



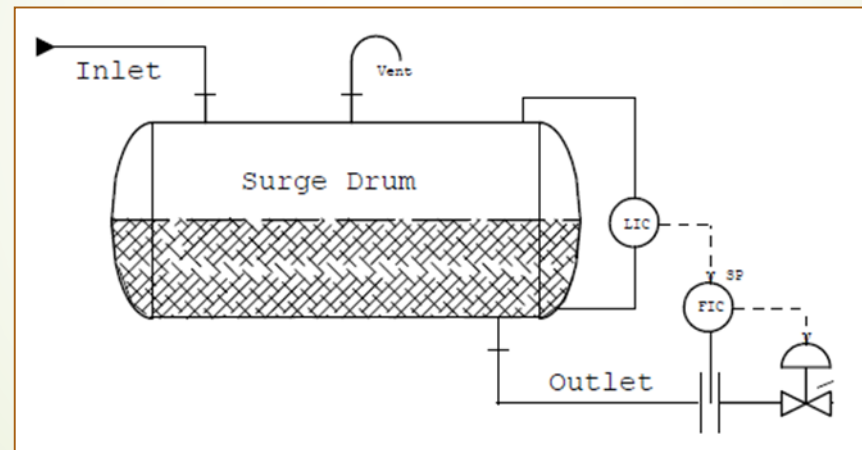
BLOQUE III. APLICACIONES DEL CONTROL EN EQUIPOS INDUSTRIALES RELACIONADOS CON LA INGENIERÍA AMBIENTAL

TEMA 7: CONTROL DE RECIPIENTES, BOMBAS Y COMPRESORES

1. CONTROL DE NIVEL EN RECIPIENTES

I.A. Surge drum (Recipiente de alimentación) →

- Mantener suficiente inventario para alimentar el proceso → Alimentación constante a la planta.
- Mantener suficiente capacidad vacía de continuar recibiendo alimentación en caso de parada de la planta/unidad (tanque de almacenamiento intermedio)
- **Parámetros a controlar:** nivel (válvula entrada y salida). Si se desea una flujo de alimentación constante aguas abajo, se emplea control el cascada, nivel y caudal.

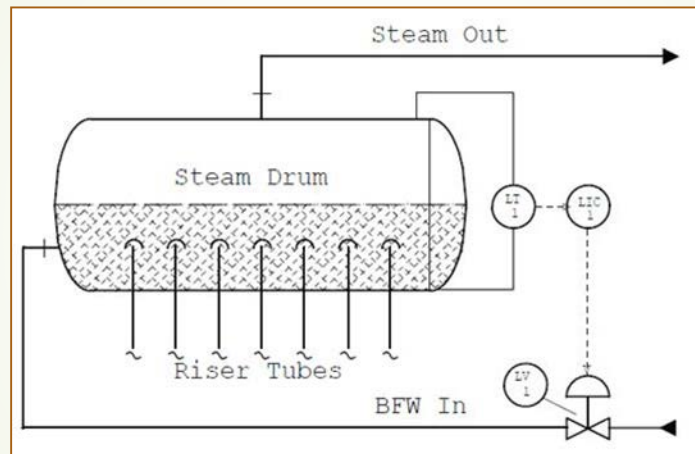


1. CONTROL DE NIVEL EN RECIPIENTES

I.B. Steam drum (Acumulador de vapor)

Un acumulador de vapor es una aplicación que actúa como reserva de energía en forma de vapor. En este tipo de recipientes el agua baja por las tuberías y se calienta. Por otras, sube una mezcla líquido vapor (Risers) y en el recipiente se separan.

a) Control univariable: nivel de líquido.



- **Control Inverso.** Si sube el nivel, la válvula del agua de alimentación cierra.
- **Problemas de estabilidad.** Ante un aumento de la demanda de vapor, disminuye la presión, las burbujas en el recipiente crecen y sube el nivel. La válvula se cierra. Cuando las burbujas rompen el nivel baja y la válvula ha de abrir.
- Steam drum de pequeño tamaño

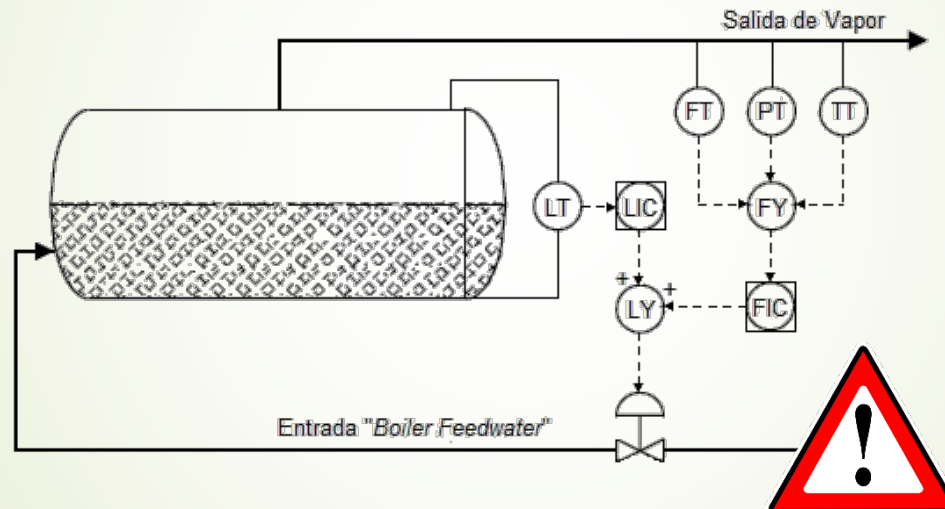
1. CONTROL DE NIVEL EN RECIPIENTES

I.B. Steam drum (Acumulador de vapor) →

Reserva de energía en forma de vapor

b) Control multivariable: caudal de vapor y nivel de líquido (control feedback-feedforward).

A la señal obtenida en el control de nivel (feedback) se le suma la del control del caudal de la salida de vapor (feedforward). Ya que la demanda de vapor es dinámica, este sistema detectará y actuará sobre cambios en la demanda de vapor sin que esto afecte al nivel.



INCONVENIENTES:

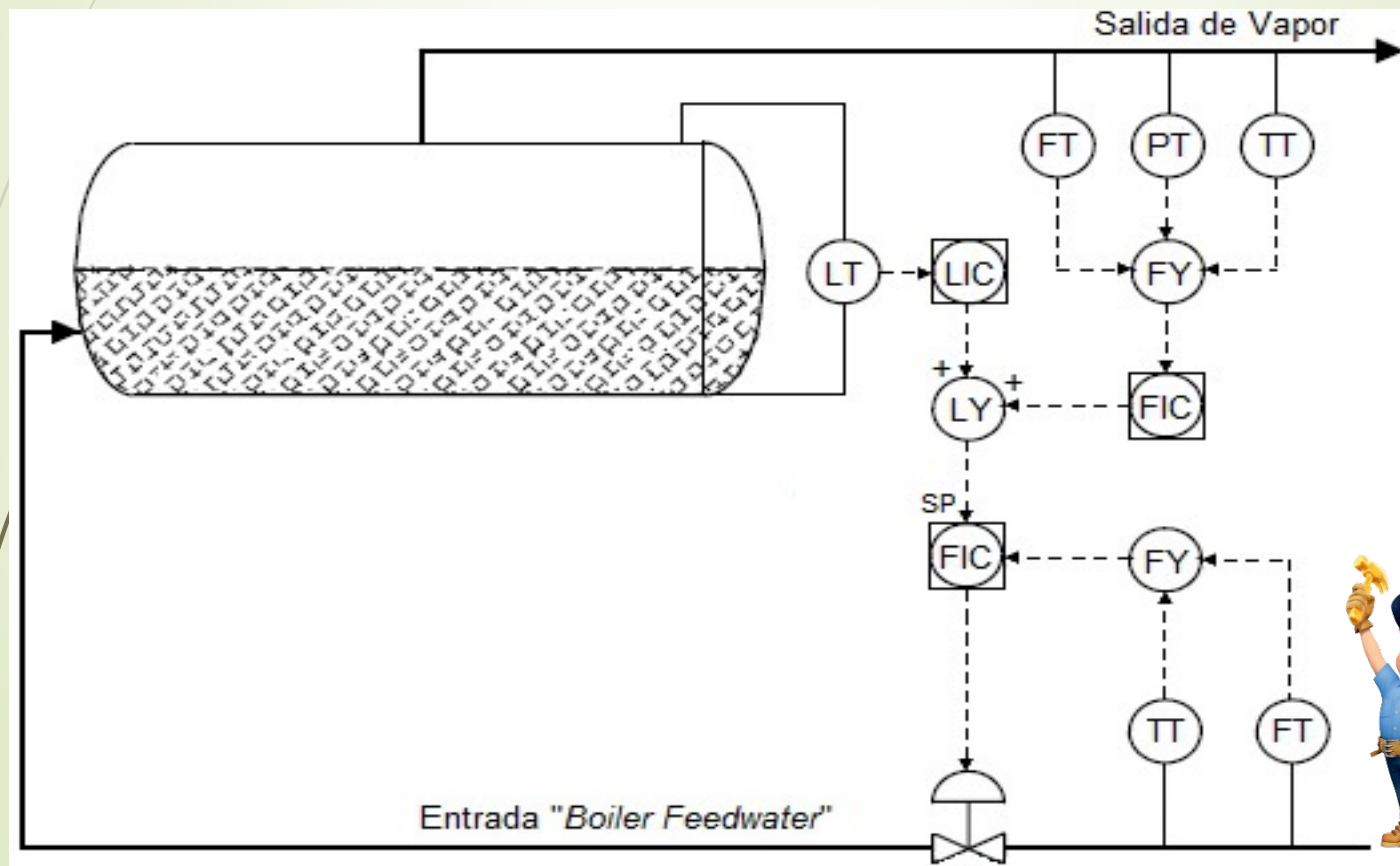
No tiene en cuenta las posibles variaciones tanto en el caudal como en la temperatura del agua de suministro, lo que podría afectar tanto a la cantidad de vapor acumulada como a su calidad.

