



## **INFORMACIÓN TÉCNICA ITSI-12**

# **SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE AGUA Y CONTROL DE NIVEL EN CALDERAS DE VAPOR**

**Versión 1.1**

agosto de 2018

***Sistemas Industriales de Calderas, S.L.***

# ÍNDICE

- 1 Control de nivel/agua de alimentación en calderas de vapor. .... - 3 -
  - 1.1 Objetivo..... - 3 -
  - 1.2 Filosofía del control..... - 3 -
  - 1.3 Tipos de Control ..... - 5 -
    - 1.3.1 Control a un elemento: ..... - 5 -
    - 1.3.2 Control a dos elementos: ..... - 6 -
    - 1.3.3 Control a tres elementos:..... - 8 -
  - 1.4 Conclusiones:..... - 13 -
- 2 Esquemas de Control ..... - 15 -
  - 2.1 Control a un elemento..... - 15 -
  - 2.2 Control a dos elementos..... - 16 -
  - 2.3 Control a tres elementos. .... - 17 -
  - 2.4 Válvula de control. .... - 18 -
  - 2.5 Conclusiones..... - 19 -
- 3 Ejemplo 1..... - 20 -
- 4 Ejemplo 2..... - 25 -
- 5 Conclusiones ..... - 28 -
- 6 Leyenda ..... - 28 -

Versión 1.1



# 1 CONTROL DE NIVEL/AGUA DE ALIMENTACIÓN EN CALDERAS DE VAPOR.

## 1.1 Objetivo

Los principales objetivos del control del nivel de agua en una caldera de vapor son los siguientes:

1. Controlar el nivel de agua en el valor deseado.
2. Minimizar la interacción con el control de combustión.
3. Crear suaves cambios en el agua almacenada ante los cambios bruscos de la demanda.
4. Equilibrar adecuadamente la salida de vapor con la entrada de agua.

Además, aunque no es función principal, compensar las variaciones de presión del agua de alimentación sin perturbar el proceso ni modificar el punto de operación.

Particularmente importante es el minimizar la interacción con el control de combustión. Esta interacción se acentúa con el suministro desigual del agua de alimentación, que afecta a la presión de vapor y que conlleva modificaciones en la demanda de potencia sin existir variaciones en la demanda de vapor. Estas variaciones en la potencia de combustión de la caldera producen a su vez incrementos y decrementos en la presión con las consiguientes perturbaciones en la caldera que acentúan el problema.

## 1.2 Filosofía del control

El control de nivel de agua de una caldera tiene varias particularidades debido a su especial comportamiento. Dichas particularidades son el esponjamiento y la contracción que se producen en el nivel de agua ante cambios de demanda de vapor y, que, modifica el nivel en la dirección opuesta a la que intuitivamente se espera. Así, ante un incremento en la demanda de vapor, el nivel de agua, en lugar de disminuir al extraerse más vapor, se incrementa temporalmente debido a la disminución de la presión provocada por el aumento de consumo. Esta disminución en la presión provoca un aumento en la evaporación y en el tamaño de las burbujas de vapor (esponjamiento) que hace aumentar el nivel. Si pudiéramos ver una sección de la caldera por el interior, veríamos que el nivel de agua se eleva en la parte central de la caldera. Por el contrario, ante una disminución en la demanda, en lugar de producirse un aumento en el nivel debido a la disminución del caudal de vapor, se produce una disminución debida al aumento de la presión.

Esto origina una menor evaporación y un menor tamaño en las burbujas de vapor (contracción) que hace disminuir el nivel.

Para lograr los objetivos básicos mencionados, existe un patrón que indica la relación deseable entre el caudal de agua, de vapor y el nivel de agua del calderín o caldera (Figura 1). Cuando se incremente el caudal de vapor, se incrementará el caudal de agua si no se ha producido un esponjamiento en el nivel. Un incremento en el nivel producirá una disminución en el caudal de agua si no se ha incrementado el caudal de vapor.

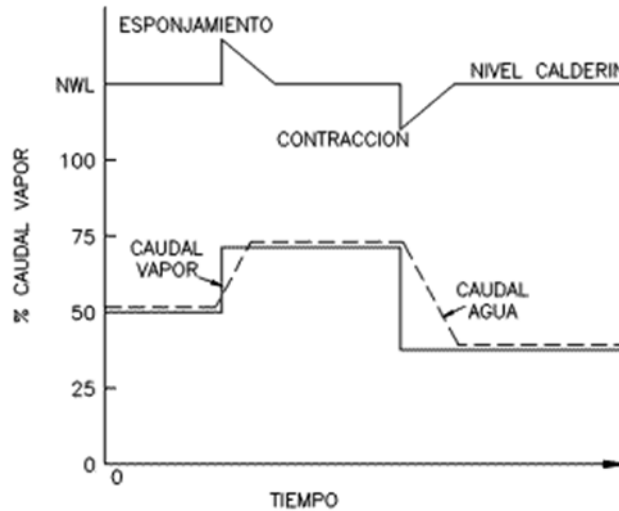


Figura 1. Relaciones óptimas agua-vapor

Si la influencia del nivel de agua del calderín (en el caso de calderas acuatubulares) o caldera es muy grande, se producirá una disminución en el caudal de agua, que provocará finalmente que el nivel sea excedido para poder aportar esa pérdida de agua. Si la influencia del caudal de vapor es muy grande, el incremento inicial de aportar más agua, mantendrá por más tiempo el nivel por encima de su punto de consigna (Figura 2).

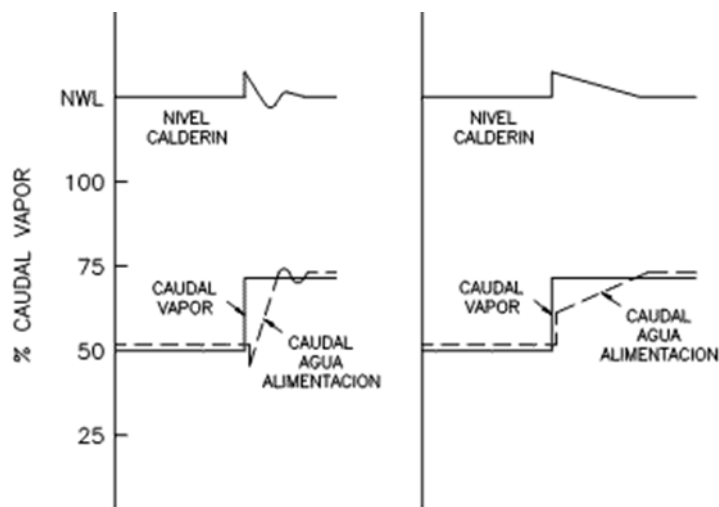


Figura 2. Influencias del nivel y del caudal de vapor

Versión 1.1

La acción correctora adecuada sería la mostrada en la Figura 1 en la que el caudal de agua no cambia inmediatamente, sino gradualmente para acompañar al caudal de vapor una vez que el nivel ha vuelto a su punto de trabajo tras el transitorio.

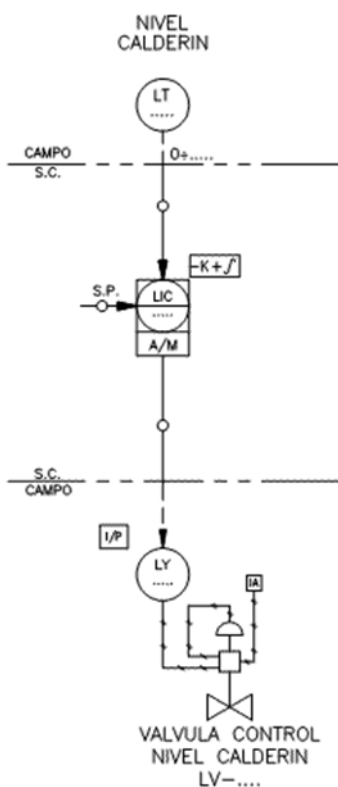
### 1.3 Tipos de Control

#### 1.3.1 Control a un elemento:

Después de lo indicado, el típico control de nivel a un elemento que se basa en la medición de una única variable (nivel de agua en la caldera) y regula el caudal de agua de aportación mediante un controlador PI<sup>(1)</sup> no es el adecuado para una caldera, aunque en aquellas calderas pequeñas en las que el contenido de agua es relativamente grande, y en donde los cambios de demanda se producen de una manera lenta, de forma que la presión no se ve muy afectada por dichos cambios, se puede implementar este tipo de control de un elemento como se muestra en la figura 3.

En el ajuste de este lazo debe tenerse en cuenta que, aunque para lograr una regulación mejor el valor de la ganancia (k) sea grande, esto contribuiría a una mayor interacción entre el control de nivel y el control de combustión (Figura 4). Por otra parte, el ajuste de la acción integral en el lazo debe ser lento puesto que en los cambios de demanda el control se mueve en la dirección opuesta. Sin embargo, el incluir la acción integral nos permitirá disminuir la ganancia minimizando la interacción con el control de combustión.

Este tipo de sistema es el que se implementa de manera más habitual debido a su sencillez y coste.



Versión 1.1

Figura 3. Control de nivel a un elemento

(1): Controlador Proporcional – Integral.

