entradas (I) y salidas (O) que dan información sobre el control del brazo automático.

Con la siguiente imagen nos da una clara idea de la forma en que será conectado el PLC, cada una de las entradas y salidas están referenciadas en el programa, por lo que hay que tener mucho cuidado en el momento de conectarlo para evitar intercambiar alguna conexión. Como se analiza en dicho esquema de conexión el PLC cumple con las características (cantidad de entrada y salidas) necesarias para este proyecto, se acomoda perfectamente a las necesidades.

- 1) 24 voltios
- 2) 0 voltios
- 3) tierra
- 4) (O0.0) activa válvula ventosa
- 5) (O0.1) contrae cilindro de aproximación
- 6) (O0.2) extiende cilindro de aproximación
- 7) (O0.3) contrae cilindro sin vástago
- 8) (O0.4) extiende cilindro sin vástago
- 9) (O0.5) rota actuador hacia la derecha
- 10) (O0.6) rota actuador hacia la izquierda
- 11) (O0.7) lampara de señalización
- 12) (I0.0) pulsador de marcha manual
- 13) (I0.1) sensor inductivo des actuador giratorio
- 14) (I0.2) sensor magnetico del cilindro sin vástago
- 15) (I0.3) sensor magnetico del cilindro sin vástago
- 16) (I0.4) sensor magnetico del cilindro de aproximación
- 17) (I0.5) sensor magnetico del cilindro de aproximación
- 18) (I0.6) pulsador de marcha automatico
- 19) (I0.7) reset

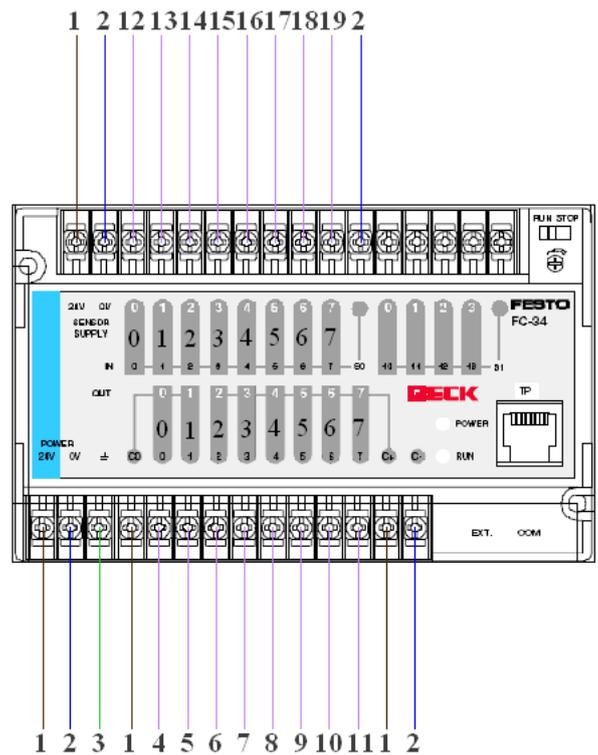


Ilustración 170 " Controlador EC FC34-FST (Festo, Festo, 2019)"

Conexiones de actuadores, sensores y PLC

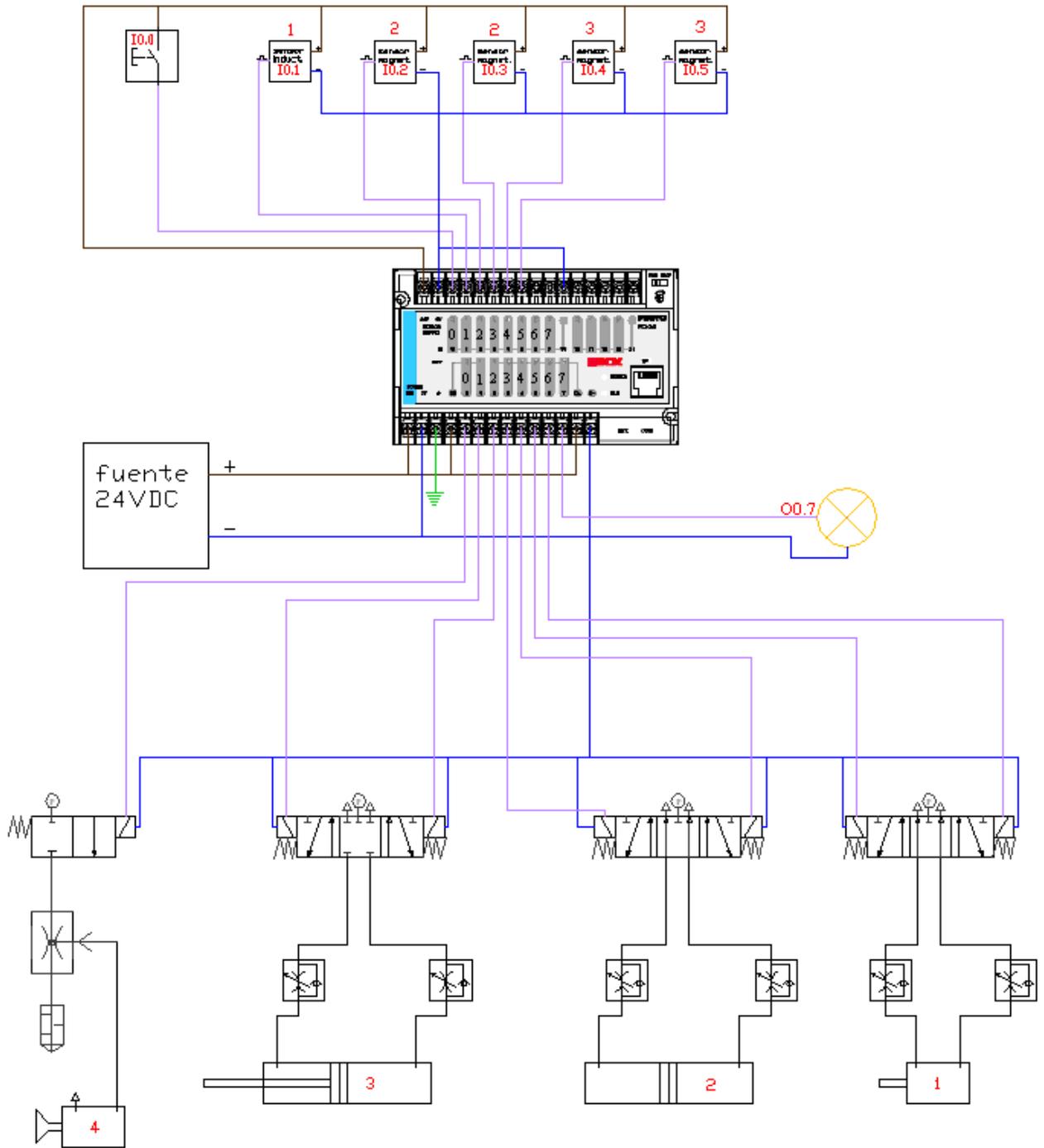


Ilustración 171 "Gráfico de conexiones"

### Diagrama espacio-fase

Es muy difícil poder ver el funcionamiento de una instalación neumática, debido al gran número de elementos de trabajo y emisores de señal que la comprenden.

Por tal razón se utilizan estos diagramas que sirven para tener una idea del orden que se efectúa el mando de los movimientos de trabajos.

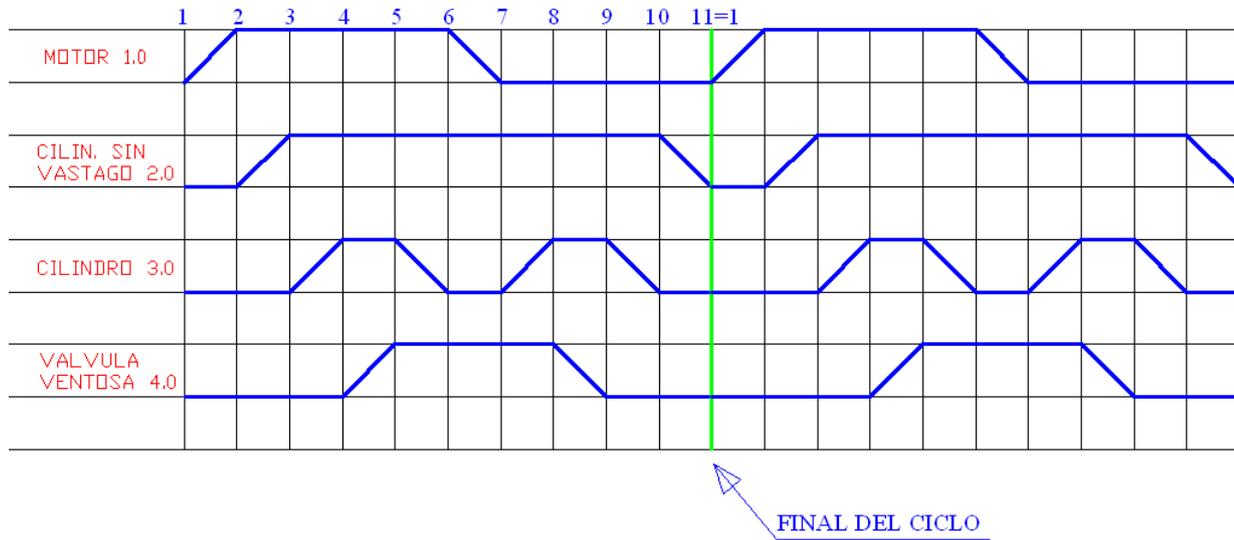


Ilustración 172 "Grafico espacio-fase"

Este diagrama espacio-fase se lo puede ver físicamente en las siguientes secuencias de fotos que fueron tomadas del brazo robótico en base a las distintas posiciones que va tomando a través de su recorrido.

El ciclo se debe mirar de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

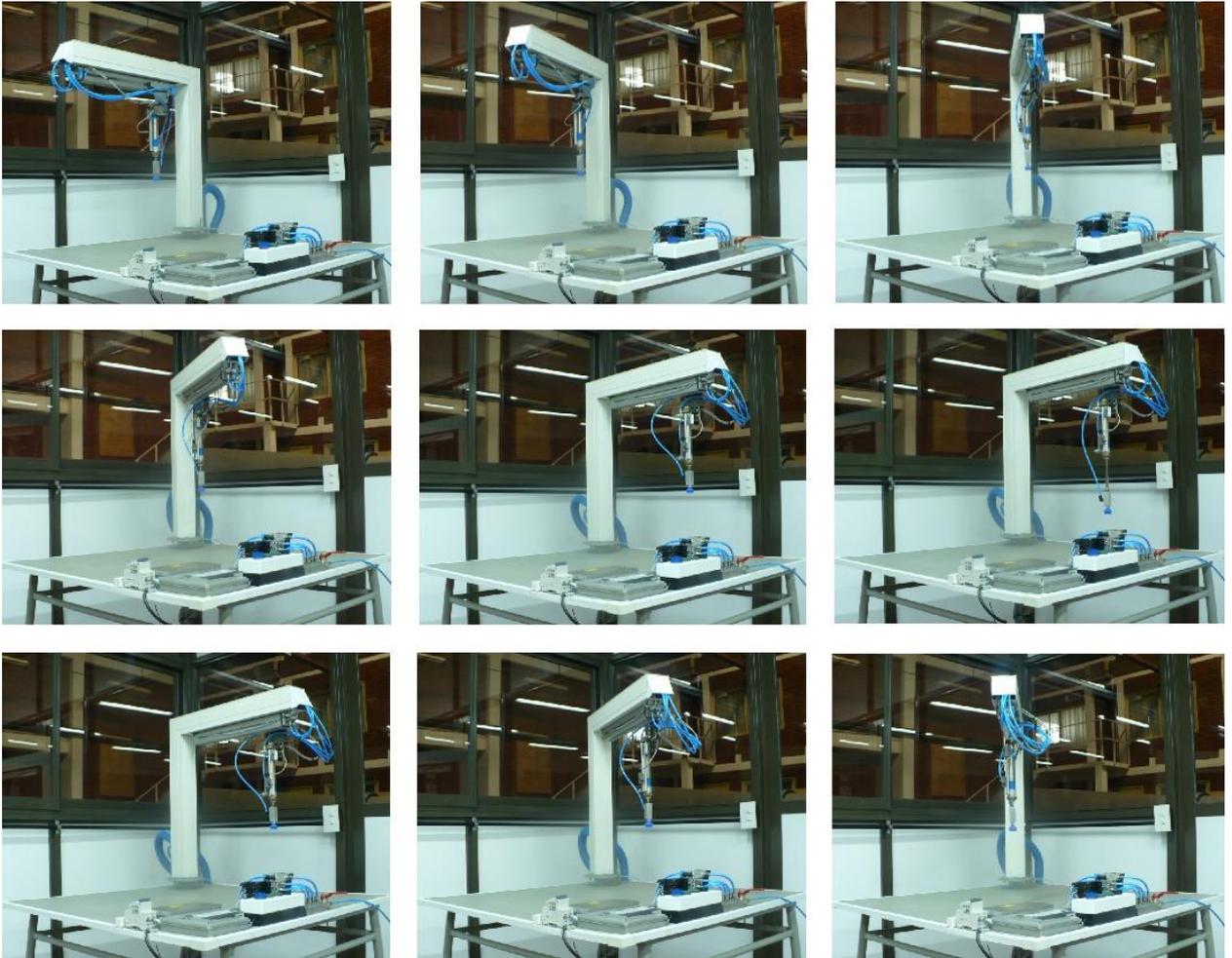


Ilustración 173 "Brazo robótico"

### Programación con el FST "Festo software tools"

A continuación, se muestra cómo se realiza el proyecto con el software FST, se debe prestar crucial atención en todos los pasos y configuraciones para que el proyecto pueda ser transferido al PLC y luego pueda funcionar de acuerdo a la especificación del diagrama espacio-fase.

### Proyecto

- Crear un nuevo proyecto en el MENU Project.

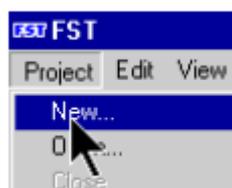


Ilustración 174 "Software FST (FESTO software tools)"

- Nombrar al proyecto



Ilustración 175 "Software FST (festo software tools)"

- Selección del tipo de controlador

Seleccionar el controlador adecuado. En este caso es un FEC Compact.

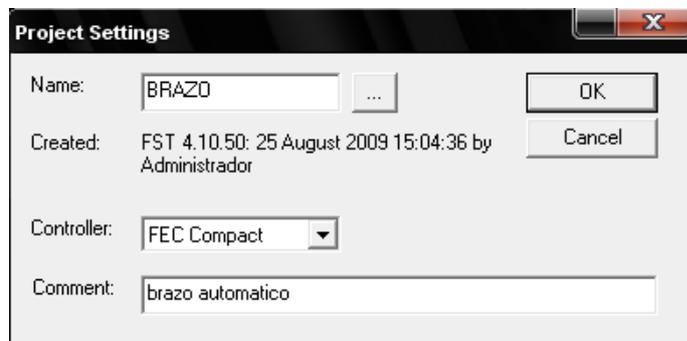


Ilustración 176 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

### Configuración de I/O

Se puede nombrar todas las entradas y salidas antes de programar, se debe tener especial cuidado con esto ya que si por ejemplo se nombra a una bobina como "bobina de apertura" perteneciente a la salida "O0.2" y en el programa se cambia este nombramiento, ocurrirá un mal funcionamiento del ciclo de trabajo.

Para realizar este nombramiento se debe ir al menú "allocation list", cabe destacar que este nombramiento se puede hacer antes o durante la edición del programa.

- Abrir allocation list con doble clic.

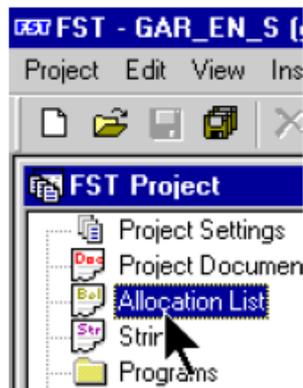


Ilustración 177 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

A continuación, se desplegará la siguiente ventana:



Ilustración 178 "Software FST ( (Festo, Festo Software Tools, 2019))"

Para agregar las entradas y salidas hacemos clic derecho dentro de la ventana y seleccionamos "insert operand".

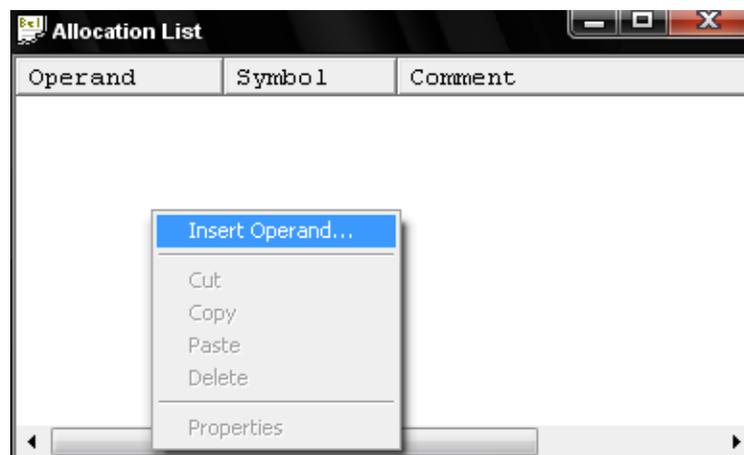


Ilustración 179 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

Se desplegará una ventana en donde el “Absolute operand” es el nombre de la entrada, salida, bandera, etc. que se desea agregar.

En el cuadro “Symbolic Operand” se escribe el apellido o identificación de operador para su fácil identificación por el usuario.

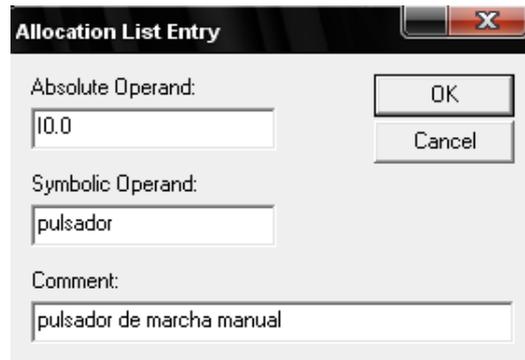


Ilustración 180 ”Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)”

El Allocation List para el brazo automático es el siguiente:

Lo importante de este paso es poder nombrar las entradas y salidas y darle una identificación para que luego sea más simple la programación. El “Symbolic operand” no es necesario colocar si no se desea.

Muchas herramientas no se saben que serán utilizadas como las banderas, contadores, etc. pero esto no es inconveniente alguno porque pueden ser agregadas a medida que se va programando o al final.

Operand	Symbol	Comment
⊗ OO.0		activa valvula ventosa
⊗ OO.1		contrae cilindro de aproximacion
⊗ OO.2		extiende cilindro de aproximacion
⊗ OO.3		contrae cilindro sin vastago
⊗ OO.4		extiende cilindro sin vastago
⊗ OO.5		rota actuador hacia la derecha
⊗ OO.6		rota actuador hacia la izquierda
⊗ OO.7		lampara de señalizacion
⊕ IO.0		pulsador de marcha manual
⊕ IO.1		sensor inductivo actuador giratorio
⊕ IO.2		sensor magnetico cilindro sin vastag
⊕ IO.3		sensor magnetico cilindro sin vastag
⊕ IO.4		sensor magnetico cilindro aproxima
⊕ IO.5		sensor magnetico cilindro aproxima
⊕ IO.6		pulsador de marcha automatico
⊕ IO.7		reset
⊕ FO.0		bandera 0
⊕ FO.1		bandera 1
⊕ FO.2		bandera2
⊕ FO.3		bandera3
⊕ FO.4		bandera 4
⊕ FO.5		bandera 5
⊕ FO.6		bandera 6
⊕ FO.7		bandera 7
⊕ FO.8		bandera 8
⊕ FO.9		bandera 9
⊕ F1.0		bandera 10
⊕ F1.1		bandera 11
⊕ F1.2		bandera 12
⊕ F1.3		bandera 13
⊕ PO		programa maestro
⊕ P1		programa de secuencia
⊕ TONO		temporizador ascendente
⊕ CW0		contador universal 0
⊕ CW1		contador universal 1
⊕ CW2		contador universal 2
⊕ CW3		contador universal 3
⊕ CW4		contador universal 4
⊕ CW5		contador universal 5
⊕ CW6		contador universal 6

Ilustración 181 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

## Programación

- Programando en Ladder Diagram

A continuación, debemos hacer clic derecho sobre la carpeta "Programs" y elegir "New Program":



Ilustración 182 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

A partir de este punto se debe seleccionar un lenguaje de programación. El FST ofrece dos opciones: Statement List (STL) o Ladder Diagram (LDR). Seleccionamos Ladder Diagram.

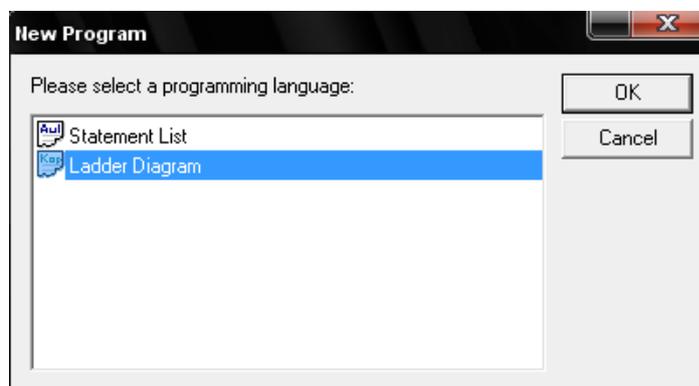


Ilustración 183 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

- Se abre una ventana de 'New Program':

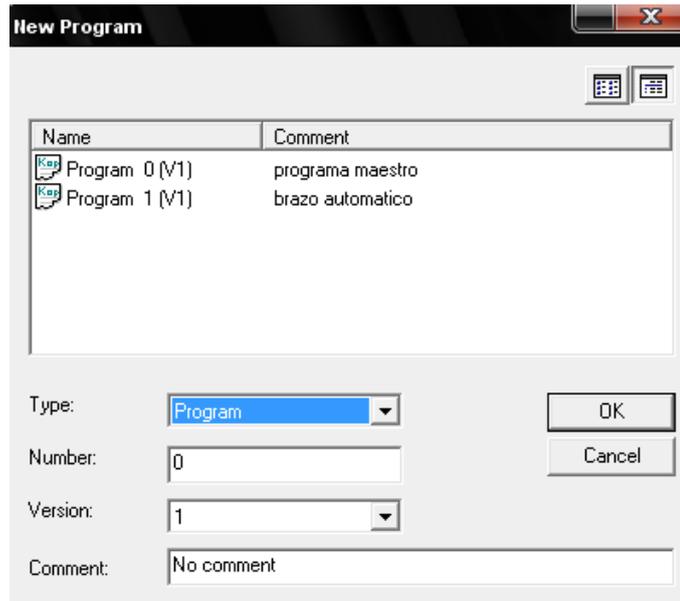


Ilustración 184 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

Type: Programa, CMP, CFM

Number: número de programas (0... 63)

Version: versión de cada programa (1... 9)

Comment: comentario

#### Descripción de los programas

El programa maestro "P0" es el programa principal. Por medio de P0 se puede analizar la lógica del programa, se llamarán cada uno de los subprogramas a medida que el curso del programa lo requiera o que alguna señal tenga un cambio de estado. Si este programa no existe el controlador está en pausa y no será posible correr el programa una vez que se haya desconectado de la PC.

#### Programa secuencia "P1"

Como su nombre lo indica P1, programa de secuencia, será el encargado de controlar la secuencia del brazo a medida que recibe entradas de posición de los actuadores por medio de

sensores, evitando de esta forma que, si no se llega a cumplir alguna de las condiciones, el sistema siga en funcionamiento.

Luego de haber creado los dos programas hacemos doble clic sobre P0 (V1) - programa maestro, y con las herramientas del Ladder creamos dos bobinas seteadas con el nombre de los programas que tengamos. Estas bobinas son seteadas para que cuando pongamos es funcionamiento el PLC lo haga en modo Play.

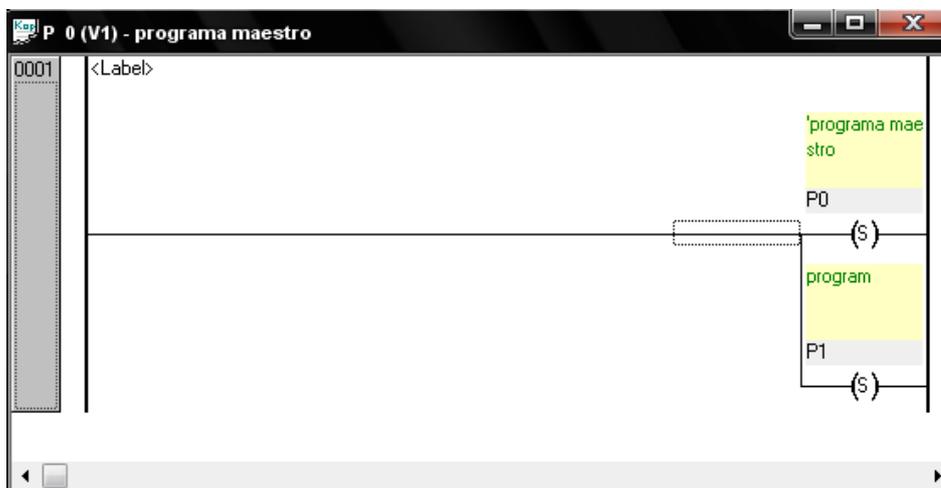


Ilustración 185 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

### Programa P1(V1) - Brazo Automático

Ahora abrimos el programa P1(V1) - Brazo Automático y mediante las herramientas del Ladder Diagram podemos empezar a crear el programa:

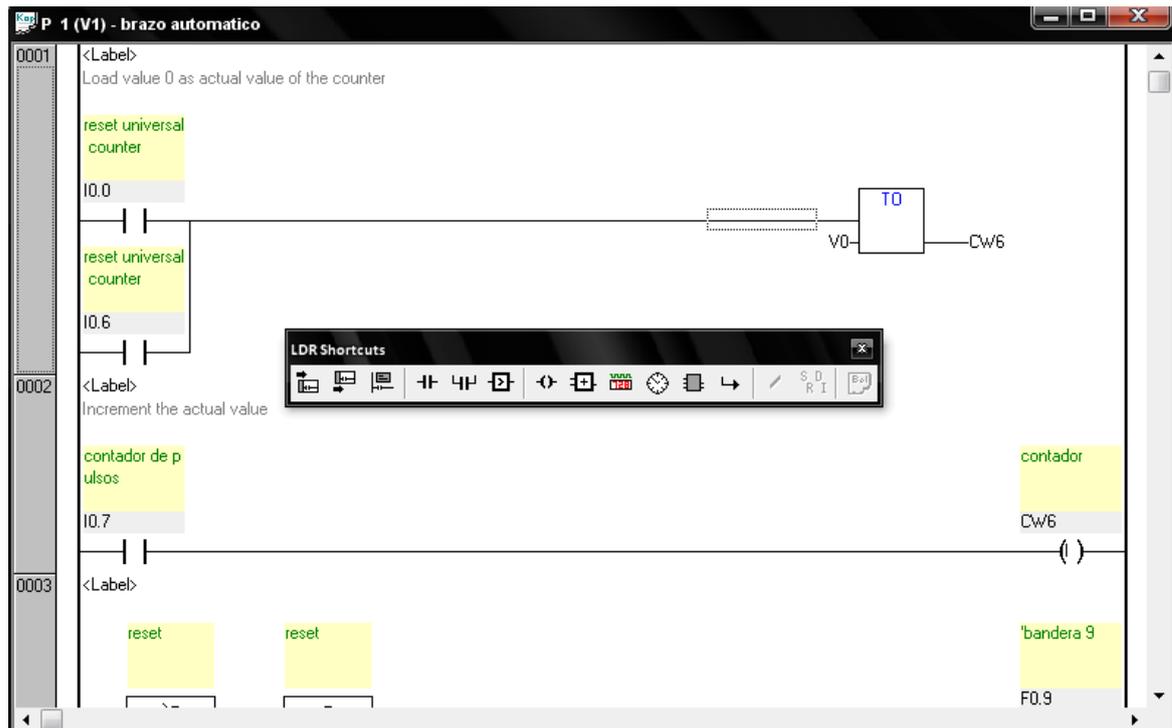


Ilustración 186 "Software (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

### Compilación del proyecto

El software FST no siempre concuerda con todo lo que fue editado, principalmente si hay errores de sintaxis. De esta forma, durante la compilación el software busca errores formales de programación (syntax check).

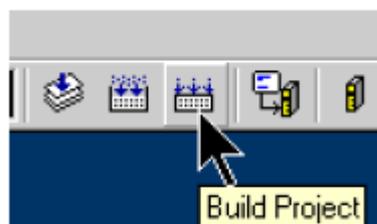


Ilustración 187 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

Haciendo clic en el icono mostrado, aparecerá un mensaje de estado y el resultado de la compilación:

```
FST Project Build
Project: Conter2, FEC, 'Use counters with Ladder Diagram'
Input Module: FEC.IOD , 0 , 0 , 0
Output Module: FEC.IOD , 0 , 0 , 0
compiling CZOP01V1
2896 Bytes Machine Code
0 Error(s) in ladder diagram CZOP01V1, 315 Lines
linking CZOP01V1.FEC.OBJ
compiling CZOP00V1
208 Bytes Machine Code
0 Error(s) in ladder diagram CZOP00V1, 6 Lines
linking CZOP00V1.FEC.OBJ
Project complete, Size 3750 Bytes in Project.RUN File

0 Error(s) and 0 Warning(s) for Project Conter2
```

Ilustración 188 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

Abajo del cuadro se puede ver los errores producidos en el programa. En este caso indica "0" errores. De lo contrario nos mostrara la cantidad de errores y el lugar en donde se produjo.

#### Download del proyecto

Una vez que esté conectado el PLC a la PC y además esta alimentado el PLC con tensión de 24V se procederá a la descarga del proyecto.

- Para testear la comunicación entre el controlador y la PC debemos hacer clic en el icono "Control Panel".

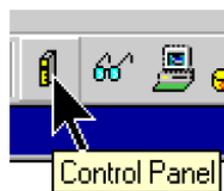


Ilustración 189"Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

En caso positivo (comunicación establecida) una ventana como la mostrada abajo será visible:



Ilustración 190 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

En caso negativo (sin comunicación), La comunicación serial (RS232)- USB deberá ser Reconfigurada como se observa abajo:

Extras → Preferences... → Communication.

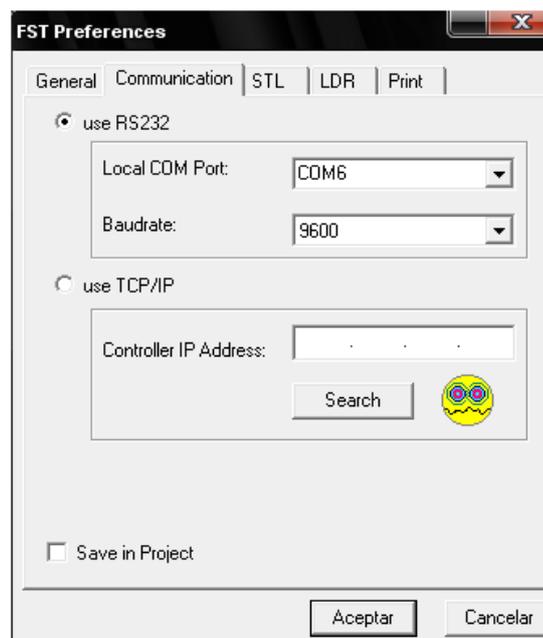


Ilustración 191 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

Cuando la comunicación haya sido establecida, el LED debe necesariamente encender en los colores verde, naranja o rojo, dependiendo de lo ocurrido anteriormente.

Cuando la comunicación está establecida es posible descargar (Download) el proyecto.



Ilustración 192 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

Un mensaje "Download complete" debe aparecer en la ventana de mensajes.

Dependiendo del uso anterior del PLC puede ser necesario conmutar la llave RUN/STOP.

Generalmente se debe transferir el programa con el contacto en STOP y luego antes de utilizar el PLC volver a conmutar a RUN.

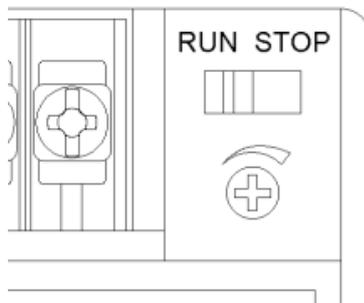


Ilustración 193 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

### Visualización del proyecto

Es de gran importancia que el proyecto pueda ser analizado al mismo tiempo que lo está procesando el PLC, o sea, es esencial poder chequear el programa, entradas, salidas y otros operandos en tiempo real.

