Problemas de “Control e Instrumentación de Procesos Químicos”
4º curso de Ingeniería Química

Problema 23

En la Fig. 1 se pude ver un proceso al que entra una corriente manipulable A y otra corriente no manipulable B. La corriente A puede regularse por medio de un sistema de control de flujo tal como se aprecia en la figura. Cuando se aumenta en 2 l/min la consigna z del regulador de flujo de A, partiendo de un cierto estado estacionario de todo el sistema, la respuesta que se obtiene en la densidad ρ del producto de salida puede verse en la Fig. 2. En esta figura, las unidades del eje de tiempos son minutos y las de densidad Kg/l y esta última se mide con un transmisor calibrado en el rango 0.5-3 kg/l para dar una señal de 4-20 mA. Del mismo modo el transmisor de flujo de A está calibrado en el rango 0- 20 l/min.

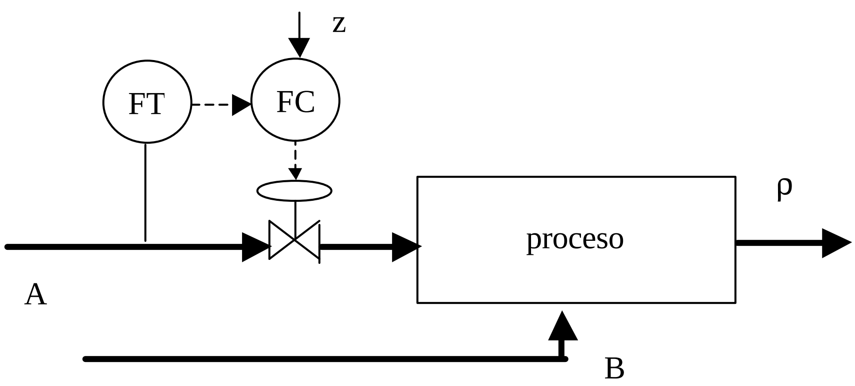


Fig. 1

Se pide:

1) Estimar un modelo matemático dinámico que relacione los cambios de consigna de caudal de producto A con los cambios en la densidad de salida del producto en esa zona de trabajo.
2) Proponer un sistema de control de densidad y dibujar un esquema del mismo utilizando nomenclatura ISA. Diseñar el regulador de densidad mas sencillo que no presente error estacionario frente a cambios escalón en la referencia y que minimize las desviaciones de la densidad sobre el valor de referencia cuando B experimenta cambios.
3) Dibujar un diagrama de bloques del proceso en lazo cerrado y expresar las relaciones que ligan los cambios en densidad con los cambios de referencia de densidad y de B, sí como las unidades de las distintas variables.
4) En lazo abierto, cuando el caudal B experimenta un salto en escalon, la densidad varia de forma continua sin estabilizarse, y cuando B experimenta un impulso unitario positivo (l/min) la densidad se estabiliza, al cabo de un cierto tiempo, en un nuevo valor 2 Kg/l por debajo del valor estacionario de partida. Sabiendo esto, se pide calcular el error

estacionario, si existe, que presentará el sistema en lazo cerrado con el regulador calculado en 2), frente a un cambio unitario (l/min) en escalón del caudal B.

5) ¿Cuál es el margen de fase del sistema en lazo cerrado calculado en 2)?, ¿Qué interpretación puedes dar a este valor?

