



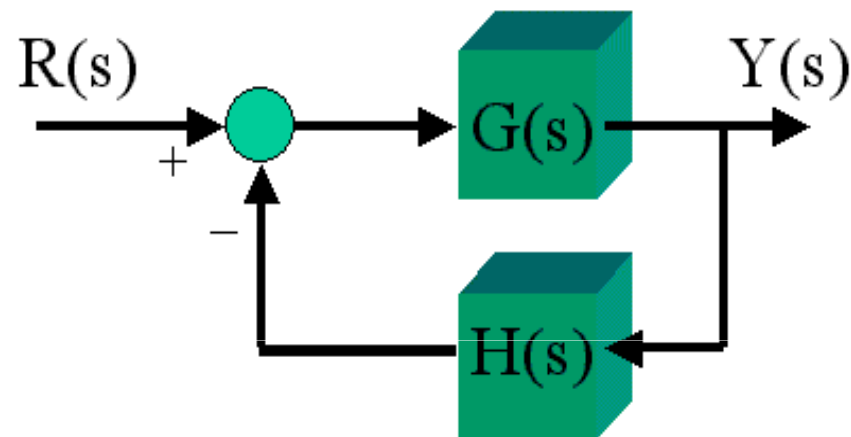
# SISTEMAS DE CONTROL AVANZADOS NORMAS DE REPRESENTACIÓN

- CÁTEDRA: “SISTEMAS DE CONTROL”
- DOCENTE: Prof. Ing. Marcos A. Golato

# Introducción

---

Los sistemas convencionales (lazos simples de control), no son suficientes algunas veces para la ejecución correcta de un control.



- Este sistema resuelve el problema mediante un procedimiento de prueba y error.
- Este sistema genera la señal de control en base a la diferencia entre los valores de medición y de referencia.

# Sistemas de control avanzados

---

Son técnicas más efectivas que se aplican al lazo simple de control con realimentación, ya que muchas veces las perturbaciones provocan desvíos grandes con respecto al “set point” con demasiada duración.

Las técnicas empleadas son:

- Control en cascada.
- Control en adelante (Feed Forward).
- Control de relación.
- Control de restricción o selectivo.

# Normas de representación de los sistemas de control

---

## **Diagramas P&ID:**

Se denomina diagrama “P&ID” (Piping and Instrumentation Diagram), a los esquemas donde se registran toda la instrumentación sobre un diagrama de flujo de proceso. Estos permiten asociar a cada elemento de medición y/o control un código, denominado “TAG” del instrumento.

## **Simbología:**

Los símbolos y nomenclaturas que se utilizan en los diagramas P&ID, se encuentran normalizados en diversos estándares. Las representaciones se realizan según:

- En Argentina: Norma IRAM-IAP 550, año 1972 y 1973 (IRAM 505).
- En el mundo:

Norma ISA (Instrument Society of America), S5.1 (1986), S5.2 (1981), S5.3 (1983), S5.4 (1986) y S5.5 (1989).

Norma SAMA (Scientific Apparatus Makers Association), esta organización se encarga de reunir y estandarizar los aparatos que se construyen para mediciones de variables físicas.

# Identificación de los instrumentos

Consiste en un arreglo de letras y números, y es de primordial importancia para la interpretación de los diagramas P&ID.

Por ejemplo: para un controlador de nivel con indicación local, tendría la forma “LIC-101A”, con el siguiente significado:

<b>L</b>	<b>I</b>	<b>C</b>	<b>101</b>	<b>A</b>
<b>PRIMERA LETRA</b>	<b>MODIFICADOR DE LA SEGUNDA LETRA</b>	<b>SEGUNDA LETRA</b>	<b>NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DEL LAZO</b>	<b>SUFIJO ADICIONAL</b>

# Significado de las letras

	PRIMERA LETRA	LETRAS SUCESIVAS
A	ANÁLISIS	ALARMA
C	ELEGIBLE POR EL USUARIO	CONTROL
D	ELEGIBLE POR EL USUARIO	DIFERENCIAL
E	TENSIÓN	ELEMENTO PRIMARIO DE MEDICIÓN (SENSOR)
F	CAUDAL	RELACIÓN
L	NIVEL	BAJO
I	CORRIENTE	INDICACIÓN
P	PRESIÓN	-
Q	TOTALIZACIÓN / EVENTO	-
R	RADIACIÓN	REGISTRO
S	VELOCIDAD/FRECUENCIA	INTERRUPTOR
T	TEMPERATURA	TRANSMISOR
U	MULTIVARIABLE	MULTIFUNCIÓN
V	VIBRACIÓN	VÁLVULA
Y	INDEFINIDA	RELÉ DE CÓMPUTO O LÓGICO
Z	POSICIÓN	MOTOR / ELEMENTO FINAL DE CONTROL

- **PRIMERA LETRA**: indica siempre la variable que se controla.
- **MODIFICADOR DE LA PRIMERA LETRA**: indica diferencia, relación, etc, de la variable medida.
- **SEGUNDA LETRA**: describe la función cumplida por el elemento.

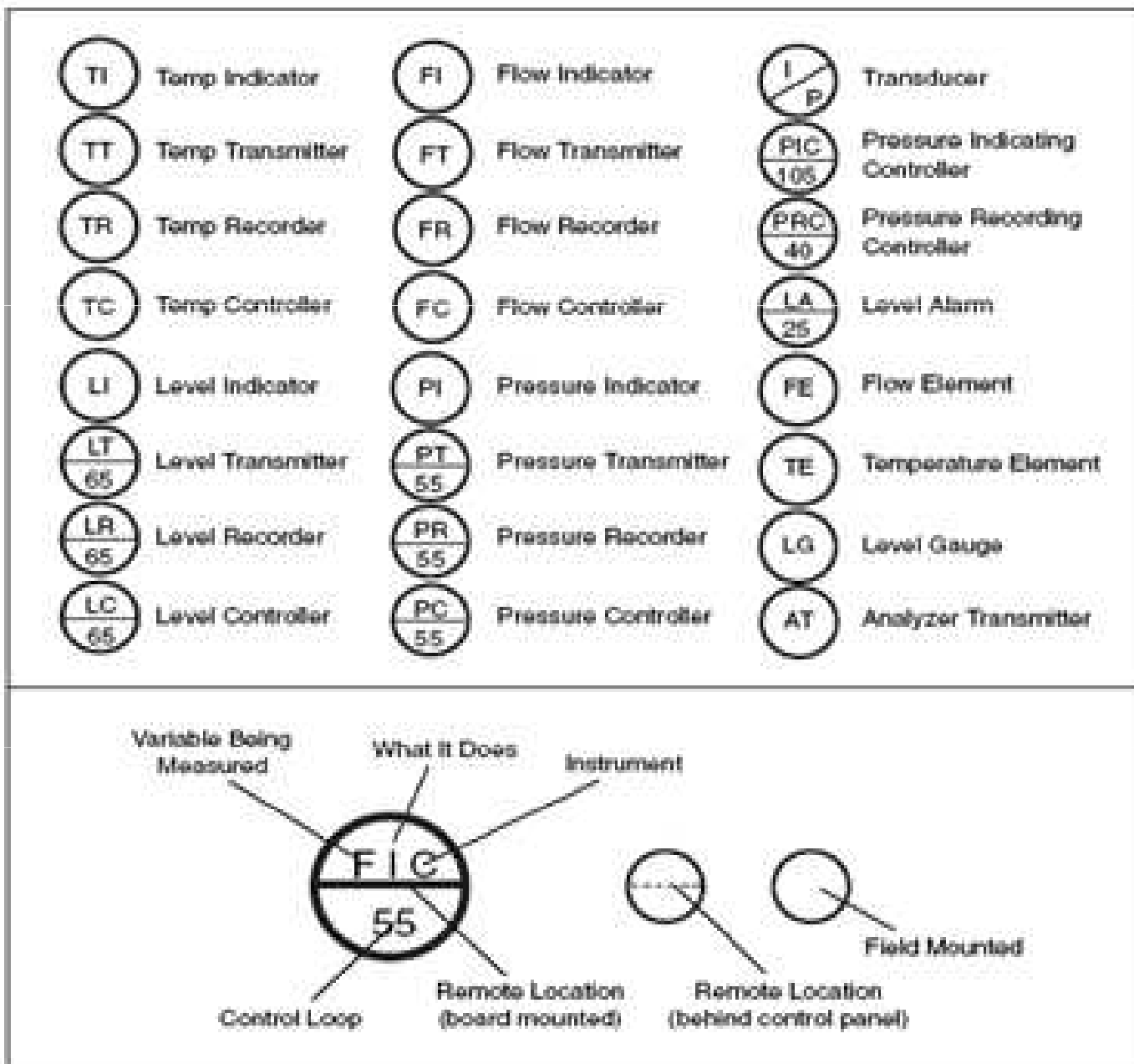
## Ejemplos:

**PT**= Transmisor de presión (primera y segunda letra).

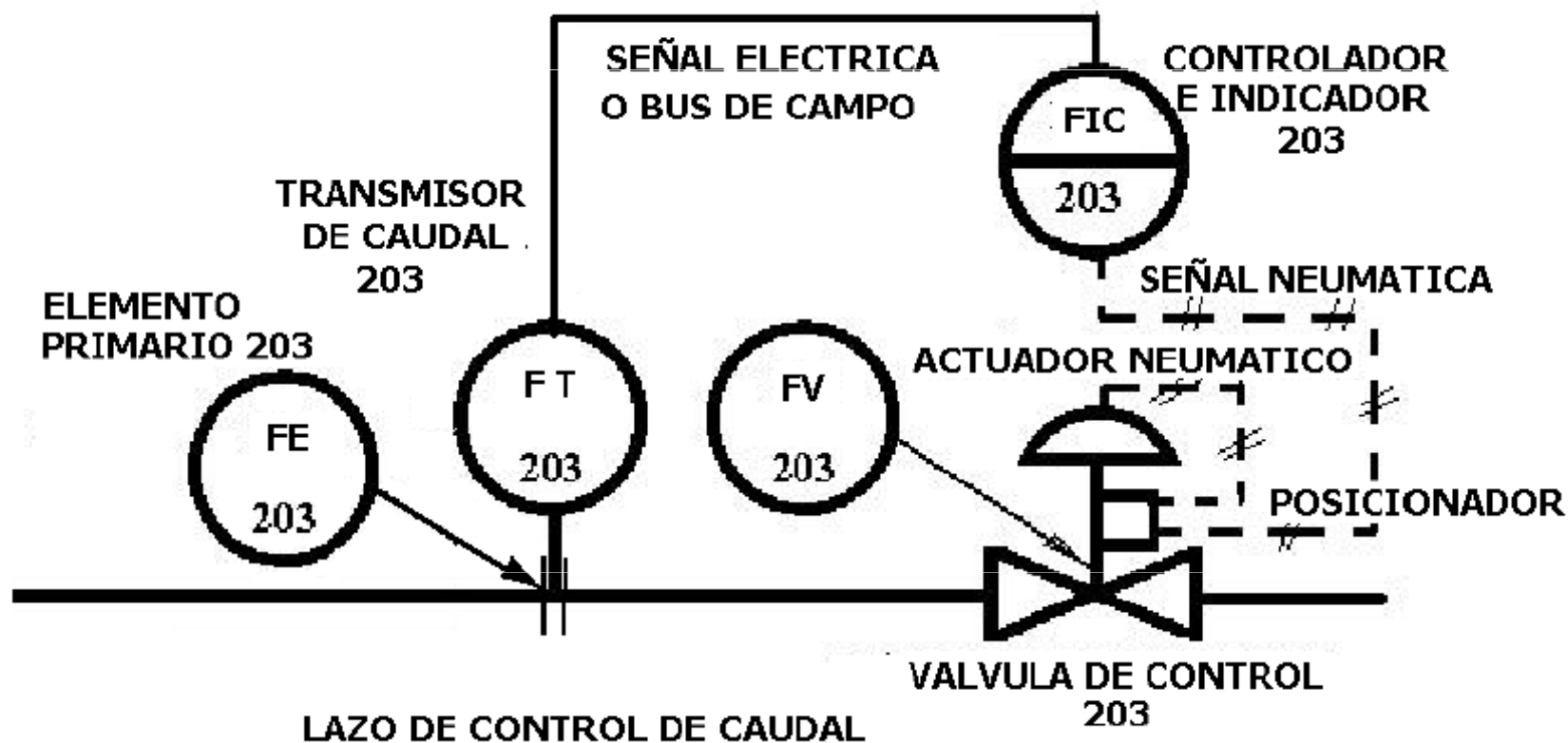
**PDT**= Transmisor diferencia de presión (primera letra con su modificadora y segunda letra).

**PIT**= Transmisor de presión con indicación local (primera y segunda letra con modificadora para la función pasiva de indicación).

## INDICADORES E INSTRUMENTOS DE CONTROL

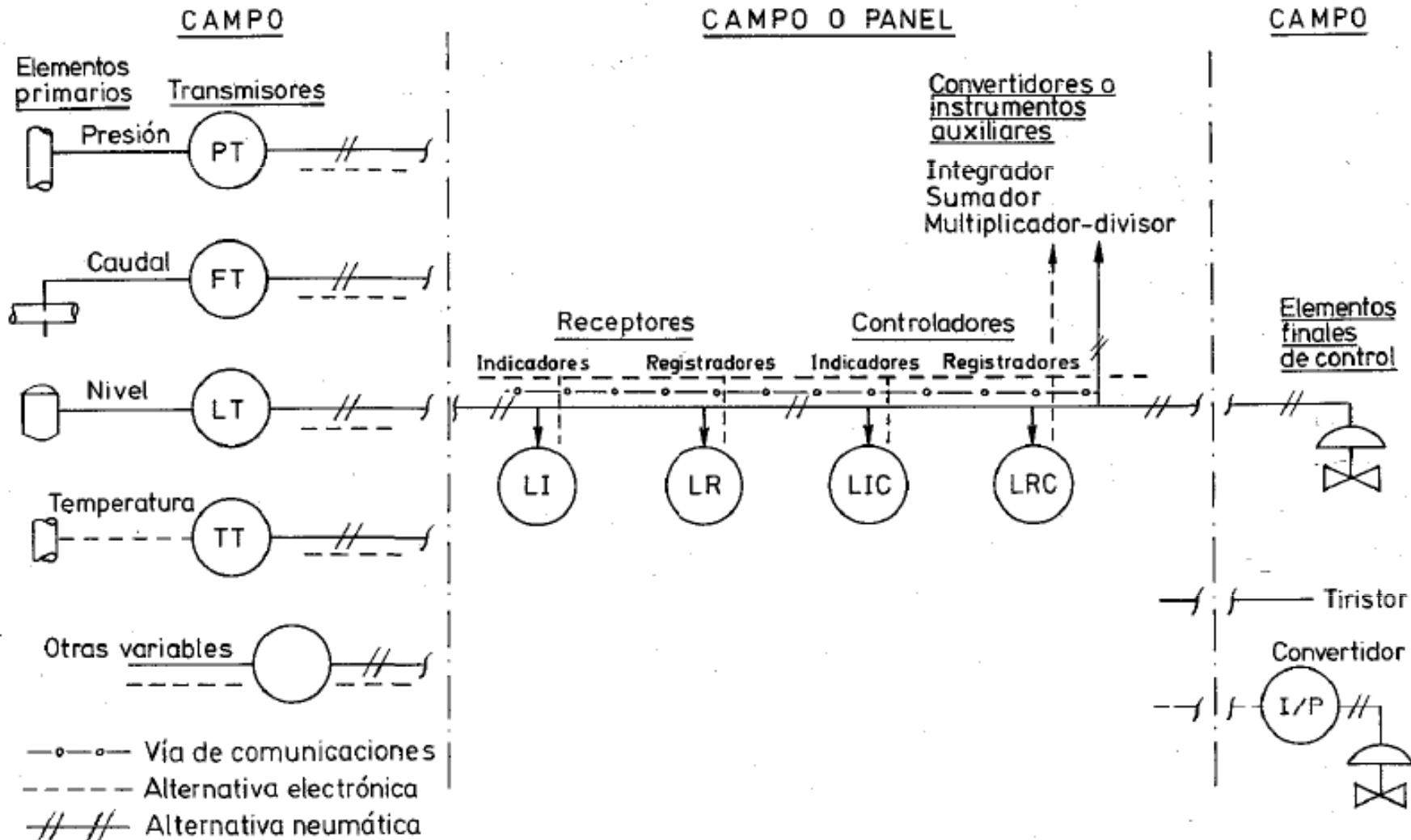


# Ejemplo: Lazo de control de caudal





# Ejemplos de identificación de instrumentos y su ubicación

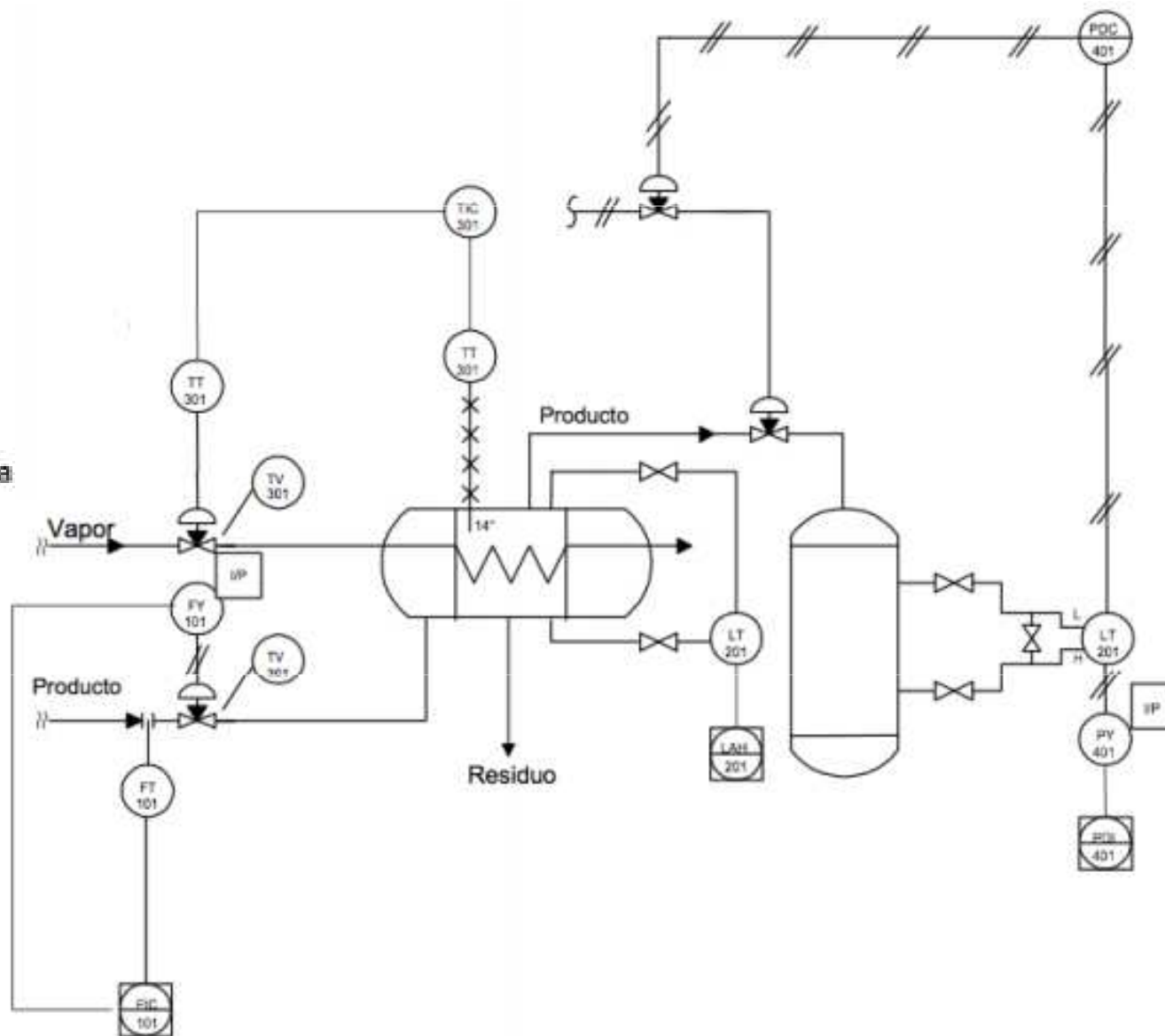


# Ejemplo: Sistema de control de una planta de calentamiento de un producto.



Leyenda:

- FT : Transmisor de Flujo
- FIC : Controlador Indicador de flujo
- FY : Relé de Flujo
- LAH: Nivel con Alarma de Alta
- LT : Transmisor de Nivel
- I/P : Corriente/Neumático
- PY : Relé de presión
- PDI: Indicador Presión Diferencial
- PDC: Controlador Presión Diferencial
- TT : Transmisor de Temperatura
- TV : Válvula de Temperatura
- TIC: Controlador Indicador de Temperatura



# Símbolos SAMA p/ sistemas de control de combustión

## Introducción

La complejidad de las estrategias usadas para el control de la combustión requiere una notación que exceda los Diagramas de Proceso e Instrumentación (P&IDs) estándar de la ISA (Sociedad de Instrumentación, Sistemas y Automatización). La Asociación Científica de Fabricantes de Aparatos (SAMA) ha desarrollado tal notación y esto se utiliza comúnmente para definir estrategias de control de combustión.

## Fundamentos

La notación SAMA consiste en cuatro formas, una serie de letras para la información de la etiqueta y varios algoritmos matemáticos de control. Estos componentes, demostrados en las tablas abajo, se combinan para describir completamente la lógica de control compleja.

Tipo de Dispositivo	
	Medición o Indicación
	Procesamiento Manual
	Procesamiento Automático
	Control Final

Letras de Medición/Indicación			
<b>A</b>	Análisis	<b>R</b>	Registro
<b>C</b>	Conductividad	<b>I</b>	Indicación
<b>D</b>	Densidad	<b>Q</b>	Integración
<b>F</b>	Flujo	<b>U</b>	Adquisición Digital
<b>L</b>	Nivel	<b>T</b>	Transmisor
<b>M</b>	Humedad	<b>RT</b>	Transmisor Registrador
<b>P</b>	Presión	<b>IT</b>	Transmisor Indicador
<b>S</b>	Velocidad		
<b>T</b>	Temperatura		
<b>V</b>	Viscosidad		
<b>Z</b>	Posición		

<b>Procesamiento de la Señal</b>			
Adición	$\Sigma$	Selector Alto	$>$
Promedio	$\Sigma/n$	Selector Bajo	$<$
Diferencia	$\Delta$ ó $-$	Limitador Alto	$\nabla$
Proporcional	$K$ ó $P$	Limitador Bajo	$\nless$
Integral	$\int$ ó $I$	Proporción Inversa	$-K$ ó $-P$
Derivativa	$d/dt$ ó $D$	Limite de Velocidad	$V \nless$
Multiplicación	$\times$	Bias	$\pm$
División	$\div$	Función de tiempo	$f(t)$
Raíz Cuadrada	$\sqrt[n]{x}$	Transferencia de señal	$T$
No-lineal	$f_1(x)$	Generador de señal	$A$
Tres estados	$\updownarrow$	Comparador de señal	$H/, /L$

FUNCION BLOCK – FUNCION DESIGNACION


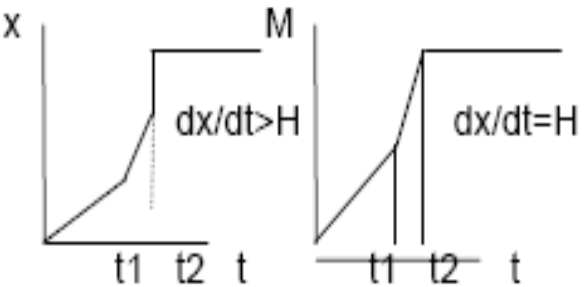
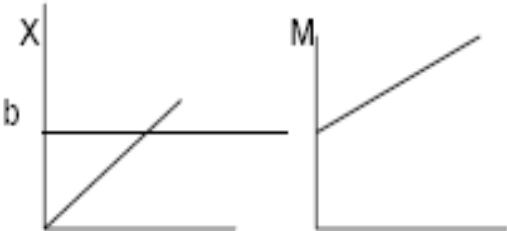

La función designación esta asociada con controladores dispositivos computacionales convertidores y relés se usa individualmente o en combinaciones(ver tabla 1 nota 14) Las “cajas” ayudan en la ubicación de símbolos u otras marcas en diagramas y permite que la función se use solo en block de diseño conceptual

Nº	FUNCION	SIMBOLO	ECUACION	REPRESENTACION GRAFICA	DEFINICION
1	SUMA	$\Sigma$	$M = X_1 + X_2 + \dots + X_n$		La salida es la suma algebraica de las entradas. Las entradas pueden ser positivas o negativas
2	PROMEDIO	$\frac{\Sigma}{n}$	$M = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$		La salida es la suma algebraica de las entradas dividida por el numero de entradas
3	DIFERENCIA	$\Delta$	$M = X_1 - X_2$		La salida es la diferencia algebraica de dos entradas
4	PROPORCIONALIDAD	K 1:1 2:1	$M = KX$		La salida es directamente proporcional a la entrada. En un bloque K puede ser 1:1, 2:1 etc que reemplazan a K
5	INTEGRACION	$\int$	$M = \frac{1}{T_i} \int x dt$		La salida varia con ambas magnitudes y su duración. La salida es proporcional al tiempo de integración de la entrada
6	DERIVADA	d/dt	$M = T_D \frac{dx}{dt}$		La salida es proporcional a la razón de cambio de la entrada

5.4 TABLA 3 CONTINUACION					
Nº	FUNCION	SIMBOLO	ECUACION	REPRESENTACION GRAFICA	DEFINICION
7	MULTIPLICACION	$\times$	$M = X_1 X_2$		La salida es el producto de las dos entradas
8	DIVISION	$\div$	$M = \frac{X_1}{X_2}$		La salida es el cociente de las dos entradas
9	EXTRAER RAIZ	$\sqrt[n]{\quad}$	$M = \sqrt[n]{X}$		La salida es la raíz n de las entradas si n es omitida se asume raíz cuadrada
10	EXPONENCIAL	$X^n$	$M = X^n$		La salida es igual a la entrada elevada a exponente n
11	NO LIENAL O FUNCION NO ESPECIFICADA	$M = f(x)$	$M = f(x)$		La salida es no lineal o función no especificada de la entrada
12	FUNCION TIEMPO	$f(t)$	$M = Xf(t)$ $M = f(t)$		La salida es igual a la entrada en función tiempo o al tiempo solamente

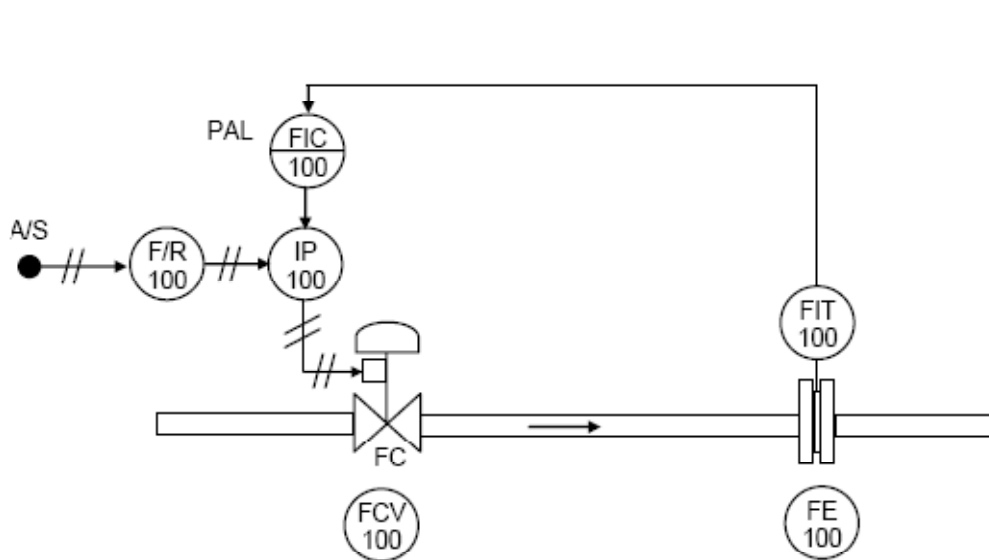
### 5.4 TABLA 3 CONTINUACION

Nº	FUNCION	SIMBOLO	ECUACION	REPRESENTACION GRAFICA	DEFINICION
13	SELECCIÓN MAYOR	$\vee$	$M = \begin{cases} X. para X1 \geq X2 \\ X2. para X1 \leq X2 \end{cases}$		La salida es mayor que las entradas
14	SELECCIONA MENOR	$\wedge$	$M = \begin{cases} X. para X1 \leq X2 \\ X2. para X1 \geq X2 \end{cases}$		La salida es menor que las entradas
15	LIMITACION MAYOR	$\vee$	$M = \begin{cases} X. para X \leq H \\ H. para X \geq H \end{cases}$		La salida es igual a la entrada o al limite mayor, mientras el valor sea menor
16	LIMITACION MENOR	$\wedge$	$M = \begin{cases} X. para X \geq L \\ L. para X \leq L \end{cases}$		La salida es igual a la entrada o al limite menor mientras el valor sea mayor
17	PROPORCIONAL INVERSA	$-K$	$M = -KX$		La salida es inversamente proporcional a la entrada la entrada

