

## ALTO GRADO DE AUTOMATIZACION EN UN LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS.

S. Dormido, L. Lechuga, F. Morilla

Dpto de Informática y Automática, UNED, Avda Senda del Rey s/n, 28040 Madrid

Tfno: (91)-5446000, Fax: (91)-5446737, E-mail: fmorilla@test.uned.es

### Resumen.

Conseguir un buen control de un proceso real requiere: conocer bien el proceso, seleccionar el controlador adecuado, ajustar los parámetros del controlador y supervisar el lazo de control. Todo ello implica disponer de la instrumentación adecuada (generadores de baja frecuencia, registradores, regulador industrial más o menos versátil), y conocer los algoritmos de control más habituales y las técnicas de ajuste de parámetros. En este trabajo se presenta un proyecto de integración de hardware (computador, tarjetas de adquisición de datos), de software comercial (TURBO PASCAL, MATLAB, LABTECH NOTEBOOK) y de experiencias propias (plasmada en programas específicos), con el objetivo de disponer de una herramienta que permita un alto grado de automatización en un laboratorio de control de procesos. Esta herramienta tiene fines principalmente didácticos pero, por su marcado acento práctico, puede ser muy útil en la industria.

### 1. Introducción.

Las experiencias en lazo abierto son buenas fuentes para la obtención de conocimiento sobre el proceso. Una experiencia de este tipo, Fig. 1, consiste en registrar y analizar la salida del proceso como respuesta a una entrada específica. Partiendo de un estacionario y seleccionando la entrada adecuada se puede saber si el proceso es estable o inestable, si es de fase mínima o no mínima, si es lineal o no lineal, etc... Cuando el proceso tiene respuesta monótona creciente para entrada escalón, existen garantías de que el estudio del proceso se puede efectuar sobre un modelo simple de primer orden, y existen técnicas para estimar sus parámetros. En función del modelo se puede seleccionar y sintonizar el controlador. Para estas experiencias se requiere un adiestramiento especial y la siguiente instrumentación básica: generador de señales de bajas frecuencias y/o fuente de alimentación, registrador u osciloscopio con memoria o digital.

Por tanto las tareas más habituales que se realizan en un laboratorio sobre el proceso en lazo abierto son:

- Llevar el proceso a un estado estacionario, con la ayuda generalmente de la fuente de alimentación.

- Excitar el proceso, con la ayuda del generador de señales.
- Estudiar la respuesta, generalmente de forma visual, con la ayuda del registrador u osciloscopio.
- Estimar parámetros de un modelo del proceso, utilizando técnicas simples, generalmente gráficas, basadas en la respuesta del proceso a una entrada escalón.

Las experiencias en lazo cerrado son buenas fuentes para la obtención de conocimiento sobre el sistema de control realimentado. Una experiencia de este tipo, Fig. 2, consiste en registrar y analizar la salida del proceso como respuesta a cambios en la señal de referencia o en la carga. Seleccionando el cambio adecuado se puede saber si el sistema cumple las especificaciones de diseño, en definitiva si el controlador o sus parámetros son los adecuados o no lo son, si es suficiente controlar el proceso con un controlador de parámetros fijos o es necesario incorporar alguna estrategia de control adaptativo. Para estas experiencias se requiere un adiestramiento especial y la instrumentación del laboratorio anterior más un regulador industrial, de los existentes en el mercado, [1].

Las tareas más habituales sobre el sistema de control en lazo cerrado son:

- Llevar el proceso a un estado estacionario, con la ayuda generalmente del regulador en modo manual.
- Configurar el regulador, con ayuda del teclado específico para este fin.
- Ajustar parámetros, de forma manual o utilizando procedimientos semiautomáticos que el regulador pueda ofrecer.
- Controlar el proceso, con el regulador en modo automático o modo adaptativo, acompañada de la excitación al sistema por parte del generador de señales o del propio regulador.
- Estudiar la respuesta, generalmente de forma visual, con la ayuda del registrador u osciloscopio.

