1 Control de proceso multivariable: control de nivel y de caudal

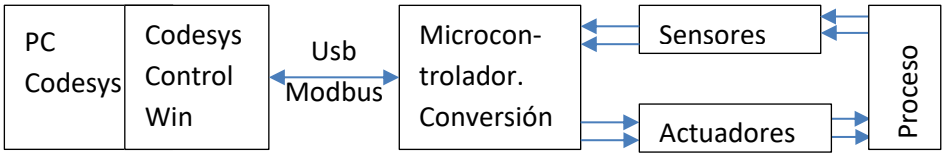
1.1 Objetivo

El objetivo de la práctica es practicar con estructuras de control avanzado en un sistema de control con múltiples entradas y salidas. Por una parte, se trabajará en la puesta en marcha y monitorización del sistema y, por otra parte, en el diseño e implementación de controladores, así como estructuras de control multivariable. Se utilizarán diferentes técnicas de control y de diseño de controladores para el control del nivel y del caudal.

1.2 Descripción del material a utilizar

1.2.1 Esquema general

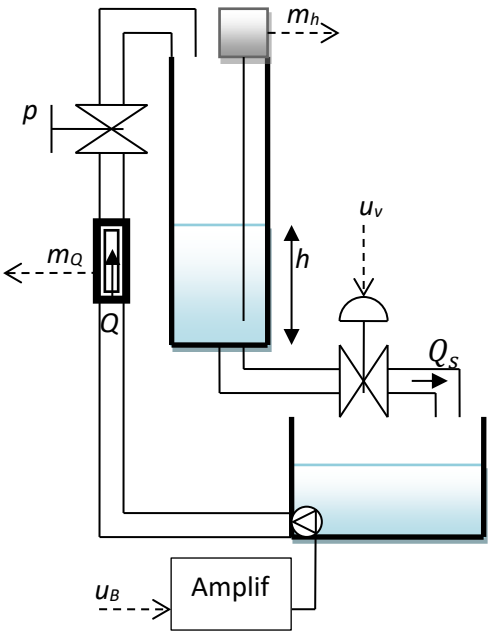
El esquema general del material a utilizar es el siguiente:



En el proceso se tienen dos sensores que generan señales de diferente naturaleza y dos actuadores que requieren señales también de distinta naturaleza para su funcionamiento. El microcontrolador se encarga de realizar las mediciones de los sensores y generar los mensajes que envía al PC vía Modbus. Asimismo, el microcontrolador se encarga de leer los mensajes que recibe del PC y los convierte en las señales específicas que requieren los actuadores. El PC ejecuta los algoritmos de control a través del runtime *Codesys Control Win* que simula un PLC. El PC se programa a través del propio PC mediante Codesys y permite también la monitorización del comportamiento del sistema completo.

1.2.2 Proceso, sensores y actuadores

El sistema a controlar incluye dos depósitos a distinto nivel con una bomba de recirculación y una válvula pilotada desde un servomotor. Las variables medibles serán el caudal de entrada al depósito superior y el nivel de llenado del mismo. Las variables manipulables serán la tensión en la bomba y el grado de apertura de la válvula del conducto horizontal.

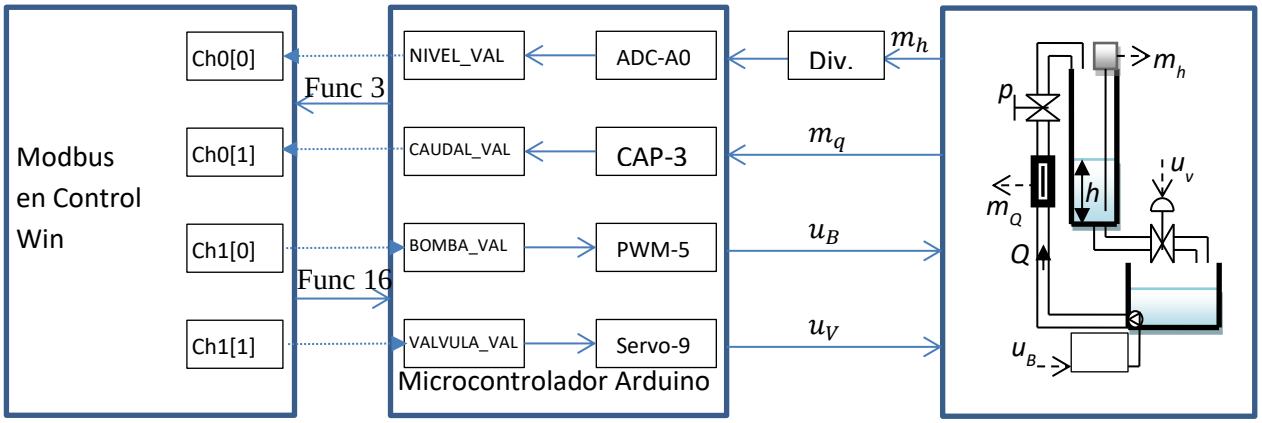


- En el **depósito inferior** el sistema tiene una **bomba** sumergible que se acciona con un motor de corriente continua que requiere una tensión de 0 a 15 voltios. Para generar esta tensión se utiliza un **amplificador** conmutado que se alimenta a 15 V y que recibe una señal PWM de manera que la tensión sobre la bomba varía de 0 a 15 V cuando el ciclo de trabajo de u_B varía del 0 al 100%
- El caudal impulsado por la bomba sube por un conducto vertical en el que se atraviesa un

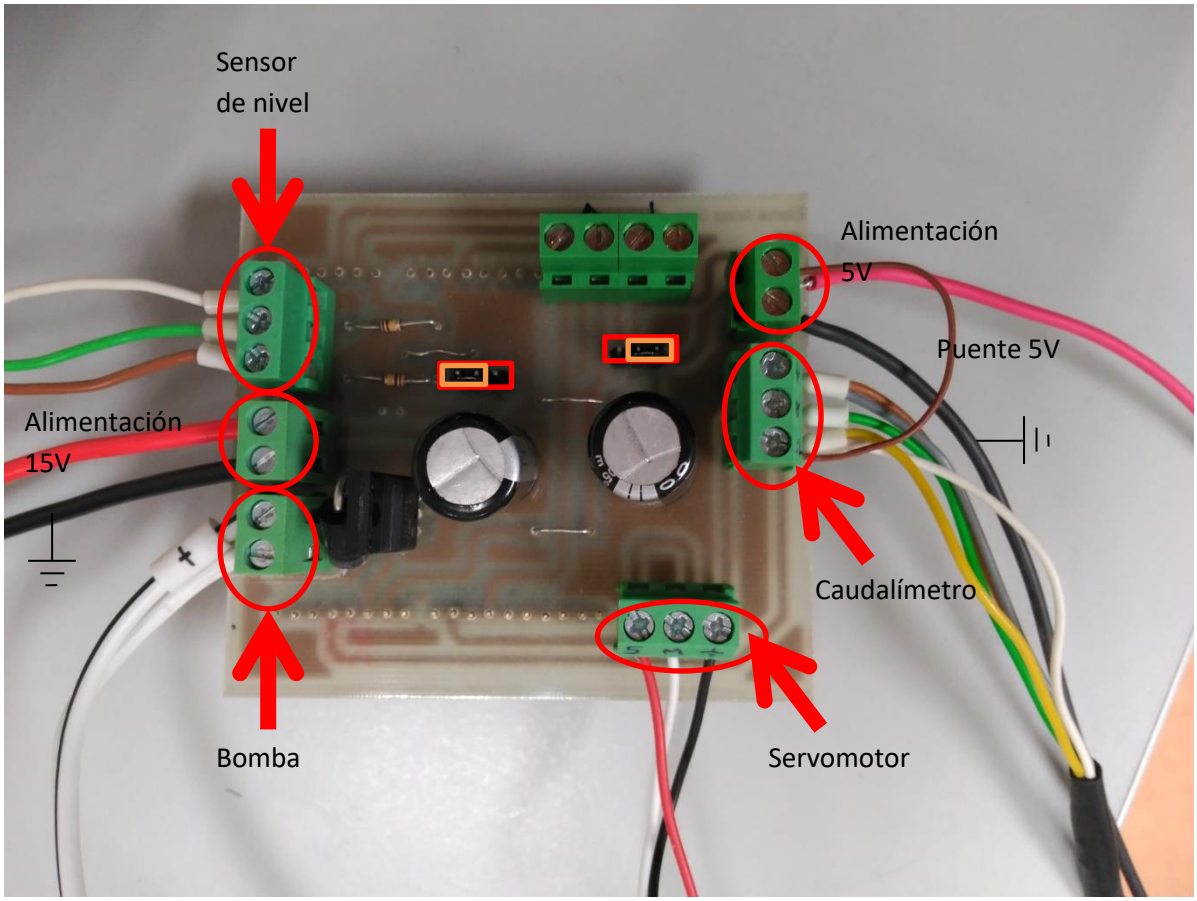
caudalímetro que genera una señal cuadrada cuya frecuencia depende del caudal que la atraviesa. La frecuencia de dicha señal varía entre 0 y 140 Hz cuando el caudal que atraviesa el caudalímetro varía entre 0 y 6 l/min. La conexión de los cables del caudalímetro son como siguen:
    - Gris/marrón: masa
    - Blanco/amarillo: 5V
    - Verde: señal cuadrada de medición
- En el conducto vertical existe una **válvula** que se acciona manualmente y sirve para provocar perturbaciones en el sistema.
- El agua de llenado cae en el **depósito superior** desde la parte de arriba, y éste tiene un conducto en la parte inferior por el que se vacía hacia el depósito inferior.
- En el depósito existe un **sensor de nivel** sumergible de manera que genera una señal continua de tensión entre 0 y 10 voltios cuando el agua sube entre 0 y 50 cm. El cableado del sensor de nivel es como sigue:
    - marrón: masa
    - blanco: alimentación de 15 V
    - verde: señal de medición de 0 a 10 V
- En el conducto inferior horizontal de vaciado existe una **válvula** que se mueve con ayuda de un **servomotor**. El servomotor requiere una señal PWM de 5 voltios y 20 ms de periodo y funciona de manera que cuando la señal tiene un tiempo a nivel alto de 1 ms la válvula se abre al máximo, dejando caer la mayor cantidad de agua, y cuando tiene el tiempo a nivel alto es de 2 ms, se cierra al máximo. El cableado del servomotor es como sigue:
    - Negro: masa
    - Rojo: alimentación de 5 V
    - Blanco: señal PWM (periodo 20 ms, ciclo de trabajo entre 1 y 2 ms).

1.2.3 Tarjeta de interfaz (microcontrolador)

Para poder interactuar con las cuatro señales descritas anteriormente, se utiliza un microcontrolador que es capaz de generar las dos señales PWM requeridas por el amplificador de la bomba y por el servomotor de la válvula, y que es capaz de medir la señal continua generada por el sensor de nivel y de capturar la señal de pulsos generada por el caudalímetro. La tarjeta de interfaz tendrá como objetivo permitir una interacción sobre el proceso únicamente con la comunicación serie vía USB y el protocolo Modbus.



La conexión de los actuadores y sensores con la tarjeta interfaz es como se muestra en la figura



En el microcontrolador se utiliza el protocolo Modbus vía puerto serie y los registros utilizados están en las direcciones 0, 1, 2 y 3 con el siguiente orden:

```
0 - NIVEL
1 - CAUDAL
2 - BOMBA
3 - VALVULA
```

1.3 Puesta en marcha del sistema de monitorización y control

1. Comprobad el cableado entre el microcontrolador y el proceso. Comprobad la alimentación de los sensores y actuadores. Comprobad que todas las masas de alimentación y del microcontrolador están conectadas.
2. Conectad el microcontrolador al PC mediante el cable USB y descargar el programa de interfaz proporcionado, anotando el puerto COM en el que está conectado el microcontrolador.
3. Abrir el software Codesys
4. Crear un Proyecto nuevo: Codesys -> Nuevo proyecto -> proyecto standard -> ubicación: E:\Química Industrial\Control Avanzado -> nombre: practica
5. Indicar que el proyecto es para ejecutar en PC con Windows (que hará las veces de PLC): Codesys Control Win V3 e indicar que el código del programa principal (PLC_PRG) será ST. Aceptar
6. En el árbol del proyecto pinchar sobre Device (Codesys Control Win V3) -> agregar dispositivo -> Buses de campo -> Modbus -> Puerto serie Modbus -> Modbus COM Port (el PC será el maestro de las comunicaciones)

7. Pinchar sobre Modbus_COM_Port, botón derecho -> agregar el dispositivo -> Maestro serie Modbus -> Modbus Master COM Port
8. Pinchar sobre Modbus_Master_COM_Port, botón derecho -> agregar dispositivo -> Modbus Esclavo, Puerto COM
9. Doble click en Modbus_COM_Port del árbol del proyecto para configurarlo. En puerto COM ponemos el de Arduino (será del tipo COMx, con x>1). El resto de parámetros se quedan igual, pues son los que se han utilizado en el código de Arduino (9600 baudios, paridad EVEN, 8 bits de datos, 1 bit de parada).
10. Doble click en Modbus_Maestro_Puerto_COM: activamos el reinicio de comunicación.
11. Doble click en Modbus_Esclavo_Puerto_COM para configurarlo.
12. Pinchar en la pestaña "configuración de esclavo Modbus": Dirección de esclavo (ID): 1 (el que hay en el códiglo Arduino).
13. Pinchar en la pestaña "Canal esclavo Modbus". Pinchar bajo en "Agregar canal"
    a. Channel 0 (para lecturas): Read, función Modbus 3, desplazamiento 0 (las lecturas están en las dos primeras posiciones de Arduino), longitud 2 (hay dos variables a leer).
    b. Channel 1 (para escrituras): Write, función Modbus 16, desplazamiento 2 (las escrituras están en la tercera y cuarta posición de Arduino), longitud 2 (hay dos variables a escribir).
14. Una vez configurado el puerto serie vamos a trabajar con las variables que se intercambiarán vía Modbus. Crearemos dos programas para leer y escribir los datos sobre Modbus. Pinchar sobre Application con el botón derecho -> Agregar objeto -> POU -> Nombre: Lecturas -> Tipo: Programa -> Lenguaje: Texto estructurado (ST). Aceptar
15. En la parte superior del código de lecturas añadir una variable con el primer icono (o botón derecho debajo de Ámbito -> insertar). En nombre ponemos Nivel_MB (variable que se leerá vía Modbus) y en tipo de datos WORD (también se puede ir a "accesibilidad" en el despeglable y seleccionar WORD). Crear también la variable Caudal_MB del mismo tipo.
16. Crear también las variables Nivel y Caudal de tipo REAL que almacenarán las variables en tanto por cien.
17. Generar ahora en la parte inferior el código para la lectura de los sensores y su conversión de unidades digitales (de 0 a 10000 según se han definido en Arduino) a unidades de tanto por cien con dos decimales:

```
(* Lecturas *)
nivel_cm := INT_TO_REAL(nivel_MB)/100.0;
caudal_lmin := INT_TO_REAL(caudal_MB)/100.0;
```

18. Repetir los pasos anteriores para crear un programa en ST para las escrituras en los actuadores y su conversión de unidades de proceso (en tanto por cien) a unidades digitales (de 0 a 10000 según se han definido en Arduino). Crear para ello las variables Bomba_MB y Valvula_MB de tipo WORD, y las variables bomba y valvula de tipo REAL. El código de conversión sería:

```
(* Escrituras *)
bomba_MB := REAL_TO_INT(bomba*100.0);
valvula_MB:= REAL_TO_INT(valvula*100.0);
```

19. Para ejecutar los programas creados: MainTask y ahí añadir llamadas a programas, en este caso a Lecturas y Escrituras creados anteriormente.
20. Para asignar las variables creadas en los programas anteriores a los mensajes Modbus, ir a Modbus_Esclavo_puerto_COM -> ModbusGenericSerialSlave Asignación E/S. Las variables de lectura irán a Channel0 y las de lectura a Channel1, según se ha configurado anteriormente. Las variables a asignar deben ser las creadas en los programas anteriores. Pinchamos en las variables (en blanco) y en los tres puntos que aparecen. Ahí buscamos las variables dentro de los programas creados en Application. Las asignaciones quedarán como sigue:

   a. Channel 0[0]: Application.Lecturas.Nivel_MB
   b. Channel 0[1]: Application.Lecturas.Caudal_MB
   c. Channel1[0]: Application.Escrituras.Bomba_MB
   d. Channel1[1]: Application.Escrituras.Valvula_MB
21. Pinchar en always update variables: enabled 1
22. Para compilar el código: usar el icono o bien F11
23. Poner en marcha el PLC (el runtime de windows que hace de PLC). Start PLC
24. Pinchar doble click en "Device (CODESYS Control Win V3)" para conectar codesys con el dispositivo en el que ejecutar el programa (en este caso, el propio PC gracias al codesys control win en ejecución vía "start PLC"). Pinchar en el desplegable de la derecha el PC (saldrá el identificador de red del PC, en el laboratorio PC-0x). Todos los elementos deberían tener una bola verde indicando la correcta comunicación

25. Para comunicarse con el PLC (en este caso el PC): Iniciar Sesión o bien Alt+F8, icono engranaje con enchufe y círculo verde, al lado del de compilar, aceptando la descarga del código.
26. Pulsar Inicio de programa (F5) o el botón triangular.
27. Para cambiar valores: ir al código donde está generada la variable y escribir el valor en “predefinir” y a continuación Control+F7 para cargarlo. Probar a modificar el valor de la bomba (con valores de 0 a 100) y de la válvula (también de 0 a 100). Ir al programa de lecturas y comprobar que se leen valores aceptables de nivel y caudal.
28. Poner a cero la bomba y la válvula y parar la ejecución del programa con el botón Stop. Desconectarse del PLC con el icono con el enchufe y aspa roja.
29. Ahora incluiremos una interfaz para poder modificar los actuadores y visualizar el funcionamiento: Application -> Agregar -> Objeto -> Visualización. Para editar cada elemento se debe hacer doble click sobre cada uno de ellos, con lo que se desplegará un menú de opciones en el lateral derecho de la pantalla. Para asignar una variable a un elemento (ya sea de entrada o de salida), se debe insertar el nombre de esa variable (precedido por el POU en el que se encuentra) en la casilla llamada “Variable”. En el caso de que se quieran mostrar por campo de texto los valores numéricos de alguna variable del programa, en el campo de texto debe escribirse el tipo de número que se quiere mostrar (en formato %f, %i,…), y en Variables de texto debe introducirse la variable a mostrar.
30. Añadir ahora una visualización de la evolución de las señales a lo largo del tiempo: Application -> Agregar -> Objeto -> Registro de traza. Poner en marcha la aplicación y mostrar los datos accediendo a la pestaña de Traza en Codesys, pulsando el botón derecho sobre la gráfica y seleccionar la opción Descarga de traza. La gráfica comenzará a mostrar los datos del experimento en tiempo real. Con el ratón y la rueda se puede modificar la visualización (tiempo y amplitud). Una vez acabado el experimento se debe volver a la pestaña de la Traza, pulsar el botón derecho sobre la gráfica y seleccionar la opción Parar trace, que parará la toma de datos. En este momento se puede observar la totalidad de los datos obtenidos y modificar la escala. Para guardar los datos del experimento, se debe pulsar el botón derecho sobre la gráfica de la Traza y seleccionar Guardar la traza, de manera que los datos de la gráfica quedarán guardados en un fichero.

1.4 Diseño e implementación de controladores

Para el diseño de los controladores se utilizarán técnicas experimentales si no se indica lo contrario.

31. **Control de nivel mediante bomba tipo relé**. Iniciad una captura de datos mediante una traza que almacene (por lo menos) el valor de la bomba y el valor del nivel. Realizar un control de nivel actuando sobre la bomba utilizando un controlador tipo relé manteniendo la válvula de vaciado fija (electroválvula horizontal, la inferior) al 50% y la referencia al 50 %, y variando la acción de la bomba entre el 30% y el 90%. Realizar las mediciones necesarias que permiten diseñar un controlador tipo PID a partir del control tipo relé (ver anexo).
32. **Control de nivel mediante bomba tipo PID**. Implementad el controlador de nivel actuando sobre la comba con la función PID. Cread una traza donde se vean las 4 señales del proceso más la referencia de nivel. Poned en marcha el controlador con la referencia de nivel al 20 % y la válvula al 50% y esperad a que se estabilice el nivel, la bomba y el caudal.
    a. Realizad un escalón en la señal de referencia de nivel de 20 % a 40 %, midiendo el tiempo de establecimiento aproximado y la sobreoscilación.
    b. Cuando el nivel esté estable en 40 %, cambiad el valor de la electroválvula inferior del 50% al 70%, midiendo el error máximo cometido en el seguimiento de la referencia de nivel, y el tiempo que el nivel tarda en volver al valor de consigna. En los siguientes puntos se verá cómo mejorar el comportamiento frente a esta perturbación mediante una prealimentación del valor de la electroválvula. Para este experimento, poned en marcha una traza adicional en la que se almacene el resultado del escalón en las variables [t válvula bomba].
    c. Estando el sistema estable (con referencia de nivel 40% y electroválvula al 70%), aplicad ahora un cambio de unos 45º-60º en la válvula manual y ved cómo afecta al caudal y al nivel. 45º puede ser poca perturbación y 60º puede hacer saturar la bomba y que no se reestablezca el nivel en el valor de la referencia. Buscad el ángulo correcto para tener un experimento adecuado. Calculad el error máximo que se produce en el seguimiento de la referencia de nivel. Más adelante se tratará de mejorar este comportamiento con un control en cascada con ayuda de la medición del caudal que atraviesa dicha válvula manual.
33. **Control de nivel mediante bomba tipo PID + prealimentación de pertubación medible**. Calcular una prealimentación estática de la perturbación de la válvula horizontal (la inferior) y sumarla a la acción de control (la bomba) del controlador de nivel. Para el cálculo utilizad la ganancia estática que indica cuál ha sido el cambio necesario en la bomba frente al cambio en la válvula para devolver el nivel al valor de referencia ($K_{ff,BV} = \Delta Bomba(\infty)/\Delta Válvula(\infty)$). Suele tener un valor entre -3 y -0.5 según el puesto. Realizad un experimento en el que, partiendo en régimen permanente con referencia de nivel al 40% y la válvula al 50%, se aplica un escalón a la electroválvula a 70% y medid de nuevo el error debido a dicha perturbación, comprobando si ha mejorado respecto del error inicial con el controlador sencillo de nivel mediante bomba.
34. **Control de nivel mediante bomba tipo PID + control de rango medio mediante válvula.** En este caso ya no se debe utilizar la prealimentación, sólo el control de nivel (que actúa sobre la bomba) más el controlador de rango medio (que actúa sobre la válvula) que se va a diseñar e implementar.
    a. Realizad para dicho diseño un control inicial de valor medio de bomba mediante la válvula con un control tipo relé con histéresis, manteniendo la referencia de nivel fija al 20% y la referencia de bomba al 50%. Utilizad como actuaciones límite de la válvula los valores

40% y 70% . Modificar estos niveles o el nivel de referencia de nivel para conseguir unas oscilaciones simétricas. La histéresis debe ser del orden de magnitud del ruido que presenta la bomba debido al ruido de medida cuando el nivel está controlado de forma estable. Este controlador debe ser por lo menos unas 3 veces más lento que el controlador de nivel con bomba con el que trabajará en paralelo (bajad para ello el valor de Kp obtenido en el ajuste, que llevará a un controlador más lento). Unos valores orientativos (que llevan a un control muy lento pero estable) son $K_p = -0.1$ y $T_i = 100$.

b. Realizad experimentos en los que inicialmente se está con la referencia de nivel al 20% y la referencia de bomba media al 40%. Anotad los valores de nivel, bomba y válvula en los que se ha estabilizado el sistema (se hará lo mismo en las siguientes situaciones). Cuando esté estable, cambiad la referencia de nivel al 80%, y cuando esté estable el sistema, cambiad la referencia de bomba al 90%. Cuando esté estable, cambiad la referencia de nivel al 20%. Cuando esté estable, perturbad durante 5 segundos el sistema con ayuda de la válvula manual a 60º y devolviéndola a 0º, comprobando que sólo actúa de forma rápida la bomba (y no la válvula) para corregir dicha perturbación.

35. **Control de caudal mediante bomba.** Diseñad un control PID de caudal actuando sobre la bomba utilizando el método de experimento escalón con valor final conocido. Implementad el controlador mediante la función PID y probadlo modificando la referencia de caudal con valores de 40%, 60%, y 80%. Medid el tiempo de establecimiento para seguir referencias. Perturbad el sistema con la válvula vertical y comprobad que se mantiene el caudal solicitado. Comprobad que la electroválvula no perturba a la medición de caudal. Buscad cuáles son los valores mínimo y máximo de caudal que se pueden medir (el valor mínimo vendrá dado por el propio sistema de medición que utiliza el caudalímetro, que necesita un caudal mínimo para que la turbina gire, mientras que el caudal máximo será el que se obtenga con la bomba al 100% y la válvula manual completamente abierta).
36. **Control en cascada: Control de caudal mediante bomba (esclavo) + Control de nivel mediante caudal (maestro).** Diseñad un control en cascada de nivel con el control de caudal anterior. El nuevo control de nivel dará como acción de control la referencia de caudal del controlador del punto anterior. Con el controlador de caudal en funcionamiento, cambiad el caudal de referencia en forma de escalón y comprobad como varía el nivel. Utilizad un método de control tipo relé para diseñar el controlador, utilizando como referencias de caudal mínimo y máximo valores que el sistema sea capaz de medir. Cread una traza donde se vean las 4 señales del proceso más la referencia de nivel. Poned en marcha el controlador con la referencia de nivel al 20 % y la válvula al 50% y esperad a que se estabilice el nivel, la bomba y el caudal.
    a. Realizad un escalón en la señal de referencia de nivel de 20 % a 40 %, midiendo el tiempo de establecimiento aproximado y la sobreoscilación.
    b. Estando el sistema estable (con referencia de nivel 40% y electroválvula al 70%), aplicad ahora un cambio de unos 45º-60º en la válvula manual y ved cómo afecta al caudal y al nivel. Calculad el error máximo que se produce en el seguimiento de la referencia de nivel y comprobad si se ha mejorado el comportamiento respecto al error inicial con el controlador sencillo de nivel mediante bomba.

Bibliotecas > Biblioteca Util > Regulador > pid

pid

La biblioteca util.library pone a disposición el siguiente bloque de funciones de regulador PID:

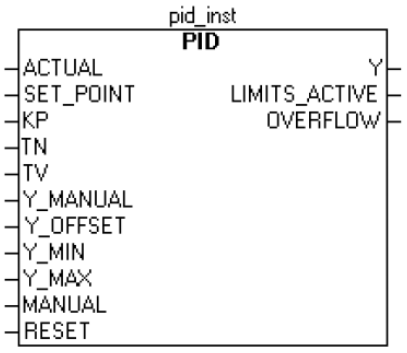


Fig. 778: PID en FBD

Como diferencia al regulador PD este bloque de funciones contiene otra entrada REAL TN para el tiempo de reajuste en seg (p.ej. "0.5" para 500 mseg).

Entradas del módulo:

Variable	Tipo de datos	Descripción
ACTUAL	REAL	Valor real de la magnitud controlada
SET_POINT	REAL	Valor nominal, magnitud de guía
KP	REAL	Coeficiente de proporcionalidad, ganancia de la parte P
TN	REAL	Tiempo de reajuste, ganancia recíproca de la parte I; Indicación en segundos, p.ej. "0.5" para 500 mseg
TV	REAL	Tiempo de acción derivada, ganancia de la parte D; Indicación en segundos
Y_MANUAL	REAL	Valor de salida manual; se emite en Y, cuando MANUAL = TRUE
Y_OFFSET	REAL	Desplazamiento para magnitud de ajuste
Y_MIN, Y_MAX	REAL	Límite inferior o bien superior para magnitud de ajuste Y. Si Y sobrepasa o está por debajo de estos límites, la salida LIMITS_ACTIVE se establece en TRUE e Y se mantiene dentro de los límites. Esta supervisión sólo está activa, cuando Y_MIN<Y_MAX..
MANUAL	BOOL	Conecta manualmente la especificación de magnitud de ajuste a través de Y_MANUAL (TRUE) o bien desconecta mediante (FALSE)
RESET	BOOL	TRUE reinicializa el regulador. Durante la inicialización Y = Y_OFFSET.

Salidas del módulo:

Variable	Tipo de datos	Descripción
Y	REAL	Magnitud de ajuste, calculada por el módulo (ver abajo)
LIMITS_ACTIVE	BOOL	Indica con TRUE, que Y ha sobrepasado el rango permitido (Y_MIN, Y_MAX).

OVERFLOW	BOOL	Indica con TRUE un desbordamiento (ver abajo)

Y_OFFSET, Y_MIN e Y_MAX sirven a la transformación de la magnitud de ajuste en un rango preestablecido.

Con MANUAL se puede conmutar a servicio manual y con RESET el regulador puede ser reinicializado.

En el servicio normal (MANUAL = RESET = LIMITS_ACTIVE = FALSE) el regulador calcula el Error de regulación e como diferencia de SET_POINT – ACTUAL, forma su derivación de acuerdo al tiempo $\delta e/\delta t$ y guarda este valor internamente.

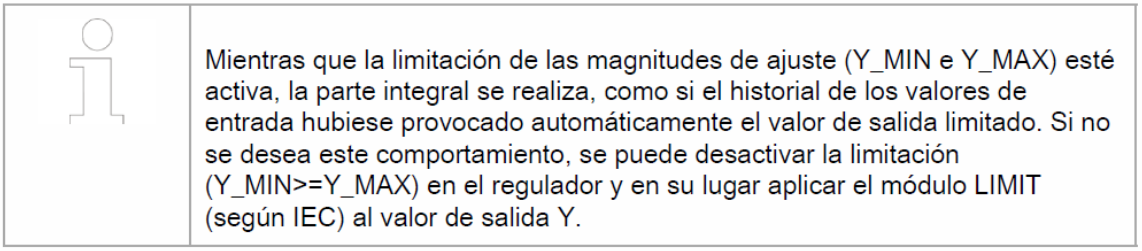
La salida, la magnitud de ajuste (Y) contiene en contrapartida al regulador PD una parte integral adicional y se calcula de la siguiente manera:

$$Y = KP \cdot (\Delta + 1/TN \int e dt + TV\, \delta\Delta/\delta t) + Y_OFFSET$$

Junto a la parte P fluyen entonces también las modificaciones actuales del error de regulación (parte D) y el historial del error de regulación (parte I) en la magnitud de ajuste.

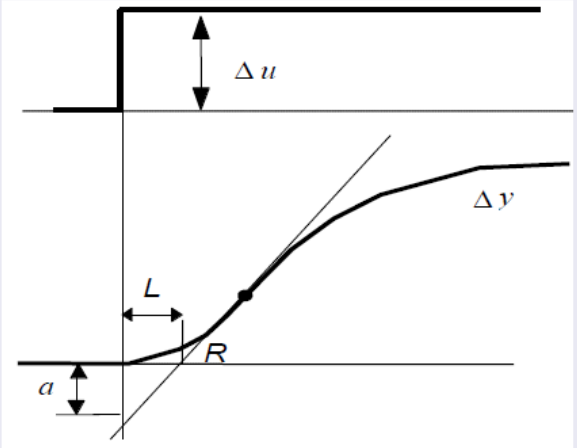
El regulador PID permite convertirse fácilmente en un regulador PI, estableciendo TV=0.

A través de la parte I adicional; en caso de parametrización errónea del regulador, cuando la integral a través del error Δ se hace muy grande; puede producirse un desbordamiento. Por razones de seguridad se dispone por ello de una salida BOOLeana OVERFLOW, que en este caso se torna TRUE. Esto pasa solamente, cuando el sistema de regulación es inestable debido a una parametrización errónea. Al mismo tiempo el regulador se desconecta, y se activa nuevamente a través de una nueva inicialización.



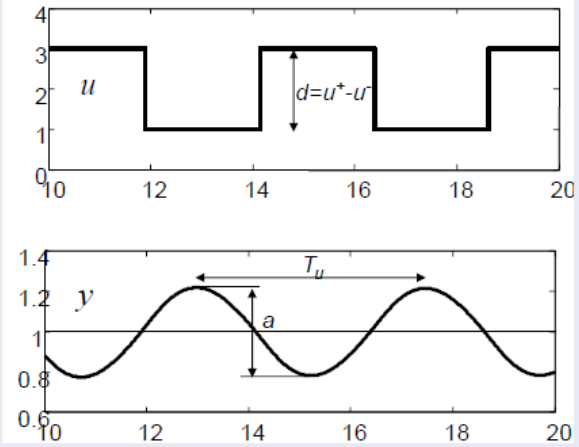
Mientras que la limitación de las magnitudes de ajuste (Y_MIN e Y_MAX) esté activa, la parte integral se realiza, como si el historial de los valores de entrada hubiese provocado automáticamente el valor de salida limitado. Si no se desea este comportamiento, se puede desactivar la limitación (Y_MIN>=Y_MAX) en el regulador y en su lugar aplicar el módulo LIMIT (según IEC) al valor de salida Y.

Método de bucle abierto (ZN)



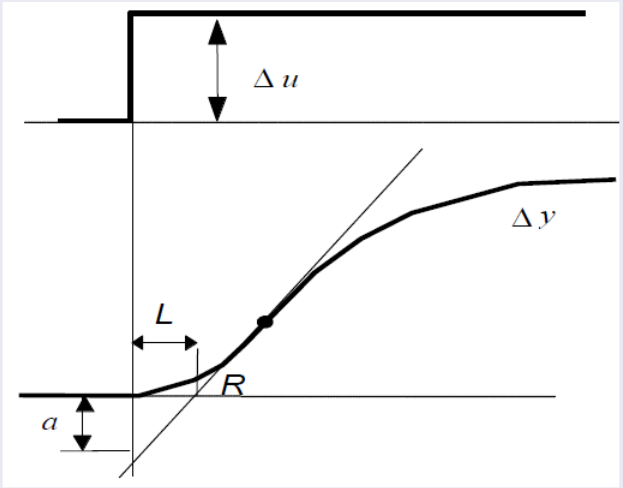
	K_p	T_i	T_d
PI	$0{,}9\frac{\Delta u}{a}$	$3{,}4L$	0
PID	$1{,}2\frac{\Delta u}{a}$	$2L$	0.5L

Método de bucle cerrado (relé)



	K_p	T_i	T_d
PI	$0{,}57\frac{d}{a}$	$0{,}83T_u$	0
PID	$0{,}76\frac{d}{a}$	$0{,}5T_u$	$0{,}13T_u$

Método de bucle abierto I

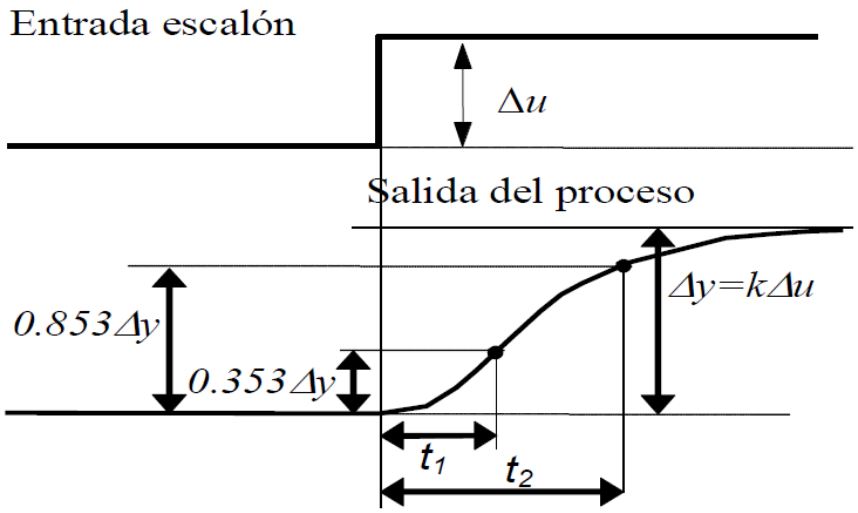


No es necesario esperarse al valor final

Recta tangente a máxima pendiente

Tipo	Poco robusto			Muy robusto		
	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
PI	$0.6\frac{\Delta u}{a}$	$4L$	0	$0.35\frac{\Delta u}{a}$	$13.4L$	0
PID	$0.95\frac{\Delta u}{a}$	$2.4L$	$0.42L$	$0.45\frac{\Delta u}{a}$	$8L$	$0.5L$

Método de bucle abierto II (aproximación a FOTD)



$$G(s) = \frac{k e^{-Ts}}{1 + \tau s}$$

← Es necesario esperar al valor final

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$T = 1.3t_1 - 0.29t_2$$

$$\tau = 0.67(t_2 - t_1)$$

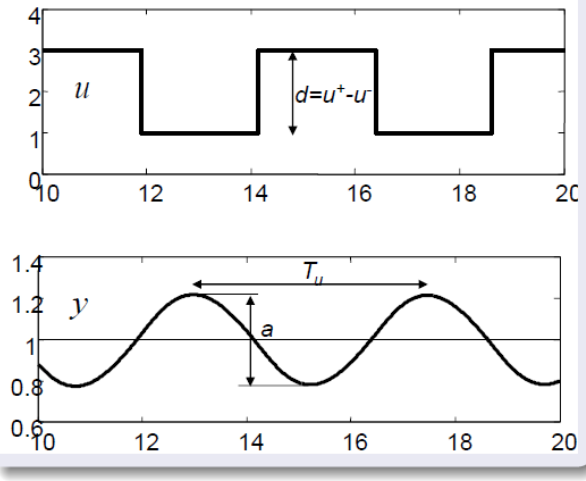
Método de bucle abierto II

- Con k, T y τ se entra en una tabla

Tipo	Poco robusto		
	K_p	T_i	T_d
PI	$\frac{0.859}{k}\left(\frac{T}{\tau}\right)^{-0.997}$	$1.484\,\tau\left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.468}$	0
PID	$\frac{1.357}{k}\left(\frac{T}{\tau}\right)^{-0.947}$	$1.188\,\tau\left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.738}$	$0.381\,\tau\left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.995}$

Tipo	Muy robusto		
	K_p	T_i	T_d
PI	$\frac{0.15}{k} + \left(0.35 - \frac{\tau T}{(\tau+T)^2}\right)\frac{\tau}{kT}$	$0.35T + \frac{13\tau^2 T}{\tau^2 + 12\tau T + 7T^2}$	0
PID	$\frac{1}{k}\left(0.2 + 0.45\frac{\tau}{T}\right)$	$\frac{0.4T + 0.8\tau}{T + 0.1\tau}T$	$\frac{0.5T\tau}{0.3T + \tau}$

Método de bucle cerrado (relé)



Se utiliza un control tipo relé
Hay que conseguir simetría en las conmutaciones
Se puede cambiar la amplitud del relé o la referencia

$$K_u = \frac{4\,d}{\pi\,a}$$

Respuesta	Tipo de control: PI		Tipo de control: PID		
	K_p	T_i	K_p	T_i	T_d
Poco robusto	$0.37K_u$	$0.83T_u$	$0.87K_u$	$0.55T_u$	$0.14T_u$
Robustez intermedia	$0.26K_u$	$0.83T_u$	$0.71K_u$	$0.77T_u$	$0.19T_u$
Muy robusto	$0.2K_u$	$0.83T_u$	$0.5K_u$	$1.19T_u$	$0.3T_u$

Método de bucle cerrado II

Muy robusto				
Tipo de control	K_p	T_i	T_d	b
PI	$0.053e^{\left(\frac{2.9}{K_u k}-\frac{2.6}{(K_u k)^2}\right)}K_u$	$0.9e^{\left(\frac{-4.4}{K_u k}+\frac{2.7}{(K_u k)^2}\right)}T_u$	0	$1.1e^{\left(\frac{-0.0061}{K_u k}+\frac{1.8}{(K_u k)^2}\right)}$
PID	$0.33e^{\left(\frac{-0.31}{K_u k}-\frac{1}{(K_u k)^2}\right)}K_u$	$0.76e^{\left(\frac{-1.6}{K_u k}-\frac{0.36}{(K_u k)^2}\right)}T_u$	$0.17e^{\left(\frac{-0.46}{K_u k}-\frac{2.1}{(K_u k)^2}\right)}T_u$	$0.58e^{\left(\frac{-1.3}{K_u k}+\frac{3.5}{(K_u k)^2}\right)}$

Poco robusto				
Tipo de control	K_p	T_i	T_d	b
PI	$0.13e^{\left(\frac{1.9}{K_u k}-\frac{1.3}{(K_u k)^2}\right)}K_u$	$0.9e^{\left(\frac{-4.4}{K_u k}+\frac{2.7}{(K_u k)^2}\right)}T_u$	0	$0.48e^{\left(\frac{0.4}{K_u k}-\frac{0.17}{(K_u k)^2}\right)}$
PID	$0.72e^{\left(\frac{-1.6}{K_u k}+\frac{1.2}{(K_u k)^2}\right)}K_u$	$0.59e^{\left(\frac{-1.3}{K_u k}+\frac{0.38}{(K_u k)^2}\right)}T_u$	$0.15e^{\left(\frac{-1.4}{K_u k}+\frac{0.56}{(K_u k)^2}\right)}T_u$	$0.25e^{\left(\frac{0.56}{K_u k}-\frac{0.12}{(K_u k)^2}\right)}$