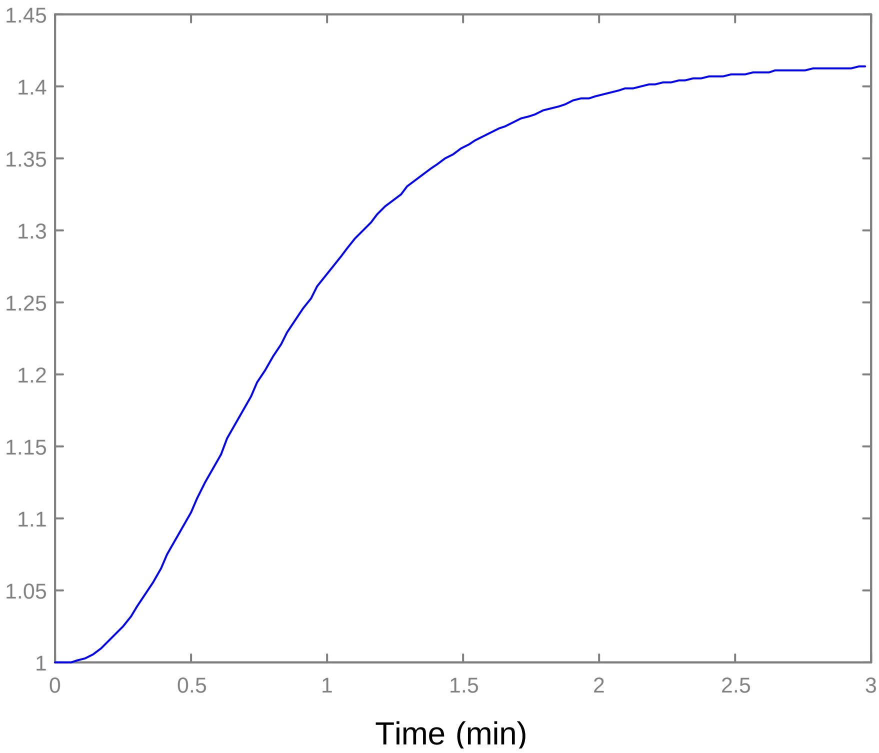


Fig.2

Solución

1) A la vista del enunciado del problema, debemos obtener el modelo matemático pedido a partir de la curva de respuesta de la Fig.2. Dado que se trata de un proceso sobreamortiguado, podemos intentar aproximar la respuesta por la de un sistema de primer orden con retardo:

$$\frac{Ke^{-ds}}{\tau s+1}$$

Para estimar este modelo, la ganancia se calcula del modo habitual, mediante el cociente entre el cambio en la salida en estado estacionario y el cambio en la entrada.

Con referencia a la Fig. 3 se tiene:

$$K = \frac{1.417 - 1}{2} = 0.21 \frac{Kg}{min}$$

o bien expresado en %/%:

$$K = \frac{(1.417 - 1)\dfrac{100}{3 - 0.5}}{2\dfrac{100}{20 - 0}} = \frac{18.8}{10} = 1.88 \frac{\%}{\%}$$

Para determinar la constante de tiempo y el retardo podemos seguir varios métodos, el mas común se basa en dibujar la recta tangente a la curva de respuesta de mayor pendiente, determinando luego los puntos de corte de la misma con paralelas en los puntos de inicio y final . El resultado puede verse en la figura:

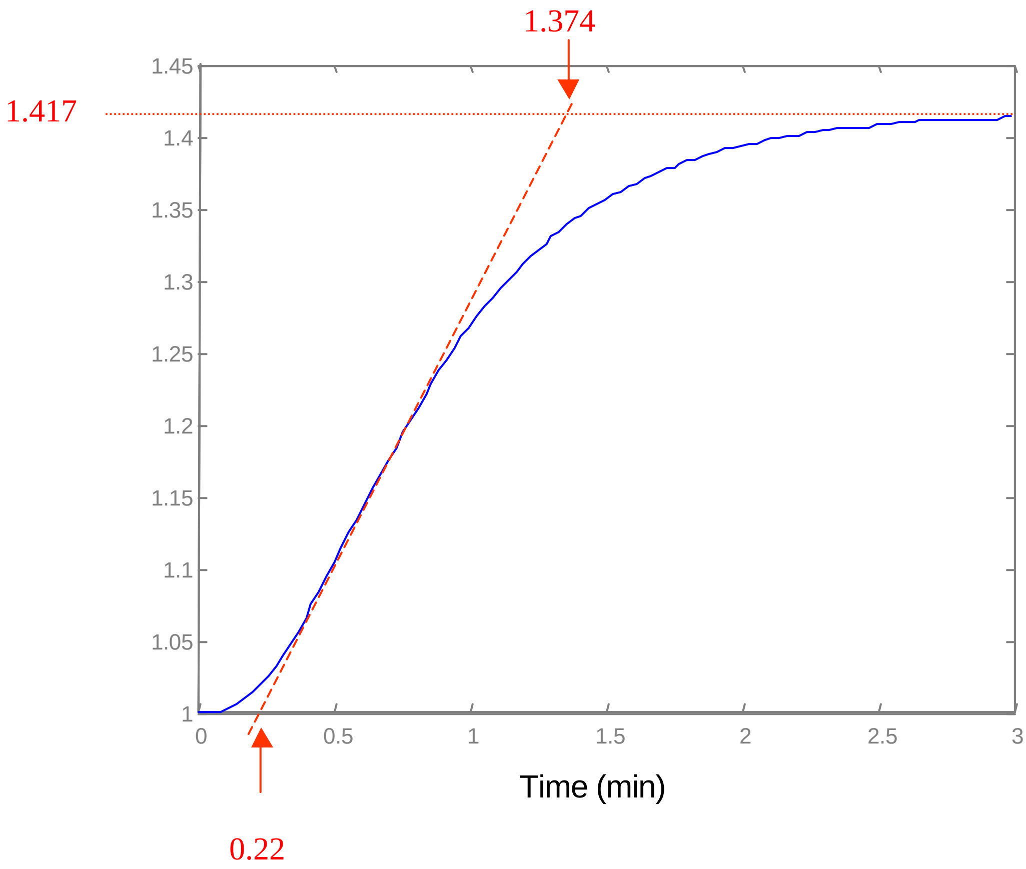


Fig.3

De donde se deduce:

d = 0.22 sg. τ = 1.374 – 0.22 = 1.15 sg. y el modelo estimado es:

$$\rho(s) = \frac{1.88e^{-0.22s}}{1.15s + 1} z(s)$$

2) Un esquema de un sistema de control de densidad puede verse en la Fig.4. Incorpora un transmisor de densidad y un regulkador que actua en cascada sobre la referencia de caudal de A.

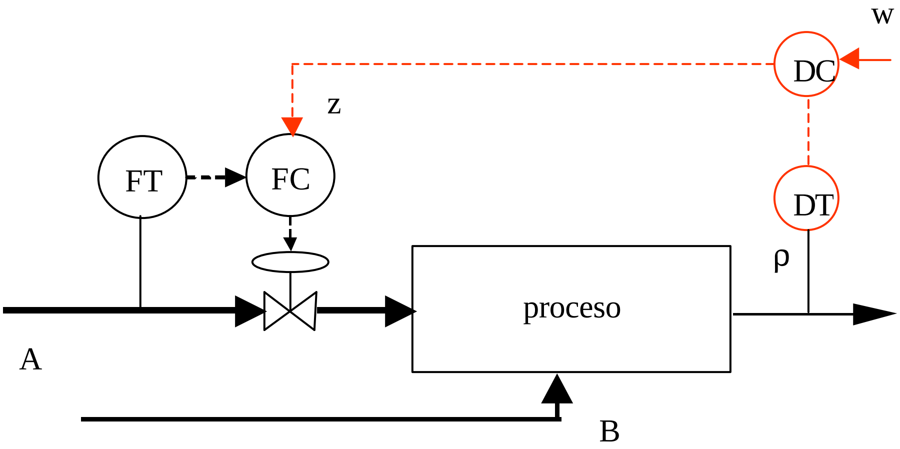


Fig.4

Dado que el proceso no presenta integradores en su respuesta frente a z, el regulador mas sencillo que puede eliminar errores estacionarios frente a cambios de consigna es un PI. De acuerdo a las especificaciones pedidas, podemos utilizar las Tablas de Lopez et al. con el criterio MIAE para la sintonía, ya que corresponden al tipo de modelo identificado, verifican la condición $d/\tau = 022/1.15 < 1$, y se ajustan al criterio pedido.
Ahora para calcular la ganancia K_p del regulador usaremos la fórmula:

$$K_p K = a\left(\frac{d}{\tau}\right)^b$$

Para la cual las tablas de Lopez, siguiendo el criterio MIAE nos proporcionan los valores:

Criterio	Proporcional	Integral
MIAE	a=0.984 b=-	a=0.608 b=-
MISE	a=1.305 b=-	a=0.492 b=-
MITAE	a=0.859 b=-	a=0.674 b=-

a = 0.984, b= - 0.986, con lo cual:

$$K_p = \frac{1}{1.88} 0.984 \left(\frac{0.22}{1.15} \right)^{-0.986} = 2.67\ \%/\%$$