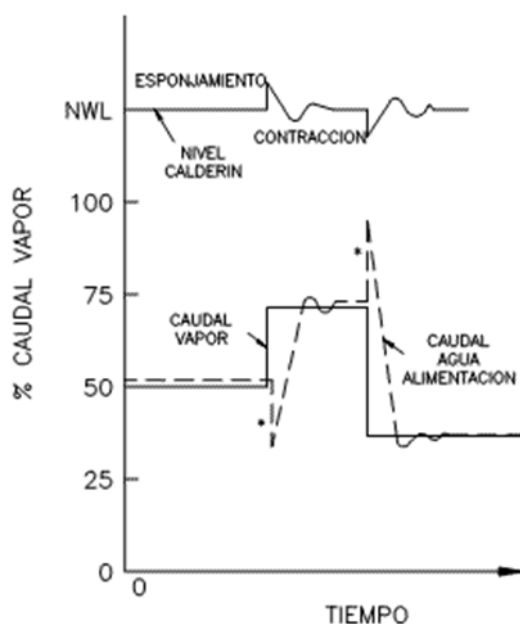


Figura 4. Interacción con el control de combustión

### 1.3.2 Control a dos elementos:

En este tipo de control se utilizan dos variables de control a saber: caudal de vapor demandado y nivel de agua en caldera, normalmente el nivel en este tipo de control se mide en continuo.

El caudal de vapor es la señal índice que anticipa una variación en las necesidades de aportación de agua, de forma que se establecerá una relación entre éste y la posición de la válvula. Por otra parte, para el correcto funcionamiento de esta estrategia, es imprescindible que la relación entre la posición del elemento de control y el caudal aportado por éste no cambie y sea conocida, de forma que, para unas condiciones de demanda de vapor dadas, sepamos en qué posición se ha de situar el elemento de control.

Como hemos comentado, la respuesta deseada ante un cambio de carga es que se mantenga el caudal de agua hasta que el nivel empieza a retornar a su punto de trabajo, de forma que la cantidad de agua se ajusta suavemente al nuevo valor requerido.

Puesto que, en este diseño ante un aumento en el caudal de vapor, éste pedirá más agua al tiempo que el nivel hará lo contrario, el ajuste adecuado de estas acciones nos permitirá evitar cambios inmediatos en la cantidad de agua y cumplir con el requisito expuesto anteriormente y mostrado en la Figura 1.

El diseño del control a dos elementos se muestra en la Figura 5. En ella puede observarse el típico control con retro-alimentación más post-alimentación.

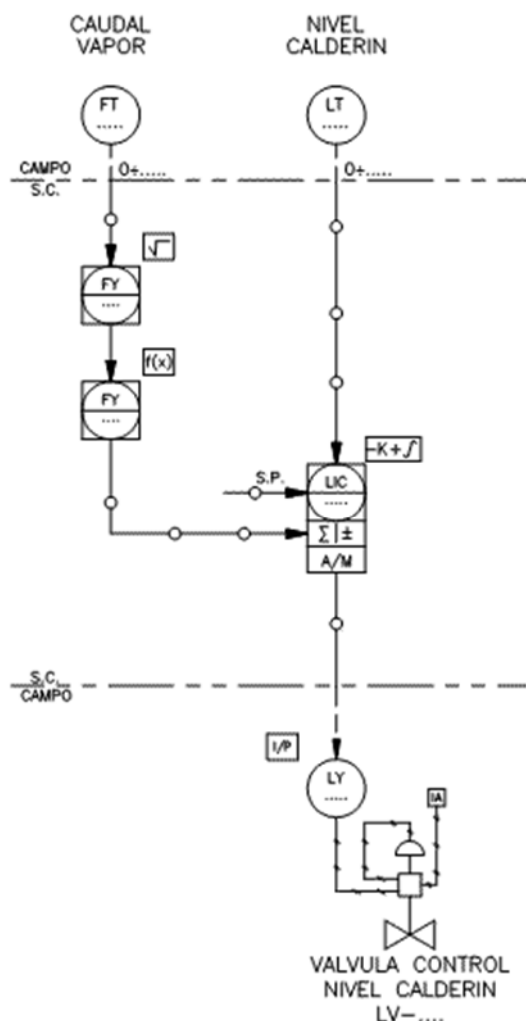


Figura 5. Control de nivel a dos elementos

Como hemos comentado ya, aunque este diseño cumple con la mayoría de los objetivos requeridos para un correcto control del agua de alimentación, tiene un gran inconveniente al no ser capaz de absorber las modificaciones en la presión de suministro. El efecto que la variación de la presión de suministro produce queda reflejado en la Figura 6. Esto conduce a que el nivel desarrolle una compensación para mantener la relación agua-vapor. Este tipo de control no es muy utilizado o está en desuso.

Cuando la presión en el agua de alimentación es variable, o existen otros motivos que hagan la relación entre la posición del elemento de control y el caudal aportado impredecible, es necesario usar un control a tres elementos.

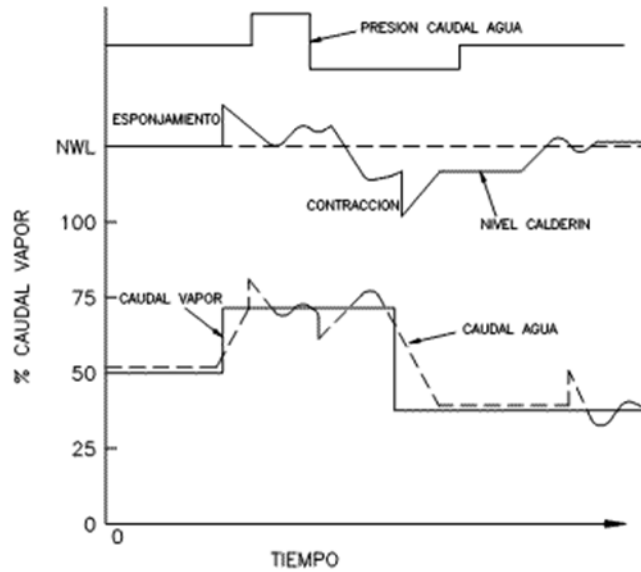


Figura 6. Efecto de la presión de suministro en dos elementos

**1.3.3 Control a tres elementos:**

Hemos visto que en el control a dos elementos se utilizaban el nivel y el caudal de vapor. Para conseguir un control de tres elementos añadiremos la medida del caudal de agua de alimentación. Con ello, solucionaremos los problemas planteados con anterioridad sobre la necesidad de repetitividad en el elemento final. Hay diversas formas de configurar un control a tres elementos. Aunque la más extendida es la mostrada en la Fig. 7, podemos ver otra alternativa en la Fig. 8.

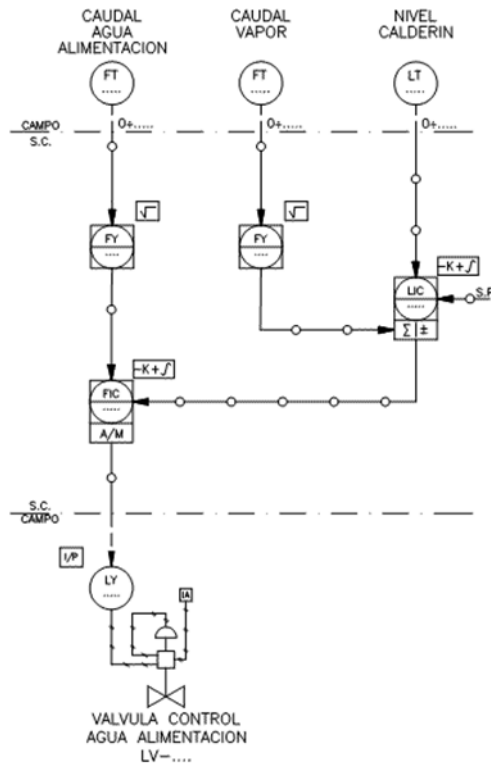


Figura 7. Control de nivel a tres elementos

Versión 1.1



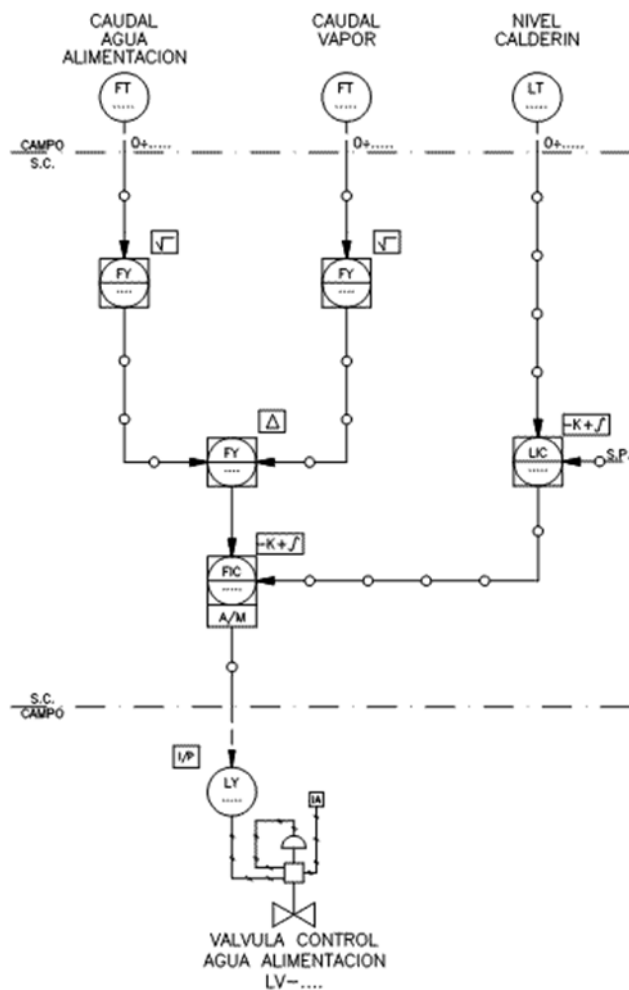


Figura 8. Alternativa de control a tres elementos

Las dos configuraciones vistas pueden presentar problemas a bajas cargas por las limitaciones de las medidas de caudal. Una solución muy extendida para este problema, es la conmutación del control de agua de alimentación de uno a tres elementos de forma automática a partir de un caudal mínimo de vapor que suele estar entorno al 20%, valor para el cual las medidas son más fiables (Figura 9).