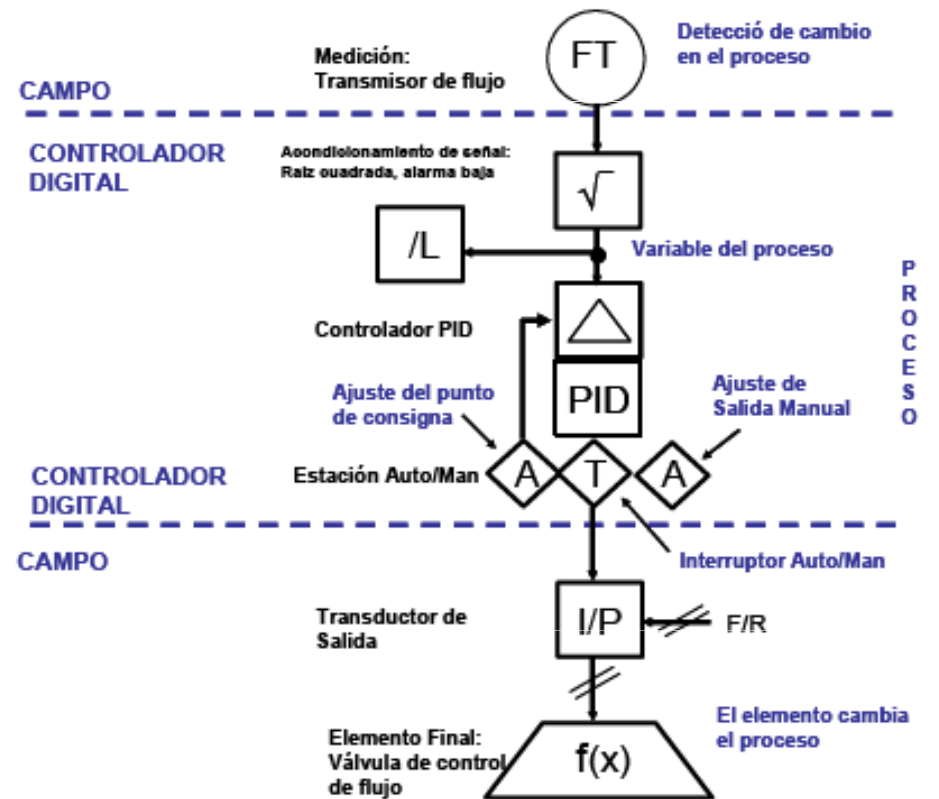
5.4 TABLA 3 CONTINUACION					
Nº	FUNCION	SIMBOLO	ECUACION	REPRESENTACION GRAFICA	DEFINICION
18	LIMITACION DE VELOCIDAD		$\frac{dM}{dt} = \frac{dx}{dt} \left[ \frac{dx}{dt} \leq H \right] \text{ AND}$ $\frac{dM}{dt} = H \left[ \frac{dx}{dt} \geq H \right] \text{ OR}$		La salida es igual a la entrada, mientras la relación de cambio de la entrada no exceda un valor limite. La salida cambiara con la relación establecida de limite hasta que la salida sea igual a la entrada
19	BIAS	<p style="text-align: center;">+</p> <p style="text-align: center;">-</p> <p style="text-align: center;">±</p>	$M = X \pm b$		La salida es igual a la entrada más o menos un valor arbitrario (Bias)
20	CONVERTIDOR		Salida = f (entrada)	NADA	<p>La forma de la señal de salida es diferente que las señal de entrada.</p> <p>*</p> <p>E tensión H hidráulico I corriente Q electromagnético P Neumático A análogo B binario R resistencia eléctrica D digital</p>



# Comparación de los métodos de notación ISA y SAMA para un lazo típico de control de caudal



Notación ISA



Notación SAMA

## SIMBOLOGIA DE INSTRUMENTACION – NORMA ISA



SIMBOLOS EN DIAGRAMAS DE TUBERIAS E INSTRUMENTACION			
	VALVULA DE GLOBO	<b>TEMPERATURA:</b> MEDIDOR DE TEMPERATURA CONEXION CON TERMOPOZO PUNTO DE MEDICION DE TEMPERATURA ELEMENTO DE TEMPERATURA SIN THERMOWELL (ELEMENTO NO CONECTADO A UN INSTRUM. SECUNDARIO) INDICADOR DE TEMPERATURA LOCAL ELEMENTO DE TEMPERATURA CON TERMOPOZA	
	VALVULA DE COMPUERTA		
	VALVULA DE ANGULO	<b>ELEMENTOS PRIMARIOS</b> <b>FLUJO:</b> ORIFICIO DE RESTRICCIÓN FIJO PLACA DE ORIFICIO PLACA DE ORIFICIO DE CAMBIO RAPIDO ELEMENTO DE FLUJO TIPO VENTURI ELEMENTO DE FLUJO TIPO PITOT MEDIDOR DE CAUDAL TIPO TURBINA  MEDIDOR DE CAUDAL TIPO VORTEX  MEDIDOR DE CAUDAL TIPO SONICO MEDIDOR DE CAUDAL TIPO ROTAMETRO ENDEREZADOR DE FLUJO	
	VALVULA DE MARIPOSA		
	VALVULA DE BOLA		
	VALVULA CHECK		
	VALVULA DE AGUJA		
	VALVULA DE TRES VIAS		
	VALVULA DE CONTROL CON ACTUADOR DE DIAFRAGMA		
	VALVULA DE CONTROL CON ACTUADOR DE DIAFRAGMA y VOLANTE MANUAL		
	VALVULA DE CONTROL CON ACTUADOR MANUAL		
	VALVULA DE CONTROL CON ACTUADOR DE DIAFRAGMA y POSICIONADOR		
	VALVULA AUTOMATICA CON ACTUADOR DE PISTON y MUELLE DE RETORNO		
	VALVULA AUTOMATICA CON ACTUADOR DE PISTON DE DOBLE ACCION		
	VALVULA AUTOMATICA CON ACTUADOR ELECTROHIDRAULICO		
			<b>ELEMENTOS MISCELANEOS:</b> LUZ INDICADORA DETECTOR DE FUEGO ULTRAVIOLETA CORNETA PARA ALARMA CONTINUACION EN PLANO INDICADO LLEGADA DE PLANO INDICADO
			<b>SIMBOLOS PARA RELES</b> SUMAR-RESTAR-TOTALIZAR RESTAR POLARIZACION

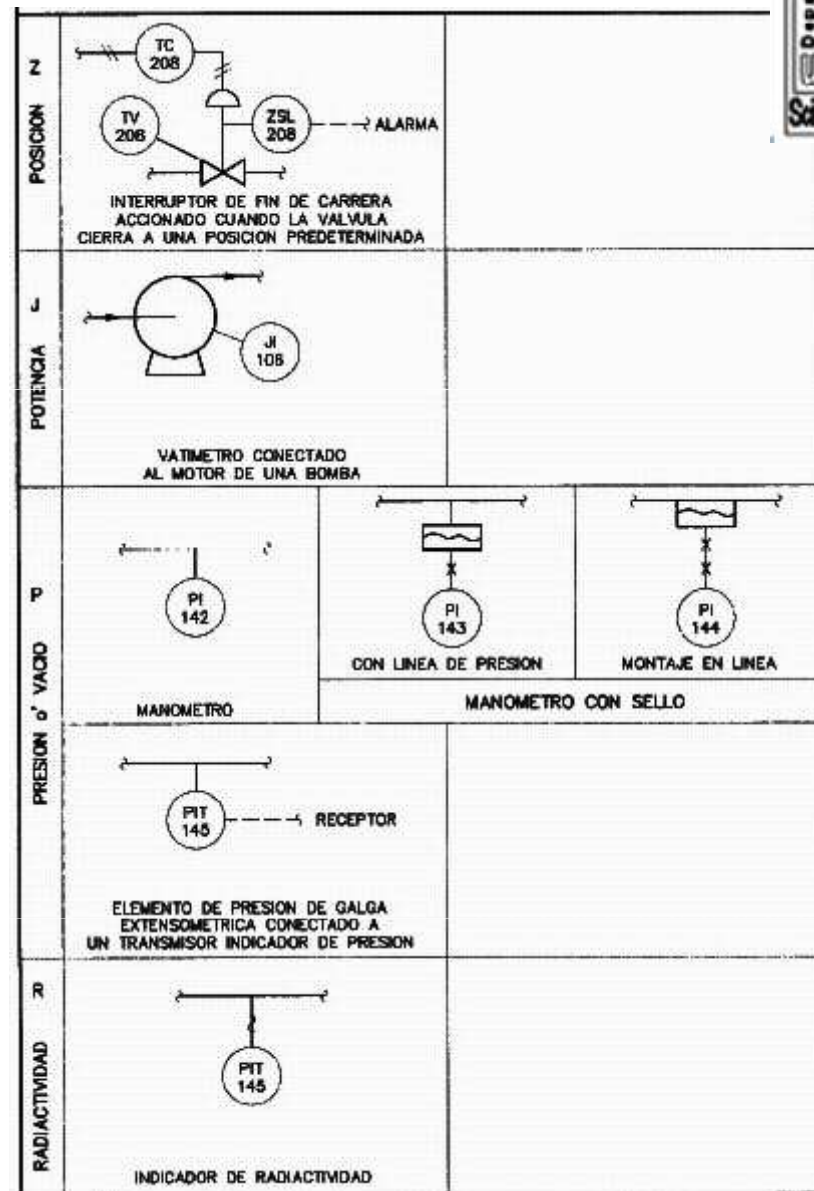
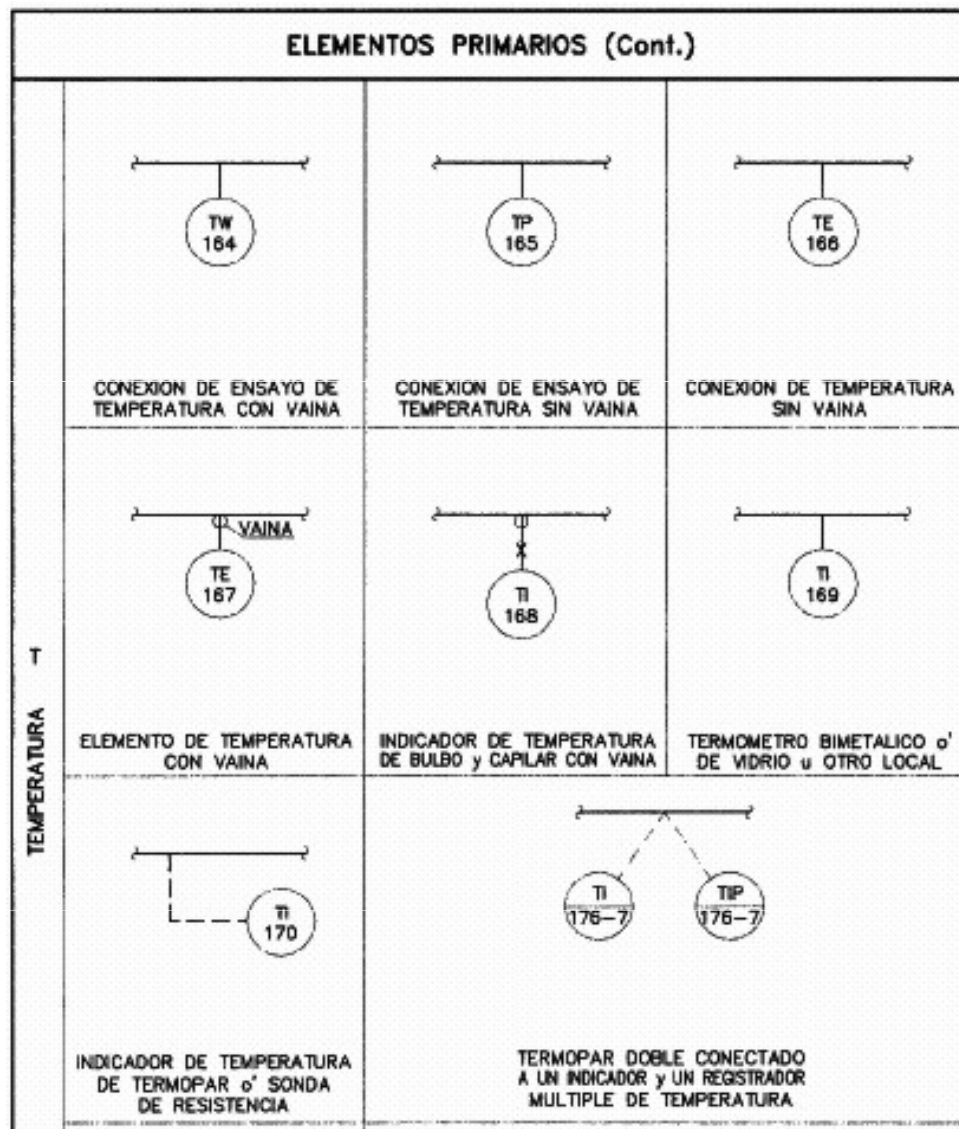
Fuente: ANSI / ISA S 5.1 - 1984 (R1992).

### IDENTIFICACION DE INSTRUMENTOS

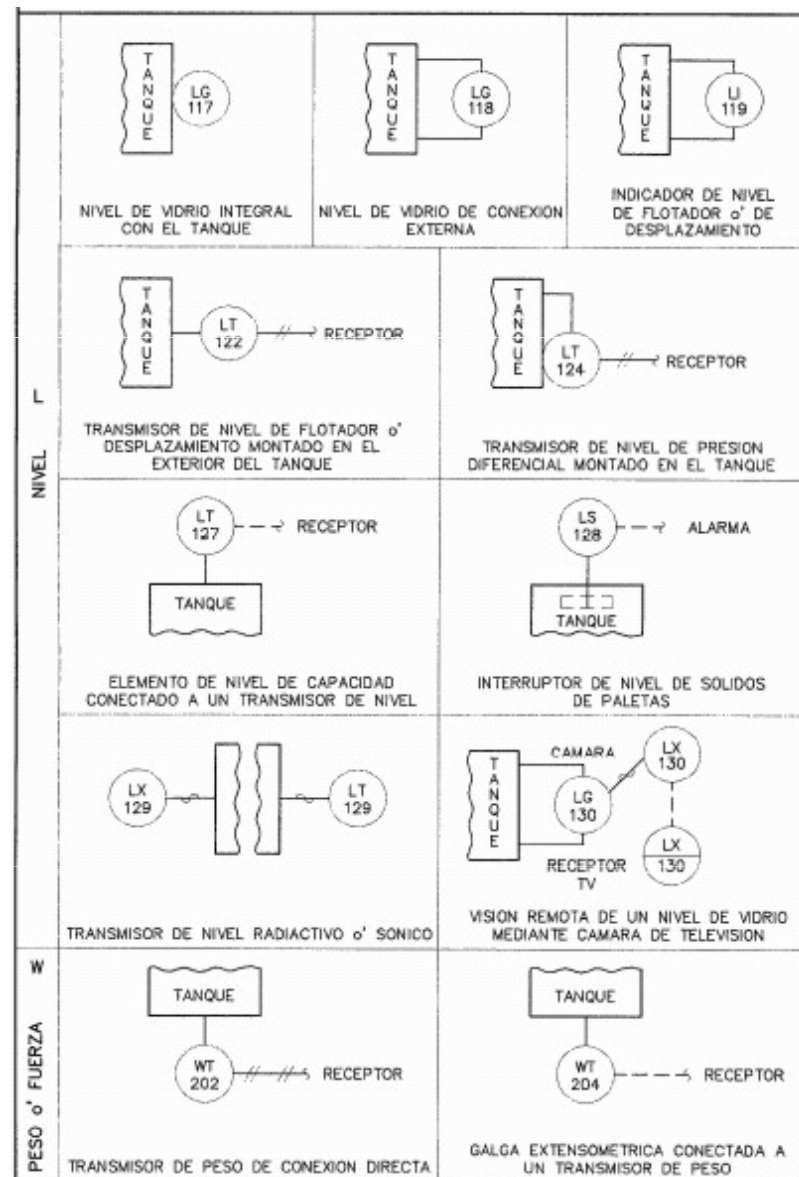
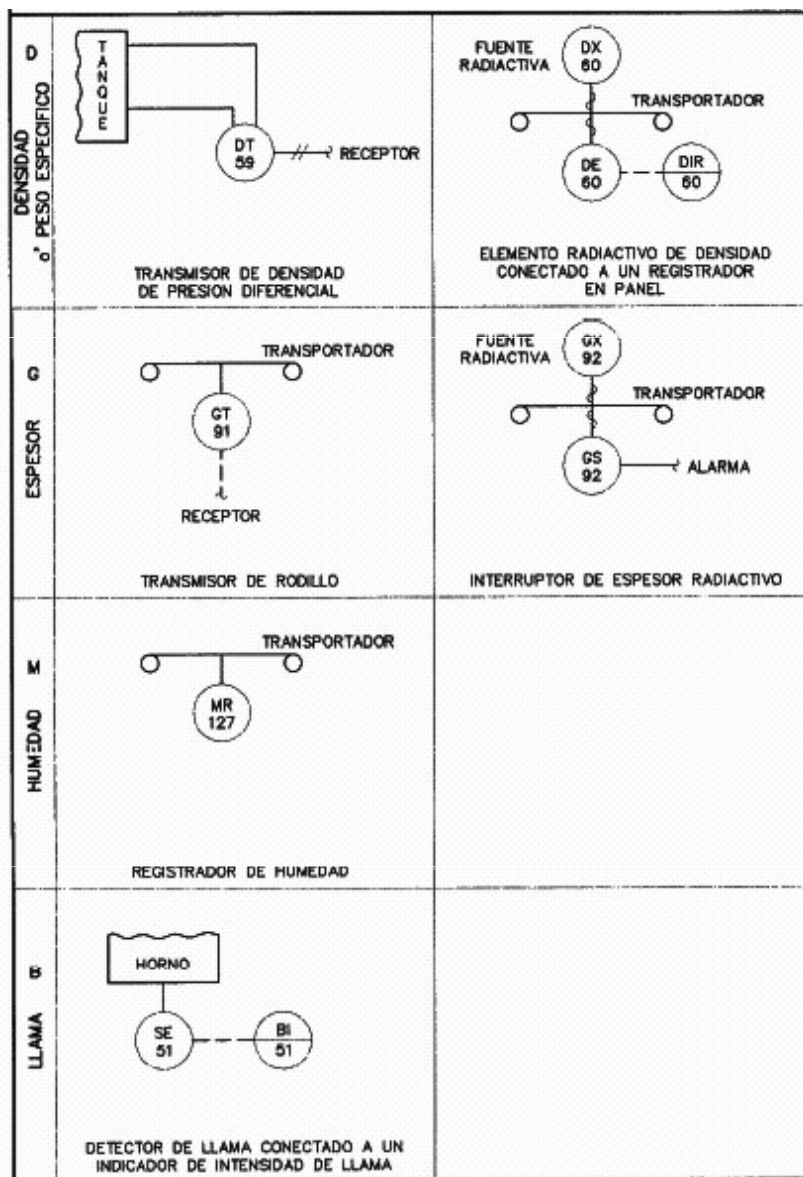
FUNCIÓN  VARIABLE	REGISTRADOR	INDICADOR	CONTROLADOR	REGISTRADOR/ CONTROL	INDICADOR/ CONTROLADOR	INTEGRADOR/ TOTALIZADOR	ALARMA	RELE	TRANSMISOR	ELEMENTO PRIMARIO	VALVULA	(CV)	(SV)	(G)	(S)	
	(R)	(I)	(C)	(RC)	(IC)	(Q)	(A)	(Y)	(T)	(E)	(V)					
ANALISIS	A	AR	AI	AC	ARC	AIC	AQ	AA	AY	AT	AE	AV			AS	
LLAMA	B		BI	BC		BIC		BA	BY	BT	BE			BG	BS	
CONDUCTIVID.	C	CR	CI	CC	CR	CIC		CA	CY	CT	CE	CV			CS	
DENSIDAD	D	DR	DI	DC	DRC	DIC		DA	DY	DT	DE	DV			DS	
VOLTAJE	E	ER	EI	EC	ERC	EIC		EA	EY	ET	EE				ES	
FLUJO	F	FR	FI	FC	FRC	FIC	FQ	FA	FY	FT	FE	FV	FCV	FSV	FG	FS
CORRIENTE	I	IR	II	IC	IRC	IIC	IQ	IA	IY	IT	IE				IS	
TIEMPO	K	KR	KI	KC	KRC	KIC	KQ	KA	KY	KT	KE	KV			KS	
NIVEL	L	LR	LI	LC	LRC	LIC		LA	LY	LT	LE	LV	LCV		LG	LS
HUMEDAD	M	MZ	MI	MC	MRC	MIC		MA	MY	MT	ME	MV			MS	
PRESION	P	PR	PI	PC	PRC	PIC		PA	PY	PT	PE	PV	PCV	PSV		PS
FRECUENCIA	S	SR	SI	SC	SRC	SIC		SA	SY	ST	SE	SV			SS	
VELOCIDAD	S	SR	SI	SC	SRC	SIC	SQ	SA	SY	ST	SE	SV			SS	
TEMPERATURA	T	TR	TI	TC	TRC	TIC		TA	TY	TT	TE	TV	TCV	TSV		TS
VISCOSIDAD	V	VR	VI	VC	VRC	VIC		VA	VY	VT	VE	VV			VG	VS
VIBRACION	Y	YR	YI	YC	YRC	YIC		YA	YY	YT	YE					YS
PESO	W	WR	WI	WC	WRC	WIC	WQ	WA	WY	WT	WE	WV				WS
INDEFINIDO	X	XR	XI	XC	XRC	XIC		XA	XY	XT	XE	XV				XS
POSICION(*)	Z	ZR	ZI	ZC	ZRC	ZIC		ZA	ZY	ZT	ZE	ZV			ZG	ZS
MANUAL	H			HC		HIC		HA				HV				HS

\*SE LE DEBE AÑADIR UNO DE LOS SIGUIENTES SUFIJOS: H,L,HH,LL, PARA INDICAR ALTO BAJO, MUY ALTO o MUY BAJO

COMBINACION IMPROBABLE    
  COMBINACION IMPOSIBLE



Fuente: ANSI / ISA S 5.1 - 1984 (R1992).



Fuente: ANSI / ISA S 5.1 - 1984 (R1992).

ANÁLISIS A	<p>RECEPTOR RECEPTOR ANÁLISIS DOBLE DE OXIGENO y COMBUSTIBLE</p>		
	<p>PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA BRIDA o' EN LA CAMARA ANULAR</p>	<p>PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA VENA CONTRAIDA, RADIALES o' EN LA TURBINA</p>	<p>PLACA-ORIFICIO CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PRESION DIFERENCIAL</p>
	<p>PLACA-ORIFICIO CON ACCESORIO DE CAMBIO RAPIDO</p>	<p>TUBO PITOT o' TUBO VENTURI-PITOT</p>	<p>TUBO VENTURI o' TOBERA</p>
CAUDAL F	<p>CANAL MEDIDOR</p>		
	<p>VERTEDERO</p>	<p>ELEMENTO DE TURBINA</p>	

ELEMENTOS PRIMARIOS (Cont.)			
CAUDAL F	<p>ROTAMETRO INDICADOR DE CAUDAL</p>	<p>TOTALIZADOR INDICADOR DE CAUDAL DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO</p>	<p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR CONECTADO A UN CONTROLADOR DE CAUDAL</p>
	<p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR CON TRANSMISOR</p>		
CONDUCTIVIDAD C	<p>CELULA DE CONDUCTIVIDAD CONECTADA AL PUNTO 5 DE UN REGISTRADOR MULTIPLE</p>		
	<p>TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD MIDIENDO CORRIENTE DE UN MOTOR</p>		

Fuente: ANSI / ISA S 5.1 - 1984 (R1992).

## ELEMENTOS FINALES DE CONTROL



VALVULA DE CONTROL  
 DIAFRAGMA VS RESORTE  
 FALLA DE AIRE ABRE (FO)  
 FALLA DE AIRE CIERRA (fc)

EMPUJA PARA CERRAR  
 (FALLA DE AIRE ABRE)

EMPUJA PARA ABRIR  
 (FALLA DE AIRE CIERRA)



VALVULA DE MARIPOSA  
 FALLA DE AIRE ABRE (FO)  
 FALLA DE AIRE CIERRA (FC)

EMPUJA PARA ABRIR  
 (FALLA DE AIRE CIERRA)

EMPUJA PARA CERRAR  
 (FALLA DE AIRE ABRE)



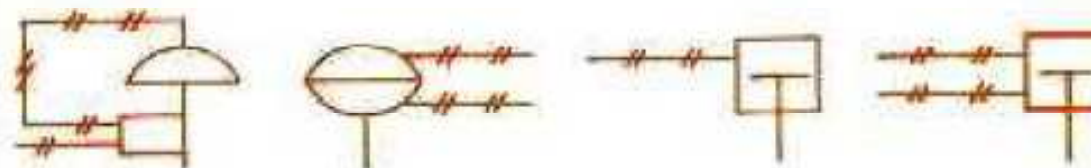
TRES VIAS  
 DESVIACION  
 HACIA ABAJO

TRES VIAS  
 DESVIACION  
 HACIA DIRECTA

BOLA

SOLENOIDE

SOLENOIDE  
 ALTERNADA



VALVULA CON  
 POSICIONADOR

DIAFRAGMA VS  
 DIAFRAGMA

PISTON

PISTON DE  
 DOBLE ACCION

SIMBOLOS PARA VALVULAS DE CONTROL			
GLOBO, COMPUERTA u OTRA	ANGULO	MARIPOSA, PERSIANA o' COMPUERTA	OBTURADOR ROTATIVO o' VALVULA DE BOLA
TRES VIAS	CUATRO VIAS		
SIN CLASIFICAR			



ACCION DEL ACTUADOR EN CASO DE FALLO DE AIRE (o' DE POTENCIA)		
ABRE EN FALLO (FAIL OPEN)	CIERRA EN FALLO (FAIL CLOSED)	ABRE EN FALLO A VIA A-C
ABRE EN FALLO A VIAS A-C y D-B	SE BLOQUEA EN FALLO (FAIL LOCKED)	POSICION INDETERMINADA EN FALLO (FAIL INDETERMINATE)

Fuente: ANSI / ISA S 5.1 - 1984 (R1992).