Por eso, es importante observar también que el controlador está haciendo y como lo está realizando.

Po lo tanto, existen dos posibilidades: observar el programa o las entradas y salidas.

Para observar el programa basta hacer clic derecho con el mouse sobre la ventana del programa y seleccionar “online”.

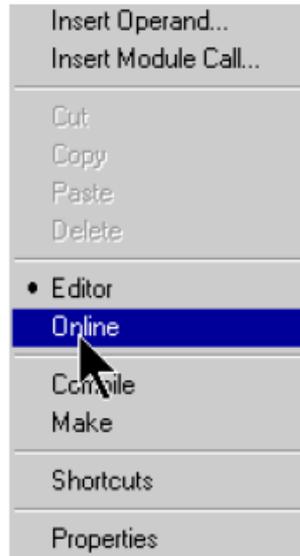


Ilustración 194 ”Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)”

El modo de visualización “online” del programa LDR de acuerdo a cada operando es indicado con ON u OFF.

Esto se puede visualizar en la ventana mediante la iluminación azul de cada elemento, si es un contacto y está en azul, esto implica que hay continuidad y si es una bobina y está en azul es porque esta energizada.

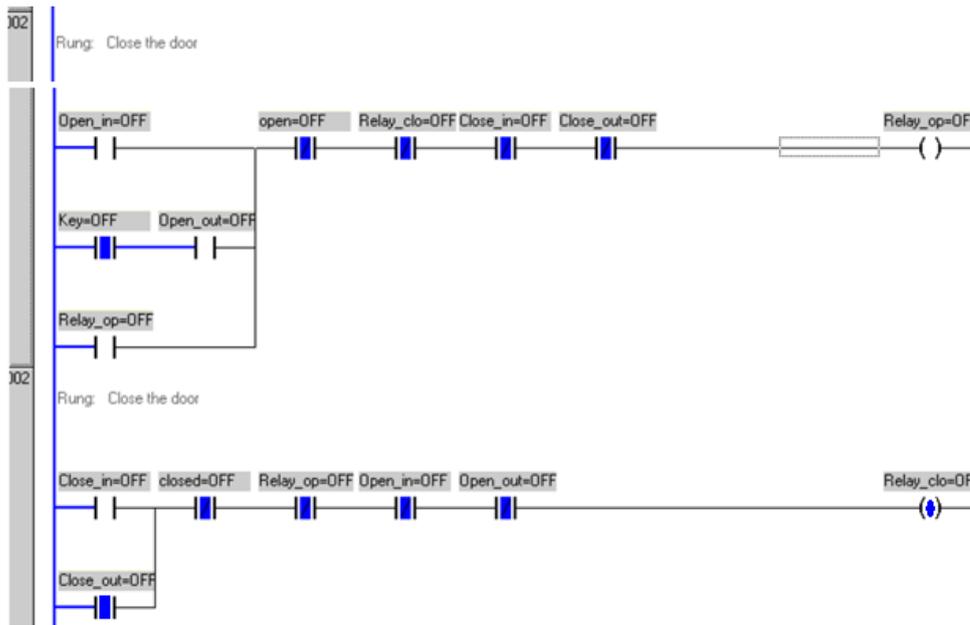


Ilustración 195 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

### Documentación

El FST puede registrar toda la documentación de un proyecto en un manual que puede ser escrito por un usuario y ser grabado en 'Project Documentation'.

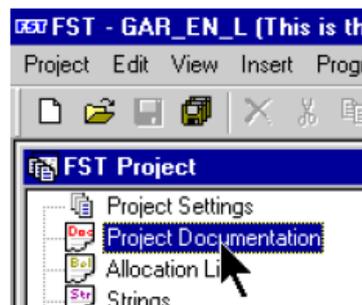


Ilustración 196 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

La documentación del proyecto (Project Documentation) es un archivo de texto y puede ser editado por el usuario cada vez que el usuario haga doble clic sobre el siguiente icono:

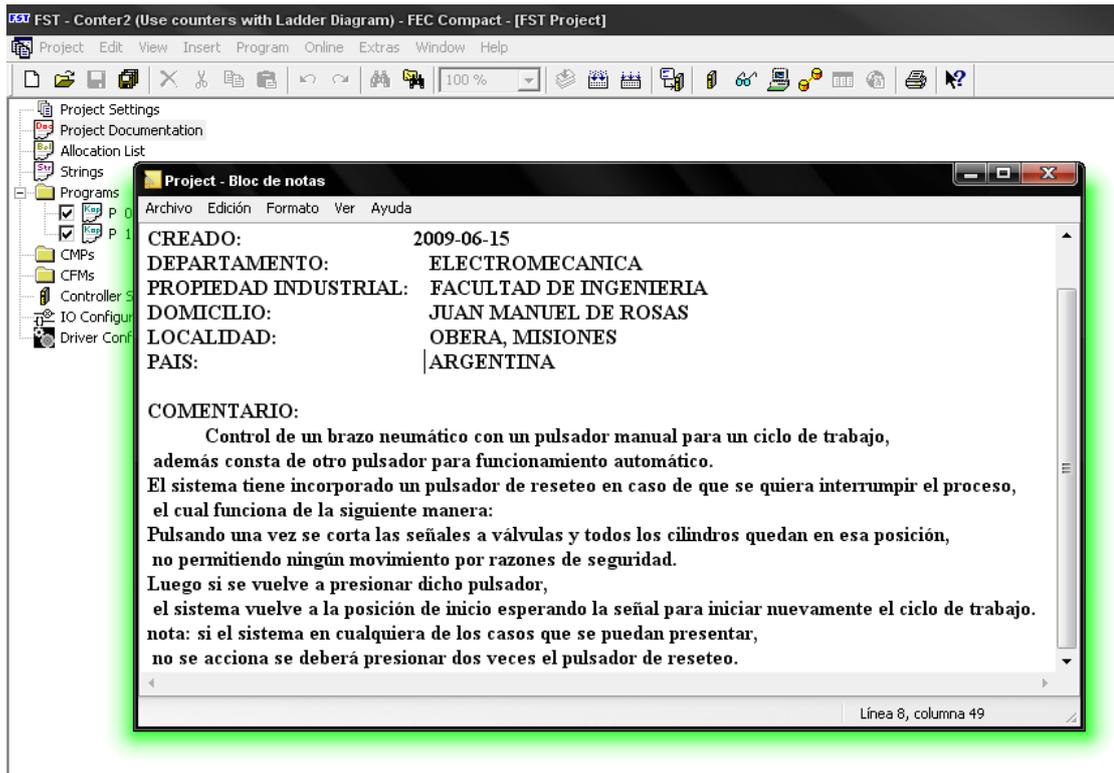


Ilustración 197 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

### Impresión del proyecto

Ahora el proyecto puede ser impreso

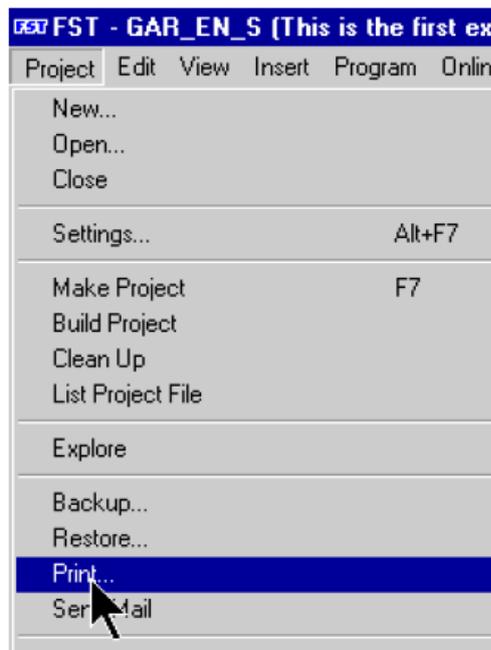


Ilustración 198 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

Selección de lo que será impreso en el proyecto:

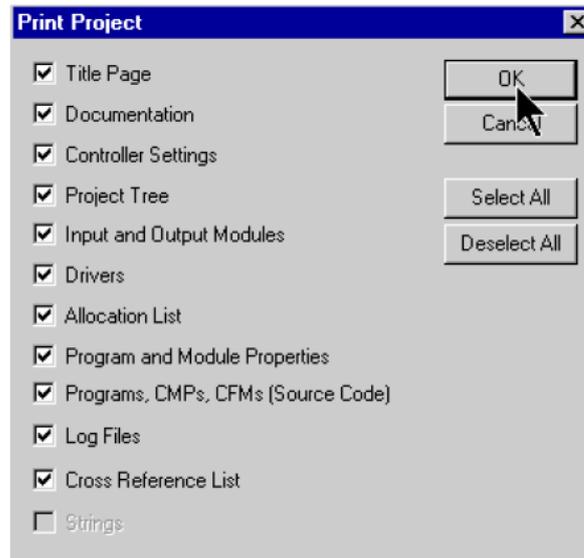


Ilustración 199 "Software FST (Festo, Festo Software Tools, 2019)"

### Descripción de las aplicaciones

#### INICIO

Por medio de dos pulsadores normalmente abiertos, sin enclavamiento y de color verde, se inicializará el sistema de dos maneras, una manual y otra automática; además, el pulsador de inicio manual cumple la función de activar una bandera que se verificará en el inicio de cada ciclo y reseteará el programa para poder poner en cero los contadores. El modo automático lo hace también pero automáticamente.

#### PARO DE EMERGENCIA

Este pulsador normalmente abierto, sin enclavamiento, de color negro y de un modelo distinto a los demás, tiene como función detener el proceso del brazo instantáneamente y bloquear el sistema en el momento en que sea pulsado, deshabilitando los demás pulsadores, con excepción del pulsador de "reset".

#### RESET

El pulsador de reset, es el mismo pulsador de paro de emergencia, que cumple con una función importante, al pulsar este pulsador por segunda vez, vuelve a poner el sistema en condiciones iniciales.



Ilustración 200 "Pulsadores del brazo robótico"

### Conclusiones

El manejo de este brazo es sencillo para el operario, debido a que el diseño de control es simple y además cuenta con todas las funciones para su uso (arranque, paro de emergencia, reset). Donde el operario puede visualizar y operar la máquina sin complicaciones.

El sistema de control de brazo, es flexible y de fácil programación, debido a la buena interacción de los dispositivos electroneumático con el PLC seleccionado y su diseño.

El brazo automático aplicado a la industria, reduce los posibles errores que se pueden presentar, con el proceso realizado en forma manual, y así ofrecer una mejor calidad en los productos.

ANEXO 1: Programa completo en el FST "Festo Software Tool" brazo automático.

*Actividad N°2: Diseño y sintonización de un sistema de control de nivel en un tanque realizado por los alumnos de sistemas de control, Marcelo Tarnoski y Yesica Cardozo*

Objetivo general: realizar el análisis actual del sistema para posterior modificación y puesta en marcha.

Esta práctica pretende realizar el control automático de un PLC industrial, que va a recibir las señales de un sensor para medir el nivel del agua

Al mismo sistema se conectará una válvula de control de accionamiento neumático, controlada por el PLC para abrir o cerrar el paso al agua.

Empleando el mecanismo de control PID (Proporcional integral derivativo), que a través de un lazo de retroalimentación nos permitirá regular el nivel de un tanque.

### Reconocimiento del sistema

Al tomar contacto con el sistema existente en el laboratorio de Neumática de la Facultad, se revisaron las instalaciones del control de nivel divisándose de esta manera el esquema del mismo (conexiones de tanques y tubos) y el estado de los componentes. El esquema de la instalación se muestra en la Ilustración 201. En ella, se muestran las partes componentes y las conexiones entre tanques, además se divisa el circuito neumático para la alimentación de la válvula.

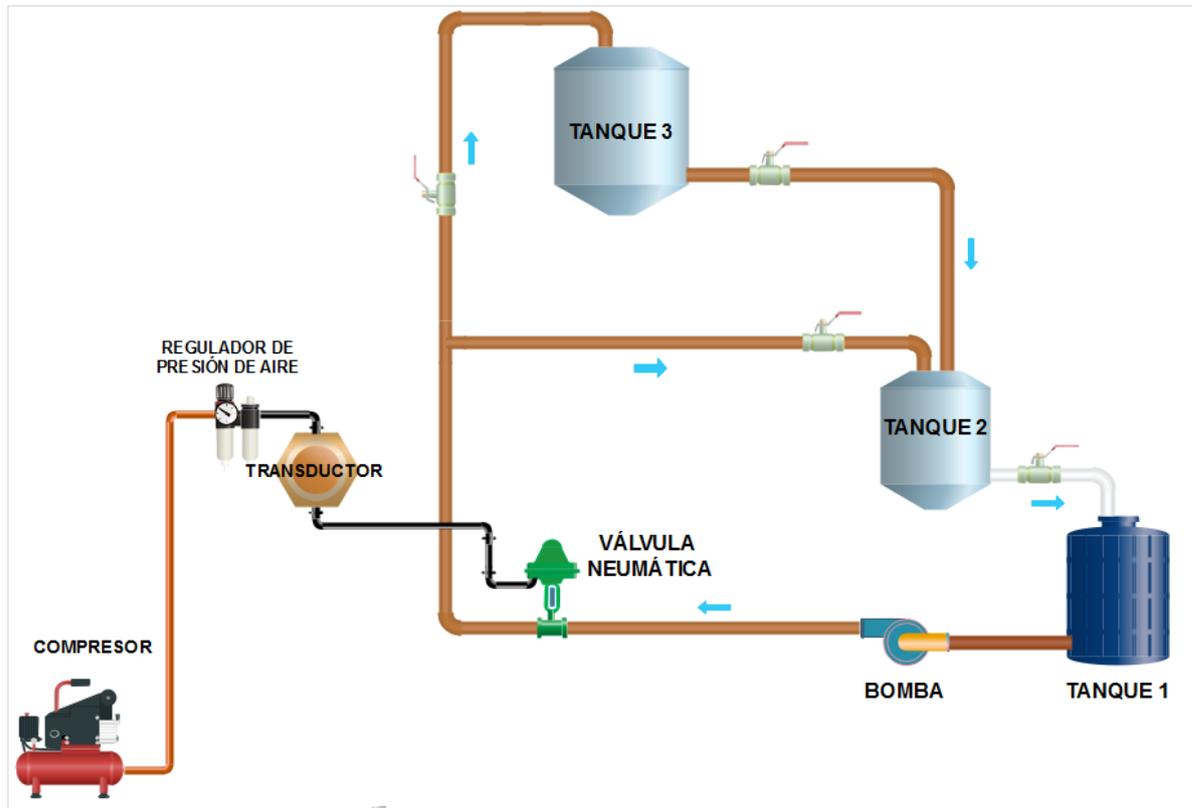


Ilustración 202 “Lazo de control del laboratorio”

Atendiendo al sistema de la ilustración 203, se comienza el recorrido partiendo del tanque 1, el cual hace de reservorio del fluido (agua). desde allí, a mediante la bomba se la envía, pasando por la válvula de control neumática y luego de la cual puede distribuirse hacia el tanque 2 o al tanque 3. los tubos de unión y válvulas (a excepción de la válvula neumática) corresponden a accesorios de agua potable en material ppn de ½ pulgada nominal.

En cuanto a los tanques, fueron construidos con bidones de 50 litros de capacidad (tanque 1 y tanque 2), el tanque 3 se construyó con tubo de pvc de 100mm x 3,2mm con su correspondiente tapa de fondo.

En la Ilustración 204 no se detalla el controlador (PLC), pero se cuenta con un tablero didáctico compuesto por un PLC Twido de la firma Schneider Electric del que se hará uso y cuyas partes

se comentan en la sección siguiente. En cuanto a las señales de entrada que recibe el PLC, estas provienen de un sensor de presión y uno de temperatura instalados en el tanque 2.

Esquematzación del lazo de control

Luego del reconocimiento del sistema en el laboratorio, se esquematizaron los lazos de control mediante diagramas de bloques, en ellos se agregaron las señales según el tipo, tanto de entradas como de salidas.

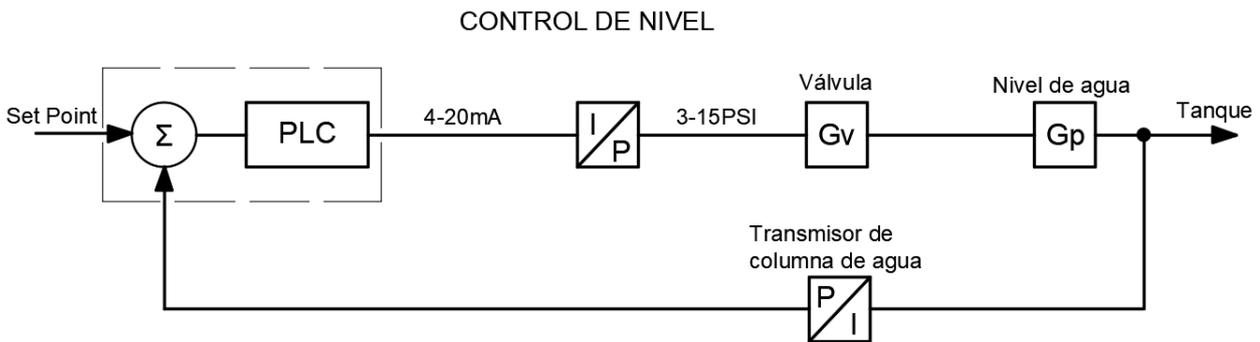


Ilustración 205 “Lazo de control de nivel de líquidos”

Características de los componentes

En este apartado se nombrarán y describirán los componentes activos de los lazos de control, es decir aquellos sobre los cuales se opera para obtener un determinado comportamiento.

Bomba:

La bomba de impulsión es de tipo centrífuga y sus datos se detallan en la Tabla 6 “Característica de la bomba”.

Marca	<b>WORK TOOLS</b>
Modelo	BP212
Caudal máximo	33 litros/minuto
Altura máxima	15 metros
Potencia	0,5HP

Tabla 6 “Característica de la bomba”

La bomba se encuentra conectada al tanque 1 mediante accesorios de PPN y la impulsión está hecha con manguera transparente.

#### Válvula de control neumática:

La válvula comandada con aire posee un cuerpo y un actuador, ambos formando un conjunto.

Las características se detallan en la Tabla 7 “*Característica de la válvula*”

Tipo	<b>F8</b>
Número de serie	4482
Cuerpo	1 pulgada SA
Número de inventario FI	6239
Actuador	P-25

Tabla 7 “*Característica de la válvula*”

#### Transductor de presión

Este dispositivo recibe la señal de tipo eléctrico (4 a 20mA) proveniente del PLC y entrega a la válvula una presión de aire proporcional. Sus características se detallan a continuación.

Tipo	<b>546</b>
Número de serie	9994186
Señal de entrada	4-20mA (DC)
Presión de salida	3-15psi
Resistencia interna	176ohms
Presión de suministro	20psi

Tabla 8 “*Característica del transductor*”

#### Sensor de presión

El sensor de presión se ubica en el TANQUE 2 y se conecta (ver sección de conexiones) a la fuente de alimentación entregando una señal de corriente al PLC según la presión censada. Sus características son:

Marca	<b>WIKA</b>
Modelo	P-1215
Rango	0-4bar Abs.
Tipo	A-10
Salida	4-20mA (DC)
Alimentación	8-30V (DC)

Tabla 9 “Característica del sensor de presión”

### Controlador Lógico Programable

El controlador utilizado está compuesto de un sistema modular con dos módulos de ampliación montado sobre un tablero que permite acceder a todas las entradas y salidas a través de conectores rápidos y con borneras. Las características de cada componente se detallan a continuación.

#### 1- Base modular

Modelo	TWDLMDA20DRT
Entradas	12 de 24V (DC) 8 en total
Salidas	2 salidas a transistor 0,3 A  6 salidas a relé de 2 A
Ampliación	Hasta 7 módulos

#### 2- Módulos de ampliación

Control de temperatura	
Modelo	TWDALM3LT
Entradas	2 analógicas: termopares K, J, Pt100 de tres hilos
Salidas	1 analógica de 0-10V o 4-20mA (DC)
Control de nivel	

Modelo	TWDAMM3HT
Entradas	2 analógicas
Salidas	1 analógica 4-20mA o 0-10V (DC)

Tabla 10 “*Característica de la bomba*”

### Conexiones realizadas

En la presente sección, se indican las conexiones de los diversos componentes disponibles en el lazo del laboratorio. Por otra parte, en el Anexo D se presentan los planos que serán de guía a la hora de vincular los componentes en caso de que sea retirado el módulo didáctico.

### Conexiones del PLC

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**0 se muestran las conexiones de las que se disponen en el tablero sobre el cual están montados los módulos, la base, la fuente de alimentación y las protecciones. A partir de las salidas hacia las borneras con tornillos, se conectaron los diversos componentes del lazo.

En dicha imagen no se detallan la fuente y las protecciones.

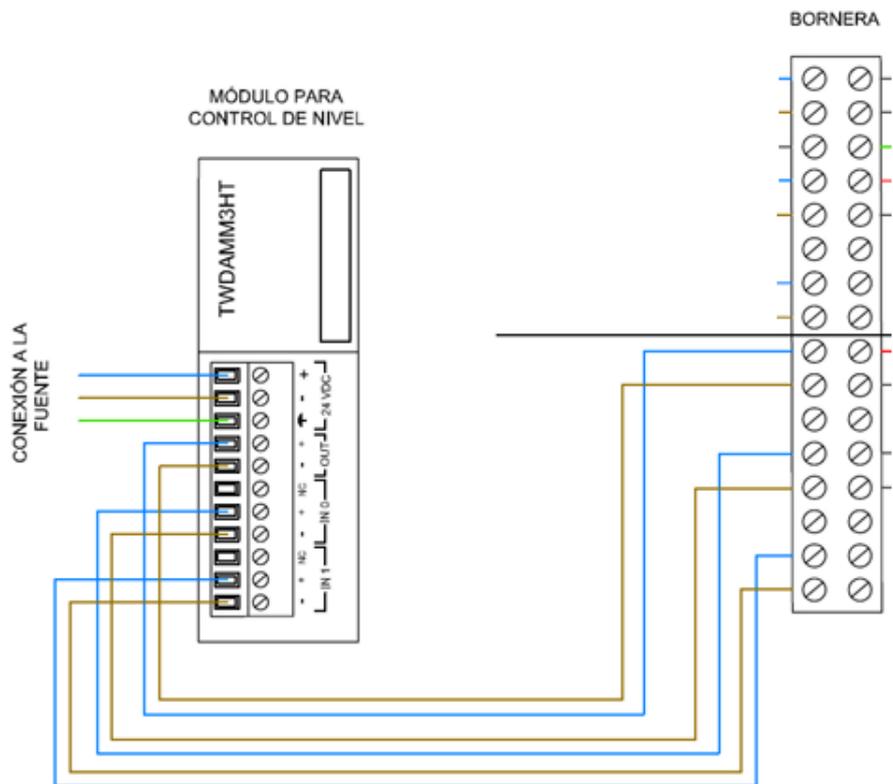


Ilustración 206 “Detalle de conexiones del tablero”

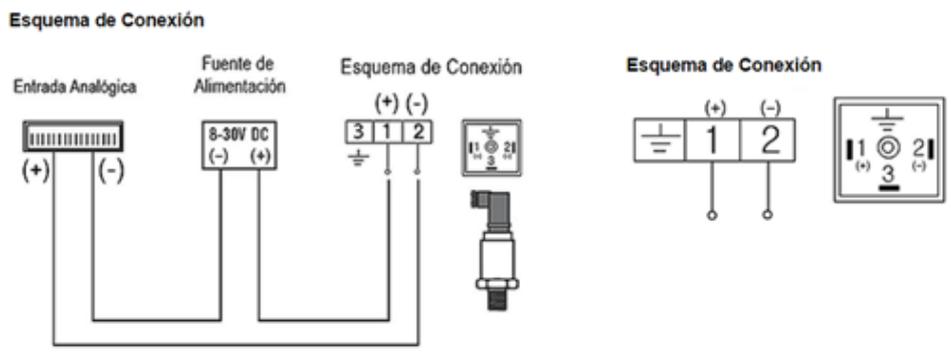


Ilustración 207 “Esquema de conexión del sensor de presión (Wika, 2019)”

### Conexiones de los sensores

La conexión del sensor de presión se realizó siguiendo el esquema de la 61. En él se detallan, con los números correspondientes a la denominación de los pines, la correcta conexión a la fuente. La fuente utilizada fue la de la alimentación del PLC, en este caso hubo que extraer los polos correspondientes mediante cables.

### Conexión del transductor de presión y válvula

El transductor de presión se conectó a la salida del módulo TWDAMM3HT indicada con la palabra OUT en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**1 para el módulo mencionado.

El suministro de aire se realizó mediante un empalme a la línea de salida del regulador de presión a 20psi. Luego, respetando el color de los cables del transductor (rojo y negro), que indican la polaridad (+ y -), se concretó la conexión para poder operar adecuadamente a la válvula.

En cuanto a la válvula, las conexiones sobre ella son solamente de aire. En la Tabla 11 *“Conexiones de aire a la válvula”*

se indican los puntos de conexión.

Designación	Aplicación
OUT	Salida hacia el actuador de la válvula
SUP	Suministro de aire a 20psi
INS	Señal regulada desde el transductor

Tabla 11 *“Conexiones de aire a la válvula”*

### Programación del control de nivel

La programación en lenguaje Ladder se lleva a cabo mediante el software TwidoSuite, versión 2.31.04.

El sistema fue configurado de manera tal que sea accionado mediante pulsadores que cumplen las siguientes funciones:

1. Inicializar el proceso PID es decir, se inicia el proceso de control.
2. Finalizar el control sobre el sistema.

Además, dentro del programa se establecieron tres condiciones correspondientes a niveles de agua dentro del tanque controlado (TANQUE 2) que, a medida que se van alcanzando, encienden un juego de luces indicadoras.

Una vez inicializado el proceso de control, se varían algunos parámetros (que se mencionan más adelante) de forma tal de observar comportamientos.

La utilización del sistema de control proporcional-integral-derivativo (PID) incorporado en el PLC, se desarrolla siguiendo una serie de pasos establecidos por el fabricante del equipo dados en la Guía de Programación TwidoSuite V2.3. En ella se encuentran todos los detalles de funcionamiento, pasos para la configuración y visualización de resultados, así como también la solución a errores que puedan aparecer.

### Configuración de las Entradas y Salidas

Una vez descriptos los módulos y su base en el TwidoSoft (pestaña *Describir*), se configuraron las entradas y salidas según se muestra en la ilustración 61 y 62. Estas figuras se obtuvieron directamente del programa.

**Tabla de entradas**

Uso	Dirección	Símbolo	Utilizado por	Filtrado	Guardado	¿Run/Stop?
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.0	MARCHA	Lógica aplicación	3 ms	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	%I0.1	PARADA	Lógica aplicación	3 ms	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	%I0.2			3 ms	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	%I0.3			3 ms	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ilustración 208 “Tabla de configuración de entradas de la base modular TWDLMDA20DRT-

(Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)”

**Tabla de salidas**

Uso	Dirección	Símbolo	¿Estado	Utilizado por
<input type="checkbox"/>	%Q0.0			
<input type="checkbox"/>	%Q0.1		<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.2	LUZ_NIVEL_BAJO	<input type="checkbox"/>	Lógica aplicación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.3	LUZ_NIVEL_MEDIO	<input type="checkbox"/>	Lógica aplicación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.4	LUZ_NIVEL_ALTO		Lógica aplicación
<input checked="" type="checkbox"/>	%Q0.5	PID_ENCENDIDO		Lógica aplicación
<input type="checkbox"/>	%Q0.6			
<input type="checkbox"/>	%Q0.7			

Ilustración 209 ” *Tabla de configuración de salidas de la base modular TWDLMDA20DRT - (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)*”

Una vez configurada la base modular, se siguió con la configuración de los módulos, en este caso, el de control de nivel (ver 10).

**Tabla de entradas y salidas**

Uso	Dirección	Símbolo	Tipo	Ampliada	Mínimo	Máximo	Unidades
<input checked="" type="checkbox"/>	%IW2.0	SENSOR_DE_PRESION	4 - 20 mA	Personalizad	0	10000	Ninguno
<input type="checkbox"/>	%IW2.1		No utilizado	Normal	0	4095	Ninguno
<input checked="" type="checkbox"/>	%QW2.0	TRANSDUCTOR	4 - 20 mA	Normal	0	4095	Ninguno

Ilustración 210 “*Tabla de configuración de E/S del módulo TM2AMM3HT - (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019).*”

En las tablas se aprecia la nomenclatura de las entradas y salidas (E/S). La forma o secuencia en que Twido asigna las posiciones de cada una es:

<b>%</b>	<b>I, Q</b>	<b>x</b>	<b>.</b>	<b>y</b>	<b>.</b>	<b>z</b>
<b>Símbolo</b>	<b>Tipo de objeto</b>	<b>Posición del controlador</b>	<b>Punto</b>	<b>Tipo de E/S</b>	<b>Punto</b>	<b>Número de canal</b>

Ilustración 211 “*Tabla de configuración - (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)*”

%	I, IW, Q	0	.	j
Símbolo	Tipo de objeto	Posición u orden		Número de canal

Ilustración 212 “Tabla de configuración - (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)”.

### Configuración del PID

Luego de asignadas las E/S, se pasó a la programación en lenguaje Ladder. Esta consistió en la inserción líneas de comando para los pulsadores, luces y del correspondiente bloque de operaciones.

Una vez presionado el PULSADOR DE MARCHA, se setea una memoria que permanece encendida hasta que se presione el PULSADOR DE PARADA, el cual la resetea. De esta forma, nos aseguramos de que el bloque PID siga encendido y en ejecución.

Al insertar el bloque de operaciones, se lo debe designar según la sintaxis siguiente:

PID<espacio>0

En el lugar mostrado con “0” podrán colocarse desde “0” hasta “13”.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el diagrama Ladder correspondiente al lazo de control de nivel. Allí puede observarse el bloque de operaciones PID en la línea marcada con “Rung 1”.

En la misma figura se detallan los bloques de comparación que encienden las luces. Los valores de cada bloque se extrajeron de la lectura de la variable “medida” del PID.



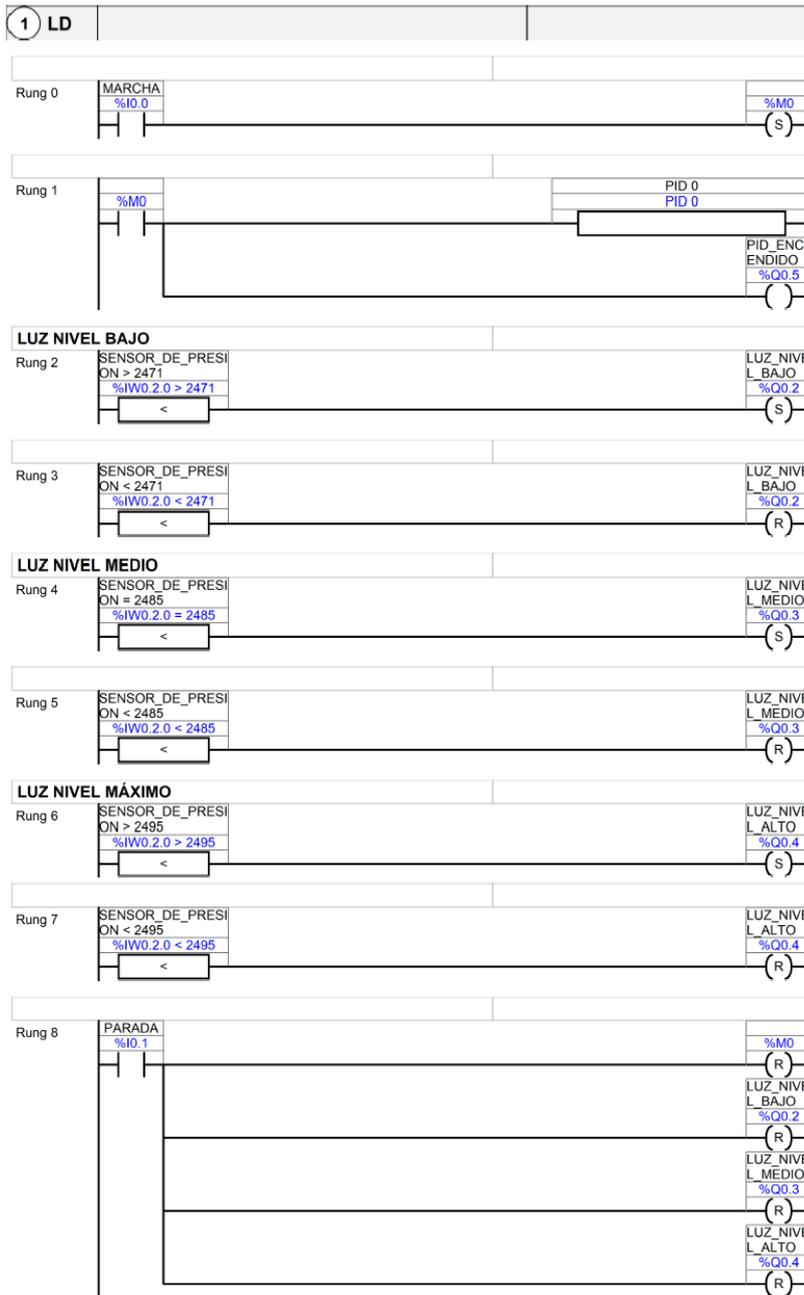


Ilustración 215 *Diagrama Ladder del lazo de control de nivel* (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)”

- Pestaña Entrada:

General	Entrada	PID	AT	Salida
Aplicar Cancelar				
<b>Medida</b>	<b>Conversión</b>	<b>Alarma</b>		
%IW2.0	<input type="checkbox"/> Autorizar	<input type="checkbox"/> Autorizar		
	Min	Baja	Salida	
	Máx	Alta	Salida	

Ilustración 216 “*Configuración PID* - (Electric, Controlador logico programable TWIDO, 2019)”

En el casillero “Medida” se carga el nombre de la entrada del módulo, que será leída durante la ejecución del control. Esta corresponde al sensor de presión (%IW2.0).