Versión 1.1

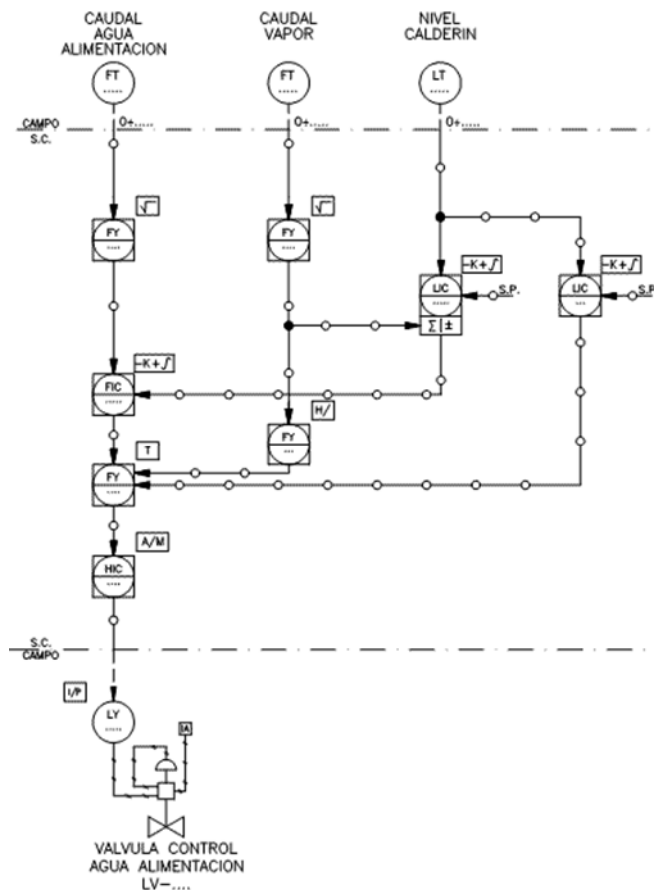


Figura 9. Control a uno y tres elementos

En el ajuste del lazo típico de tres elementos se siguen las pautas indicadas anteriormente en el de dos para el ajuste del regulador de nivel y el caudal de vapor. El ajuste del regulador de caudal se hace mediante el procedimiento habitual para cualquier lazo de este tipo.

Adecuadamente ajustado, el funcionamiento de un control de nivel a tres elementos debería tener una apariencia similar a la de la Figura 10.

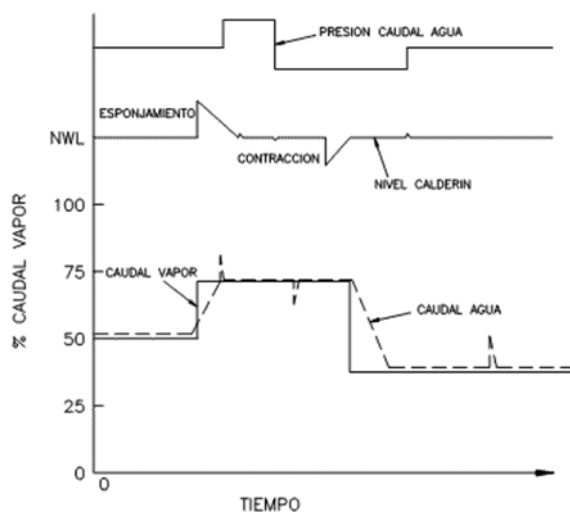


Figura 10. Respuesta de control de tres elementos

Versión 1.1

Como se observa, las variaciones en la presión del agua de alimentación son absorbidas por la acción del regulador secundario. Cuando estas variaciones sean de un rango tan importante que puedan complicar el ajuste de dicho regulador secundario, sería adecuado modificar la ganancia de éste en función de la presión del suministro para conseguir las mismas respuestas en caudal para las distintas condiciones de presión. Esto nos incluiría un cuarto elemento en el lazo como se muestra en la Figura 11.

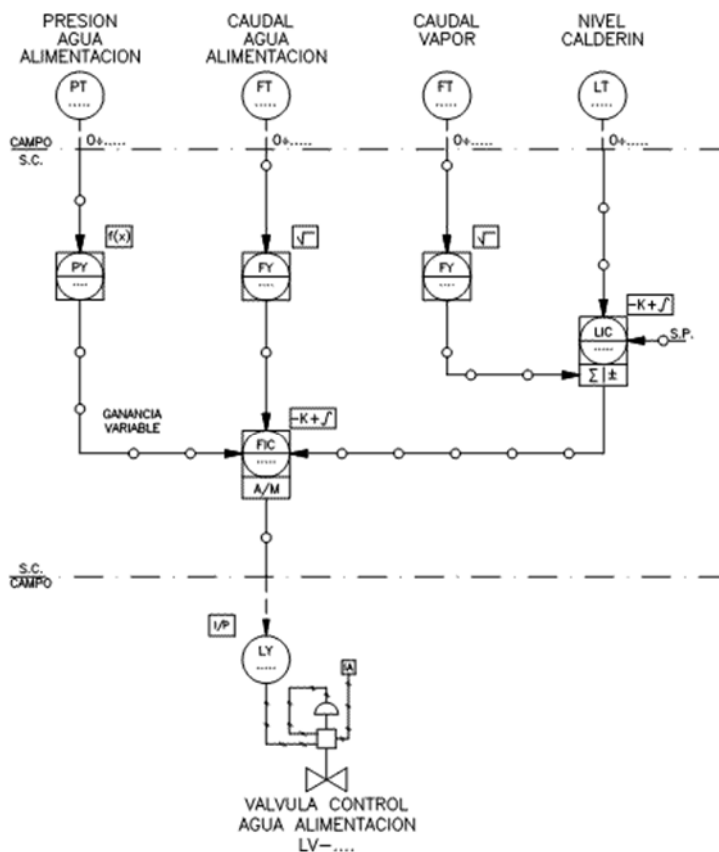


Figura 11. Ganancia variable por presión de suministro

Este tipo de lazo es conveniente implementarlo siempre y cuando no exista una presión constante en el suministro. Una forma de obviar este cuarto elemento de control sería mediante la implementación de un variador de frecuencia en las bombas de alimentación de agua que mantuvieran dicha presión de forma constante.

Otra posible causa para la utilización de un cuarto elemento en el lazo, es el caso en que la purga continua de la caldera pueda tener una magnitud relevante con relación al caudal de vapor. Este hecho generaría la introducción de un desajuste permanente en el regulador de nivel, que compensaría la desviación entre las medidas de caudal. Para evitarlo se introducirá el caudal de purga como se indica en la Figura 12.

Versión 1.1

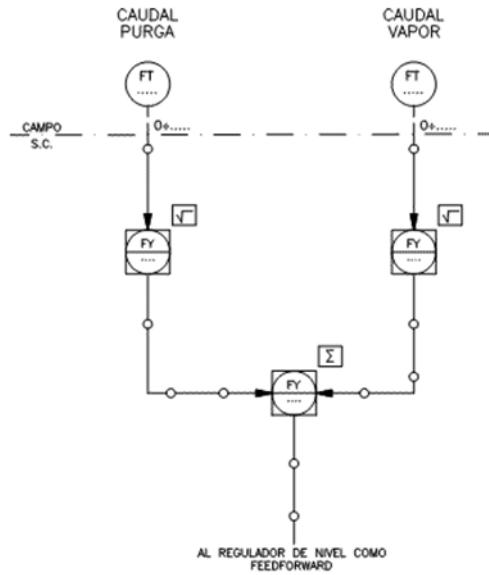


Figura 12. Inclusión del caudal de purgas

En calderas en las que los cambios de carga son muy rápidos, se puede afinar el equilibrio agua-vapor mediante el uso de la presión del calderín o caldera. El equilibrio agua-vapor que hemos visto, está basado en la medida de vapor principal que sale de la caldera. Esta medida no considera lógicamente el vapor generado o sustraído a la caldera, que contribuye al aumento o disminución de la presión. Sin embargo, la generación de este vapor conlleva un consumo de agua. Este vapor se puede indicar mediante la derivada de la presión del calderín como se muestra en la Figura 13.