# Control en cascada

---

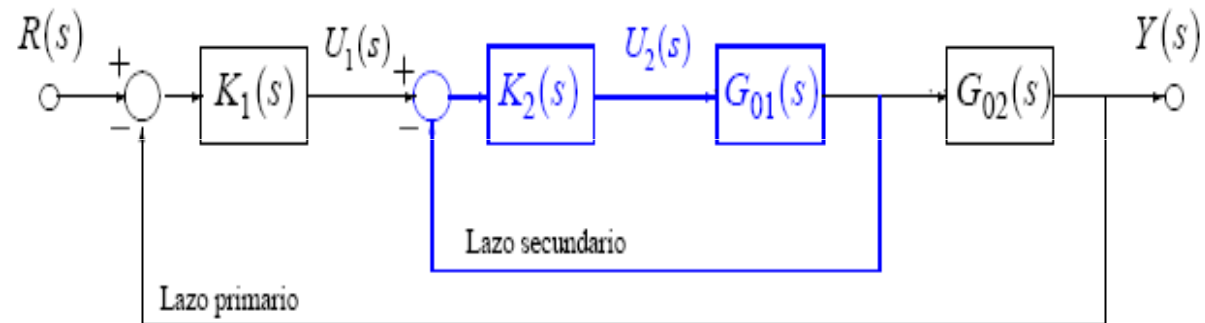
**Control en el cual la señal de salida de un controlador ingresa como valor deseado en otro controlador; y la señal de salida de este último, actúa directamente sobre el elemento final de control.**



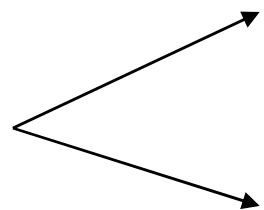
- **Es una estructura alternativa de control para rechazar perturbaciones parcialmente medibles.**
- **La idea básica es realimentar variables intermedias entre la perturbación y la salida.**

# Estrategia del control en cascada

Estructura básica de un control en cascada:



Presenta básicamente dos lazos:



Lazo primario con un controlador primario  $K_1(s)$ .

Lazo secundario con un controlador secundario  $K_2(s)$ .

**El control secundario se diseña para atenuar el efecto de la perturbación antes de que alcance a afectar significativamente la salida  $y(t)$ .**

# Ejemplo: Control de temperatura en un reactor continuo. Aplicación de un lazo de control simple.

## Perturbaciones del sistema:

- Caudal producto
- Temperatura producto
- Composición producto
- Presión fluido refrig.
- Temperatura fluido refrig.

## Inconvenientes:

Para cambios en  $T_c$  y  $P_c$ , el sistema responde lento debido al retardo en la transferencia de energía.

Diagrama P&ID

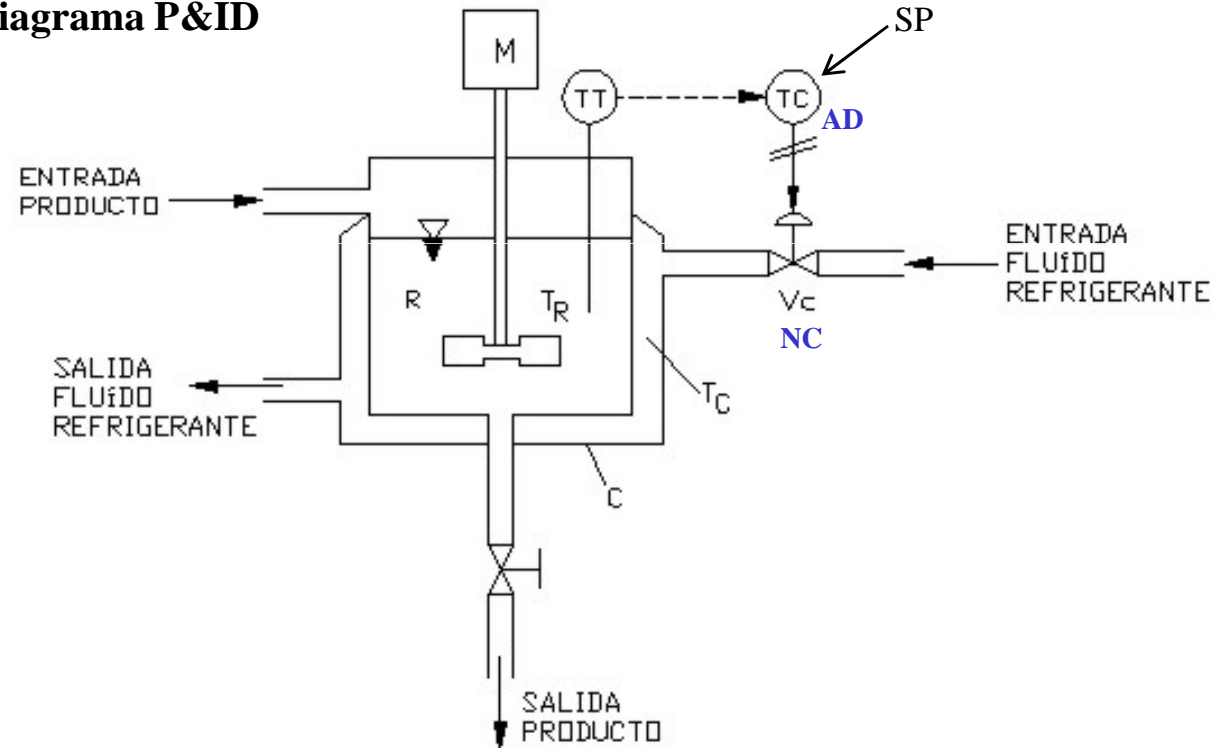
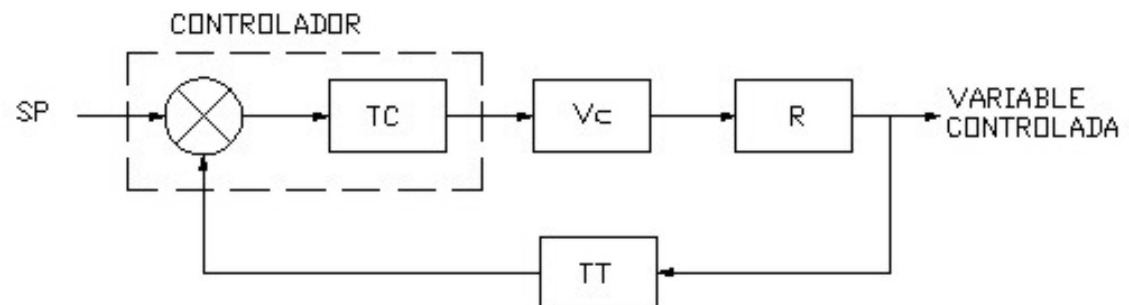


Diagrama de bloques



# Ejemplo: Control de temperatura en un reactor continuo. Aplicación de un lazo de control en cascada Temp.-Temp.

## Mejora:

Este sistema mantiene cte  $T_c$ , evitando variaciones grandes en  $T_R$ .

## Inconvenientes:

Para variaciones de  $P_c$  el sistema pierde efectividad.

Diagrama P&ID

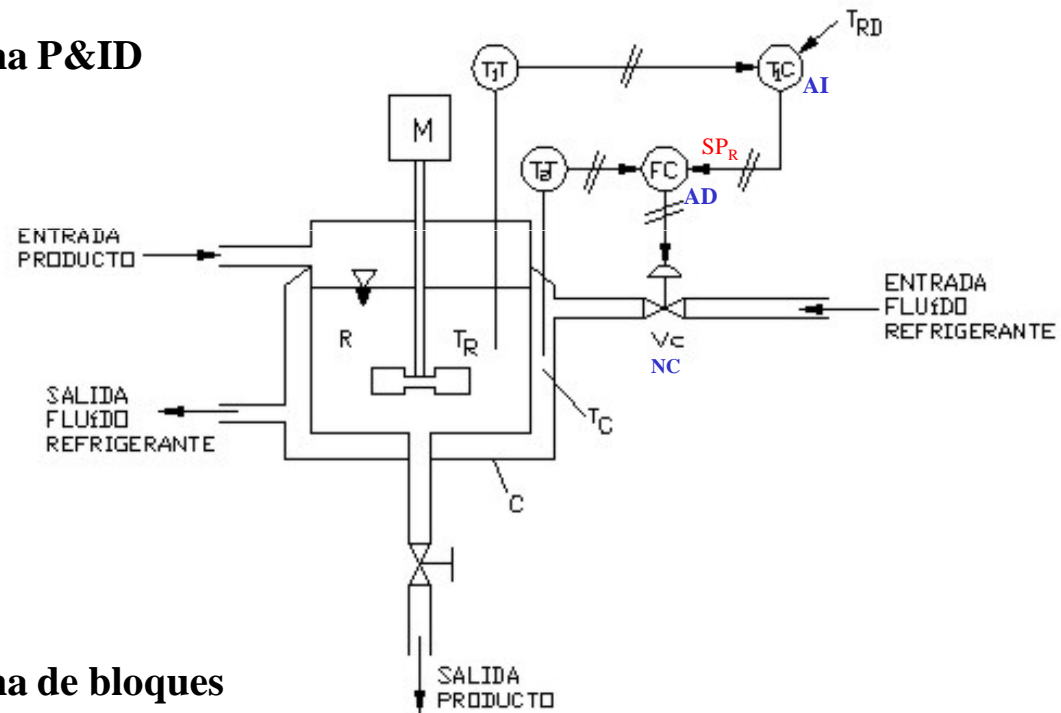
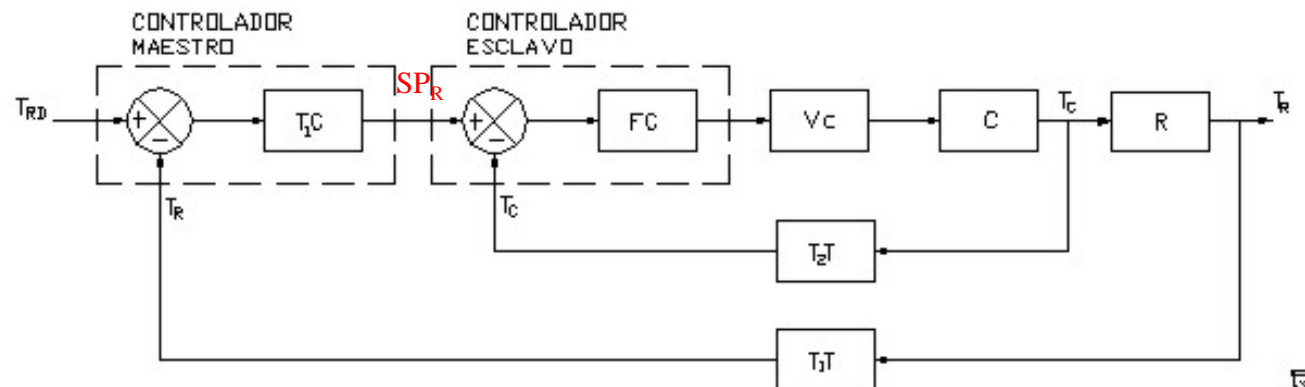


Diagrama de bloques



# Ejemplo: Control de temperatura en un reactor continuo. Aplicación de un lazo de control en cascada Temp.-Caudal.



## Mejora:

Este sistema tiene en cuenta las variaciones de  $P_c$ .

## Inconveniente:

No ayuda p/ variaciones de  $T_c$ .

Diagrama P&ID

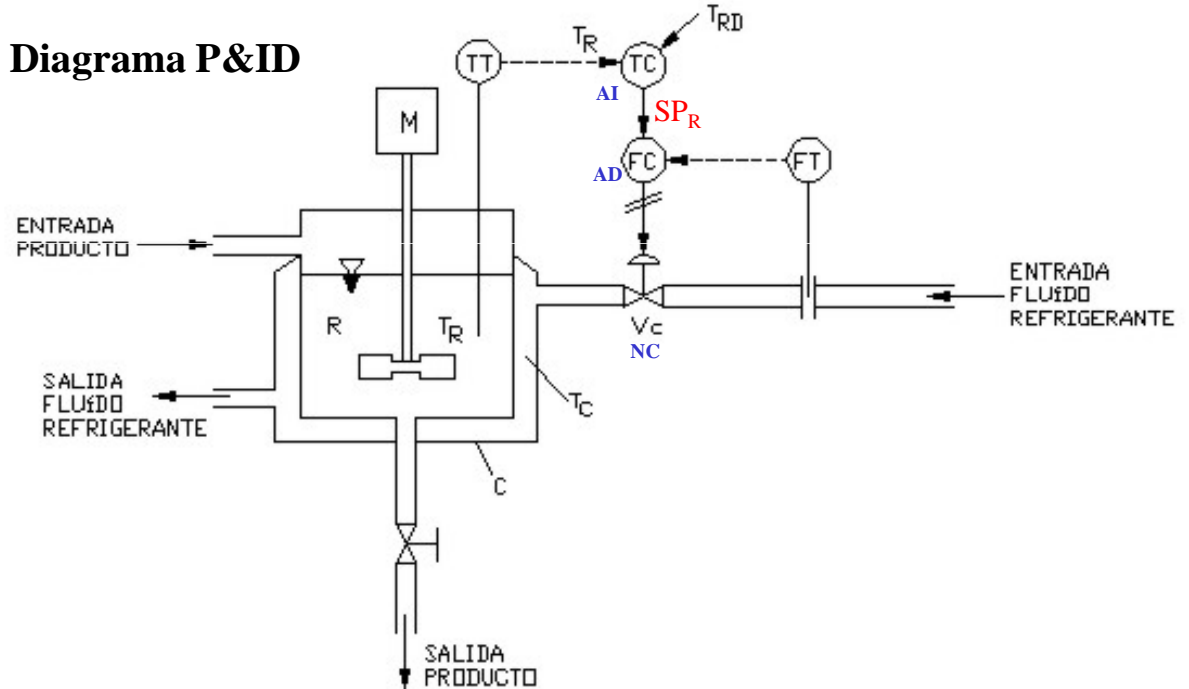
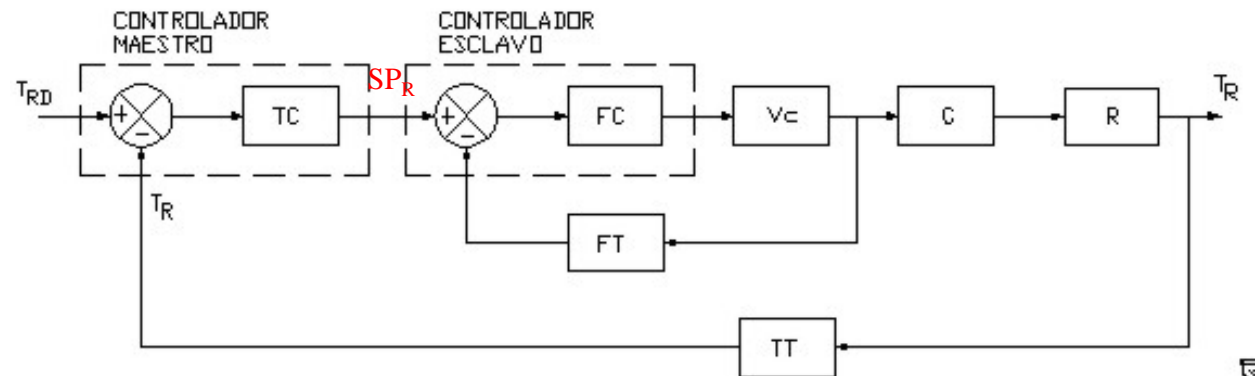


Diagrama de bloques



# Ejemplo: Control de temperatura en un reactor continuo. Aplicación de un lazo de control con doble cascada Temp.- Temp.-Caudal.



Diagrama P&ID

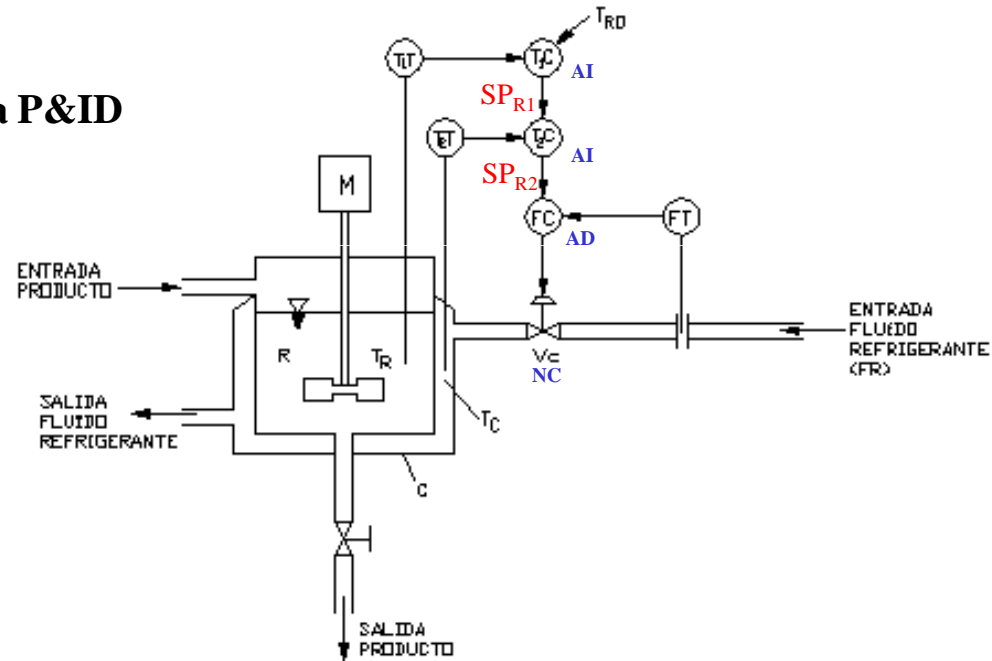
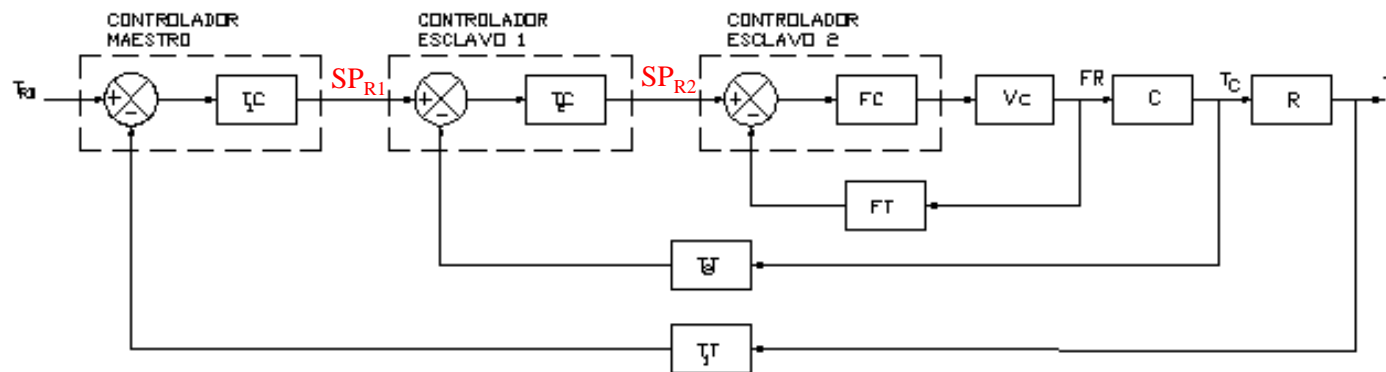
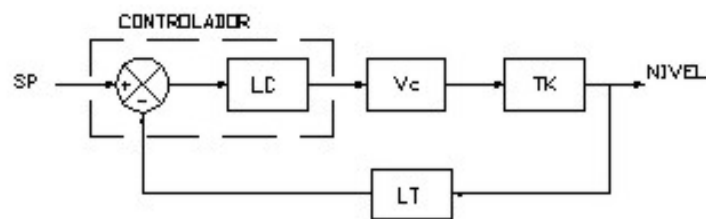
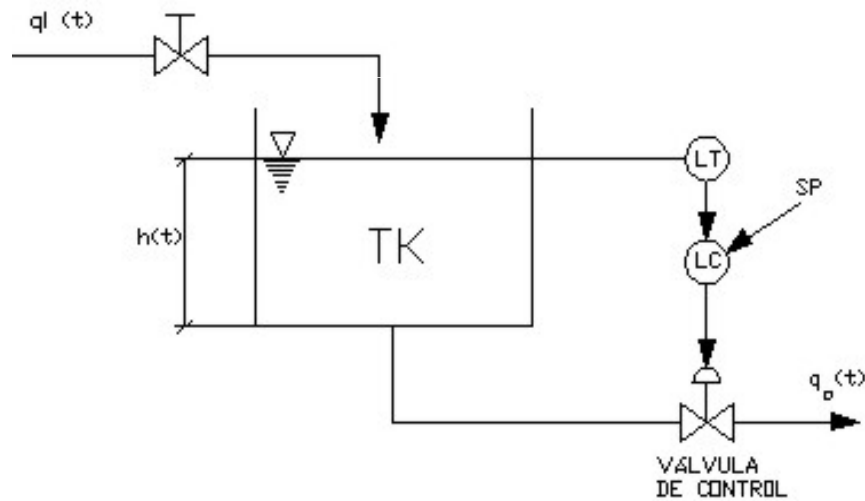


Diagrama de bloques

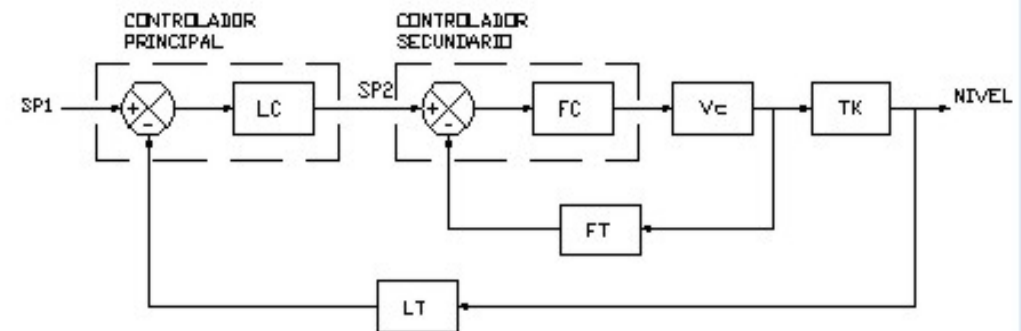
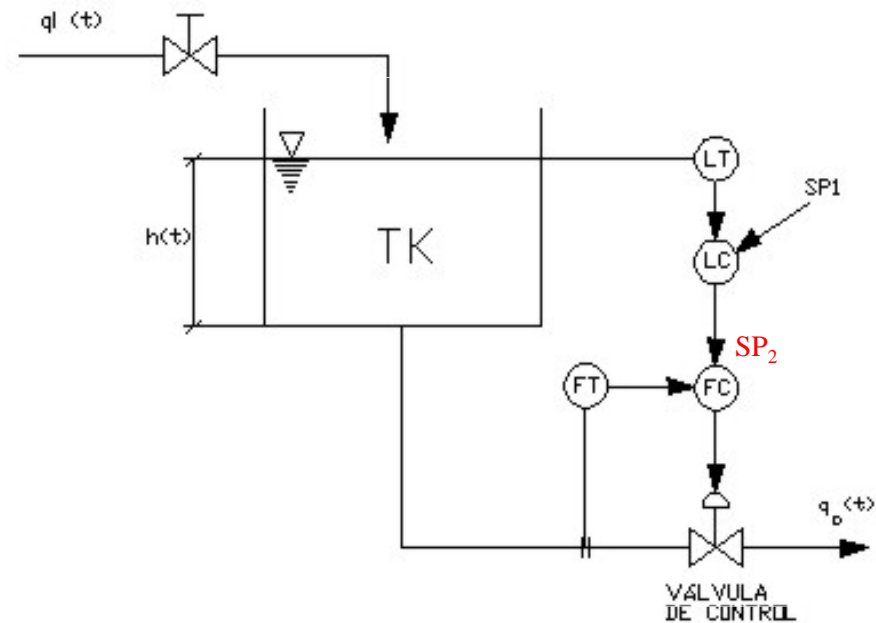


# Aplicación de un control de nivel en cascada.

LAZO SIMPLE DE CONTROL



CASCADA NIVEL-CAUDAL



## Ventajas del control en cascada

---

- Las perturbaciones del lazo secundario son corregidas antes que afecten la variable primaria.
- Los retrasos de fases en los procesos intermedios son disminuidos por el lazo secundario.
- Brindan ajustes precisos en la manipulación de fluidos másicos o energéticos.

## Condiciones para su aplicación

---

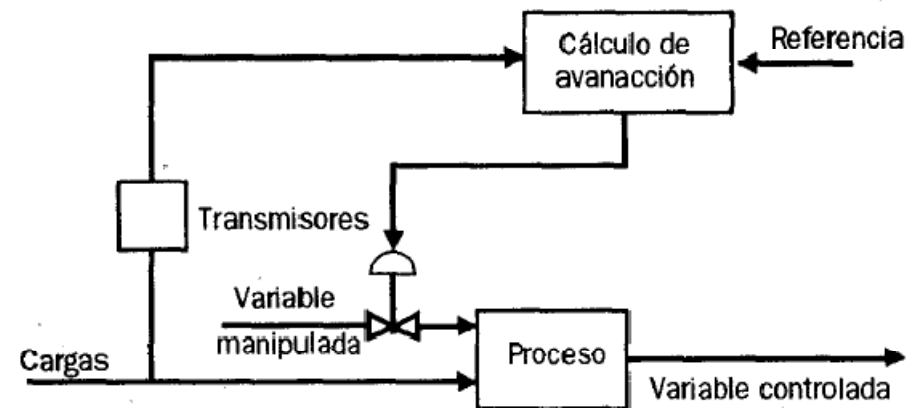
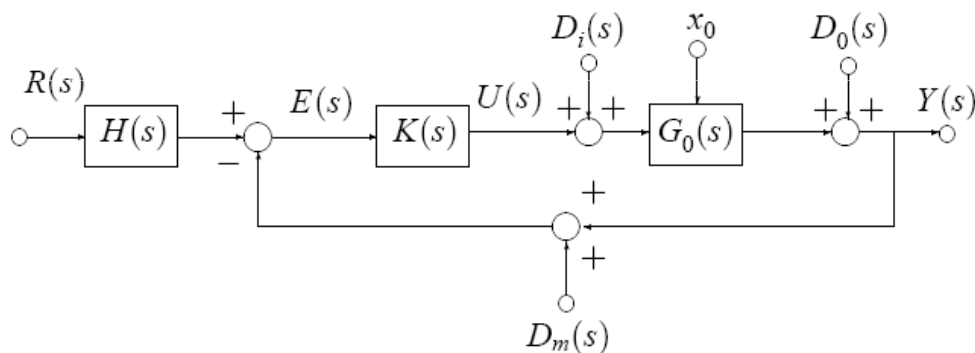
- Debe ser posible medir una variable intermedia de influencia sobre la variable controlada.
- La suma de los retardos de los elementos que integran el lazo secundario, debe ser menor a la suma de los elementos del lazo primario.



# Control en adelante (Avanacción).

Control en el cual la información de una o más condiciones que puedan “perturbar” la variable controlada, son convertidas fuera de cualquier lazo de control, en una acción correctiva que se suma a la señal de salida del controlador para minimizar la desviación de dicha variable.