Los demás casilleros permanecen vacíos ya que no se requiere conversiones de valores ni alarmas de aviso.

- Pestaña PID:

En el casillero “Consigna” se coloca un valor de memoria (%MW0) que será cargado luego con un valor numérico en la tabla de animación (en modo On-Line con el PLC).

En la casilla “Parámetros”, se cargan los valores de Kp, Ti y Td también como espacios de memoria de manera tal de poder modificarlos al igual que la consigna. El “Período de muestreo” corresponde a cada cuanto tiempo el PLC censa las variables y actualiza las salidas entonces, al igual que las otras se configuró como memoria.

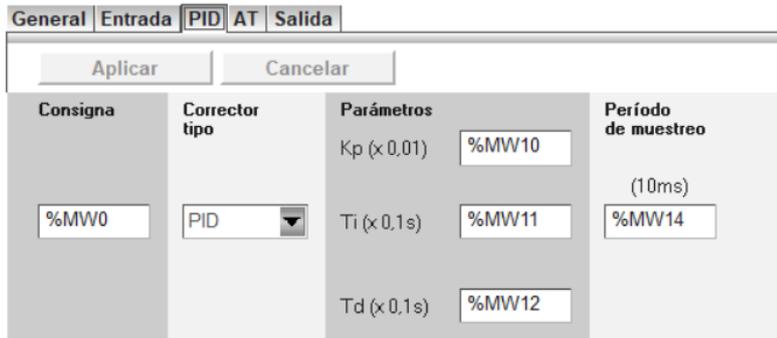


Ilustración 217 “Configuración PID - (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)”

- Pestaña AT:

Esta función permite setear valores límite de la medida para poder ejecutar un proceso automático de búsqueda de valores para Kp, Ti, Td incorporado en el autómata como una opción para hallarlos.

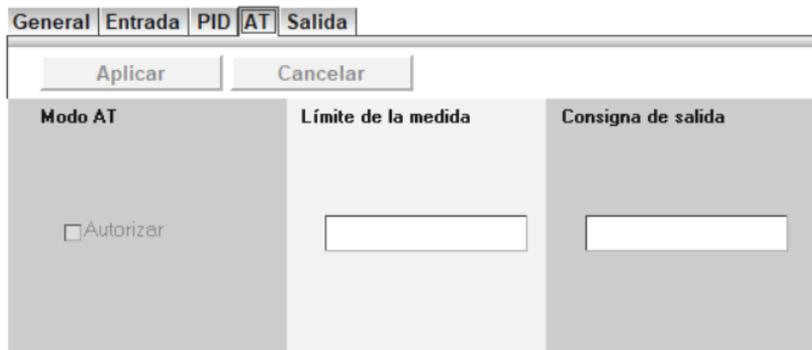


Ilustración 218 “Configuración PID - (Electric, Controlador logico programable TWIDO, 2019)”

- Pestaña Salida:

La casilla “Acción” se configura en Directa y la “Salida digital” con el valor de la salida del módulo (%QW2.0) a través de la cual se enviará la señal de control al transductor de presión.

Las demás casillas no se utilizaron, por ello se dejaron como se encontraban.

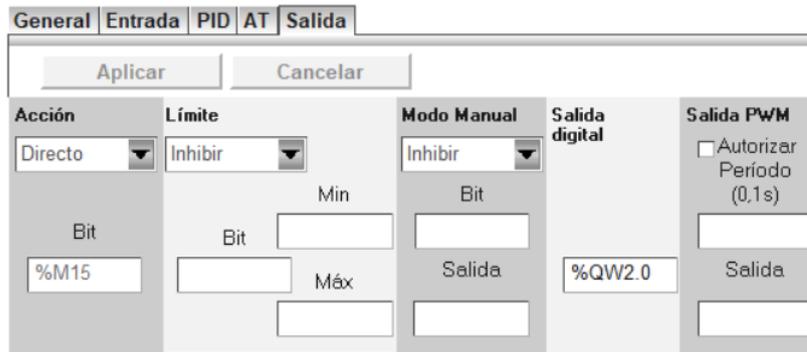


Ilustración 219 “Configuración PID - (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)”

- Pestaña animación:

Mediante esta pestaña puede observarse en tiempo real (con el PLC en modo OnLine) el lazo de control esquemático con los valores de Consigna, Medida y Salida como se observa en la figura siguiente.

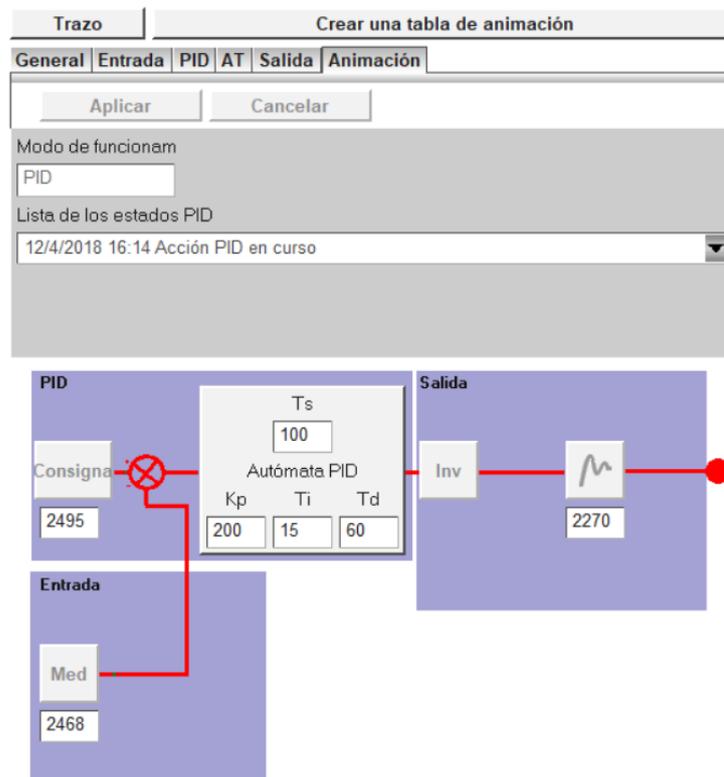


Ilustración 220 “Configuración PID - (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)”

En modo OnLine (PLC conectado) es posible asignar valores mediante la Tabla de Animación, la cual se gestiona desde el menú derecho de la ventana del TwidoSoft, mediante la pestaña Gestionar la tabla de animación. En esta tabla se cargan los valores deseados para aquellas constantes definidas previamente como memorias (%MW...). A continuación, se muestra la tabla con los valores asignados.

	 Us	Dirección	Símbolo	Actual	Guardado	Formato
1	<input checked="" type="checkbox"/>	%MW0	CONSIGNA	2495	2495	Decimal
2	<input checked="" type="checkbox"/>	%MW14	PERÍODO_DE_M	100	100	Decimal
3	<input type="checkbox"/>	%MW15	LÍMITE_DE_LA_M	0	0	Decimal
4	<input type="checkbox"/>	%MW16	CONSIGNA_DE_	0	0	Decimal
5	<input checked="" type="checkbox"/>	%MW10	KP	200	200	Decimal
6	<input checked="" type="checkbox"/>	%MW11	TI	15	15	Decimal
7	<input checked="" type="checkbox"/>	%MW12	TD	60	60	Decimal
8	<input type="checkbox"/>	%MW20		0	0	Decimal
9						

Ilustración 221 “Configuración PID - (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)”

- Trazado:

Mediante esta opción, es posible obtener una gráfica de los valores de consigna y medida directamente desde el PLC. Se cuenta además con la posibilidad de exportar (pulsando el botón Exportar) los valores medidos a Excel en un archivo con extensión **.csv** para procesarlos si se desea.

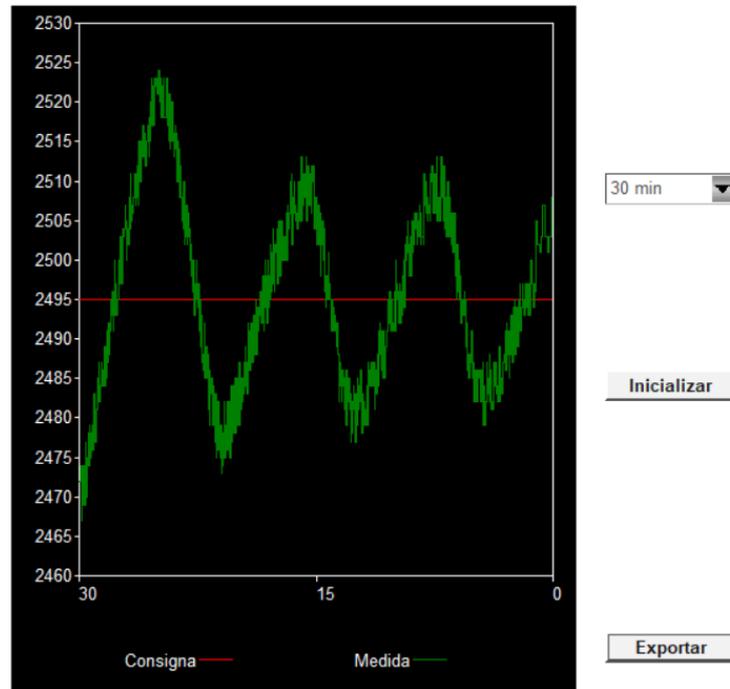


Ilustración 222 “Respuesta control PID - (Electric, TwidoSuite 2.31.04, 2019)”

### Sintonización del lazo de control

Para hallar los valores de las constantes  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  correspondientes a la constante proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo respectivamente, se recurrió a la herramienta AutoTuning propia del PLC. Luego de varios intentos, no se obtuvo valor alguno mediante este procedimiento.

Por ello se analizó otra alternativa que consistió en obtener la función de transferencia del sistema mediante el planteo de las ecuaciones diferenciales para luego simularlos mediante la herramienta Simulink de Matlab.

Los planteos de las ecuaciones diferenciales se detallan en el Anexo 2.

Una vez halladas las constantes en Matlab, se procedió a graficar el comportamiento del sistema para compararlo con la gráfica obtenida mediante la herramienta **Trazado** de TwidoSoft con esos mismos valores.

Las funciones de transferencia que se cargaron en Simulink son:

- **Sistema de primer orden:**

Las funciones de transferencia de los componentes por separado resultaron (ver Anexo C):

$$\text{Función de transferencia de la válvula neumática } \frac{Q_e(s)}{T(s)} = \frac{0.00166}{s - 0.05} \quad (1)$$

$$\text{Función de transferencia válvula neumática } \frac{Q_e(s)}{H(s)} = \frac{6846}{895s + 1} \quad (2)$$

Colocadas estas funciones en bloques de Simulink, resulta el siguiente diagrama, Ilust 77:

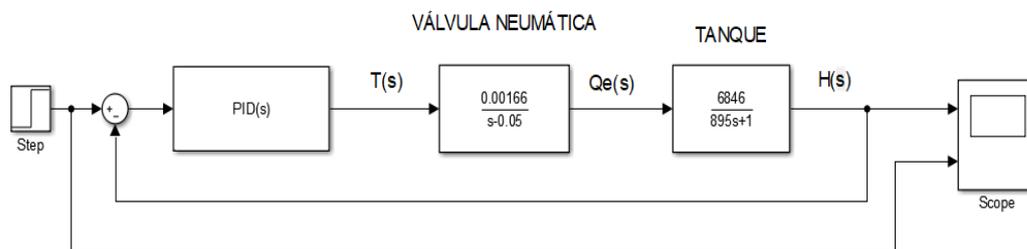


Ilustración 223 “Diagrama de bloques en (MathWorks, 2019)”

Una vez obtenido el comportamiento (gráfico) del sistema y las constantes con Simulink, se cargaron en el PLC y se evaluaron los resultados para comparar y validar el modelo. De esta manera se aceptan o rechazan los valores de las tres constantes (Kp, Ti y Td).

Los valores a cargar en el PLC son:

Caso	Simulink	PLC Twido
1	Kp      200	Kp (x0,01)      200
	Ti      15	Ti (x0,1s)      15
	Td      60	Td (x0,1s)      60

2	Kp	200	Kp (x0,01)	200
	Ti	9	Ti (x0,1s)	9
	Td	150	Td (x0,1s)	150

Tabla 12 “Valores de las constantes”

### Análisis y Discusión de los resultados

En esta etapa, se comparan las curvas obtenidas en la simulación de Matlab y la correspondiente corrida del programa en el PLC con los valores de la Tabla 11.

El objetivo de la comparación, como se dijo anteriormente, tiene como objeto obtener valores de las tres constantes que hagan estable al sistema.

- Prueba con  $K_p=200$ ,  $T_i=15s$  y  $T_d=60s$

En primer lugar, se expone la gráfica obtenida con la corrida del modelo en Simulink, y la correspondiente obtenida del PLC con los datos procesados en Excel.

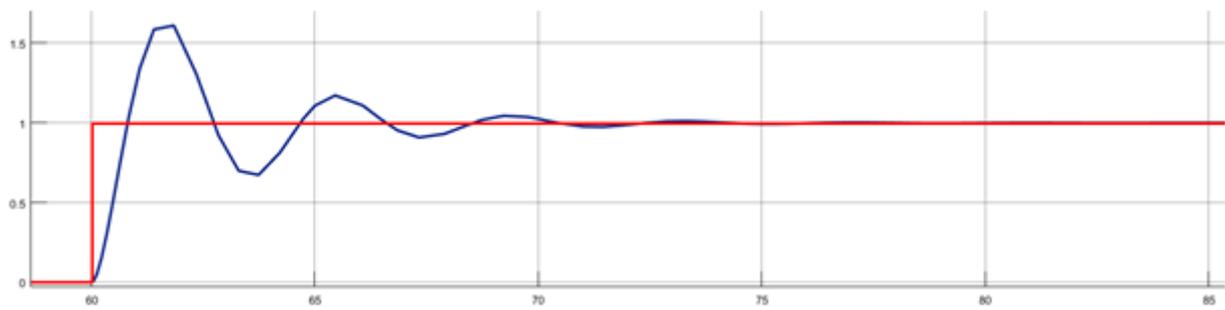


Ilustración 224 “Gráfica obtenida con (tiempo en segundos) (MathWorks, 2019)

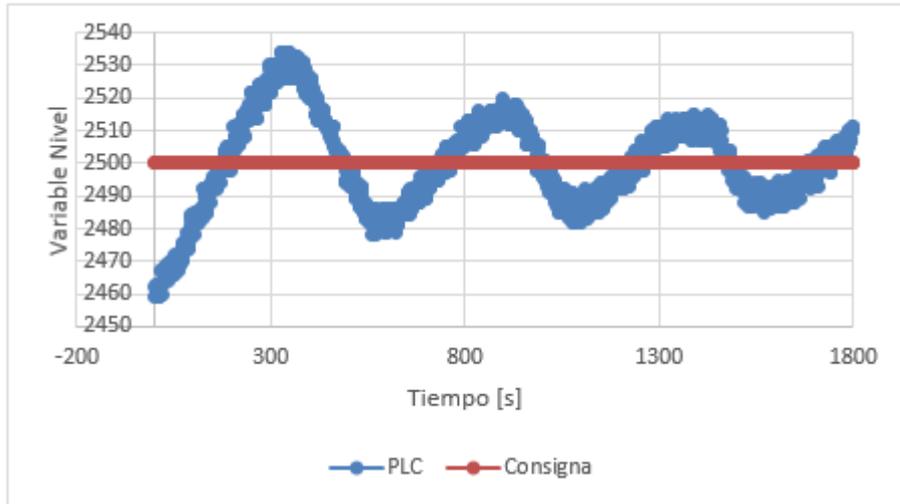


Ilustración 225 “Gráfica obtenida con el PLC (30 minutos)”

- Prueba con  $K_p=200$   $T_i=9s$   $T_d=150$ :

De manera similar al caso anterior, se exponen las dos ilustraciones.

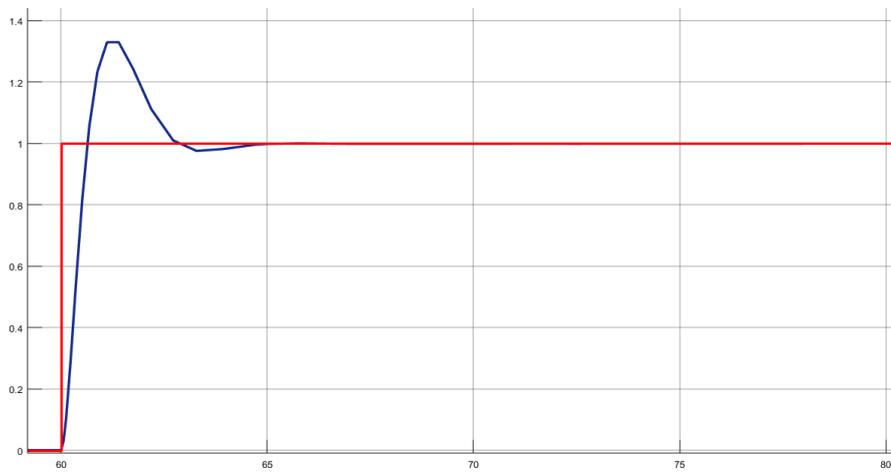


Ilustración 226 “Gráfica obtenida con Simulink (tiempo en segundos) (MathWorks, 2019)”

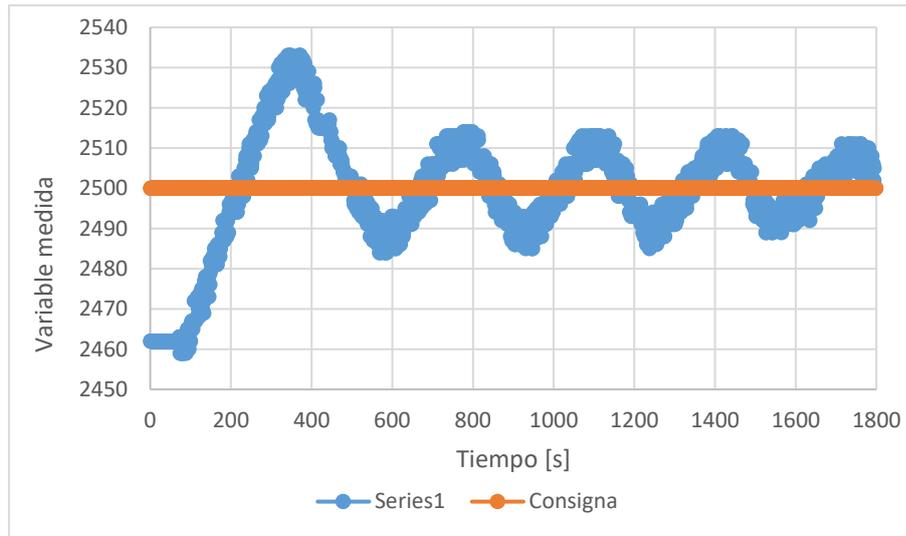


Ilustración 227 “Gráfica obtenida con el PLC (30 minutos)”

Mediante el planteo del modelo teórico se buscó la similitud de comportamiento con el real del PLC debido a la imposibilidad de sintonizar automáticamente el lazo mediante la función AutoTunnig del controlador.

Como se observa en las pruebas, el sistema se estabiliza y presenta predominio de las funciones Proporcional y Derivativa, siendo de menor medida la Integral. Con valores de  $K_p$  menores al de las pruebas, el sistema se inestabiliza, de forma similar al modelo.

Si bien el tiempo de estabilización entre el modelo y el lazo real difiere, se observó un comportamiento similar, justificando los valores que, de otro modo deberían adoptarse al azar. Por lo tanto, se los consideraron como coeficientes finales para proponer en el control del nivel de agua en el tanque.

Cabe aclarar que para la obtención del modelo mediante ecuaciones diferenciales, se realizaron algunas suposiciones como ser: el tanque es de sección uniforme y la caída de presión en la válvula neumática es de 1psi, cosa que puede variar en la práctica. Además de esto existen condiciones de operación de los distintos componentes que no se encuentran en los valores

nominales, como ser la operación de la válvula y la del sensor de presión, el cual se encuentra operando muy cerca del cero de su escala.

Otro aspecto a destacar es la lenta respuesta inicial de la válvula a la señal proveniente del controlador, esto puede atribuirse a la magnitud de acción proporcional. Ello provoca una demora en la estabilización con la descarga al 100%.

Para la corrida del programa y la correspondiente acción de control, el tanque se encuentra inicialmente vacío y con la descarga completamente abierta.

## **CAPITULO 8**

### **Control de proceso cascada y avanaccion**

En las industrias de procesos (Química, petroquímica, de alimentos, etc.) el control está asentado básicamente en estructuras de lazo simples de realimentación negativa.

Existen casos en los que el simple FEEDBACK no cubre las exigencias impuestas a la variable controlada (rapidez en la respuesta, máximos apartamientos del valor consigna permisible, etc.), por lo que se debe recurrir a lazos de control más elaborados

### **Concepto de control en cascada**

Se define como la configuración donde la salida de un controlador de realimentación es el punto de ajuste para otro controlador de realimentación, por lo menos. Más exactamente, el control de cascada involucra sistemas de control de realimentación o circuitos que estén ordenados uno dentro del otro.

Existen dos propósitos para usar control cascada:

1. Eliminar el efecto de algunas perturbaciones en la variable manipulada, haciendo la respuesta de regulación del sistema más estable y más rápida.
2. Mejorar las características dinámicas de lazos de control en procesos

## Estructura

La estructura de control en cascada tiene dos lazos un lazo primario con un controlador primario también llamado “maestro”  $K_1(s)$  y un lazo secundario con un controlador secundario también denominado “esclavo”  $K_2(s)$ , siendo la salida del primario el punto de consigna del controlador secundario. La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso.

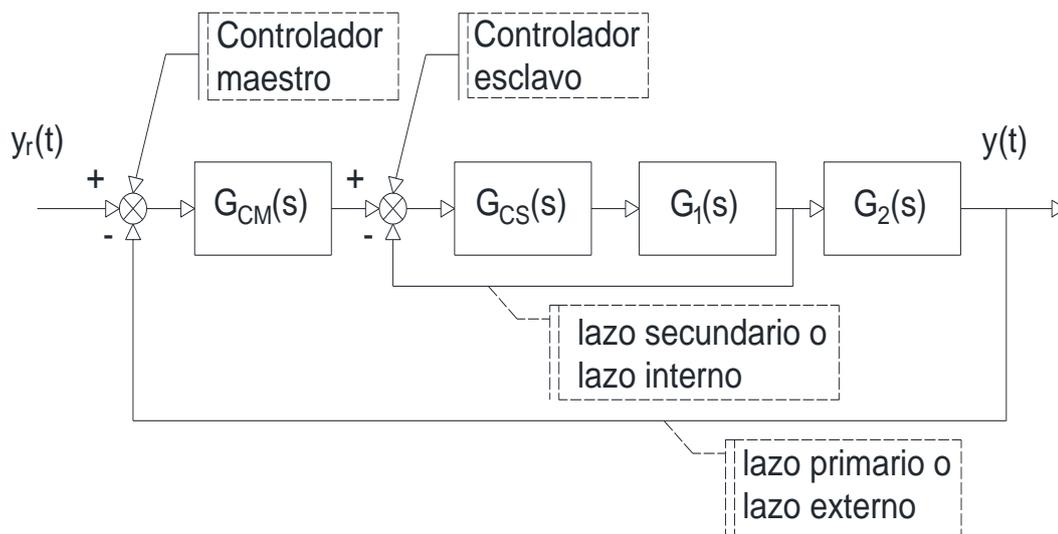


Ilustración 228 “Diagrama de bloque control en cascada”

## Ventajas del control en cascada

- ✓ Produce estabilidad en la operación
- ✓ Las perturbaciones en el lazo interno o secundario son corregidas por el controlador secundario, antes de que ellas puedan afectar a la variable primaria.
- ✓ Cualquier variación en la ganancia estática de la parte secundaria del proceso es compensada por su propio lazo

- ✓ Las constantes de tiempo asociadas al proceso secundario son reducidas drásticamente por el lazo secundario.
- ✓ El controlador primario recibe ayuda del controlador secundario para lograr una gran reducción en la variación de la variable primaria.
- ✓ Incremento de la capacidad de producción.

### **Limitaciones de aplicación del control en cascada**

- ✓ Es aplicable solo cuando pueden obtenerse mediciones de variables adicionales de proceso.
- ✓ Requiere medir las perturbaciones en forma explícita.
- ✓ En algunas aplicaciones la variable controlada no puede medirse y la realimentación no puede realizarse.

### **Diseño de Control en Cascada**

Los criterios para el diseño de control en cascada pueden ser considerados:

- ✓ Cuando el control realimentado simple no provee un desempeño satisfactorio a lazo cerrado.
- ✓ La medida de la variable es disponible.
- ✓ La variable secundaria debe tener una dinámica más rápida que la variable primaria. (Típicamente  $t_p$  (tiempo pico) debe ser mayor que  $3t_s$  (constante de tiempo del proceso secundario)).

### **Implementación de Controlador en Cascada**

Consideraciones Principales para la Implementación de Control en Cascada.

Una cuestión importante en la implementación de control en cascada es cómo encontrar la variable secundaria controlada más ventajosa, es decir, determinar cómo el proceso puede ser mejor dividido.

La selección de la variable controlada secundaria es tan importante en un sistema de control en cascada que es muy útil formalizar algunas reglas que ayuden a la selección.

**Regla 1.-** Diseñar el lazo secundario de manera que contenga las perturbaciones más serias.

**Regla 2.-** Hacer el lazo secundario tan rápido como sea posible.

**Regla 3.-** Seleccionar una variable secundaria cuyos valores estén definidamente y fácilmente relacionados a los valores de la variable primaria.

**Regla 4.-** Incluir en el lazo secundario tantas perturbaciones como sea posible, manteniéndolo al mismo tiempo, relativamente rápido.

### **Lazos de control simples**

Decimos simples porque presenta el lazo un solo camino de realimentación.

Las perturbaciones que lo pueden afectar (Algunas de ellas):

$Q_p$  = Caudal de carga al horno

$T_p$  = Temperatura de carga al horno.

$T_a$  = Temperatura ambiente

$P_q$  = Presión del gas combustible.

$H_g$  = Poder calorífico del combustible.

Supongamos que tenemos un controlador (P+I+D) y fue ajustado por Z-N (en forma empírica).

Pasado un tiempo nos informan que el lazo de control no funciona bien, el personal de

operaciones se jacta de que lo que corresponde a ellos está todo bien; pero cuando las cosas no andan bien “la culpa la tienen los de mantenimiento, en este caso mantenimiento instrumental”.

Entonces comienza una serie de interrogantes y consultas:

- 1) Si el resultado no es el esperado, entonces preguntarse si la falencia es continua o no.
- 2) Si la falencia es continua, el camino clásico inmediato es entrar a dudar de los elementos constitutivos del lazo y ello dependerá del mantenimiento de dichos elementos, como así también de la confianza que inspiran las personas que hacen dicho mantenimiento.
- 3) Ahora si tanto Gv, Gc y H están en perfectas condiciones, algunos de estos instrumentos del lazo no están debidamente calibrados, y fundamentalmente la válvula no está correctamente dimensionada o esta subdimensionada o sobredimensionada.

De acuerdo a lo comentado, y estando ahora en una planta industrial, donde todo no anda bien, y antes no andaba mal, y ahora los componentes del lazo están en condiciones operativas, entonces algo cambió en el proceso.

Es muy factible que las perturbaciones sean las causantes de problemas en el lazo de control

En el caso del diagrama siguiente, si sube la Pg entrará más gas a los quemadores y después de un tiempo el TT detectará y bajará el gas.

