



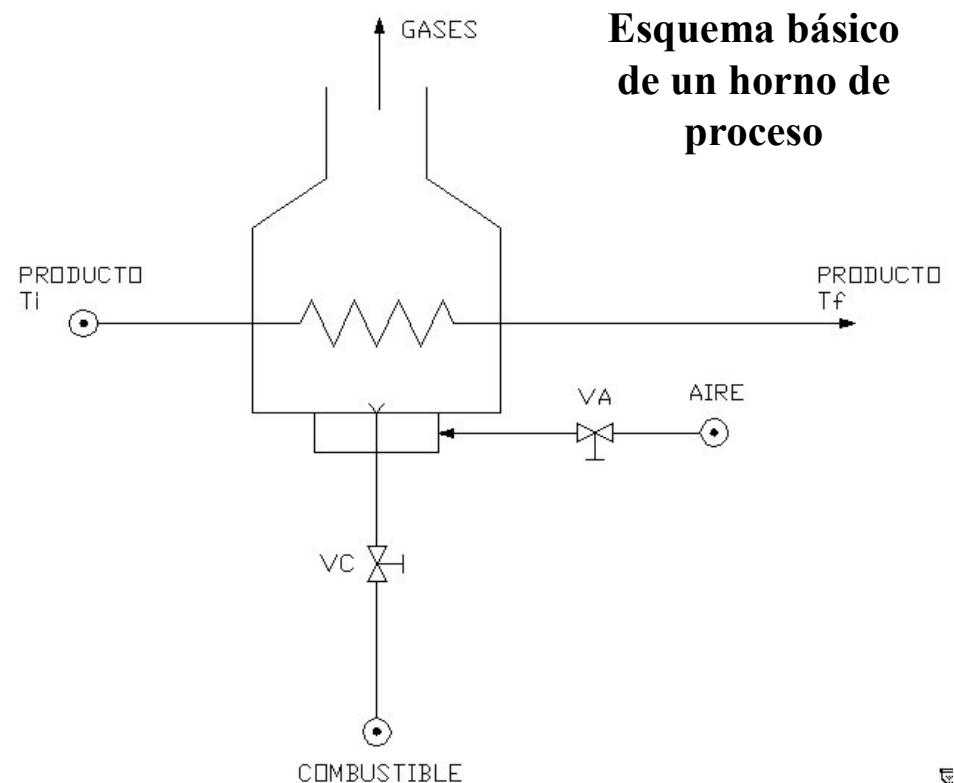
# SISTEMAS DE CONTROL EN HORNOS (CONTROL DE TEMPERATURA)

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

## 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

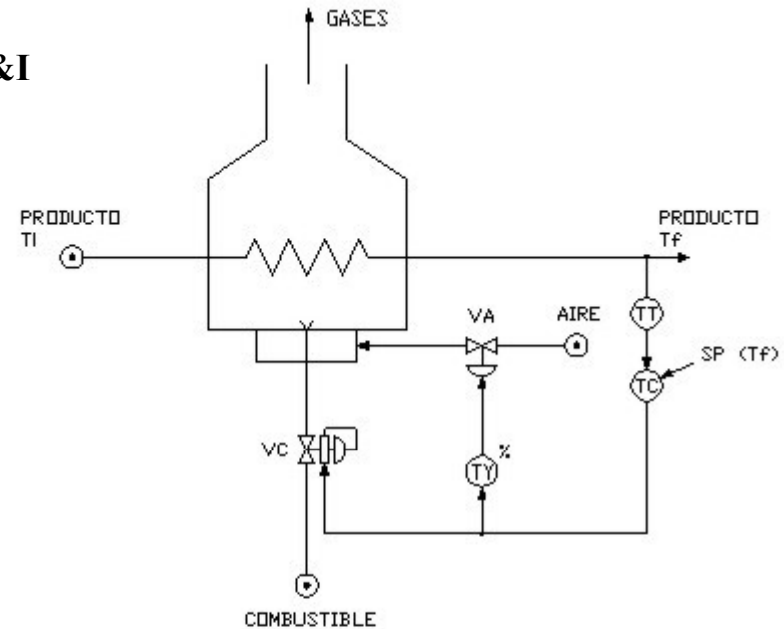
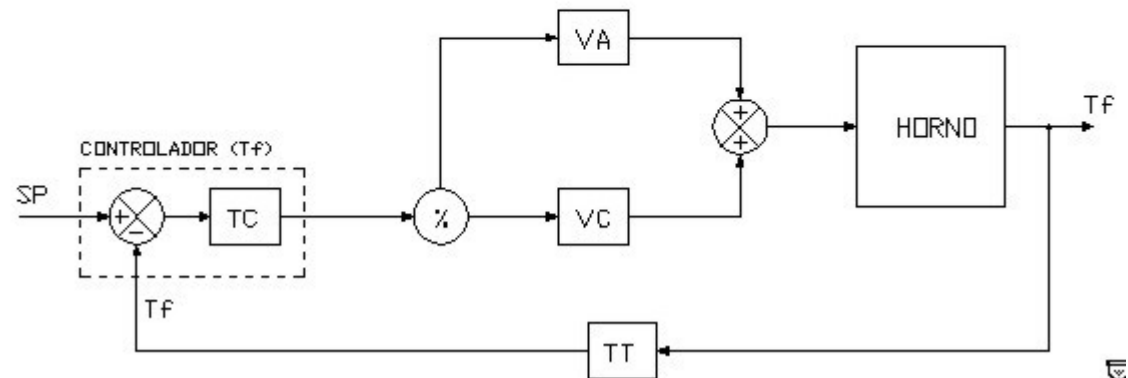


Diagrama de bloques



## 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

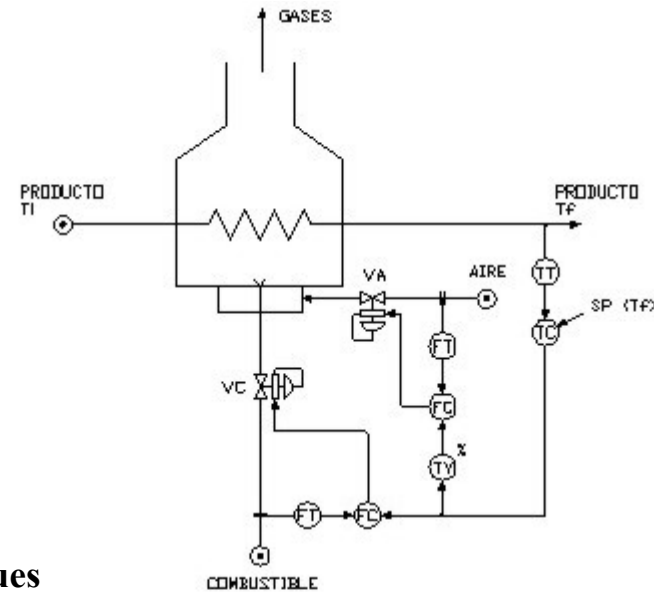
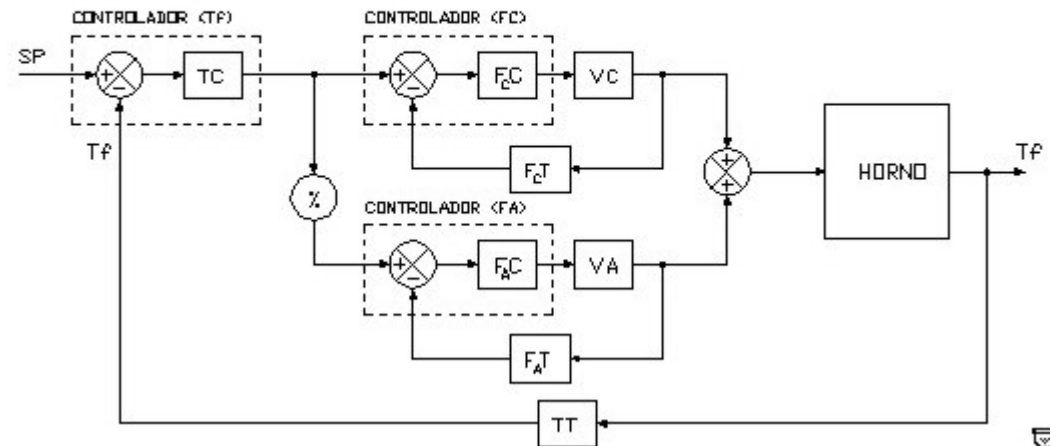


Diagrama de bloques



## 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

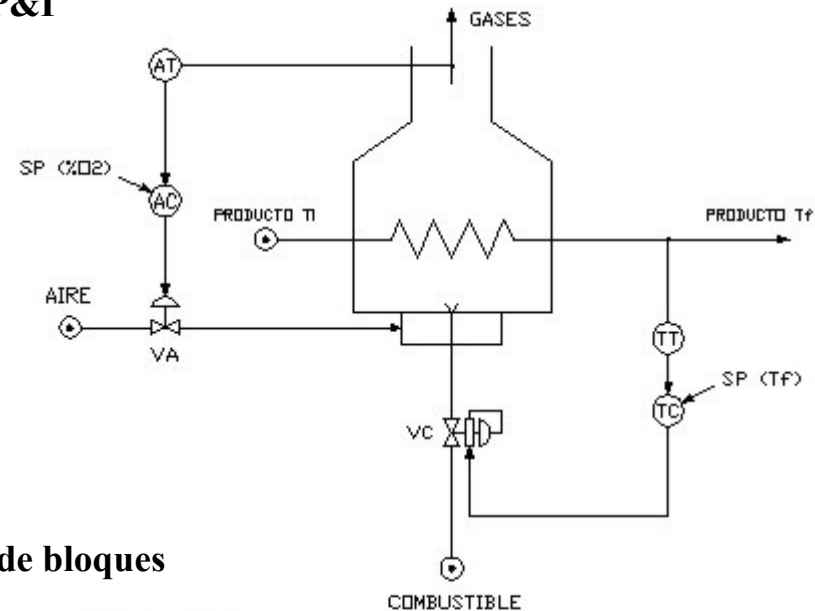
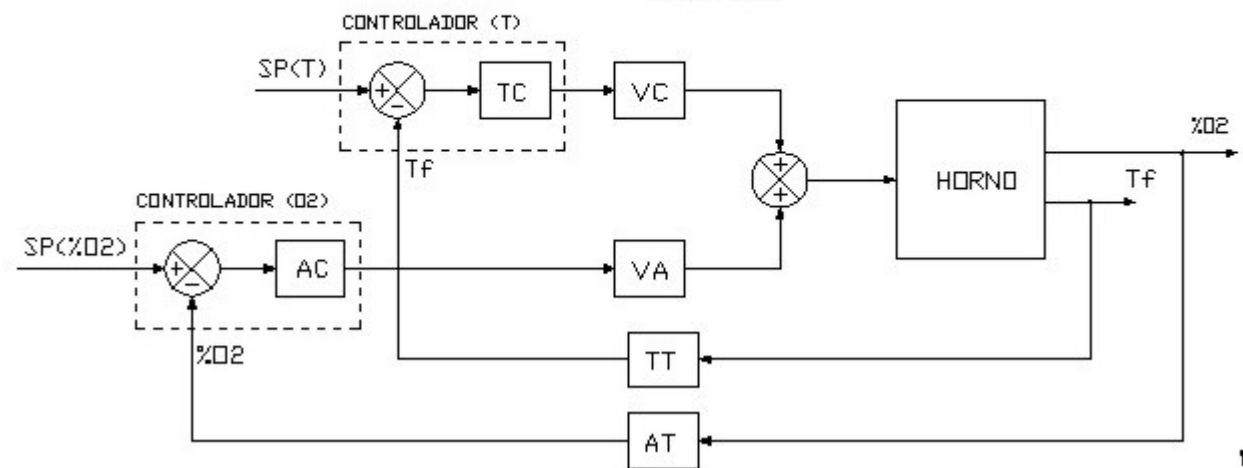