Cuando en el laboratorio se dispone de un computador y de tarjetas de adquisición de datos, Fig. 3, es posible:

- Prescindir del registrador, del osciloscopio y del regulador.
- Abordar más fácilmente las tareas habituales sobre el proceso en lazo abierto y sobre el sistema en lazo cerrado, y ampliarlas con:

Presentación gráfica de señales.

Determinación de características del proceso.

Estudio exhaustivo de la respuesta del proceso o del sistema.

Estimación paramétrica de un modelo del proceso.

Simulación de la respuesta del modelo del proceso para la misma o distinta entrada utilizada en la estimación.

Simulación de la respuesta del sistema, para la misma o distinta excitación utilizada en la estimación y para el mismo o distinto controlador, con los mismos o diferentes parámetros de control.

no si antes desarrollar programas específicos para cada tarea, o hacer uso de programas comerciales para la adquisición de datos, control y simulación. LABTECH NOTEBOOK de Laboratory Technologies Corporation, [2], es una herramienta software muy potente para la adquisición, tratamiento y visualización de datos en tiempo real. MATLAB de MatWorks Inc., [3], es una herramienta muy popular y potente en el campo del estudio, diseño y simulación de sistemas de control.

En nuestro Departamento se están desarrollando, y se encuentran en estado bastante avanzado, dos programas ESLA (Experiencias con Sistemas en Lazo Abierto) y ESLC (Experiencias con Sistemas en Lazo Cerrado), con una filosofía común: ofrecer al usuario un alto grado de automatización en las experiencias en lazo abierto y en lazo cerrado, respectivamente, sobre procesos reales, con marcado acento industrial. En estos programas se integran la potencia de NOTEBOOK, de MATLAB y la experiencia acumulada en estos últimos años, [4], [5] y [6].

## 2. Programa ESLA.

El programa ESLA ejecuta, u ordena a LABTECH NOTEBOOK o a otros programas en MATLAB, las siguientes tareas: definir la excitación, registrar una señal, llevar el proceso a un estado estacionario, excitar el proceso, estudiar la respuesta, estimar parámetros, simular respuesta. La ejecución es automática, con la única intervención del usuario en la elección de la tarea y de las posibles opciones que se le presentan a lo largo de su ejecución. Cada tarea se puede ejecutar independientemente, pues el enlace con otras tareas se efectúa a través de ficheros de datos por defecto o generados la última vez que se ejecutó la tarea, de esta forma se permite al usuario continuar fácilmente experiencias de días anteriores.

**Definir la excitación.** La excitación, que siempre estará superpuesta sobre el estado estacionario en el que se encuentre el proceso, puede ser externa (procedente de un generador de señales o fuente de alimentación y previamente registrada) o interna (generada por el propio computador), y tendrá una duración (en sg.) determinada. En el primer caso, el usuario da el nombre del fichero donde se ha registrado o se va a registrar la señal. En el segundo caso, el usuario puede elegir entre excitación no periódica (escalón, pulso, escalón múltiple) o periódica (cuadrada, triangular o sinusoidal), y rellenar los parámetros que la definen (amplitud, signo y ancho de pulso o período).

**Registrar una señal.** Se trata de registrar en un fichero una señal analógica, procedente un generador de señales o fuente de alimentación, durante un cierto tiempo (en sg.) y a una frecuencia de muestreo determinada. La señal registrada se puede utilizar posteriormente como excitación al proceso, de esta forma el usuario puede disponer de una batería de señales de prueba para cualquier proceso.

**Llevar el proceso a un estado estacionario.** Para conocer la respuesta de un proceso a una entrada determinada, es necesario partir de un estado estacionario, ya que así se garantiza que la evolución de la salida responde efectivamente a la entrada elegida y no contiene perturbaciones debidas a experiencias anteriores. El usuario puede elegir entre comenzar la excitación en el estado que tiene el proceso en ese instante o llevar al sistema a un nuevo estacionario. En este último caso, que debe ser tarea obligatoria cada vez que se vaya a excitar el proceso con una nueva entrada, el usuario decide el valor analógico que desea enviar al proceso y el tiempo aproximado que tardará el proceso en alcanzar el nuevo estacionario. Este tiempo es muy importante para la prueba, transcurrido un 10% de este tiempo la entrada del proceso habrá cambiado bruscamente de valor, mientras que en su totalidad se está registrando la salida del proceso. El tiempo ha de ser lo suficientemente grande para que el proceso alcance el estacionario, pero no tan grande como para que el proceso haya alcanzado pronto el estacionario y el tiempo de espera haya sido excesivo. Si el proceso de búsqueda de estacionario no ha sido del agrado del usuario o el estacionario no ha sido validado, el usuario tiene la opción de repetir la experiencia con la misma o distinta entrada.

**Excitar el proceso.** Se trata de enviar una señal analógica a la entrada del proceso y registrar su salida, durante un cierto tiempo (en sg.) y a una frecuencia de muestreo determinada. La excitación del proceso incluye la generación de ésta, si es interna, la visualización, en tiempo real, y el almacenamiento en un fichero de la entrada al proceso y de su respuesta (salida).

**Estudiar la respuesta.** Este estudio está limitado a que la excitación haya sido generada internamente, y es diferente si se trata de una entrada con cambios bruscos o en rampa, o una entrada sinusoidal. Como paso previo para facilitar el estudio de la respuesta se puede solicitar un suavizado. Salvo en el caso sinusoidal, el estudio de la respuesta se efectúa en tramos aislados, seleccionados manual o automáticamente, con tantos tramos como cambios bruscos o como rampas de subida y de bajada se hayan producido en la entrada del proceso, seleccionados manual o automáticamente.

Como resultado del estudio de la respuesta del proceso a un cambio brusco, Fig. 4, se presentan al usuario y se almacenan en fichero los siguientes valores

ye            valor del estacionario final, referido al estacionario inicial

t1	instante en que la salida del proceso alcanza el 28.3% del estacionario
m	valor máximo de la derivada
t2	instante en que se produce el valor máximo de la derivada
y2	valor de la salida en t2
t3	instante en que la salida del proceso alcanza el 63.2% del estacionario
A0	área comprendida entre la respuesta y el estacionario
A1	área parcial encerrada por la respuesta

que están condicionados a la existencia de estacionario y a que la respuesta del proceso sea monótona creciente.

Como resultado del estudio de la respuesta del proceso a un cambio en rampa, se determinan los siguientes valores representativos de la característica de transferencia del proceso, Fig. 5: ganancia y posiciones de la zona lineal, valor y posiciones de la zona muerta, valores y posiciones de las zonas de saturación. Que está condicionado a la existencia de la zona correspondiente.

Como resultado del estudio de la respuesta del proceso a una entrada sinusoidal, se determinan la ganancia y el desfase para esa frecuencia de la señal excitadora, y por tanto un punto de la respuesta en frecuencia del proceso. Que están condicionados a que la salida haya alcanzado el régimen estacionario.

**Estimar parámetros.** La estimación puede ser gráfica o paramétrica. Sólo se puede elegir estimación gráfica si se ha producido algún cambio brusco en la entrada y se ha efectuado el estudio de la respuesta. La estimación paramétrica no está limitada a ningún tipo concreto de entrada y no es necesario efectuar el estudio de la respuesta, salvo que se desee incluir selección automática del orden del modelo a estimar.

La estimación gráfica tienen como objetivo estimar tres parámetros (K, ganancia en estado estacionario,  $T_o$ , retardo, y  $T_p$ , constante de tiempo) de un modelo continuo del proceso. De estos tres parámetros, K coincide con el valor estacionario determinado en el estudio de la respuesta, por tanto sólo hay que estimar  $T_o$  y  $T_p$ . El usuario puede elegir entre cuatro aproximaciones diferentes, [4], resumidas en la Fig.6, pero siempre la misma para todos los tramos de un mismo registro.

La estimación gráfica puede dar lugar a tantos modelos del proceso como tramos estudiados, sin embargo el modelo del proceso que se utilizará para la simulación y para la sintonía del controlador debe ser único, obtenido como promedio entre los diferentes modelos. Si a pesar de ser la respuesta monótona creciente, durante la estimación gráfica se detecta alguna incongruencia entre los datos suministrados por el estudio de la respuesta, se informará al usuario sobre la imposibilidad de efectuar la estimación.

La estimación paramétrica tiene como objetivo estimar los parámetros (coeficientes de la función de transferencia) de un modelo discreto del proceso. Cuando se solicita la estimación paramétrica se dispone de todos los valores de entrada y de salida al proceso.

**Simular respuesta.** Además del valor de los parámetros estimados, la presentación de resultados de una estimación se puede completar con la presentación de la respuesta del proceso y la respuesta del modelo a la misma entrada excitadora. En simular respuesta se asume esta tarea y además la simulación de la respuesta del modelo para entradas distintas a la que sirvió de excitación en la estimación.

### 3. Programa ESLC.

El **programa ESLC** ejecuta u ordena, a petición del usuario, las siguientes tareas: definir excitación, registrar una señal, llevar el proceso a un estado estacionario, configurar el controlador, modificar los parámetros de control, controlar el proceso, estudiar la respuesta, estimar parámetros, y simular respuesta.

**Definir la excitación.** El estudio de la respuesta de un sistema en lazo cerrado, que tiene como objetivo principal ver si se cumplen las especificaciones de diseño, suele estar limitado a respuestas del sistema frente a cambios bruscos en la señal de referencia o en la carga. De ahí que en la definición de excitación interna para el sistema en lazo cerrado sólo se contemple la generación de señales que incluyan cambios bruscos (escalón, pulso, escalón múltiple y onda cuadrada) y la combinación de cambios no simultáneos en la referencia y en la carga. En cuanto a la excitación externa, el usuario elegirá si afectará a la señal de referencia o a la carga.

**Registrar una señal.** Esta tarea es idéntica a la descrita en la experiencia en lazo abierto. Más aún, cualquier señal registrada por ESLA se podrá utilizar en ESLC y viceversa.

**Llevar el proceso a un estado estacionario.** Se trata de ofrecer al usuario la posibilidad de llevar al proceso a un punto de funcionamiento. Mediante dos pulsadores externos el usuario podrá incrementar o decrementar la señal de control, entrada al proceso, mientras el sistema permanece en lazo abierto. Concretamente se emula así el modo de funcionamiento MANUAL de los reguladores industriales.

**Configurar el controlador.** En los reguladores industriales, el controlador PID sigue siendo el controlador más utilizado, no obstante es frecuente encontrar distintas versiones del algoritmo de control y diferentes estructuras, por lo que se refiere al tratamiento de la señal de referencia, [5]. En la configuración del controlador se trata de cubrir el amplio abanico de

posibilidades que ofrecen los reguladores industriales, el usuario puede elegir entre el tipo de control (P, PI, PD, PID), el tipo de algoritmo (no interactivo, interactivo o paralelo), Fig. 7, y la estructura de control (PI, I-P, PID, PI-D, I-PD), Fig. 8.

**Modificar los parámetros de control.** Tras configurar el controlador, se trata de dar valores a los parámetros de control, que permanecerán fijos durante toda la experiencia de control del proceso. Los valores de los parámetros podrán ser manuales o calculados. En este último caso el usuario debe disponer de datos sobre un modelo de primer orden del proceso, obtenidos en la experiencia en lazo abierto, y elegir entre diferentes criterios de sintonía, [6] : razón de amortiguamiento 1/4 o criterios integrales (MIAE, mínima integral del valor absoluto del error, MISE, del cuadrado del error, MITAE, del valor absoluto del error ponderado en el tiempo), para cambio en la señal de referencia o en la carga. Todo ello condicionado a la configuración que se haya hecho del controlador.

**Controlar el proceso.** Se trata de enviar una señal analógica a la entrada del proceso y registrar su salida, durante un cierto tiempo (en sg.) y a una frecuencia de muestreo determinada. El control del proceso incluye la generación de las señales de referencia y de carga, si son internas, el cálculo de la señal de control, la visualización, en tiempo real, y el almacenamiento en un fichero de todas las señales del sistema.

**Estudiar la respuesta.** Este estudio está limitado a que la excitación haya sido generada internamente, y es ligeramente diferente si se trata de un cambio brusco en la referencia o en la carga. Como paso previo para facilitar el estudio de la respuesta se puede solicitar un suavizado. El estudio de la respuesta se efectúa en tramos aislados, seleccionados manual o automáticamente, con tantos tramos como cambios bruscos se hayan producido en la referencia y en la carga.

Como resultado del estudio de la respuesta del proceso a un cambio brusco, Fig. 9, se presentan al usuario y se almacenan en fichero los siguientes valores

yi	valor del estacionario inicial
ye	valor del estacionario final
ts	tiempo de asentamiento
iae	integral del error en valor absoluto
ise	integral del cuadrado del error
itae	integral del error en valor absoluto y ponderado
td	tiempo de retardo
tr	tiempo de subida
Mp	% de sobreelongación
tp	tiempo de sobreelongación máxima

to	pseudoperíodo de oscilación
DMP	amortiguamiento, definido como $(e_3 - e_2)/(e_1 - e_2)$
OVR	“overshoot”, definido como $-e_2/e_1$
b/a	razón de amortiguamiento

de los cuales algunos están condicionados a la existencia de estacionario, otros a que la respuesta sea oscilatoria y se hayan podido medir los picos, y otros a que la respuesta sea debida a una cambio en la referencia.

**Estimar parámetros.** La estimación es de tipo paramétrica pero existen tres posibles estimaciones, entre las que puede elegir el usuario : a) estimación de un modelo del proceso, con la señal de control (suma de la señal generada por el controlador y la señal de carga) como entrada al proceso, b) estimación de un modelo del sistema en lazo cerrado, con la señal de referencia como entrada al sistema, c) estimación de un modelo del sistema con la señal de carga como entrada. La estimaciones (b) y (c) sólo se podrán efectuar para tramos aislados de cambios en la referencia o en la carga, respectivamente.

**Simular respuesta.** En función de la estimación realizada existen tres posibles simulaciones: a) simulación del sistema en lazo cerrado, con el modelo del proceso estimado, con el mismo o diferente controlador utilizado en la estimación y con las mismas o diferentes perturbaciones de referencia y de carga utilizadas en la estimación, b) simulación de respuestas a cambios en la referencia, con el modelo del sistema estimado, y con las mismas o diferentes perturbaciones de referencia utilizadas en la estimación, c) simulación de respuestas a cambios en la carga, con el modelo del sistema estimado, y con las mismas o diferentes perturbaciones de carga utilizadas en la estimación.

#### 4. Características generales de ambos programas.

La utilización de estos programas requiere disponer de:

- Un computador IBM-AT o compatible, con coprocesador matemático.
- Un generador de señales o fuente de alimentación, sólo necesario si se van a registrar señales.
- Una tarjeta de entradas y salidas analógicas, de las que se utilizan dos entradas (conectadas a las salidas del proceso y del generador, respectivamente). ESLC requiere además que la tarjeta disponga de dos entradas digitales. En la actualidad se contempla el uso de la tarjeta DAS-16 o el uso combinado de las tarjetas DAS-8 y DAC-02 de Metrabyte.
- El programa LABTECH NOTEBOOK(version 5.0).
- El programa MATLAB (version 3.5), con las funciones de Control.



Los programas principales ESLA, ESLC y un gran número de rutinas se desarrollan en TURBO PASCAL (version 5.0), con una estructura modular, y en cierto modo compartida, entre los que destacan los módulos encargados de:

- a) Gestionar recursos del sistema operativo MS-DOS, concretamente el manejo de ficheros, el movimiento por los subdirectorios, y la ejecución de programas (NOTEBOOK o programas en MATLAB).
- b) La generación de señales internas.
- c) La modificación de los ficheros de datos, que constituyen el "SETUP" de NOTEBOOK, para que al ejecutarlo tengan lugar los procesos de envío, adquisición, visualización y almacenamiento de las señales, correspondientes a la tarea seleccionada por el usuario. Concretamente, durante el registro de una señal, NOTEBOOK se encarga de la adquisición, la visualización en pantalla y el almacenamiento en fichero de la señal procedente del generador. Durante la búsqueda de estacionario o la excitación en lazo abierto, NOTEBOOK se encarga del envío de la señal excitadora, la adquisición de la salida del proceso, la visualización y el almacenamiento de ambas. Durante el control manual, NOTEBOOK se encarga de la adquisición de las dos señales digitales, el cálculo y envío de la señal de control, la adquisición de la salida del proceso, la visualización y almacenamiento de las señales de entrada y salida del proceso. Durante el control automático, NOTEBOOK se encarga del cálculo y envío de la señal de control, la adquisición de la salida del proceso, la visualización y almacenamiento de las señales de referencia, de carga, de control y de salida del proceso
- d) El diálogo con el usuario, consistente en presentar en pantalla todos los menús y mensajes que le faciliten la elección entre diferentes opciones y la introducción de datos.

Otra gran parte de los programas se desarrollan en el entorno de programación MATLAB, haciendo uso de las funciones básicas, de las funciones de Control y de funciones desarrolladas expresamente para los siguientes fines: suavizado de señales, análisis de estacionarios, estudio de respuestas en lazo abierto y en lazo cerrado, estimaciones gráficas, estimaciones paramétricas, ajuste de parámetros para controladores PID, simulaciones de control PID.

## 5. Conclusiones.

En conjunto y por separado, ambos programas constituyen herramientas muy útiles para el usuario, porque:

- Facilitan la interacción con el proceso y con el controlador.
- Asumen capacidades de la instrumentación convencional, para la generación, presentación y registro de señales analógicas en tiempo real.
- Facilitan la repetición o simulación de experiencias en lazo abierto (con el mismo o distinto proceso, en las mismas o diferentes condiciones de excitación) y en lazo cerrado (con el

mismo o distinto proceso, con el mismo o distinto controlador, en las mismas o diferentes condiciones de excitación en la referencia y en la carga)

- Ponen de manifiesto, de forma gráfica, ciertas características de la respuesta del proceso o del sistema. Que en lazo abierto pueden servir para conocer el proceso, y en lazo cerrado para comprobar fácilmente si se están cumpliendo las especificaciones de diseño.
- Permiten emular los modos manual y automático de los reguladores industriales, y las experiencias específicas de algunos de ellos, catalogados como reguladores adaptativos o expertos, [7] y [8].
- Se pueden utilizar para aumentar el conocimiento heurístico sobre caracterización de procesos dinámicos, control de procesos, ajuste y autoajuste de controladores PID, que es muy importante en el desarrollo de sistemas expertos de control.

En definitiva, permiten un alto grado de automatización en un laboratorio de control de procesos.

## Referencias.

- [1] Quevedo, J. "Controladores digitales autónomos". Informe de la revista Automática e Instrumentación, No 206, pp. 185-202, 1990.
- [2] LABTECH NOTEBOOK for the PC XT/AT and PS/2, Version 5. Laboratory Technologies Corporation, 1989.
- [3] Kermit Sigmon. "MATLAB Primer". Dept. of Mathematics, University of Florida, 1989.
- [4] Morilla, F., S. Dormido, J.L. Fernández and M.A. Canto. "A systematic study of PID controllers tuning methods". Proc. IASTED International Symposium "Modeling Identification and Control", pp. 383-386, 1989.
- [5] Morilla, F. "Controladores PID: Algoritmos y Estructuras". Automática e Instrumentación, No 204, pp. 131-136, 1990.
- [6] Morilla, F. "Controladores PID: Ajuste de parámetros". Automática e Instrumentación, No 207, pp. 155-160, 1990.
- [7] Hoopes, H. S., Hawk Jr., W. M. and Lewis, R. C. "A Self-Tuning Controller". ISA Transactions, Vol. 22, No 3, pp. 49-58, 1983.
- [8] Kraus, T. W. and Myron, J.J. "Self-Tuning PID Controller Uses Pattern Recognition Approach". Control Engineering, pp. 106-111, June 1984.



Fig. 1 : Experiencia en lazo abierto.

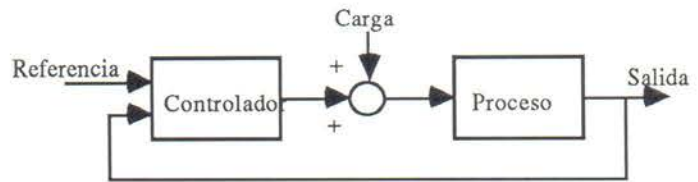


Fig. 2 : Experiencia en lazo cerrado.

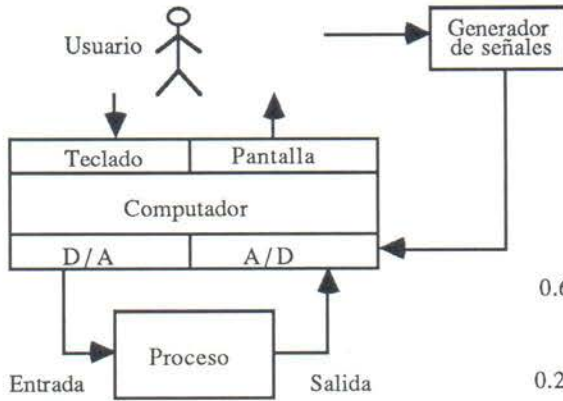


Fig.3 : Laboratorio de control de procesos por computador.

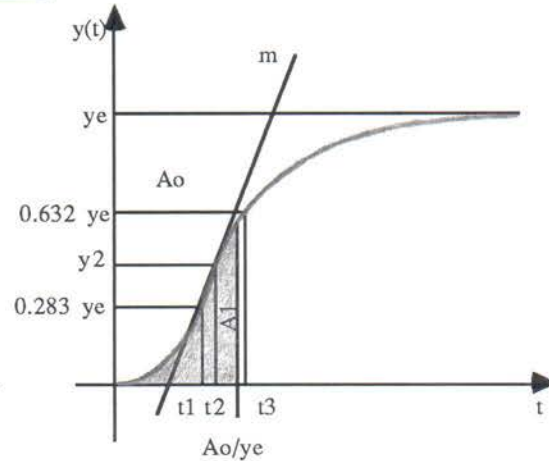


Fig. 4 : Respuesta de un proceso industrial típico a una entrada escalón.

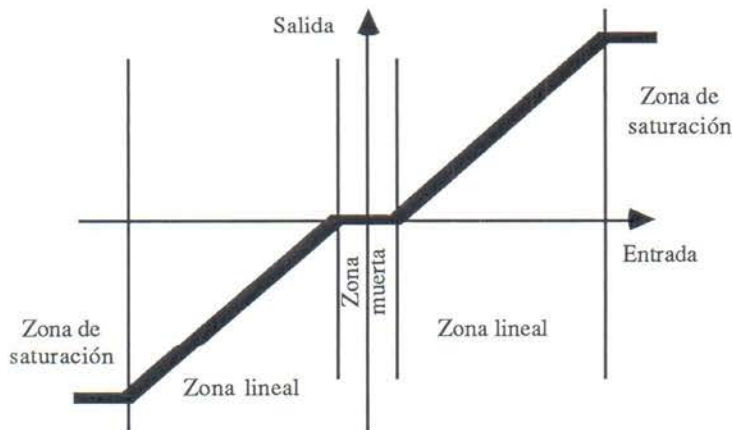


Fig. 5 : Característica de transferencia típica.

Parámetro	Aproximación 1	Aproximación 2	Aproximación 3	Aproximación 4
$T_p$	$\frac{y_e}{m}$	$t_3 - T_o$	$\frac{3}{2}(t_3 - t_1)$	$A_1 \frac{e}{y_e}$
$T_o$	$t_2 - \frac{y_2}{m}$	$t_2 - \frac{y_2}{m}$	$t_3 - T_p$	$\frac{A_0}{y_e} - T_p$

Fig. 6 : Cuatro aproximaciones para la constante de tiempo y el retardo del modelo.

Controladores PID			
Tipo	No interactivo	Interactivo	Paralelo
Diagrama de bloques			
Función de transferencia	$K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$	$K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) (1 + T_D s)$	$K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$

Fig. 7 : Tres algoritmos de control PID.

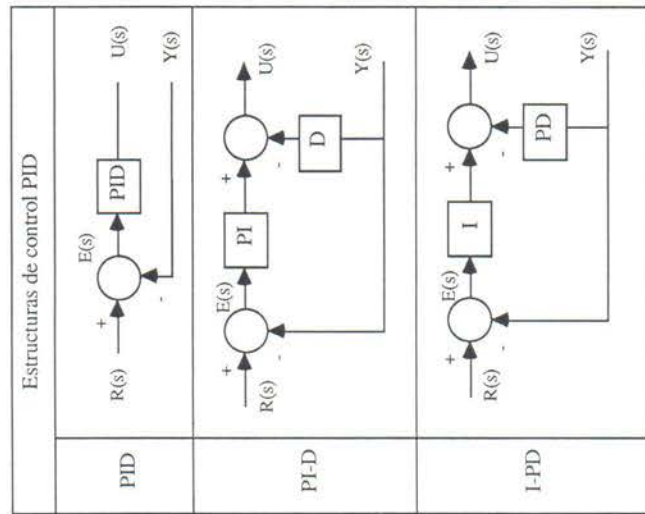


Fig. 8 : Estructuras de control PID.

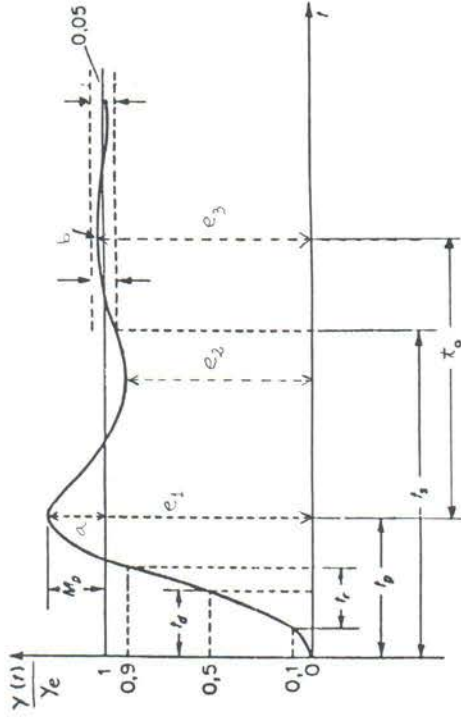


Fig. 9 : Respuesta típica de un sistema de control realimentado para un cambio en la referencia.