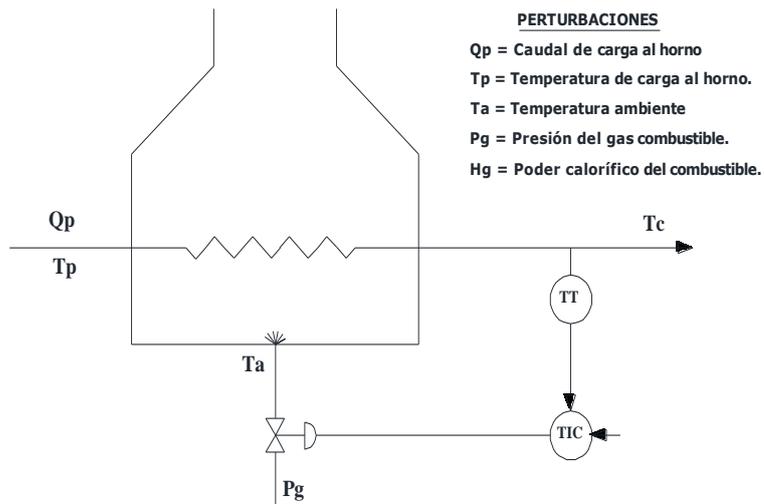


Ilustración 229 "Representación del proceso industrial control de temperatura control simple"

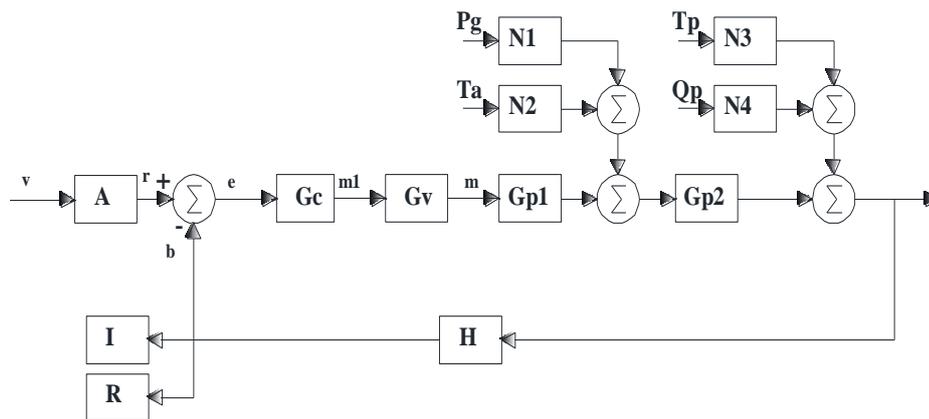


Ilustración 230 "Diagrama de flujo del proceso industrial lazo simple"

**Eliminación de la presión del gas "Pg" como perturbación**

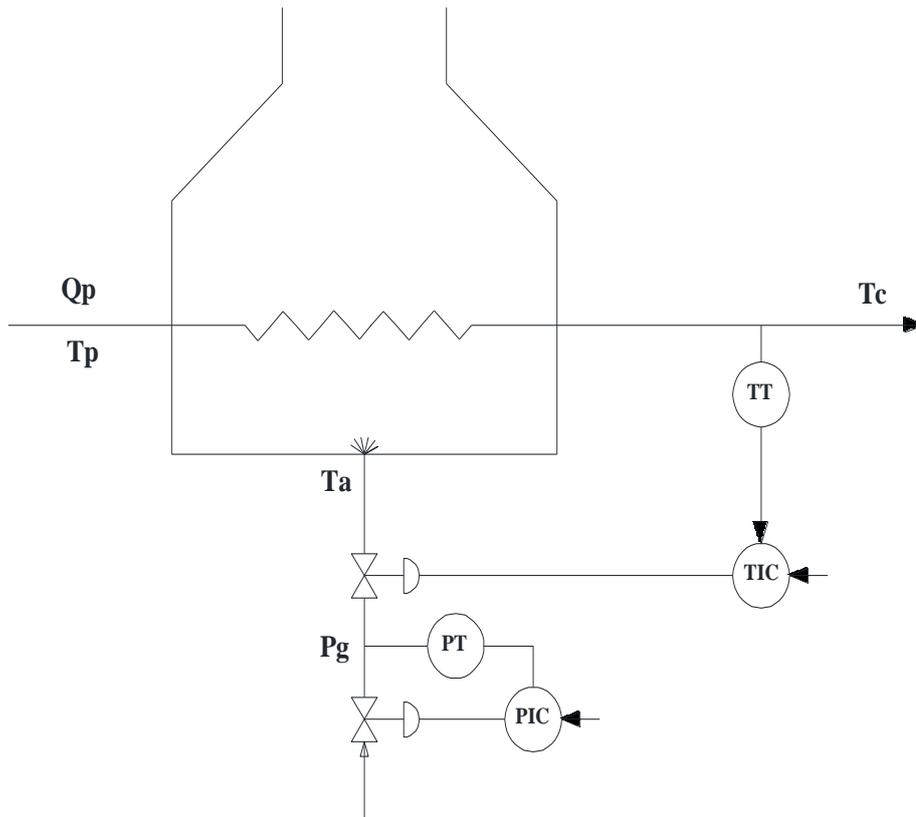


Ilustración 231 “Representación proceso industrial eliminación de la presión del gas”

**Planteamos ahora al Lazo cascada**

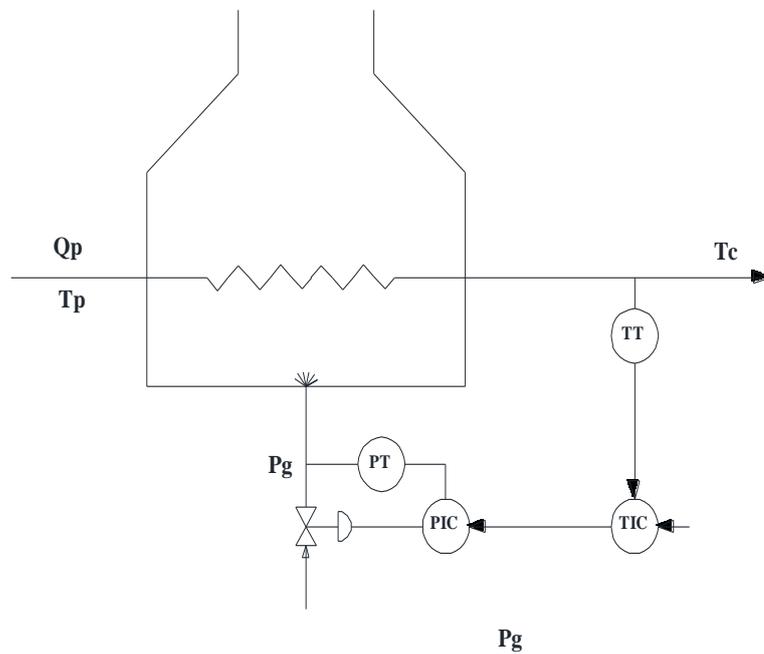


Ilustración 232 "Representación del proceso industrial control de temperatura lazo en cascada"

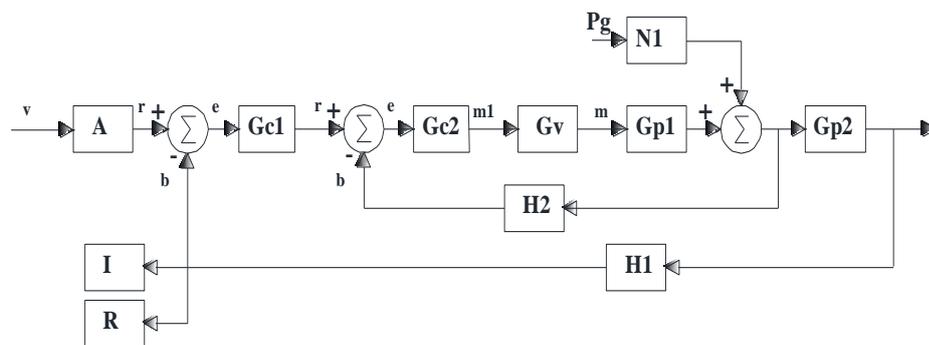


Ilustración 233 "Diagrama de flujo del proceso industrial lazo en cascada"

- Como vemos en la figura 3, hemos incorporado un segundo lazo de control, el de la presión de gas a quemadores.

- El lazo interno de control de presión está subordinado al externo de control de temperatura, que le define el Set- Point.
- El lazo interno no tiene indicado elemento de entrada “A” pues la señal de salida [m1(t)] del Gc1 (TIC) entra en forma directa como valor deseado al detector de error siendo interpretada como valor de referencia para el controlador (PIC).
- La parte del proceso que abarcamos como el lazo interno tiene que ser más rápida que la que tenemos como lazo externo. O sea que hay una conexión ineludible:

$$\sum T_i \text{ interno} < \sum T_i \text{ externo}$$

### Control en cascada mediante lazo simple y con Posicionador de válvula

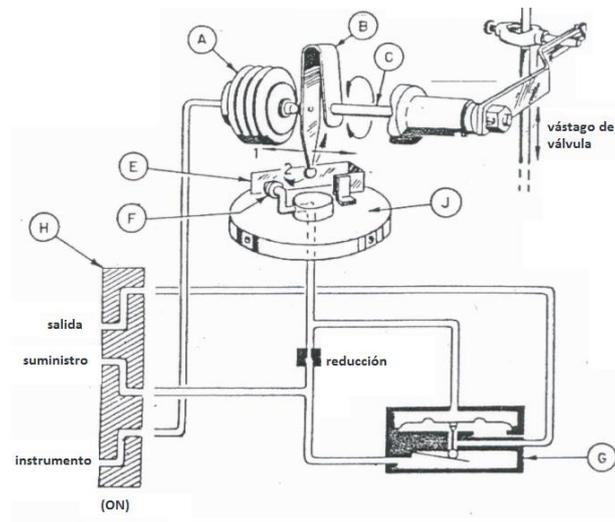


Ilustración 234 “Posicionado de válvula tipo C gentileza (Foxboro, 2002)”

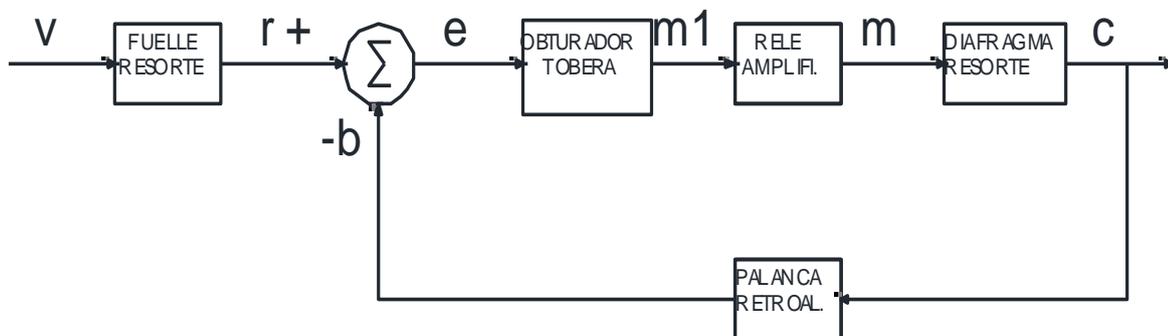


Ilustración 235 “Diagrama en bloque Posicionado de válvula tipo C gentileza (Foxboro, 2002)”

Como vemos en la figura 4 anterior la señal m1 no va directamente al actuador de la válvula sino que previamente pasa por el fuelle del posicionador y de allí como sabemos (una vez procesada) sale al actuador.

El controlador ahora No gobierna la válvula, pero en su lugar define el valor deseado de la presión de gas a quemadores, El Set – Point de la temperatura de salida lo define el operador. O sea que el lazo cascada del Horno, tiene su válvula de control con posicionador, tenemos una doble cascada.

Industrialmente es difícil encontrar más de dos cascadas.

“La variable de lazo Interno es la posición de la válvula” Es importante notar las siguientes diferencias entre las estructuras de control de tipo feedback convencional y cascada:

- El esquema de control feedback sólo emplea un controlador, mientras que en el esquema de control en cascada se emplean dos controladores., es decir necesita una mayor inversión en instrumentación
- En el esquema de control feedback el set-point del controlador se fija externamente (normalmente lo fija el operador del proceso). En el esquema de control en cascada el set-point de la variable a controlador sigue siendo fijado de manera externa. Sin embargo, el set-point del controlador esclavo es fijado por el controlador maestro. Es decir, la salida o resultado que produce el controlador maestro es simplemente el set-point al que debe operar el controlador esclavo.
- La velocidad de respuesta del sistema se mejora en el control en cascada, si el lazo secundario tiene una respuesta más rápida que la planta interna.

## **Ejemplo de sistema de control de cascada**

Considérese el sistema de control de temperatura del cuarto mostrado en la figura

Por simplicidad considerar que solo se necesita calentamiento y que este es provisto por el vapor caliente de un sistema de aire circulante. En la figura (a), un termómetro convencional mide la temperatura del cuarto y fija el flujo de vapor dentro de un rango convencional de retroalimentación.

Asumir que el sistema está sujeto a perturbaciones severas, tales como variaciones de la temperatura del aire entrante, de la velocidad de flujo y variaciones en la presión de suministro de vapor.

### Control de Retroalimentación Simple

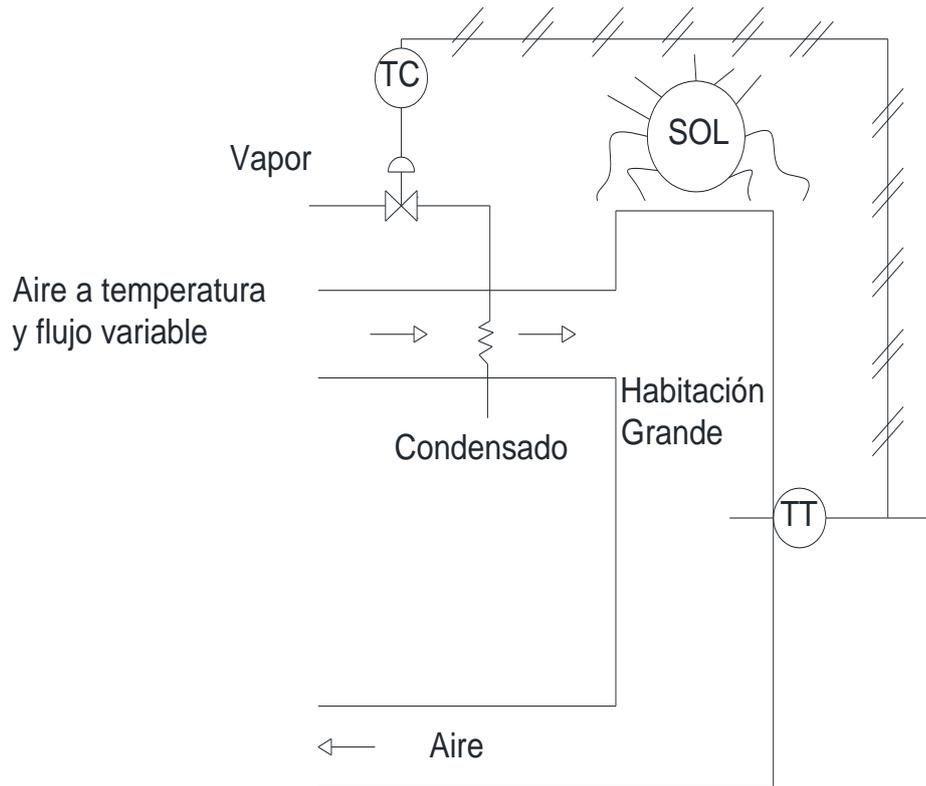


Ilustración 236 “Sistema de control de temperatura del cuarto”

Una inspección reflexiva de la figura a conduce a la conclusión de que el tiempo de retraso asociado con el control de temperatura en el cuarto es considerable. El largo tiempo de retraso es asociado con el tiempo que le toma al cuarto cambiar de temperatura, éste podría ser 15 o 20 minutos. También hay un retraso en la acción correctiva asociado con el cambio de temperatura del vapor, calentando el serpentín. Intuitivamente se podría pensar que éste es de 2 o 3 minutos. El tiempo de retraso asociado con la válvula de vapor y el termómetro es ignorado.

Las razones por las cuales usamos un sistema de control en cascada son:

1. Para preservar la relación deseada entre las variables controladas.
2. Para restringir la segunda variable controlada correctamente.
3. Para decrementar la no linealidad y la no continuidad del cambio de carga al fin de la aumentación.

4. Para desarrollar el circuito de control decrementando el tiempo de demora.

La figura (b) muestra un arreglo en cascada en el cual un lazo secundario de control de retroalimentación de temperatura, mide y controla la temperatura del aire entrante. Un lazo primario de control de temperatura mide y controla la temperatura del cuarto manipulando el punto de referencia o valor deseado sobre el lazo de control secundario para la temperatura del aire entrante.

#### Sistema de control en cascada

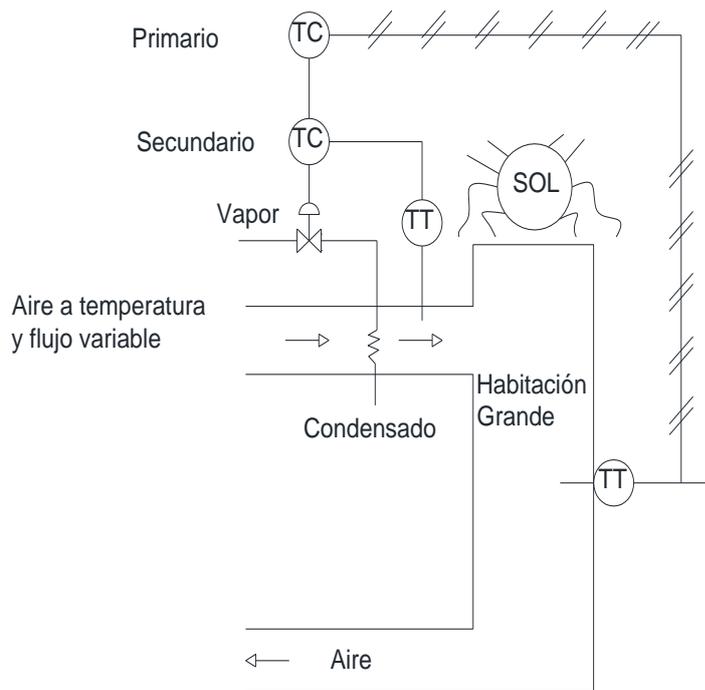


Ilustración 237 “Sistema de control del cuarto en cascada”

Con el sistema de cascada mostrado en la figura (b), ahora se conoce cómo este responderá a las perturbaciones o variaciones en la temperatura del aire entrante o en la velocidad de flujo de vapor. Claramente perturbaciones que afecten al serpentín serán percibidas por el lazo

secundario localizado y la acción correctiva puede ser tomada inmediatamente para evitar el deterioro en la temperatura actual del cuarto.

O sea con cascada tratamos de neutralizar la perturbación, por lo tanto si la temperatura en la cañería de calefacción baja, el Tic-2 (secundario) mandara a abrir la válvula de control, mientras que durante ese lapso de tiempo el Tic-1 (primario) permanece invariable (o sea que la temperatura del ambiente no se entera de nada).

### **Consideraciones del control cascada**

Cuando en la práctica se pone en utilización el control en cascada, lo que logramos es que el lazo de control sea más estable y su respuesta más rápida.

Yendo al trabajo de los lazos de control en planta, cuando arrancamos un proceso, primero los lazos están trabajando en manual, y pasando un determinado tiempo, estos se pasan a automático.

En el caso de tener un sistema en cascada, primero se pasa a automático el lazo interno o secundario y en segundo lugar el lazo externo o primario.

Para el último ejemplo planteado, primero pasamos a automático el Tic-2 (secundario), mientras el Tic-1 (primario) permanece en manual y luego se pasa a automático el Tic-1 (primario).

Otra consideración que podemos hacer sobre el “control en cascada”, es sobre las variables de lazo interno, como hemos demostrado el control en cascada promete ser un sistema de fácil utilización, con buenos resultados, pero hay que tener en cuenta las variables que se manejan.

De estas variables las más comunes son caudal y presión, que son típicamente rápidas y estarían en el lazo interno y el lazo externo será la temperatura o nivel.

Nunca usar cascada “caudal” sobre “caudal” y debemos evitar “presión sobre caudal”. Y cuando se dé “temperatura sobre temperatura”, los que diseñen el lazo de control deberán realizar un análisis muy fino.

## **Avanación o control pre alimentado**

### **Perturbaciones medibles y no medibles**

Debemos hacer hincapié en el hecho de que, si no existiesen perturbaciones, de poco servirían los sistemas de control. Y cuanto mejor las conozcamos, tanto mejor podremos diseñar el sistema de control. Así, debemos notar que en muchos casos es conveniente poder medir las perturbaciones, si esto es posible. Por ejemplo, se pueden medir en un horno la temperatura de entrada del fluido y su caudal. Estas variables se denominan perturbaciones medibles.

En oposición, existen perturbaciones no medibles (o de muy difícil estimación), como el coeficiente de transferencia de calor, que se ve drásticamente disminuido por la acumulación de sales en el serpentín.

### **Avanación o Control prealimentado**

Si repentinamente existe, por ejemplo, una fuerte disminución de la temperatura de entrada del fluido que desea calentarse, el sensor de temperatura TT recién acusará este efecto en la temperatura de salida transcurrido un cierto tiempo, cuando el fluido haya salido del intercambiador, y solo entonces podrá efectuarse alguna acción de control para corregir dicho efecto.

Ahora bien, siendo la temperatura de entrada una perturbación medible, resulta lógico pensar que se podría efectuar una acción correctiva más rápida si se informa al controlador de dicho

cambio en la variable de carga. Este es el principio básico del Control por Avanzación o prealimentado, que se ilustra en la Figura 5. En la nomenclatura anglosajona, este tipo de control es denominado feedforward -"alimentar hacia adelante"- en contraposición al control realimentado o feedback.

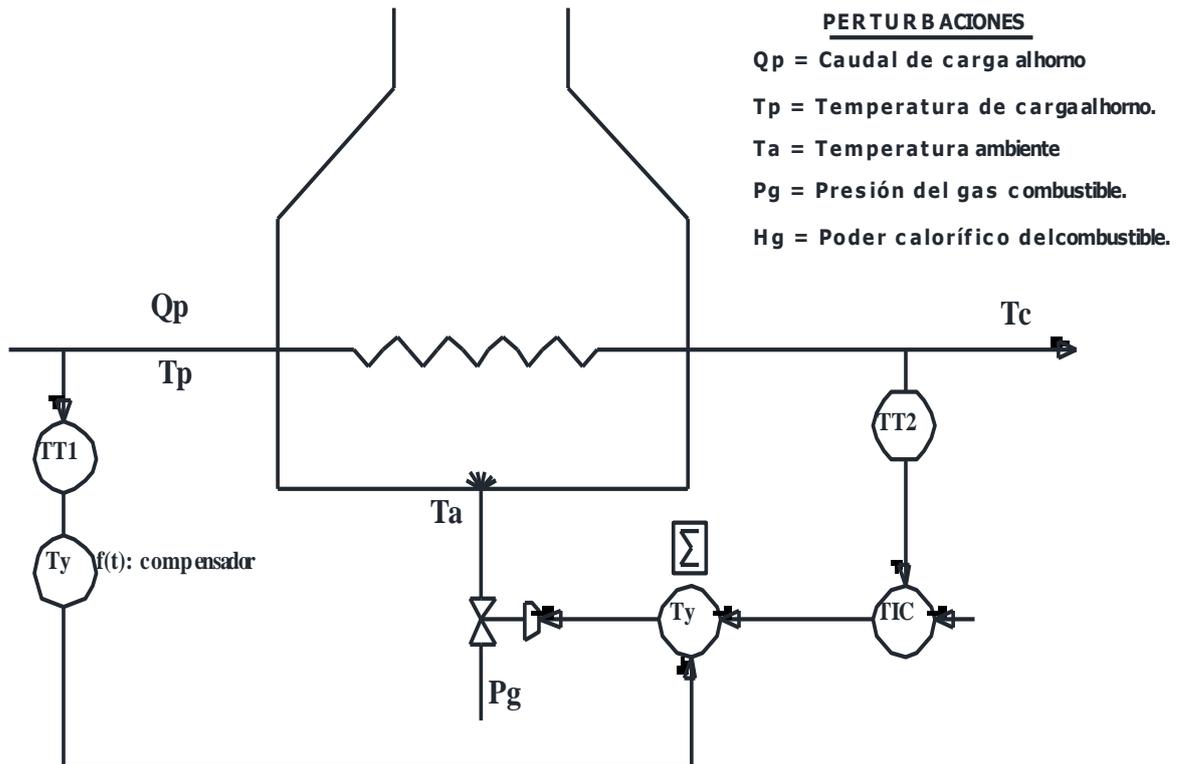


Ilustración 238 "Representación proceso industrial control prealimentado"

Si la temperatura del producto a meter en el horno perturba colocamos un (TT1), y suponemos que la temperatura disminuye, el (TT1) manda la orden para hacer entrar más gas, a pesar de que la perturbación no afecta aún a la temperatura de salida del horno.

El Ty [f(t)] es el compensador, es el que ayuda a saber cuánto más gas debemos agregar, o sea como debemos compensar. O sea que actuamos adelante en el camino en que se propaga la

perturbación dentro del proceso, tratando de generar un efecto antagónico al que esa perturbación puede provocar sobre nuestra variable directamente controlada.

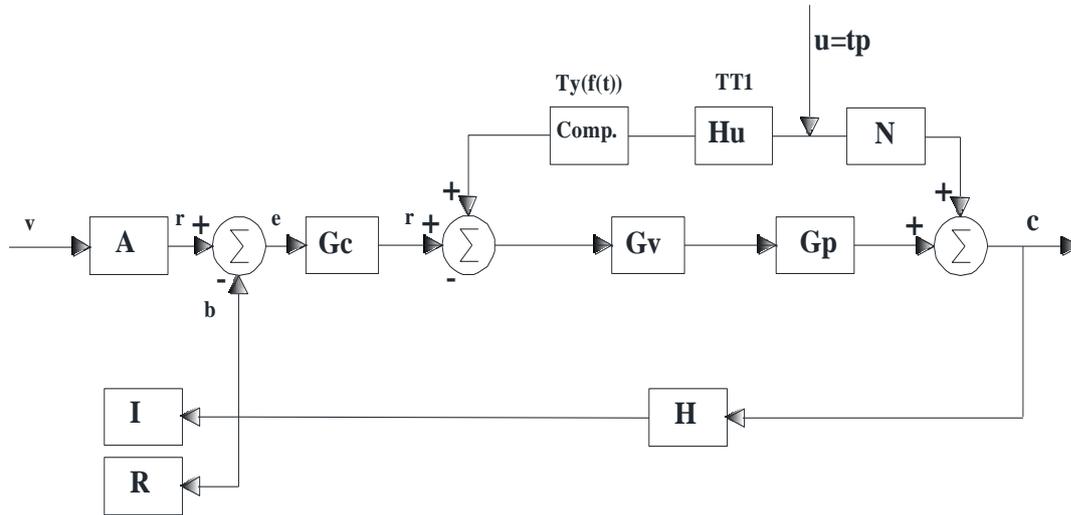


Ilustración 239 "Diagrama de bloque proceso industrial control prealimentado"

Si tomamos un instante determinado de tiempo, vemos que  $\Delta m_1$  de (GC) es nulo pues en ese lapso no cambia su salida entonces: si ambos caminos fuesen iguales, es decir la misma función de transferencia, el efecto de la perturbación sería anulado.

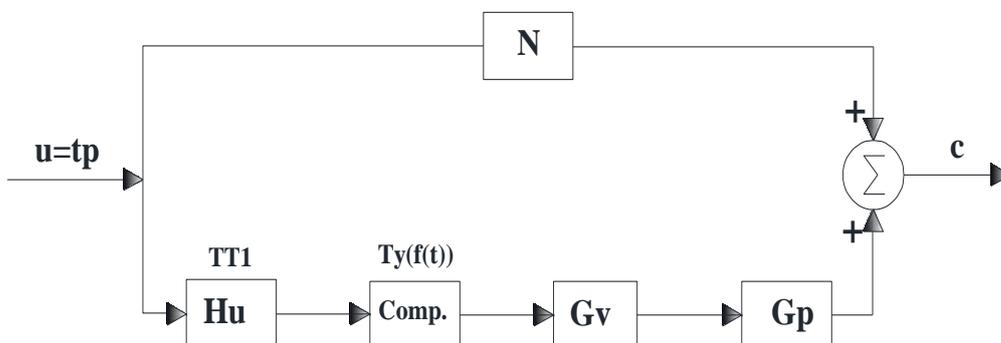


Ilustración 240 "Diagrama de bloque proceso industrial control prealimentado"

El compensador: (función de temperatura)

$$\text{Compensador electrónico } (S) = \frac{k_1 T_{c1} S + 1}{T_{c1} S + 1}$$

$$\text{Compensador neumático } (S) = \frac{T_{c1} S + 1}{\frac{T_{c1}}{k_2} S + 1}$$

Controlador :  
P+I

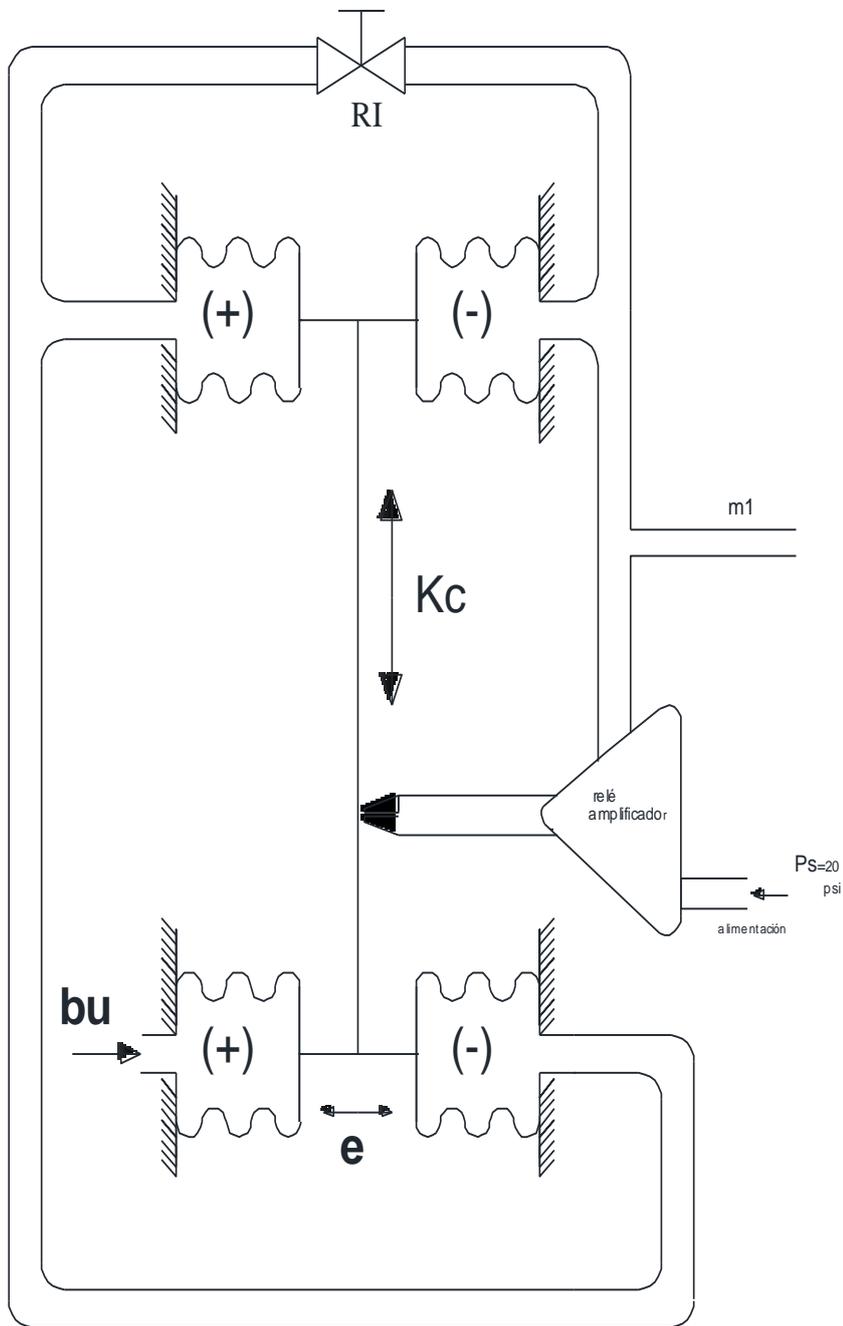


Ilustración 241 "Representación Controlador P+I"

Parece un controlador P+I, pero si observamos la señal que va al fuelle de realimentación positiva también va al fuelle del comparador [(o sea comparamos la señal de salida m1 con la entrada bu (que viene en nuestro ejemplo del TT1 (temperatura))].

- Veamos también que el sistema busca igualar la salida con entrada.

### Combinación de cascada Avanciación

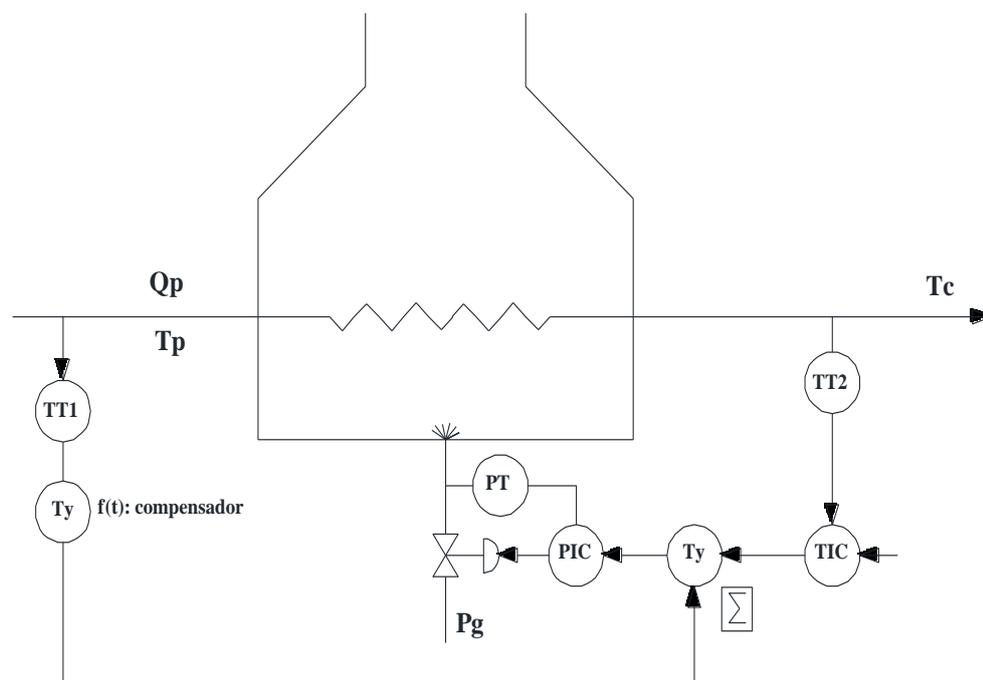


Ilustración 242 “Proceso industrial combinación de cascada y avanciación”

En esta combinación de cascada y Avanciación sabemos que el lazo interno (el de control de presión es más rápido que el de control de temperatura), y supongamos que:

1. Entra una perturbación por cambio de temperatura de entrada al horno.
2. En ese instante de tiempo aún no ocurrió cambio en la variable que es el objetivo del sistema, la salida del horno.

3. Cualquier señal que modifique la orden que el PC haya dado sobre la válvula y no vaya acompañada de una orden simultánea desde el Tic será interpretada por el PIC como una perturbación de su lazo, y cancelada en pocos segundos, y allí terminó toda nuestra compensación.

La conclusión es:

Avanacción debe entrar modificando la orden sobre el lazo interno.

De acuerdo a lo comentado, Avanacción modifica la orden que va desde el lazo externo, y siendo este un lazo lento no reacciona y permite la compensación.

## **CAPITULO 9**

### **Intercambiadores de calos**

#### **Sistemas de control en intercambiadores de calor**

El intercambiador de calor es cualquier dispositivo en el que se verifica un intercambio de calor entre dos fluidos separados por una pared. Si se tiene en cuenta que cualquiera de los fluidos puede ser un líquido, un gas, un vapor condensable o un líquido en ebullición, el número de cambiadores de calor es muy elevado. El fluido caliente se denomina fuente y el frío se denomina receptor. La transferencia de calor se define por la función que llevan a cabo en el proceso, clasificándose:

**Intercambiador:** Recupera el calor por intercambio entre dos corrientes de proceso, exceptuando vapor de agua y agua de refrigeración que son servicios auxiliares.

