

CARACTERÍSTICAS DE LAZOS TÍPICOS EN CONTROL DE PROCESOS

INTRODUCCIÓN

Prácticamente casi todos los lazos de control de procesos caen dentro de las siguientes categorías:

- **Caudal:** importante para conocer el balance de materia. Raramente se mantiene constante, generalmente fluctúa y es una variable ruidosa.
- **Presión:** es la única que puede ser a su vez clasificada en tres categorías (líquido, gas y líquido con vapores en equilibrio), cada una con características bien diferenciadas.
- **Nivel:** es la integral del caudal durante el tiempo que ésta dura y da una medida de la acumulación de materia en el sistema considerado.
- **Temperatura:** es una propiedad intensiva asociada al balance de energía.
- **Composición:** determina la proporción de cada componente en la mezcla. Está asociada con el balance de materia. No siempre, se mide directamente la composición, también se la suele inferir a partir de medidas de conductividad, viscosidad, etc.

Para comprender cómo se comportan los distintos Sistemas de control, es decir su "personalidad", se analizarán:

- Cada componente del lazo, empezando por el proceso y el elemento de medición transmisión.
- La característica de flujo del elemento final de control.
- El tipo de controlador más apropiado.

y se verá finalmente qué puede esperarse de la dinámica del lazo de control.

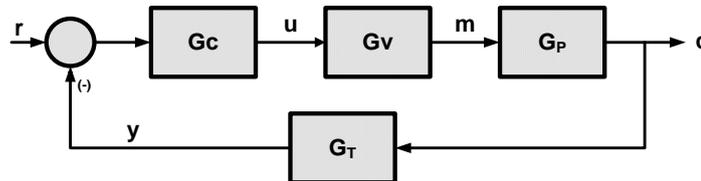


Figura 1: Diagrama en bloques con los elementos típicos de un lazo de Control de Procesos

CONTROL DE CAUDAL

Este es un caso muy especial ya que la variable manipulada es la controlada y por lo tanto la ganancia del proceso resulta igual a 1. Dos de las configuraciones más difundidas se muestran en las Figuras.

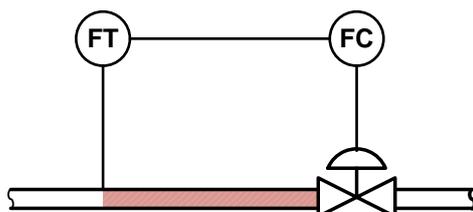


Figura 2: Lazo de caudal manipulando la pérdida de carga en la línea

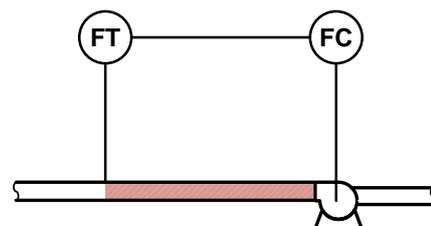
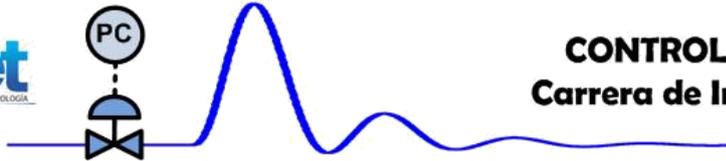


Figura 3: Lazo de caudal manipulando la energía entregada al fluido



La dinámica del proceso puede modelarse como un elemento de primer orden, haciendo un balance de cantidad de movimiento (fuerzas) que considere a la cantidad de fluido que hay en la línea entre el sensor y elemento final de control (válvula, bomba centrífuga o ventilador) y que aparece rayado en los dos esquemas.

Cuando se emplea una bomba de desplazamiento positivo, la única posibilidad de controlar el caudal es mediante el manejo de una corriente de reciclo tal como se muestra en la Fig. 4. En este caso, la ganancia es igual a -1 (mayor caudal derivado por la corriente de reciclo representa una disminución equivalente de la corriente principal) y la dinámica también puede ser asimilada a un primer orden como en los casos anteriores.

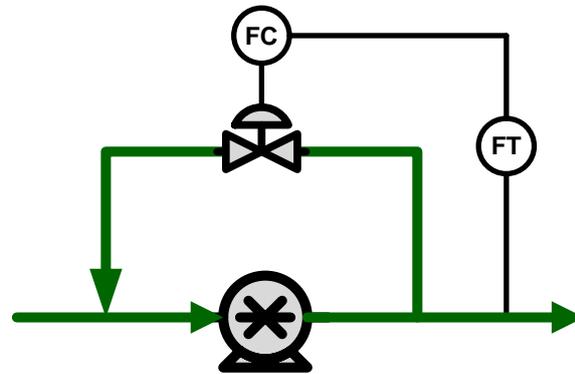


Figura 4: Control manipulando la corriente de reciclo

Existen muchos dispositivos de medición-transmisión lineales (ganancia constante) como el caso de medidores magnéticos o de desprendimiento de vórtices.

Sin embargo están bastante difundidos los dispositivos diferenciales como placas de orificios, ó tubos de Venturi que generan salidas que son proporcionales al cuadrado del caudal. En estos casos, la ganancia del transmisor varía con el caudal, introduciendo una no linealidad que debe ser adecuadamente analizada a efectos de compensarla.