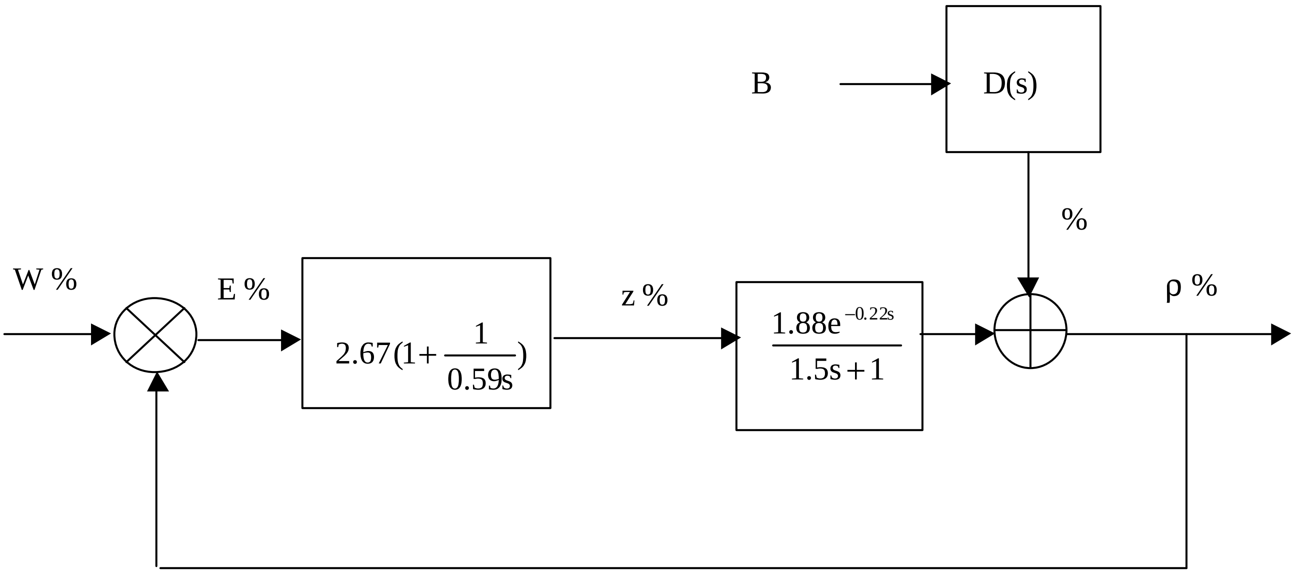
mientras que para el tiempo integral T_i se utiliza la fórmula:

$$\frac{\tau}{T_i} = a \left(\frac{d}{\tau} \right)^b$$

para la cual la tabla de Lopez da los valores: a = 0.608, b = - 0.707 , lo que conduce a:

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1}{1.15} 0.608 \left(\frac{0.22}{1.15} \right)^{-0.707} \Rightarrow T_i = 0.59\text{sg.}$$

3) Un diagrama de bloques del proceso puede observarse en la figura:



La salida del bloque D, desconocido, debe estar en %, mientras que la entrada puede figurar en l/min puesto que no sabemos nada del transmisor respectivo. Del diagrama se deduce la expresión de las funciones de transferencia que relacionan la densidad con la referencia y el caudal B:

$$\rho(s)=\frac{GR}{1+GR}w+\frac{D}{1+GR}B=\frac{\frac{1.88e^{-0.22s}}{1.15s+1}2.67\frac{0.59s+1}{0.59s}}{1+\frac{1.88e^{-0.22s}}{1.15s+1}2.67\frac{0.59s+1}{0.59s}}w+\frac{D}{1+\frac{1.88e^{-0.22s}}{1.15s+1}2.67\frac{0.59s+1}{0.59s}}B=$$

$$=\frac{1.88e^{-0.22s}2.67(0.59s+1)}{(1.15s+1)0.59s+1.88e^{-0.22s}2.67(0.59s+1)}w+\frac{0.64s(1.5s+1)D}{(1.15s+1)0.59s+1.88e^{-0.22s}2.67(0.59s+1)}B$$

4) La expresión del error en lazo cerrado ante un cambio en B viene dada por:

$$E(s)=-\frac{D}{1+GR}B=-\frac{D(s)}{1+\frac{1.88e^{-0.22s}}{1.15s+1}2.67\frac{0.59s+1}{0.59s}}B=\frac{-0.59s(1.15s+1)D(s)}{(1.15s+1)0.59s+1.88e^{-0.22s}2.67(0.59s+1)}B$$

y el error estacionario frente a un cambio escalón en B puede calcularse como:

$$e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE(s)=\lim_{s\to 0}s\frac{-0.59s(1.15s+1)D(s)}{(1.15s+1)0.59s+1.88e^{-0.22s}2.67(0.59s+1)}\frac{1}{s}=\lim_{s\to 0}\frac{-0.59sD(s)}{1.88\ \ 2.67}$$