**Calentador:** Se utiliza fundamentalmente para calentar corrientes de proceso, generalmente con vapor de agua.

Enfriador: Se utiliza fundamentalmente para enfriar corrientes de proceso, generalmente con agua.

Condensador: Es un enfriador cuyo uso fundamental es el de eliminar calor latente de condensación.

Reboiler: Es un calentador que tiene como función principal la de aportar calor latente en proceso de destilación.

Evaporador: Se utiliza para concentrar alguna solución evaporando el agua.

Como intercambiador de calor tenemos en cuenta para nuestro caso el de tubo y camisa que puede efectuar intercambios entre dos líquidos, entre un líquido y vapor, para que condense éste último, entre vapor de agua y un líquido, para elevar su temperatura, como así también el intercambiador de gases calientes y agua para obtener vapor, no olvidando del precalentador del aire de alimentación a caldera utilizando los gases de escape de la misma.

Además, tenemos las torres de enfriamiento (tan comunes en las centrales de generación), y se plantea también el caso de un GVRC (generador de vapor por recuperación de calor) que es un gran intercambiador de calor (generando vapor con los gases de escape de turbinas de gas, o sea una caldera sin quemadores).

## Control convencional de un intercambiador

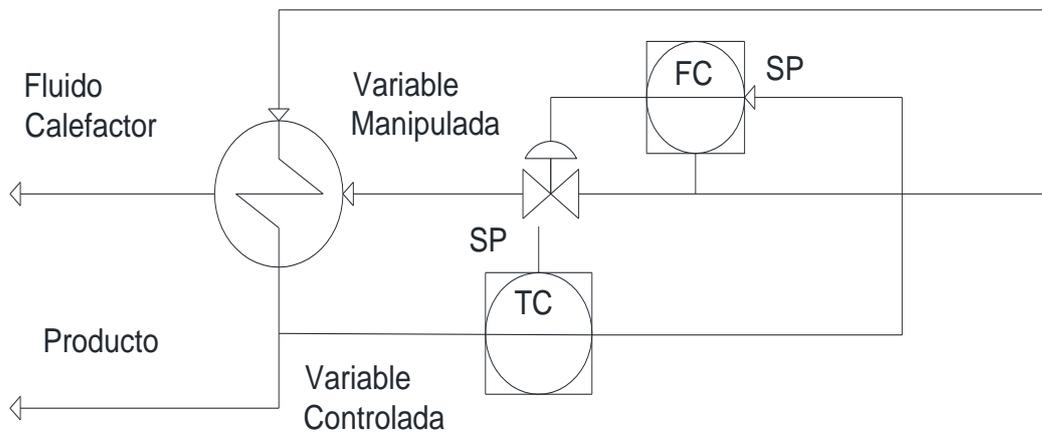


Ilustración 243 "Control del intercambiador de calor"

En esta figura se observa un típico control de intercambiador de calor en el cual el controlador de temperatura de producto fija el punto de consigna de controlador de caudal del fluido calefactor. Este tipo de control para modificar la variable manipulada, necesita detectar el error producido entre la medida de la variable controlada y el set point, produciéndose un control por un lazo de control con retroalimentación.

Basándose en el esquema de arriba se puede decir que en el control de un intercambiador de calor pueden presentarse una o varias de las perturbaciones siguientes:

- Cambio en las condiciones de la corriente de proceso o producto. Esto puede ocurrir si existen variaciones en el caudal o en la temperatura del mismo.
- Cambio en las condiciones del fluido calefactor, como pueden ser variaciones en la temperatura, o la presión si el fluido es vapor.
- Cambio en el propio proceso en si, como ocurre en un proceso de reacción, cuando en el circuito esta intercalado un intercambiador.

El control convencional de un intercambiador de calor se realiza utilizando la temperatura de salida de producto como variable controlada. La variable manipulada es el caudal del fluido calefactor. En algunos sistemas se puede eliminar el controlador de caudal, bien por razones económicas o en dificultad en su medida, aunque, como norma general, es preferible utilizar este controlador para mayor estabilidad del sistema.

En el caso de producirse una perturbación brusca, por ejemplo, una variación en el caudal del producto o una variación en la temperatura del fluido calefactor, se producirá un desajuste en el control de temperatura durante un periodo de tiempo más o menos largo. Esta perturbación se elimina se utilizando un sistema feedforward.

## **Elementos del sistema de control**

### **Sensor de temperatura**

En la detección de temperatura se produce un tiempo muerto debido a circunstancias tales como la naturaleza de la variable a medir, la inercia que produce la vaina de protección del sensor, así como la cámara de aire que existe entre la vaina y el propio sensor. Por tales motivos, el sensor debe estar instalado tan cerca como sea posible de la superficie activa del intercambiador.

### **Elemento de acción final:**

Las válvulas utilizadas en los sistemas de control de intercambiadores de calor deben estar provistas de posicionador, con el fin de que la respuesta de control sea lo más rápida para no aumentar la inercia propia del sistema. Por otro lado, la característica de la válvula debe ser isoporcentual con el fin de mantener la ganancia del sistema constante.

### **Controlador:**

El lazo de control de temperatura suele tener tiempo de respuesta relativamente lento, por lo que el controlador debe tener acciones proporcionales, integrales y derivativas.

La ganancia proporcional dependerá en cada caso de la configuración del lazo de control y del rango de calibración del controlador. La acción integral tiene por objeto corregir el error permanente que produce la acción proporcional cuando se realiza los cambios en las variables. Por último, la acción derivativa es esencial en procesos de este tipo, donde el tiempo de retardo suele ser grande cuando se producen cambios en las variables de proceso.

## **Intercambiadores de Calor**

**Caso N°1:** Para calefaccionar líquidos, con trampa de vapor incorporada.

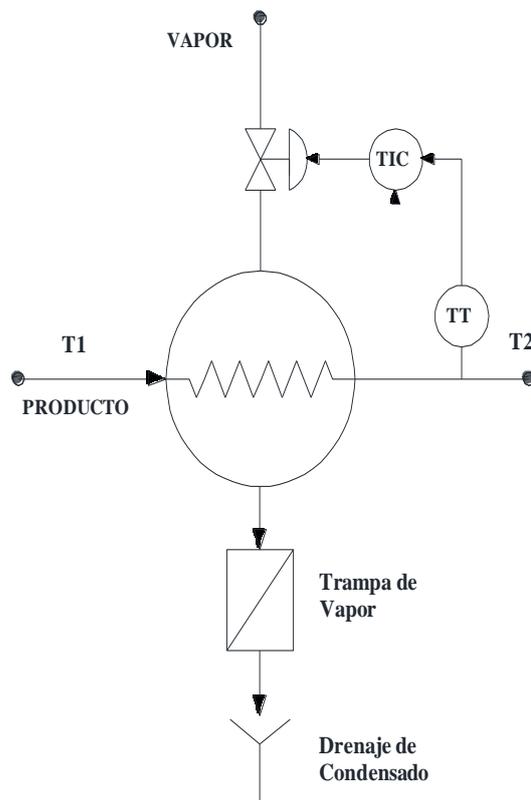


Ilustración 244 “Sistema de control de calefacción de agua con trampa para vapor”

**Caso N°2:** Es similar al primer caso, en donde se sustituye la trampa de vapor y se coloca un acumulador de condensado con control de nivel, de esta manera se reducen las oscilaciones generada por la trampa.

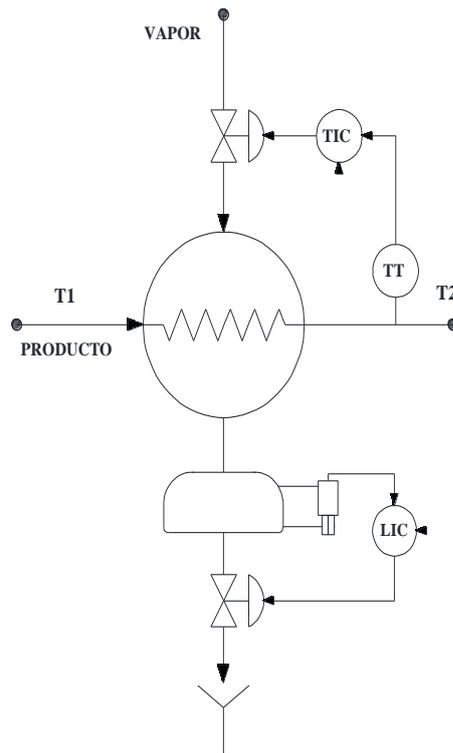


Ilustración 245 “Sistema de control de calefacción de agua con acumulador de condensado”

**Caso N°3:** Se trabaja con condensado inundando parte del haz de tubos y la variable controlada es la temperatura del producto.

Este puede ser el caso del condensador de una turbina de vapor, si así fuere es conveniente colocar en el condensador un lazo automático de control de nivel.

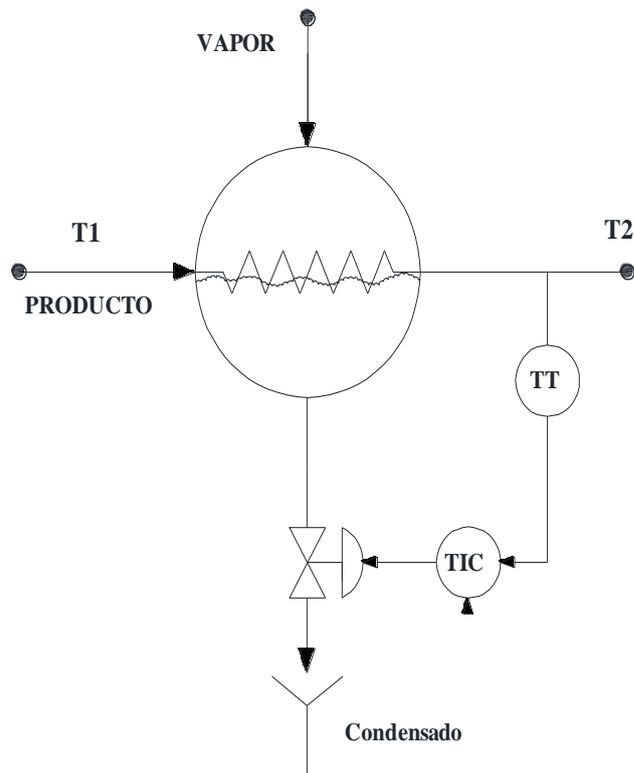


Ilustración 246 “Condensador-lazo automático de control de nivel-temperatura

**Caso N°4:** Similar al caso 3, pero la variable controlada es la presión.

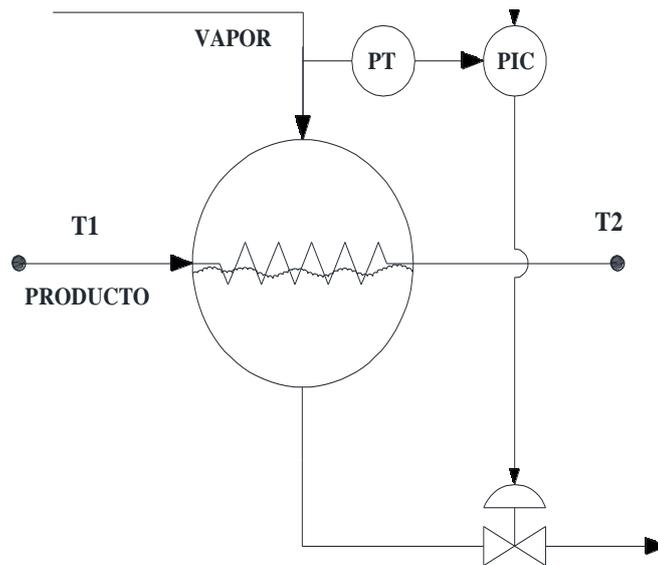


Ilustración 247 “Condensador-lazo automático de control de nivel-Presión

**Caso N°5:** Los sistemas térmicos se caracterizan por ser lentos.

En lo que hemos visto hasta ahora cuando la temperatura que se debe controlar es crítica e interesa una decadencia rápida, se recurrirá al mezclado de productos de distintas temperaturas ya que es el más rápido de todos.

Lo que hacemos es sobredimensionar el intercambiador y se bifurca parte del producto a calefaccionar, que se vuelve a mezclar después del intercambiador.

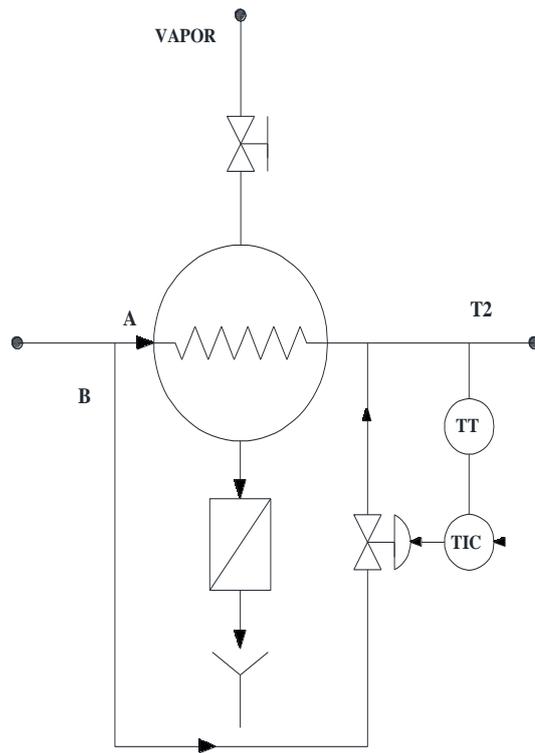


Ilustración 248 “Mejora del sistema de calefacción de líquido-mezcla de líquido”

**Caso N°6:** La ventaja que al incorporar una válvula de tres vías actúa como una mezcladora y trata de mantener el flujo constante. El posicionador es conveniente colocarlo en este caso por la estabilidad.

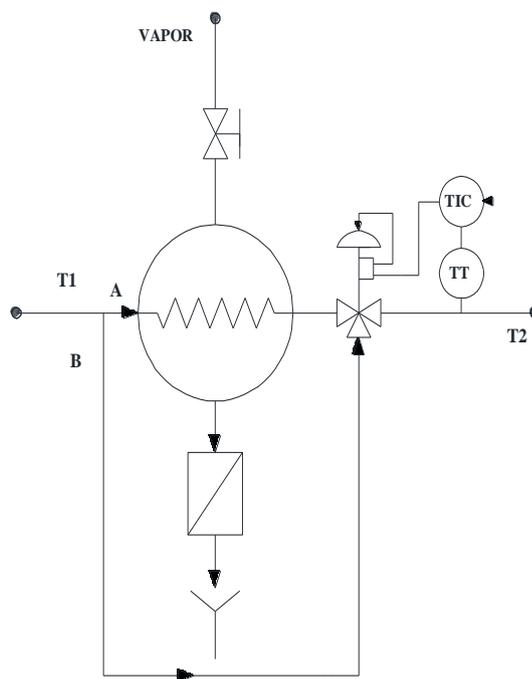


Ilustración 249 “Mejora del sistema de calefacción de líquido-mezcla de líquido- válvula de tres vías”

**Caso N°7:** En el caso de que haya variaciones en la presión de vapor, es conveniente colocar un lazo de control de presión.

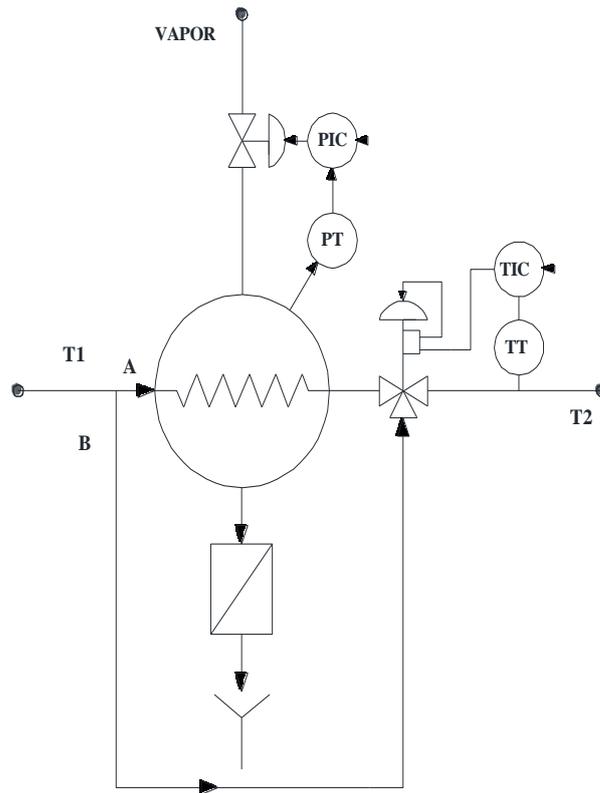


Ilustración 250 “Mejora del sistema de calefacción de líquido-mezcla de líquido- válvula de tres vías con lazo de control de presión”

**Caso N°8:** En este caso se plantea una alternativa del caso 7, en donde el medio calefactor es un líquido en lugar de vapor de agua, para prevenir el sobrecalentamiento del fluido en la camisa; si la temperatura se mantiene constante para el segundo lazo de temperatura, cuando aumenta el caudal a ser calefaccionado, el calefactor se enfría más y abrirá para aportar más calor y viceversa.



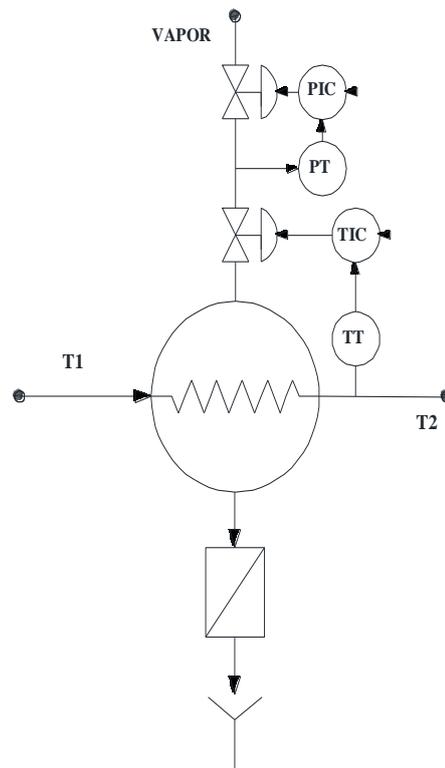


Ilustración 252 "Sistema de calefacción, control de temperatura en función del lazo de control de vapor"

**Caso N°9 (B):** Si en el caso anterior controlamos la temperatura y la presión de alimentación de vapor, pero tan solo con una válvula para disminuir costos y mejorar la estabilidad, se obtiene un lazo de control en cascada.

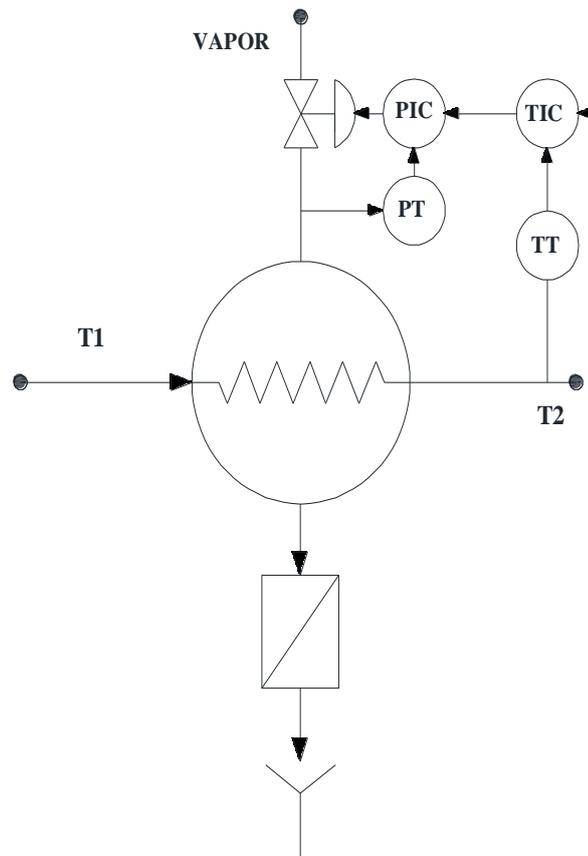


Ilustración 253 "Sistema de calefacción, control de temperatura en función del lazo de control de vapor con una válvula"

**Caso N°10:** Para poder mejorar la transferencia de calor y la dinámica del sistema, se trabaja con circulación forzada. La válvula de tres vías regula cuanto caudal pasa y cuánto va al drenaje

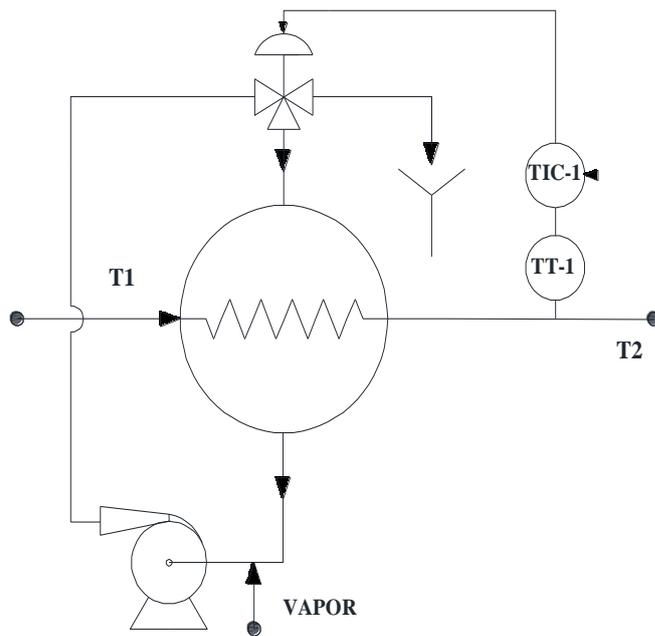


Ilustración 254 "Incorporación del circuito de circulación forzada más válvula de tres vías"

**Caso N°11:** Esta internamente relacionado con el caso 10, se incorpora un lazo interno de temperatura que mejora la variable de salida, esto se debe porque el lazo interno es más rápido por estar conectado en cascada.

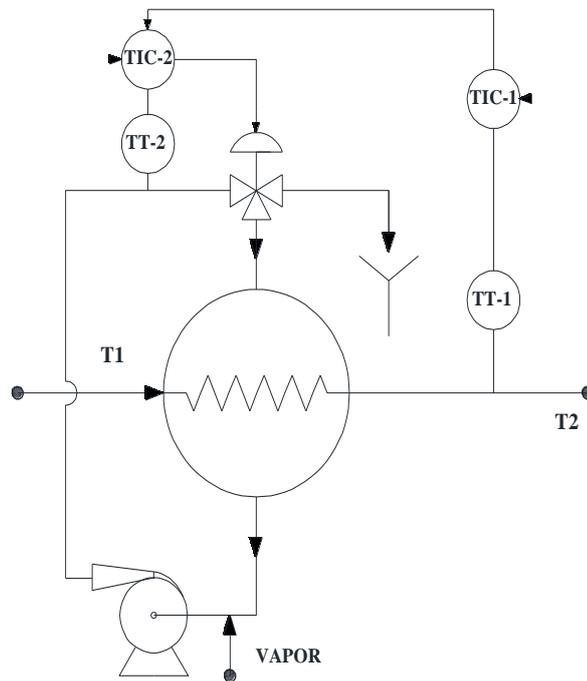


Ilustración 255 "Incorporación del circuito de circulación forzada más válvula de tres vías y lazo de control interno de temperatura"

## Torres de enfriamiento

Las máquinas y los procesos industriales generan enormes cantidades de calor que deben ser continuamente disipadas si se quiere que esas máquinas y procesos operen de forma eficiente.

Las torres de enfriamiento permiten el control del proceso de enfriamiento mediante la evaporación controlada, reduciendo así la cantidad de agua consumida.

Básicamente podemos clasificarlas en

- Torres de circulación natural
  1. Atmosféricas
  2. Tiro natural
- Torres de tiro mecánico
  1. Tiro inducido

## 2. Tiro Forzado

- Otros tipos: Torres de flujo cruzado

### Control de las torres de enfriamiento

El objetivo principal de control se basa en cumplir con la demanda de frío de la planta. Esta demanda en general se expresa por el producto de la temperatura y el caudal del agua fría, aunque en muchos casos se da sólo en función de la temperatura del agua fría. Para satisfacer ese objetivo, existen varias soluciones de implementación en los diferentes niveles relativos al sistema de control, instrumentación y elementos finales de control.

La capacidad del sistema de control automático de monitorear las variables a controlar tiene como resultado una operación más eficiente que la simple operación manual. En este esquema, la sola medición de temperatura del agua fría y su comparación por un valor de set-point predeterminado, determina si se necesita más o menos caudal de aire. El modo de control puede ser más o menos eficiente, dependiendo de los elementos finales que se posea para regular el caudal del aire, y consecuentemente será el ahorro energético.

En general, se tendrán que controlar varios motores, por lo que la elección de cuáles y cuántos motores deben estar encendidos o apagados, o a una determinada velocidad, no es trivial, si se desea producir un ahorro de energía real. Es por eso que la implementación de un algoritmo de control inteligente que evalúe cuál es la selección y velocidad de ventiladores óptima puede brindar al sistema de control de torres de enfriamiento una capacidad mejorada.

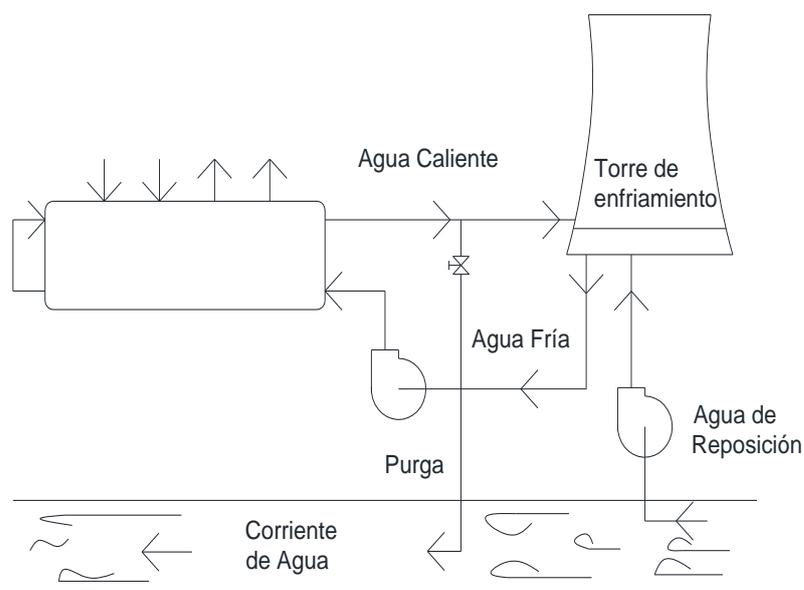


Ilustración 256 “Esquema de instalación de una torre de enfriamiento”

Un sistema que intente optimizar el manejo de torres de enfriamiento debe contar como mínimo con los siguientes elementos:

- Medición de temperatura ambiente
- Medición de la temperatura del agua caliente
- Medición de la temperatura del agua fría
- Medición de temperatura de bulbo húmedo del aire que ingresa a la torre
- Temperatura de aire bulbo seco que ingresa a la torre
- Medición de caudal de agua fría
- Actuación sobre los ventiladores (Flujo de aire)

### Control de torre de enfriamiento

En el siguiente dibujo veremos cuatro lazos de control que se utilizan para controlar el funcionamiento de una torre de enfriamiento:

- 1) Lazo de control de nivel de la pileta colectora, para compensar el consumo por vaporización, posibles pérdidas, purgas continuas e intermitentes, como así también el arrastre por el aire.





Se hace necesario contar con generadores de vapor en los que se debe resaltar: La Confiabilidad, La Independencia Operativa, La Seguridad y La Eficiencia.

Todas estas condiciones dependen del equipamiento del generador de vapor, pero además está muy vinculada con el sistema de control necesario para su operación.

La caldera de vapor es el equipo industrial encargado de proveer energía térmica, bajo la forma de vapor de agua.

En las calderas la variable sobresaliente es la presión, le siguen la temperatura del vapor y el caudal a suministrar. la presión es indicadora del desbalance de energía de entrada y salida; el caudal es la variable manipulada para variar la potencia entregada y la temperatura del vapor sobrecalentado la que nos define la energía obtenible o el salto entálpico.

En cualquier caso, ya sea alimentando Intercambiadores de Calor, Columnas de Destilación o una Turbina de Vapor que produce Energía Mecánica en el eje de un Generador de Energía Eléctrica, se producen requerimientos de vapor sumamente variables en su forma y tamaño, y la caldera tiene que absorber todos estos cambios de demanda.

Esta necesidad de suplir una demanda variable condicionará el diseño mecánico, la operación y el diseño de los Lazos de Control que se instalen.

La relación entre una variable Controlada con una variable Manipuladora no es única, pues al corregir una variable se modifican otras.- Una serie de Lazos de Control tienen una gran cantidad de elementos especiales de Control, sumadores, divisores, multiplicadores, etc. que aumentan el número de componentes de regulación en una Sala de Control de Calderas.

En una caldera industrial se pueden encontrar las siguientes variables:

- 1) Caudal de agua de alimentación
- 2) Presión de agua de alimentación
- 3) Nivel máximo en la Caldera humotubular
- 4) Nivel mínimo en la caldera humotubular
- 5) Nivel mínimo peligroso
- 6) Estos mismos niveles en el domo de la caldera acuotubular
- 7) Composición del agua:
  - PH
  - Conductividad
  - Oxígeno disuelto
- 8) Caudal de combustible
- 9) Presión de combustible
- 10) Caudal de aire
- 11) Temperatura de gases de combustión
- 12) Composición de gases de combustión
- 13) Temperatura de vapor
- 14) Presión de vapor
- 15) Caudal de vapor

### **Circulación:**

Natural: El H<sub>2</sub>O circula por la diferencia de densidad entre el H<sub>2</sub>O frío y el H<sub>2</sub>O caliente, O sea esto se produce por convección.

Forzada: Se obliga al H<sub>2</sub>O a viajar a través de todos los circuitos generadoras de vapor en la dirección deseada, independientemente del calor aplicado.

Generalmente la caldera de circulación forzada se distingue de la de circulación natural por la superficie de evaporación, dado que el sobrecalentador, economizador, calentador de aire, etc. son iguales.

Los ductos ya no son tan grandes como en los de circulación natural, o sea se reducen los tubos y se eliminan los domos, de esta manera se usan bombas en su lugar.

En general se usan para presiones  $>120(\text{kg}/\text{cm}^2)$  en algunos fabricantes dicen que la circulación NATURAL puede acceder bien hasta Presiones  $< 180 (\text{kg}/\text{cm}^2)$

## **El control de Calderas**

Es complejo dado que tiene varios subsistemas relacionados entre sí (control de presión y combustión) (Aire combustible), y como debe entregar energía térmica, esto da lugar a cargas variables.

En una Caldera con Domo, el Nivel manipula el caudal de H<sub>2</sub>O de alimentación, la Presión, el caudal de combustible, y la Potencia Eléctrica, la velocidad de rotación de la turbina, o la demanda generada, la apertura de la válvula de vapor.-

Habíamos hablado de una Caldera Humotubular, ahora lo haremos de una Acuotubular.

**Domo superior:** cumple con lo siguiente:

- a) En él se da físicamente la interface entre el agua y el vapor.
- b) Posee un pulmón para poder absorber las variaciones de nivel durante los transitorios.
- c) Calentamiento del H<sub>2</sub>O de alimentación que ingresa.
- d) En el espacio físico necesario para poder mezclar el H<sub>2</sub>O de caldera con productos químicos.
- e) Lugar donde se puede efectuar el purgado del H<sub>2</sub>O de caldera.

En toda caldera en operación debe haber un estado de equilibrio, dado que el vapor producido debe equilibrarse en la cantidad de H<sub>2</sub>O que ingresa.

Por eso el nivel de domo debe mantenerse en un valor estricto.

Si el nivel de domo baja por debajo del nivel de los tubos, estos llegarían a fundirse, y si sube demasiado, el vapor no se separaría bien del H<sub>2</sub>O, llegando a arrastrar H<sub>2</sub>O en el vapor.

**Hogar:** Es el medio de transferencia de calor, es el lugar de la caldera que tiene la mayor superficie de tubos de H<sub>2</sub>O, (paredes, techo y piso) expuestos a la radiación.

**Sobrecalentador:** Su función es la de llevar la temperatura de vapor por encima de la saturación a la presión de domo.