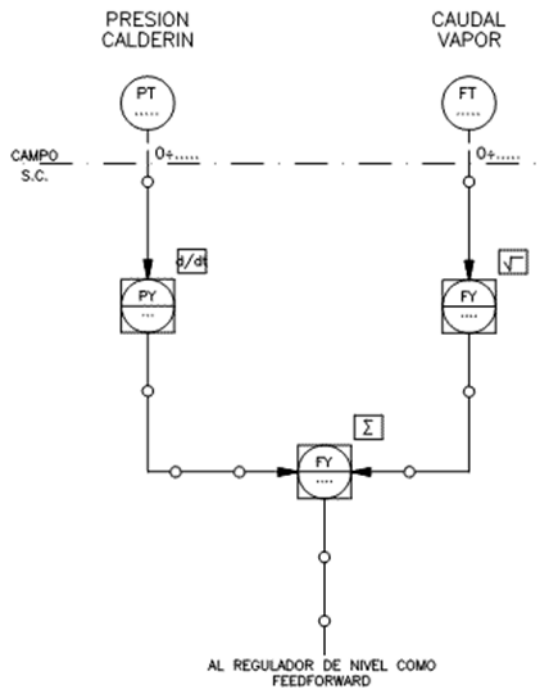


Figura 13. Alternativa a la medida del caudal de vapor

Versión 1.1

Una variación de este diseño se utilizará en el caso de que la caldera opere en presión deslizante o variable. La densidad del agua en el calderín varía con la variación de presión y por lo tanto la relación entre la derivada de la presión del calderín y el caudal de vapor expuesta anteriormente queda también modificada. Para tener esto en cuenta se puede multiplicar la derivada por el cuadrado de la presión de forma que la relación se mantiene para el rango de presión de operación, figura 14.

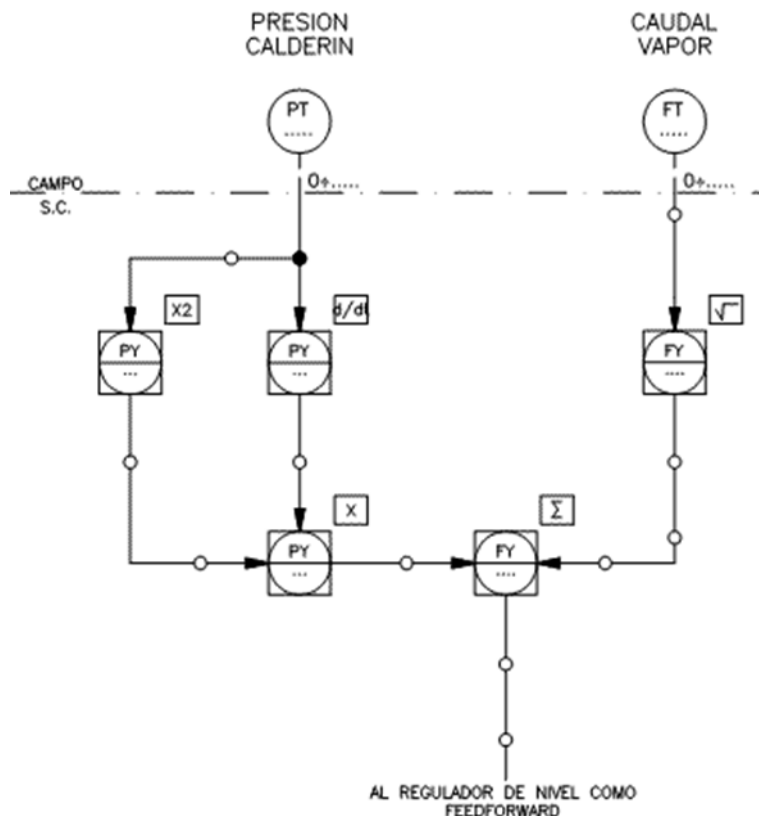


Figura 14. Alternativa para presión deslizante

La operación con presión variable también modifica la densidad de la mezcla agua vapor en circulación por la caldera. Dicha circunstancia puede modificar de forma notable el comportamiento de la caldera en cuanto a sus reacciones de esponjamiento y contracción, por lo que pudiera ser necesario el reajuste de la ganancia del controlador de nivel de acuerdo con la presión de operación.

**1.4 Conclusiones:**

Según todo lo visto anteriormente el sistema que mejor regula la alimentación de agua, de forma continua a una caldera, es mediante la utilización del control a tres elementos que es completamente válido para calderas de hasta 15 Tn/h de vapor. Si bien, el sistema de control a un elemento es válido para calderas de hasta 6 toneladas por hora de vapor, debemos de observar la forma y manera en que se demanda el vapor de la caldera. Dicho

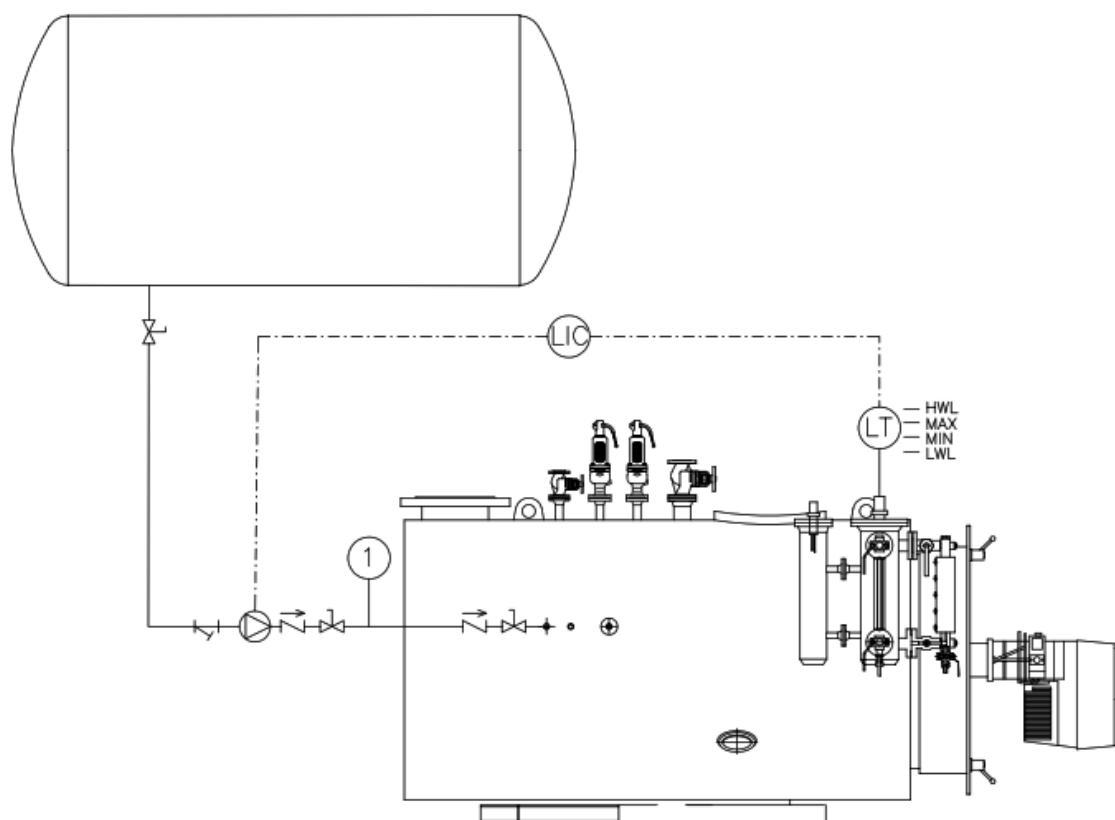
Versión 1.1

de otra forma, si la demanda del vapor presenta una curva con forma de dientes de sierra no tendremos más remedio que implementar un control a tres elementos. Para calderas por encima de las 15 toneladas por hora de vapor es imprescindible, o bien, implementar el cuarto control para rectificar las variaciones de presión del agua de suministro, o bien, implementar un variador de frecuencia que mantenga de forma constante dicha presión. En casos extraordinarios, como ya se ha visto, se podría implementar la variación en el control debido a un caudal de purgas constante.

En el caso de calderas acuotubulares con dos presiones de operación es necesario implementar el control para presión deslizante.

## 2 ESQUEMAS DE CONTROL

### 2.1 Control a un elemento



(1) Se puede añadir una válvula de control y sonda capacitiva para el control en continuo del nivel

Figura 15

Como se puede observar en la figura 15, el elemento de control es la bomba de alimentación de agua. Este es el sistema más simple de control y el nivel de agua puede ser realizado de forma discreta, o lo que tradicionalmente se denomina marcha-paro, o en continuo que en este último caso la bomba deja de ser el elemento de control y pasaría a ser una válvula de control. La variable a controlar es el nivel de agua de la caldera o calderín a saber:

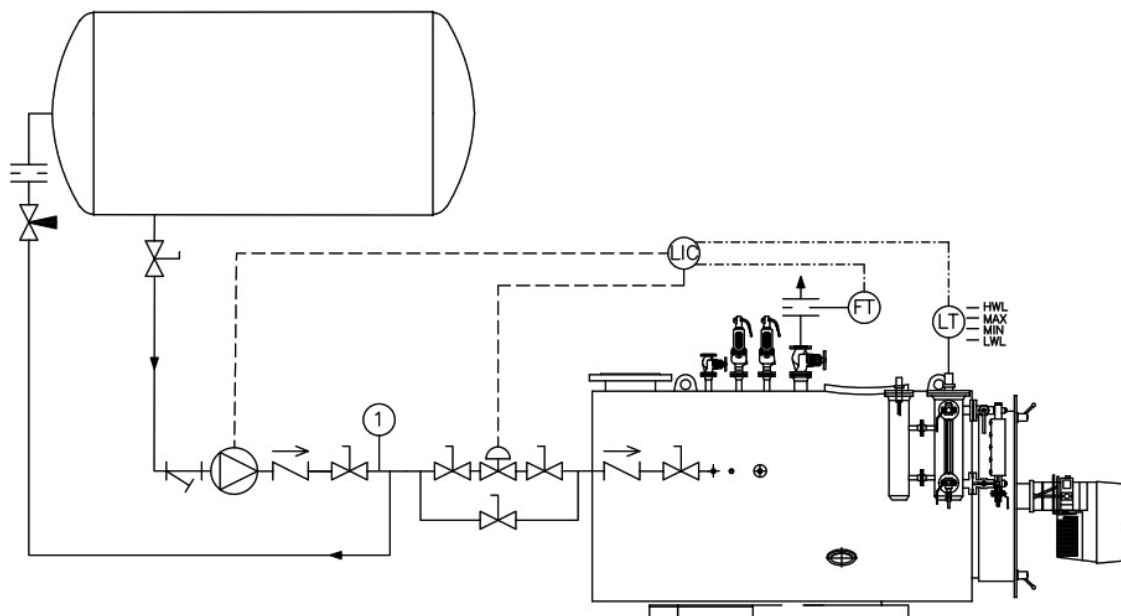
- LWL: nivel mínimo de agua de seguridad.
- MIN: es el punto de arranque de la bomba.
- MAX: es el punto de parada de la bomba.
- HWL: es el nivel máximo de agua de seguridad.

En el caso de ser la medición en continuo, como se comentó anteriormente, se añadiría un punto de control denominado "Set Point" (SP) o consigna de nivel.

Este tipo de control se emplea habitualmente en calderas pirotubulares de pequeña potencia. El uso o no de la válvula de control con una medición en

continuo del nivel dependerá de si la caldera lleva acoplado un economizador de gases de escape o la curva de demanda de vapor de la instalación es en dientes de sierra, lo cual hace obligatorio este tipo de sistema.

**2.2 Control a dos elementos.**



(1) Punto de inserción en caso de equipar economizador

Figura 16

En el esquema representado en la figura 16, podemos observar que el elemento de control es una válvula. Esto es debido a que la medición de nivel de agua es en continuo para que se ajuste correctamente a la otra variable que también se mide, la producción, o mejor la demanda de vapor. En este caso y al ser la medición en continuo tendremos los siguientes puntos a medir:

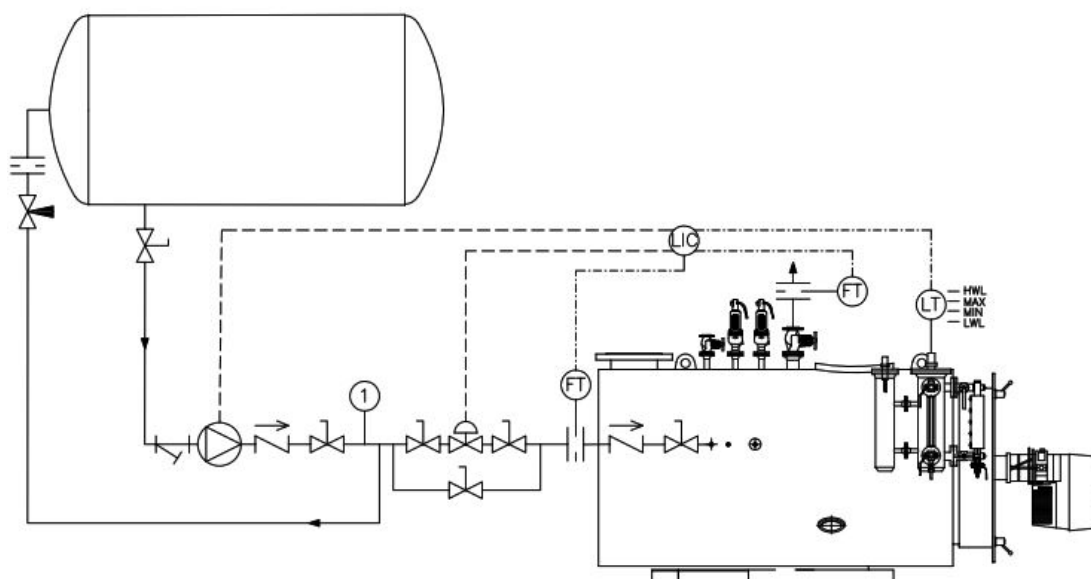
- LWL: nivel mínimo de agua de seguridad.
- MIN: es el punto de arranque de la bomba.
- MAX: es el punto de parada de la bomba.
- SP: "Set Point" o consigna de nivel.
- HWL: es el nivel máximo de agua de seguridad.

Este sistema es poco utilizado según lo anteriormente comentado y se sustituye actualmente por el sistema de control a tres elementos.

Versión 1.1



### 2.3 Control a tres elementos.



(1) Punto de inserción en caso de equipar economizador

Figura 17

Aquí representamos el esquema más adecuado para el control de una caldera de vapor pirotubular y el más empleado para producciones por encima de las 10 t/h. El control de nivel se mide en continuo y las variables a controlar son tres:

- Caudal de agua de aporte a caldera.
- Caudal de vapor instantáneo.
- Nivel de agua de la caldera o calderín.

En los sistemas con válvula de control se hace necesario implementar, aparte de dicha válvula, un sistema que, en caso del cierre completo de la válvula de control, alivie con un caudal mínimo de agua hacia el tanque de alimentación de agua dicho caudal para un correcto funcionamiento de las bombas y no provoquen su colapso y avería prematuros. Este sistema se compone de una válvula de aguja seguida de una placa de orificio que descargan al tanque de alimentación de agua. Este sistema regula el caudal mínimo requerido por la bomba y la placa de orificio provoca una gran contrapresión para evitar cavitación en la válvula de aguja. En algunas instalaciones las calderas utilizan, en vez del conjunto válvula de control, válvula de aguja y placa de orificio, una válvula de control de tres vías o un variador de frecuencia en las bombas. En el siguiente apartado expondremos por qué Sincal no recomienda la válvula de tres vías y, más adelante, explicaremos por qué no es adecuado utilizar un variador de frecuencia como elemento de control del caudal de agua.

## 2.4 Válvula de control.

Para Sincal, el elemento de control principal del caudal de agua de aporte a una caldera es la válvula de control del tipo de dos vías. Aunque, como ya se ha expuesto anteriormente, existen válvulas de tres vías para realizar la misma misión.

Las razones por las que Sincal recomienda la válvula de dos vías son las siguientes:

- La primera razón es que en la válvula de tres vías va a existir siempre un gran diferencial de presión, ya que la tercera vía actúa contra una presión en torno a 0 o 1 barg frente a la presión de la caldera. Esto va a provocar una cavitación interna en la válvula, es por esto por lo que montan jaulas anti cavitación, lo cual traerá consigo un desgaste y deterioro prematuro de la válvula además de ruidos constantes en la instalación. Evidentemente en la válvula de dos vías esto no sucede ya que quien sufre el efecto de la cavitación es la placa de orificio y es el elemento de desgaste del sistema siendo fácil, rápido y económico su sustitución. Si la válvula de tres vías hay que cambiarla el coste es mucho mayor que la placa de orificio.
- Como segunda razón, es la regulación propiamente dicha. La válvula de tres vías tiene mayor complejidad en la regulación no llegando a ser todo lo estable que se desea. Éste problema de regulación se agrava aún más conforme se va deteriorando la jaula de la tercera vía y, por ende, su orificio. En el caso de la válvula de dos vías se irá desgastando la placa de orificio, pero siempre tendremos el ajuste mediante la válvula de aguja manual.

Las válvulas de tres vías suelen llevar asociadas un actuador eléctrico en vez de neumático. El principal inconveniente del actuador eléctrico es la falta de seguridad inherente que tiene, esto es, ante un fallo eléctrico o de cualquier índole la válvula se queda en la posición en la que esté, siendo preocupante cuando la válvula se ha quedado en posición cerrada y no deja entrar agua de aporte. Puede llevar acarreado una falta de nivel de agua en caldera y llevarla al paro por nivel bajo de agua con todo lo que ello supone. En el caso del actuador neumático, ante cualquier fallo, la válvula retorna a “posición segura”, es decir, queda abierta y evita cualquier falta de agua en la caldera.

Otra ventaja del actuador neumático es que la velocidad de respuesta, desde la apertura al cierre y viceversa, está en torno a los 7-8 segundos frente a los 70 segundos del actuador eléctrico.

En definitiva, Sincal no recomienda instalar la válvula de tres vías.

## 2.5 Conclusiones.

Sincal recomienda montar el sistema de alimentación a caldera según la figura 15, en su opción discreta o “marcha-paro”, para calderas de pequeña potencia. Para potencias medianas o grandes se recomienda instalar dicho sistema, pero con la medición en continuo de nivel, válvula de dos vías, válvula de aguja y placa de orificio (Figura 18). Este último sistema, o alimentación continua de agua a un elemento, irá siempre montado cuando exista un economizador para evitar re vaporizaciones en el mismo y tenerlo constantemente refrigerado por un caudal mínimo de agua

Cuando tenemos calderas con producciones por encima de las 15 t/h es recomendable añadir un variador de frecuencia con el fin de evitar grandes diferenciales de presión, un ajuste óptimo de la curva presión-caudal de la bomba, y economizar en energía eléctrica. Como ya dijimos el variador nunca sustituye a la válvula de control, lo explicaremos con un ejemplo en el siguiente apartado.

Por último y, siempre que exista una demanda variable en el tiempo de forma brusca, la curva de demanda en diente de sierra, optaremos por instalar el esquema de la figura 17 (control a tres elementos) con las particularidades ya comentadas.