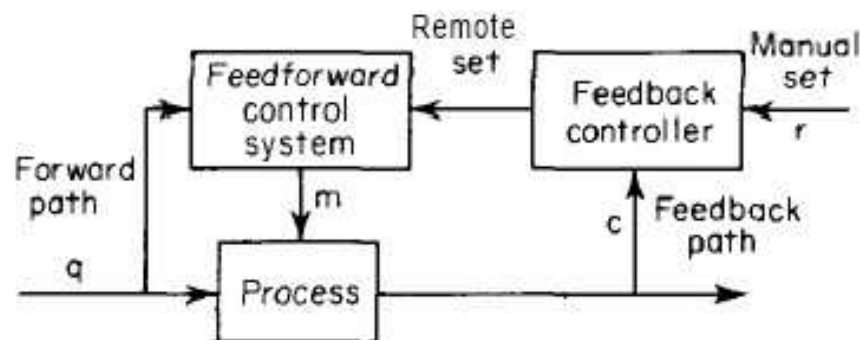
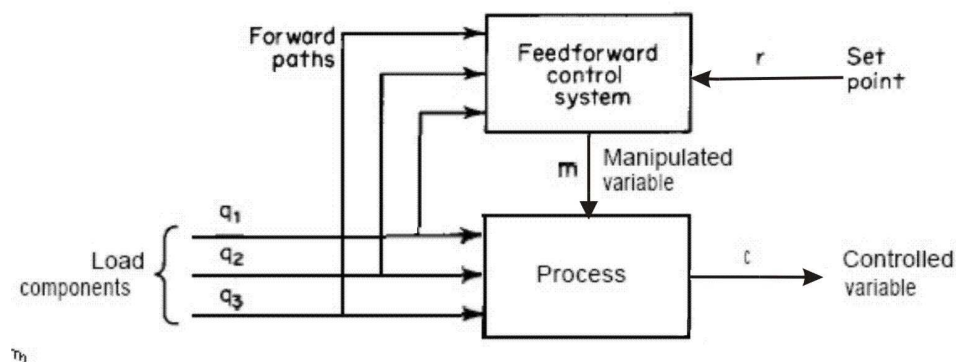
Estructura básica de un control en avanacción:



# Característica de la Avanación

La Avanación no altera la estabilidad de un sistema, ya que es un lazo de “control abierto adelantado”. No forma parte de ningún lazo retroalimentado quien determina las características de estabilidad del conjunto.

Inyección de señales perturbadoras medibles en el lazo del proceso.



Estructura del control feedforward en relación al control feedback:

# Ejemplo: Control de temperatura en un intercambiador de calor.

## Variables características del sistema:

- Variable controlada: Temperatura  $T_2$
- Variable manipulada: Caudal vapor  $F_V$
- Perturbaciones: Temperatura  $T_1$   
Caudal líquido  $F_L$

## Defectos del sistema implementado:

- Errores de exactitud en los cálculos.
- Velocidad de compensación dinámicamente no ajustada.



Diagrama P&ID

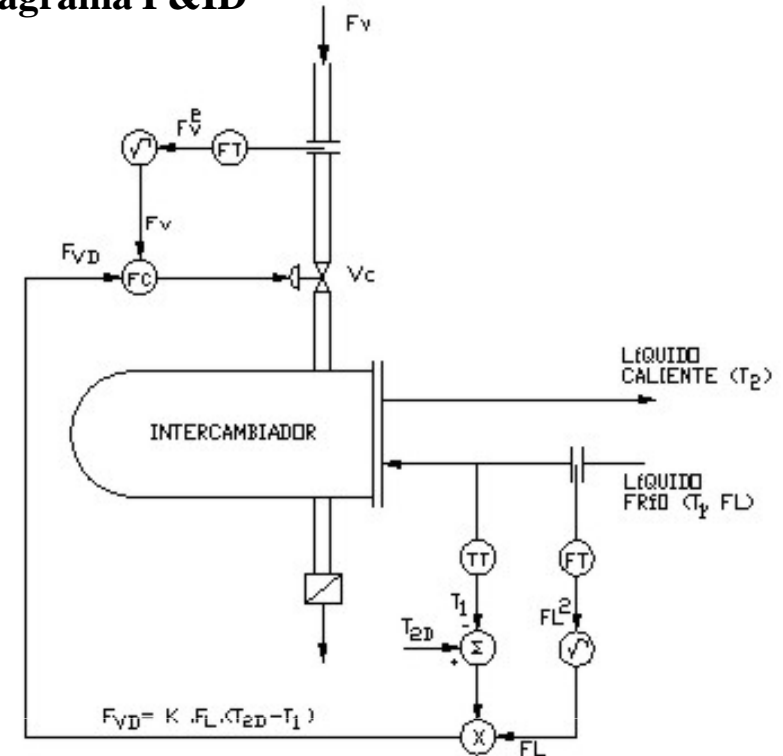
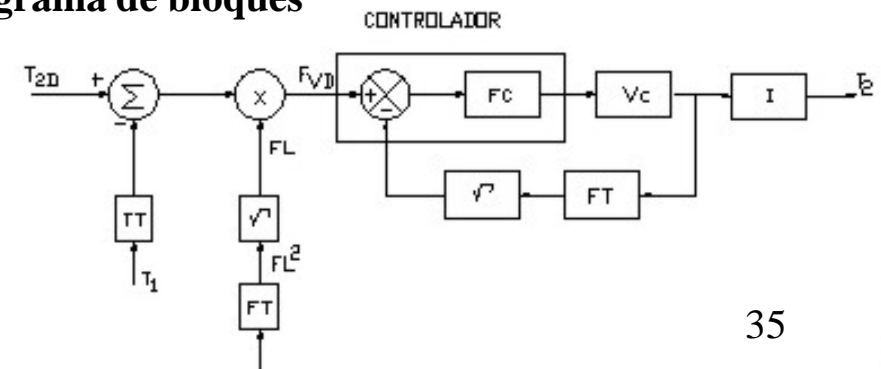


Diagrama de bloques



# Ejemplo: Control de temperatura en un intercambiador (mejorado).

- La velocidad de compensación se ajusta con la inclusión de relés dinámicos.
- Los errores de exactitud se eliminan con la introducción de realimentación negativa.



Diagrama P&ID

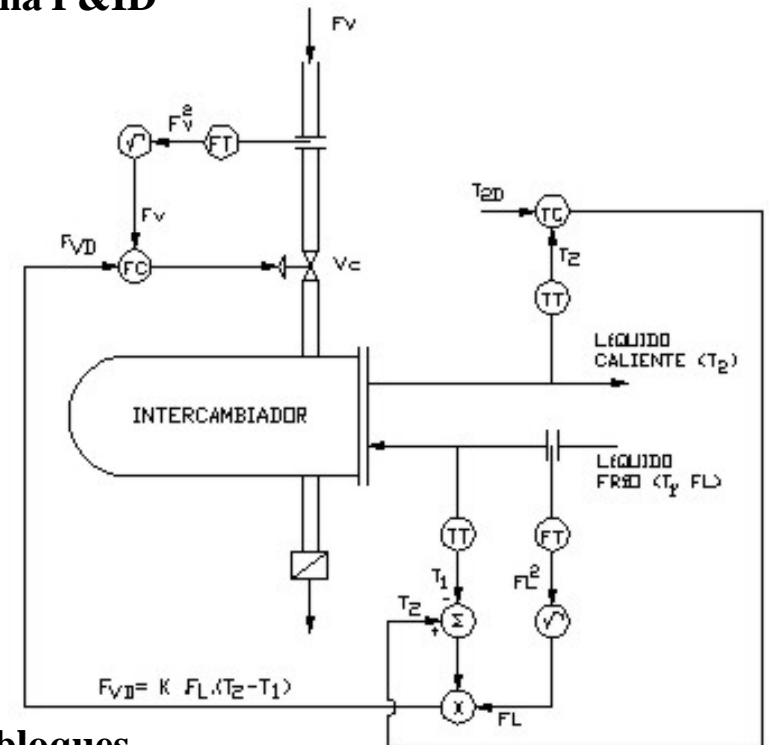
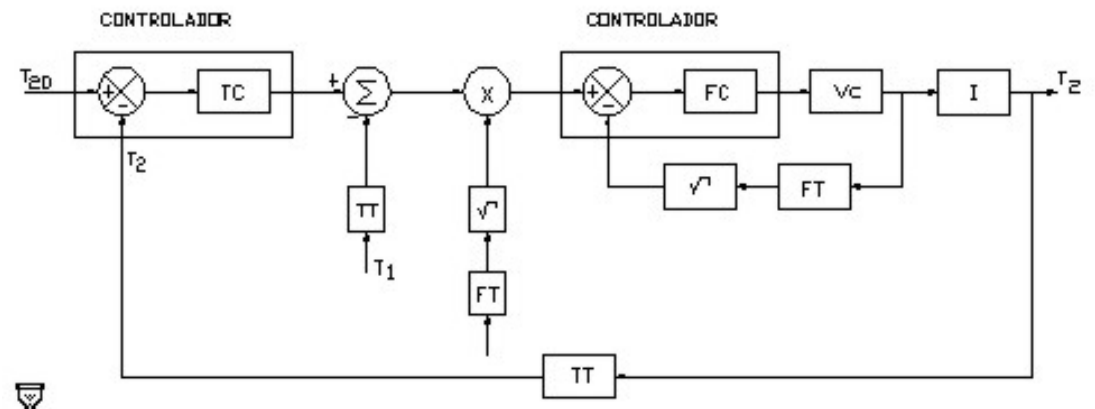


Diagrama de bloques



# Ventajas del control en Avanzación

---

- Reducción del efecto de las perturbaciones sobre la variable controlada.
- Mejora en la respuesta de sistemas que poseen retardos importantes.
- Posibilidad de agregarse a un lazo de control por realimentación.

## Condiciones para su aplicación

---

- Debe ser posible medir las variables perturbadoras del sistema.
- Debe poder introducirse realimentación negativa para asegurar una variable controlada constante.

# Conclusión

---

- Con el control en realimentación se asegura la estabilidad interna del lazo y el desempeño robusto en régimen permanente.
- Con el control FeedForward, se pueden hacer «retoques finos» al diseño para mejorar la respuesta transitoria del sistema.



# Control de Relación

**Control en el cual permite mantener una relación fija entre dos o más variables, por lo general flujos.**

- Se utiliza en procesos continuos de mezcla de flujos en los que se requiere mantener una cierta relación entre ellos.
- Requiere de cálculos aritméticos.
- Su implementación depende del proceso y del dispositivo de control.

Diagrama P&I

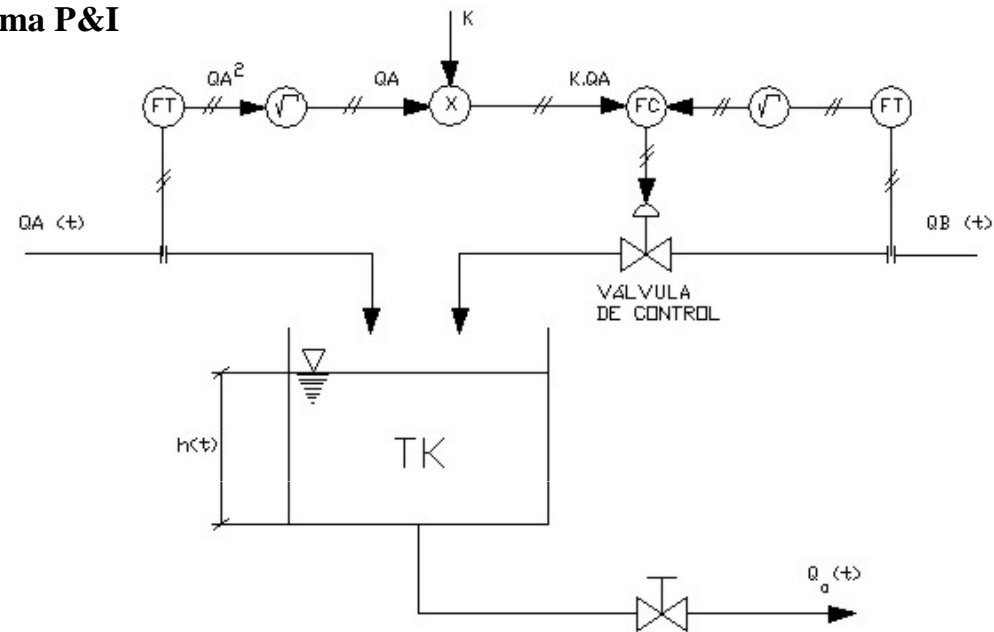
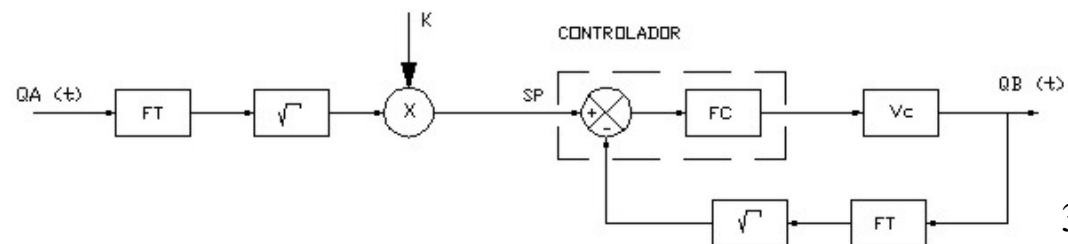


Diagrama de bloques



# Control de Relación Multiblending

Este control permite mezclar más de dos corrientes con distintas relaciones.

Diagrama P&ID

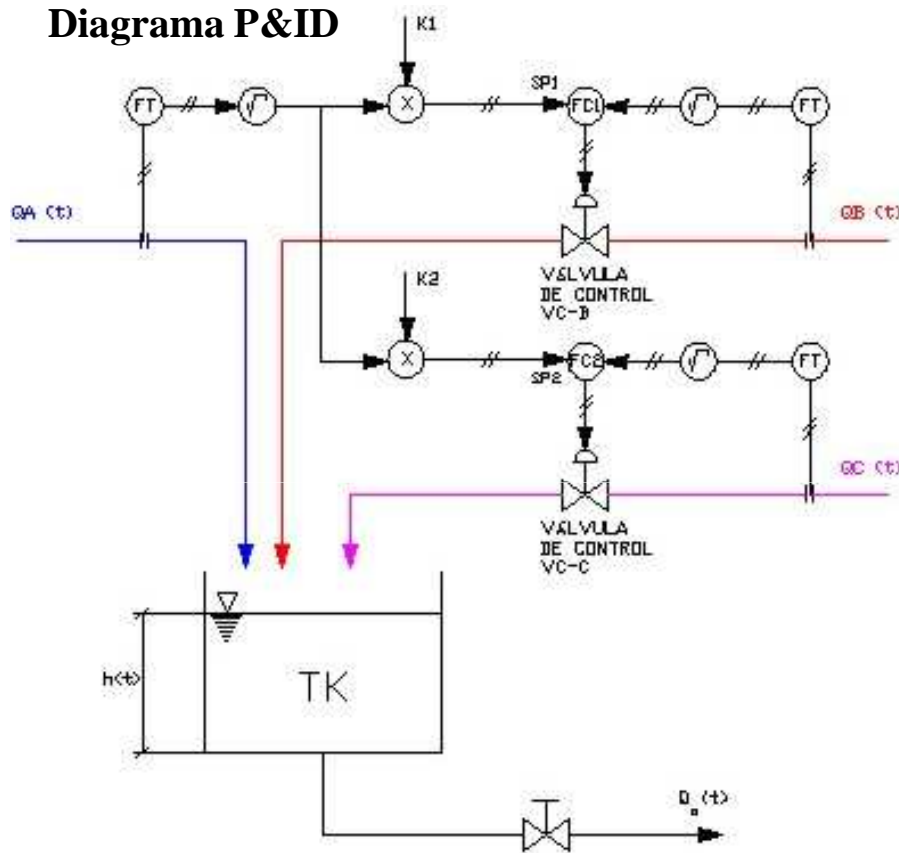
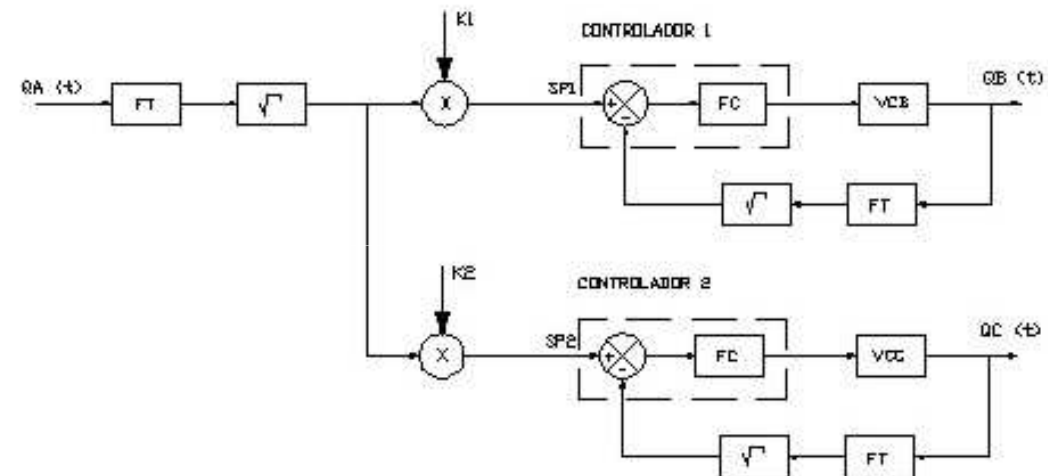


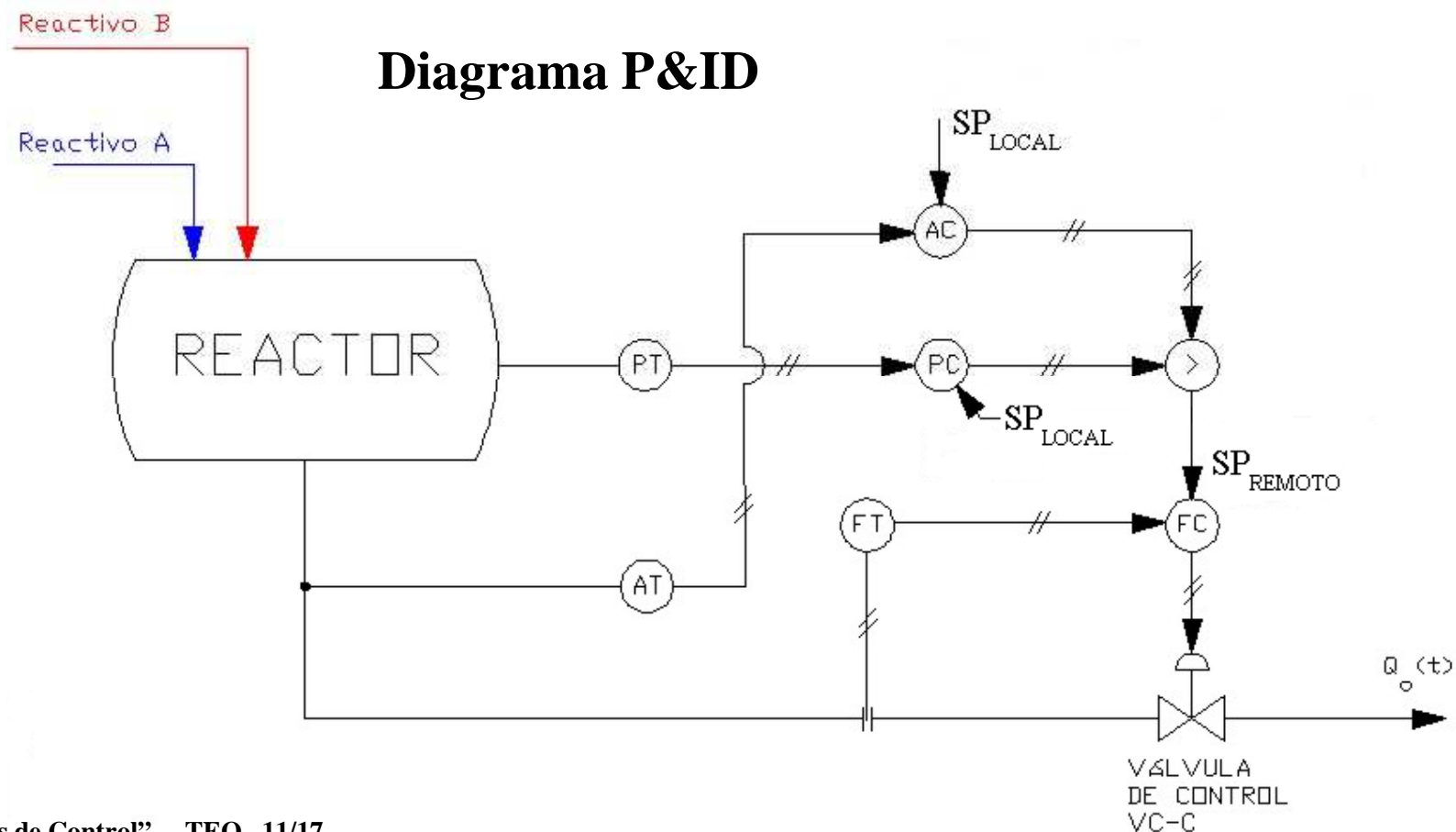
Diagrama de bloques





# Control de Restricción

Este control permite restringir o relevar acciones de control en operaciones particulares donde se desee que una señal prevalezca sobre otra.



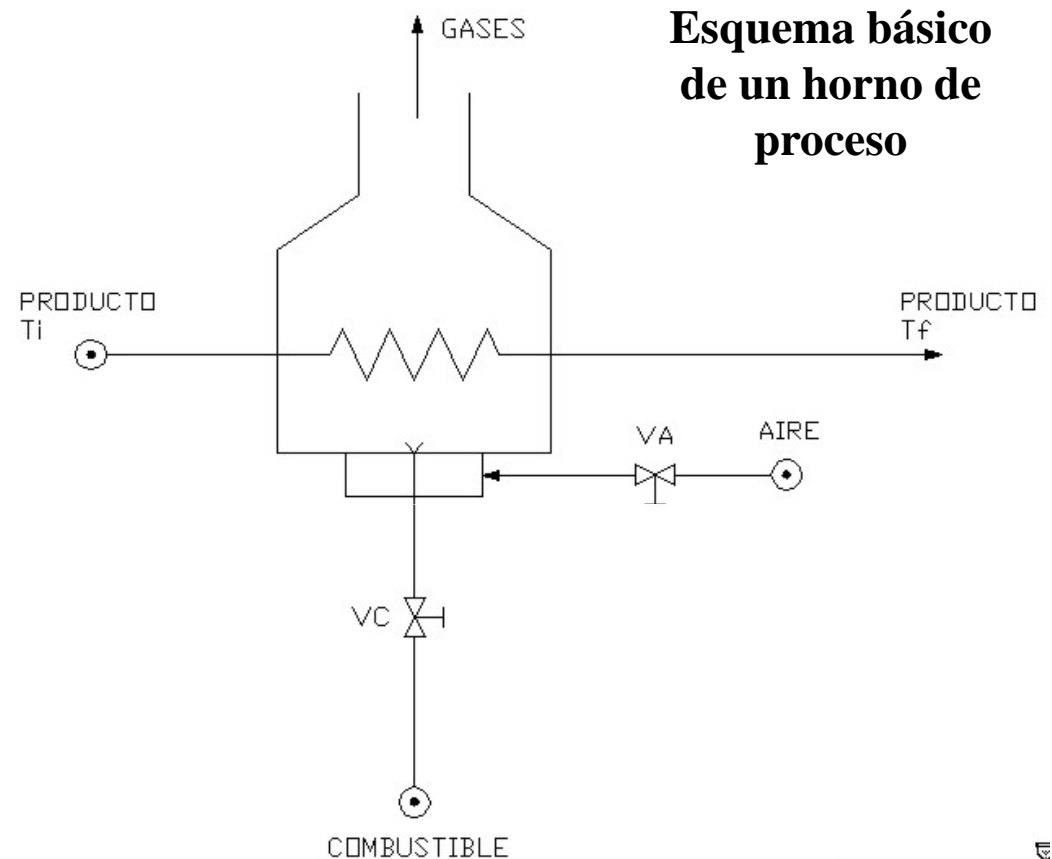
# SISTEMAS DE CONTROL EN HORNOS CONTROL DE TEMPERATURA



## HORNOS - DEFINICIÓN:

Son equipos que forman parte de un proceso, donde se producen una reacción de combustión para generar calor y transferirlo al medio para aprovechar su energía.

- Son equipos de proceso lentos.
- Tienen pocas variables a controlar y manipular.
- Típicamente, el objetivo de control es la temperatura del producto ( $T_f$ ).
- En estos casos la entrada de energía es lo único manipulable.



## OBSERVACIONES:

● El factor fundamental es el sistema de medición, ya que los retardos por este motivo son muy significativos.

P/Medición de temperatura:

c/Vaina: tiempo de respuesta a un escalón de temperatura de 20 a 40 [seg].

c/Bulbo desnudo: tiene una respuesta de 2 a 4 [seg].

● Para este tipo de proceso es muy útil disponer de acción derivativa.

Ajustes típicos son  $BP = 30$  a  $60$  %,  $I = 1$  a  $0,07$  [1/min] y  $TD = 1$  a  $3$  [min].



# Ejemplo: Control de temperatura en horno. Combustión en lazo abierto.

- Manejo de la combustión sin medir caudales ni sus resultados.
- El relé auxiliar TY mantiene la relación aire combustible.
- Accionamiento paralelo sobre válvulas de aire y combustible.
- Aplicable a hornos chicos con perturbaciones del combustible poco probable.

Diagrama P&I

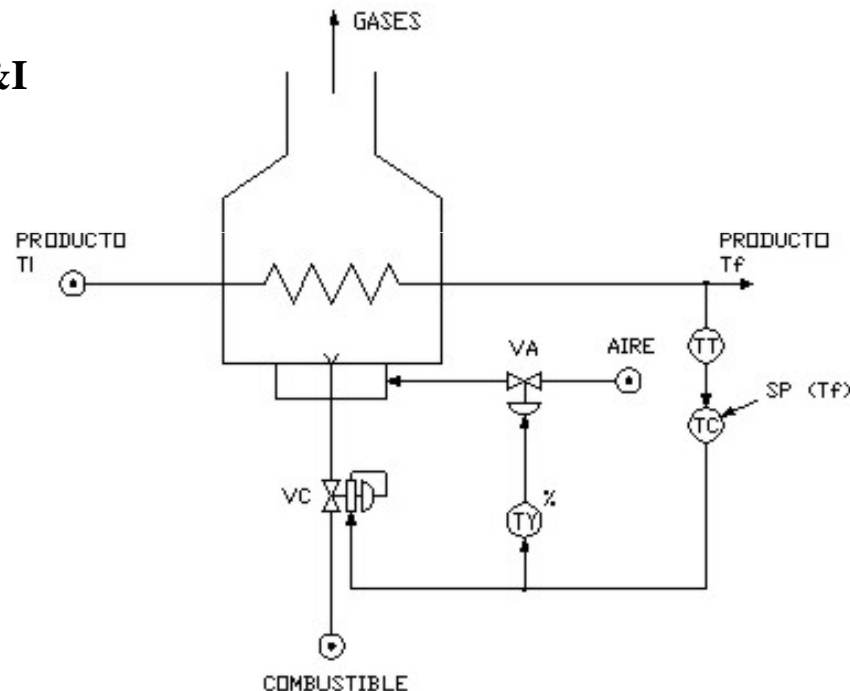
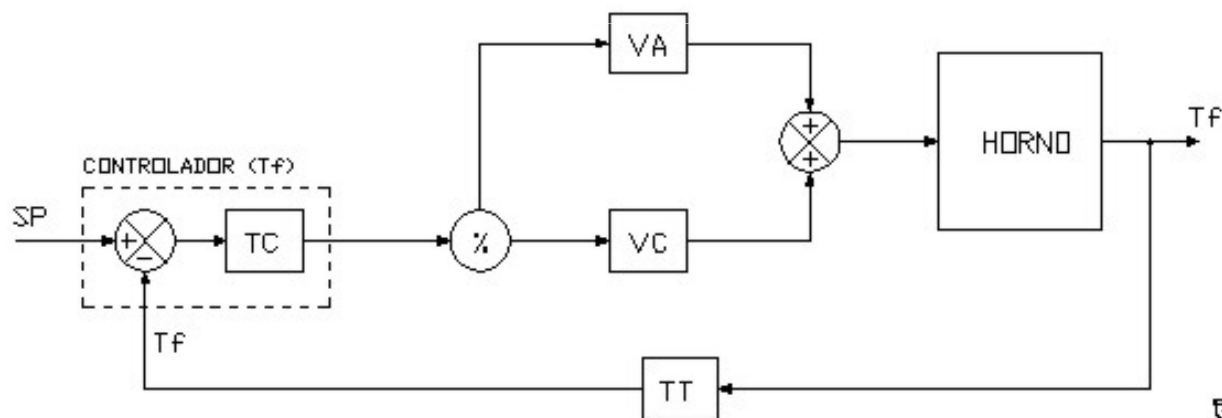


Diagrama de bloques



# Ejemplo: Control de temperatura en horno. Sistema en cascada “paralelo con medición”.

- Manejo de la combustión sin medir sus resultados.
- El relé auxiliar TY mantiene la relación aire combustible.
- Accionamiento paralelo sobre válvulas de aire y combustible con mediciones de sus caudales.
- Compensa perturbaciones del lazo interno de ambos flujos.