1. CONTROL DE NIVEL EN RECIPIENTES

I.B. Steam drum (Acumulador de vapor) →

Reserva de energía en forma de vapor

b) Control multivariable: caudal de vapor, nivel de líquido (control feedback-feedforward) y caudal de agua de alimentación (control en cascada).

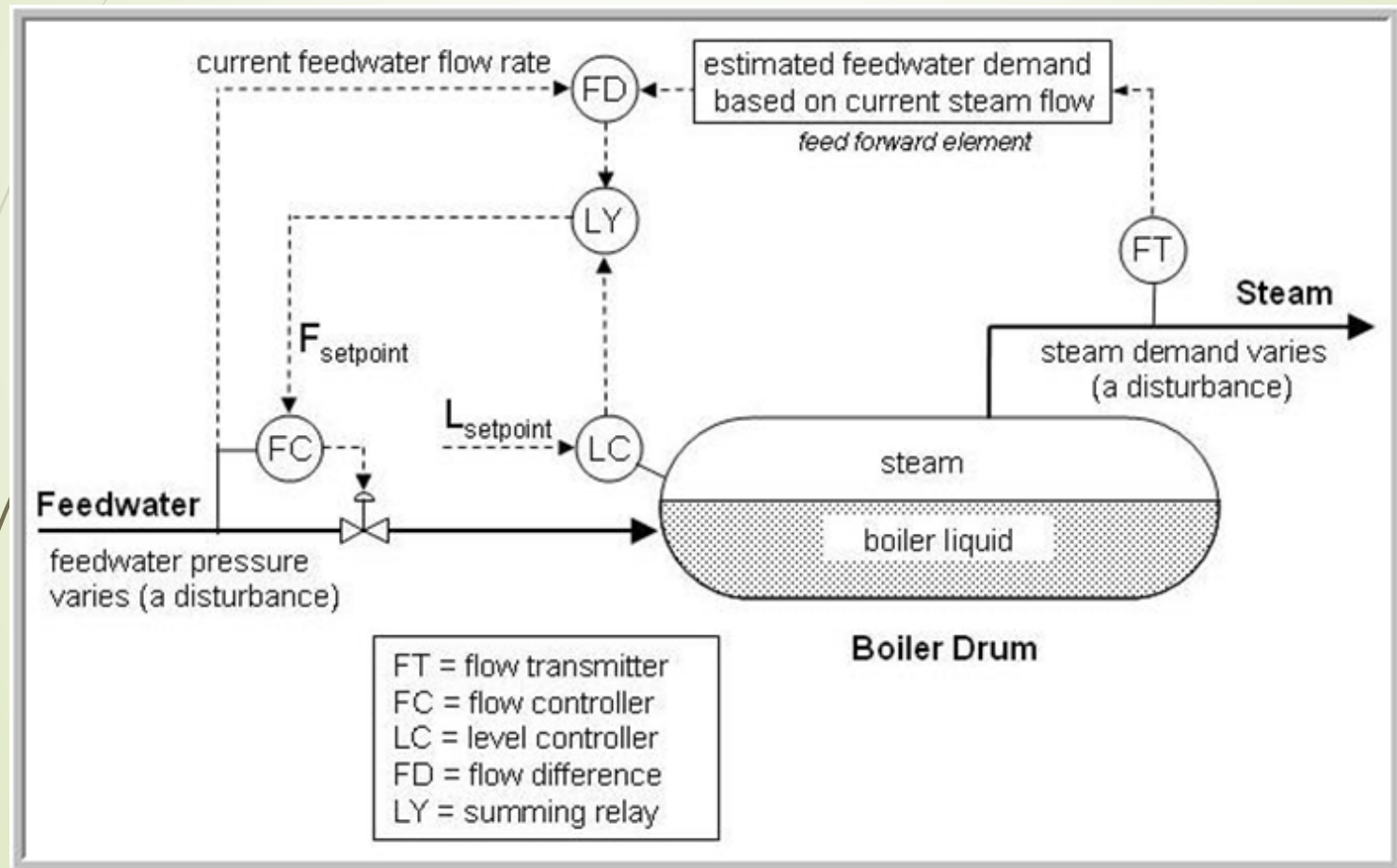


1. CONTROL DE NIVEL EN RECIPIENTES

I.B. Steam drum (Acumulador de vapor) →

Reserva de energía en forma de vapor

b) Control multivariable: caudal de vapor, nivel de líquido (control feedback-feedforward) y caudal de agua de alimentación (control en cascada).

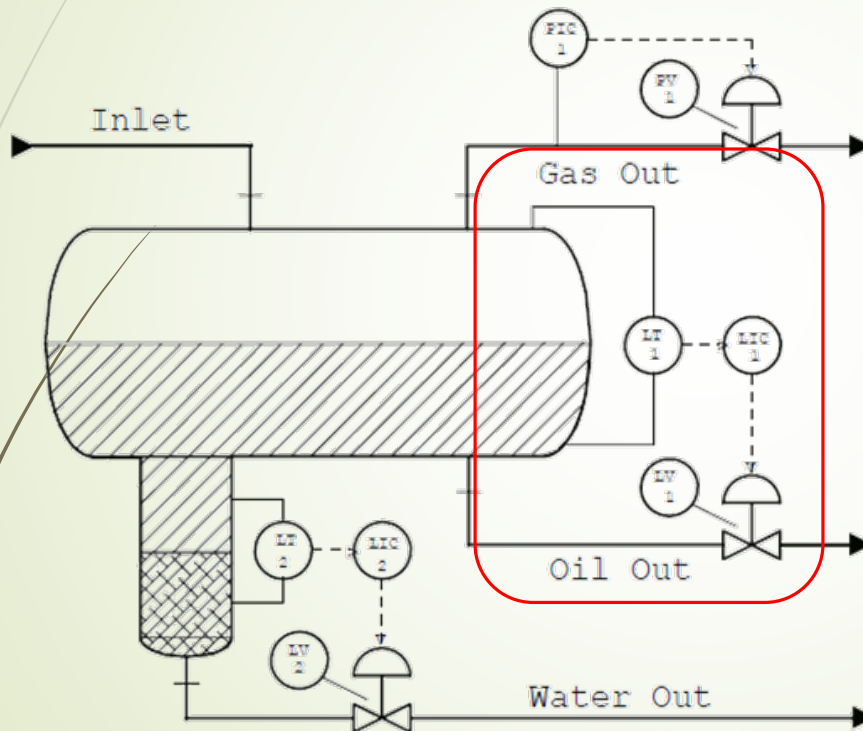


1. CONTROL DE NIVEL EN RECIPIENTES

I.C. Control de sistemas con una o dos fases: Separadores

- Generalmente, se asume que el control de nivel se refiere al control de la interfase entre un gas (o vapor) y un líquido. También se puede controlar la interfase entre dos líquidos inmiscibles tales como aceite y agua.
- **Tanque de alimentación de equipos aguas abajo**