- a) Se incrementa la ganancia termodinámica.
- b) Si el vapor ha de ser utilizado para alimentación de turbinas de vapor, es indispensable que dicho vapor no contenga H<sub>2</sub>O (o sea que este seco).

**Atemperación:** Generalmente las calderas están diseñadas para trabajar en FUEL- OIL y así se diseña el Sobrecalentador. Si la carga aumenta y estamos quemando gas, se llega a temperaturas demasiadas altas para los tubos del Sobrecalentador, entonces debemos usar la Atemperación (bajando de esta manera la temperatura de trabajo).

Lo que se hace es inyectar H<sub>2</sub>O de circulación que entra en contacto con el vapor sobrecalentado.

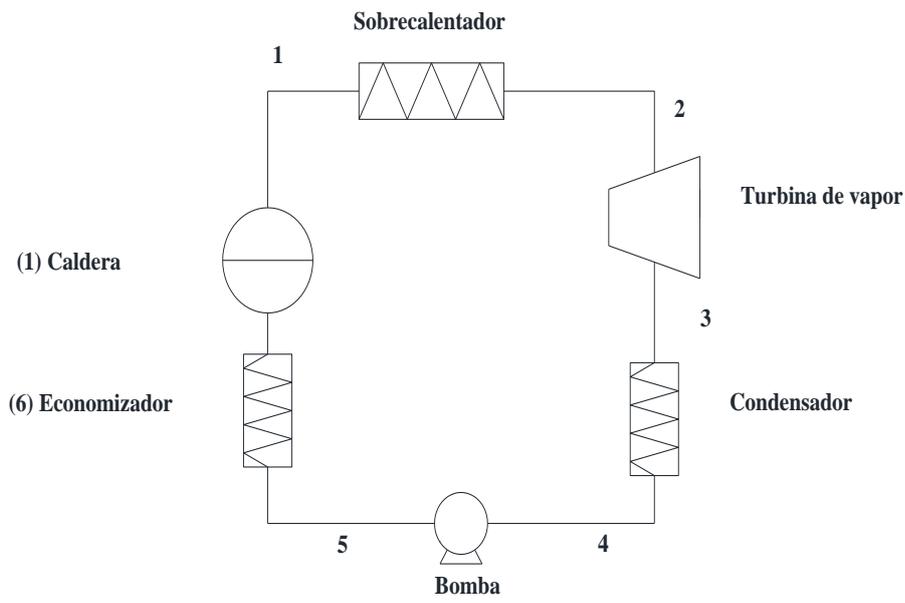


Ilustración 259 “Esquema Ciclo potencia de vapor”

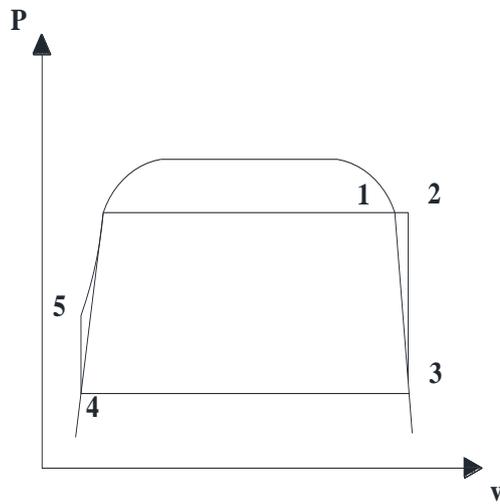


Ilustración 260 “Diagrama P-v del ciclo”

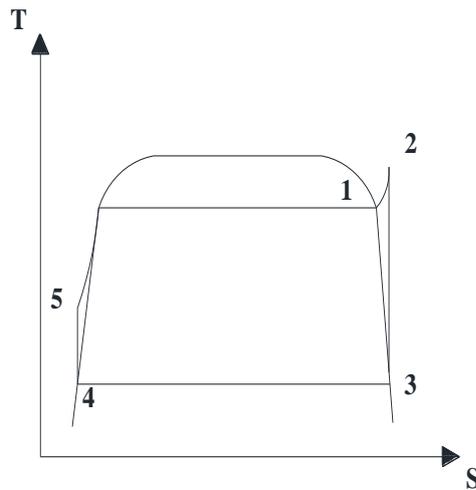


Ilustración 261 Ilustración 262 “Diagrama T-s del ciclo”

Presión: el H<sub>2</sub>O de alimentación al Economizador con una Presión entre 1 y 25% > Presión de la caldera (compensando pérdidas por el propio Economizador y por las tuberías y por las válvulas).

En nuestro caso ingresamos a  $P = 80 \text{ Kg/cm}^2$ .

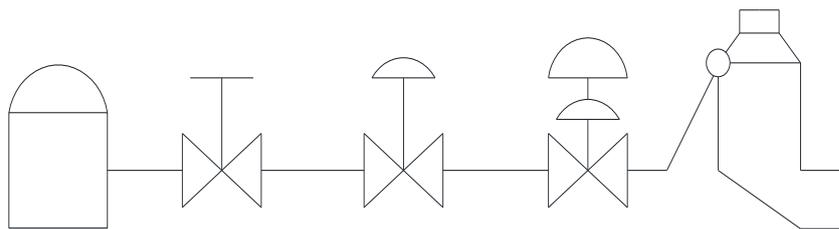


Ilustración 263 “Representación circuito de agua del economizador”

Las pérdidas en el economizador son grandes (en nuestro caso la caldera de recuperación es muy particular, con una distribución de tubos no convencional).

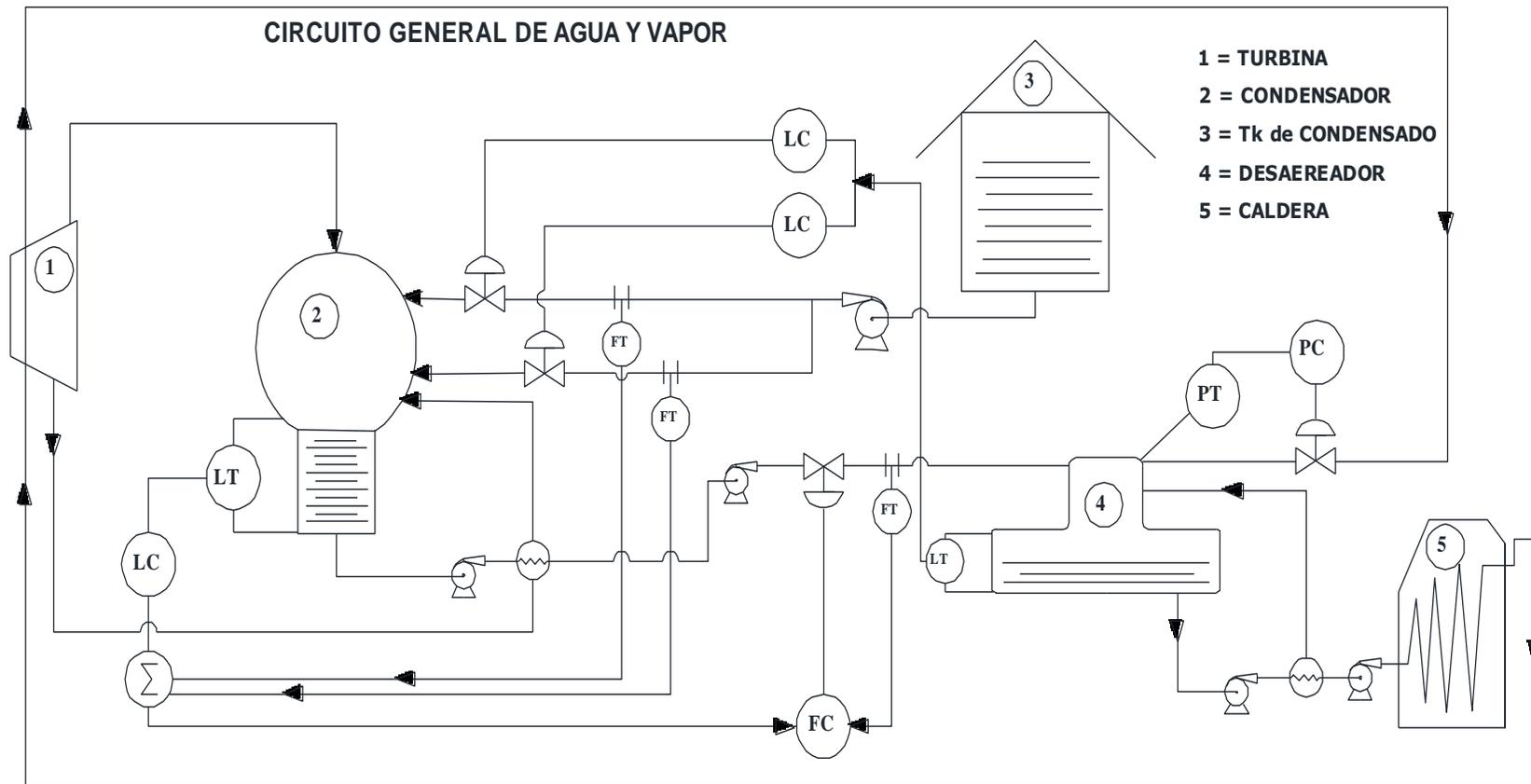


Ilustración 264 “Circuito general de agua y vapor”

En el caso que mencionamos en la figura de la caldera humotubular, encontramos como variables importantes la presión de vapor y el nivel de agua.

Dado que el caudal de agua y la presión de agua quedan fijadas por la bomba de agua, como así también el caudal y la presión de combustible, caudal de aire y temperatura de gases de combustión, porque se ajustan en la puerta a punto de la caldera y por única vez.

También se incorporó un sistema de seguridad en el encendido y otro por nivel peligroso de agua en la caldera.

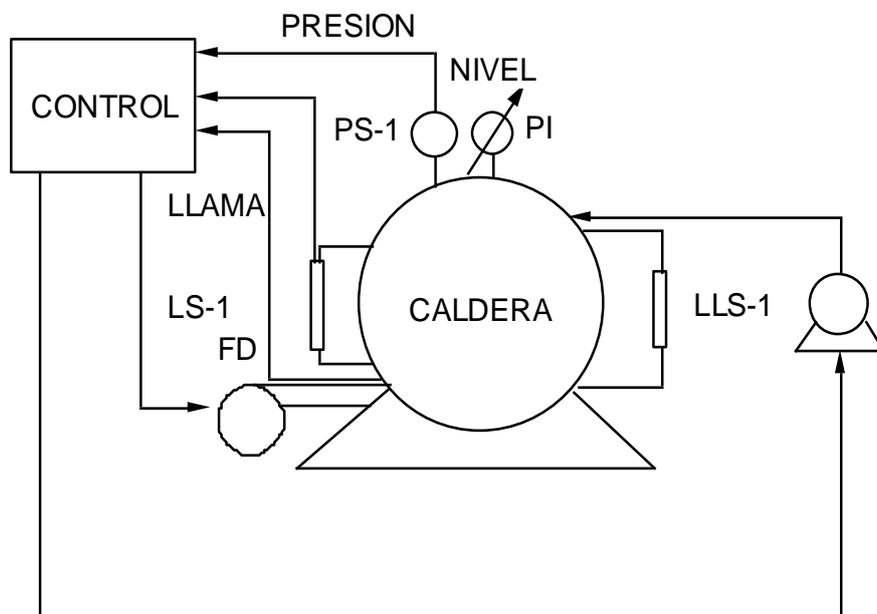


Ilustración 265 “Representación en esquema de control de caldera”

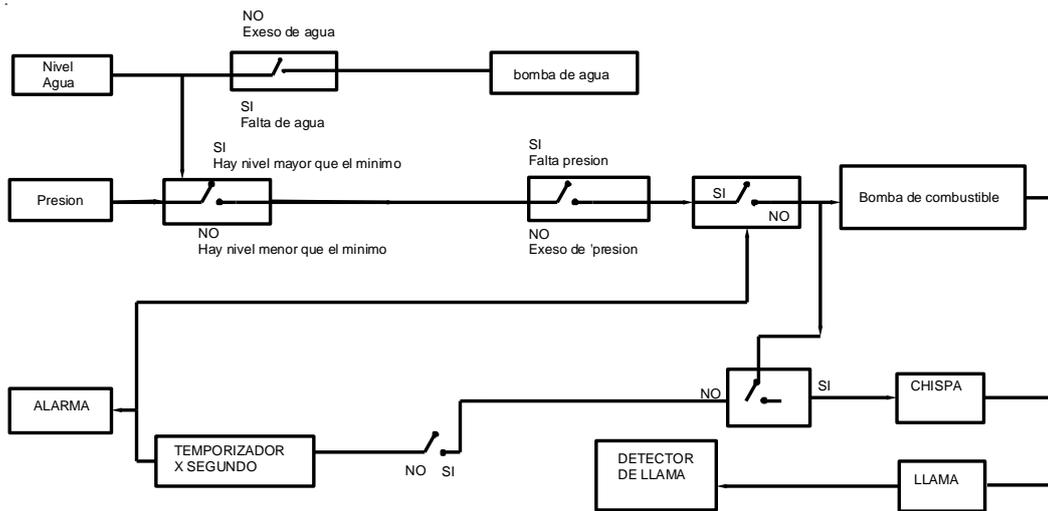


Ilustración 266 "Circuito Lógico control de caldera"

## Vista típica de una caldera de potencia

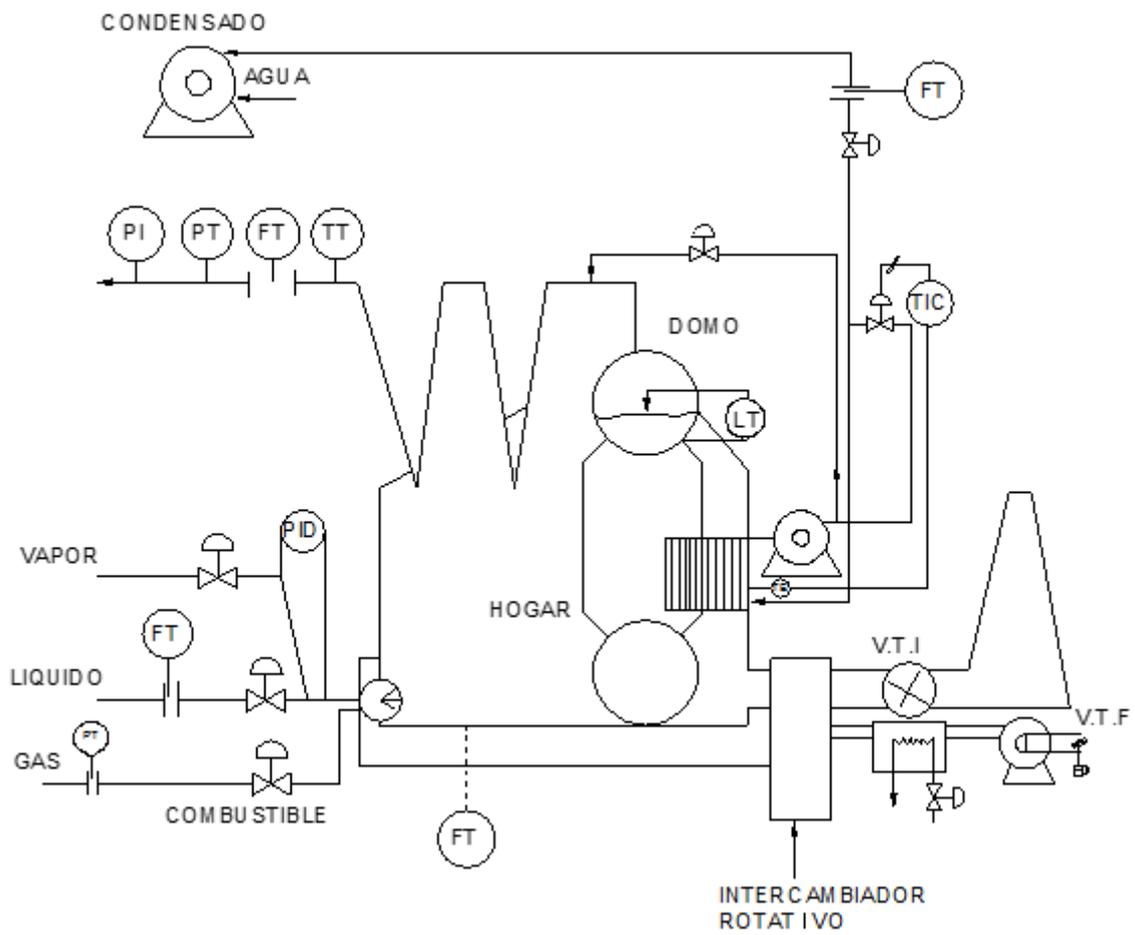


Ilustración 267 "Esquema central de potencia"

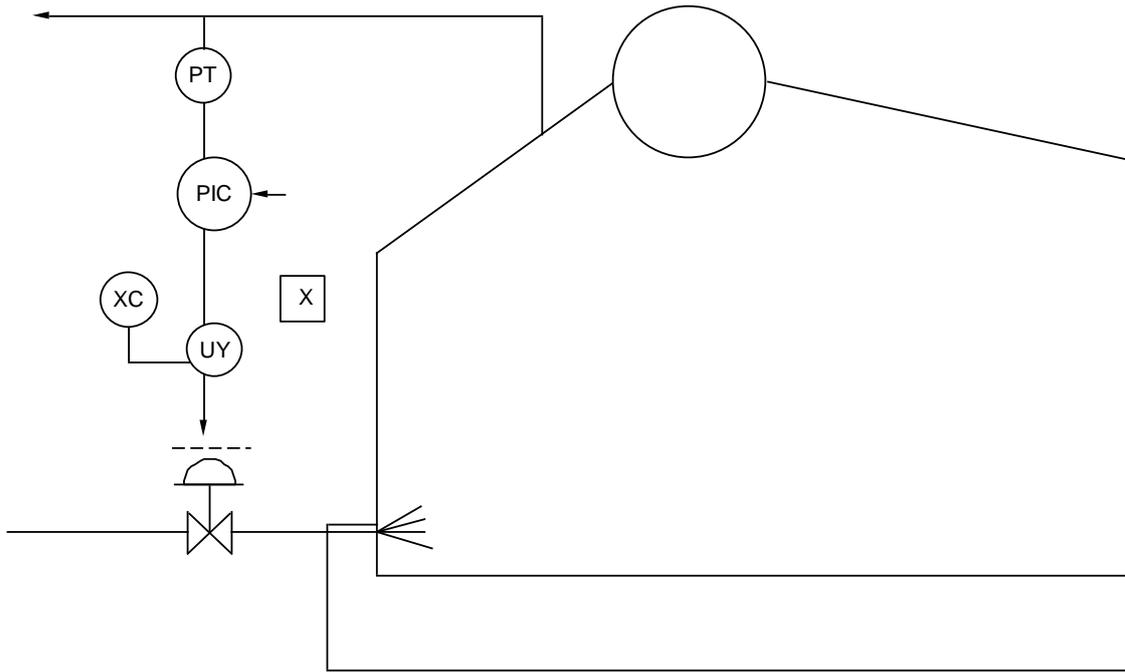


Ilustración 268 “Lazo de control de presión”

Vemos un lazo simple de control de presión de vapor, modificado su comando sobre el control de hogar por un XC.- Este XC podría representar un controlador que detectara alguna variable de la red eléctrica o de un proceso, y acorde con ella la señal correctora de esa variable es empleada para modificar, multiplicando en este caso, la orden del PIC sobre el control de hogar, que lo vemos representado en un rectángulo punteado y en su interior una válvula de combustible a quemadores.

La perturbación principal la provoca el cuarto de vapor quien actúa en el lazo de avanzación por el  $(xc) \rightarrow (uy)(x)$

## Control de Combustión en // con 2 selectores

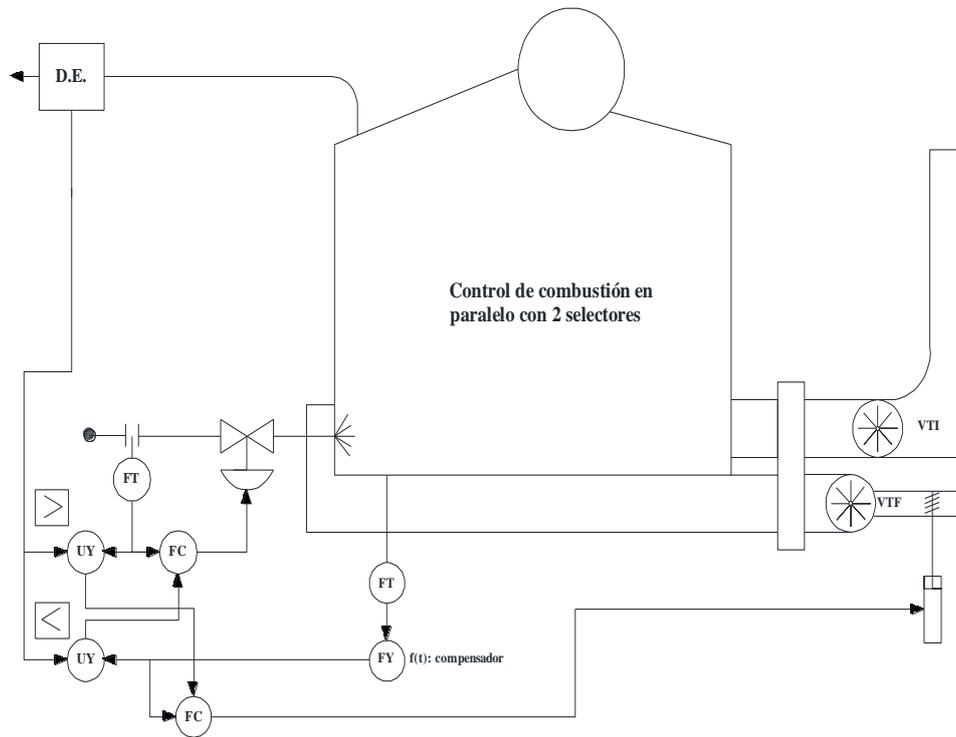


Ilustración 269 "Representación del control de combustión"

## Control de combustión en paralelo con 2 selectores

Los controladores de combustible y aire, con acción de control P+I, tratan de actuar acordes a sus respectivas set- point (flotantes).

En un incremento de carga, el selector de baja recuperará la señal D.E y entrará la señal de aire. El fluido de combustible (set point) se hace con la señal de aire. Simultáneamente el selector de alta rechaza la señal de fluido de combustible, y entra la señal de D.E. en incremento. El sistema está actuando con un sistema de medición, con el combustible siguiendo el aire.

Consideramos ahora un decremento de la carga el selector de baja hace entrar la señal de D.E.; el set point de la demanda de combustible se hace con la señal de D.E. La demanda de aire se vuelve igual al fluido de combustible.- De nuevo el sistema está actuando como en sistema serie, ahora con el aire siguiendo el combustible.

Este sistema // presenta las siguientes características:

- Ante un incremento de la carga, la demanda de combustible no puede ser incrementada hasta que no se produzca un incremento del flujo de aire.
- Ante un decremento de la carga, la demanda de aire no puede ser decrementada hasta no se produzca un decremento en el flujo de combustible.

## Control de nivel de domo

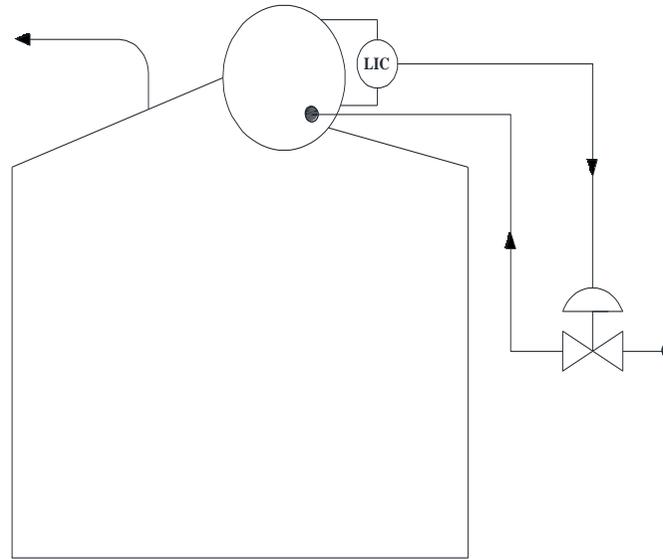


Ilustración 270 "Esquema de control de nivel del domo"

Vemos en el esquema de la figura el control de nivel de domo de un elemento.

Es importante recalcar que este esquema es para un tiempo de residencia en el domo superior a unos 8 a 10 minutos. Esto puede aplicarse a calderas antiguas, pero calderas modernas con agilidad de respuesta no permiten un control de este tipo.

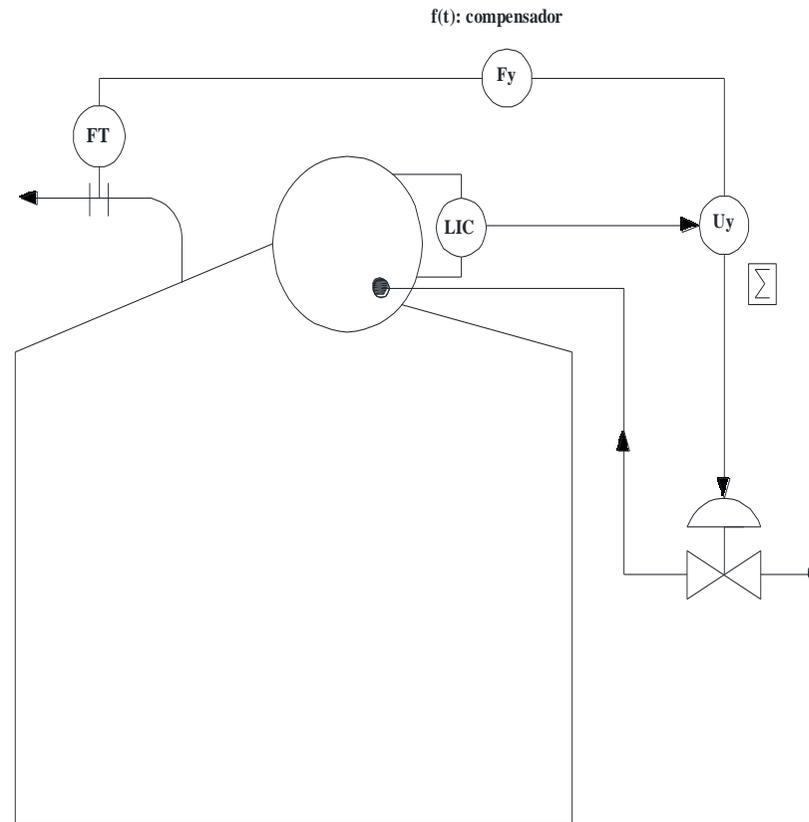


Ilustración 271 "Esquema de control de nivel del domo"

El caudal de vapor demandado es la perturbación que, como vemos en la figura, la señal del FT entra al lazo de control de nivel a través del FY (que oficia de compensador) y a un sumador que modifica la señal del LIC sobre la válvula. Este es un caso de Avanciación.

Es un caso de cascada en el que el nivel está sobre el caudal y con Avanciación:

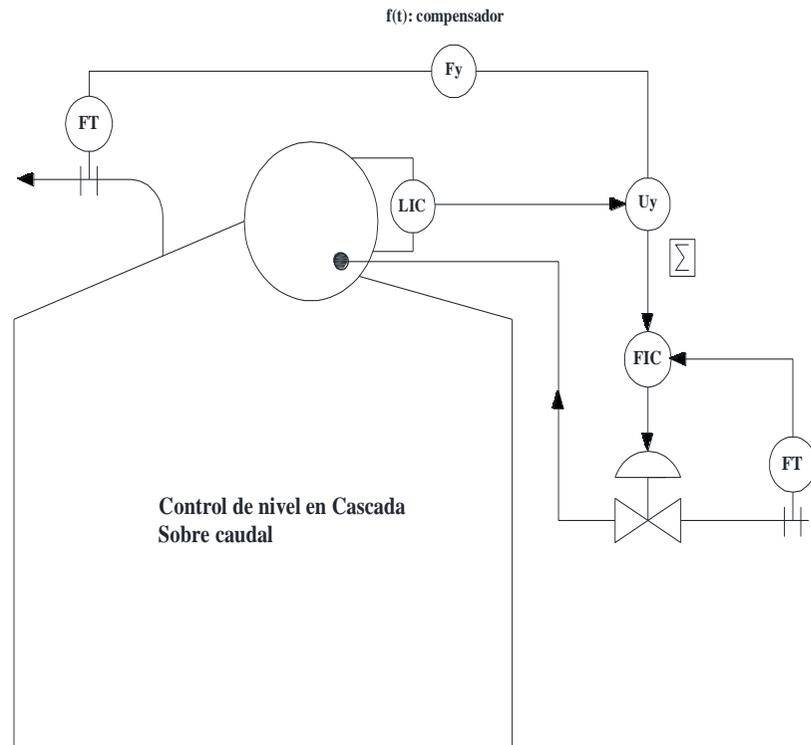


Ilustración 272 “Representación de control del nivel en cascada”

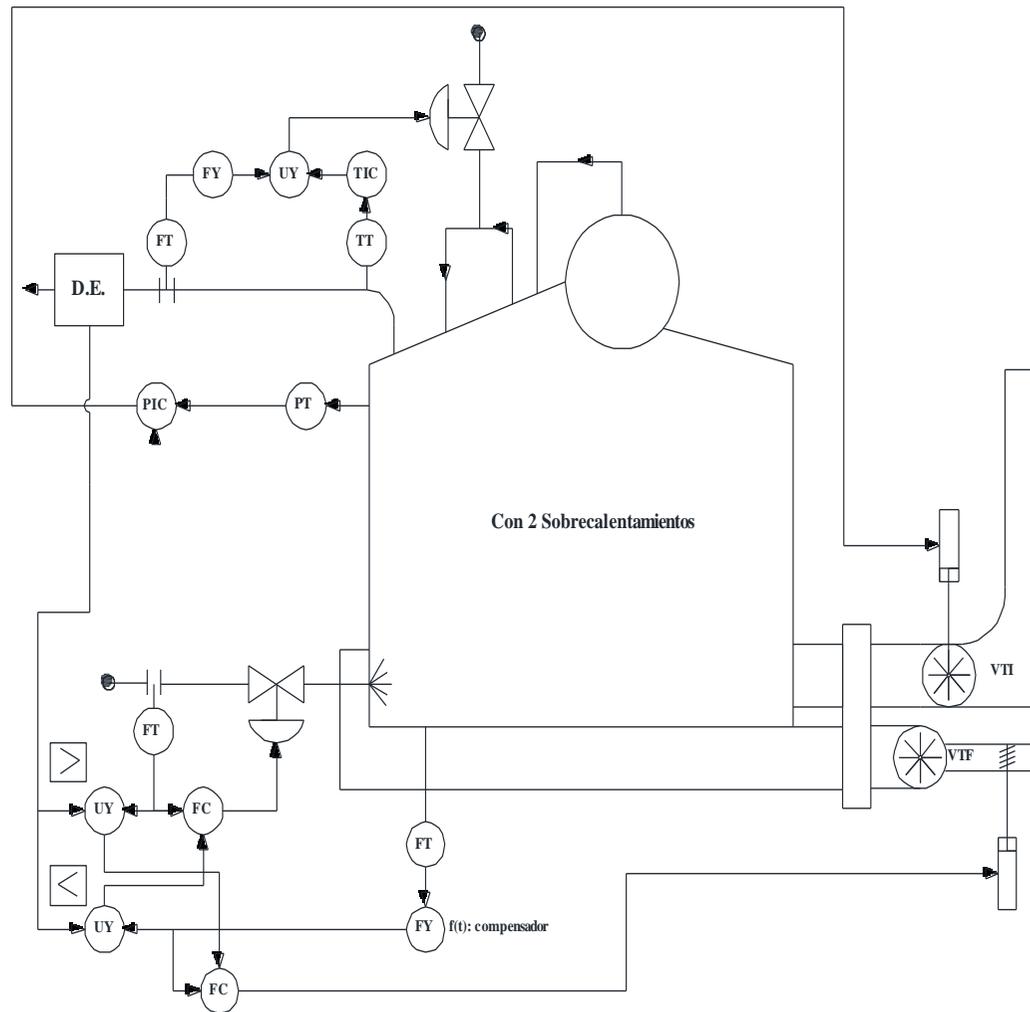


Ilustración 273 “Esquema de control de ciclo con dos sobrecalentamiento”

## Veamos otros ejemplos de Avanciación

Tomemos el caso de un Intercambiador de Calor:

En este ejemplo se puede apreciar que ante una variación en la temperatura de entrada del fluido a calefaccionar, se compensa esta variación con el lazo en Avanciación.

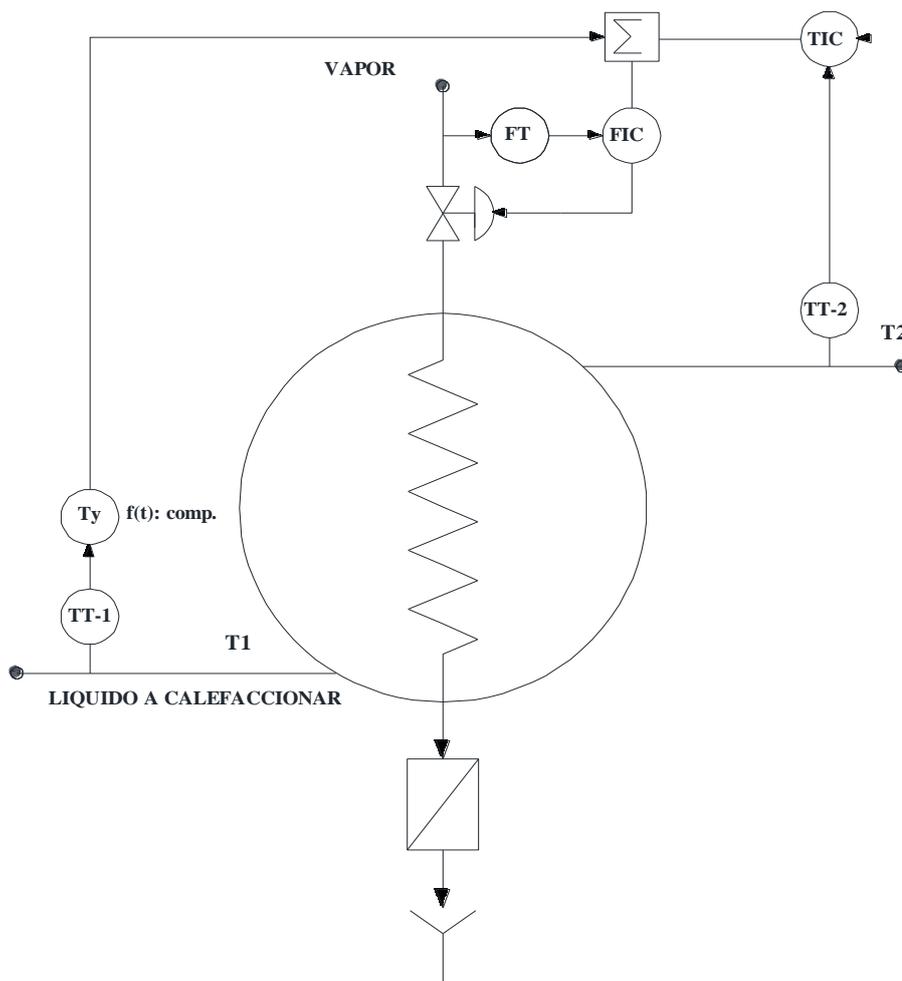


Ilustración 274 “Esquema del intercambiador de calor control por avanciación”

## Control de nivel de domo de caldera

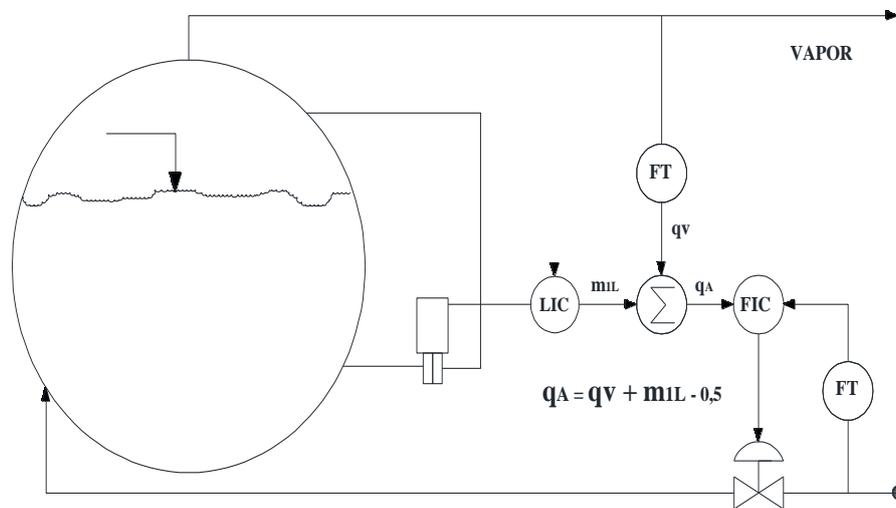


Ilustración 275 “Esquema de control de caldera por Feedforward”

El control Feedforward es comúnmente aplicado al control de nivel de domo de la caldera, esto se debe a la baja constante de tiempo del Domo, el control de nivel es sensible a los cambios rápidos en la carga.

El control I (integral) no se usa por la inestabilidad que resultaría, por tal razón se utiliza generalmente P+I.

El control Feedforward tiene las siguientes ventajas:

- 1) El flujo de H<sub>2</sub>O no cambia más rápido que el flujo de vapor.
- 2) El control de nivel de líquido no depende de los seteos del controlador de feedback

el ejemplo planteado en la figura anterior, es el lazo de control de nivel de tres elementos. en este sistema, la demanda de agua de alimentación está dada por el caudal de vapor, con las correcciones dadas por el nivel de Domo, y debido a las variaciones de nivel, purgas continuas

o intermitentes, o cualquier otra causa; el control de nivel ajustara el Set-Point de control de agua de alimentación, de tal manera que el nivel de Domo retorne siempre a su Set-Point.

El Set-Point del control de agua de alimentación está desarrollado por un sumador, el cual suma las señales de salida del control de nivel y del transmisor del caudal de vapor y su salida se convierte en Set-Point (flotante o variable) del lazo arriba mencionado.

Este Set-Point se calcula de esta manera:

$$q_A = q_V + m_{1L} - 0,5$$

$q_A =$  *Set – Point del control de agua de alimentación*

$q_V =$  *Caudal de Vapor*

$m_{1L} =$  *Salida del Controlador de Nivel de Domo*

El termino m1L de la ecuación es lo producido por el control de nivel y estará al 50% si el caudal de vapor es igual al caudal de H2O y el nivel de Domo está en su Set-Point.

Si existiera un cambio en el nivel de Domo, mientras los caudales de agua y vapor están balanceados cambiara la salida del controlador de nivel lo que hará modificar el Set-Point del control de agua de alimentación.

La modificación del caudal de vapor actuará como señal de Set-Point del control de agua de alimentación, lo que hará cambiar su salida de modo tal que el nivel alcance nuevamente su Set-Point, con la relación agua/vapor al valor requerido para ello.

El control de nivel de domo comparara la medición, que viene del transmisor de nivel con su Set-Point, y da lugar a una señal de salida que va al sumador.

El sumador combina las señales provenientes del caudal de vapor y de salida de control de nivel de domo y da una salida, que ingresa como Set-Point (flotante o variable) al control de agua de alimentación.

El control de agua de alimentación compara su medición con la señal de Set-Point, proveniente del sumador y da una señal de control hacia la válvula de control.

De esta forma, el caudal de agua de alimentación es una función del caudal de vapor, teniendo en cuenta los cambios en el nivel de Domo.

## **Bibliografía**

Benítez Mejía, D. S. (1994). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDOS*. Quito.

Creus Sole , A. (1997). *INSTRUMENTACION INDUSTRIAL* . Mexico : MARCOMBO.

Electric, S. (30 de 10 de 2019). *Controlador logico programable TWIDO*. Obtenido de Controlador logico programable TWIDO: <https://www.se.com/mx/es/product-range-presentation/533-twido/>

Electric, S. (30 de 10 de 2019). *TwidoSuite 2.31.04*. Obtenido de TwidoSuite 2.31.04: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=User+guide&p\\_File\\_Name=TwidoSuite\\_v2.3\\_Online\\_help\\_EN.zip&p\\_Doc\\_Ref=twidosuite\\_online\\_help\\_eng](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=TwidoSuite_v2.3_Online_help_EN.zip&p_Doc_Ref=twidosuite_online_help_eng)

ESFEROMATIC. (30 de 10 de 2019). *ESFEROMATIC*. Obtenido de ESFEROMATIC: <http://www.esferomatic.com.ar/>

Festo. (30 de 10 de 2019). *Festo*. Obtenido de Festo: [https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/410361/FEC-C\\_2001-09\\_527483g1.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/410361/FEC-C_2001-09_527483g1.pdf)

Festo. (30 de 10 de 2019). *Festo Software Tools*. Obtenido de Festo Software Tools:  
[https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/405197/FST\\_2004-03\\_682297g1.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/405197/FST_2004-03_682297g1.pdf)

Fisher, V. C. (s.f.). *Fisher Control Valves*.

Foxboro. (2002). Catálogo ESFEROMÁTIC.

ISA, N. (s.f.). *Normas ISA-S5.1-84*.

Masoneilan. (s.f.). Masoneilan division, McGraw-Edison Co.

MathWorks. (30 de 10 de 2019). *MathWorks Simulink*. Obtenido de MathWorks Simulink:  
<https://es.mathworks.com/products/simulink.html>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.,.

Roca, A. (2014). *CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS INDUSTRIALES*. Ediciones Díaz de Santos.

SAMA, N. (s.f.). *Normas SAMA*.

Schneider, E. (2007). *Twido Suite V2.0 Guía de programación*.

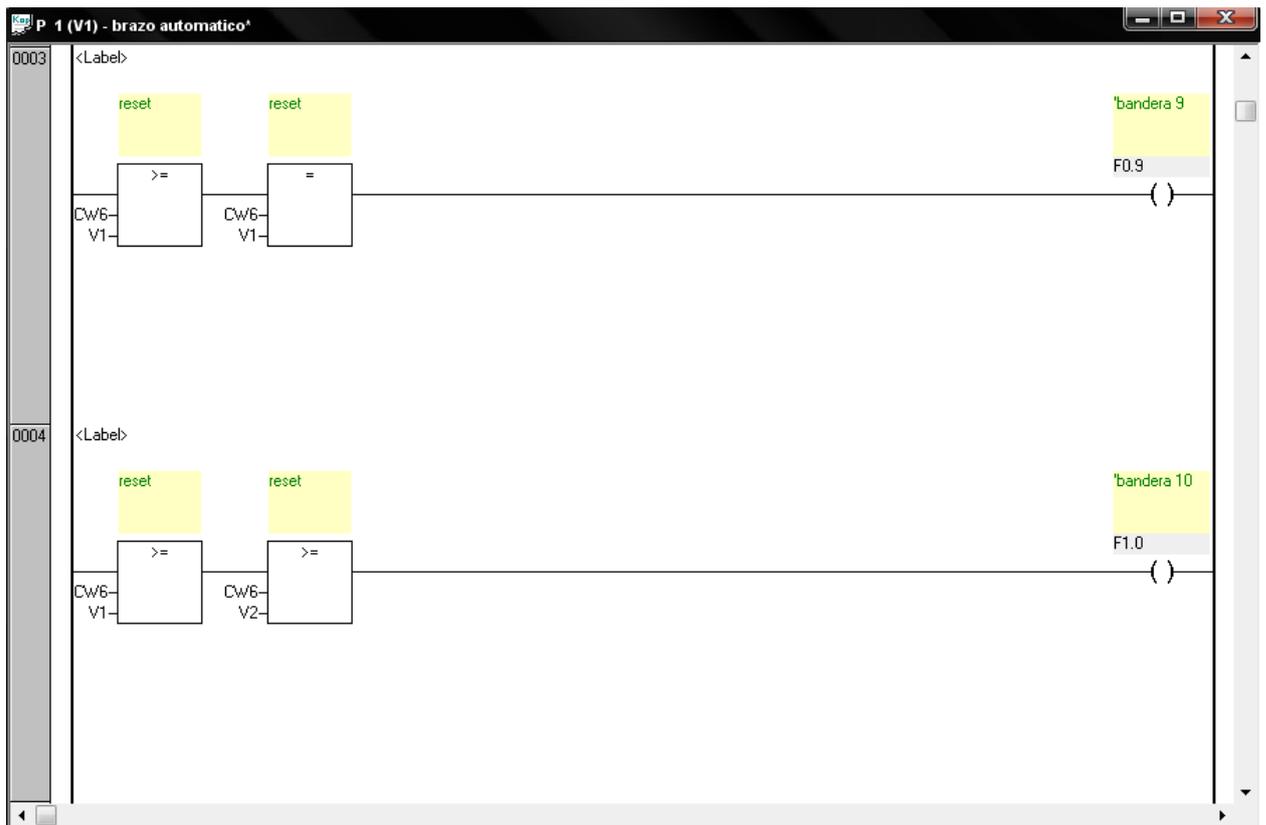
Valbia, 1. (s.f.).

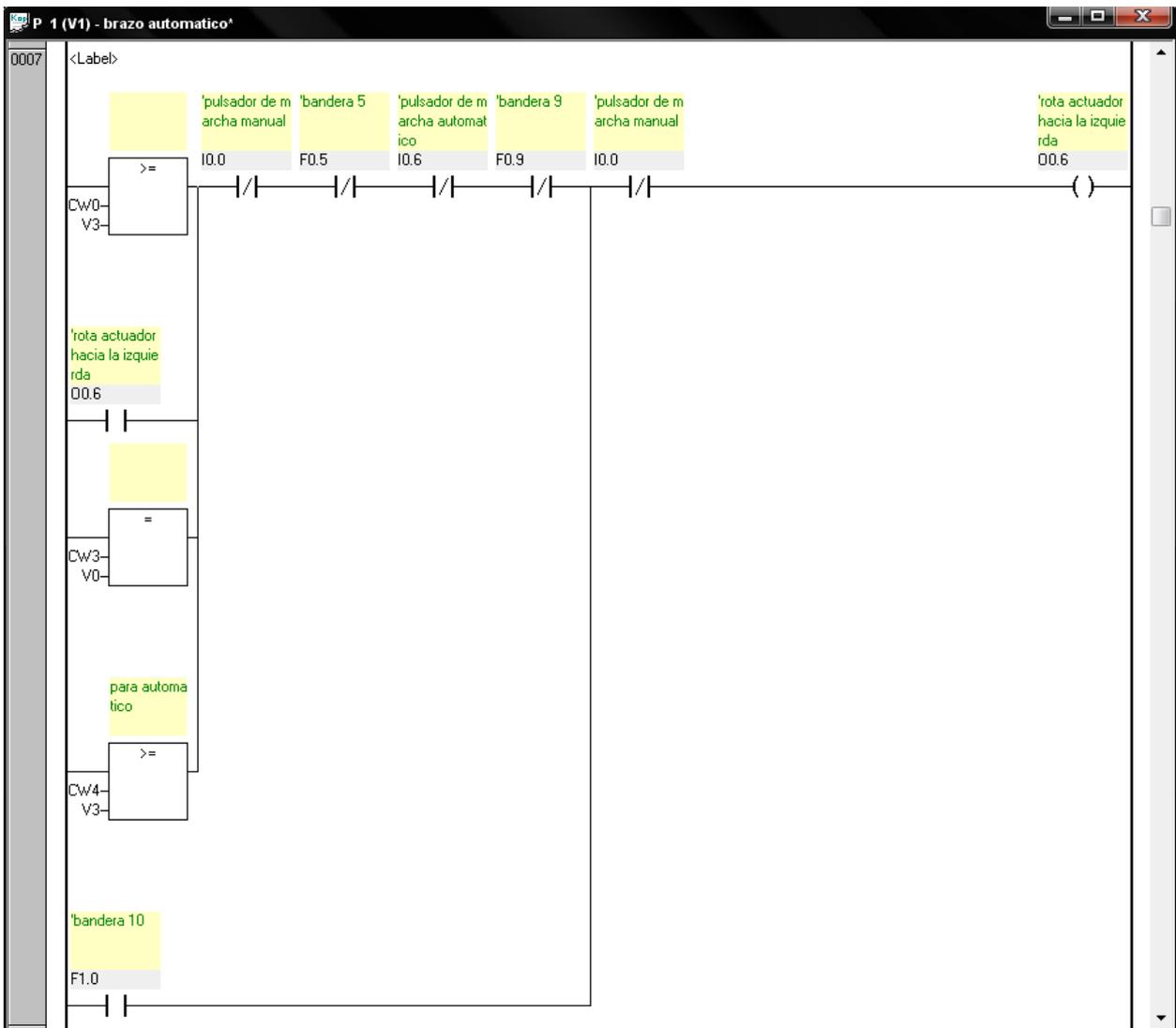
Valdes, V. (28 de 10 de 2019). *Vinco Valdes*. Obtenido de Vinco Valdes:  
<https://www.vincovalves.com/wp/?s=nh>

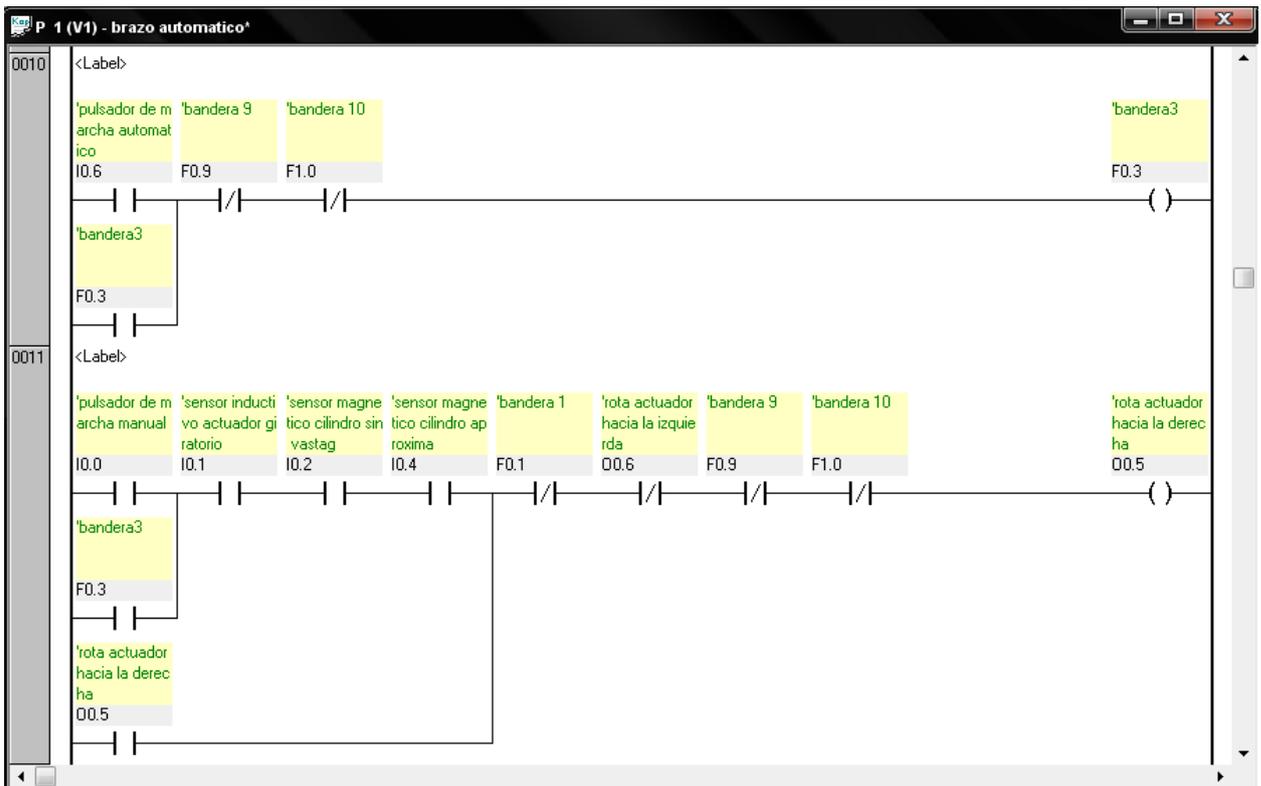
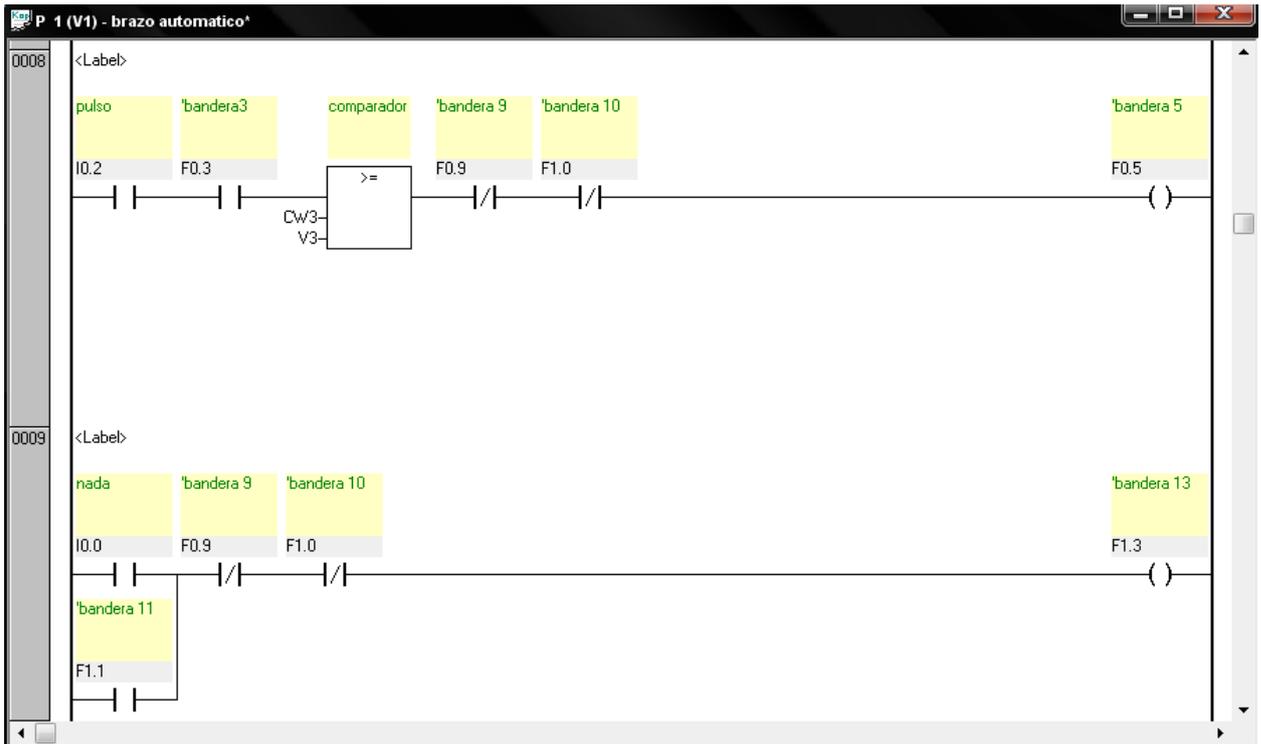
Wika. (30 de 10 de 2019). *Wika*. Obtenido de Wika:  
[https://www.wika.com.ar/products\\_es\\_es.WIKA](https://www.wika.com.ar/products_es_es.WIKA)

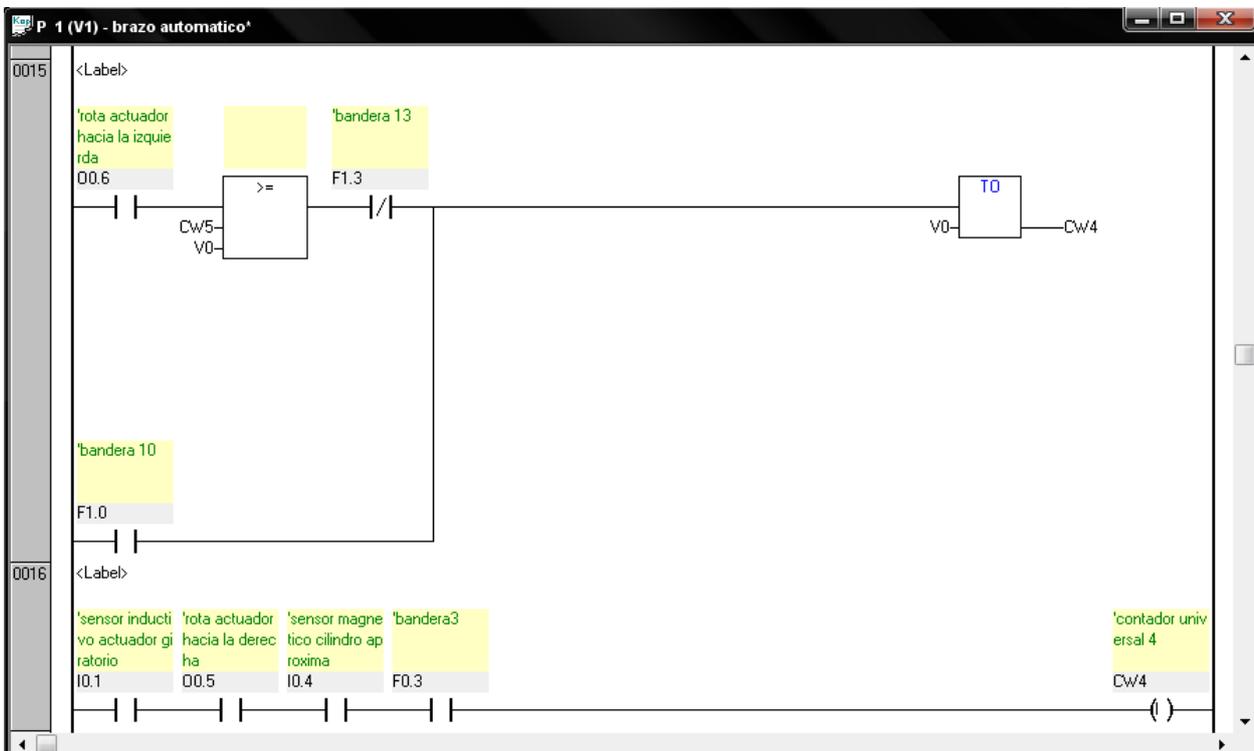
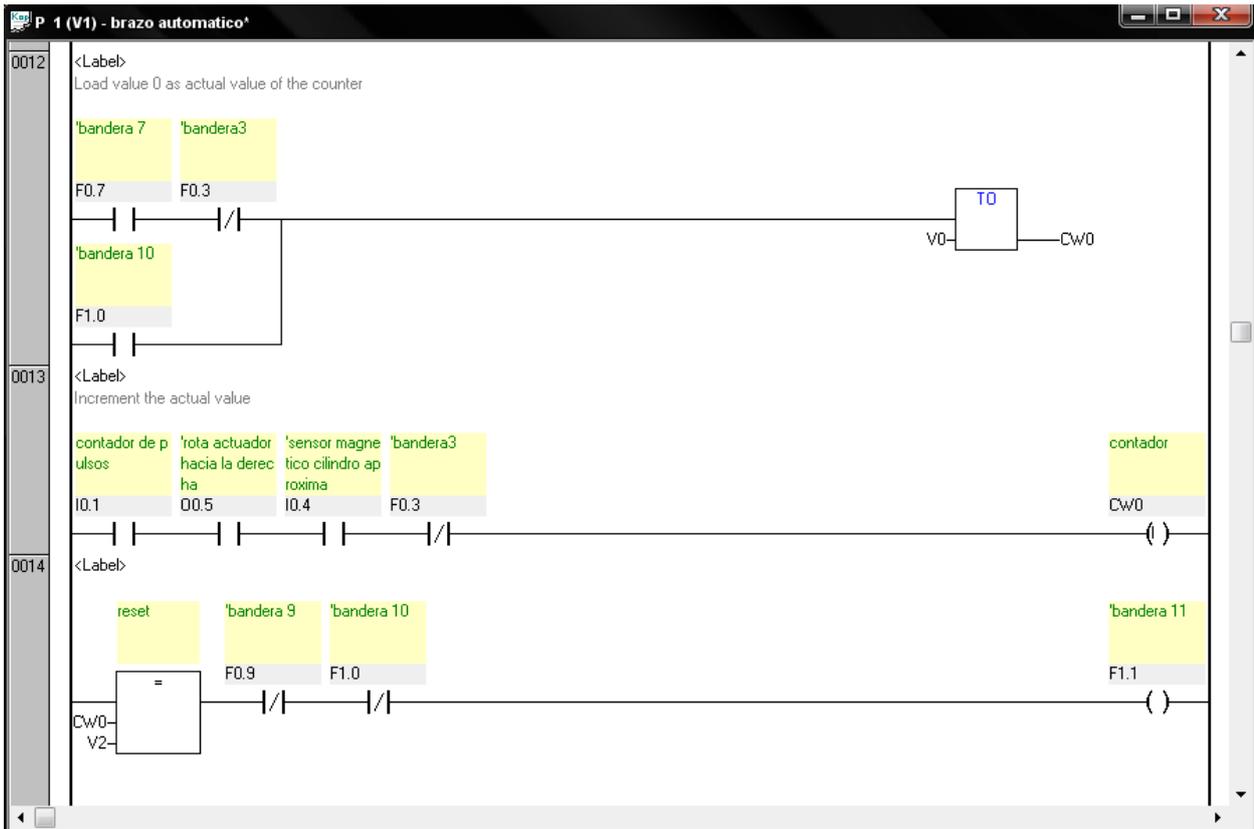
## Anexos

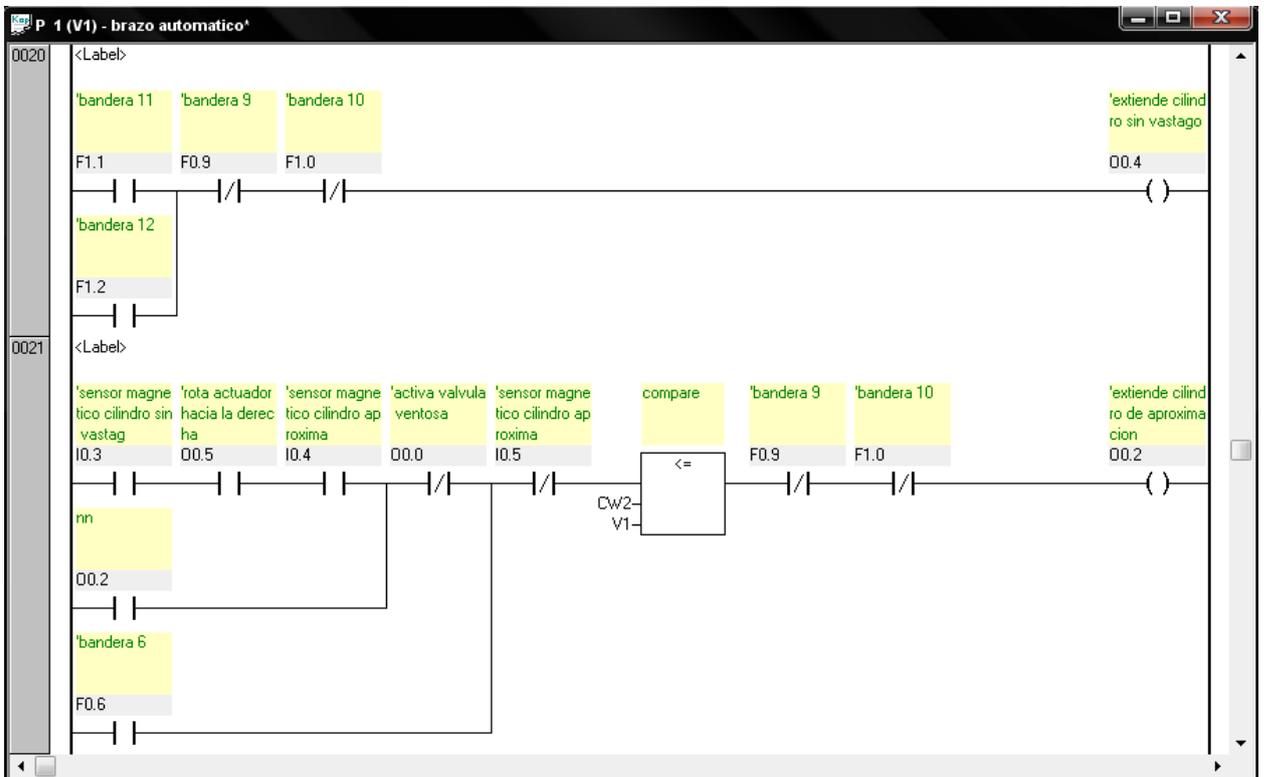
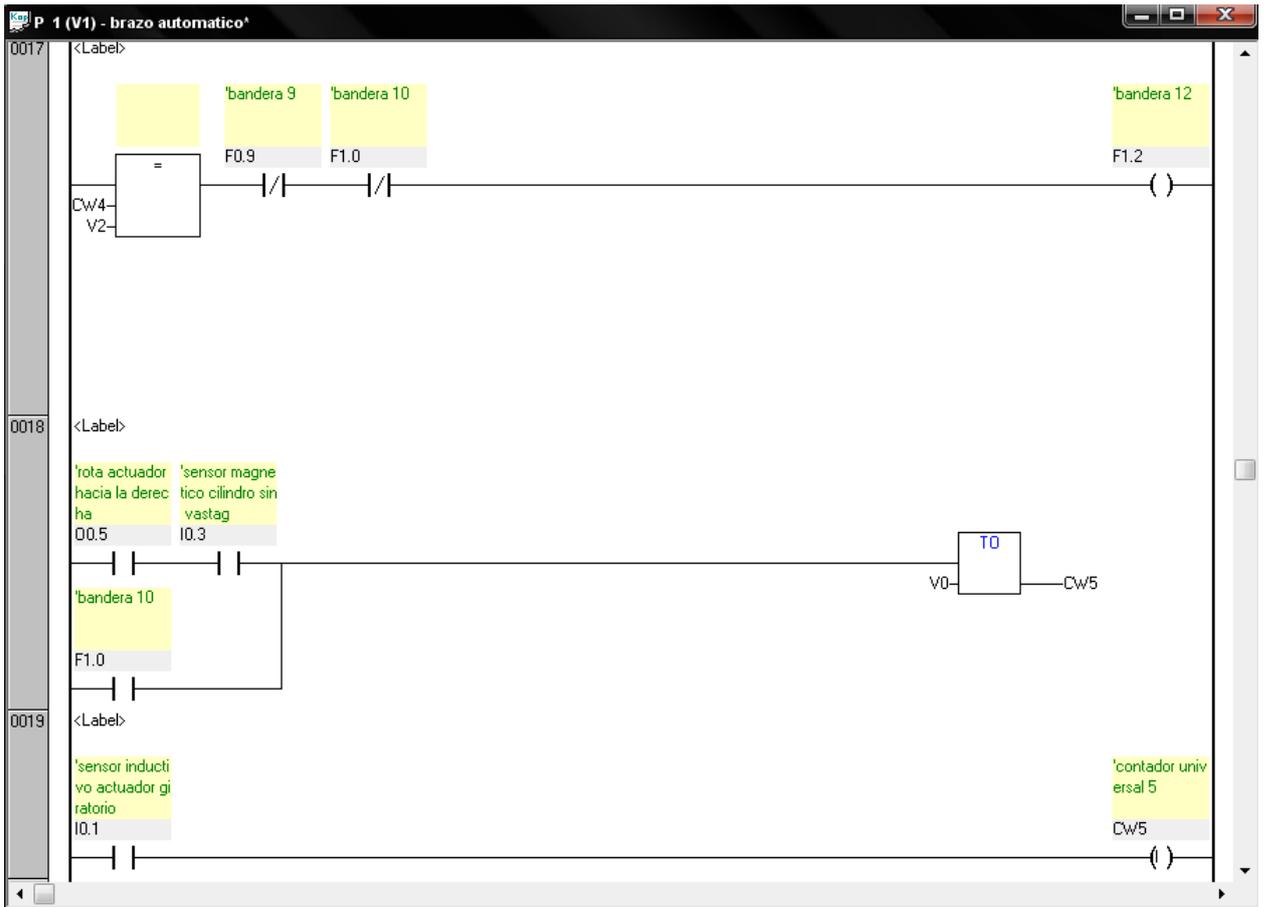
Anexo 1: Programa completo en el FST “Festo Software Tool” brazo automático.