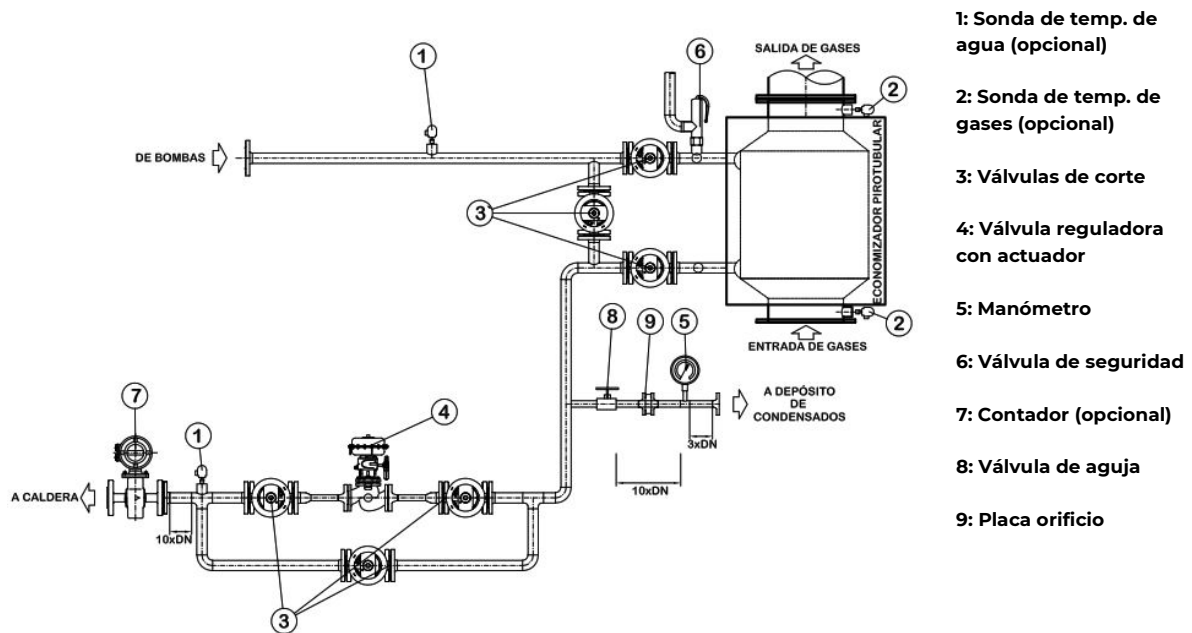


Figura 18

Versión 1.1

### 3 EJEMPLO 1

#### Alimentación continua caldera de vapor de 10 toneladas por hora a 10 Bar(G) de presión con economizador de agua.

Como ejemplo ilustrativo de todo lo anterior, expondremos el sistema de alimentación continua para una caldera de 10 toneladas a la hora de producción de vapor a una presión máxima de servicio de 10 Bar(G) con un economizador de agua.

Lo primero que elegimos es el modo de control. Para este caso utilizaremos un sistema de control a un elemento, suponiendo que la demanda de la caldera no es en diente de sierra y tiene una forma suave como mostramos a continuación:

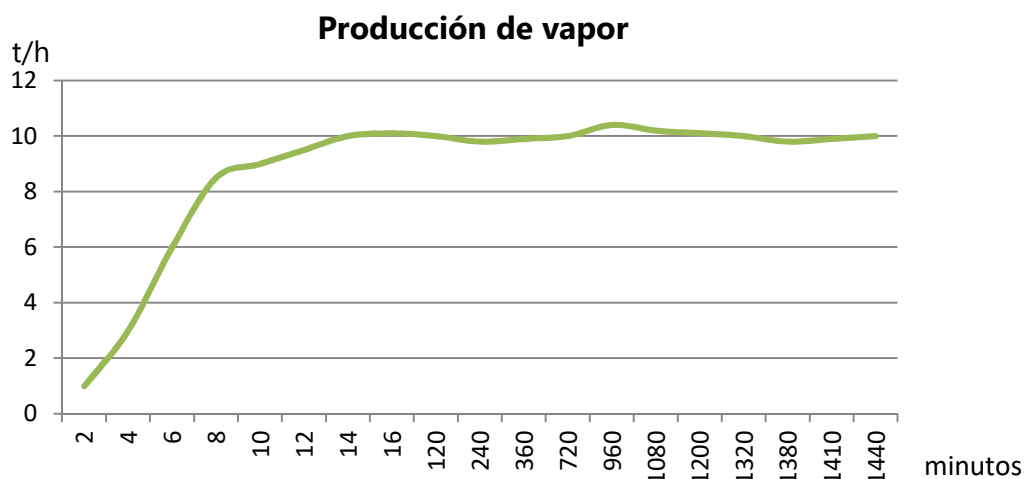


Figura 19

Vemos que, a lo largo de un día de trabajo, la caldera se mantiene en un punto constante de producción de vapor.

Como ya explicamos anteriormente, la variable de control será el nivel de agua en la caldera.

El lazo de control del sistema sería el indicado en la figura 20

Versión 1.1

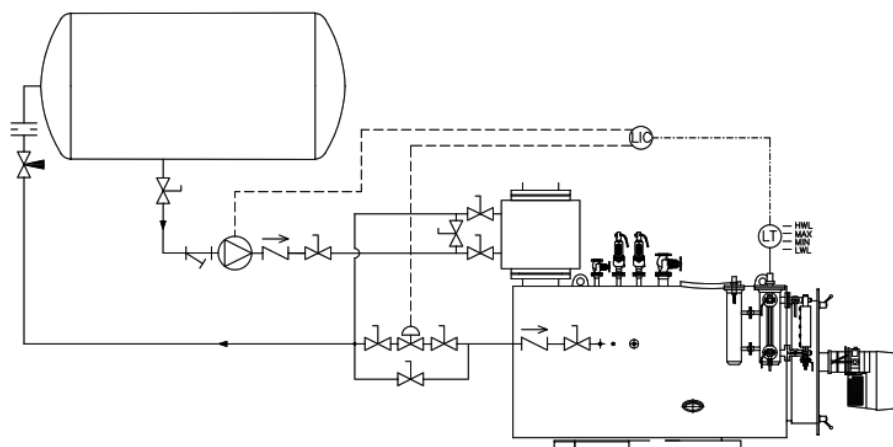


Figura 20

Como vemos, el sistema empleado es una válvula de control que será quien modifique el caudal de alimentación de agua a la caldera. Se puede observar que si la válvula de control está completamente cerrada el sistema seguiría funcionando aliviando todo el caudal a través de una placa de orificio y una válvula de aguja para regular el caudal exacto de este alivio. La mayor ventaja de este sistema es que el economizador estará siempre refrigerado y su operación, instalación y mantenimiento supone unos costes muy bajos. Al estar refrigerado el economizador conseguimos proteger los tubos de acero, que conforman los serpentines del mismo, ante altas temperaturas de los gases.

En la figura 21 se expone una curva de la bomba seleccionada para esta caldera y que sería la ideal para ella:

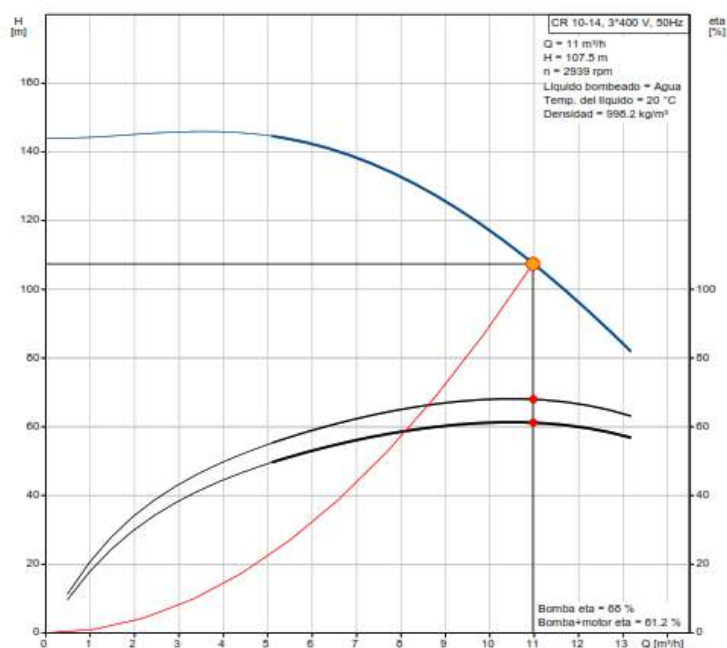


Figura 21

Versión 1.1

Con este método conseguimos el rango de regulación de caudal, en el agua, que tenga el equipo de combustión para la producción de calor.

En la figura 22 podemos observar lo que hace la válvula al abrirse, sentido de la flecha, y al cerrarse, sentido opuesto. Vemos que lo que modificamos con la válvula de control es la curva de la instalación y la de la bomba permanecerá intacta.