Diagrama P&I

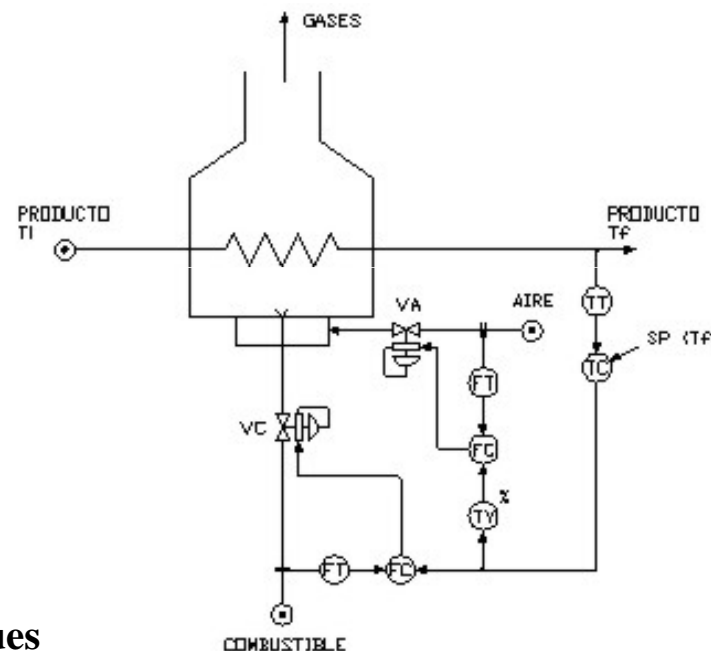
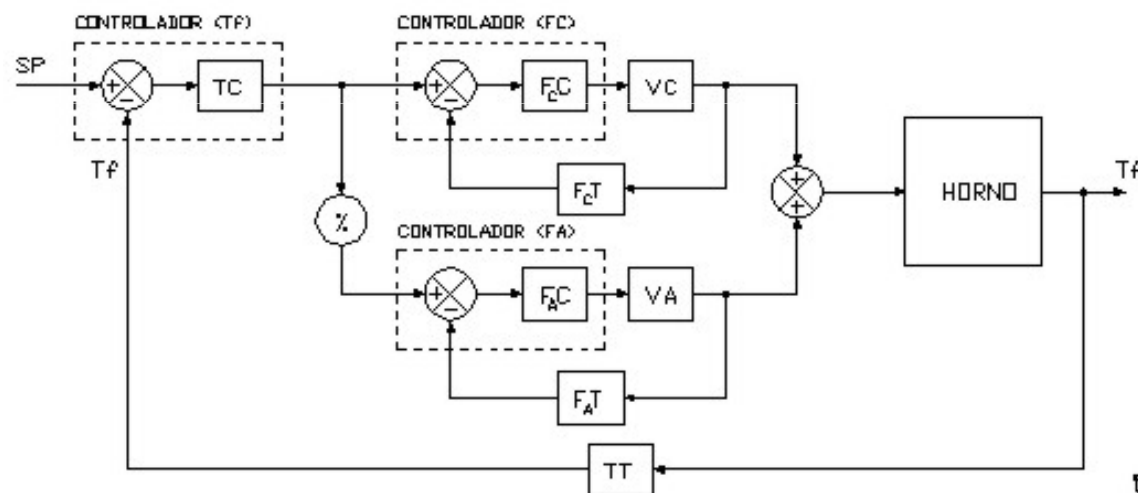


Diagrama de bloques



# Ejemplo: Control de temperatura en horno. Sistema con verificación de la combustión.

- Manejo de la combustión con medición de sus resultados.
- Estructura no conveniente para sistemas con manejo del combustible con variaciones frecuentes.
- Tiempo de tránsito en el horno, menor que el tiempo de muestreo y análisis.
- Genera altos periodos transitorios para el control de aire .

Diagrama P&I

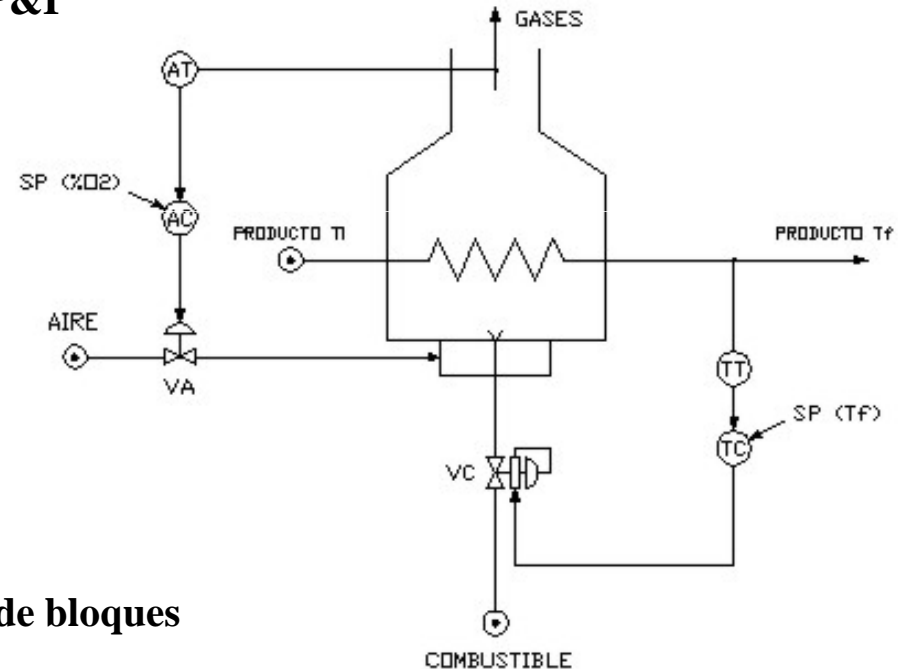
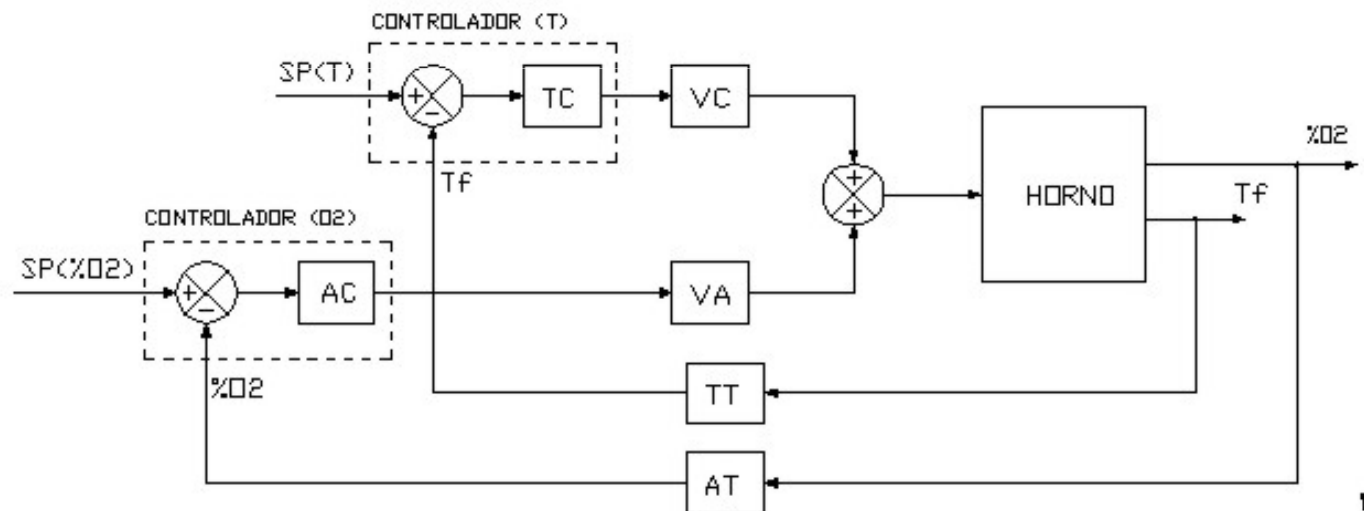


Diagrama de bloques



# Ejemplo: Control de temperatura en horno. Sistema con verificación de la combustión y acción correctora y limitadora.



- Manejo de la combustión con medición de sus resultados.
- Controla en lazo cerrado la calidad de la combustión.
- El AC cumple una función correctora.
- Los relés de alta y de baja (AY), limitan la acción de control del AC.

Diagrama P&I

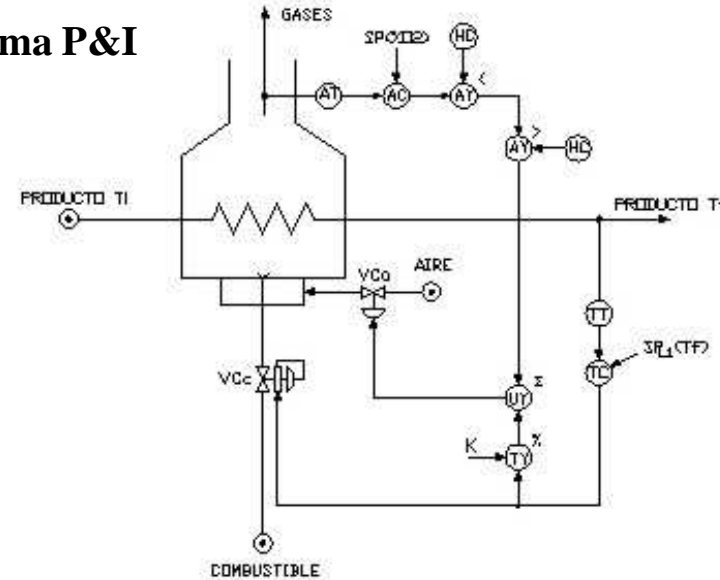
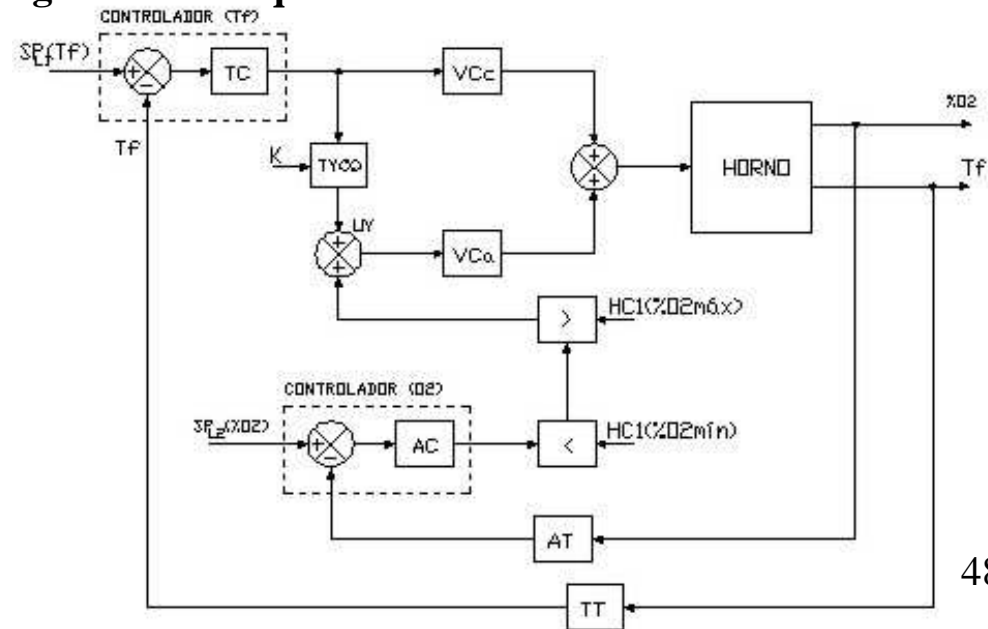


Diagrama de bloques





# Ejemplo: Control de temperatura en horno. Sistema con verificación de la combustión en Avanzación y realimentación negativa.



- Manejo de la combustión con medición de sus resultados y del flujo de combustible y aire.
- El control en Avanzación entra como SP en el lazo interno del TC.
- El AC cumple una función correctora, mientras el TY mantiene la relación aire combustible.

Diagrama P&I

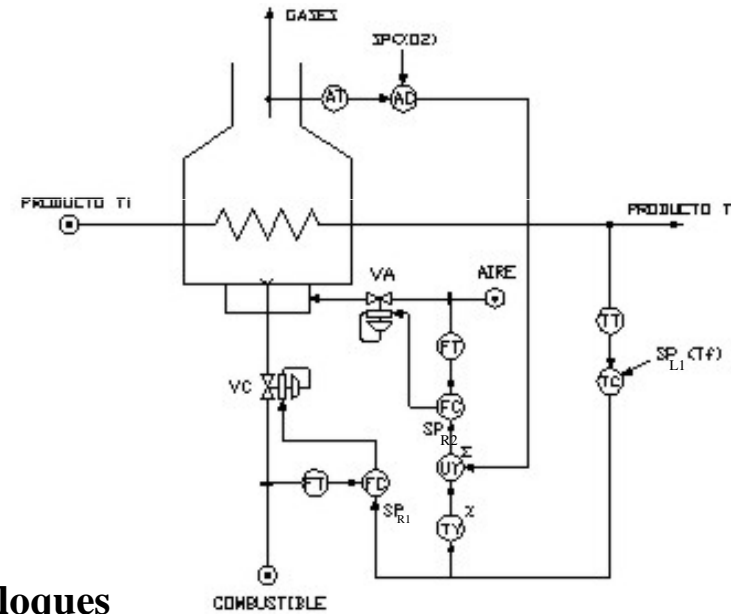
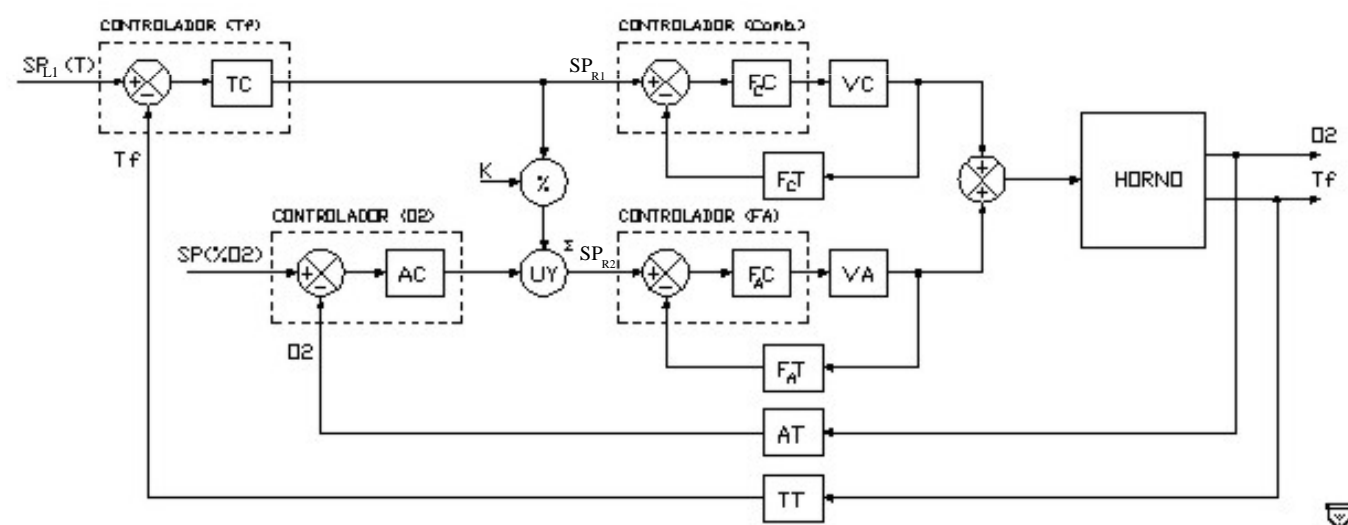


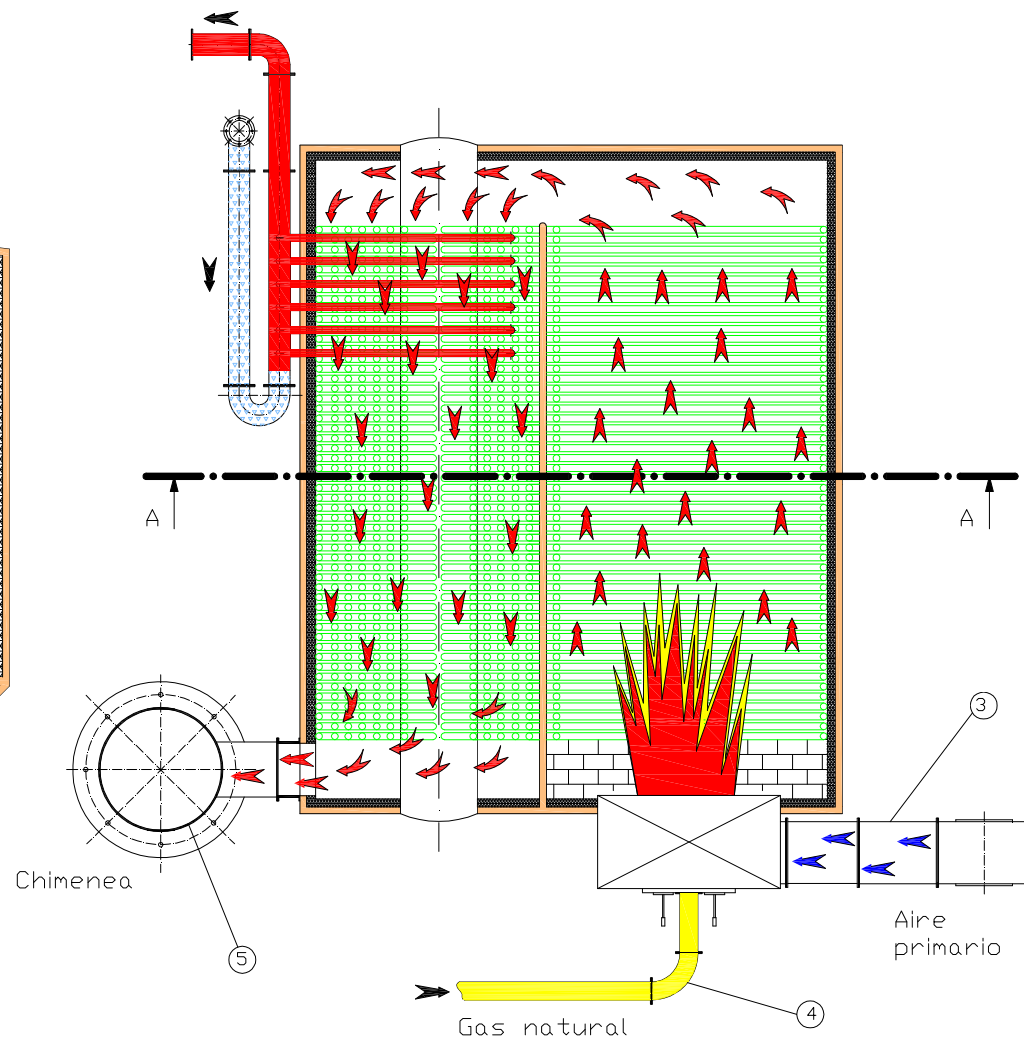
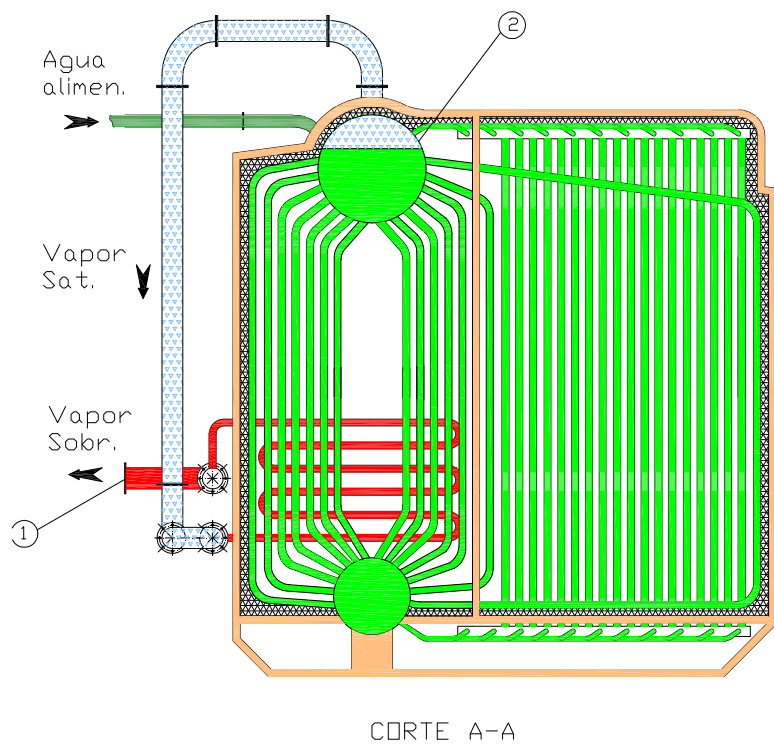
Diagrama de bloques



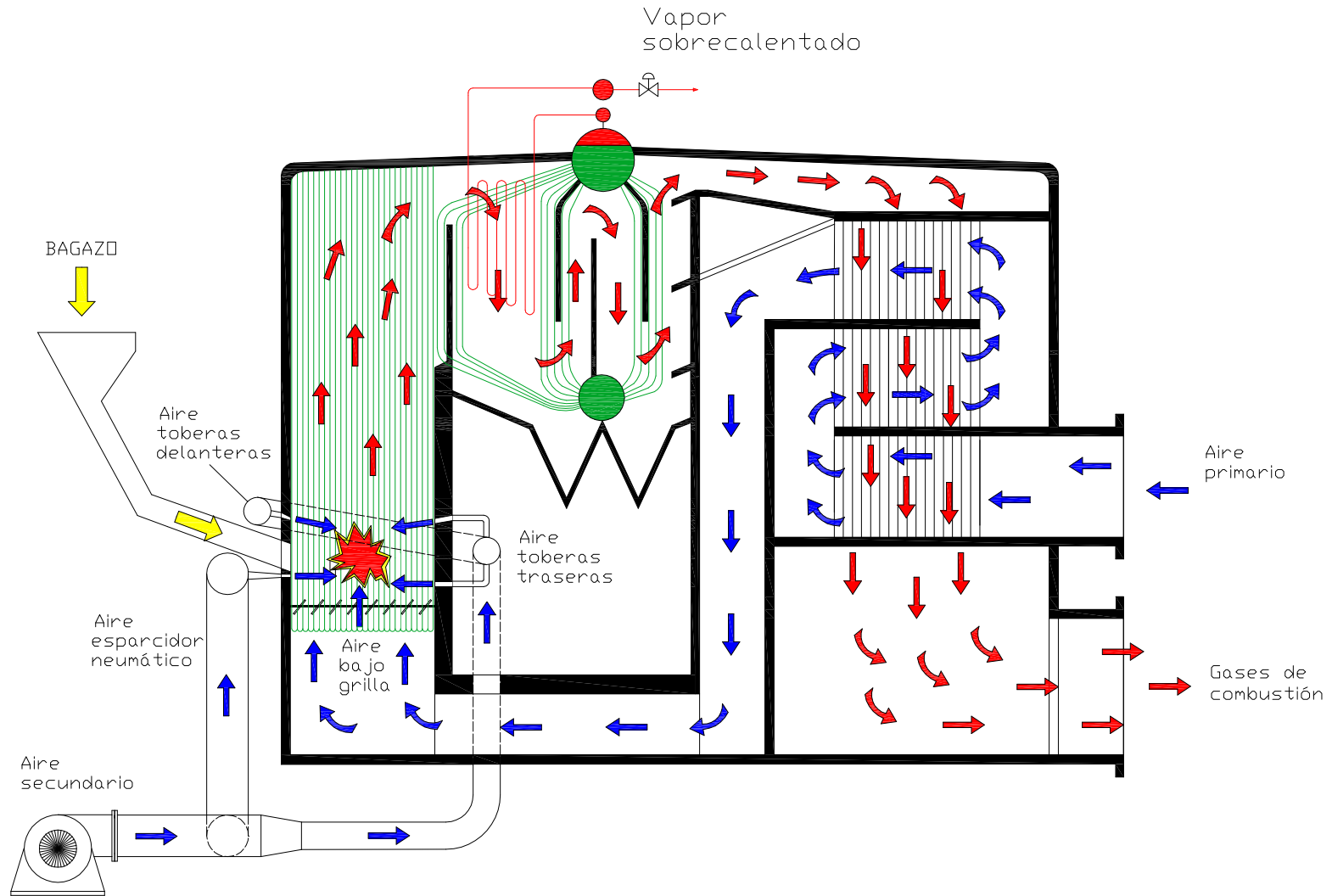
# SISTEMAS DE CONTROL APLICADOS A CALDERAS DE VAPOR



# Esquema general de una caldera gasera



# Esquema general de una caldera bagacera



# Especificaciones básicas de una caldera de vapor

---

- Producción de vapor
- Presión del vapor
- Temperatura del vapor.

*En las calderas la variable clave de control es la presión de vapor*

Los sistemas de control deben ser aptos para operarlas adecuadamente entre un 15 y 100% de la capacidad nominal de generación, manteniendo las variables dentro de las especificaciones.

# Sistemas de control aplicados a calderas de vapor

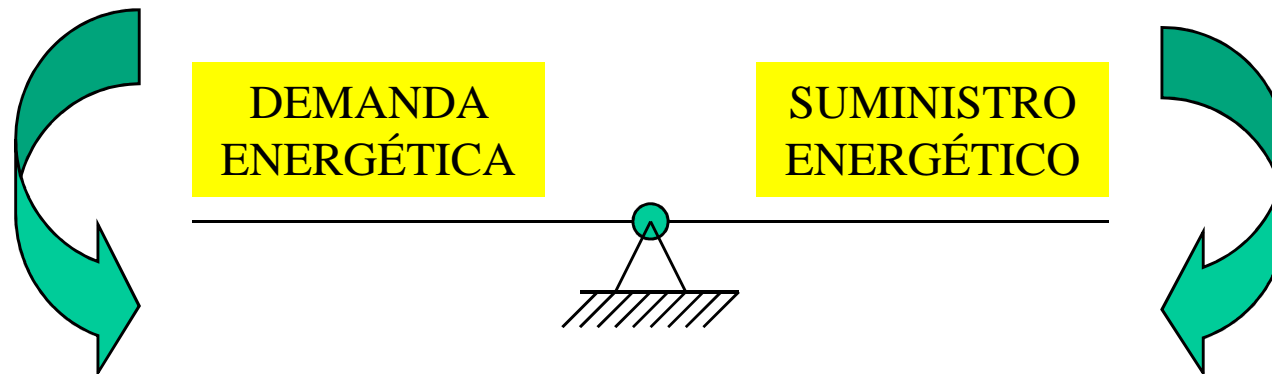
---

- Control de balance de energía.
- Control de hogar o de combustión.
- Control de nivel de domo.
- Control del agua de alimentación.
- Control de presión en el hogar.
- Control de temperatura del aire primario.
- Control de temperatura del vapor sobrecalentado.