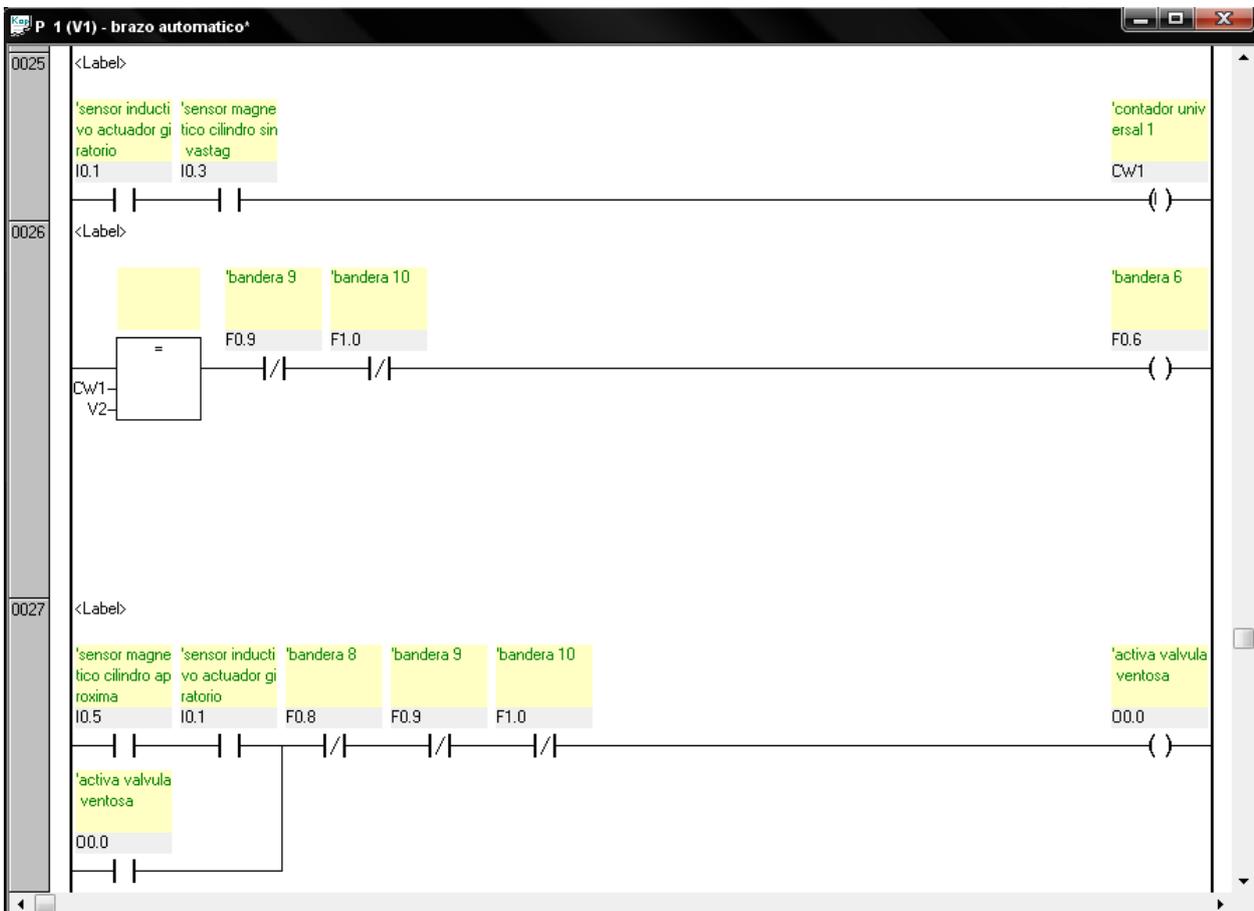
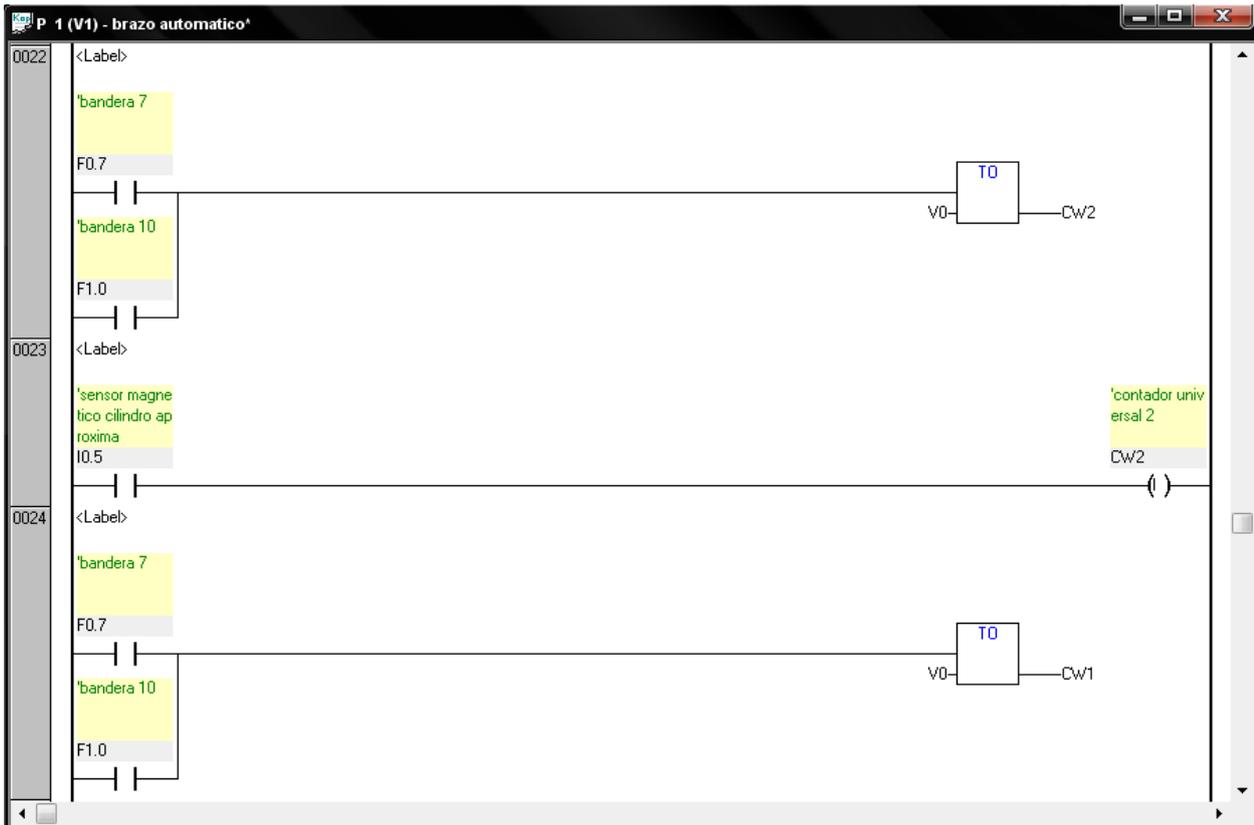


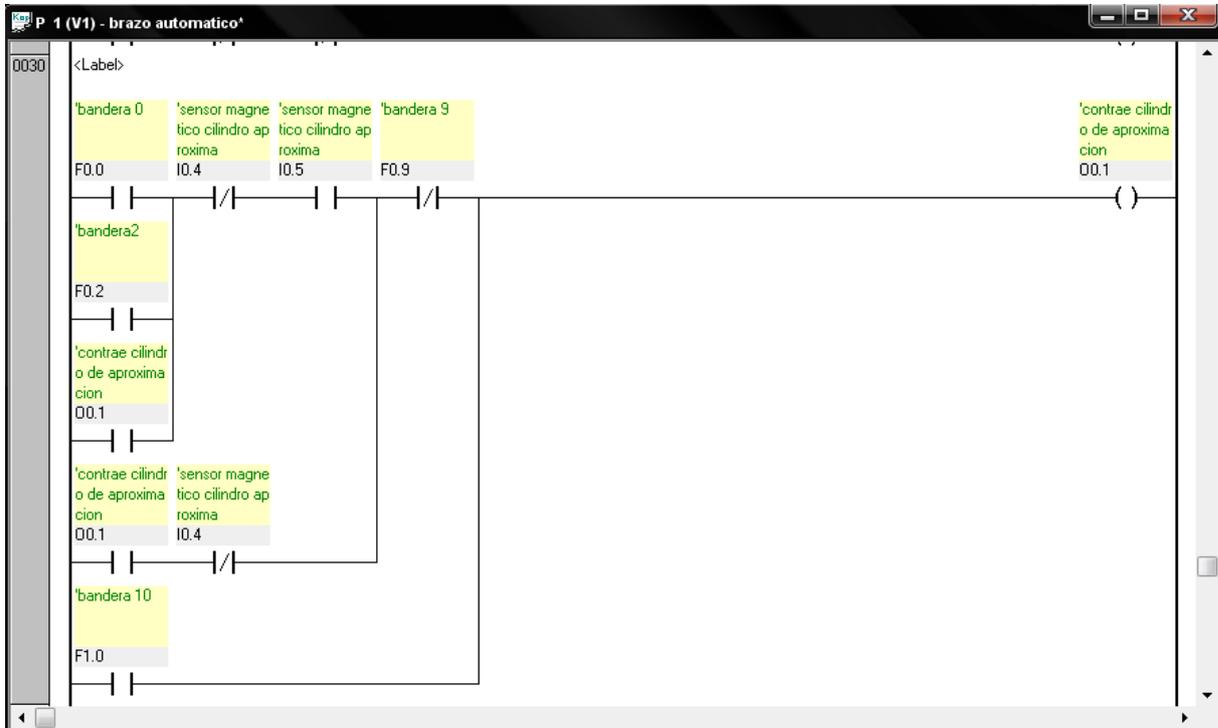


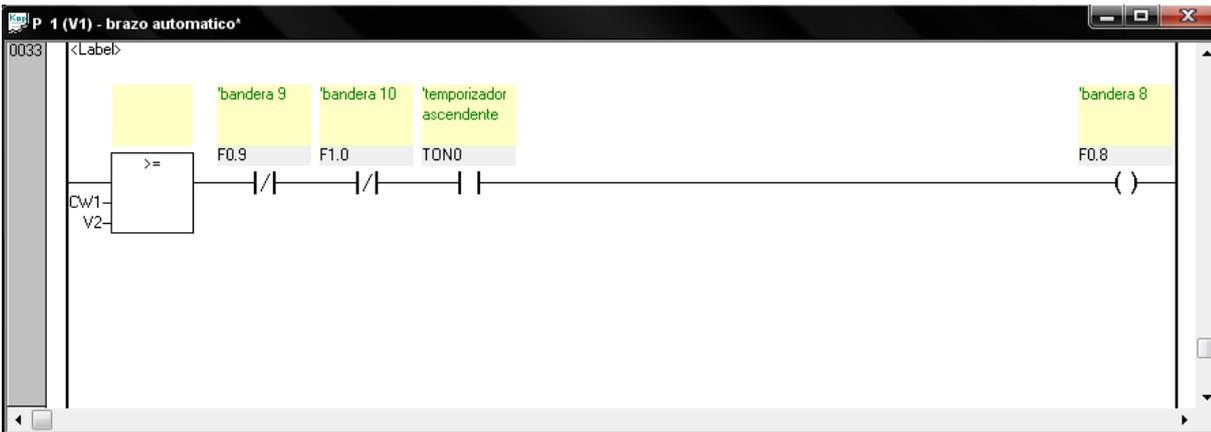
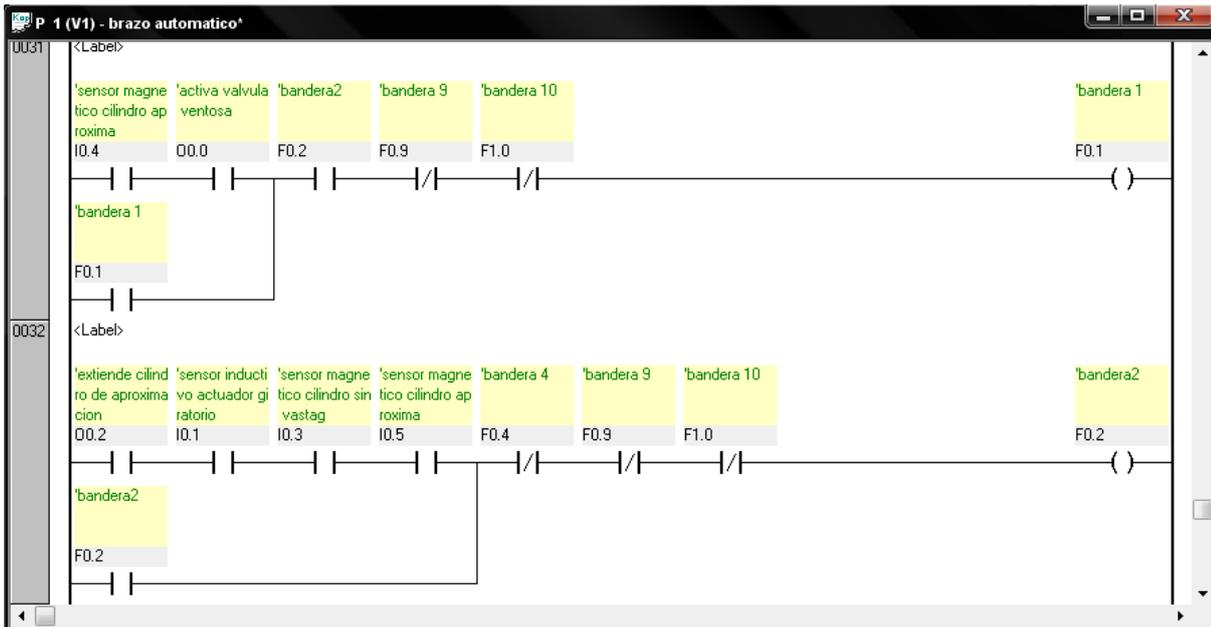


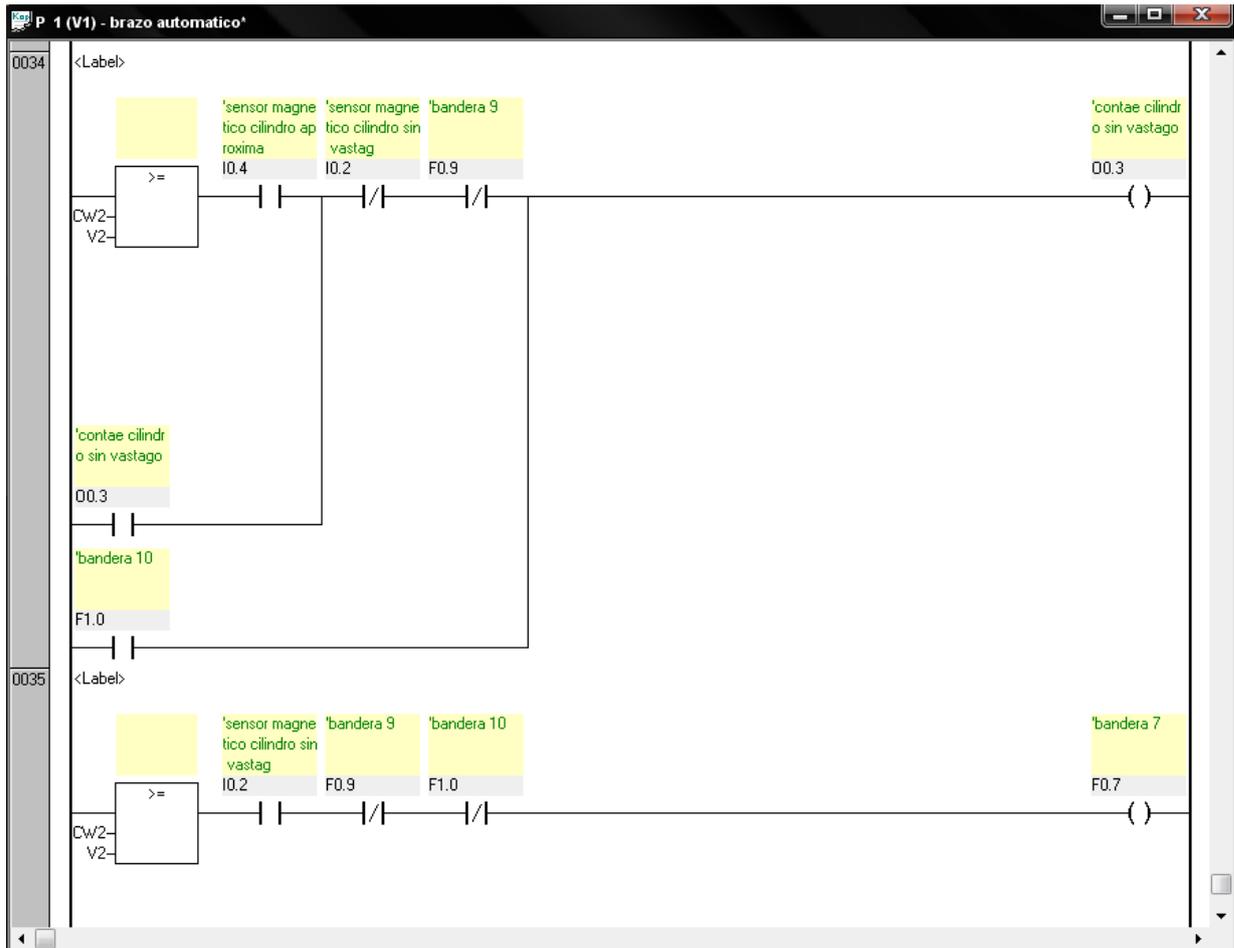












## Anexo 2: Modelado matemático del sistema (T)

En la presente unidad se detalla el modelo matemático representativo del sistema. El mismo se utilizó para obtener valores de la ganancia proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo que hagan posible la estabilidad en el lazo de control de nivel. Mediante la herramienta Simulink® de Matlab se ensayaron algunos valores de las constantes en el modelo y luego se colocaron en el bloque PID del programa del PLC.

Una vez introducidos estos valores, se obtuvo una gráfica de los valores de la variable medida por el Controlador (PLC) y se los exportaron a M. Excel, de esta forma se observó el comportamiento y se comparó con el del modelo en Simulink® para extraer conclusiones.

El modelo del sistema se creó a partir de un bloque formado por la función de transferencia del tanque 2 y válvula manual de descarga que se encuentra en su fondo y un bloque formado por la función de transferencia de la válvula neumática. A continuación se desarrollan las ecuaciones de partida.

**Modelado de la planta:**

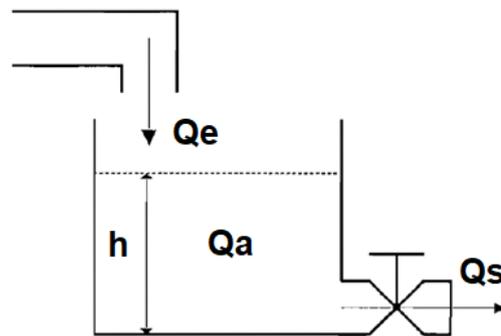


Ilustración 276 “Modelo de Planta – Gentileza Marcelo Tarnoski /Yesica Cardozo”

**Caudal de salida**

$$Q_s = K_v \times \sqrt{h} \quad (3)$$

$$Q_a = \frac{dV_a}{dt} = A \times \frac{dh}{dt} \quad \text{con } A \text{ igual al área transversal del tanque} \quad (4)$$

Haciendo el balance de caudales de entrada y salida y reemplazando las ecuaciones anteriores se tiene:

$$Q_e - Q_s = Q_a \Rightarrow Q_e - K_v \times \sqrt{h} = A \times \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

La ecuación de descarga a través de la válvula manual no es lineal, la linealización se realiza por el método de serie de Taylor. Aquí se muestra el resultado:

$$\text{Pendiente } m = \left[ \frac{dq_s}{dt} \right]_{h=hm} = \frac{1}{2} \times K_v \times \frac{1}{\sqrt{hm}} \quad (6)$$

Donde hm es la altura de operación de 30cm o 0,3m.

Entonces:

$$Q_e - m \times h = A \times \frac{dh}{dt} \Rightarrow Q_e = A \times \frac{dh}{dt} + m \times h \quad (7)$$

Transformando por Laplace:

$$Q_e(s) = A \times s \times H(s) + m \times H(s) = H(s) \times [A \times s + m] \quad (8)$$

$$G = \frac{H(s)}{Q_e(s)} = \frac{1}{As + m} = \frac{\frac{1}{m}}{\frac{As}{m} + 1} = \frac{k}{Ts + 1} \quad (9)$$

En el numerador de la función G tenemos:

$$k = \text{ganancia del sistema} = \frac{1}{m} = \frac{2 \times \sqrt{hm}}{K_v} = \frac{2 \times \sqrt{0,3m}}{\frac{16 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{bar} \cdot 1\text{bar}}{10 \times 10^4 \text{ Pa}}} = 6846 \quad (10)$$

Mientras que en el denominador:

$$T = \text{constante de tiempo} = \frac{A}{m} = 0,1307723\text{m}^2 \times 6846 = 895 \quad (11)$$

El bloque tanque 2 resulta:

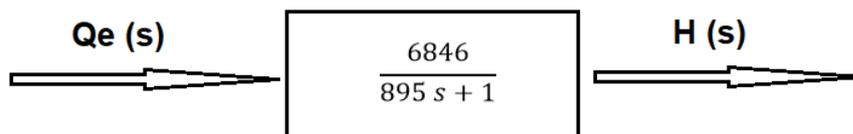


Ilustración 277 “Función Transferencia Tanque 2 – Gentileza Marcelo Tarnoski /Yesica Cardozo”

A continuación, se detalla el modelo de la válvula neumática:

Para ello se partió de las siguientes expresiones matemáticas:

a) Altura o pérdida de carga a través de la válvula:

$$hv = \frac{\Delta P_v}{\gamma} \text{ con } \gamma = 9810 \text{ N/m}^2 \text{ y } \Delta P_v \text{ en Pascales} \quad (12)$$

b) Caudal a través de la válvula:

$$Q_v = Q_e = A_v(\tau) \times \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\gamma}} = A_v(\tau) \times \sqrt{h_v} \quad (13)$$

Suponiendo una pérdida de carga a través de la válvula de 1psi o 6,895kPa, se procedió a la búsqueda de una expresión que represente a la variación del coeficiente de caudal  $A_v$  en función del grado de apertura  $\tau$ . Para ello, se recurrió una tabla del catálogo (catálogo Esferomatic) de la válvula la cual se muestra a continuación:

**Serie V1C, Característica igual porcentaje**

Tamaño Nominal del Cuerpo	Diámetro de pasaje Guía en Camisa	CV Mínimo Controlable Recomendado	PORCENTAJE DE APERTURA DE LA VALVULA ( CARRERA )										CV Nominal	CV Máximo (a)
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
1.1/2"	2.125	0.68	0.10	0.48	1.05	2.00	3.80	5.90	9.8	18.2	27.0	35.0	34.0	39.0
2"	2.625	1.20	1.03	1.60	2.70	4.60	8.9	16.5	29.0	45.0	58.0	64.0	60.0	65.0
3"	3.682	2.40	1.5	2.65	5.1	9.1	18.5	36.0	68.0	96.0	115.0	125.0	120.0	125.0
4"	4.558	4.0	3.90	6.40	11.0	18.3	32.0	50.0	112.0	165.0	185.0	195.0	200.0	198.0
6"	6.500	8.0	4.7	11.5	23.5	45.0	87.0	155.0	237.0	310.0	362.0	395.0	400.0	398.0

**Serie V1C, Característica lineal**

Tamaño Nominal del Cuerpo	Diámetro de pasaje Guía en Camisa	CV Mínimo Controlable Recomendado	PORCENTAJE DE APERTURA DE LA VALVULA ( CARRERA )										CV Nominal	CV Máximo (a)
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
1.1/2"	2.125	1.13	0.9	1.6	3.9	6.9	11.3	16.7	22.1	28.1	33.8	39.2	34.0	40.2
2"	2.625	2.0	3.75	8.75	15.5	23.2	30.5	37.2	46.5	57.5	65.0	67.5	60.0	68.0
3"	3.682	4.0	5.0	11.0	22.0	36.0	50.1	65.0	80.0	98.0	115.0	128.5	120.0	130.0
4"	4.558	6.7	6.0	17.0	34.0	53.0	73.0	94.0	117.0	144.0	172.0	195.0	200.0	195.0
6"	6.500	13.3	5.0	44.0	102.0	163.0	222.0	282.0	330.0	383.0	410.0	425.0	400.0	425.0

(a) Valor dado de CV máximo a 110% de carrera de la Válvula.

Ilustración 278 “Características de la válvula – Gentileza catálogo (ESFEROMATIC, 2019)”

Introduciendo los valores de Cv (convertidos a Av multiplicándolos por  $24 \times 10^{-6}$ ) de la fila correspondiente al tamaño nominal de 2 pulgadas en función del grado de apertura se obtiene la curva siguiente, Ilust 86.

Para obtener la función de transferencia de la válvula se aproximó la curva con la herramienta de M. Excel “Agregar línea de tendencia” mediante una función exponencial, obteniéndose:

$$Av(\tau) = (2 \times 10^{-5}) e^{0,05\tau}$$

Entonces:

$$Q_v = Q_e = \sqrt{6,895 \times 10^3 Pa} \times (2 \times 10^{-5}) e^{0,05\tau} = 0,00166 e^{0,05\tau} \quad (14)$$

Transformando por Laplace se llega a:

$$\frac{Q_v(s)}{T(s)} = \frac{Q_e(s)}{T(s)} = 0,00166 \times \frac{1}{s - 0,05} \quad (15)$$

Y en diagrama de bloques:

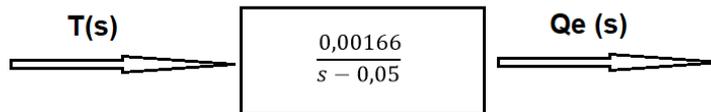


Ilustración 279 “Función transferencia válvula control Gentileza Marcelo Tarnoski /Yesica Cardozo”

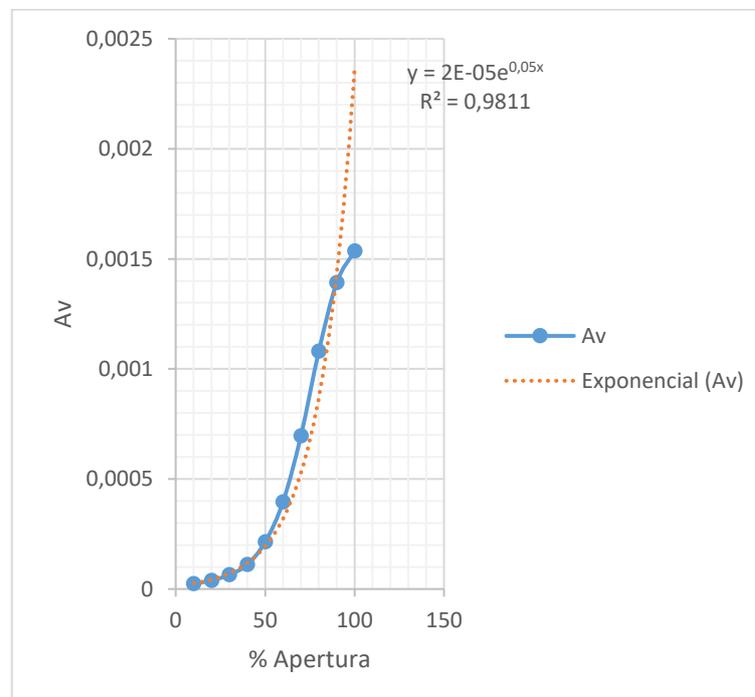


Ilustración 280 “Curva Av-% apertura – Simulink (MathWorks, 2019)”

A continuación, se configuró el lazo de control en Simulink® y, mediante un bloque PID se introdujeron valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ . Con estos valores se buscó un comportamiento estable en el tiempo y luego se los introdujo en una tabla de animación en TwidoSoft. De esta manera, se siguió el comportamiento de la *variable medida* (nivel) a través de un Trazo, a partir de allí se exportaron esos datos a M. Excel y se verificó que el comportamiento (del control con PLC) sea parecido al previsto en Simulink.

El lazo de control en Simulink resultó:

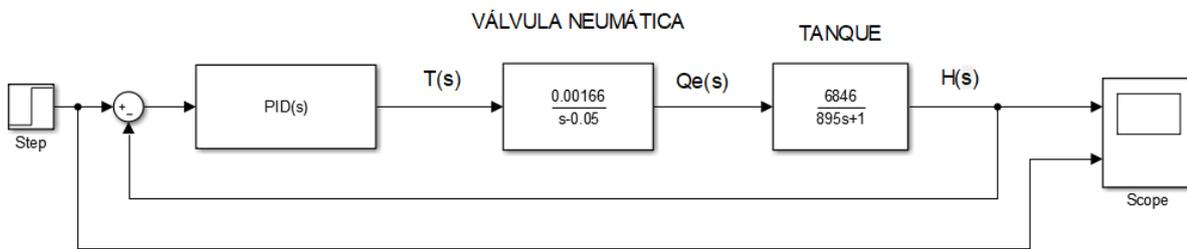


Ilustración 281 “Modelo en Simulink (MathWorks, 2019)”

A partir de aquí se mostrarán los resultados obtenidos en algunas corridas del lazo de control con el PLC y los gráficos obtenidos.