EJEMPLO: Separador de crudo



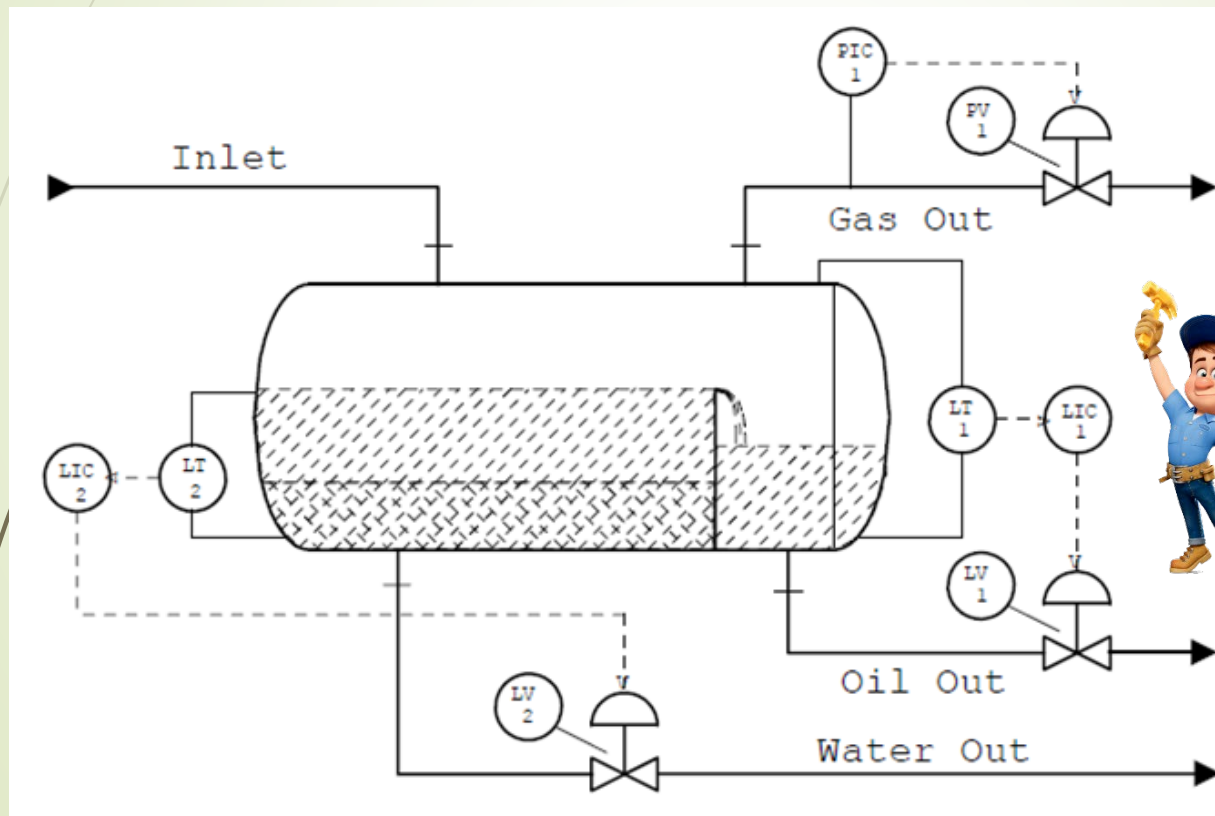
Cada fase se controla individualmente. Para minimizar oscilaciones en la fase orgánica, se puede poner en cascada con un lazo de caudal

No es necesario un lazo en cascada para la fase acuosa ya que normalmente suele purgarse.

1. CONTROL DE NIVEL EN RECIPIENTES

I.C. Control de sistemas con una o dos fases: Separadores

Si la proporción de fase acuosa es demasiado grande, en vez de emplear un separador de bota (como el mostrado en la figura superior) se emplean recipientes con tabiques deflectores.



Opción de lazo en cascada con el caudal

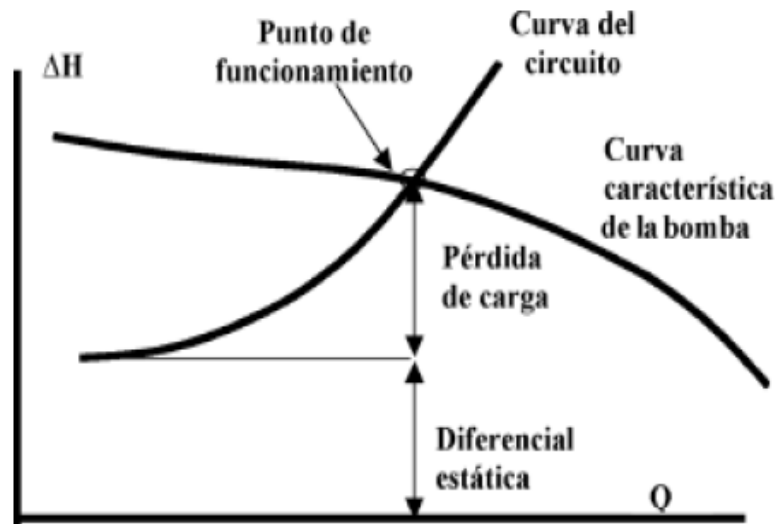
2. CONTROL DE BOMBAS

La principal función de las bombas es la de desplazar líquidos de un lugar a otro, mediante el suministro de energía a estos: impulsión del fluido a una cota más alta o impulsión de un fluido a lo largo de una tubería.

1. **Bombas centrífugas.** Se caracterizan porque su caudal varía con la presión diferencial.
2. **Bombas de desplazamiento positivo.** (rotativas y alternativas) se caracterizan por bombear un volumen fijo por cada vuelta del motor, con independencia de cuál sea la presión de descarga.