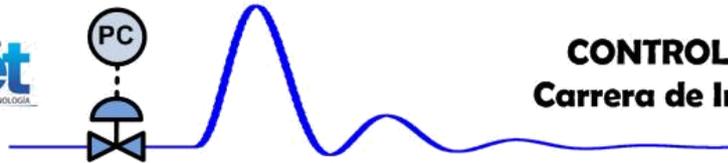
Cuando lo que se controla son caudales que fluyen en canales y la medición se realiza con vertederos o canaletas estandarizadas y se mide el nivel de líquido. La señal es proporcional a una potencia del nivel que toma valores entre $3/2$ y $5/2$, según el dispositivo. En cualquiera de los casos, los dispositivos de medición convencionales, y especialmente los basados en microprocesador, presentan la opción de linealizar la medición si fuera necesario.

La dinámica del transmisor en general se puede asimilar con buena aproximación a un primer orden con constante de tiempo en el orden de 0.1 a 0.2 segundos. El ruido es un fenómeno que aparece siempre en la medición de caudal, sobre todo por efecto de turbulencias del flujo asociadas a codos, válvulas y otros dispositivos de la línea. Por esta razón es común que los transmisores de caudal vengan con un filtro (dispositivo de primer orden) cuya constante de tiempo se puede ajustar para "filtrar" la intensidad del ruido. Es por esto que la acción derivativa resulta inadecuada para este tipo de lazo.

La característica de flujo del elemento final de control determinará si hay no linealidades estáticas, las que a su vez podrían servir para compensar las no linealidades del sistema de transmisión, si éste las tuviera. La principal dinámica del elemento final de control está asociada al actuador que generalmente es neumático (cabezal o pistón) y que proporciona una constante de tiempo en el orden de 1 a 4 segundos.

Si se consideran los elementos del lazo se concluye que:

- el sistema es siempre autorregulado,
- la dinámica está caracterizada por tres o más capacidades (sistemas de primer orden) que son no interactuantes,



- las constantes de tiempo son del mismo orden (segundos) y
- la ganancia del proceso es constante, pero tanto la del transmisor como la del elemento final de control pueden ser variables.

Así resulta que la dinámica de los lazos de caudal es bastante rápida, con períodos últimos en el orden de unos pocos segundos. Al tener varias capacidades del mismo orden, presenta dificultades para ser controlado, debiéndose usar ganancias pequeñas. Debe emplearse entonces acción integral para asegurar error de estado estacionario cero.

Existe otra razón por la que los controladores PI (y a veces integrales puros) se emplean en lazos de caudal. Normalmente estos sistemas no se implementan para mantener el set point constante (operación regulatoria) sino que más bien integran otras estrategias de control más elaboradas (lazo secundario en cascada, control selectivo, control de relación, etc.). En éstas se requiere que el caudal siga cambios permanentes del set point. Para asegurar que la ganancia entre set point y caudal medido sea constante (un cambio en la referencia genere un cambio proporcional en el flujo medido) es imprescindible la acción integral. Sólo puede lograrse esto si hay acción integral y el medidor es lineal. En estado estacionario

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} = \mathbf{k} \mathbf{F} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}} = \frac{1}{\mathbf{k}}$$

Además, como son lazos ágiles, el retardo adicional por efecto de la acción integral no resulta relevante.

CONTROL DE PRESIÓN DE LÍQUIDOS

Los líquidos al ser fluidos incompresibles producen respuestas similares a las de los lazos de caudal. Controlar la presión de un líquido es esencialmente controlar el caudal. La dinámica de los elementos del lazo son análogas a las ya vistas, pero hay algunas diferencias importantes en las características estáticas.

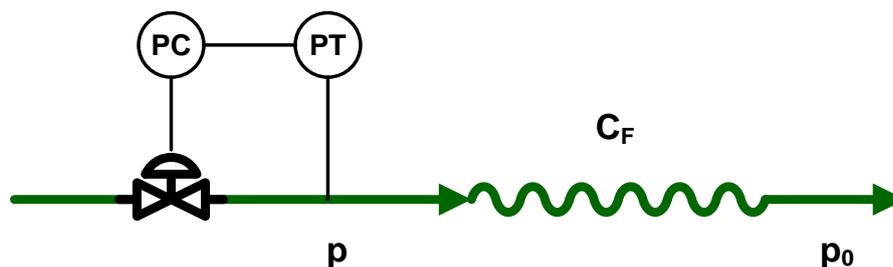


Figura 5: Lazo de control de presión de líquido

El proceso en este caso (variable de entrada → caudal, variable de salida → presión) ya no tiene una ganancia adimensional igual a 1 ó (-1) si es reciclo. Si “P” es la variable controlada y suponemos que el líquido circula a través de una línea con una resistencia de coeficiente de flujo C_F y que descarga a una contra-presión constante p_0 , para flujo turbulento y en estado estacionario vale:

$$p = p_0 + \frac{F^2}{C_F^2}$$

y la ganancia del proceso resulta:



$$K_p = \frac{\partial p}{\partial F} = \frac{2F}{C_F^2} = \frac{2(p - p_0)}{F}$$

Como K_p varía inversamente con el caudal F y los dispositivos de medición de presión son lineales (K_T constante) la característica más apropiada para el elemento final de control sería *igual porcentaje*, si no hay otra influencia dinámica no lineal. Esto no es válido si p_0 no permanece constante y resulta ser la principal perturbación. En este caso K_p varía en forma proporcional con el caudal (C es constante) y la mejor característica de flujo instalada resultaría ser la de *apertura rápida*.

Esta variable también es ruidosa como el caudal, por lo que el controlador recomendado es PI para que asegure la eliminación del off set.

CONTROL DE PRESIÓN DE GASES

La masa de un gas almacenada en un recipiente de volumen fijo tiene una relación directa con la presión, de modo que esta variable es un indicador de la acumulación de materia. Un incremento en el flujo de gas que ingresa se traducirá en un aumento de la presión del gas.

Para el caso del recipiente de la Figura 6, suponiendo válida la ecuación de estado:

- **p**: presión del gas
- **V**: volumen del recipiente (constante)
- **Z**: factor de compresibilidad (asumido constante en el ámbito de operación)
- **m**: masa de gas en el volumen V
- **M**: masa molecular relativa
- **R**: constante universal de los gases
- **T**: temperatura absoluta (supuesta constante)

$$p V = Z \frac{m}{M} R T$$

El balance de masa en estado transitorio resulta:

$$\frac{M}{Z R T} \frac{\partial p}{\partial t} = W_e - W_s$$

Este sistema es eminentemente autorregulado ya que, si crece la presión en el interior, tiende a disminuir el caudal de ingreso y a aumentar el caudal de salida. El elemento de medición y transmisión es lineal y solo aporta un retardo de primer orden con constante de tiempo del orden de la fracción de segundo.

Cuando el sistema es un colector, el volumen donde se acumula gas es relativamente pequeño y distribuido. La dinámica tiende a parecerse a la de presión de líquido, con parámetros del controlador

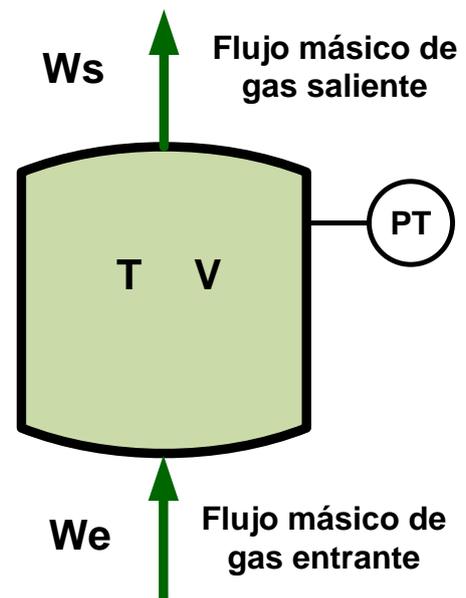
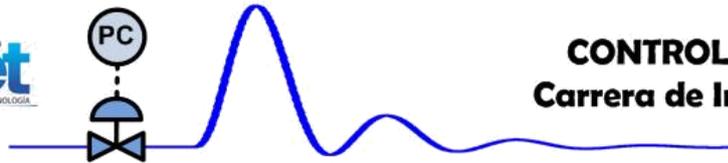


Figura 6: Presión del gas indicativa de la acumulación de materia



y períodos de oscilación parecidos. También la característica de flujo de las válvulas a usar sería la misma.

Si por el contrario, existe algún recipiente con gran capacidad (como el mostrado en la Figura 6), entonces hay una constante de tiempo preponderante y otras mucho menos significativas (transmisor, cabezal de la válvula, etc.). Esto determina que el sistema sea mucho más fácil de controlar, y el controlador se puede ajustar con ganancias mucho mayores (bandas proporcionales tan estrechas como 5 %). Es así que un controlador simplemente proporcional podría asegurar una buena performance con valores de off set bajos en estos casos.

CONTROL DE PRESIÓN DE VAPORES

En los sistemas donde líquido y vapor están en equilibrio (columnas de destilación, evaporadores, calderas, etc.), el fluido cambia de fase con transferencia de calor. Cuando la presión se controla por adición o remoción directa del vapor se espera que la respuesta sea idéntica a la de presión de gases. Un ejemplo se ve en la Figura 7.

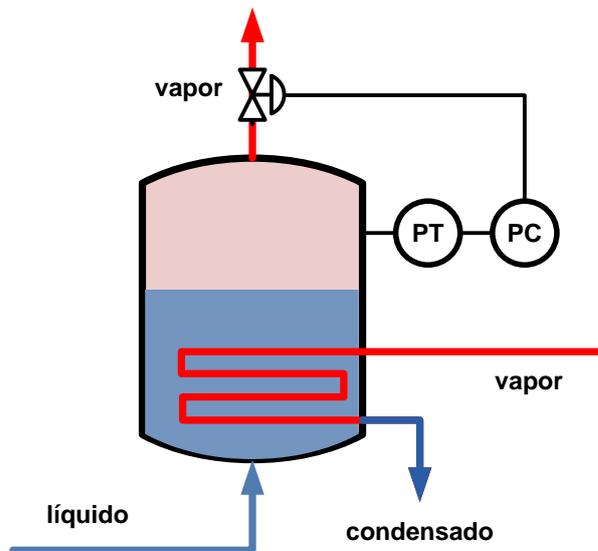


Figura 7: Control de presión de vapor manipulando el egreso de vapor

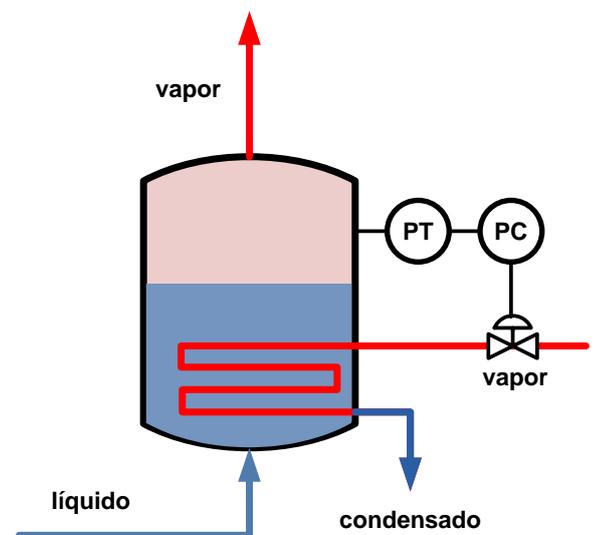
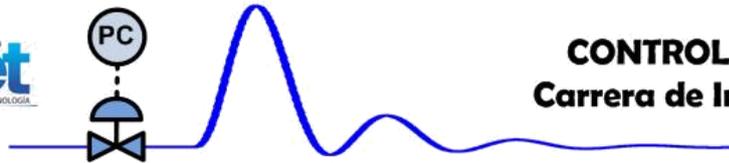


Figura 8: Control de presión de vapor manipulando el ingreso de energía

Si la presión se controla manipulando la transferencia de energía (caso de la Figura 8), entonces las características son similares a la de lazos de temperatura, ya que en este caso el balance de materia está acoplado con el de energía.

CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS

El nivel de líquido fue presentado hasta ahora en forma muy simplificada, con una dinámica caracterizada fundamentalmente por un integrador (o eventualmente un sistema de primer orden con una constante de tiempo grande).



Considerando un balance de materia:

$$A \frac{\partial h}{\partial t} = F_e - F_s$$

Sin embargo hay otras características dinámicas que complican el comportamiento de la variable. Una de ellas es la *Resonancia Hidráulica*.

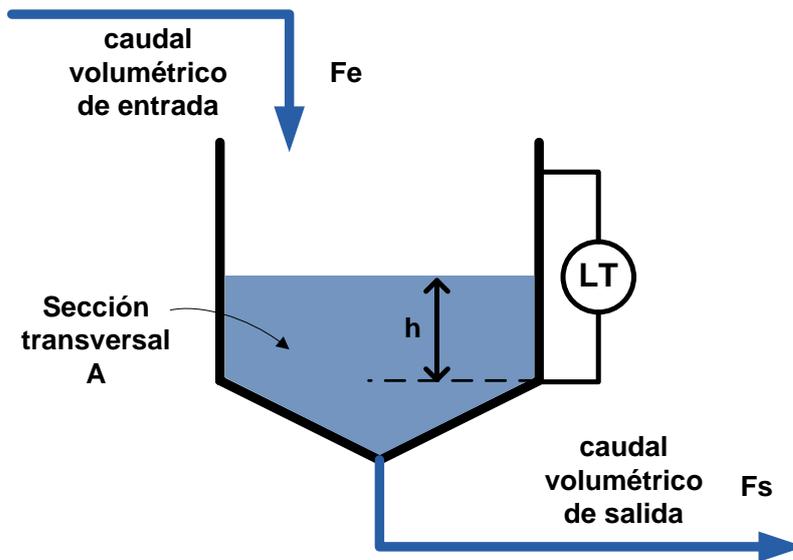


Figura 9: Sistema de nivel de líquido

En la ecuación de balance anterior, realmente h representa el nivel promedio en el tanque. Cualquier superficie de líquido, por efecto de alguna perturbación, como sería el flujo de líquido que cae sobre ella, genera un movimiento ondulante.

Este fenómeno, que por otra parte se manifiesta tanto en un lago como en un tanque, se lo denomina resonancia hidráulica. El nivel que "realmente" mide el transmisor, es el nivel medio más (o menos) la altura (o depresión) de la ola de líquido como se esquematiza en la Figura 10.

La resonancia puede ser modelada en forma aproximada con un sistema de segundo orden subamortiguado. La función de transferencia entre el caudal alimentado o extraído y el nivel será de la forma:

$$G_P(s) = \frac{K_P}{s \left(\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \right)}$$

donde K_P es la constante del integrador tal como resultaría de un modelado simplificado con la ecuación de balance de masa (inversa de la sección transversal con el signo que corresponda según el caudal considerado).

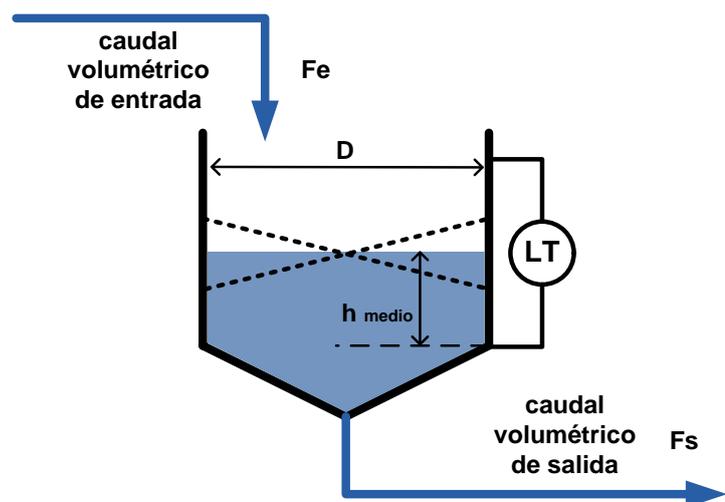
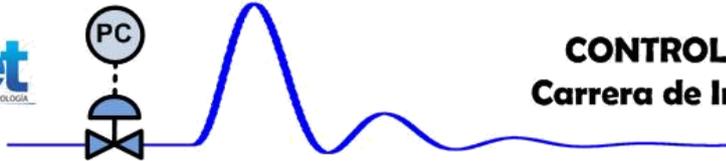


Figura 10: Esquema del efecto de resonancia hidráulica



La frecuencia natural de resonancia ω_n depende de factores geométricos y del particular sistema analizado. Para tanques de sección circular, se encontró teóricamente:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{2D}}$$

El coeficiente de amortiguamiento está relacionado con las fuerzas viscosas del fluido que tienden a atenuar la fluctuación de la superficie líquida.

Los transmisores de nivel son lineales (la ganancia se puede considerar constante) y aportan a lo sumo un retardo de primer orden con constante de tiempo de menos de un segundo.

El elemento final de control, dinámicamente aportará una constante de tiempo que a lo sumo estará en el orden de los pocos segundos y es constante. La característica de flujo más apropiada para la válvula deberá ser aquella que mantenga el producto de las ganancias del lazo constante (ya que la dinámica no cambia por efecto de las fluctuaciones de caudal). Como se vio, K_P (integrador) y K_T son constantes, entonces K_V debe ser constante. Por lo tanto el elemento final de control debe tener un comportamiento lineal (característica instalada).

De lo anterior se puede concluir que la función de transferencia de los elementos del lazo cerrado podría ser de la forma:

$$G_V(s) G_P(s) G_T(s) = \frac{K_V K_P K_T}{s(\tau_V s + 1) \left(\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \right) (\tau_T s + 1)}$$

lo que permite concluir que la frecuencia última del lazo (crítica con control proporcional), a lo sumo será igual a la frecuencia natural de resonancia hidráulica. Considerando las dimensiones de los tanques y los retardos de transmisores y actuadores que se emplean en la industria de procesos, se puede estimar que el periodo último de los lazos de nivel estará en el rango de 2 a 20 segundos.

Otro fenómeno que puede aparecer en la dinámica de nivel es la *Respuesta Inversa*. Se da cuando hay un líquido en ebullición como en el nivel de domo de una caldera acuotubular o en el reevaporador de una columna de destilación. Se debe a la interacción del balance de materia con el de energía. La respuesta inversa en nivel significa que, ante un cambio escalón en el caudal de entrada, el nivel tiende a disminuir inicialmente antes de seguir la tendencia que se espera para un integrador como se ve en la Figura 11 (No se considera la resonancia hidráulica).

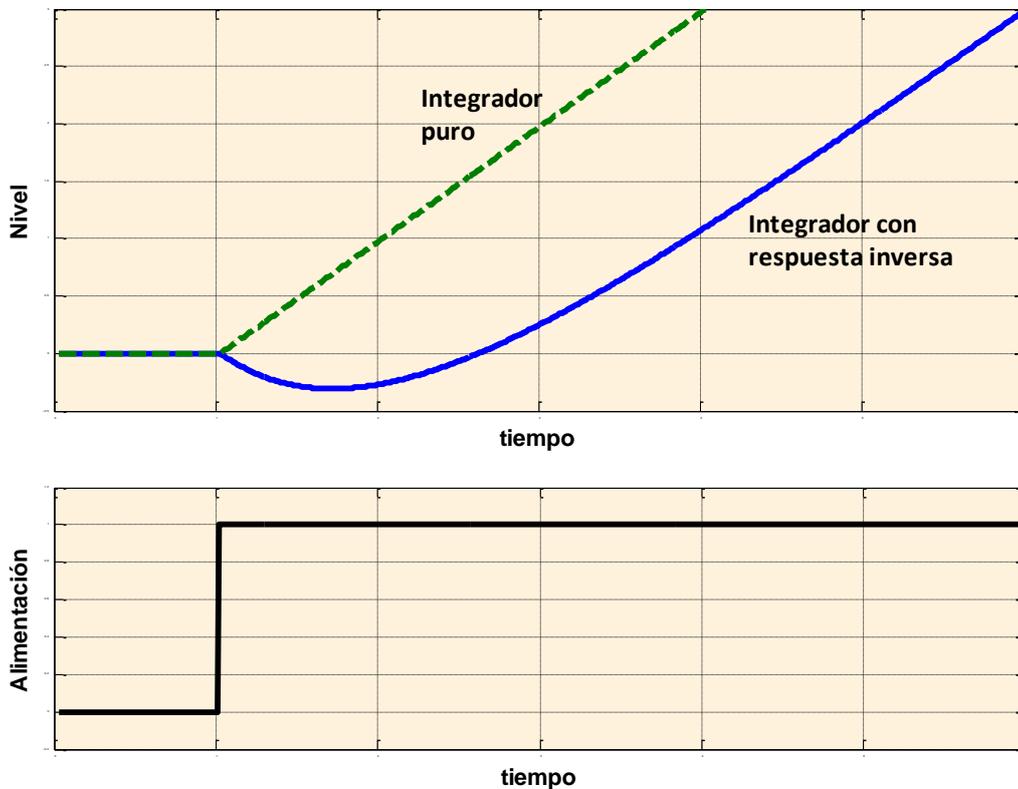
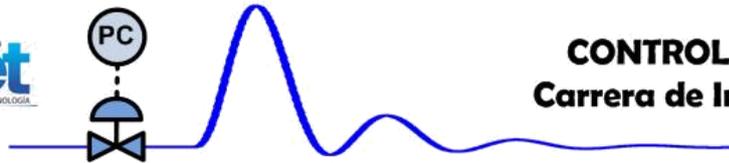


Figura 11: Respuesta de nivel como integrador puro y con respuesta inversa

La representación matemática de la respuesta inversa incluye una constante de tiempo negativa en el numerador. De esta forma, un proceso de nivel con esta dinámica, podría tener una función de transferencia de la forma:

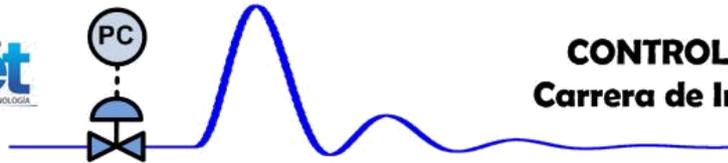
$$G_P(s) = \frac{K_P (-\tau_I s + 1)}{s(\tau_2 s + 1)}$$

Aplicando los conocimientos de la Teoría de Control de Procesos, se puede deducir que la respuesta inversa deteriora la performance acrecentando los períodos de oscilación y produciendo mayores sobrevalores cuando el sistema corrige perturbaciones. Además, el proceso de ebullición es una fuente de ruido debido al constante burbujeo de vapor sobre la interface.

El tipo de controlador a emplear dependerá de la clase de respuesta que se necesite para la variable controlada. Lo concluyente es que, debido al ruido de origen hidráulico o por efecto de ebullición, no se debe emplear acción derivativa.

Existen dos situaciones bien diferenciadas:

- **Control Promediante (Averaging):** es el caso de niveles de tanques que actúan como "pulmones", en donde la variable en sí misma no es importante y sólo se requiere que se mueva dentro de cierto ámbito más o menos holgado. En este caso es suficiente con un controlador proporcional con una banda ancha, por ejemplo del 100 %. Si se usa control PI, las acciones deberán ajustarse en forma relajada.



- **Control estricto (Tight):** corresponde a unidades donde la interfase debe mantenerse en un rango acotado por necesidades del proceso. Tal es el caso del nivel de líquido en un evaporador de tubos cortos, en donde la altura de la masa hirviente tiene enorme influencia en el coeficiente de transferencia del calor. Se deberá emplear controlador es PI que permite asegurar la constancia del set point.

CONTROL DE TEMPERATURA

La variable temperatura es un indicador de la energía acumulada en el sistema y su control se hace generalmente manipulando el flujo de calor gobernado por mecanismos de conducción, convección y/o radiación.

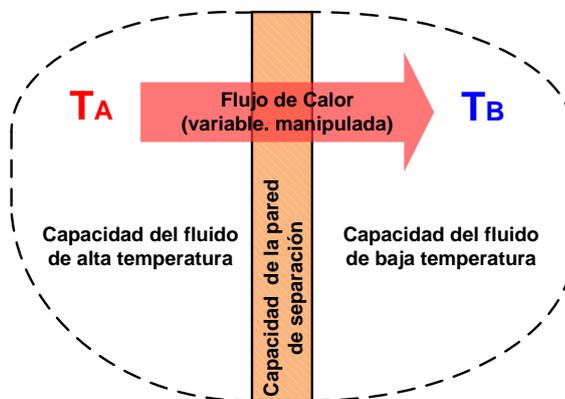


Figura 12: Esquema de las capacidades en serie involucradas en la dinámica de temperaturas

El proceso de transferencia de energía entre dos fluidos implica al menos tres capacidades térmicas (sistemas de primer orden) en serie interactuantes (esquema de la Figura 12):

- *Capacidad del fluido caliente*
- *Capacidad de la pared que separa ambos fluidos*
- *Capacidad del fluido frío*

El sensor, que se encuentra del lado del fluido cuya temperatura se desea controlar, actúa como otra capacidad. Su constante de tiempo puede ser importante, a pesar que en sí mismo el dispositivo almacene mucha menos energía que las otras capacidades.

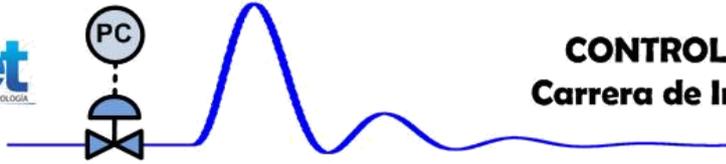
Usualmente las constantes de tiempo son de tal magnitud que "filtran" las fluctuaciones de alta frecuencia, lo que transforma a la temperatura en una variable virtualmente exenta de ruido.

Como la temperatura es una propiedad transportada por el fluido, si el elemento de medición está ubicado en la corriente de salida, hay un retardo distancia-velocidad asociado a la posición en la que se encuentra el sensor y que es variable con el caudal.

La dinámica de la válvula puede despreciarse en estos lazos ya que la constante de tiempo es de un orden de magnitud menor que las asociadas a las capacidades térmicas.

La manipulación del flujo de energía se hace manejando el caudal de la corriente (la fría o la caliente) ó el flujo de combustible según la unidad considerada. Como el proceso de transferencia es no lineal, cabe esperar que la ganancia del proceso sea no lineal.

Los transmisores de temperatura son lineales, lo que asegura que su ganancia sea constante. La característica de flujo del elemento final de control debe analizarse para cada situación particular. En la mayoría de los casos una característica igual porcentaje (o similar) es la mejor opción.



Cuando la variable temperatura es controlada es porque se requiere que se mantenga dentro de un rango muy acotado. Esto hace imprescindible la acción integral en el controlador. Teniendo presente que estos lazos pueden ser relativamente lentos (períodos últimos que pueden llegar a la decena de minutos), que no presentan ruido y que son sistemas multicapacitivos, se espera que la acción derivativa produzca una sustancial mejora de la performance. Estas razones avalan el uso de controladores PID en estos lazos.

Debe recordarse que los lazos de presión de vapores, donde se manipula el flujo de calor, se comportan en manera análoga a los lazos de temperatura como el caso de columnas de destilación y generadores de vapor.

CONTROL DE COMPOSICIÓN

Los lazos de composición son probablemente los más importantes en la industria de procesos ya que regulan la calidad del producto. Sin embargo, están poco difundidos porque suelen ser de difícil medición, y muchas veces, el lazo de control es de difícil sintonización. La composición de los productos está vinculada al balance de masa de componentes. Como se dijo, la mayoría de las veces no se mide directamente la composición sino se la infiere a partir de alguna propiedad relacionada con ella como densidad, viscosidad, pH, ORP, conductividad, índice de refracción, etc.

Como la composición es una propiedad transportada por las corrientes en las que viaja el producto siempre aparece tiempo muerto (retardo distancia-velocidad). Si para medir la composición se debe recurrir a muestreo (caso de un cromatógrafo en línea), la información de la composición se dispone a intervalos regulares (tiempo de muestreo). Surge por esta causa un tiempo muerto adicional equivalente a 1.5 veces dicho tiempo de muestreo.

Hay una fuente adicional de tiempo muerto: la agitación imperfecta. En muchas de las unidades donde se debe controlar composición, se mantiene una agitación vigorosa a efectos de asegurar un comportamiento próximo a la mezcla perfecta. Esto es especialmente cierto en tanques como el mostrado en la Figura 13, donde el agitador genera una corriente dentro del recipiente que favorecen el denominado retromezclado (back mixing).

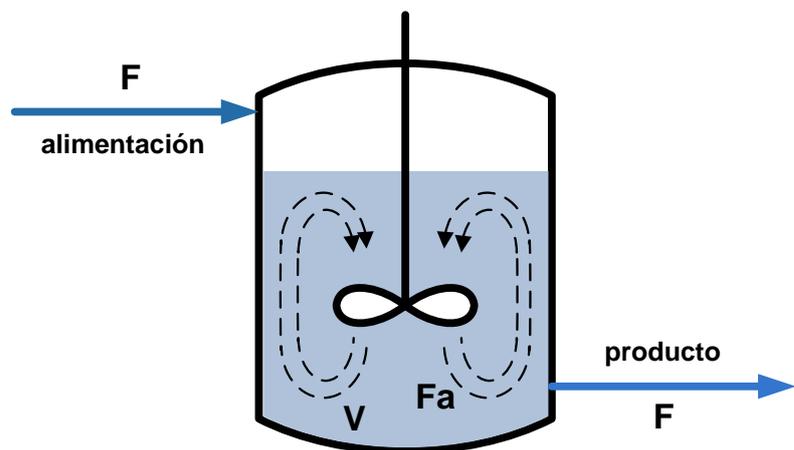
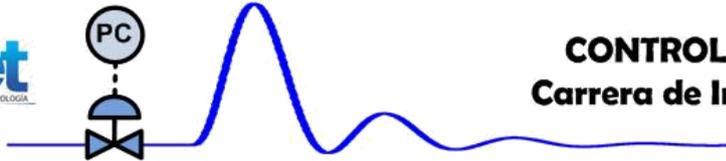


Figura 13: Esquema de las corrientes de retromezclado en un reactor tanque

Se ha propuesto un modelo para tener en cuenta la dinámica del mezclado que considera casualmente el caudal volumétrico interno desplazado por el agitador (F_a) en relación al flujo externo de alimentación (F). Según este modelo, la dinámica de composición puede ser descrita simplificada con la Función de Transferencia:



$$G_P(s) = \frac{K_P e^{-LS}}{\tau s + 1}$$

donde L es un tiempo muerto que aparece como consecuencia del mezclado imperfecto. Los parámetros dinámicos se vinculan con un parámetro α que mide la discrepancia entre el grado real de mezcla y el mezclado perfecto que se define como:

$$\alpha = \frac{F_a}{F_a + F}$$

Si $F_a \gg F$, que α tiende a 1, o sea mezcla perfecta, mientras que α nulo implicaría la carencia total de mezclado, equivalente a flujo pisón. L y τ se evalúan con las expresiones:

$$L = \frac{V}{2(F + F_a)} = \frac{V}{2F} (1 - \alpha) \qquad \tau = \frac{V}{F} - L = \frac{V}{2F} (1 + \alpha)$$

Como se ve, si hay mezclado perfecto, $L = 0$ y la constante de tiempo τ coincide con el tiempo de residencia como se puede deducir a partir de las ecuaciones de balance de materia.

Se pueden usar los siguientes valores extraídos de experiencias en plantas reales:

- Tanques con muy buena agitación $\alpha = 0.95$
- Mezcladores estáticos $\alpha = 0.40$

También se puede estimar el valor de F_a en base a las características del agitador y su potencia y relacionarlo con el caudal de alimentación. En la Figura 14 se muestra la respuesta de la composición de salida a un escalón en el caudal de la alimentación para dos situaciones bien diferenciadas: mezcla perfecta y con un grado de mezclado correspondiente a mezcladores estáticos.

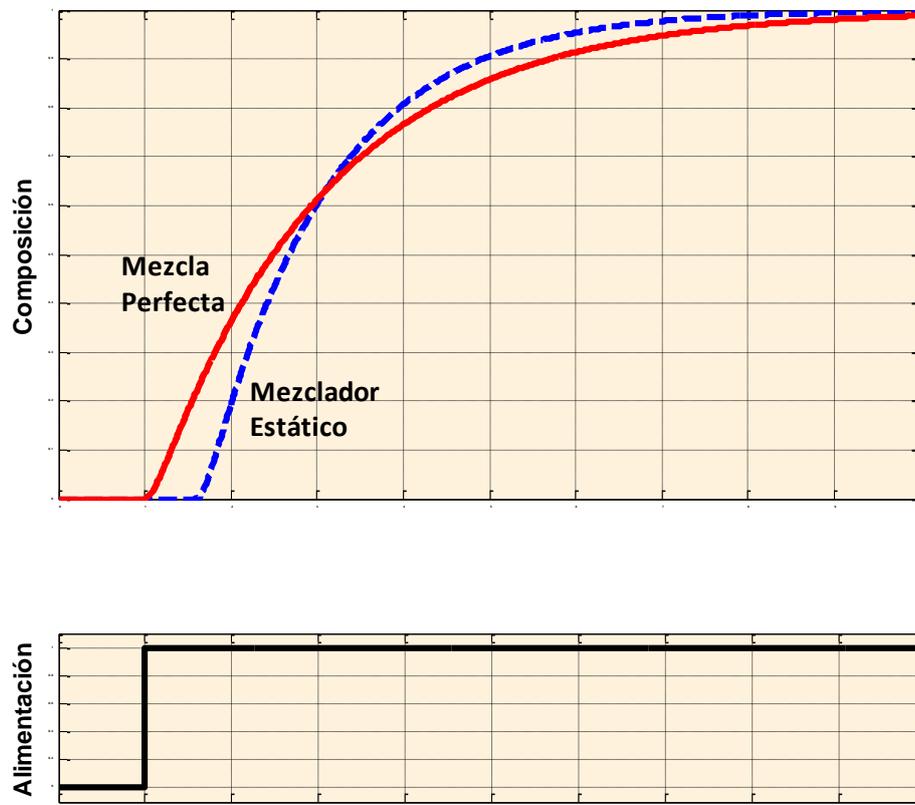
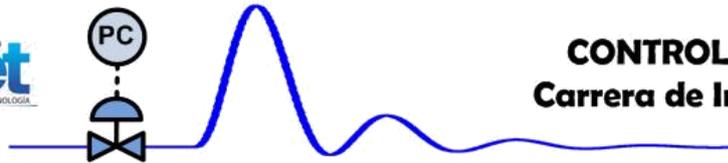


Figura 14: Transitorio de la composición en respuesta a un escalón con distintos grados de mezcla

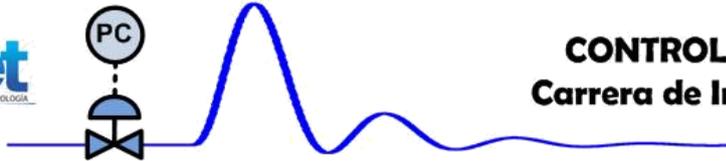
Debe quedar claro que, cuanto menor es el tiempo muerto ($\alpha \approx 1$), la performance obtenible por el lazo será mejor. Para lograr esto, se deben seguir los siguientes consejos:

- Altura y diámetro de los tanques deben ser aproximadamente iguales
- Usar mezcladores de alta velocidad
- Evitar la formación de vórtices colocando apropiadamente deflectores
- Introducir el flujo por arriba y extraer la corriente de salida por el fondo en el lado opuesto a la alimentación

No puede afirmarse que exista algo así como un "lazo típico de composición", ya que la dinámica global del proceso puede variar desde una capacidad preponderante (como el caso de un único reactor tanque) a muchas capacidades en serie e interactuantes (equipos en etapas como columnas, evaporadores múltiples, etc.). La ganancia estática del proceso por lo general es no lineal y relacionada inversamente con el caudal que circula. Como habitualmente no se mide composición sino otra variable relacionada con ella, si tal relación no es proporcional, surge otra no linealidad asociada al elemento de medición.

Por último los retardos del elemento final de control resultan en la mayoría de los lazos despreciables frente a las otras dinámicas. La característica de flujo se debe elegir para compensar no linealidades del proceso y del transmisor y debe analizarse para cada caso en particular.

Como el control de composición presupone la necesidad de mantener acotada la variable en un rango exigente de especificación, el controlador deberá incluir acción integral y por la naturaleza



generalmente lenta de la dinámica, sería deseable disponer de acción derivativa, siempre que la señal medida no sea excesivamente ruidosa.

TABLA RESUMEN

Características del lazo	Caudal y presión de líquidos	Presión de gas	Nivel de líquido	Temperatura y presión de vapor	Composición
Tiempo muerto	No	No	No	Normalmente	Siempre
Capacidad	Múltiples no interactuantes	A menudo una dominante	Integrador	Múltiples interactuantes	Una o varias interactuantes
Período último	1 - 10 seg	0.1 - 2 min	2 - 20 seg	20 seg - 1 h	1 min - 8 h
$K_V K_P K_T$	1 - 5	2 - 10	----	1 - 10	10 - 1000
Ruido	Siempre	Ninguno	Siempre	Ninguno	Generalmente
Controlador	PI	P o PI	P o PI	PID	PI o PID

BIBLIOGRAFÍA PARA CONSULTA

- **Shinskey, F. G., (1996). PROCESS CONTROL SYSTEMS, 4ta. Edición, McGraw-Hill, USA.**
El desarrollo de estas notas se basa fundamentalmente en el capítulo 4 de este libro que proporciona mucha información asentada en la extensa experiencia en el campo industrial del autor.
- **Smith, Cecil L (2009). PRACTICAL PROCESS CONTROL: TUNING AND TROUBLESHOOTING, John Wiley & Sons Inc. USA.**
Se trata de un libro eminentemente práctico pero en este caso, la información vinculada a cada tipo de lazo está distribuida en los distintos capítulos.
- **Acedo Sánchez, José (2003). CONTROL AVANZADO DE PROCESOS. TEORÍA Y PRÁCTICA.: Ediciones Díaz de Santos, Madrid, ES (ProQuest ebrary. Web. 2016).**
Libro similar al anterior, con mucha más información sobre hardware de control. En vez de analizar los lazos por las variables controladas, desarrolla el estudio de los sistemas de control de distintas unidades de operación (Capítulos 17 al 29).