# Control de balance de energía

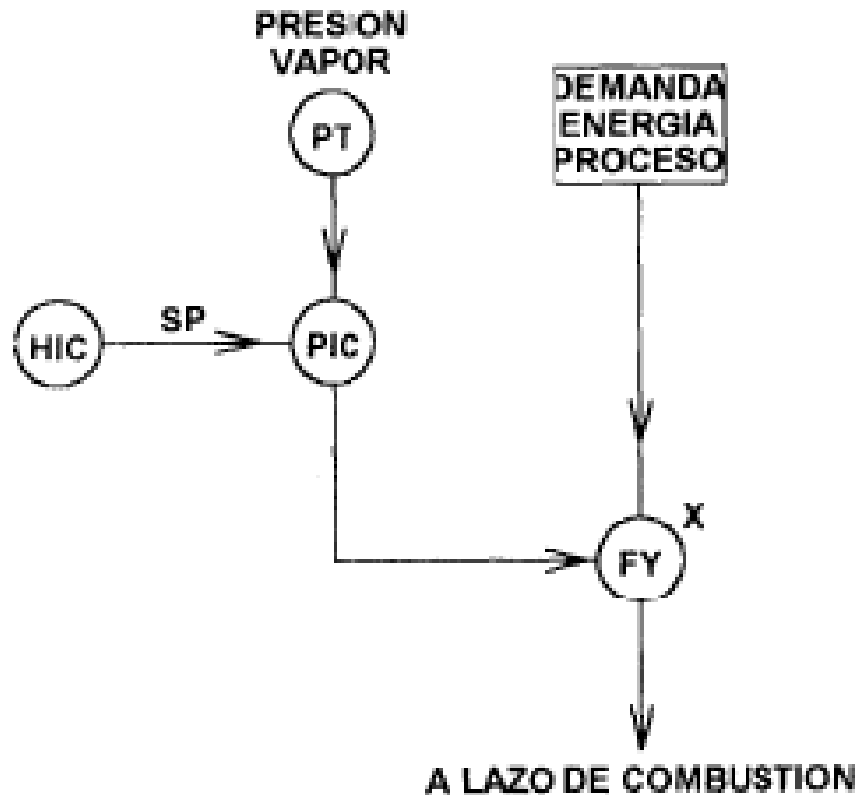
Existe una relación entre la presión de vapor y el estado de carga de la caldera. Se debe balancear la energía que demanda el proceso con la energía proveniente de la combustión.



**La presión de vapor es un excelente índice del balance energético!!**

Entonces podría aplicarse un sistema de control de un solo elemento, como ser un controlador de presión para atender este posible desbalance.

# Esquema general del sistema de control de balance de energía



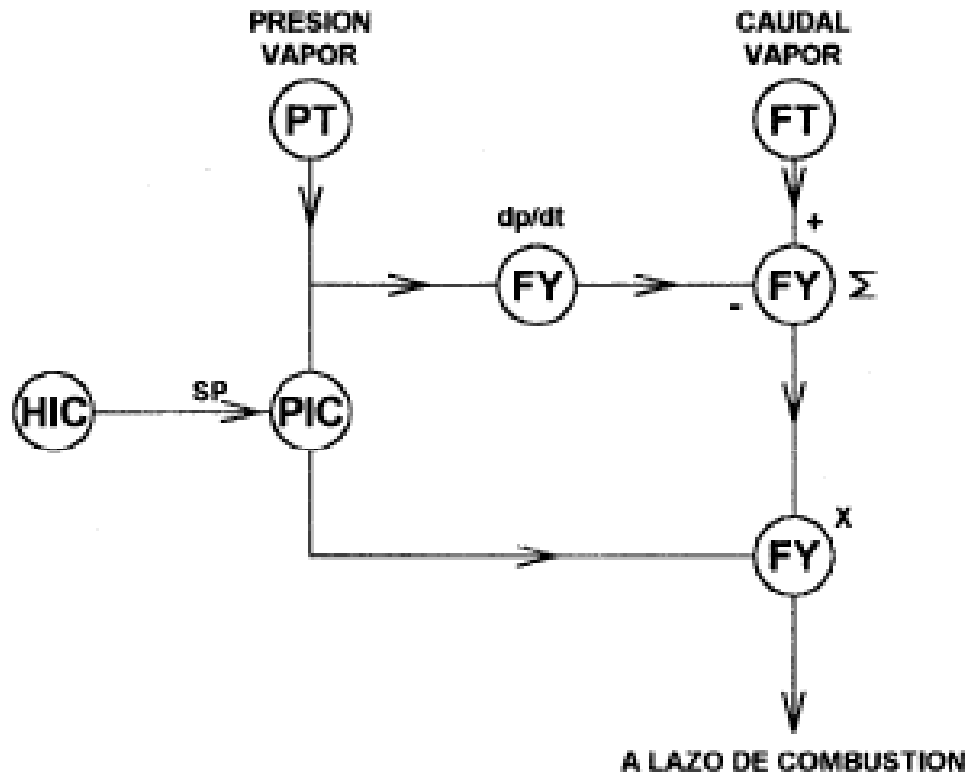
Este sistema de control es satisfactorio:

- Para variaciones de carga infrecuentes o lentas, por ejemplo: de 1 a 2% por minuto.
- Para variaciones de carga infrecuentes y/o para desviaciones del Setpoint de presión en  $\pm$  (5 a 10) % durante las variaciones de carga.
- Para instalaciones donde no puede justificarse económicamente otra solución.



# Esquema general del control de balance con compensador dinámico de presión

La señal más representativa de la demanda energética, es la de caudal de vapor. Aplicándose de la siguiente manera:

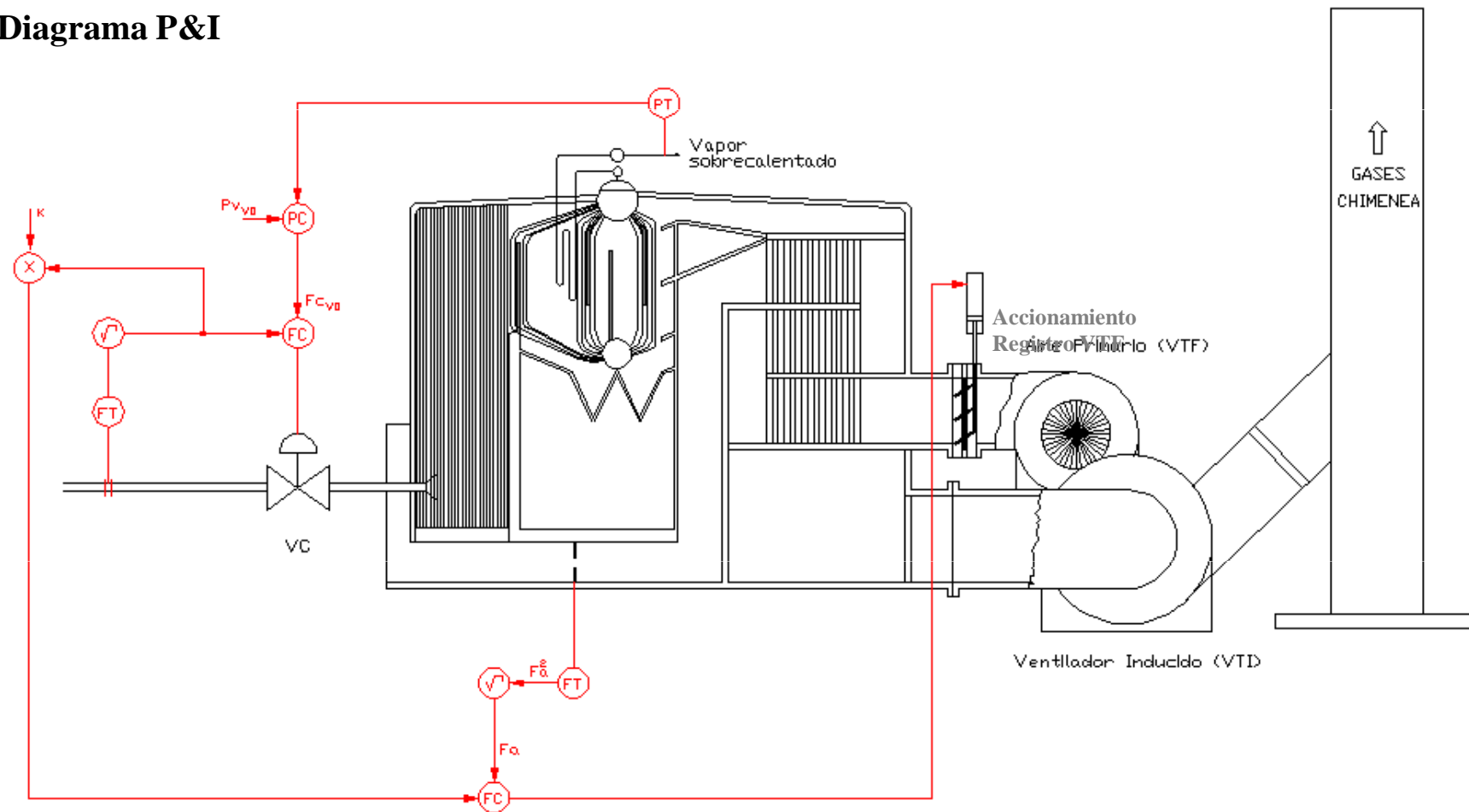


Este sistema compensa el problema dinámico asociado al uso del caudal como índice de la demanda energética (efecto de realimentación positiva), que causa inestabilidad del sistema de control.

Ejemplo: sistema de control de combustión con dos combustibles, uno en automático y otro en manual.

# Sistema de control de hogar y balance de energía (Cascada Presión-Caudal).

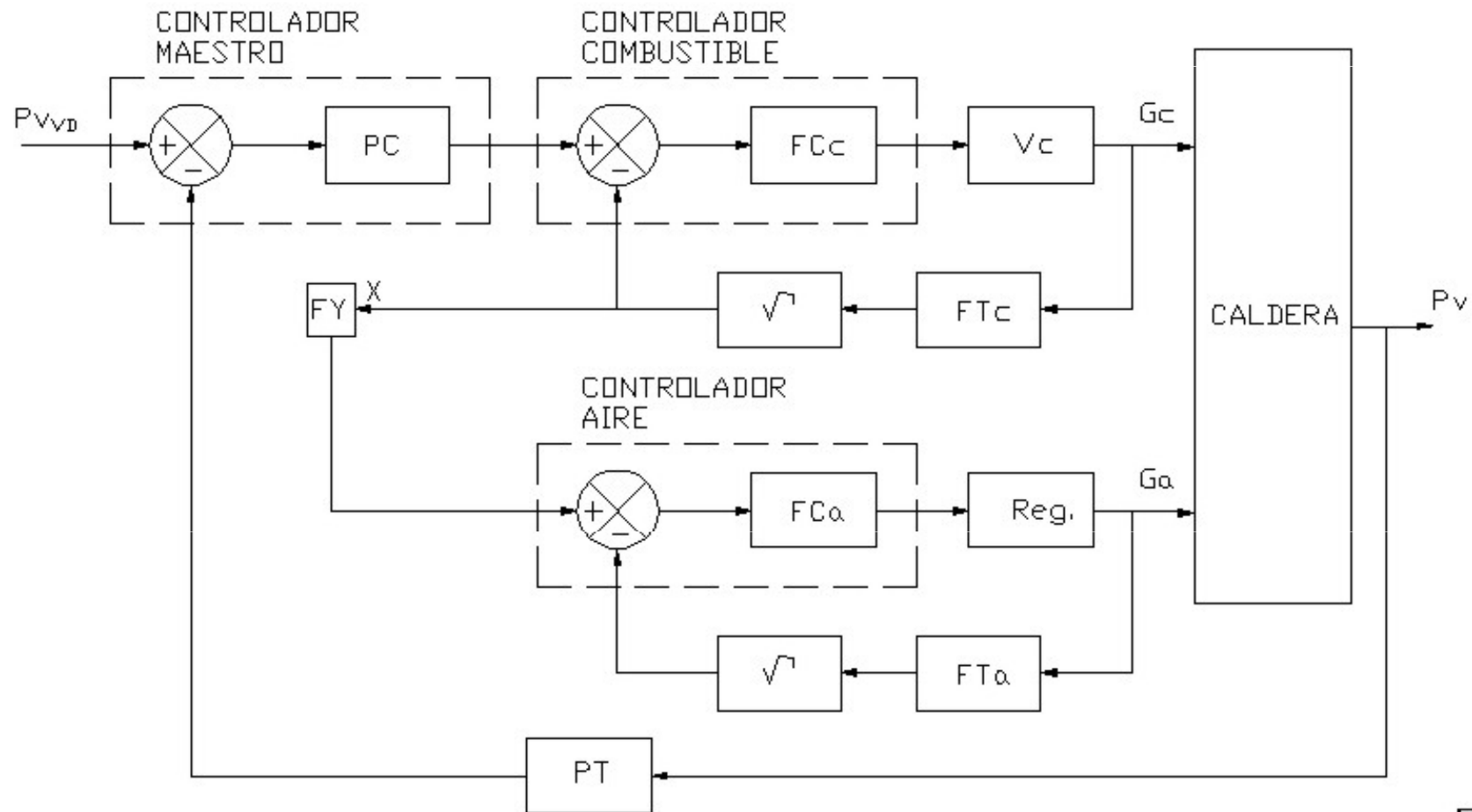
Diagrama P&I



# Sistema de control de hogar y balance de energía (Cascada Presión-Caudal).

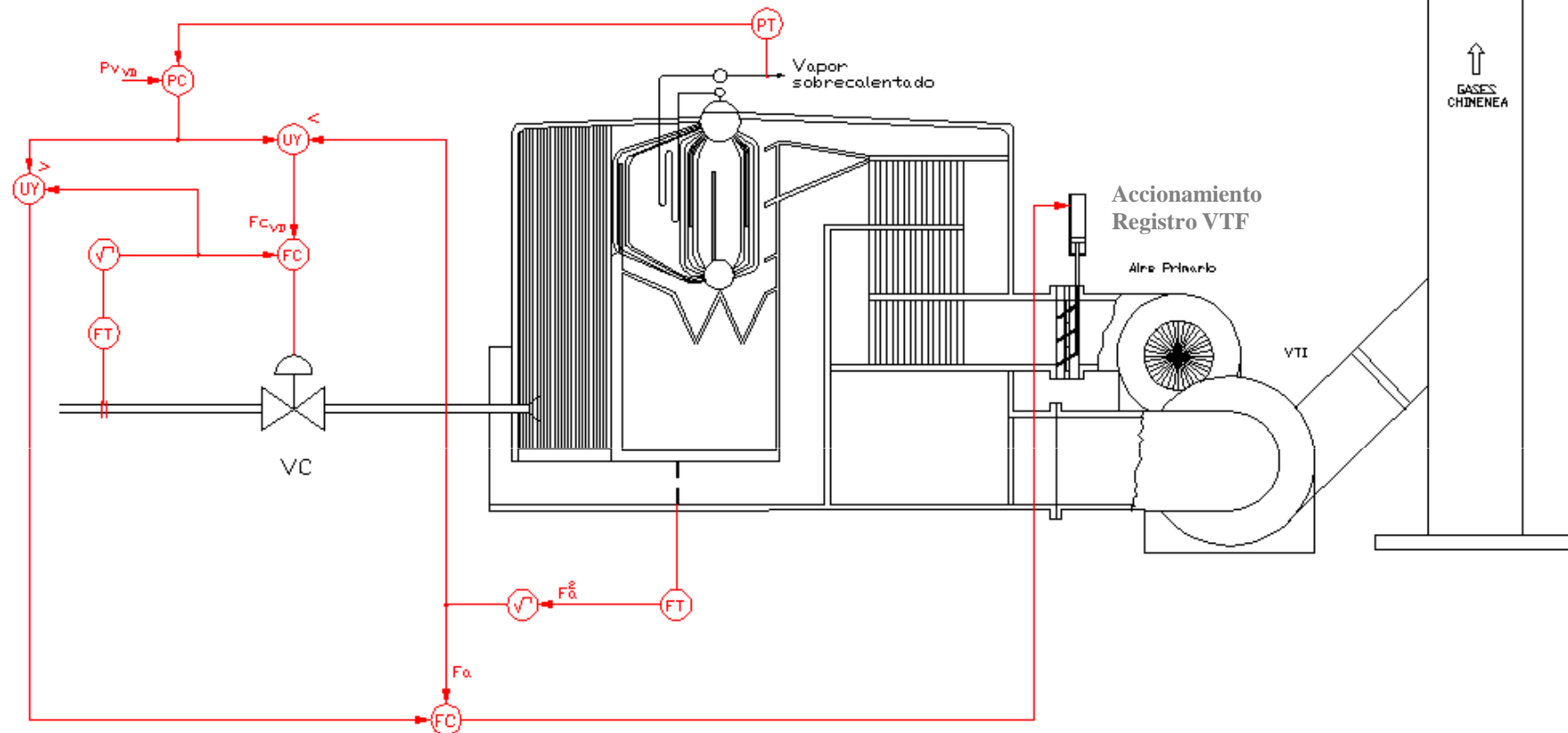


Diagrama de bloques



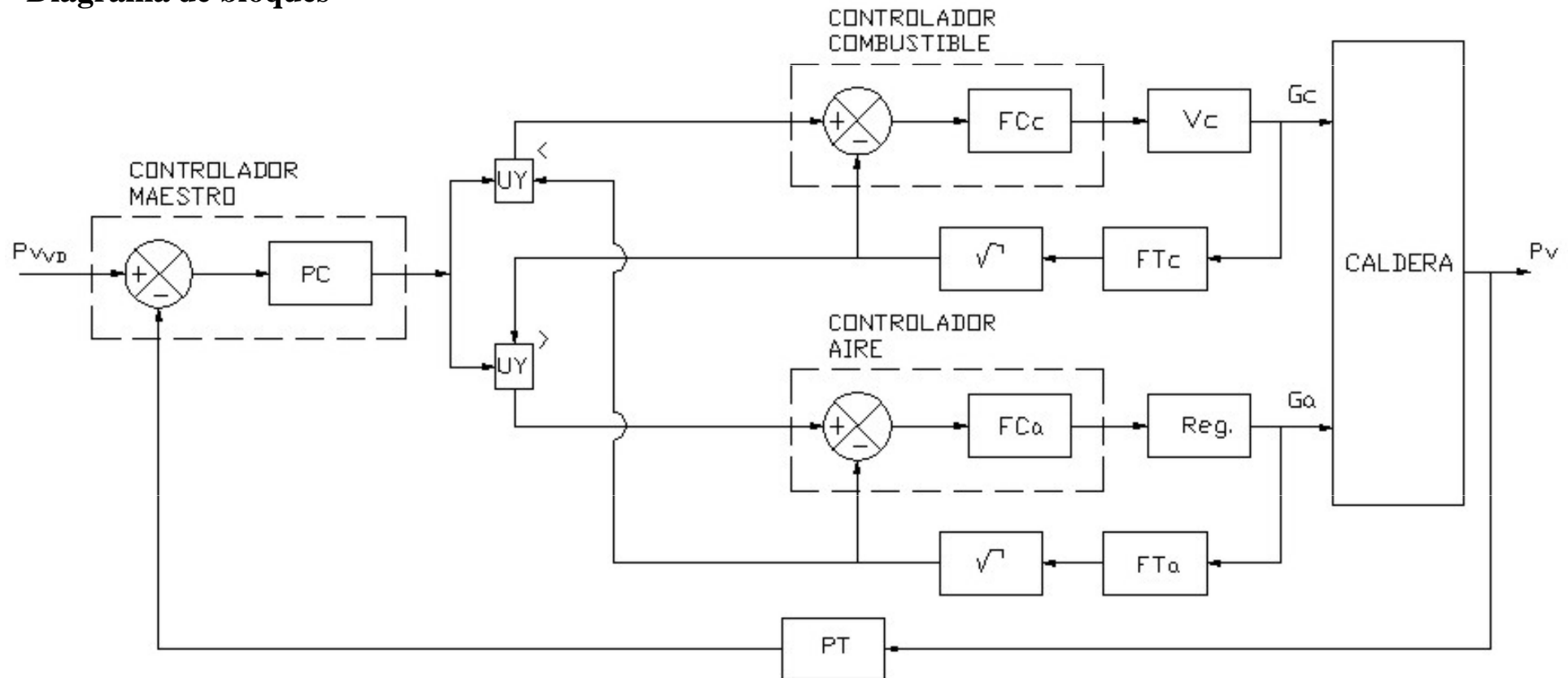
# Sistema de control de hogar y balance de energía con exceso de aire en los transitorios (Cascada Presión-Caudal):

Diagrama P&I



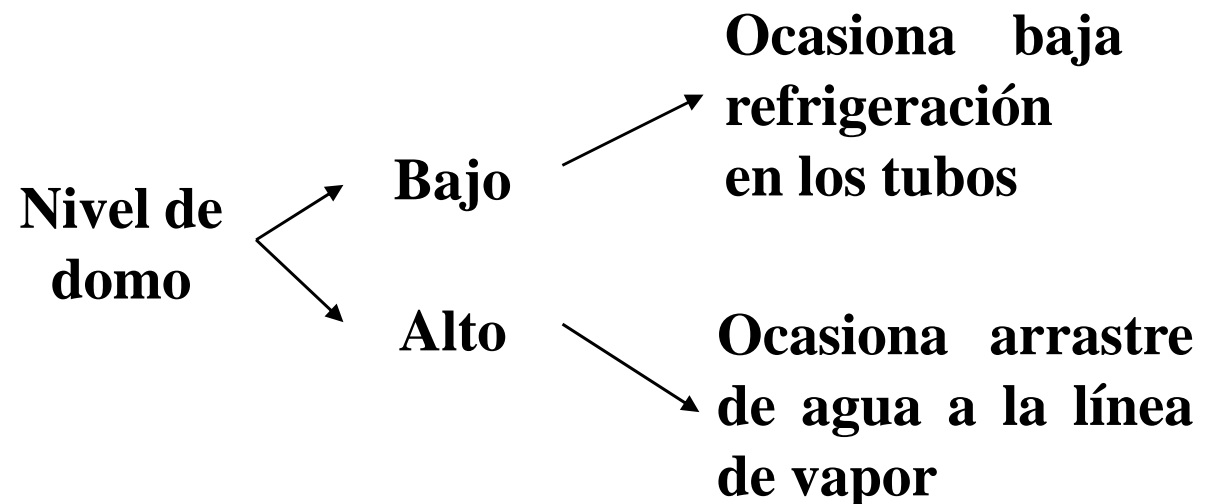
# Sistema de control de hogar y balance de energía con exceso de aire en los transitorios (Cascada Presión-Caudal):

Diagrama de bloques

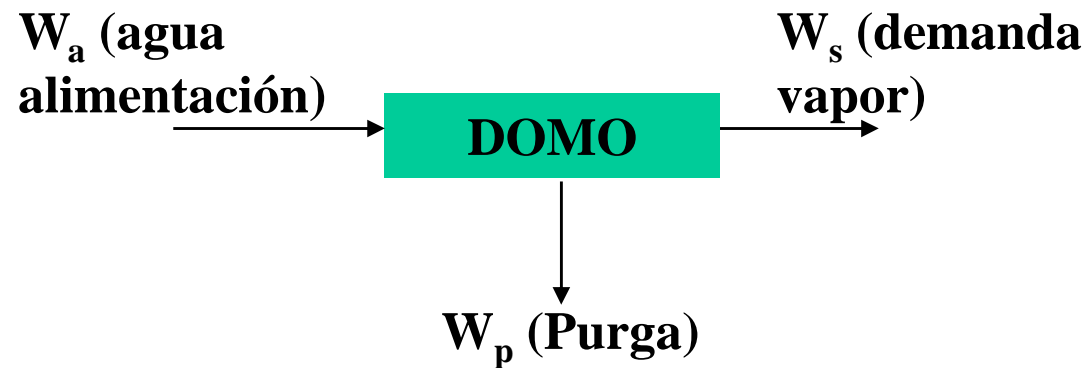


# Control de nivel de domo

Este control permite mantener el nivel de agua en el domo dentro de estrechos límites, pues variaciones del mismo tanto en defecto como en exceso son perjudiciales. Este control se encuentra asociado al control del caudal del agua de alimentación a la caldera.



# Balance másico en el domo



Un nivel de agua permanece constante cuando:  $W_a = W_s + W_p$

Si consideramos que:  $\gamma_a$  = peso específico del agua en el domo en  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ .

$S$  = superficie del espejo en  $[\text{m}^2]$ .

Entonces:  $S \cdot \gamma_a \cdot dh = [W_a - (W_s + W_p)] \cdot dt \longrightarrow \frac{dh}{dt} = \frac{[W_a - (W_s + W_p)]}{S \cdot \gamma_a}$

Representa la  
variación del nivel.

# Balance másico en el domo

Suponiendo que  $h_N = \text{nivel normal p/ } t = 0$ :

$$\int_{h_N}^{h_t} dh = \int_0^t \frac{[W_a - (W_s + W_p)]}{S \cdot \gamma_a} dt$$

Entonces:  $h_{(t)} - h_N = \frac{[W_a - (W_s + W_p)]}{S \cdot \gamma_a} \cdot T = \frac{[W_a - (W_s + W_p)]}{S \cdot \gamma_a} \cdot t$

Ahora si  $t = T_t$  y  $h_{(t)} = h_{\text{mín}} \text{ p/ } W_a = 0$ :

$$\longrightarrow h_{(t)} - h_N = \frac{-(W_s + W_p)}{S \cdot \gamma_a} \cdot T_t \longrightarrow h_N - h_{\text{mín}} = \frac{(W_s + W_p)}{S \cdot \gamma_a} \cdot T_t$$



# Constante de transición de la caldera

---

Si llamamos  $H = (h_N - h_{\min}) \longrightarrow T_t = \frac{H \cdot S \cdot \gamma_a}{(W_s + W_p)}$  (Tiempo de transición o cte de transición de la caldera).

Es el tiempo que transcurre desde el momento en que se suspendió la alimentación de agua ( $W_a = 0$ ) hasta el momento en que el nivel alcanzó su valor mínimo ( $h_{\min.}$ ), estando originalmente el nivel en su valor normal ( $h_N$ ).

**La constante “ $T_t$ ”, condiciona el tiempo de reacción de los controladores!!**

**P/ Calderas pequeñas  $T_t = 10$  a  $50$  [seg]**

**P/ Grandes calderas modernas  $T_t = 20$  a  $140$  [seg]**

# Observaciones

## ● Variaciones del nivel en función del consumo:

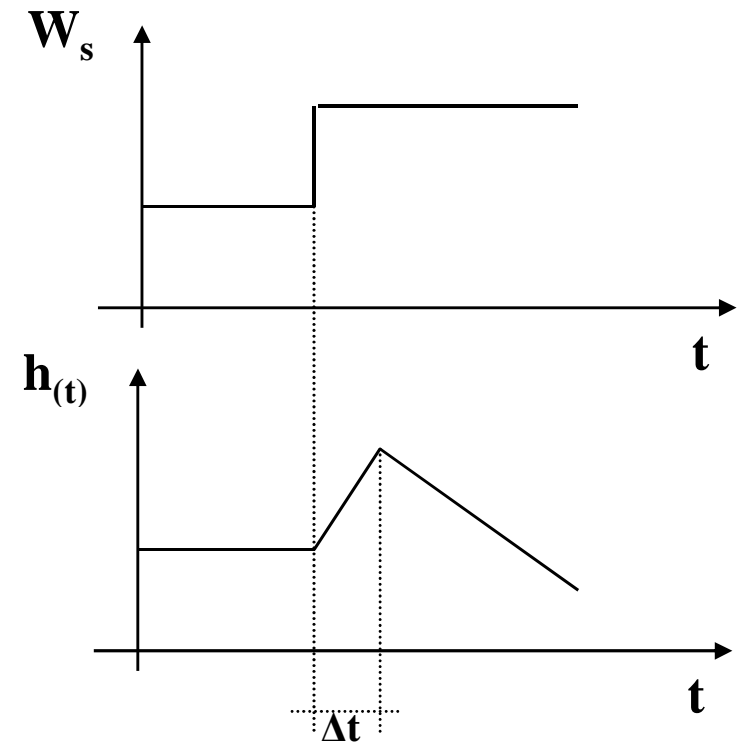
$$\frac{dh}{dt} = \frac{[W_a - (W_s + W_p)]}{S \cdot \gamma a}$$

Analizando la ecuación se observa que las variaciones de nivel son de signo contrario a las de consumo.

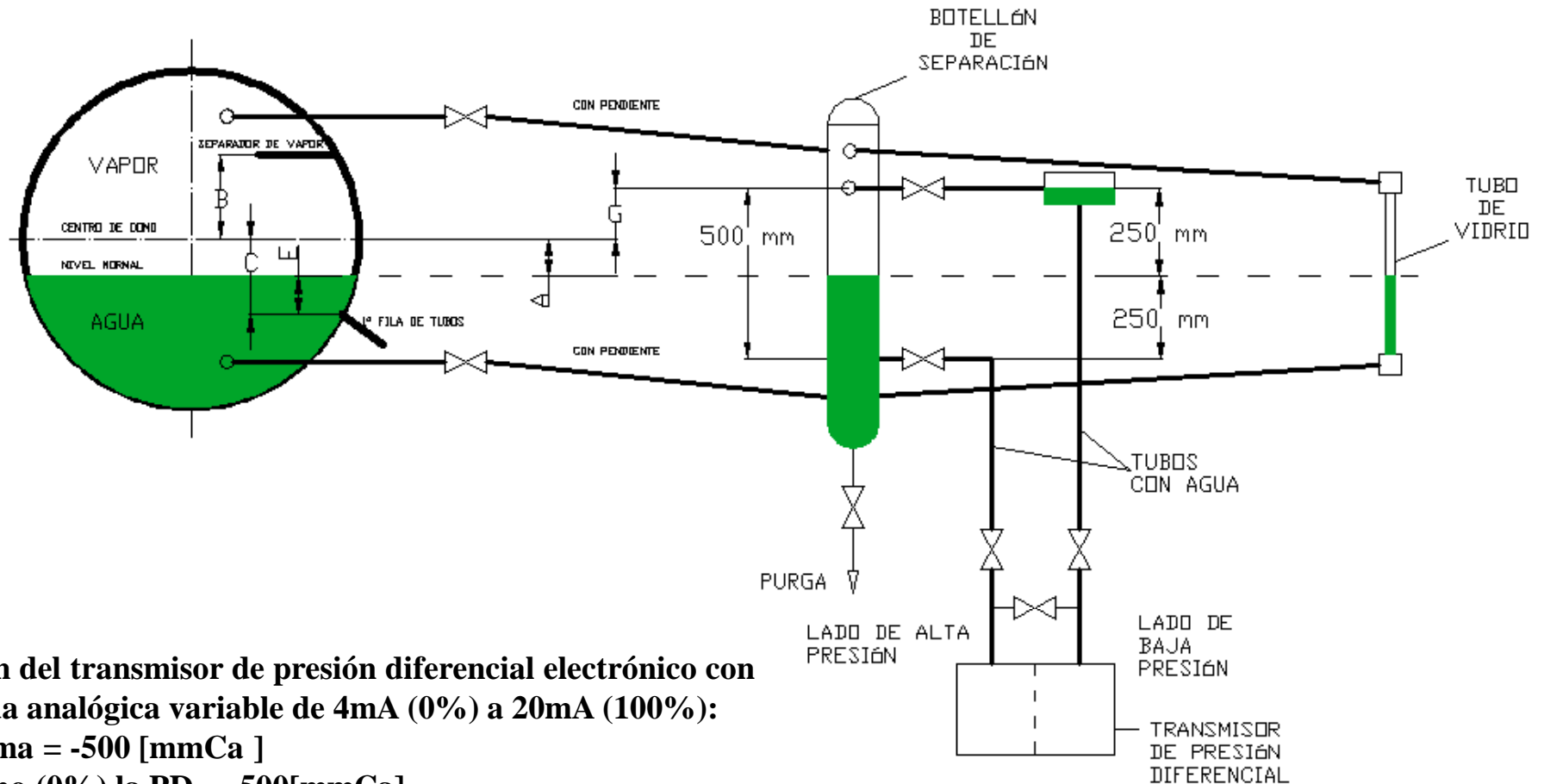
## ● Respuesta inversa:

Ante una variación brusca de la demanda, en un intervalo  $\Delta t$  el signo de la variación de  $W_s$  es el mismo que el de  $h_{(t)}$ .

Al aumentar bruscamente el consumo de vapor, baja la presión y en consecuencia se produce una súbita ebullición en el seno del líquido que da externamente una imagen falsa del nivel.



# MEDICIÓN DE NIVEL DE AGUA EN DOMOS DE CALDERAS



**Configuración del transmisor de presión diferencial electrónico con señal de salida analógica variable de 4mA (0%) a 20mA (100%):**

**Presión máxima = -500 [mmCa ]**

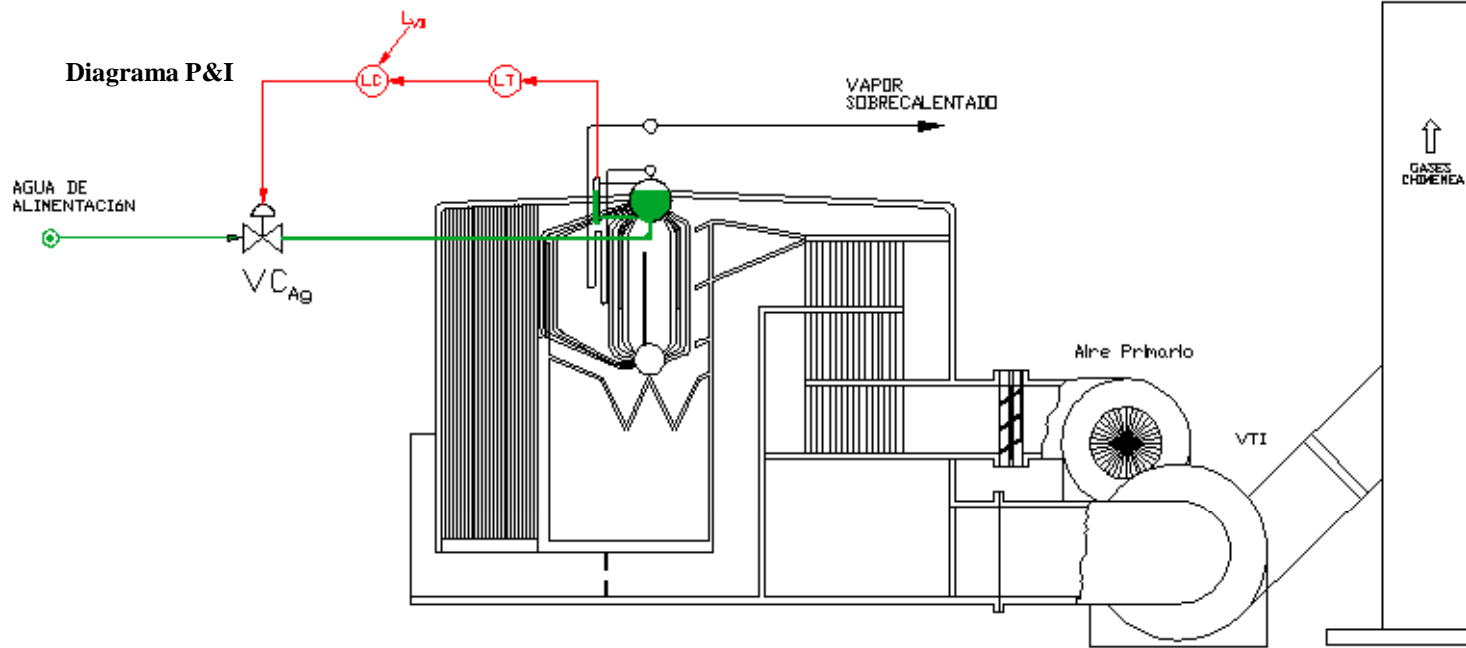
**p/ nivel mínimo (0%) la PD = -500[mmCa]**

**p/ nivel máximo (100%) la PD = 0[mmCa]**

**p/ PD = -250 [mmCa] la señal del transmisor es 50% (12mA).**

# Sistema de control de nivel de un elemento.

En este sistema de control, el nivel es la única señal que se usa para regular el agua de alimentación al domo de la caldera.

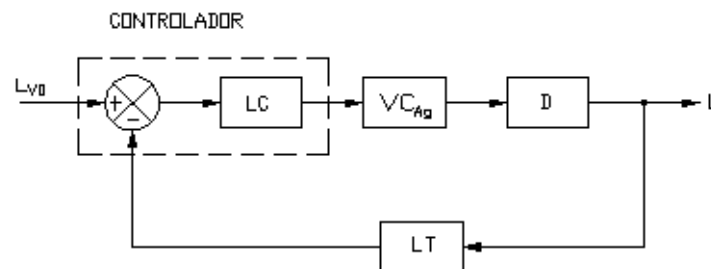


- Se adopta en calderas pequeñas y lentas (p/tiempo de residencia > 8 a 10 [mín]).

- También en calderas con suaves variaciones de la presión del agua de alimentación y del consumo de vapor.

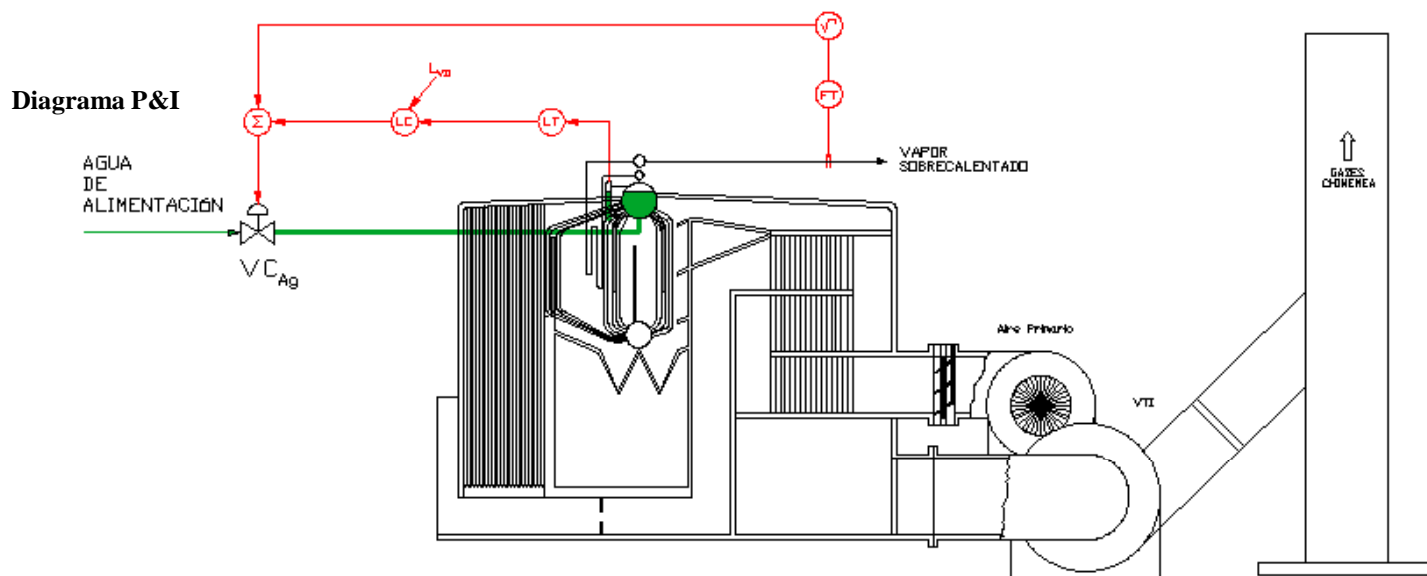
- Utilizadas en calderas humotubulares y en calderas antiguas de grandes domos > 1,5m de diámetro.

Diagrama de bloques



# Sistema de control de nivel de dos elementos.

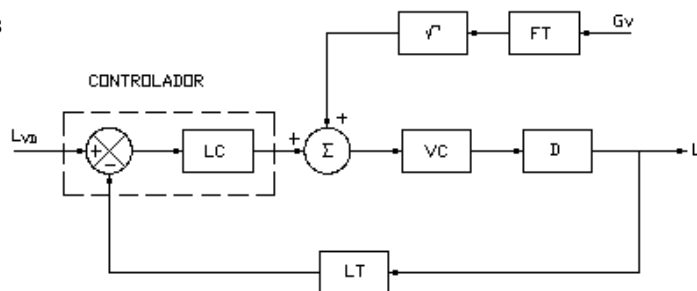
En este sistema de control, las señales para regular el agua de alimentación, provienen del nivel de domo y del consumo de vapor.



- Compensa variaciones rápidas de consumo de vapor, midiendo esta perturbación.

- Se adopta para calderas medianas con presión constante del agua de alimentación y variaciones no bruscas del consumo de vapor.

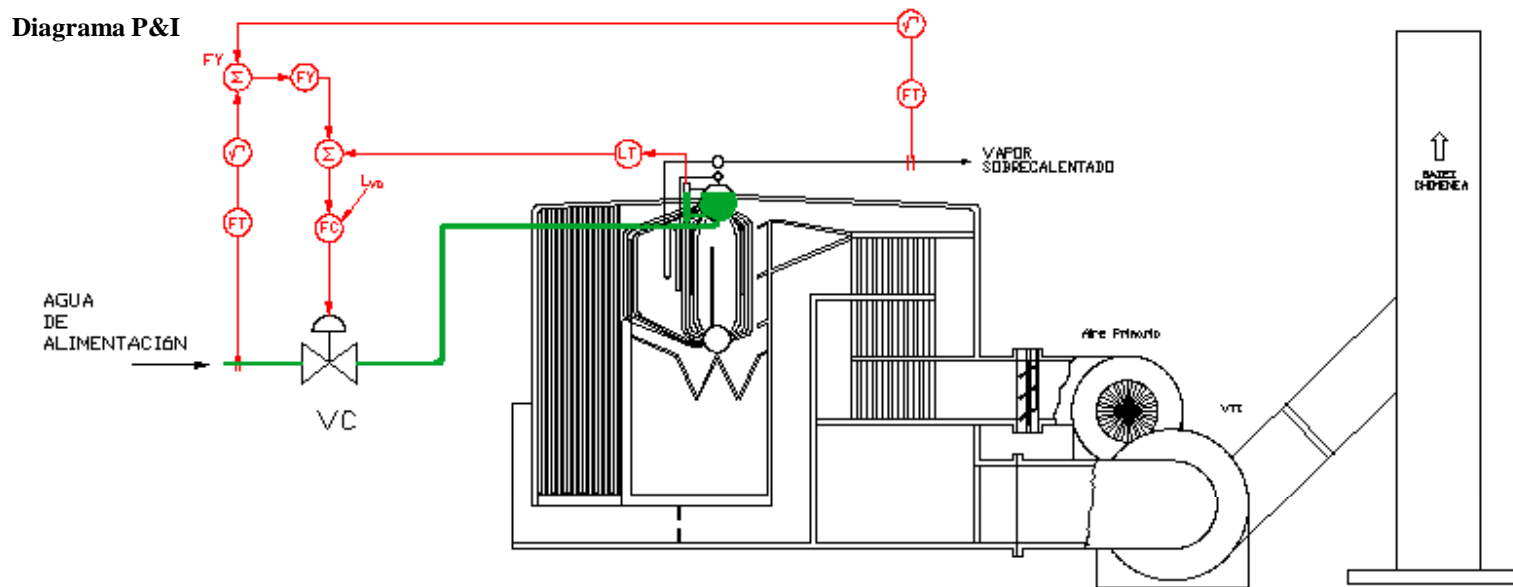
Diagrama de bloques



- La avanzación de la señal de caudal, modifica en el sentido adecuado la apertura de la válvula del agua de alimentación.

# Sistema de control de nivel de tres elementos (1 controlador).

Las señales para regular el agua de alimentación, provienen del nivel de domo, del consumo de vapor y del caudal de agua de alimentación.

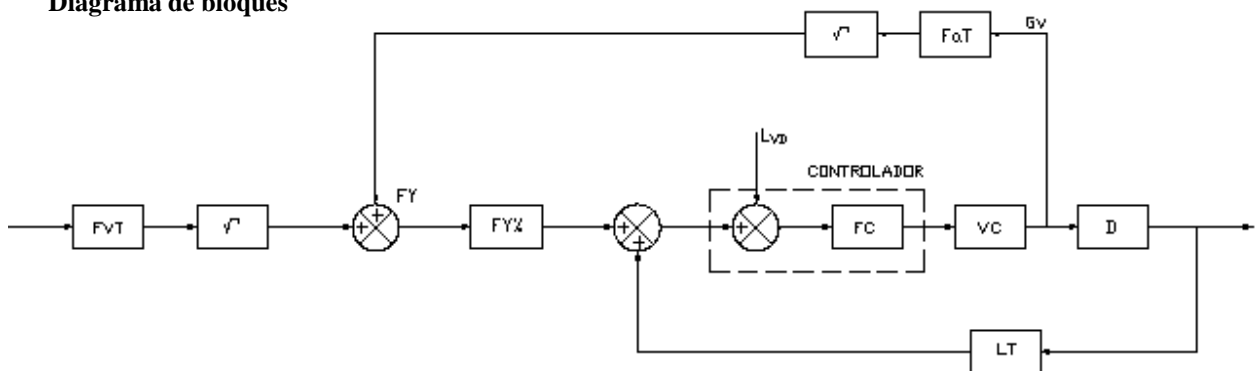


- El FY, aplica un factor de sensibilidad a la suma de las señales de caudales.

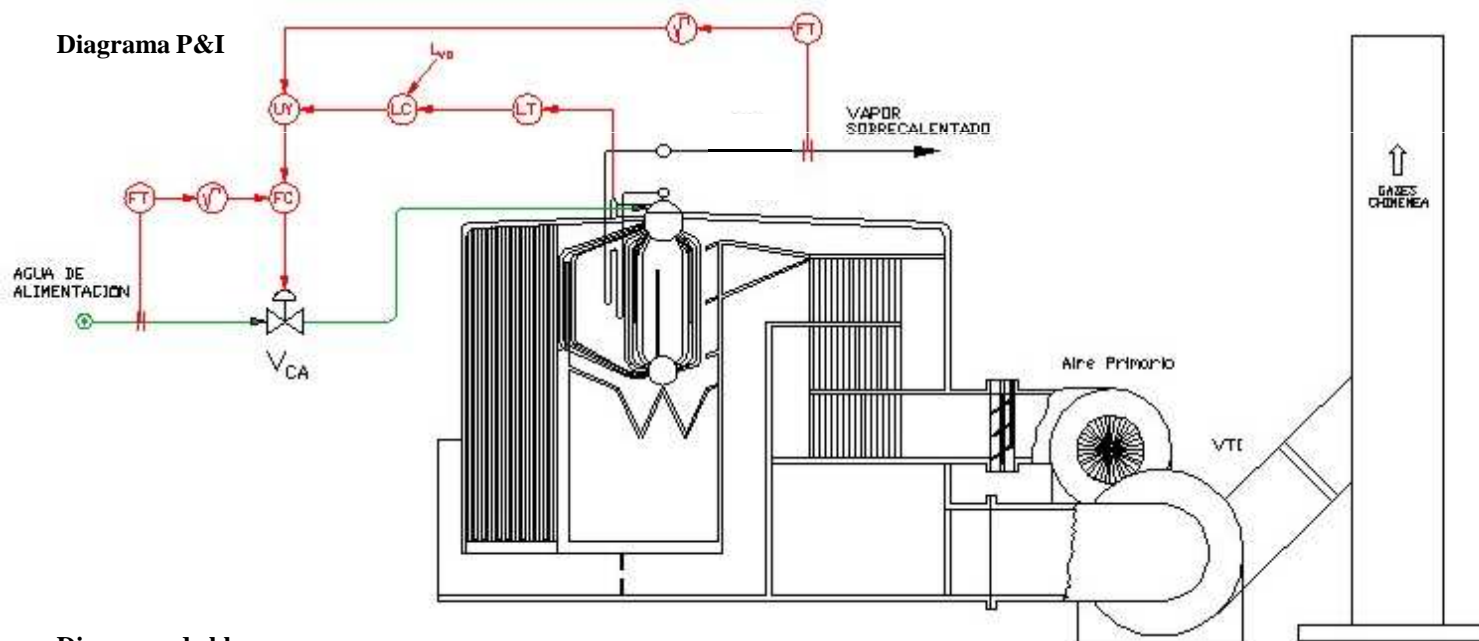
- El LT ajusta diferencias en las mediciones de los caudales debido a pérdidas y a las purgas.

- El FC recibe una señal compensada que corrige sobre el lazo de caudal de agua de alimentación.

**Diagrama de bloques**



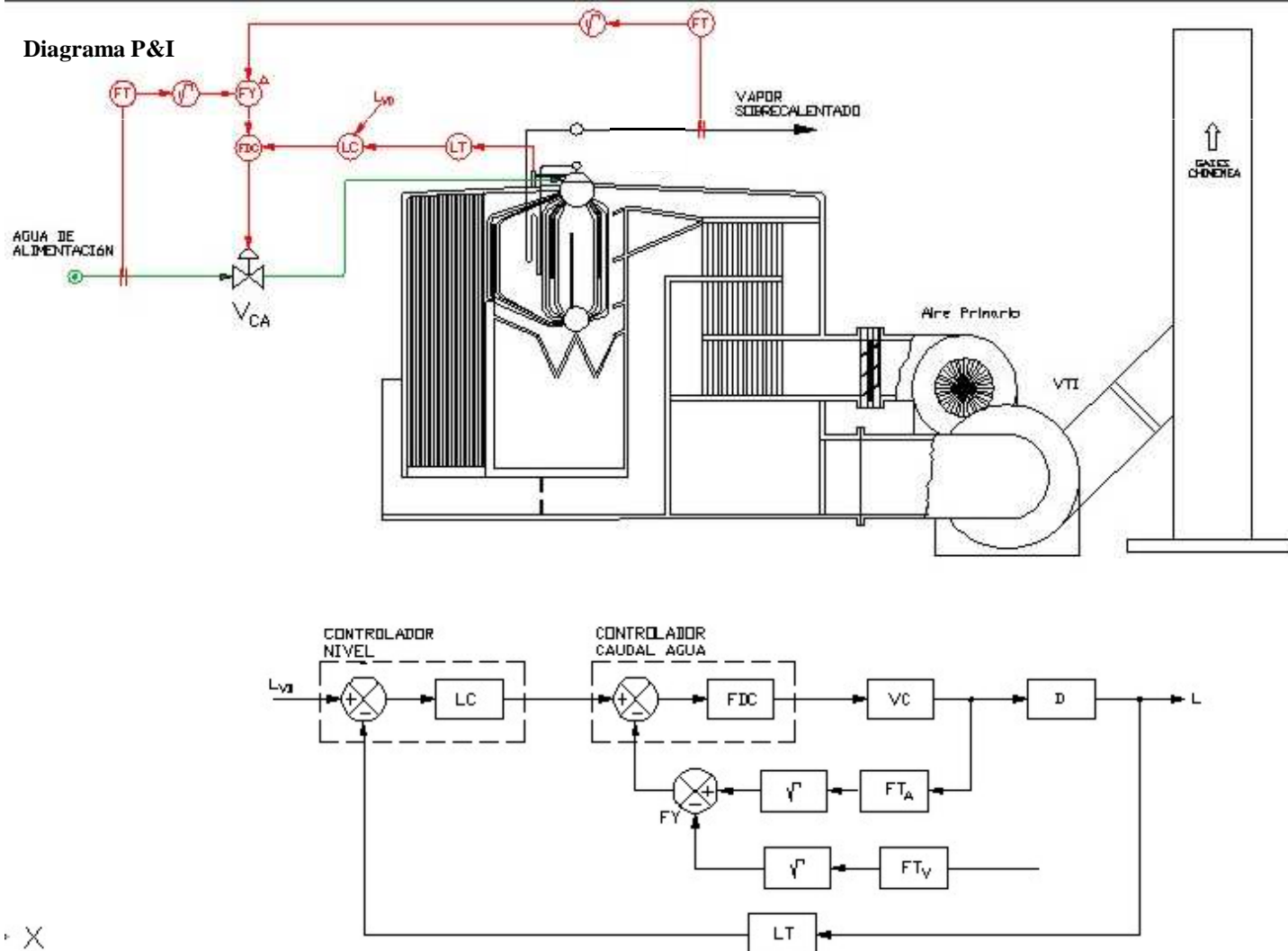
# Sistema de control de nivel de tres elementos (2 controladores).



## Con avanzación en lazo primario

- Sistema de control cascada nivel-caudal + avanzación caudal.
- La avanzación entra en el lugar adecuado, entre los lazos externo e interno.
- Permite factibilidad de ajuste en la compensación y en las acciones de control.

# Sistema de control de nivel de tres elementos (2 controladores).



Con avanzación en lazo secundario

- Sistema de control cascada nivel - caudal + avanzación caudal.
- La variable de lazo interno es la diferencia de de caudales de agua y vapor.
- El FY es empleado sobre el lazo de nivel para la corrección de las diferencias.



# Control de presión en el hogar de la caldera

Este sistema de control, permite mantener constante la presión en el interior del hogar de la caldera.

- Control sencillo de la presión en el hogar, mantiene saltos de presión constante entre el medidor y el registro del aire.
- Naturalmente da lugar a que la presión en el hogar varíe indeseablemente.
- Debido a las magnitudes de presiones con que se opera, el costo operativo es elevado.
- Provoca consumos mayores, entre el 5 y el 10%, de potencia en el motor del VTF por aumento de la densidad interna del aire en el ventilador.

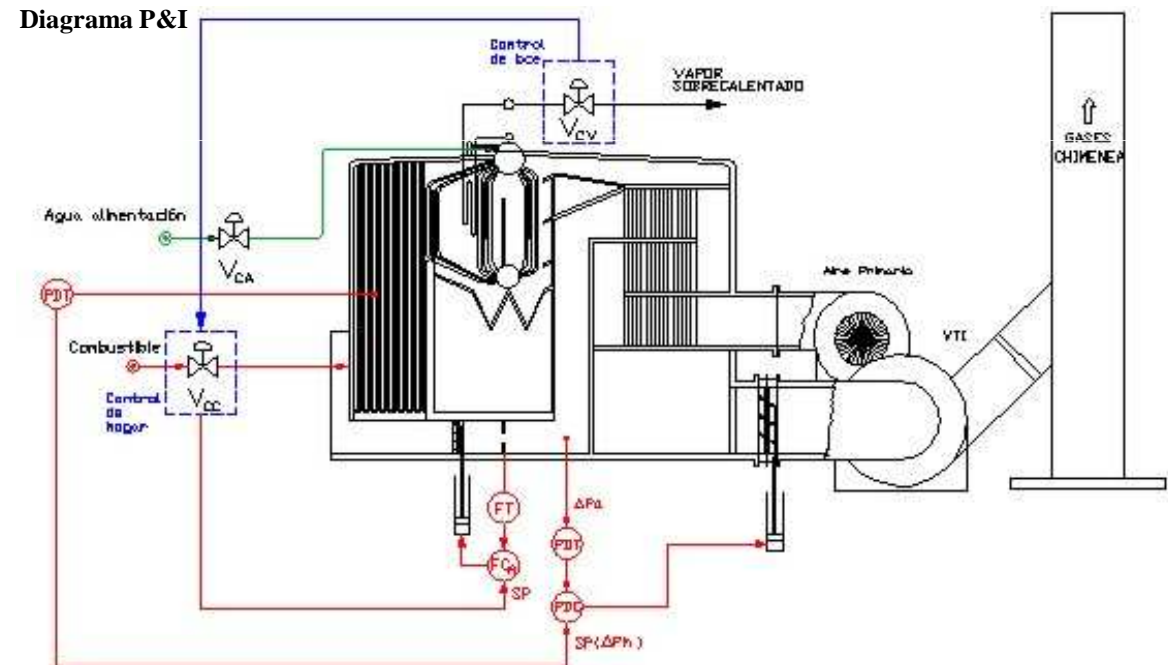
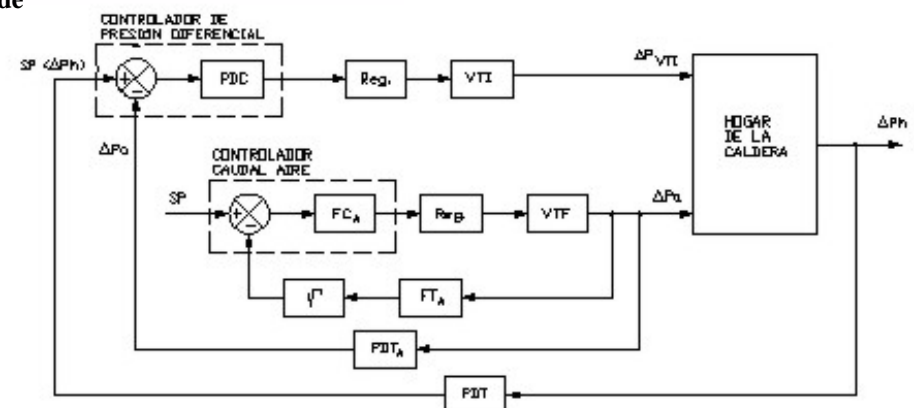
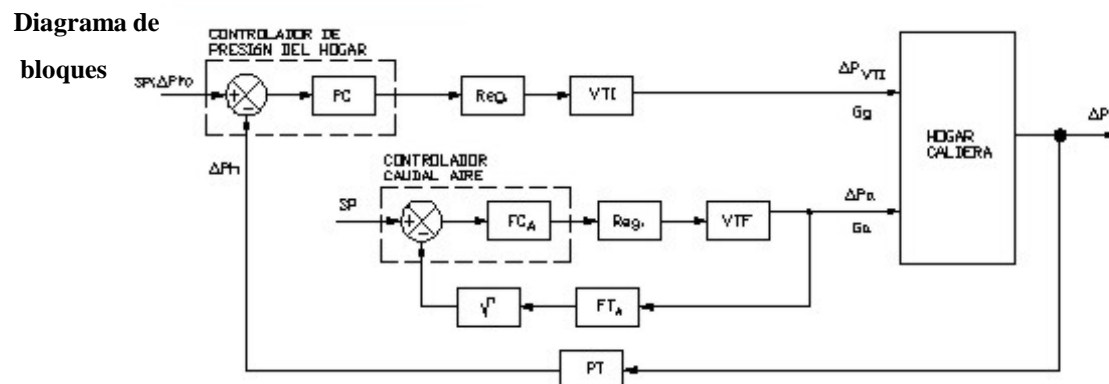
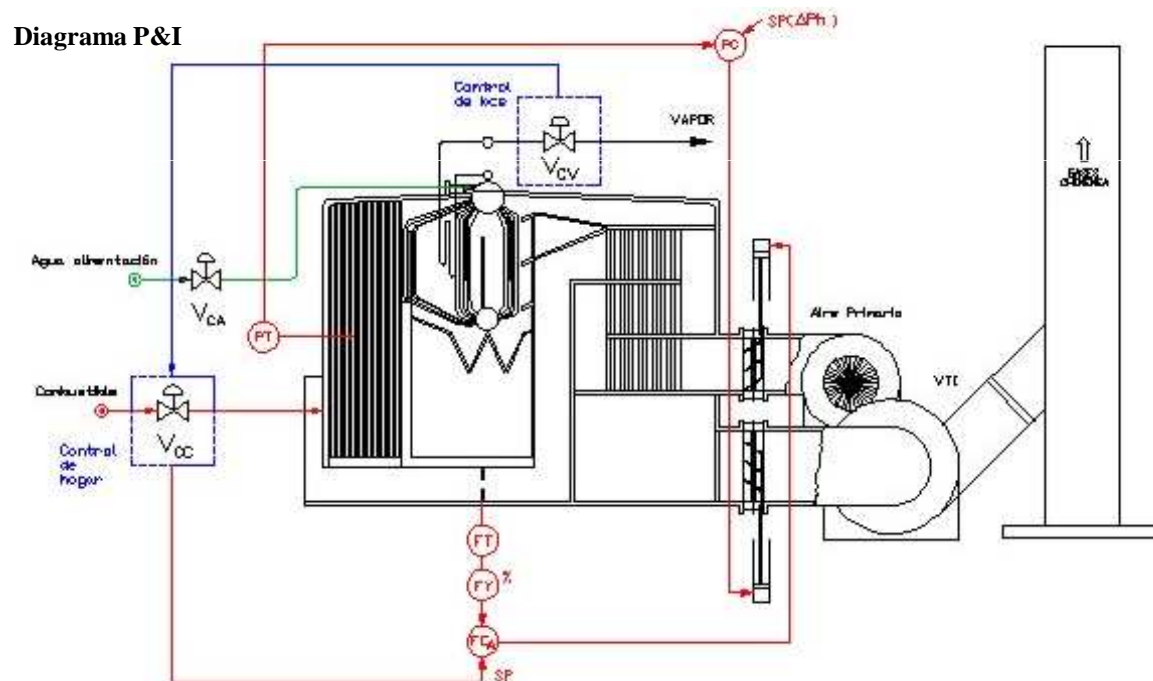


Diagrama de bloques



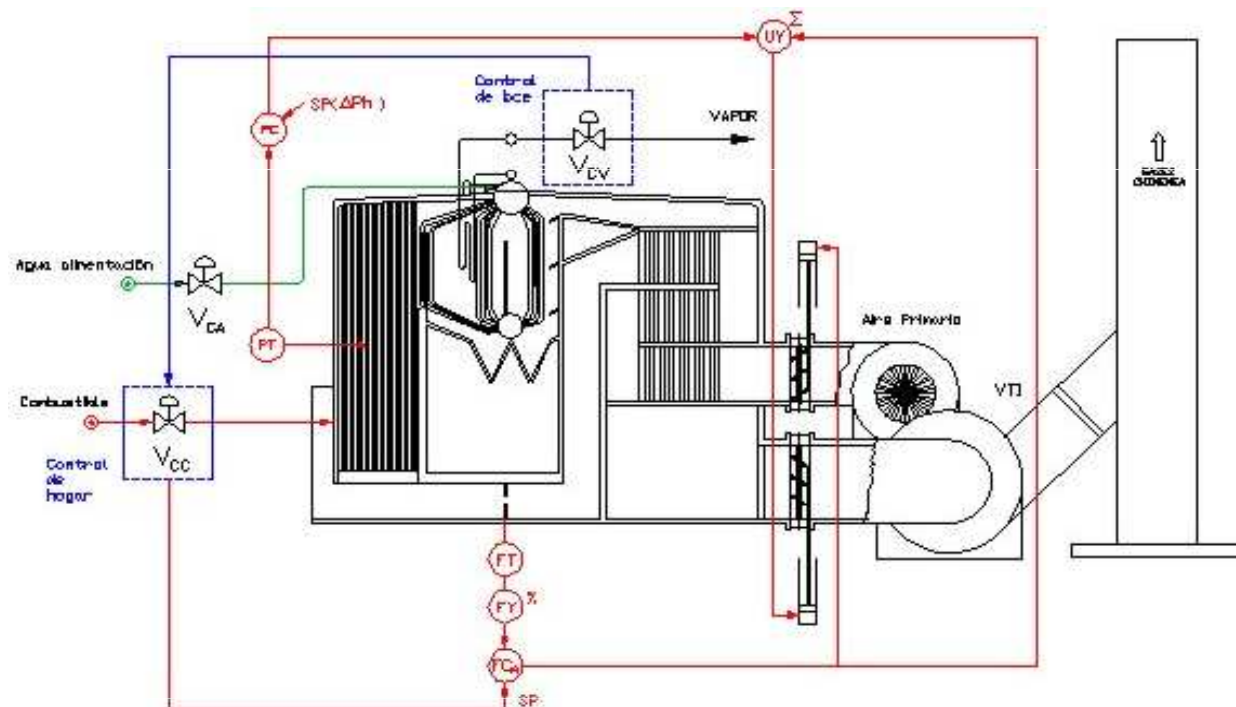
# Control de presión en el hogar de la caldera

- Control básico de independencia de los controles de manejo de aire de combustión y presión de hogar.
- El control de presión de hogar actúa sobre el VTI.
- Para demanda de energía, el FC abre el registro del VTF, lo que aumenta la presión del hogar. El PC debe equilibrar esta presión.
- Provoca oscilaciones continuas por la interacción entre los lazos de caudal de aire y presión del hogar.
- Un modo de disminuir el efecto es lentificar el sistema, retardando unos de los lazos.



# Control de presión en el hogar de la caldera

Diagrama P&I

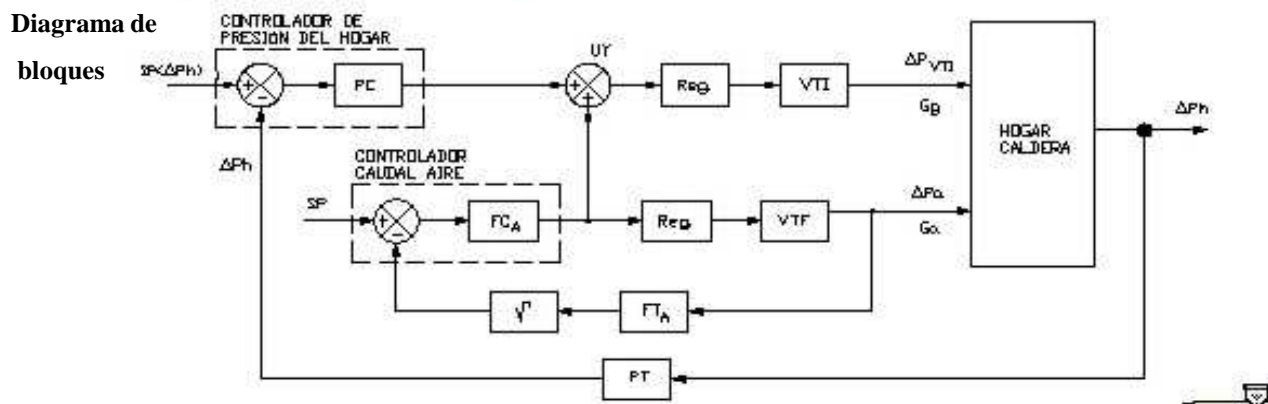


- Control con la acción de dos controladores. El  $FC_A$  sobre ambos elementos finales (registro VTI y VTF), y el PC con acción complementaria sobre el registro del VTI.

- El  $FC_A$  maneja ambos registros sin interacciones, respondiendo simultáneamente al control de hogar.

- El PC suma su salida en forma complementaria a la del  $FC_A$  sobre el VTI, dando eventuales reacciones del control de caudal, de menor magnitud, que se atenúan rápidamente.

Diagrama de bloques



# Control de temperatura del aire de combustión

Diagrama P&I

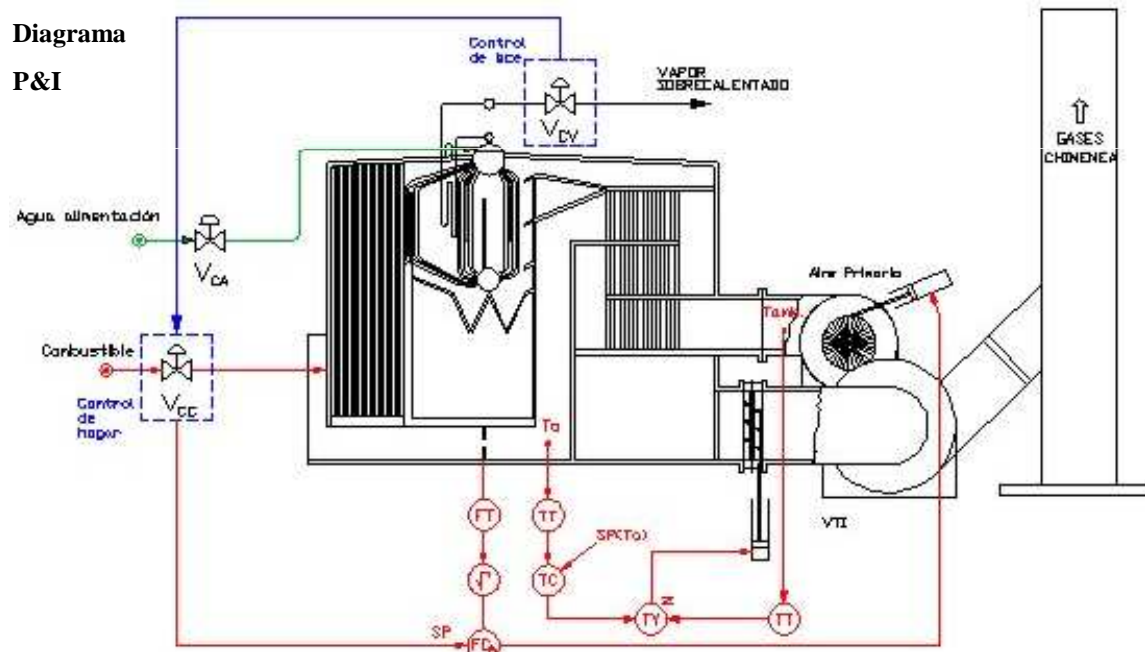
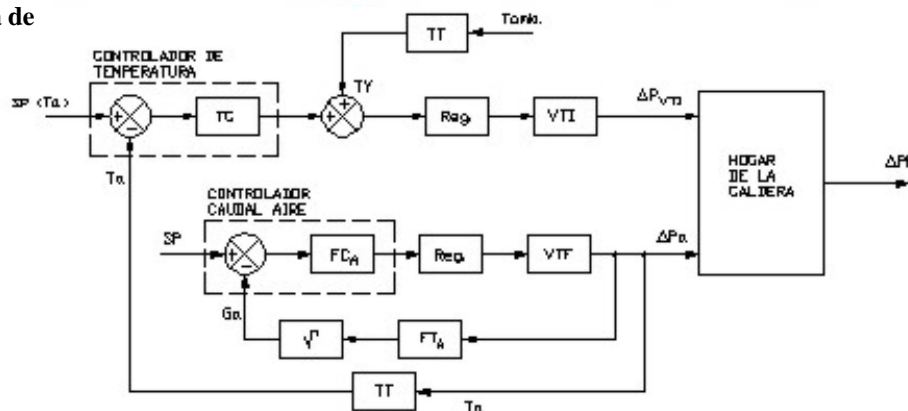


Diagrama de bloques



- El lazo de control de temperatura del aire al hogar, es lento y depende de las áreas de intercambio de calor.
- Este ejemplo posee una corrección en base a la perturbación de la temperatura ambiente. Los cambios ambientales son también lentos.
- El FY aporta sensibilidad al TT de  $T_a$ , dando la función de compensar los cambios cíclicos de  $T_{amb}$ .
- No tiene en cuenta los cambios de calor suministrado por el calentador de aire (ICQ).

# Control de temperatura del aire de combustión

Diagrama P&I

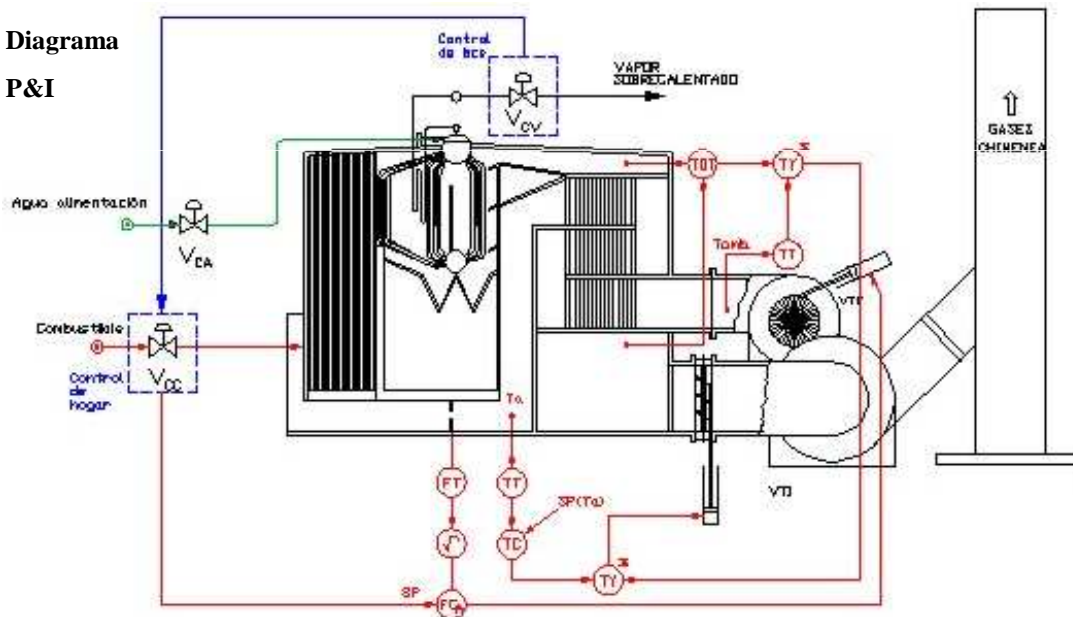
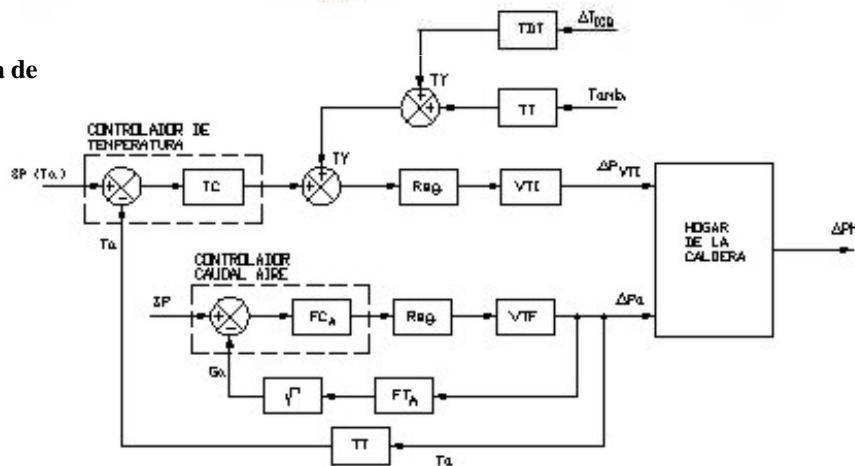


Diagrama de bloques



- Este sistema de control tiene en cuenta las variaciones de temperatura en el ICQ, debidas a las oscilaciones propias del control de hogar.
- Además, posee una corrección por la perturbación de la temperatura ambiente.
- La señal proveniente del TDT, se suma a la de  $T_{amb}$ . e ingresa al lazo de control del registro del VTI, ajustándolo para corregir las variaciones de  $T_a$ .

# **Control de temperatura del vapor sobrecalentado**

**Este control permite controlar la temperatura del vapor a la salida de la caldera. Normalmente se realiza por medio de la atemperación.**

## **Factores que influyen en la temperatura final de vapor:**

- Exceso de aire.
- Temperatura del agua de alimentación.
- Tipo de combustible.
- Ensuciamiento de la superficie de calefacción.

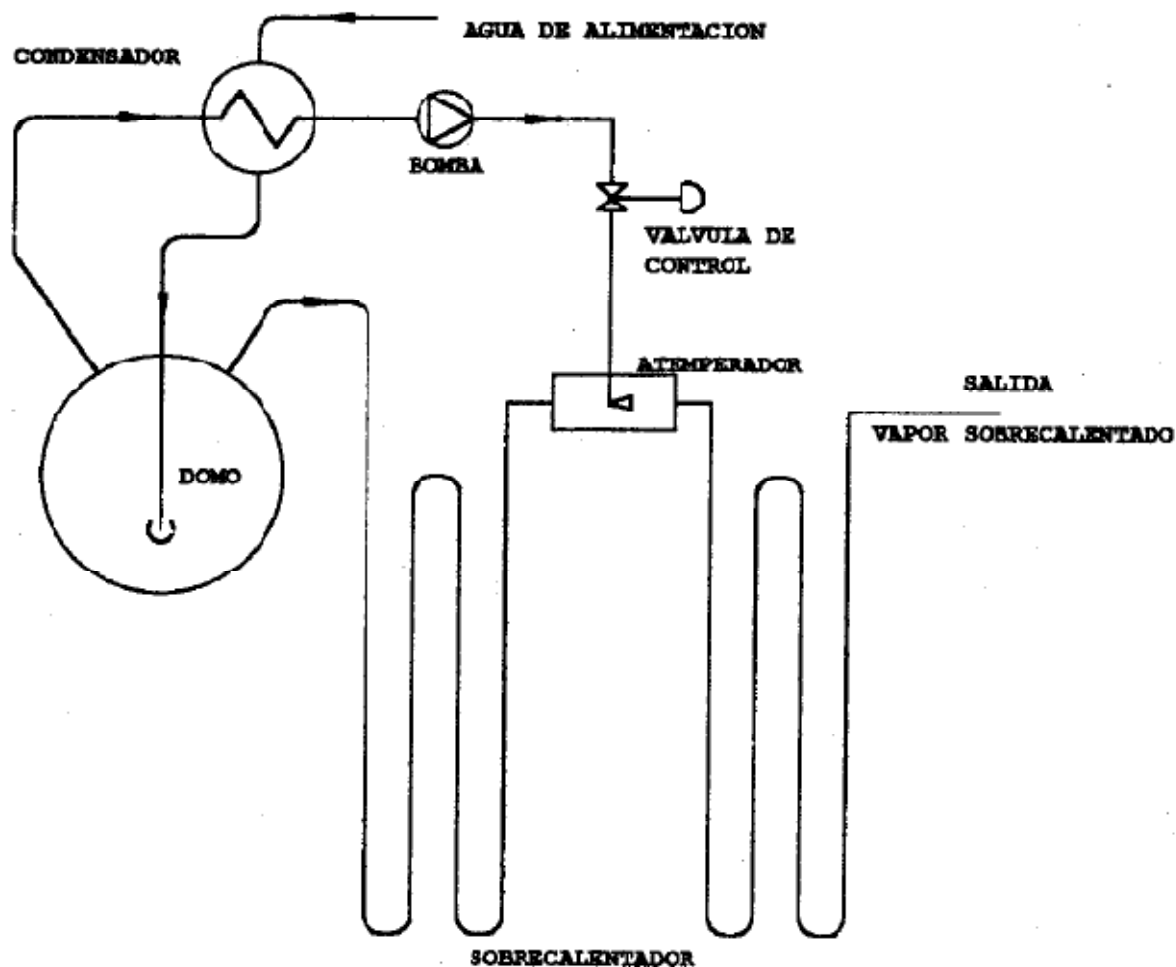
## **Atemperación Indirecta:**

Se basa en producir modificaciones en las condiciones del lado de los gases (variación de la radiación de los quemadores o desviación de la circulación de gases a través del sobrecalentador).

## **Atemperación Directa:**

Este método se basa en la disminución de la temperatura del vapor sobrecalentado por medio del intercambio térmico por contacto directo o indirecto del vapor con otro fluido de menor temperatura.

# Atemperación directa

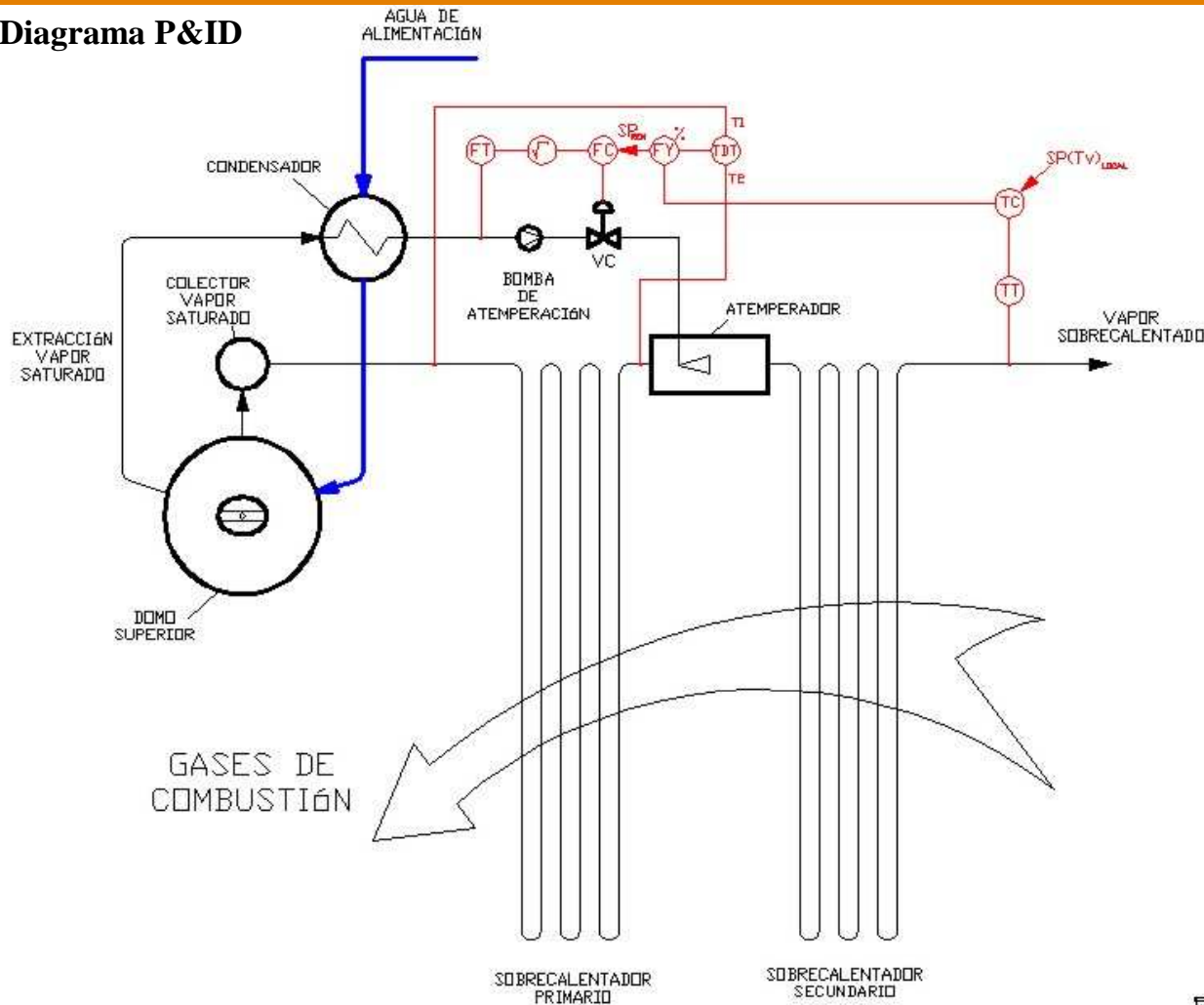


- El método universalmente de mayor utilización se basa en la inyección directa de agua dentro de la corriente de vapor sobrecalentado.
- Este circuito se caracteriza por contar con una rápida respuesta ante las variaciones de temperatura.
- La desventaja de este método radica en la necesidad de inyectar agua de alta pureza entre dos etapas sucesivas de sobrecalentamiento.

# Control de temp. de vapor sobrecalentado

## Caldera Mellor Goodwin VU40 – 120 [tn<sub>vapor</sub> /h]

Diagrama P&ID



- Control de la temperatura del vapor sobrecalentado: Cascada Temp.-Caudal + Avanacción pura (diferencia de temp. Sobrec. Primario).

- Sistema con condensador para el calentamiento del agua de alimentación a la caldera.

- Acción diferencial de la temp. de entrada y salida del sobrecalentador primario (TDT), sobre el lazo de control del agua de atemperación.

- Se tiene en cuenta el efecto de los cambios en el control de hogar y balance de energía.



# Control de temp. de vapor sobrecalentado

## Caldera Mellor Goodwin VU40 – 120 [tn<sub>vapor</sub> /h]

Diagrama de bloques