Diagrama de bloques



# 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

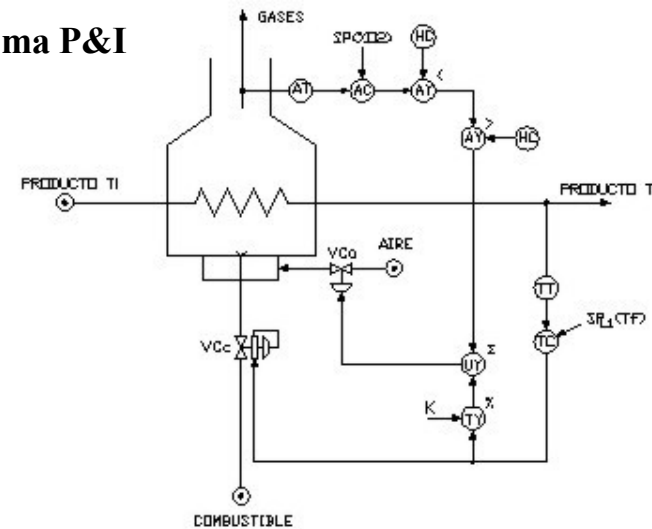
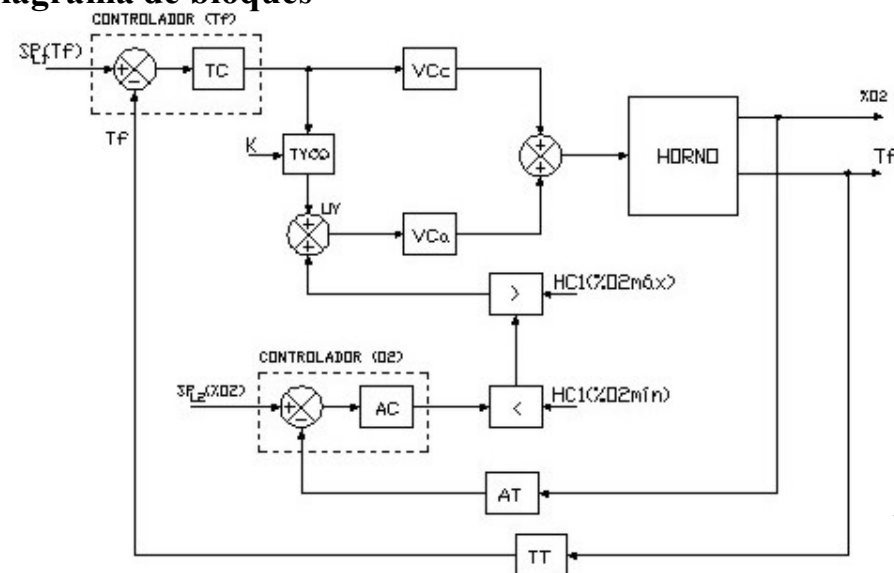


Diagrama de bloques



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



- Manejo de la combustión con medición de sus resultados y del flujo de combustible y aire.
- El control en Avanciación 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

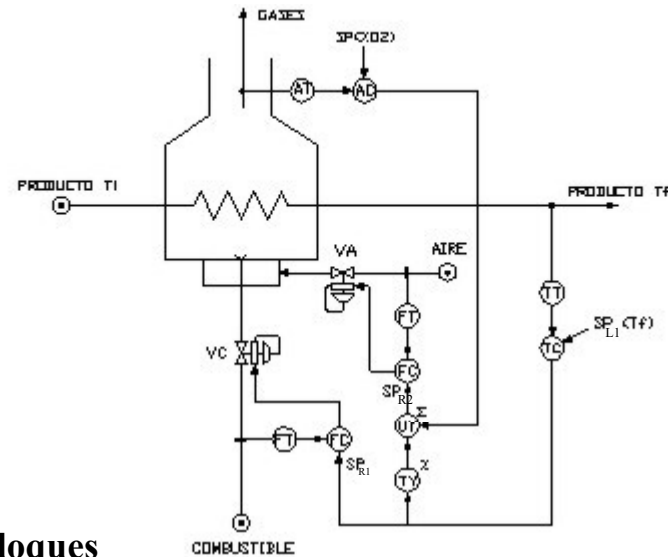
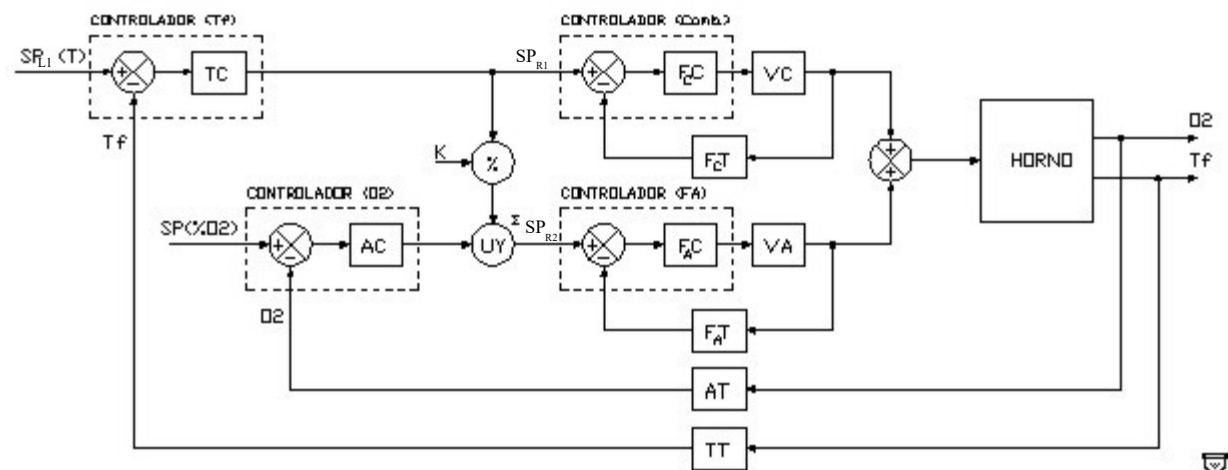


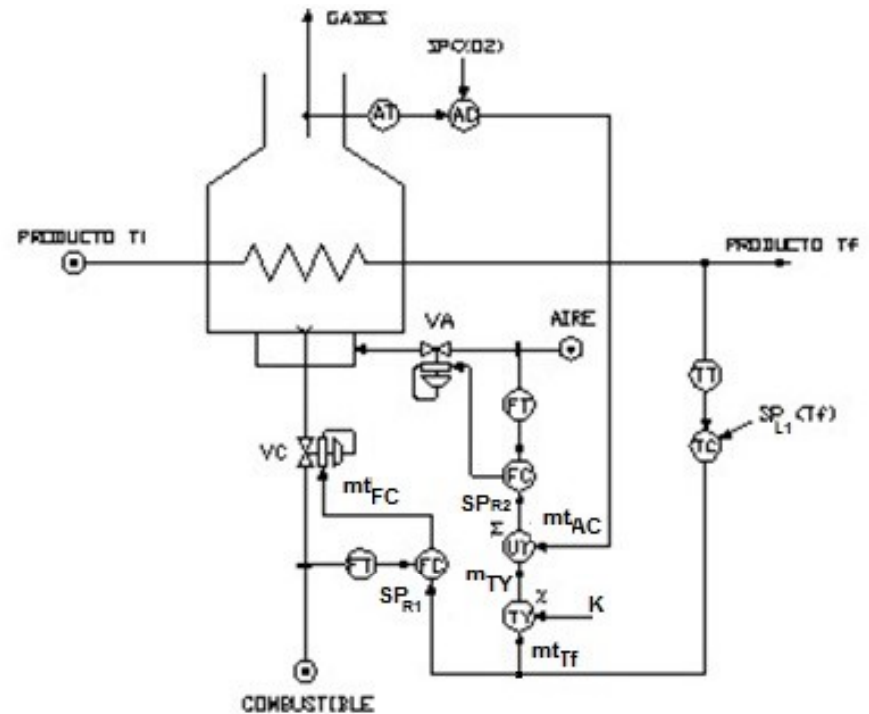
Diagrama de bloques





# DEFINICIÓN DE LOS ALGORITMOS DE CONTROL

Salida controlador	Corriente	Presión	Porcentaje
mt	4-20mA	3-15psig	0-100%
	20-4mA	15-3psig	100-0%



- $mt_{Tf} = mo_{TC} + kp_{TC} \cdot (SP_{L1} - Tf) = SP_{R1}$
- $m_{TY} = (mo_{TC} + kp_{TC} \cdot (SP_{L1} - Tf)) \cdot K$ ; con  $K [m^3_{aire}/Nm^3_{comb.}]$
- $SP_{R2} = m_{TY} + mt_{AC} = [(mo_{TC} + kp \cdot (SP_{L1} - Tf)) \cdot K] + [mo_{AC} + kp_{AC} \cdot (SP_{O2} - \%O_2)]$
- $mt_{FC} = mo_{FC} + (SP_{R2} - F_{aire}) = mo_{FC} [\%] + [((mo_{TC} [\%] + (kp [\% / (^\circ C / m^3_{aire}/Nm^3_{com.})]) \cdot (SP_{L1} - Tf) [^\circ C]) \cdot K [m^3_{aire}/Nm^3_{comb.}] + [mo_{AC} [\%] + kp_{AC} [\% / \%O_2] \cdot (SP_{O2} - \%O_2) [\%O_2] - F_{aire} \cdot A [\% / m^3_{aire}/h])] \pm B = 50\%$

Para condición nominal:

$$mt_{FC} = mo_{FC} + (SP_{R2} - F_{aire}) = mo_{FC} [\%] + mo_{TC} [\%] + [mo_{AC} [\%] - F_{aire} \cdot A [\% / m^3_{aire}/h]] \pm B = 50\%$$

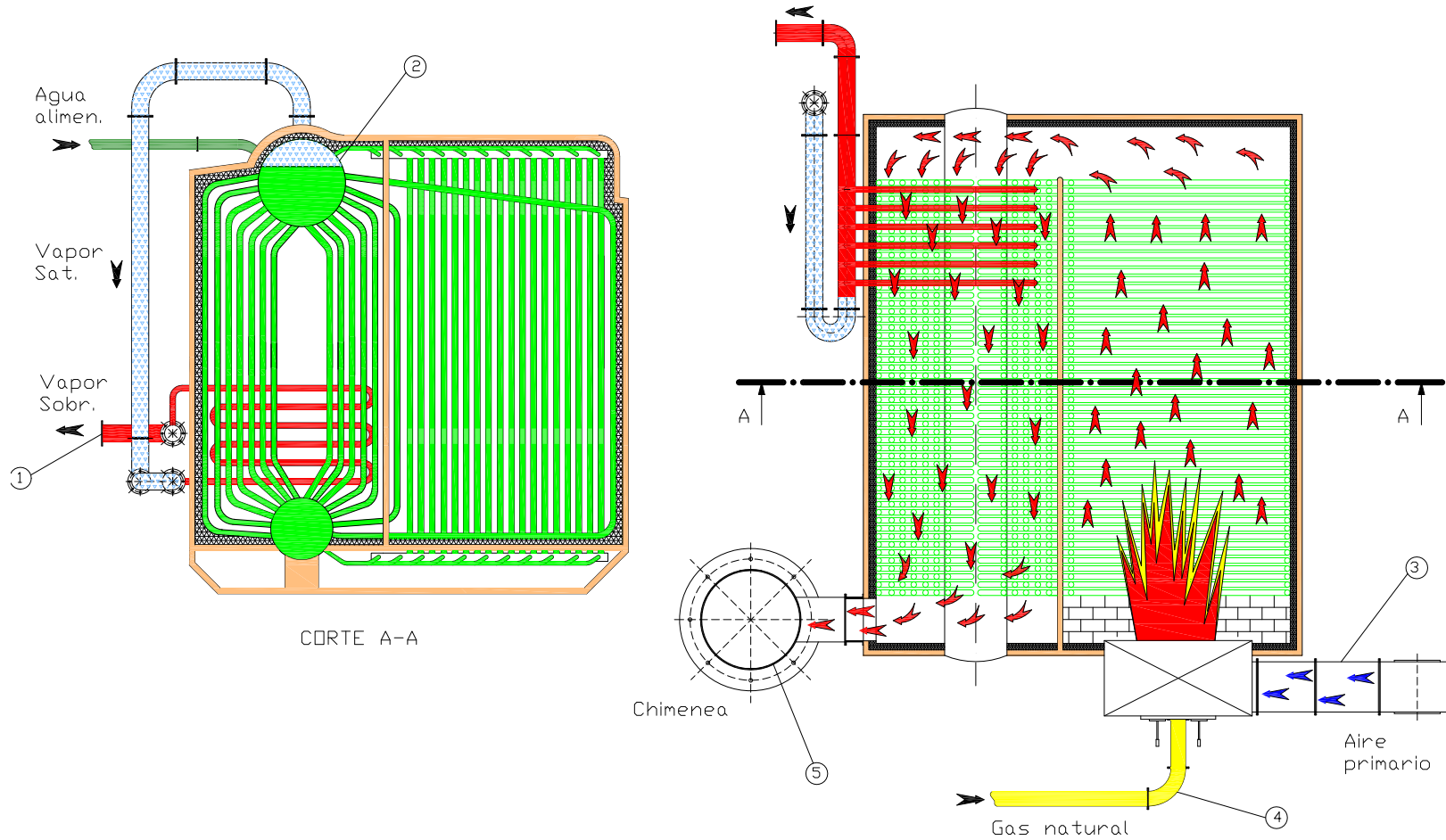
Si suponemos que  $F_{aire} = 2000 [m^3/h]$  y salida porcentual ( $mt [\%]$ ), entonces:

- Una posibilidad sería:  $mt_{FC} = 50 [\%] + 50 [\%] + 50 [\%] - 2000 [m^3_{aire}/h] \cdot A = 50\% \rightarrow A = 0,05$
- Otra posibilidad sería:  $mt_{FC} = 50 [\%] + 50 [\%] + 50 [\%] - 2000 [m^3_{aire}/h] \cdot A + B = 50\% \rightarrow A = 1 \rightarrow B = 1900$

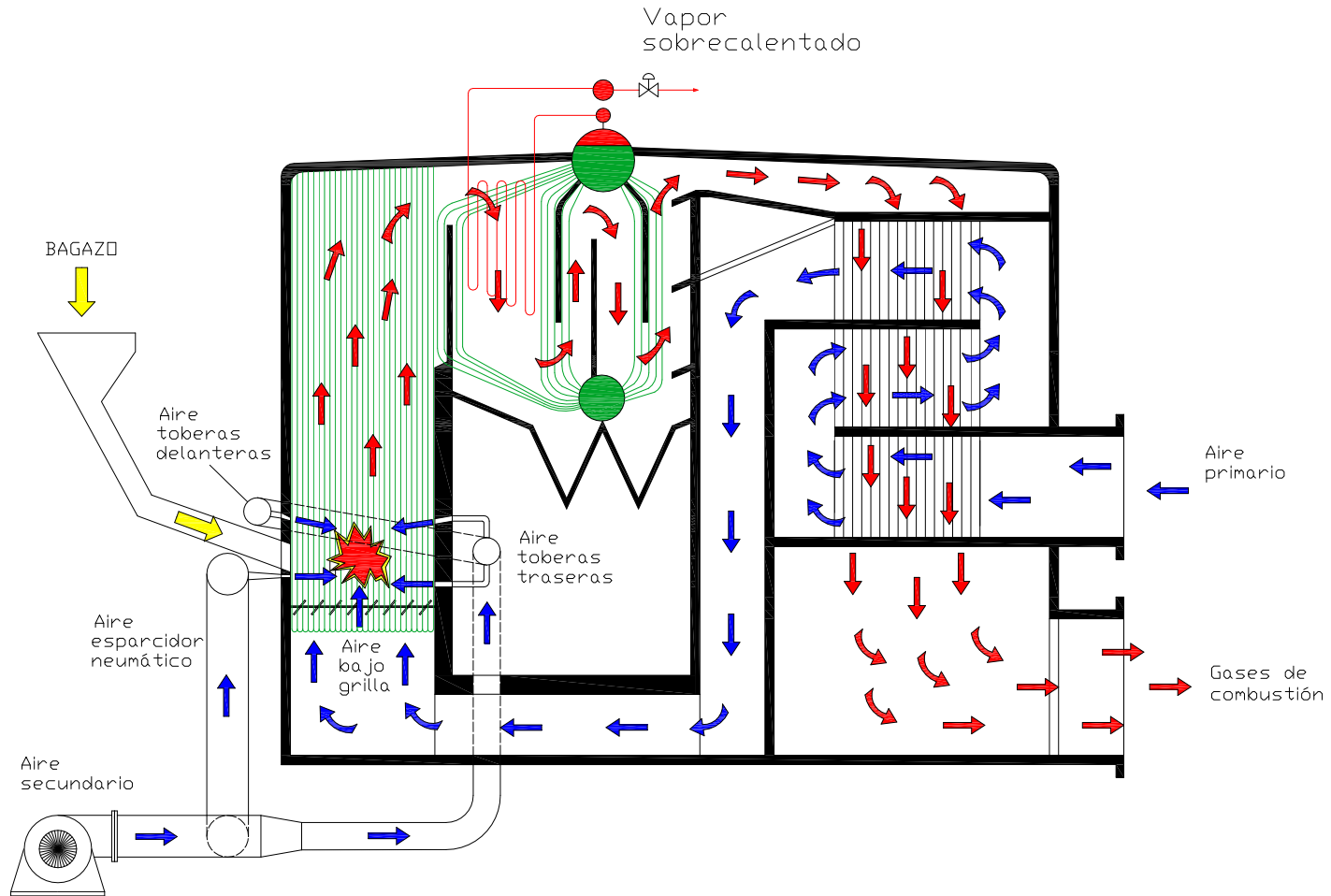
# SISTEMAS DE CONTROL APLICADOS A CALDERAS DE VAPOR



# 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

---

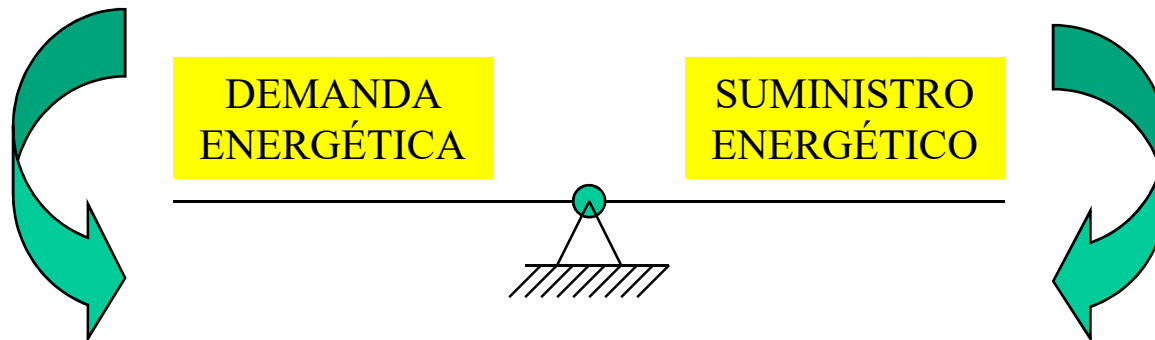
- Control de balance de energía.
- Control de hogar o de combustión.
- Control de nivel de domo.
- Control del agua de alimentación.
- Control de presión en el hogar.
- Control de temperatura del aire primario.
- Control de temperatura del vapor sobrecalentado.



# Control de balance de energía

---

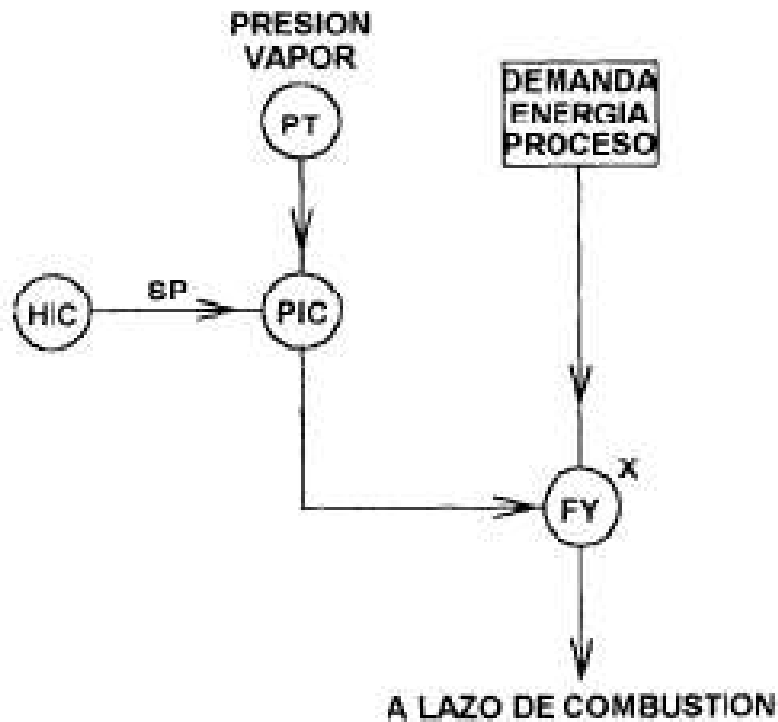
Existe una relación entre la presión de vapor y el estado de carga de la caldera. Se debe balancear la energía que demanda el proceso con la energía proveniente de la combustión.



**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



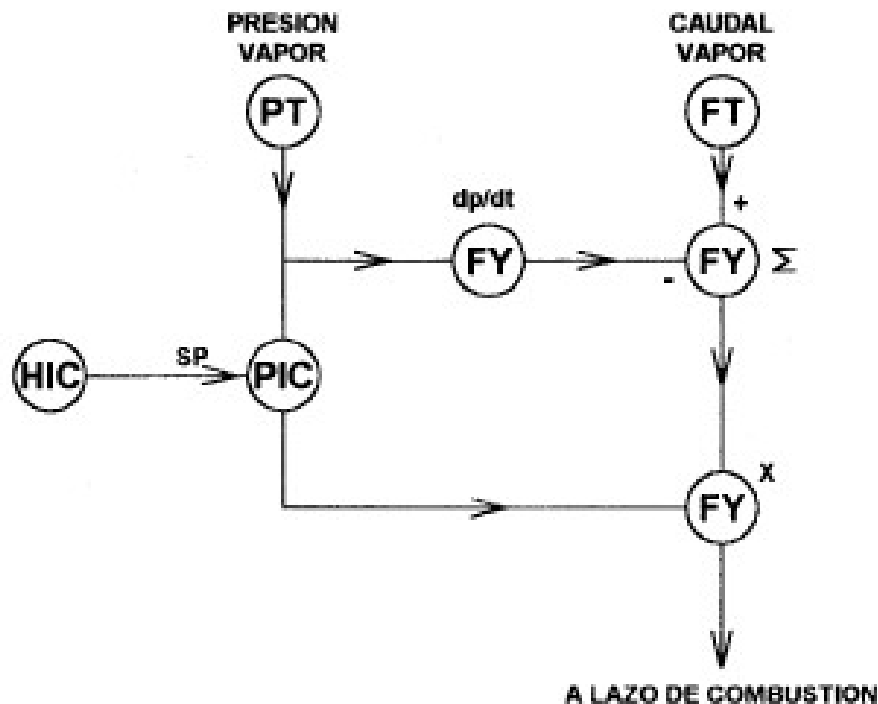
Este sistema de control es satisfactorio:

- 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:

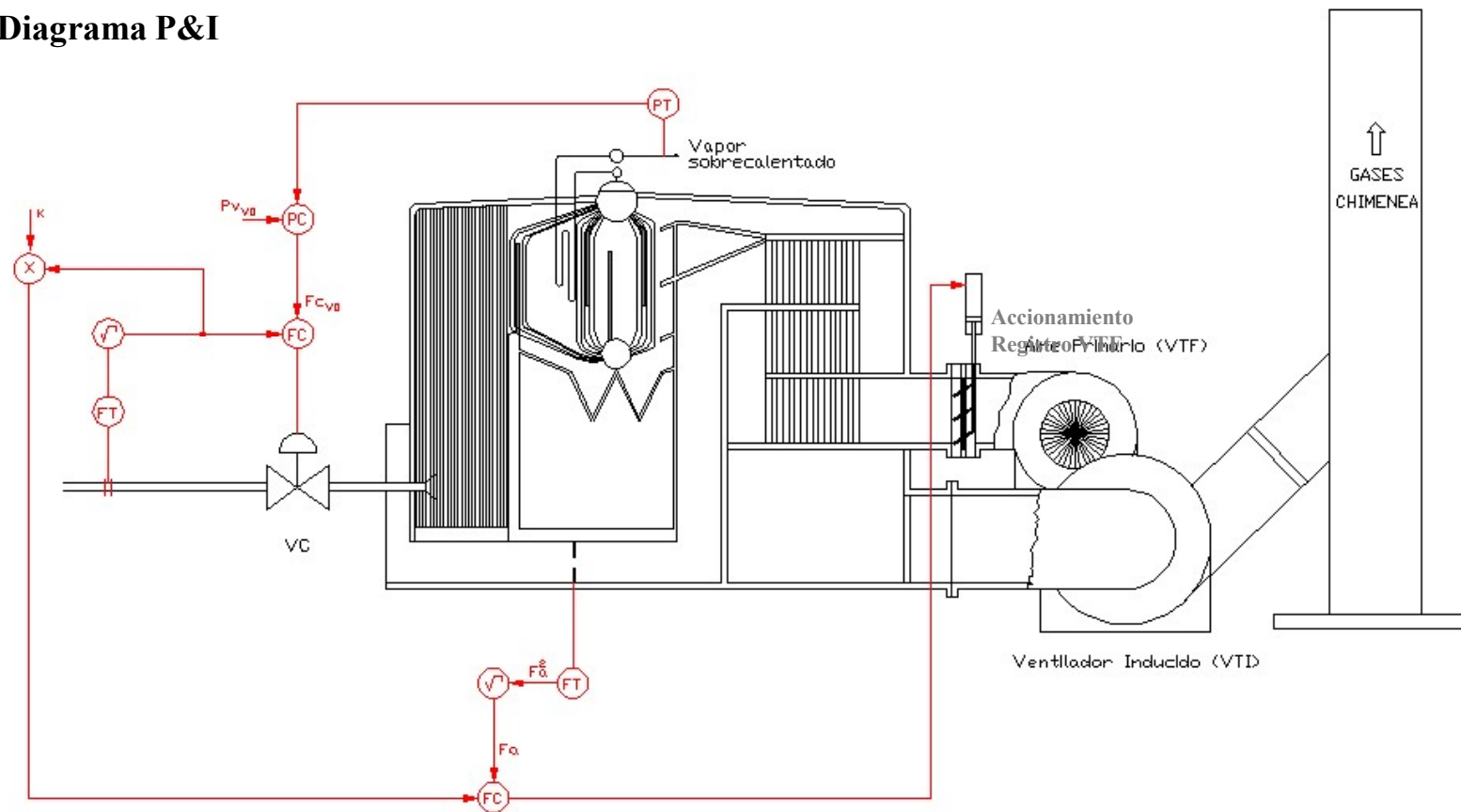


Este sistema compensa el problema dinámico asociado al uso del caudal como índice de la demanda energética (efecto de realimentación positiva), que causa inestabilidad del sistema de control.

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).

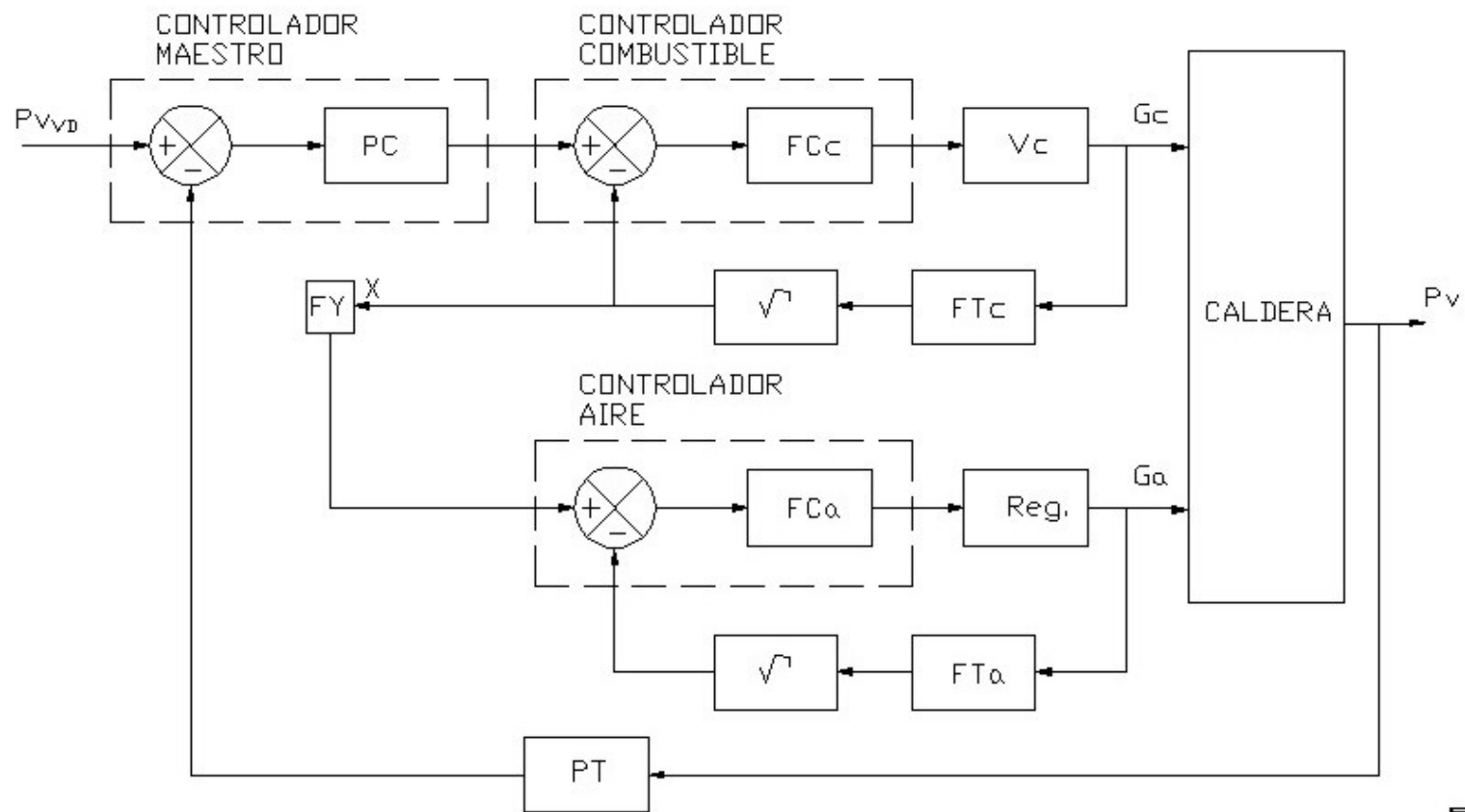
Diagrama P&I



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

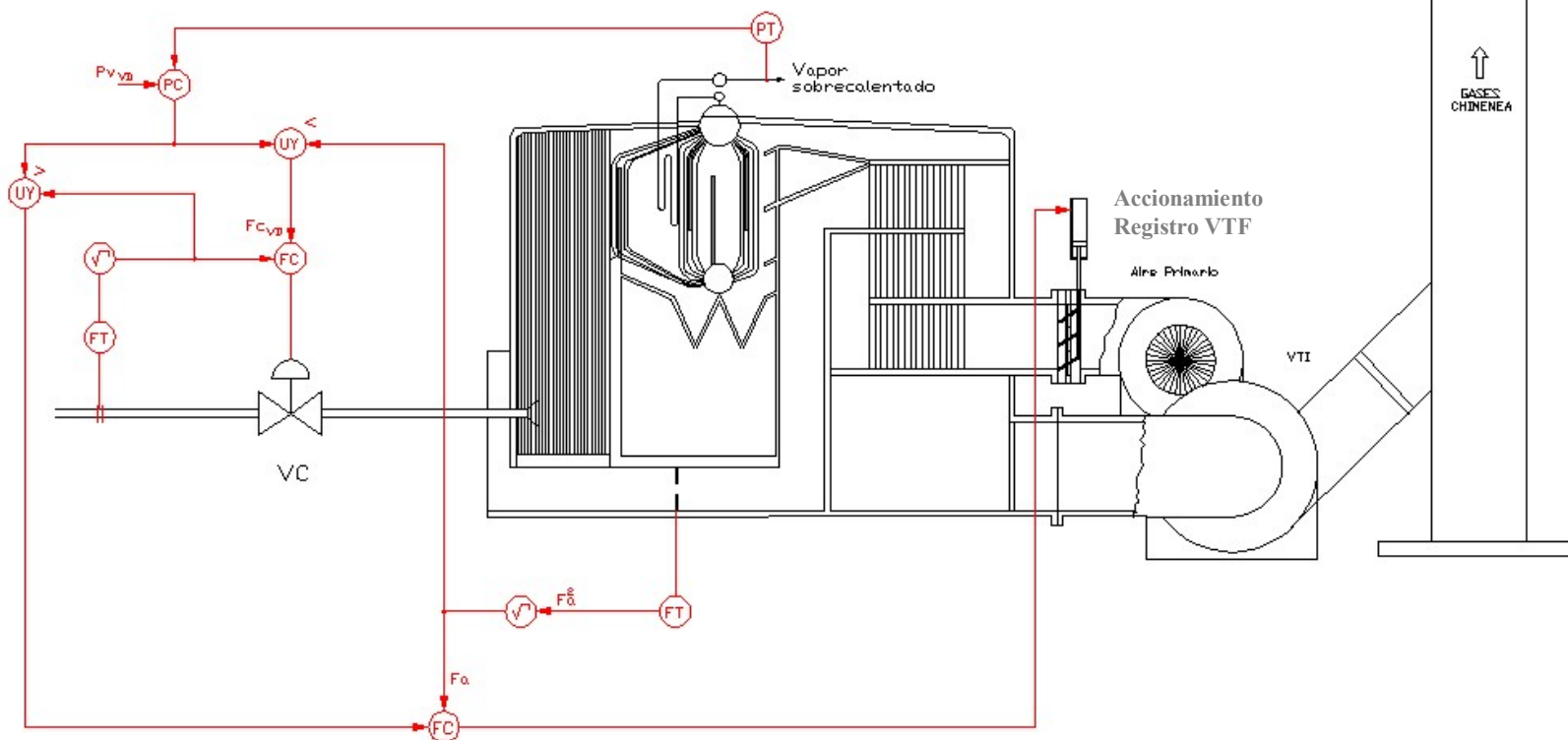


## Diagrama de bloques



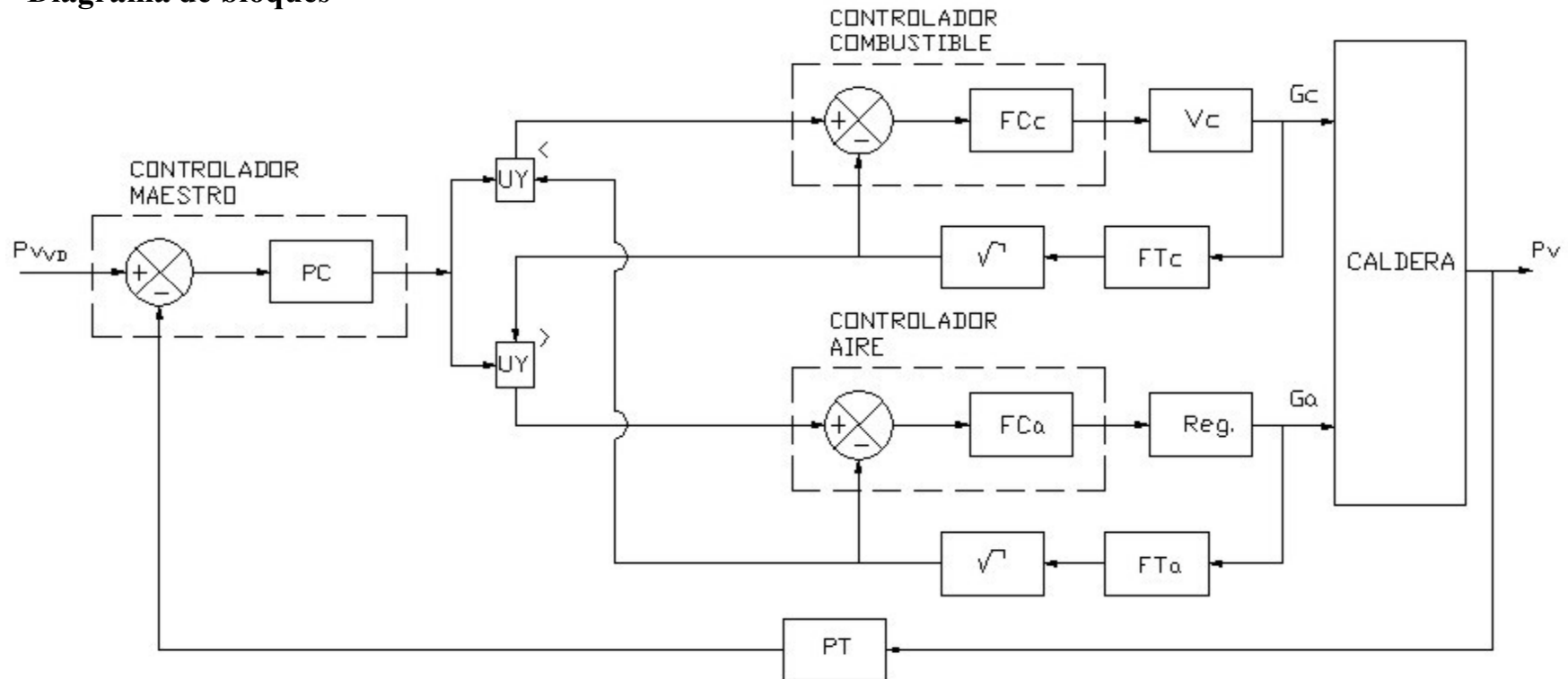
# Sistema de control de hogar y balance de energía con exceso de aire en los transitorios (Cascada Presión-Caudal):

Diagrama P&I



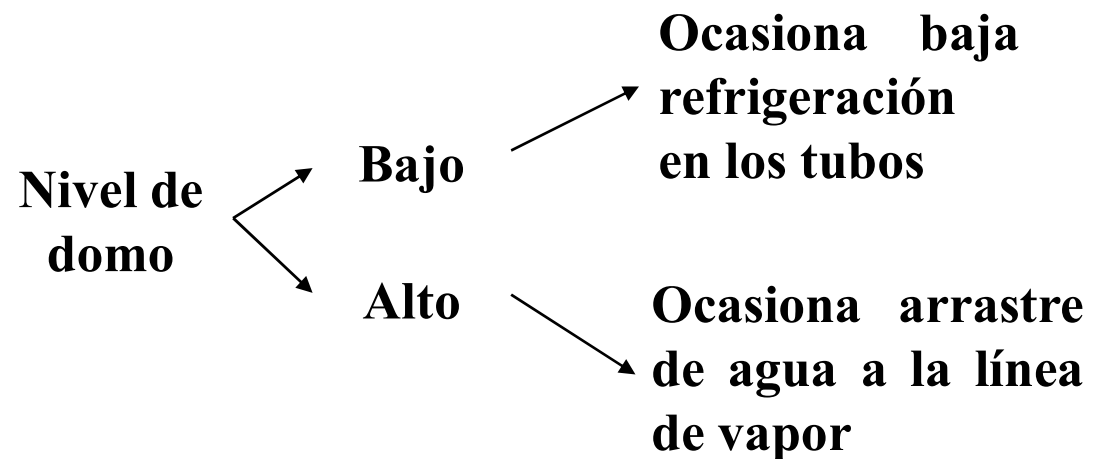
# Sistema de control de hogar y balance de energía con exceso de aire en los transitorios (Cascada Presión-Caudal):

Diagrama de bloques

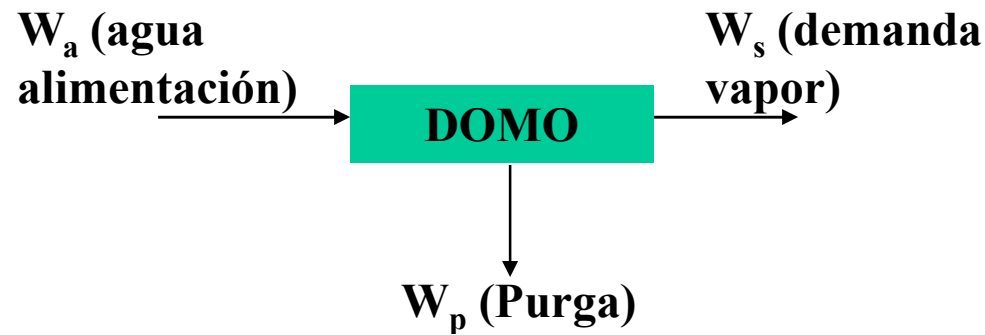


# Control de nivel de domo

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:

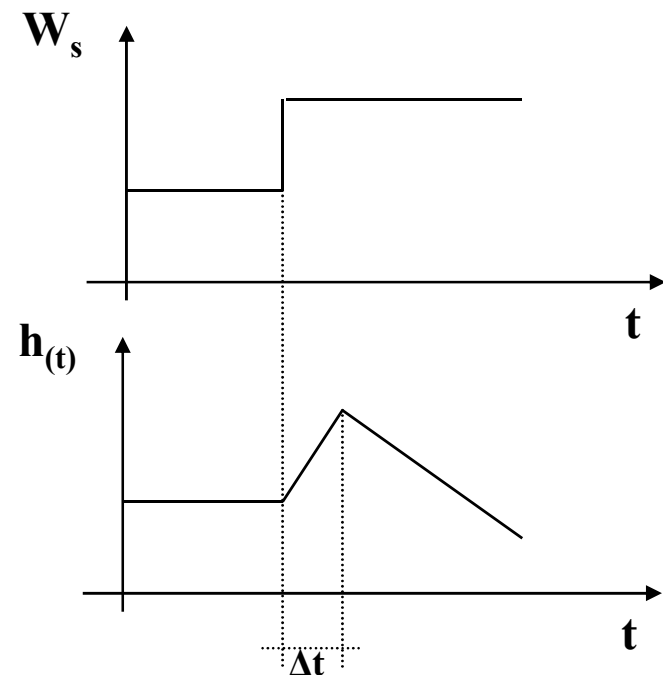
$$\frac{dh}{dt} = \frac{[W_a - (W_s + W_p)]}{S \cdot \gamma a}$$

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

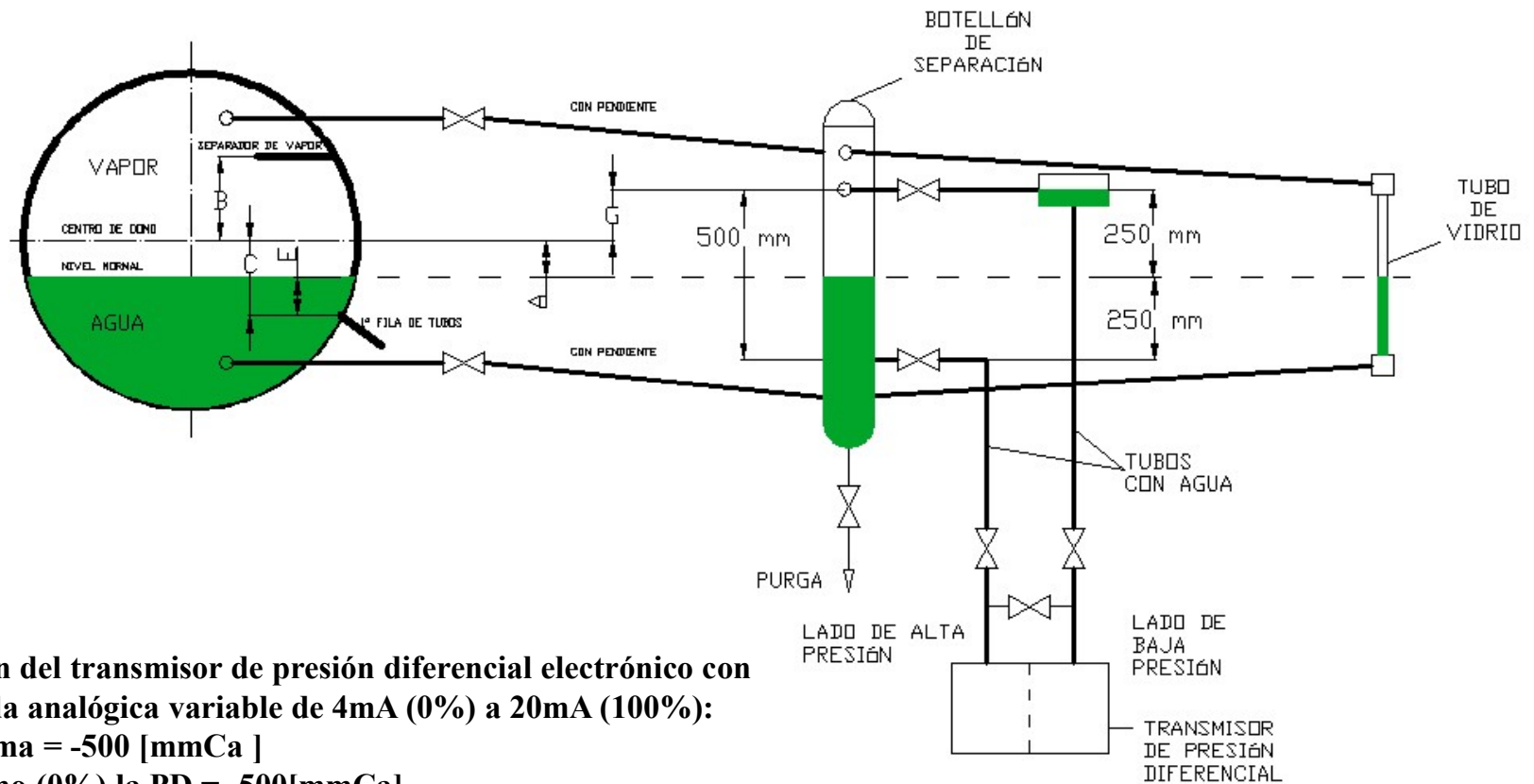
## ● Respuesta inversa:

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]**

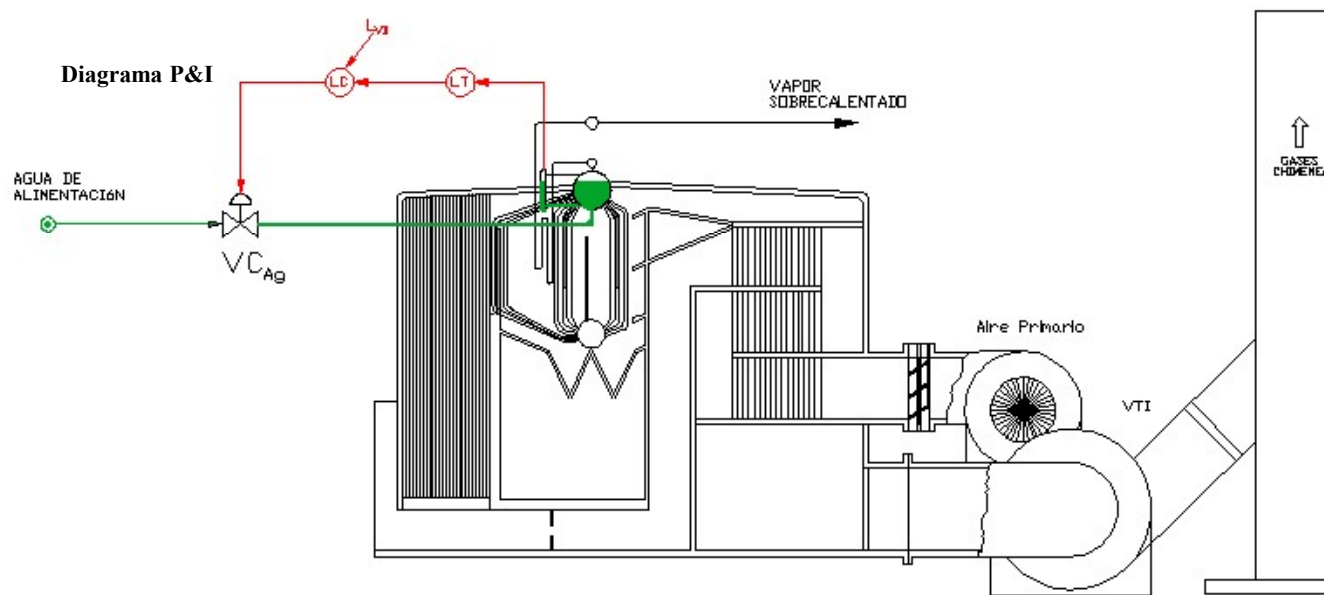
**p/ nivel mínimo (0%) la PD = -500[mmCa]**

**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.

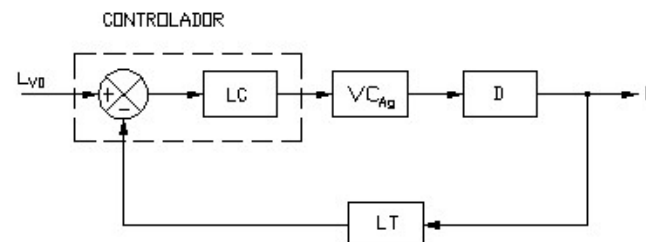


- Se adopta en calderas pequeñas y lentas (p/ tiempo de residencia  $> 8$  a  $10$  [mín]).

- 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  $> 1,5\text{m}$  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.

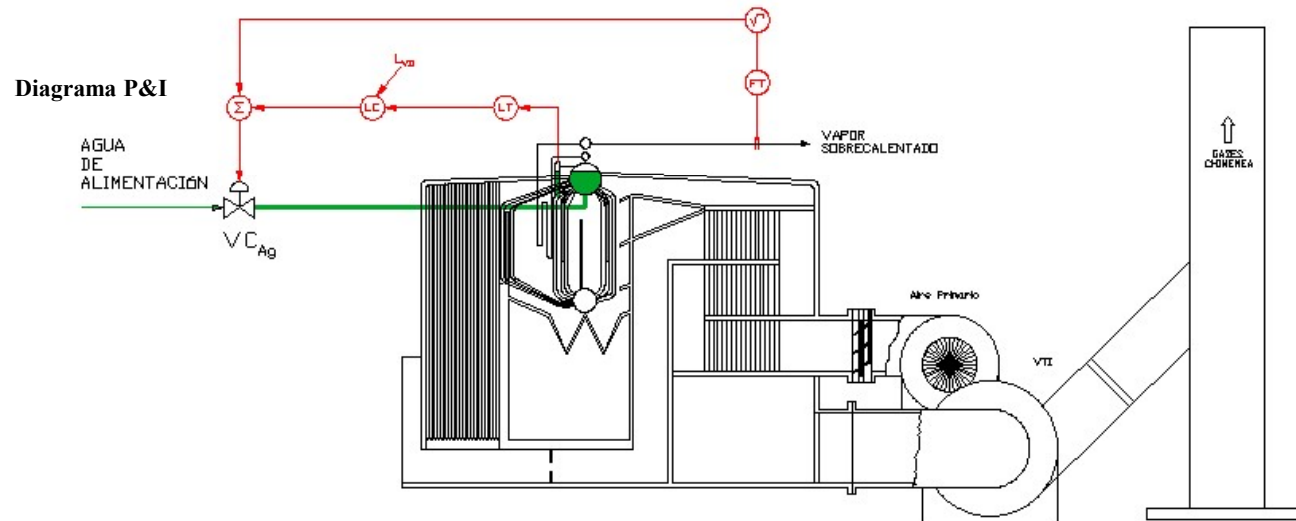
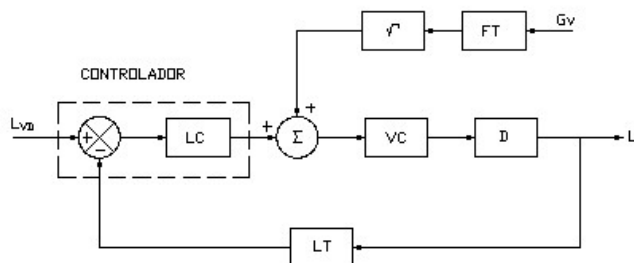


Diagrama de bloques



- 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.

- La avance 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.

Diagrama P&I

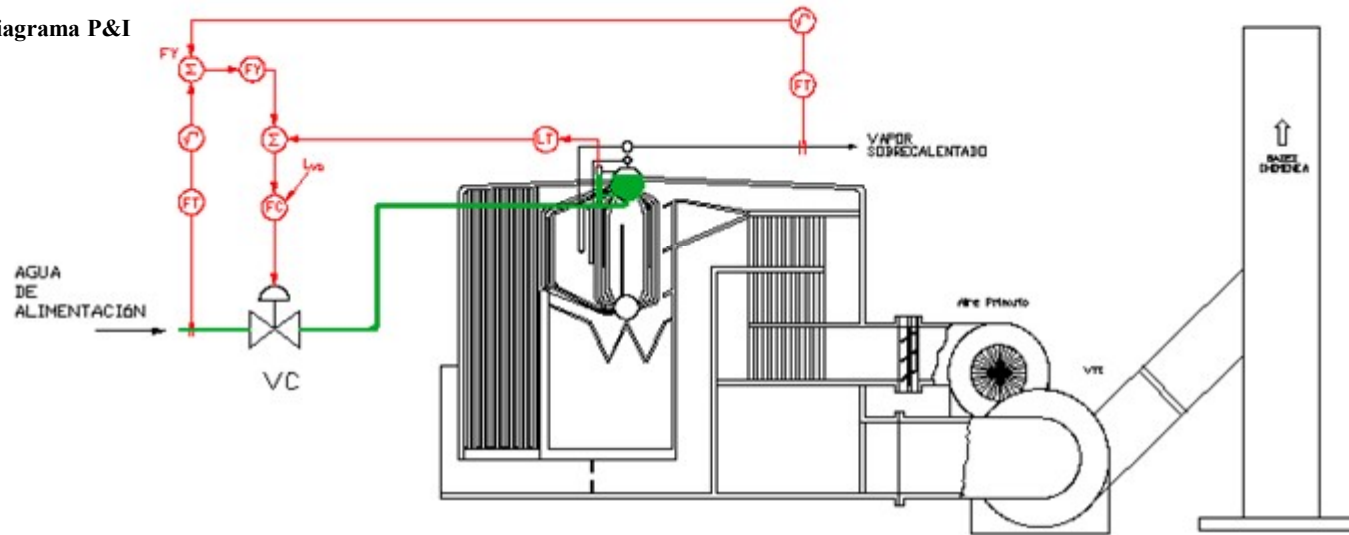
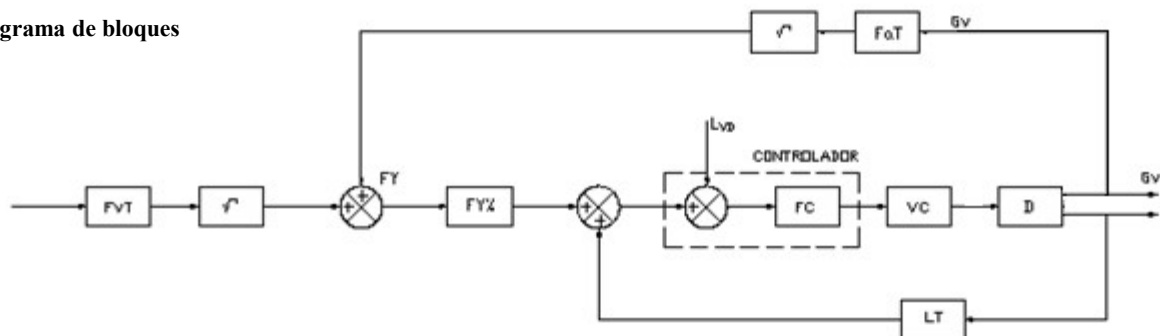


Diagrama de bloques

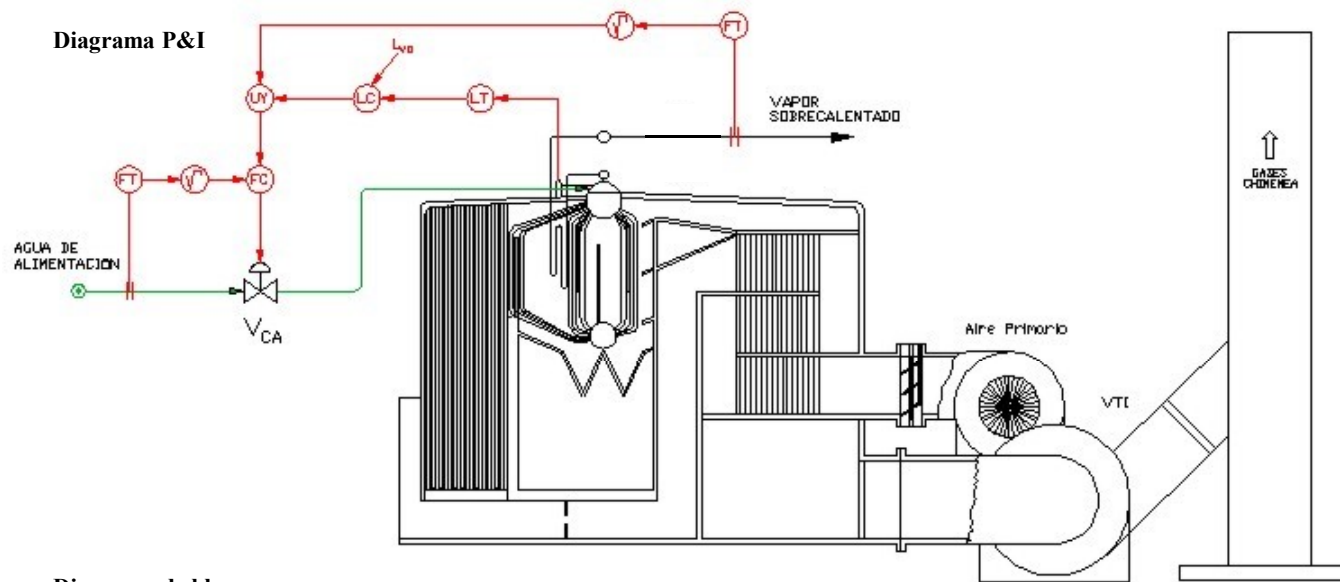


- El FY, aplica un factor de sensibilidad a la suma de las señales de caudales.

- 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.

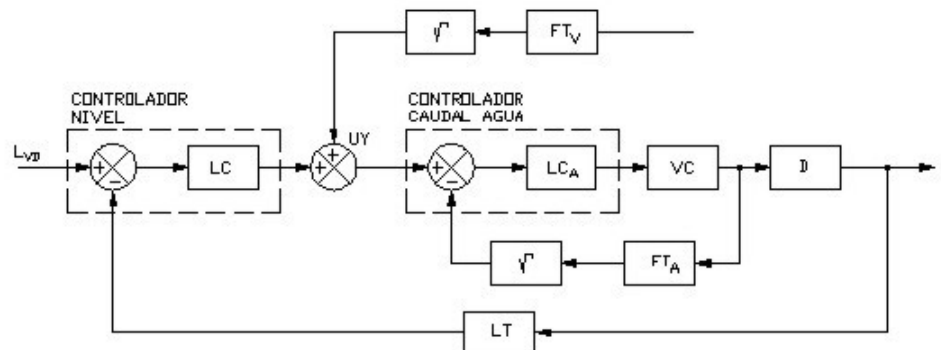
# Sistema de control de nivel de tres elementos (2 controladores).



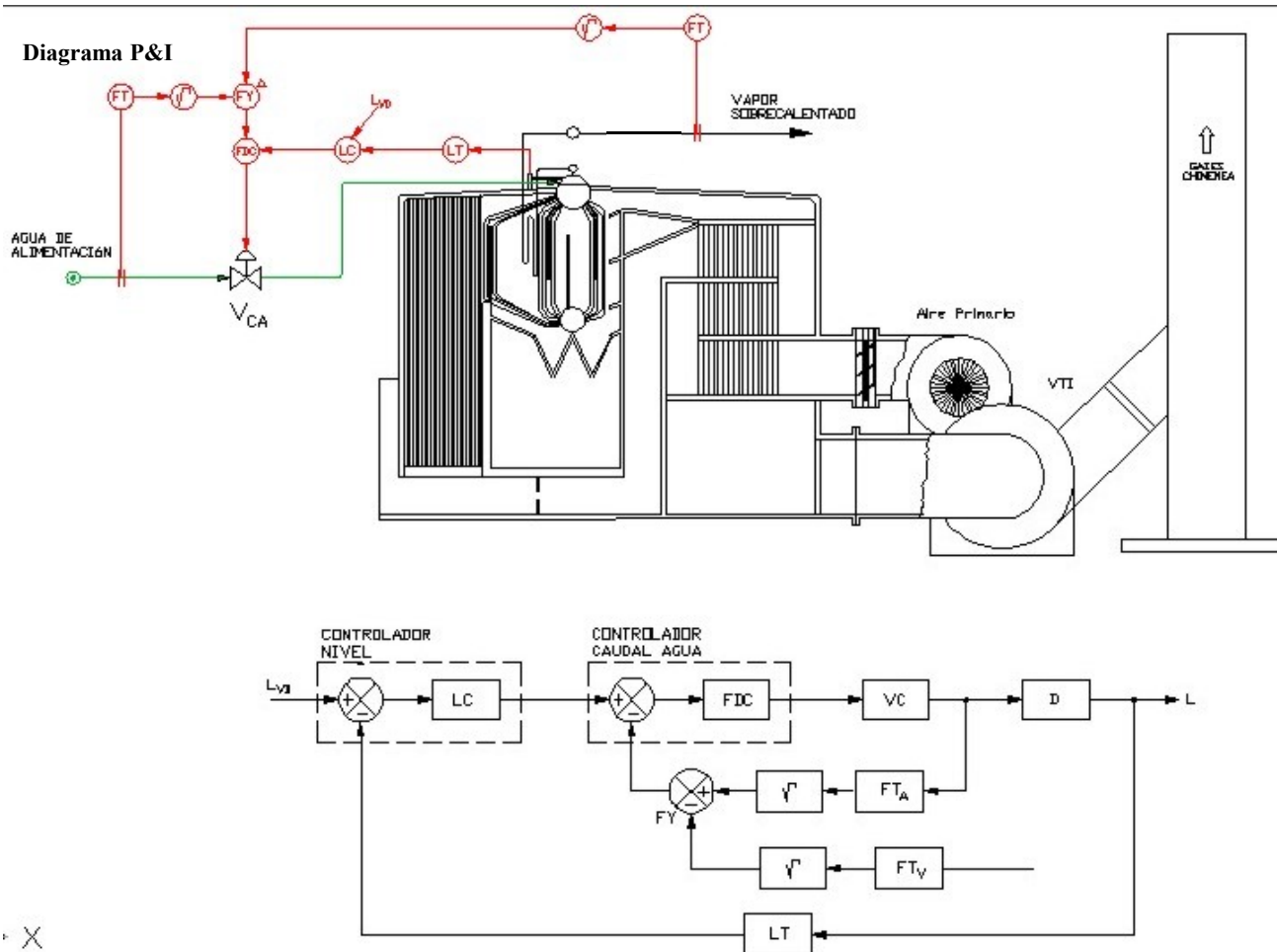
## Con avanacción en lazo primario

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

Diagrama de bloques



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



Con avanzación en lazo secundario

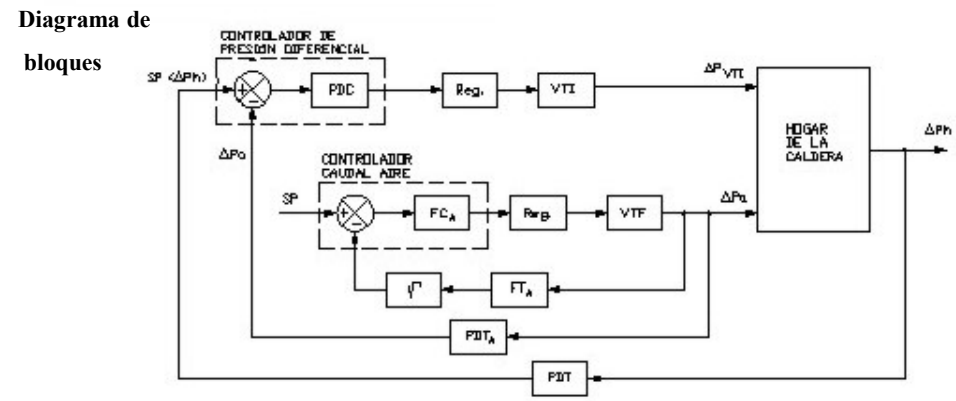
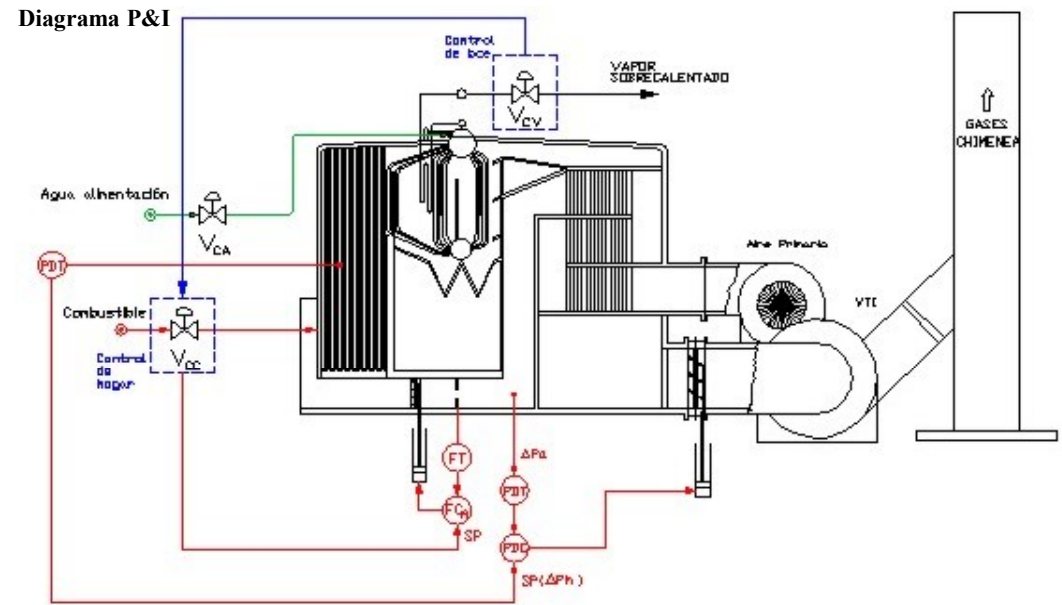
- Sistema de control cascada nivel - caudal + avanzación caudal.
- La variable de lazo interno es la diferencia de caudales de agua y vapor.
- El FY es empleado sobre el lazo de nivel para la corrección de las diferencias.



# Control de presión en el hogar de la caldera

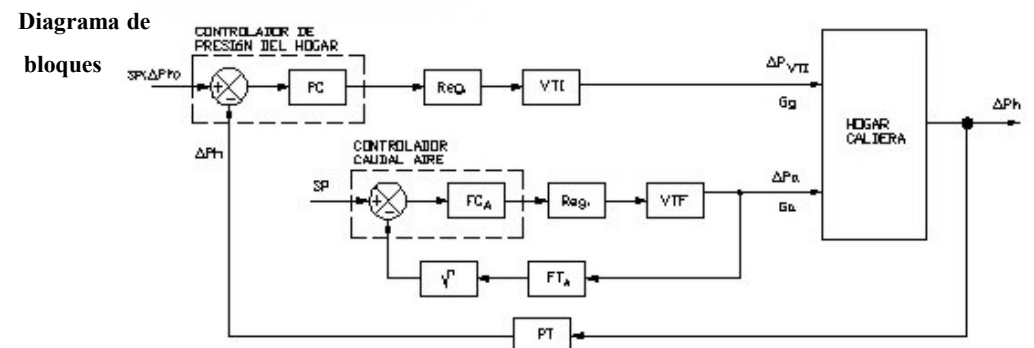
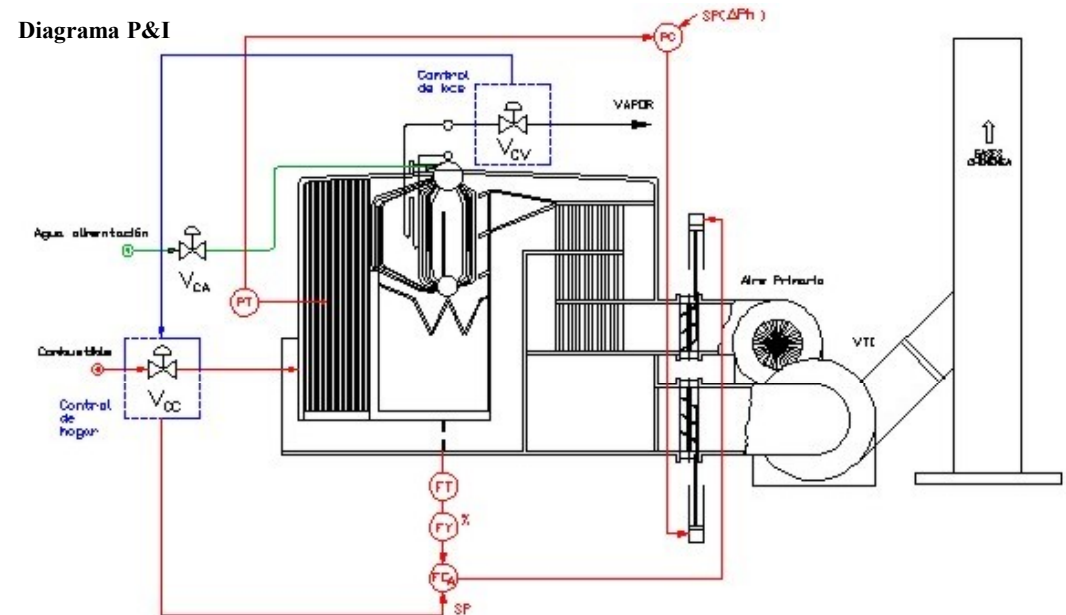
Este sistema de control, permite mantener constante la presión en el interior del hogar de la caldera.

- 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.



# 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

- 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 P&I

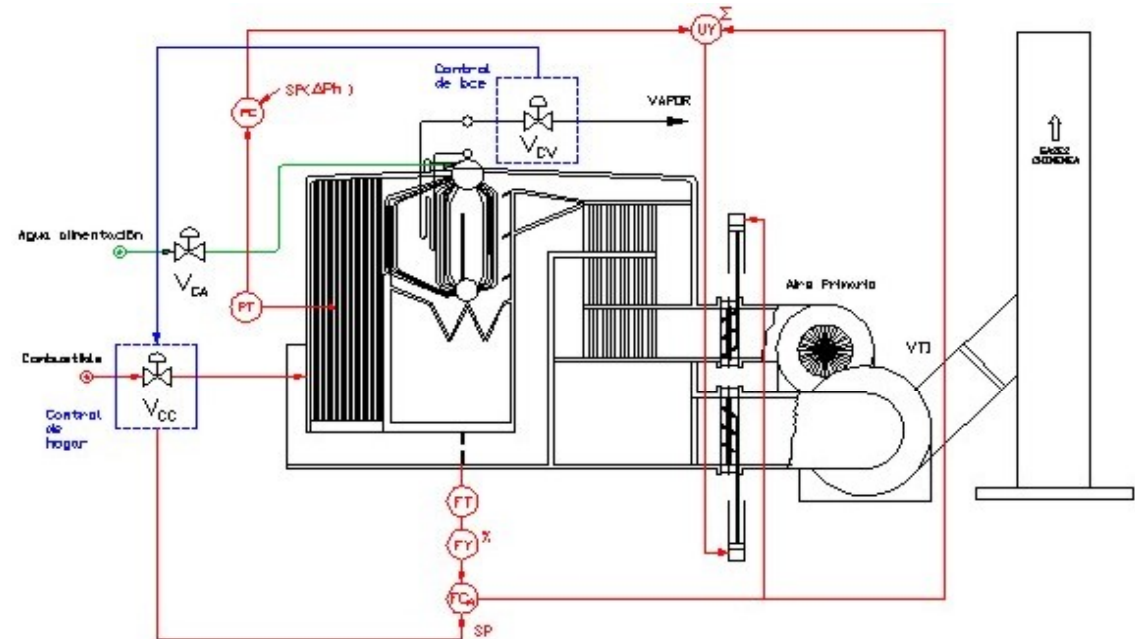
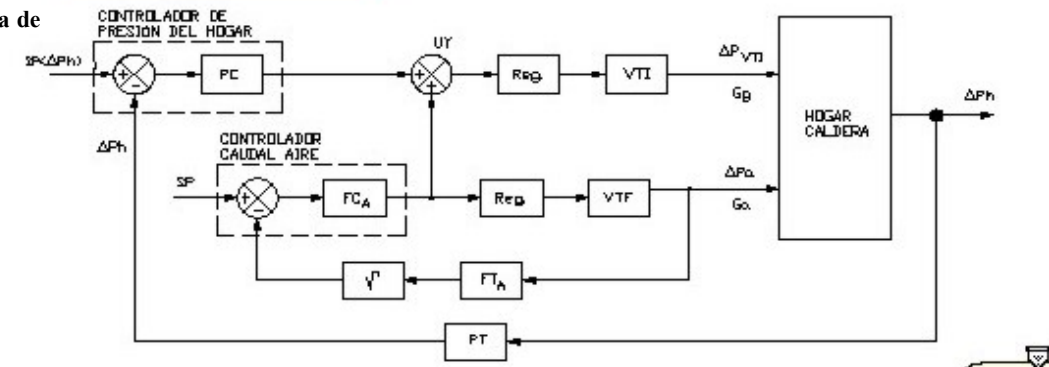
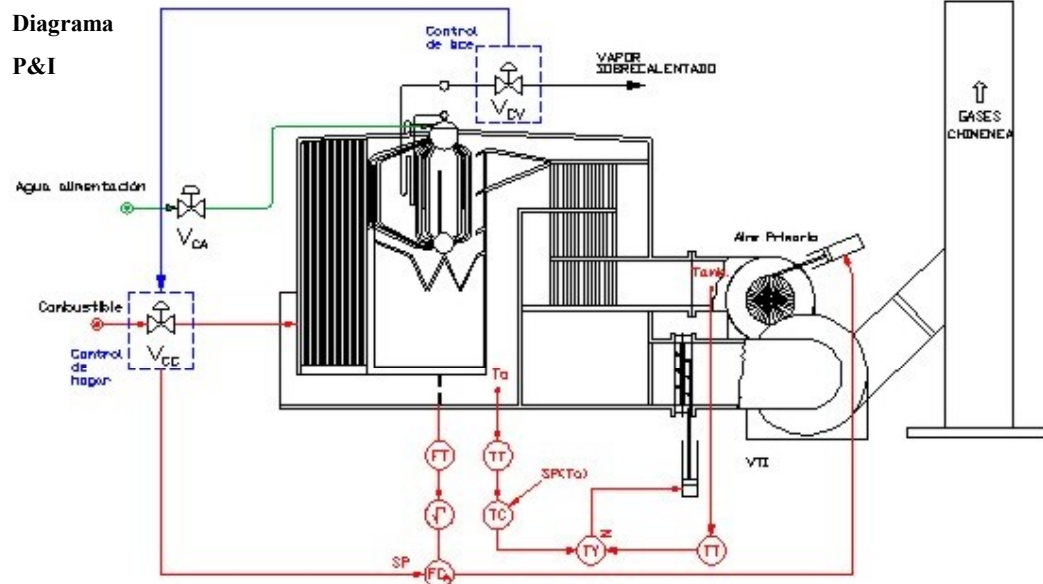


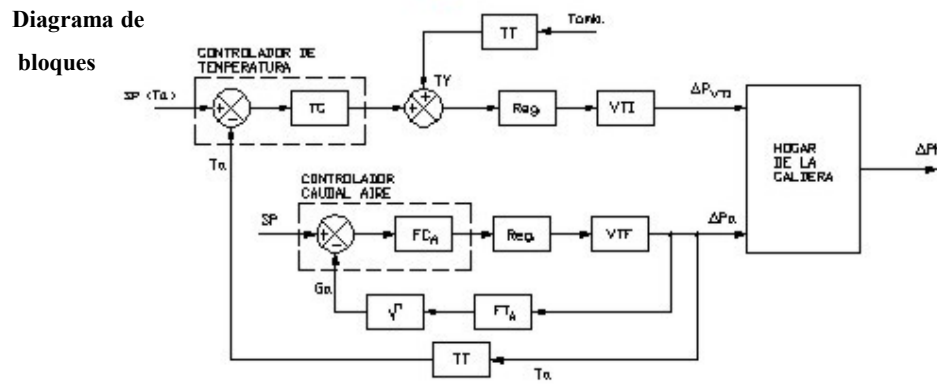
Diagrama de bloques



# Control de temperatura del aire de combustión

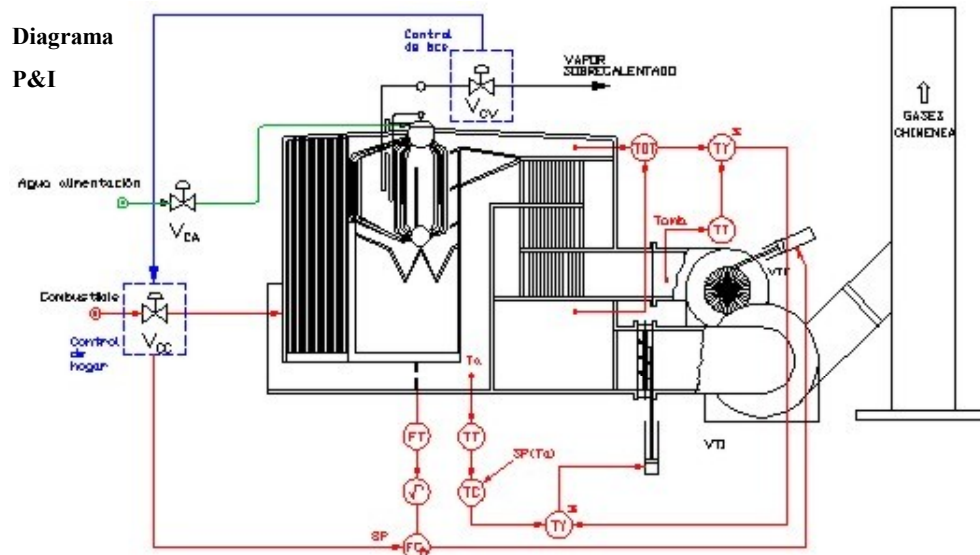


- El lazo de control de temperatura del aire al hogar, es lento y depende de las áreas de intercambio de calor.
- Este ejemplo posee una corrección en base a la perturbación de la temperatura ambiente. Los cambios ambientales son también lentos.
- El FY aporta sensibilidad al TT de  $T_a$ , dando la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



5

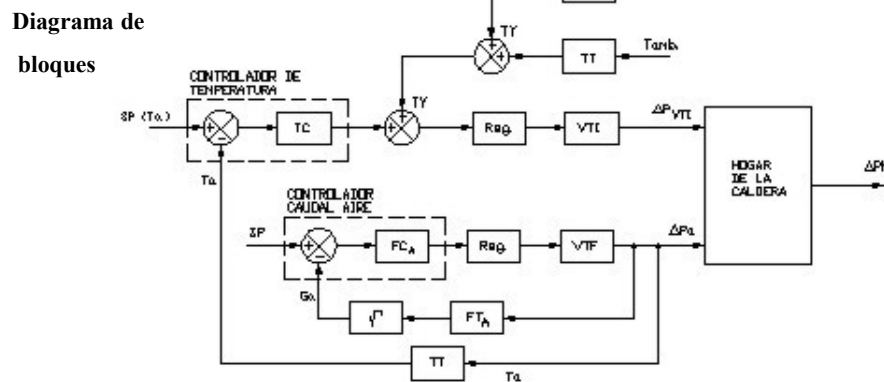
# Control de temperatura del aire de combustión



- 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.

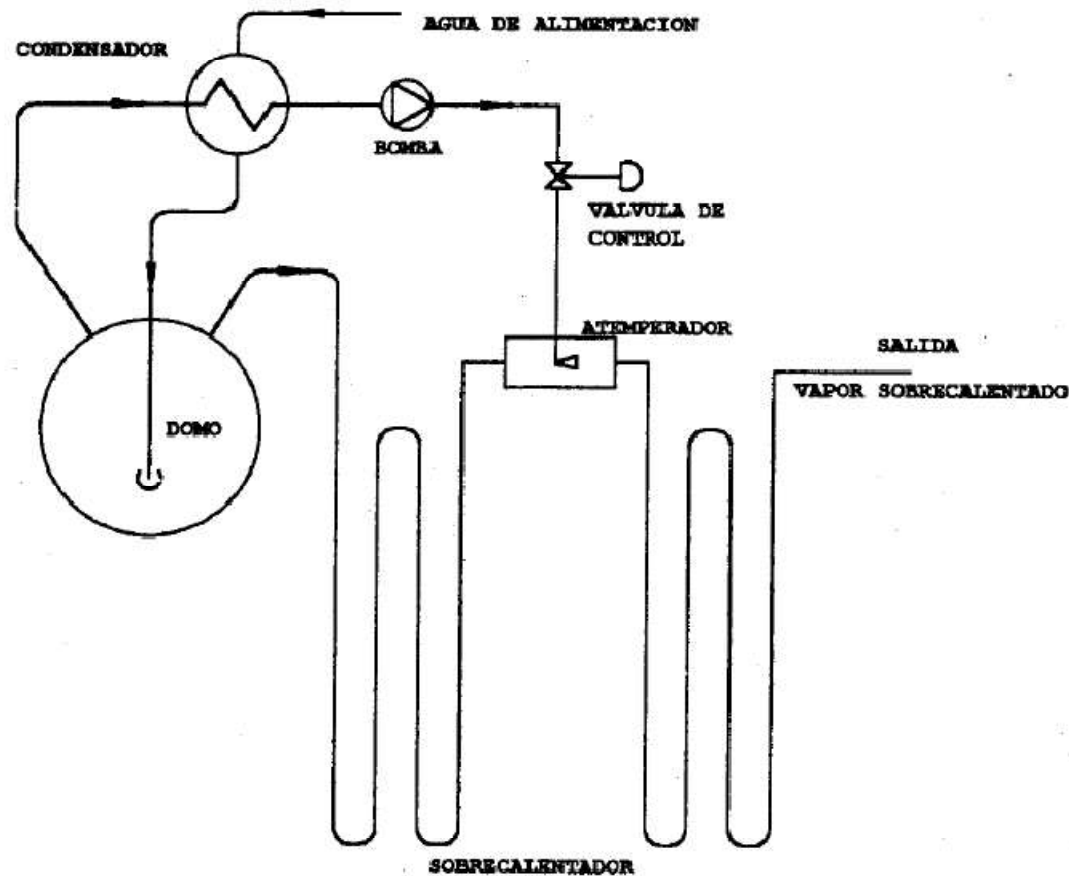
## **Atemperación Indirecta:**

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

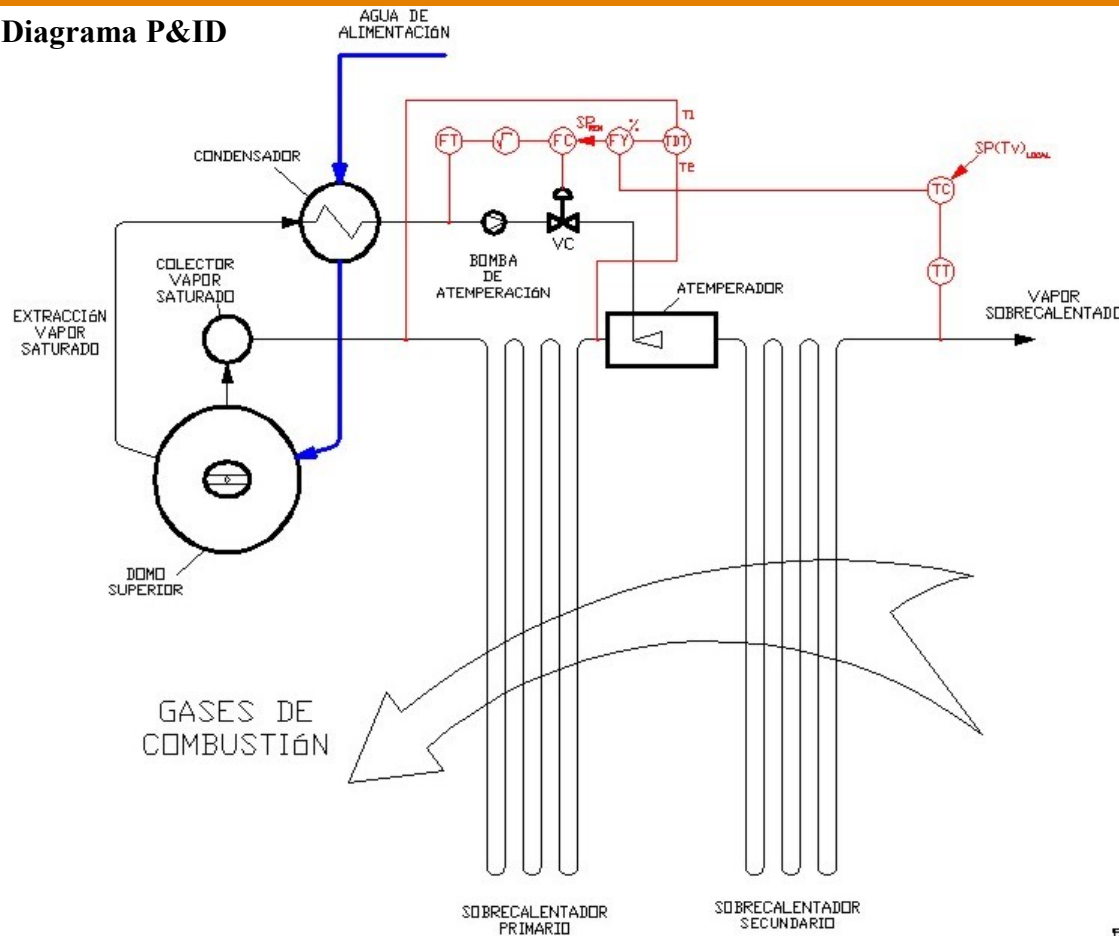


- El método universalmente de mayor utilización se basa en la inyección directa de agua dentro de la corriente de vapor sobrecalentado.
- Este circuito se caracteriza por contar con una rápida respuesta ante las variaciones de temperatura.
- La desventaja de este método radica en la necesidad de inyectar 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 + Avanación 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 [ $t_{n_{vapor}} / h$ ]

Diagrama de bloques