2.A. Bombas centrífugas

Curvas características de la bomba y del circuito

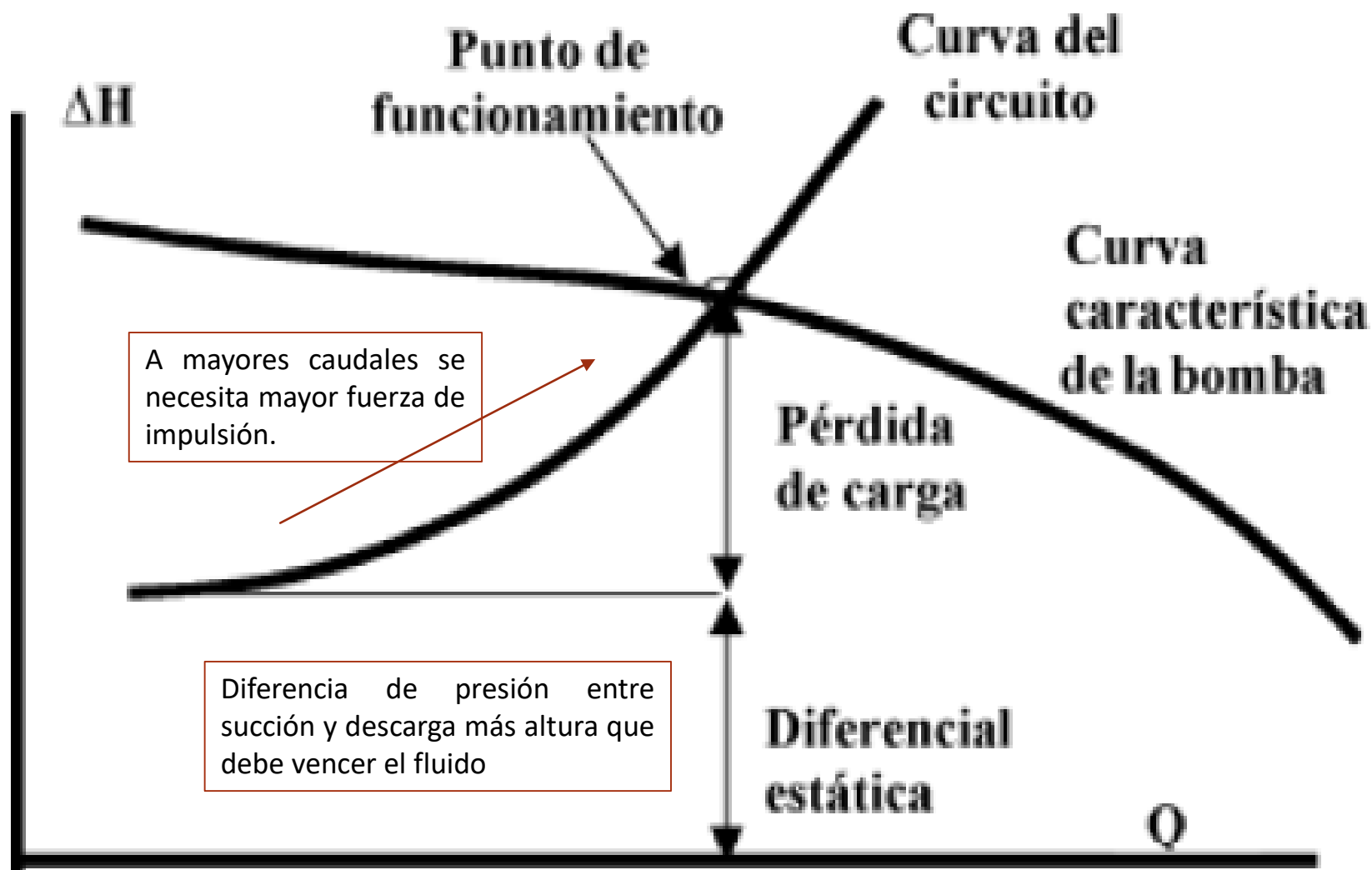


La altura de presión (H) de una bomba es el trabajo mecánico útil transmitido por la bomba al líquido bombeado. En el eje vertical se muestra la altura de presión H en metros (m). En el eje horizontal, la abscisa, está dividida en unidades del caudal Q de la bomba.

Objetivo del control de bombas se centra en que el punto de operación sea el requerido en cada momento por el sistema.

2. CONTROL DE BOMBAS

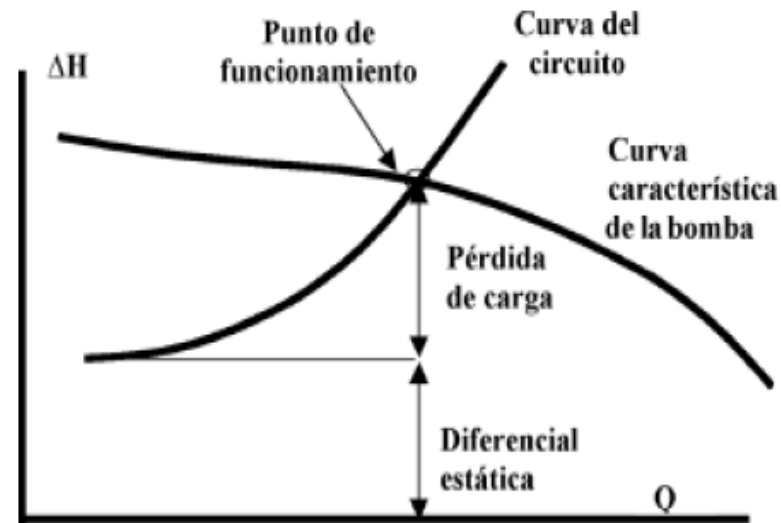
Curvas características de la bomba y del circuito



2. CONTROL DE BOMBAS

- La curva característica de una bomba proporciona una determinada diferencia de presión en función de un caudal para una determinada velocidad de giro de rodete.
- Para cada velocidad de giro, existe una determinada curva característica.
- Si la velocidad no se puede variar se debe implementar un sistema de control que permita operar en el punto de operación.
- Debido a que las variables Q - ΔH son dependientes, solo se podrá controlar una de ellas. Lo mas habitual es el caudal.

Curvas características de la bomba y del circuito

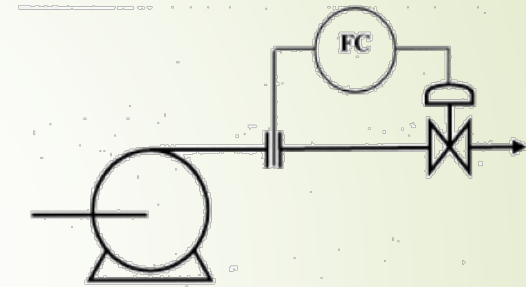


2. CONTROL DE BOMBAS

2.A. Bombas centrífugas

1) Estrangular la descarga: Método más apropiado.

Se trata de suplementar la diferencia de presión del sistema necesaria para colocar el punto de funcionamiento en el deseado, modificando la curva del circuito.



¿NPSH Disponible?



Si se modifica el grado de apertura de la válvula, se modificará la pérdida de carga del sistema, por lo que se modificará el punto de operación de la bomba, lo que conlleva diferentes caudales y presiones de operación.

NUNCA deberán instalarse válvulas de control en la aspiración de una bomba centrífuga. Podría provocar un descenso tan grande la presión por pérdida de carga que podría favorecer estos procesos de cavitación.

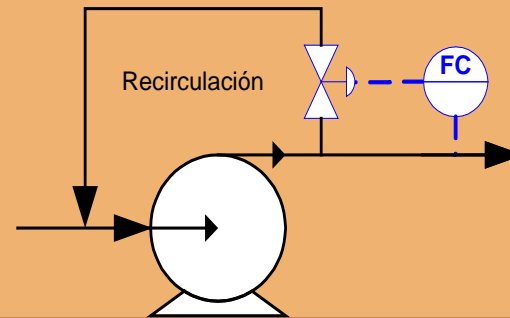
2. CONTROL DE BOMBAS

2.A. Bombas centrífugas

II) Control por Recirculación

Control del caudal se puede controlar recirculando el exceso → bomba de mayor tamaño y mayor consumo energético.

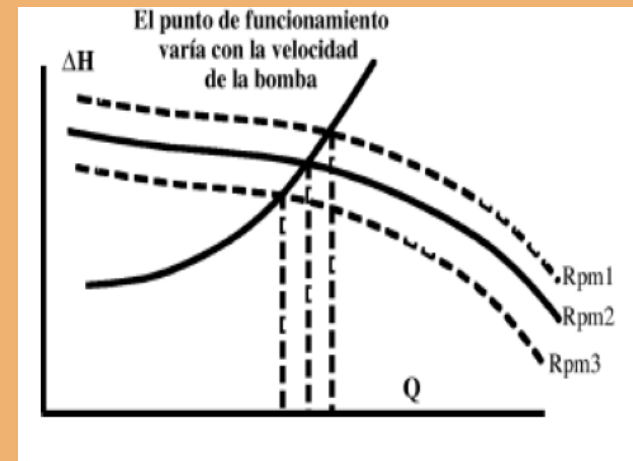
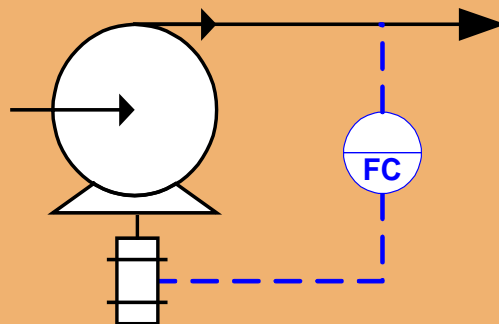
No funciona bien a caudales bajos.



III) Motor con variador de velocidad

Si la velocidad varía, se produce un desplazamiento de la curva y, por tanto, del punto de funcionamiento. Sólo se consume la potencia necesaria. Compensa para bombas de elevada potencia.

Control de velocidad



2. CONTROL DE BOMBAS

2.A. Bombas centrífugas

V) Control de Caudal mínimo:

Eficacia bomba $< 100\%$. La diferencia entre la potencia mecánica absorbida por la bomba y la potencia hidráulica se convierte fundamentalmente en calor. Importante en bombas de gran tamaño.

Dependiendo del proceso, puede requerirse un **Caudal mínimo de operación**, por debajo del cual la refrigeración sería insuficiente y T subiría hasta llegar a cavitación o a T inaceptables para alguno de sus componentes.

Para garantizar el caudal mínimo se emplea normalmente un reciclo. El caudal de reciclo suele enviarse a un recipiente situado aguas arriba de la aspiración de la bomba, con el objeto de eliminar los posibles efectos de calentamiento que se producen sobre el fluido impulsado.

También se suele fijar un caudal mínimo de las bombas por eficacia mecánica. El fabricante de la bomba determina el punto de máxima eficiencia (**BEP**) → Al alejarse de este, aumentan las vibraciones y los problemas mecánicos. → Q_{MINIMO} : 15 al 50% del BEP.

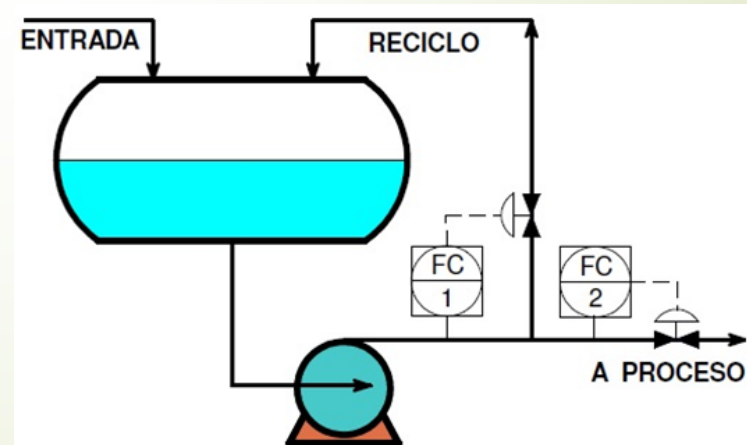
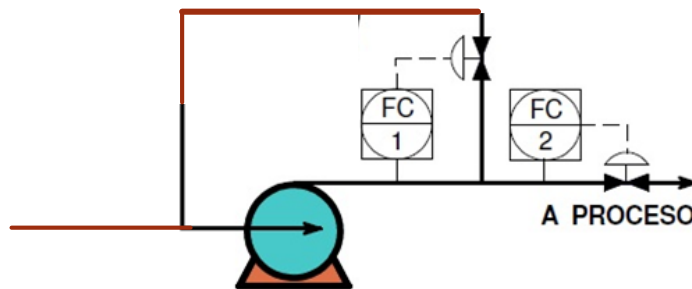
2. CONTROL DE BOMBAS

2.A. Bombas centrífugas

V) Control de Caudal mínimo:

Válvula de control en la línea de descarga → añadir una línea de recirculación que devuelva a la succión parte del caudal de descarga.

El caudal de proceso se controla con el lazo de caudal FC2. El lazo de control del reciclo (FC1) mediría el caudal total en impulsión y actuaría sobre la válvula del reciclo. Si el caudal en la impulsión es mayor del mínimo exigido se mantendrá la válvula del reciclo cerrada, mientras que si la demanda de caudal es menor al caudal mínimo, se abrirá lo justo para alcanzar dicho caudal.



2. CONTROL DE BOMBAS

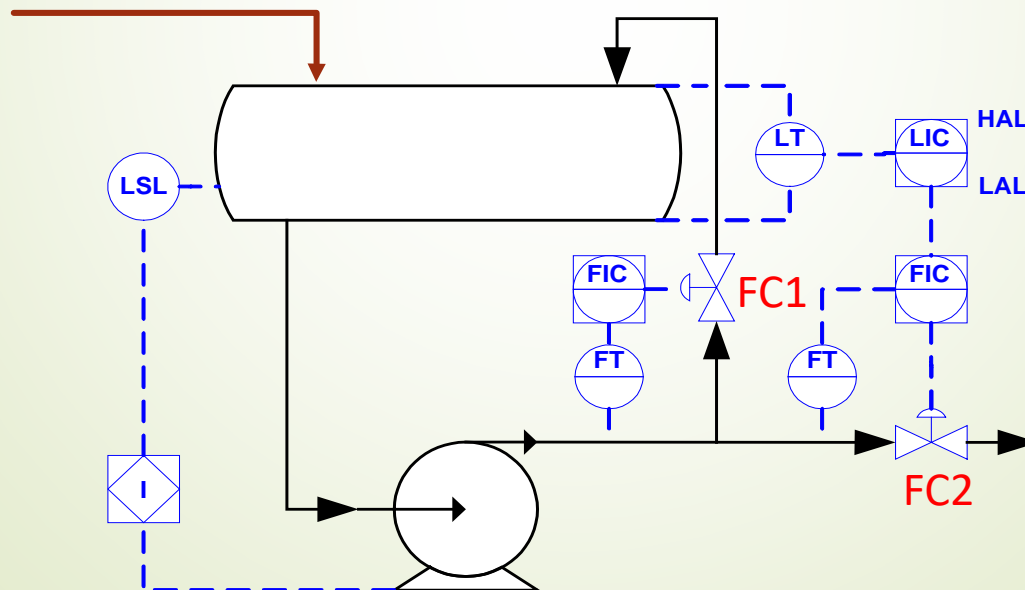
2.A. Bombas centrífugas

V) Control de Caudal mínimo:

Válvula de control en la línea de descarga → añadir una línea de recirculación que devuelva a la succión parte del caudal de descarga.

El caudal de proceso se controla con el lazo de caudal FC2. El lazo de control del reciclo (FC1) mediría el caudal total en impulsión y actuaría sobre la válvula del reciclo. Si el caudal en la impulsión es mayor del mínimo exigido se mantendrá la válvula del reciclo cerrada, mientras que si la demanda de caudal es menor al caudal mínimo, se abrirá lo justo para alcanzar dicho caudal.

El control de nivel del tanque se realiza en cascada con el lazo FC2.



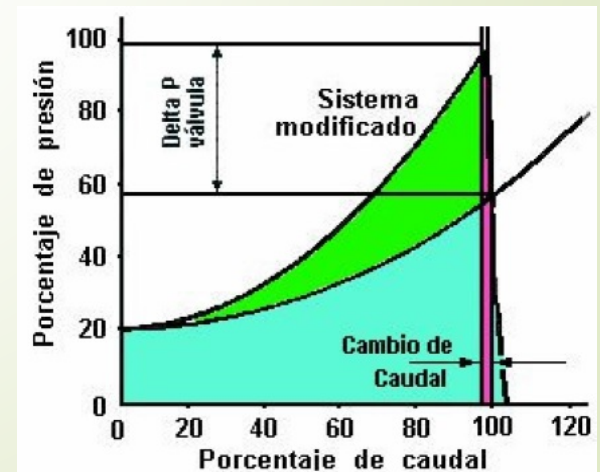
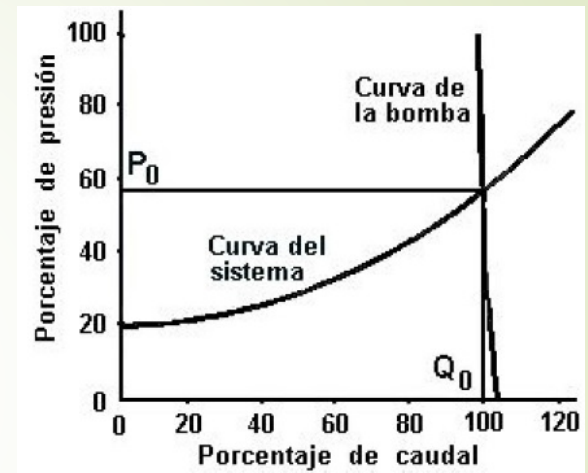
2. CONTROL DE BOMBAS

2.B.Bombas de desplazamiento positivo

Funcionan por emboladas. Bombea un caudal constante que sólo depende de la velocidad de rotación y es independiente de la altura diferencial.

La curva H vs. Q de las bombas de desplazamiento positivo se caracterizan por ser prácticamente verticales. Al igual que para las bombas centrífugas, el punto de corte entre las curvas, de la bomba y el sistema, marcará el punto de operación.

NUNCA se deberá controlar una bomba de desplazamiento positivo mediante una válvula automática en la corriente de impulsión (no varia el Q) o aspiración (NSPH)

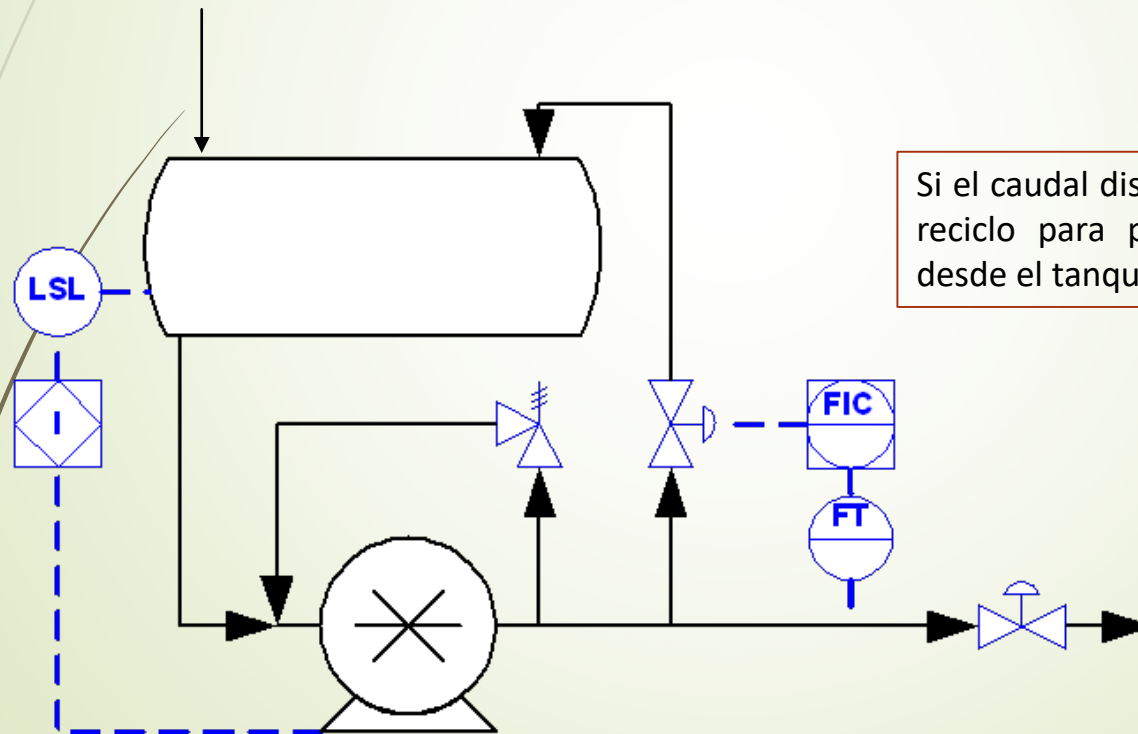


2. CONTROL DE BOMBAS

2.B.Bombas de desplazamiento positivo

I. Recirculación

La estrategia de reciclo es la más habitual para bombas de desplazamiento positivo, ya que estas bombas suministran un caudal prácticamente fijo. La potencia consumida es proporcional a la presión de impulsión. El reciclo disminuye la presión en la impulsión, al menos asegura una reducción en el consumo de energía.



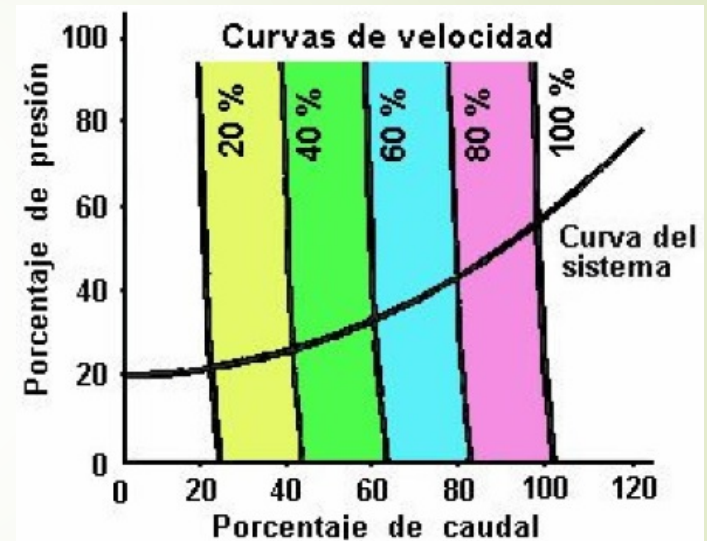
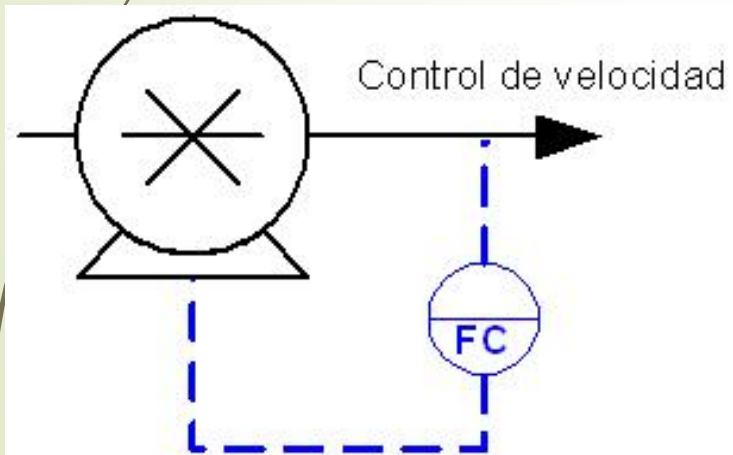
Si el caudal disminuye, se cierra la válvula del reciclo para poder suministrar mas caudal desde el tanque.

2. CONTROL DE BOMBAS

2.B.Bombas de desplazamiento positivo

II. Motor de velocidad variable

Las curvas de las bombas de desplazamiento positivo dependerán de la velocidad de giro de la misma. Si la bomba se acopla a un motor con variador de la velocidad, se podría controlar el caudal de impulsión, empleando en cada momento la potencia necesaria para el caudal que se necesite.



3. CONTROL DE COMPRESORES

3.A. Compresores centrífugos:

Curvas características:

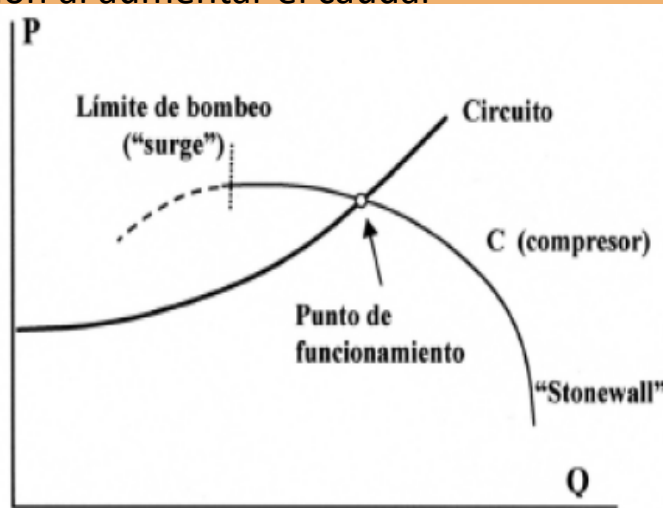
Punto máximo: punto o límite de “bombeo” (Surge).

La curva característica de un compresor centrífugo presenta un máximo, denominado límite de bombeo.

Si el caudal en el compresor cae por debajo de dicho límite, la presión en la corriente de impulsión desciende por debajo de la presión acumulada en el circuito de descarga del compresor, por lo que la dirección del flujo puede invertirse y el compresor podría entrar en un régimen de funcionamiento inestable y peligroso desde el punto de vista mecánico. Por tanto, toda la zona situada a la izquierda del límite de bombeo o zona surge.

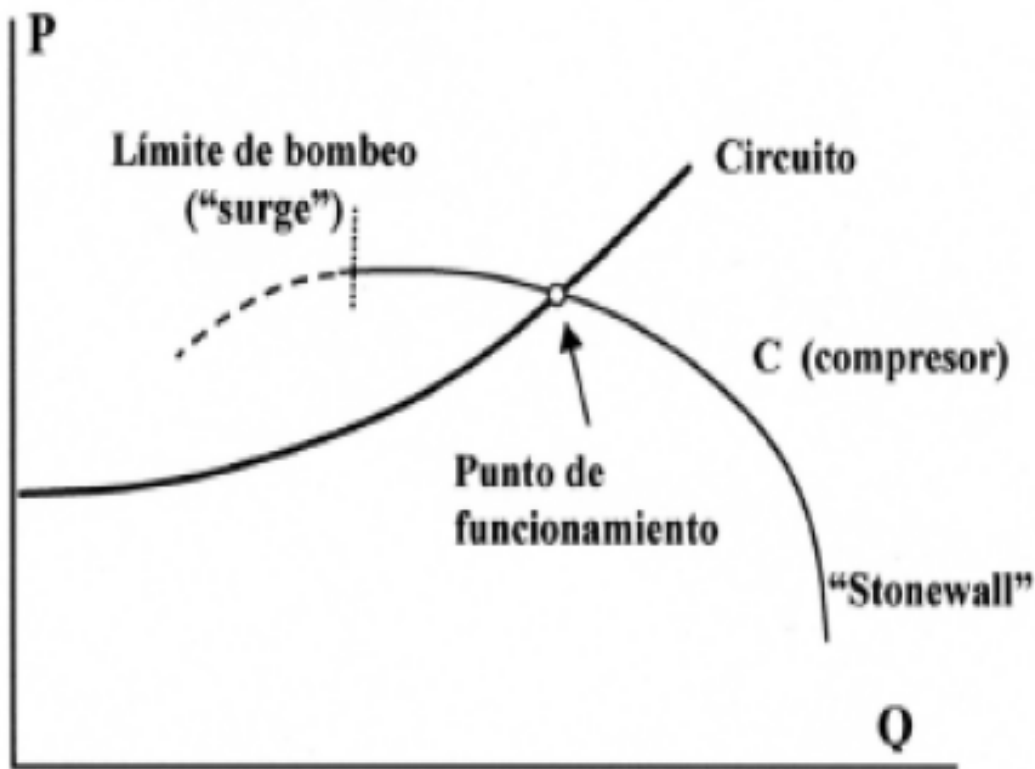
“Stonewall”:

Al aumentar $Q \rightarrow$ la velocidad del gas con respecto a la superficie del impulsor se acerca a la del sonido. Disminuye mucho la presión al aumentar el caudal



3. CONTROL DE COMPRESORES

3.A. Compresores centrífugos:



$$\Delta P = P \text{ descarga} - P \text{ succión}$$

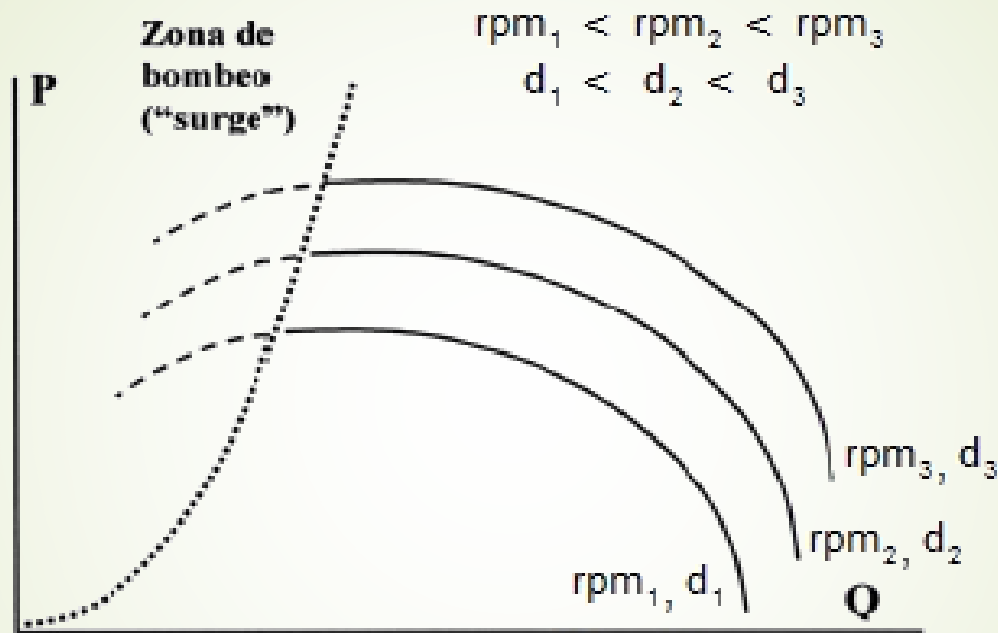
$$\downarrow \downarrow \Delta P \rightarrow \downarrow P \text{ descarga}$$

Si $P \text{ descarga} < P \text{ circuito}$
Flujo invertido

La curva característica muestra la relación entre la presión diferencial y el caudal volumétrico en las condiciones de succión. La curva es fija y se mantiene para compresor mientras que la velocidad de giro y la densidad del gas se mantengan constantes.

3. CONTROL DE COMPRESORES

3.A. Compresores centrífugos:



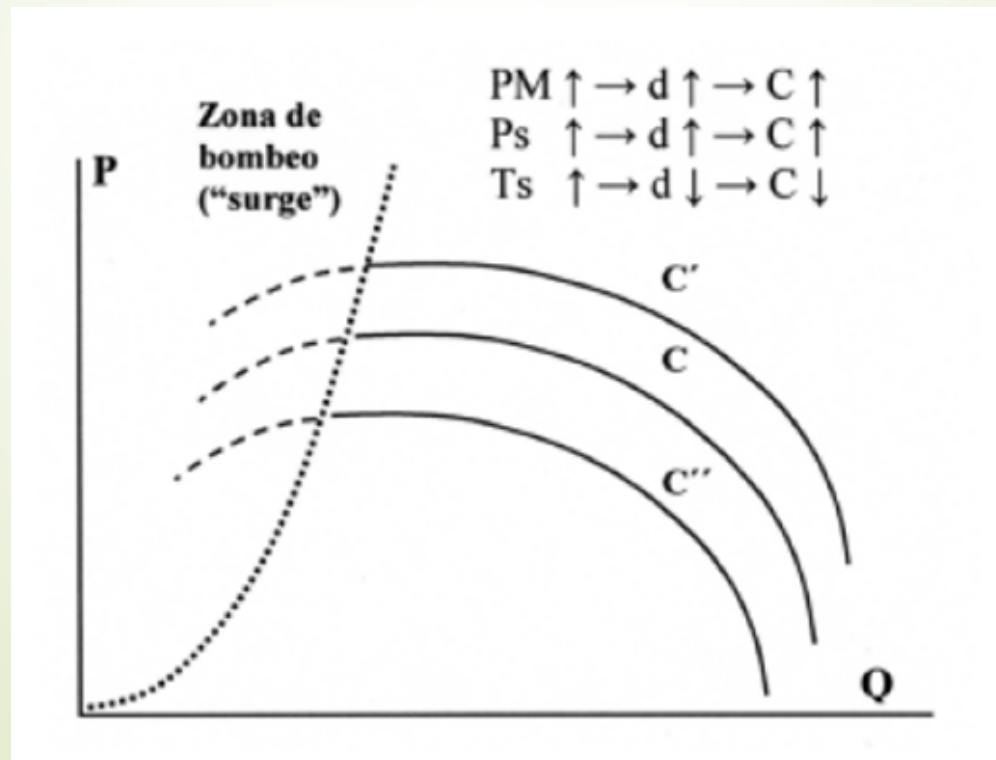
La curva de un compresor centrífugo será fija para una determinada velocidad de giro. Si aumenta la velocidad de giro, la curva se irá desplazando hacia arriba.

Sin embargo, su curva característica dependerá también de la densidad del gas. Así pues, si la densidad aumenta, la curva del compresor se irá desplazando también hacia arriba.

3. CONTROL DE COMPRESORES

3.A. Compresores centrífugos:

La densidad del gas podrá aumentar si se incrementa el peso molecular del gas, si se incrementa la presión en la succión o si disminuye la temperatura del gas en la succión. Como todas estas posibles variaciones son frecuentes en el caso de los compresores centrífugos, se suele trabajar con una familia de curvas en lugar de con una curva individual como se hacía con las bombas centrífugas.



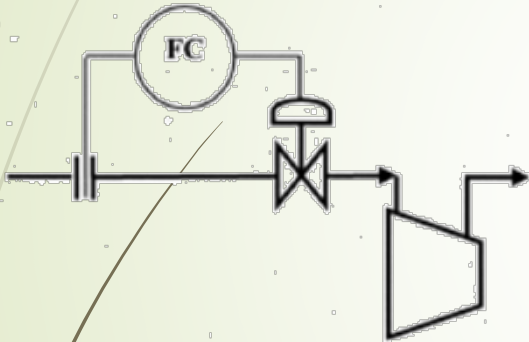
3. CONTROL DE COMPRESORES

3.A. Compresores centrífugos:

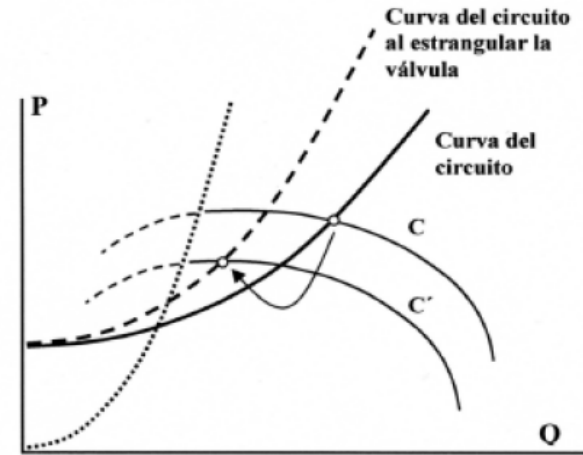
I. Válvula en succión.

La válvula se coloca generalmente en la succión.

Se modifica la curva del circuito → el punto de funcionamiento → se modifica también la del compresor



Control por mediante válvula en la succión o la descarga (véanse Figs. 4 y 5)



- Al estrangular en la succión, aumenta el incremento de presión que se debe suministrar y disminuye el caudal. (Curva del circuito)
- Por otro lado, esto provoca una disminución de la densidad del gas, lo cual provoca la variación de la curva del compresor.

VENTAJAS:

- Esta estrategia de control tiene la ventaja de ahorrar potencia frente a la opción de colocar la válvula en la corriente de impulsión.
- Asimismo, presenta ventajas desde el punto de vista de la estabilidad de la operación, alejándose del límite de bombeo.

3. CONTROL DE COMPRESORES

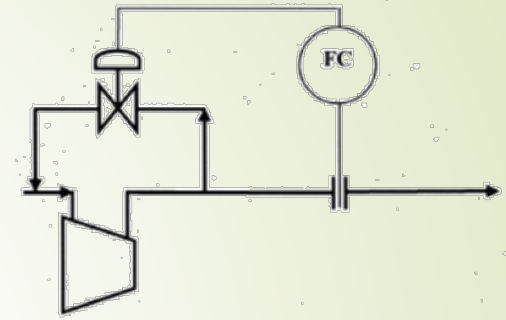
3.A. Compresores centrífugos:

II. Recirculación.

El caudal se puede controlar recirculando el exceso.

Generalmente hay que recircular constantemente una gran parte del caudal, lo que implica un compresor de mayor tamaño al necesario, así como un importante derroche de potencia.

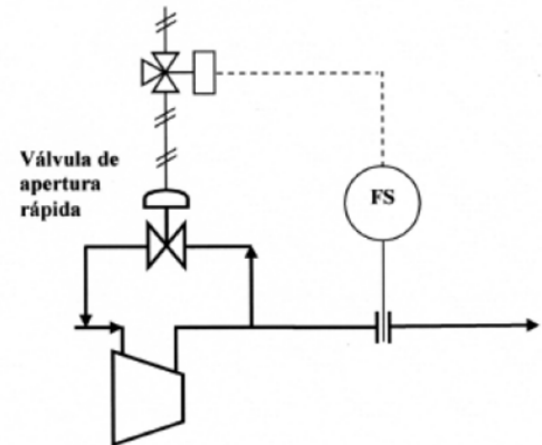
El gas se calienta al comprimirse → puede llegar a recalentar el compresor → refrigerar la recirculación.



Control por recirculación

III. Control antisurge.

Se mide el caudal que circula por el compresor, y en caso de que éste baje por debajo del caudal mínimo, se abre una válvula automática que conecte la descarga con la succión. La válvula automática ha de ser de apertura rápida (que se abra completamente en menos de dos segundos).



3. CONTROL DE COMPRESORES

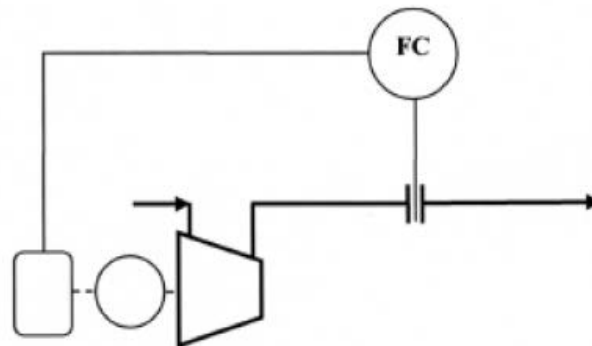
3.A. Compresores centrífugos:

IV. Variación de velocidad.

Desplazamiento de la curva del compresor → punto de funcionamiento.

Esta estrategia de control es la más utilizada con máquinas de alta potencia, ya que así se puede adecuar el consumo de potencia. La variación de velocidad se puede lograr de varias formas.

- **Motor con variador de frecuencia.** Es la solución recomendada para compresores de elevada potencia movidos por motor eléctrico, donde el ahorro de energía puede compensar con creces el coste del variador de frecuencia.



Turbina, variador de frecuencia o
acoplamiento variable

Control por variación de velocidad

3. CONTROL DE COMPRESORES

3.b. Compresores volumétricos

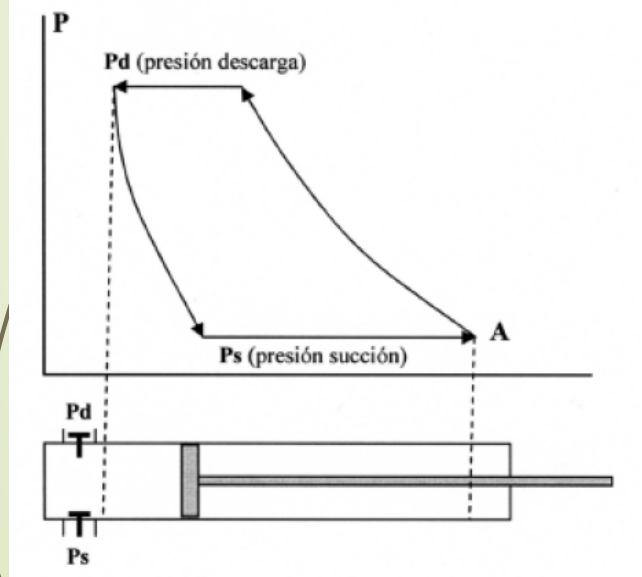
Su curva característica es una línea vertical.

No se puede mediante una **válvula en la descarga** → simplemente aumentaría la presión de descarga y el motor gastaría más energía, pero el caudal se mantendría prácticamente constante.

Válvula en la succión → Al cerrarse disminuiría la densidad del gas → ↓ caudal másico.

No se utiliza → Aumento en la relación de compresión → Aumento la temperatura del gas.
Compresores de muy baja potencia.

Actuar sobre las válvulas de entrada de los cilindros



La carrera de compresión comienza en A, estando la válvula de descarga cerrada y la de succión abierta. Al avanzar el pistón hacia la izquierda, la compresión hace que la presión aumente y se cierra la válvula de succión, abriéndose la válvula de descarga.

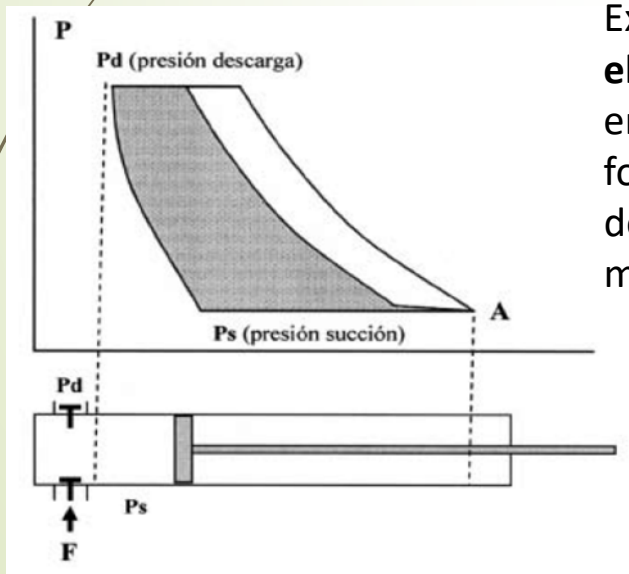
Cuando el pistón comienza a desplazarse hacia la derecha baja la presión, cerrándose la válvula de descarga y abriéndose la de succión.

3. CONTROL DE COMPRESORES

3.b. Compresores volumétricos

Actuar sobre las válvulas de entrada de los cilindros

De acuerdo a la descripción anterior, la **válvula de succión** se cierra automáticamente cuando la presión en el interior del cilindro supera el valor P_s . Si se **bloquease** dicha válvula para evitar su cierre, el gas que había entrado en el cilindro, volvería a salir por la succión durante el recorrido del pistón hacia la derecha, anulándose la etapa de compresión.



Existe otra estrategia de control basada en **retrasar el cierre de la válvula de succión** para reducir la embolada útil, reduciendo el área de la curva P - V . La forma más sencilla de conseguirlo es aplicar una determinada fuerza sobre la válvula de succión para mantenerla abierta hasta el momento deseado.