Para calcular este límite, según el enunciado, se sabe que D(s) contiene un integrador puesto que responde variando monótonamente sin estabilizarse ante un cambio escalón en B, y además, solo tiene un integrador puesto que ante un impulso alcanza un valor estacionario. Esto hará que se cancele la s de la expresión anterior. En realidad, la única información necesaria para resolver el problema es la relativa al valor estacionario de la la respuesta a un impulso en B en lazo abierto. Este viene dado por:

$$\lim_{s\to 0}sD(s)1=-2\quad Kg/l=-2\frac{100}{3-0.5}=-80\%$$

de modo que el error anterior alcanza el valor:

$$e_{ss}=\lim_{s\to 0}sE(s)=\lim_{s\to 0}\frac{-0.59sD(s)}{1.88\ \ 2.67}=\frac{(-0.59)(-80)}{1.88\ \ 2.67}=9.4\%$$

5) Para cálcular el margen de fase del sistema hay que evaluar el valor de la expresión MF = π + arg(G(jω)R(jω)) en un valor de la frecuencia para el cual | G(jω)R(jω)|=1.

Para estimar dicha frecuencia debemos, por tanto, resolver primero la ecuación:

$$\left|\frac{1.88e^{-0.22j\omega}}{1.15\,j\omega+1}\,2.67\,\frac{0.59\,j\omega+1}{0.59\,j\omega}\right|=1; \qquad \frac{1.88}{\sqrt{1.15^2\,\omega^2+1}}\,2.67\,\frac{\sqrt{0.59^2\,\omega^2+1}}{0.59\omega}=1$$

$$\frac{72.4}{1.15^2\,\omega^2+1}\,\frac{0.59^2\,\omega^2+1}{\omega^2}=1; \qquad 72.4(0.59^2\,\omega^2+1)=(1.15^2\,\omega^2+1)\omega^2;$$

$$1.15^2\,\omega^4-24.2\omega^2-72.4=0; \qquad \omega^2=\frac{24.2\pm\sqrt{24.2^2+4\;1.15^2\;\;72.4}}{2\;1.15^2}=\frac{24.2\pm 31.12}{2\;1.15^2}=20.9$$

$$\omega=4.57\ \ \mathrm{rad/min}$$

Ahora podemos calcular el MF:

$$\mathrm{MF}=\pi+\arg\left[\frac{1.88e^{-0.22j\omega}}{1.15\,j\omega+1}\,2.67\,\frac{0.59\,j\omega+1}{0.59\,j\omega}\right]=\pi+\left(-0.22\omega+\arctan 0.59\omega-\arctan 1.15\omega-\frac{\pi}{2}\right)=$$

$$=\frac{\pi}{2}-0.22(4.57)+\arctan 0.59(4.57)-\arctan 1.15(4.57)=\frac{\pi}{2}-1+1.21-1.38=0.4\ \mathrm{rad}=$$