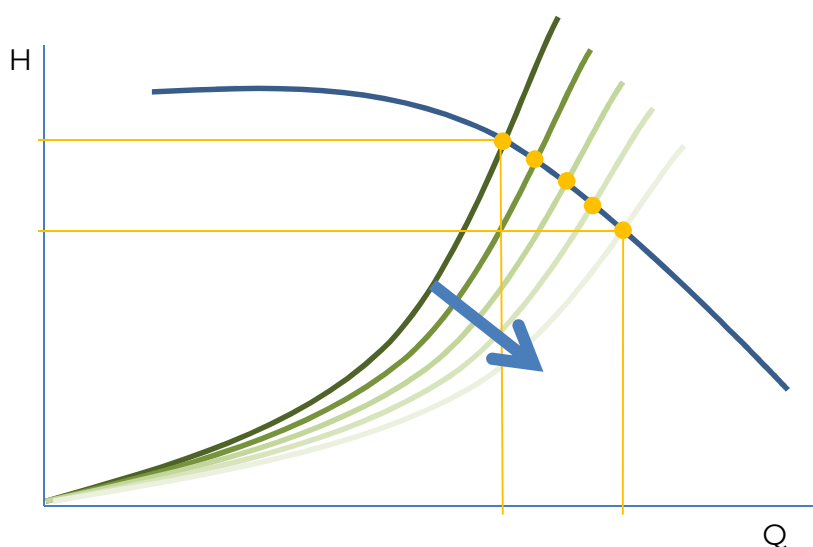


Figura 22: Curva presión-caudal utilizando válvula de control

Veamos el mismo ejemplo en la figura 23 eliminando la válvula de control sustituyéndolo por un variador de frecuencia, seguiríamos manteniendo la placa de orificio y la válvula de aguja con el fin de tener refrigerado el economizador de manera continuada.

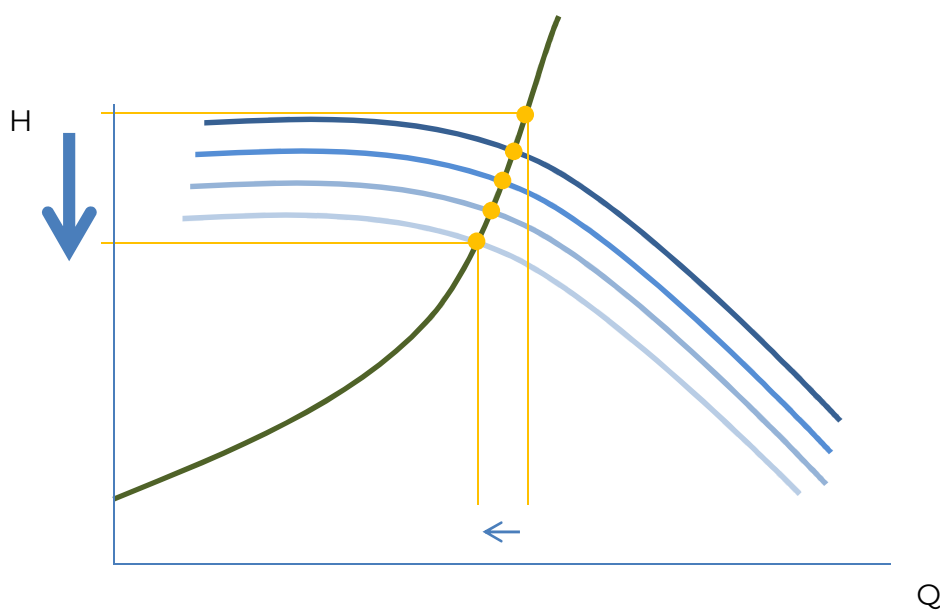


Figura 23: Curva presión-caudal utilizando variador

Versión 1.1

Aquí observamos que lo que modificamos, al utilizar el variador, es la curva de la bomba, pero la de la instalación permanece constante. En este caso, el rango de regulación de caudal, es muy pequeño respecto a la utilización con válvula de control. Esto es debido a que el variador, al modificar la velocidad de giro del motor de la bomba y, por ende, variará el caudal de forma lineal y la presión de forma cuadrática tal y como funcionan los equipos centrífugos, esto es, siguiendo la ley de semejanza de bombas que mostramos a continuación:

Variación de las revoluciones del motor según la frecuencia:

$$RPM_2 = [f_2 \times 60 \times (\frac{2}{N_p})] \times (1 - C_R) \text{ (revoluciones por minuto)}$$

Donde:

- RPM<sub>2</sub>: revoluciones por minuto del motor una vez variada la frecuencia del variador.
- N<sub>p</sub>: Número de polos del motor eléctrico.
- C<sub>R</sub>: Coeficiente de resbalamiento del motor eléctrico.
- f<sub>2</sub>: Nueva frecuencia respecto a la normal de 50 Hz.

Variación del caudal con las revoluciones del motor.

$$Q_2 = \frac{Q_1}{RPM_1/RPM_2} \text{ (Unidades de caudal)}$$

Donde:

- Q<sub>1</sub>: Caudal de trabajo a 50 Hz.
- Q<sub>2</sub>: Caudal de trabajo en la nueva frecuencia.
- RPM<sub>1</sub>: Revoluciones del motor a 50 Hz.
- RPM<sub>2</sub>: Revoluciones del motor a la nueva frecuencia.

Variación de la presión con las revoluciones del motor.

$$P_2 = \frac{P_1}{(RPM_1/RPM_2)^2} \text{ (unidades de presión)}$$

Donde:

- P<sub>1</sub>: Presión de trabajo a 50 Hz.
- P<sub>2</sub>: Presión de trabajo en la nueva frecuencia.
- RPM<sub>1</sub>: Revoluciones del motor a 50 Hz.
- RPM<sub>2</sub>: Revoluciones del motor a la nueva frecuencia.

Variación de la potencia eléctrica consumida con las revoluciones del motor.

$$PE_2 = \frac{PE_1}{(RPM_1/RPM_2)^3} \text{ (KW)}$$

Donde:

- PE<sub>1</sub>: Potencia eléctrica consumida de trabajo a 50 Hz.
- PE<sub>2</sub>: Potencia eléctrica consumida en la nueva frecuencia.
- RPM<sub>1</sub>: Revoluciones del motor a 50 Hz.
- RPM<sub>2</sub>: Revoluciones del motor a la nueva frecuencia.

Presentamos a continuación los resultados para el ejemplo en cuestión:

<b>CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR</b>	
Nº POLOS DEL MOTOR	4 (ver placa)
RESBALAMIENTO	3,660%
Velocidad de rotación (50 Hz)	1445,1
ajustar mediante coeficiente de resbalamiento para que sea igual al de la placa motor	
<b>PUNTO DE TRABAJO NOMINAL DE LA BOMBA EN LA INSTALACIÓN (A 50 Hz)</b>	
Cudal de trabajo	11 m <sup>3</sup> /h
Presión de trabajo	107,5 m.c.a.
Voltaje	400 VAC
Factor de potencia	0,8
Potencia consumida	5,5 kW
Corriente absorbida	9,92 A
<b>MODIFICACIÓN CURVA SEGÚN HERCIOS</b>	
Nueva frecuencia	48,2 Hz
Nueva velocidad	1393,0764 rpm
Caudal previsto	10,604 m <sup>3</sup> /h
Presión prevista	99,899 m.c.a.
Potencia consumida previsto	4,927 kW
Corriente absorbida prevista	8,89 A

Tabla 1

Se observa claramente que la bomba, disminuyendo solamente unos 2 Hz la frecuencia, ya no sería capaz de introducir agua en la caldera puesto que ésta trabaja a una presión de 10 barg. La consecuencia, si miramos lo que sucede con el caudal, es que la alimentación no es de forma continuada según requiera el equipo de combustión. Así, si la caldera trabaja con una producción de un 50%, necesitaríamos introducir sólo 5.000 l/h de agua y, como hemos visto con el variador, el mínimo caudal a introducir son unos 10.600 l/h. Por este motivo Sincal no recomienda el sistema de alimentación continua mediante el empleo únicamente del variador de frecuencia.

Versión 1.1



Por otro lado, si tenemos calderas con una producción de vapor por encima de las 15 t/h de vapor, ocurre que, al manejar caudales elevados, la presión en la entrada de agua de alimentación varíe excesivamente al utilizar sólo la válvula de control y es aquí cuando empleamos el variador de frecuencia para ajustar la presión y, entonces, la curva Presión-Caudal varía según la figura 24:

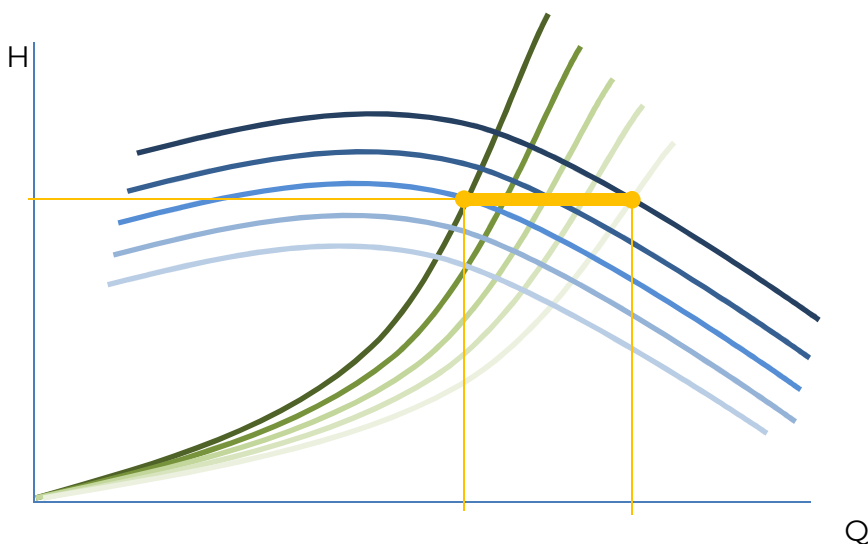


Figura 24: Curva presión-caudal utilizando válvula de control y variador

Con esto, para calderas de gran producción de vapor, logramos un ajuste equilibrado de la alimentación de agua a caldera.

## 4 EJEMPLO 2

### Alimentación continua caldera de vapor de 12 toneladas por hora a 15 Bar(G) de presión con economizador de agua.

En este ejemplo nos vamos a centrar en la eficiencia térmica que tenemos con el sistema de alimentación continua empleado por Sincal. A diferencia de otros fabricantes, Sincal, sitúa la válvula de control después del economizador por razones de protección del mismo, tal y como ya se ha comentado y se muestra en la figura 18. Como se ha comentado, otros fabricantes, sitúan la válvula de control antes del economizador esgrimiendo argumentos de mayor recuperación de calor porque se hace pasar el caudal de agua que necesita la caldera en relación al caudal de gases que pasa por el mismo, veamos si esto es cierto.

En primer lugar, procedemos a simular la caldera con economizador con la válvula de control situada aguas arriba del economizador, recordemos que esto nos quita la ventaja de tener el economizador siempre refrigerado. El caudal de agua de aporte que pasa por el economizador será igual al vapor producido por la caldera, en este caso será de 12.000 litros por hora a plena carga e irá disminuyendo conforme baja la carga de la caldera. La temperatura del agua de alimentación se considera constante a 80°C.

A continuación, representamos la gráfica potencia recuperada en el economizador versus carga de la caldera:

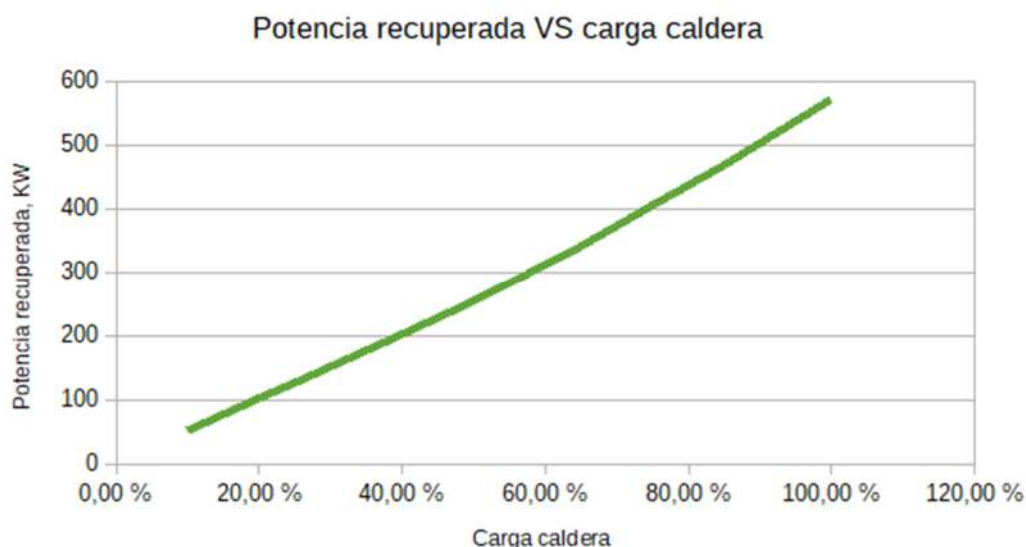


Figura 25: Curva Carga Caldera VS Potencia recuperada economizador, caso Otros

Se puede observar que para el 100% de carga de la caldera recuperamos 570 kW y para el 10% recuperamos 52 KW.

Ahora vamos a ver qué sucede con dicha recuperación si colocamos la válvula de control aguas abajo del economizador con el conjunto placa de orificio y válvula de aguja intercalado entre eco y válvula, tal y como lo planteamos desde Sincal. Hay que tener en cuenta un dato importante, en este caso, siempre va a existir un caudal mínimo de circulación de agua por el economizador que variará en función de la carga de la caldera. Para el caso que nos ocupa el caudal que se trasiega por el economizador varía desde los 16.850 litros por hora a plena carga hasta los 5.380 litros por hora para el 10% de carga. Veámoslo en una gráfica cómo queda la recuperación:

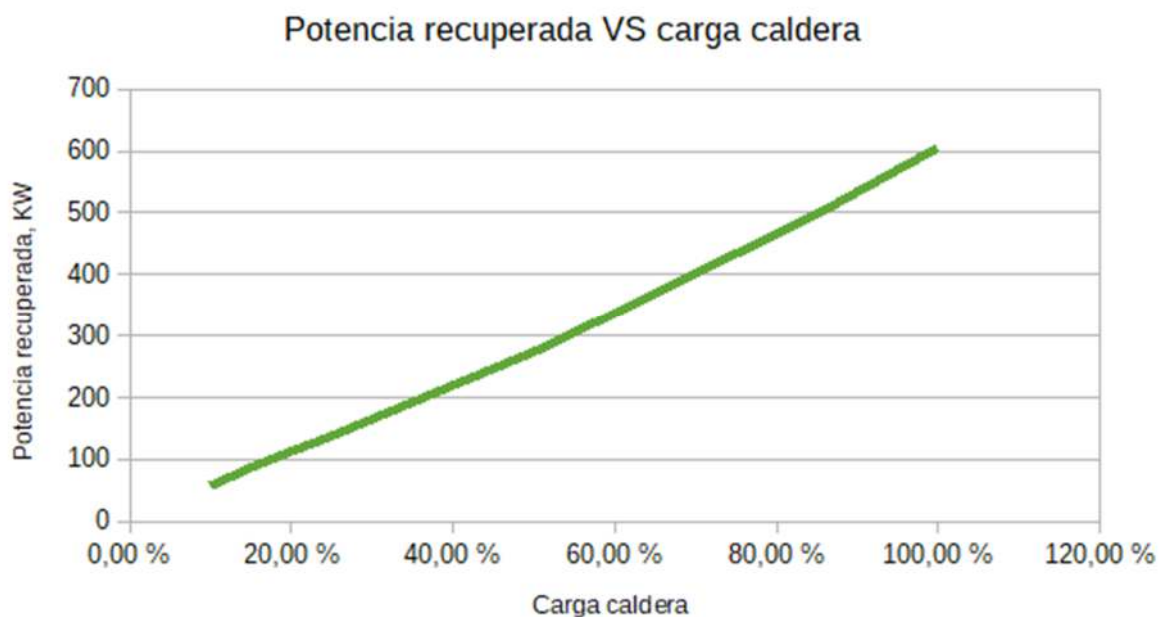


Figura 26: Curva Carga Caldera VS Potencia recuperada economizador, caso Sincal

Se puede observar que para el 100% de carga de la caldera recuperamos 604 kW y para el 10% recuperamos 57 KW.

Vemos que la diferencia de recuperación en un caso y otro varía muy poco, es más, es ventajoso en el caso de Sincal.

**Conclusión.**

Siempre tenemos que tener en cuenta que la transferencia de calor en un economizador es, conceptualmente hablando, un intercambiador de flujos cruzados a contracorriente del tipo agua-gas, y que, el coeficiente global de transferencia viene dado por el coeficiente de transferencia del lado del gas y no del agua, por esto, decidimos situar la válvula de control aguas abajo del economizador, además de tener la ventaja de tener el economizador protegido ante la falta de refrigeración.

Queremos hacer hincapié, que nuestro sistema aumenta el rendimiento de la caldera en un 0.25% con respecto a los demás sistemas. Si bien es cierto, el agua del depósito de alimentación a caldera se incrementa en torno a 10-15°C por encima del que realmente debe tener en otras situaciones. Puede ser o no perjudicial para las bombas. Una propuesta que Sincal hace para tener protegida las bombas contra sobre-temperaturas y tener el mejor sistema de recuperación energética es instalar un desgasificador del tipo térmico con el que logramos la máxima recuperación de energía.

Versión 1.1

## 5 CONCLUSIONES

- A la hora de hacer alimentación continua de agua recomendamos utilizar siempre válvula de control de dos vías, con el sistema de alivio o caudal mínimo de bombas correspondiente.
- En calderas con un caudal superior a 15 t/h se recomienda el uso de variador de frecuencia en la bomba para equilibrar la curva Presión-Caudal. También obtenemos un ahorro energético a nivel eléctrico.
- No recomendamos utilizar una válvula de control de tres vías.
- Recomendamos utilizar el sistema de alimentación continuada de agua en calderas con producciones superiores a 2 Tn/h.
- Emplear un control a tres elementos siempre y cuando se prevea que la demanda de vapor tenga una forma en dientes de sierra, es decir, no sea constante en el tiempo y, además, exista la posibilidad de cambios súbitos en dicha demanda.

## 6 LEYENDA

	<b>VÁLVULA DE CORTE</b>
	<b>VÁLVULA DE RETENCIÓN</b>
	<b>FILTRO</b>
	<b>VÁLVULA DE CONTROL</b>
	<b>PLACA ORIFICIO</b>
	<b>VÁLVULA DE AGUJA</b>
	<b>CAUDALÍMETRO</b>
	<b>SONDA DE NIVEL</b>
	<b>CONTROLADOR DE NIVEL</b>

S.C.: Sala de caldera

Resto de diagramas según norma ANSI/ISA-S5

Ejemplos:

PT: Transmisor de presión

LIC: Controlador de nivel integrado

FT: Caudalímetro

**HUGO ALBERTO SIERRA GARCÍA**

*DIRECTOR TECNICO de SINCAL*

Versión 1.1