$$=23^{\circ}$$

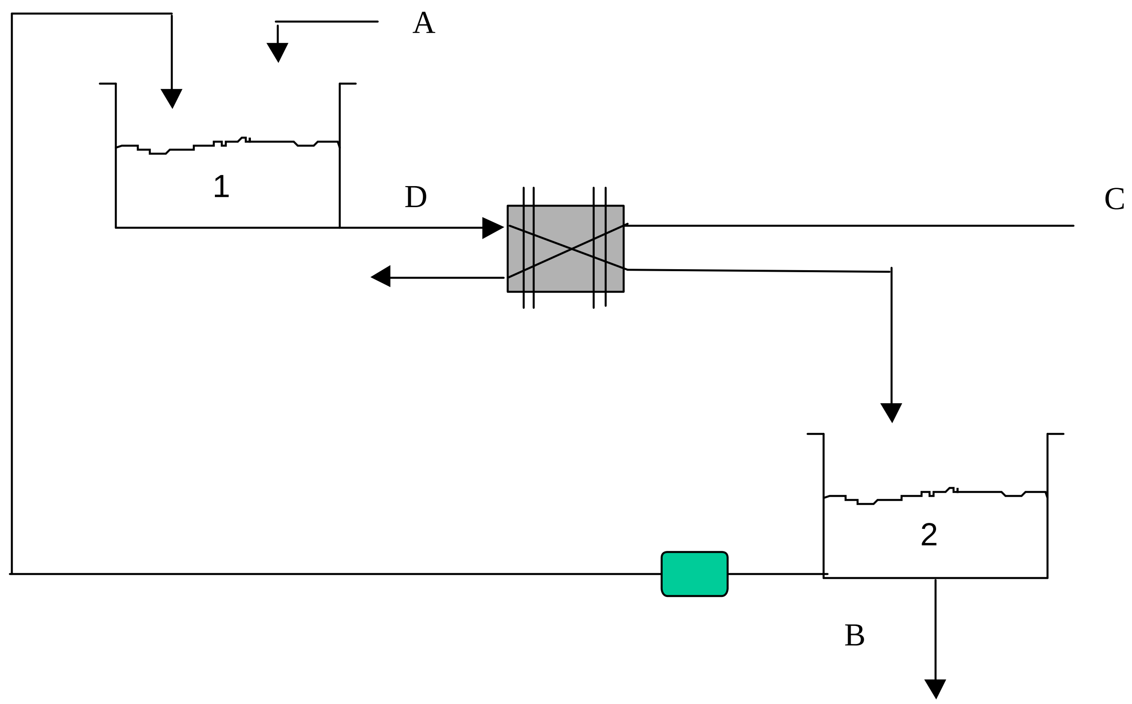
Basándonos en la relación entre margen de fase y amortiguamiento en sistemas de segundo orden, el pequeño margen de fase encontrado nos permite predecir que la respuesta del sistema tendra un sobrepico alto y el grado de robustez será pequeño frente a cambios en el proceso que aumenten el desfase del sistema, como retardos y constantes de tiempo, existiendo peligro de desestabilización si estos aumentan por algún motivo.

Problema 24

En el diagrama de la figura se puede ver un proceso en el que una corriente A, no manipulable y que experimenta cambios significativos, intercambia calor con otro líquido C a alta temperatura tras pasar por el depósito 1. En el punto de suministro del líquido C, la temperatura es sensiblemente constante, pero la presión sufre variaciones de alguna importancia. La corriente A, tras atravesar el intercambiador, va al depósito 2, donde una parte es reciclada al depósito 1 por medio de un sistema de bombeo que impone un caudal constante y otra parte, B, es la salida del proceso. Se desea mantener el caudal y temperatura de B tan constantes como sea posible, así como garantizar la seguridad del proceso. Existe un sistema de rebose en el depósito 2 que hace que no sea problemático un desbordamiento en dicho depósito.

Se pide:

Elegir la instrumentación y los lazos de control adecuados para ello y dibujar el correspondiente esquema de control según las normas ISA, justificando el mismo.



Solución

Los objetivos de regulación son mantener el caudal y temperatura de B. Además, por motivos de seguridad, deben regularse los niveles en ambos depósitos y garantizarse la circulación de 1 a 2 a través del cambiador.

El caudal de B puede mantenerse mediante un controlador de flujo y un transmisor de flujo. Para actuar sobre la temperatura de B, lo mas sencillo, y que no interfiere en los otros circuitos, es variar el caudal de C. No obstante, como la presión de alimentación de C experimenta cambios significativos, lo lógico es utilizar una estrucura en cascada en que el regulador de temperatura actue sobre la consigna de un regulador de caudal de C, de este modo este último regulador absorve las perturbaciones de presión de alimentación que no se transmitirán de forma significativa a la temperatura.

El nivel del depósito 1, puesto que la entrada A es no manipulable, debe regularse con la salida D. Nótese que, aunque A fuese cero, la salida D no seria nula de forma estable debido al caudal de recirculación y, por tanto, el intercambiador no quedaría vacio. Una consecuencia secundaria de este lazo es que modifica la temperatura de salida, con lo cual si se quiere mantener con precisión, debe incorporarse una corrección feedforward al caudal de C para compensar estas perturbaciones.

El nivel del depósito 2 debe regularse también pero, al no quedar otras variables manipuladas, no que da mas remedio que establecer un control overrride sobre el flujo de B. Nótese que aquí lo importante es mantener el nivel por encima de un mínimo, ya que debe protegerse el equipo de bombeo y los problemas de rbose no se contemplan como tales.

Para la medida de estas variables se usarán transmisores de temperatura, nivel y caudal convencionales. El conjunto de la propuesta puede verse en la figura: