

20
2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"

EL CONTROL DE VARIABLES DE PROCESO EMPLEANDO LA MICROCOMPUTADORA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
JOSE ANTONIO PALACIOS RAMOS

Director de Tesis: Ing. Eduardo Vázquez Z.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.	5
Capítulo 1.- La interfase de entrada.	11
1.1.- Conexión entre la interfase de entrada y el detector.	13
1.2.- Conexión entre la interfase de entrada y la computadora.	14
1.3.- Funcionamiento básico de la interfase de entrada.	16
1.4.- Resumen.	17
Capítulo 2.- La computadora como controlador.	19
2.1.- Especificación del algoritmo de control.	21
2.2.- Aspectos relativos al tipo de microcomputadora.	28
2.3.- Resumen.	31
Capítulo 3.- La interfase de salida.	33
3.1.- Conexión entre la interfase de salida y la microcomputadora.	35
3.2.- Conexión entre la interfase de salida y el convertidor de señal eléctrica a neumática.	35
3.3.- Funcionamiento elemental de la interfase de salida.	36
3.4.- Resumen	38
Capítulo 4.- Ejemplo práctico: Adquisición de datos desde un proceso.	39

4.1.- El circuito.	41
4.2.- Operación.	42
4.3.- Construcción del circuito.	43
4.4.- Programa de plicación.	45
4.5.- Interfases prácticas en la literatura.	46
4.6.- Resumen.	48
Conclusiones.	52
Bibliografía.	56
Apéndice A.- Elementos de un lazo de control.	60
Apéndice B.- El lazo de control digital.	80
Apéndice C.- Interfases y Tiempo de muestreo típicos.	117
Apéndice D.- Dinámica de sistemas de primer orden.	121

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.- Diagrama de bloques de un lazo de control.
- Figura 2.- Diagrama de bloques para un programa de control.
- Figura 3.- Diagrama de bloques del circuito.
- Figura 4.- Diagrama del circuito principal.
- Figura 5.- Circuito de la fuente de poder.
- Figura A.1.- Salida de un controlador proporcional.
- Figura A.2.- Circuito para control de nivel de líquido.
- Figura A.3.- Salida de un controlador PI.
- Figura A.4.- Circuito de control para intercambiador de calor
- Figura A.5.- Dinámica del controlador PID de temperatura.
- Figura B.1.- Elementos de un lazo de control.
- Figura B.2.- Representación de multiplexor.
- Figura B.3.- Representación de un convertidor A/D.
- Figura B.4.- Representación de un demultiplexor.
- Figura B.5.- Componentes de un microprocesador.
- Figura B.6.- Búsqueda de la instrucción (1a.parte).
- Figura B.7.- Búsqueda de la instrucción (2a.parte).
- Figura B.8.- Ejecución de la instrucción.
- Figura B.9.- Señales de control.
- Figura D.1.- Representación de un proceso.
- Figura D.2.- Respuesta de procesos de primer orden.
- Figura D.3.- Representación de un tanque con líquido.
- Figura D.4.- Función trasladada.
- Figura D.5.- Respuesta de un proceso de primer orden más

tiempo muerto.

Figura D.6.- Ajuste de procesos a modelo de primer orden.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.- Conexiones del puerto de expansión.

Tabla 2.- Programa de adquisición de datos.

Tabla A.1.- Valores de $-K_c$ contra $-e(\alpha)$.

Tabla B.1.- Tabla de verdad del "status".

Tabla C.1.- Módulos de campo típicos.

Tabla C.2.- Tiempos de muestreo.

INTRODUCCION

La aplicación del control es tan amplia como la misma actividad industrial, éste consiste en mantener dentro de márgenes aceptables variables tales como flujo, concentración, temperatura y presión, para obtener productividad, calidad y seguridad a costos deseados.

Como es sabido, la actividad de los procesos químicos representa un elevado costo social, la generación de un empleo involucra un gasto enorme en comparación con lo equivalente para otros sectores de la producción. Esta rama tiende a ser altamente automatizada, sin embargo, la razón de esto no es un mero lujo, por el contrario, es una necesidad.

La calidad y productividad en una planta dependen del cumplimiento de especificaciones establecidas por el cliente, las cuales a su vez dependen de mantener rigurosamente dentro de márgenes previamente determinados las variables de mayor influencia dentro de cada operación unitaria. La Variación de las condiciones de operación provocada por un disturbio debe ser inmediatamente corregida mediante el accionamiento de los dispositivos de control previstos para minimizar su efecto nocivo en el producto terminado.

Cabe resaltar que sea cual fuere el control a establecer, éste siempre podrá ser ejecutado por uno o varios operadores, la calidad del producto final se verá afectada sólo en costo,

debido a que se requerirá reprocesar o desechar el producto afectado por el descontrol durante los intervalos en que tarde en surtir efecto la medida correctiva tomada.

Si la única razón para establecer sistemas de control fuera eliminar los costos excesivos de la calidad, muchos negocios afrontarían esta desventaja cuando los márgenes de utilidad lo permitieran, sin embargo, hay una razón de mucho mayor peso para adoptar sistemas de control altamente eficientes, esta razón es la seguridad laboral.

La integridad física y la salud del ser humano no tiene precio, una vez afectadas pueden ser compensadas con alguna indemnización económica, pero no se puede restituir una extremidad o una vida perdida, un equipo fuera de control representa una condición insegura que involucra riesgo de accidentes. Existe la legislación que norma el control de equipos altamente peligrosos bajo estándares de fabricación y operación seguros, por ejemplo, los generadores de vapor.

Como puede apreciarse, el control desempeña un papel importante en factores como el costo de la calidad, la productividad de los equipos e incluso llega a ser obligatorio. Calidad, productividad y seguridad son elementos que distinguen a las empresas competitivas. Con la apertura del mercado a nivel internacional, el costo de producción

tendrá que abatirse para hacer frente a los altos niveles de competencia que se tienen en los países que tendrán acceso a nuestros consumidores.

Considerando lo anterior, la modernización de los sistemas de control industrial tienen un papel importante que jugar en este contexto, así como también, el desarrollo de recursos humanos necesarios para que se lleve a cabo esto.

Dada la evolución de las computadoras durante los años más recientes, han quedado en desuso equipos diversos por motivo de no ser compatibles con IBM o por resultar obsoletos en velocidad y capacidad de memoria con relación a las aplicaciones típicas de paquetería, que demandan de sistemas más poderosos. La utilidad de dichos recursos puede hallar campo de aplicación en proyectos didácticos de control de variables de procesos sencillos.

El uso de una microcomputadora no compatible para desempeñar este trabajo es más accesible que una de diseño especial para la aplicación específica de control, sobre todo si se cuenta con una microcomputadora en desuso y el recurso humano con la capacidad para adaptarla para dicho uso.

La función que lleve a cabo el control se pueden realizar mediante un programa de aplicación desarrollado en el lugar

con recursos propios.

El objetivo de la presente tesis es presentar la inclusión de una microcomputadora en un lazo de control para controlar procesos sencillos que puedan ser implementados con fines didácticos.

Para cubrir éste objetivo se requiere analizar la forma en la cual se realiza la entrada y salida de información a través de una interfase, así como la manera en que esta es procesada por la computadora.

En el Capítulo 1 se analiza la recepción de información proveniente del proceso y su transformación en señales que serán manejadas por la computadora.

En el Capítulo 2 se abordará el tema relativo al manejo de las señales provenientes de la interfase con el proceso para producir señales que puedan ser utilizadas para efectuar el control deseado en el proceso.

En el Capítulo 3 se estudiará lo relativo a la manipulación de las señales provenientes de la computadora y su conversión en señales adecuadas para su uso en el control del proceso, todo esto a través de la interfase de salida.

Con el fin de ejemplificar la utilidad práctica de los temas que se presentarán en los primeros tres capítulos, el Capítulo 4 presentará una interfase de entrada para la adquisición de datos de proceso.

Finalmente se incluirá una sección de conclusiones en donde se evaluará el alcance logrado en el cumplimiento del objetivo de esta tesis.

CAPITULO 1
LA INTERFASE DE ENTRADA

Como es sabido, los elementos básicos que conforman un lazo de control son el detector, el controlador y el elemento final de control, tal como puede apreciarse en la Figura 1. En el Apéndice A se presenta una breve descripción de tales elementos.

Por lo que respecta al controlador, en los sistemas de control por computadora, éste está constituido básicamente por tres subsistemas que son la tarjeta de entrada, la unidad central de proceso y la tarjeta de salida. En el Apéndice B se presentan algunos aspectos de interés sobre estos equipos de uso industrial.

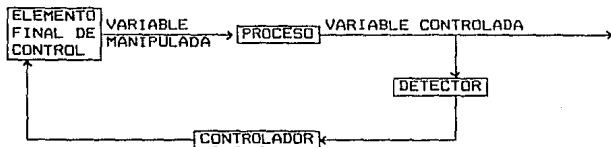


Figura 1.- Diagrama de bloques de un lazo de control

La inclusión de una microcomputadora en el lazo de control, como sustituta del controlador mencionado, implica el problema de adaptarla en forma tal que pueda leer los datos provenientes del detector, además de que pueda generar la señal adecuada de forma tal que tenga el efecto esperado en el proceso a través de los componentes intermedios a estos.

El dispositivo que permite tal adaptación es conocido como interfase.

Hay en el mercado interfases de fabricación estándar, sin embargo existe literatura relativa al armado y construcción de interfases para conexión de microcomputadoras a diversos sistemas. Dicha literatura está destinada para lectores con diversos niveles de especialización. Aquella que está dirigida a legos en la materia requiere de cierto conocimiento elemental sobre funcionamiento y terminología de uso frecuente sobre sistemas digitales. En los temas presentados en el Apéndice B se introduce terminología de uso frecuente en los capítulos de la presente tesis.

A lo largo del presente capítulo se realiza un análisis de la recepción de la información proveniente del proceso y de la transformación de esta última en señales que serán manejadas por la computadora a través de la interfase de entrada.

1.1.- Conexión entre la interfase de entrada y el detector.

Existe gran variedad de tipos de señales que pueden ser generadas por los detectores según la naturaleza del proceso, éstas pueden ser pulsos aislados, pulsos ligados en forma de cadenas, y corrientes o voltajes que oscilan dentro de rangos limitados.

Desde el punto de vista de los procesos químicos, las señales de mayor interés son aquellas consistentes en corrientes eléctricas o voltajes dinámicos, cuyo valor dentro de rangos preestablecidos conserva una analogía con el valor de la variable del proceso en cuestión, de ahí el nombre genérico de señales analógicas.

En el Apéndice C se presenta brevemente un listado de las diferentes señales que se pueden recibir en una tarjeta o interfase de entrada, provenientes de detectores varios.

Cuando se requiere de una tarjeta de entrada para conectar la microcomputadora con el proceso, se necesita conocer el tipo de señales que será necesario recibir, así como rango de valores que podrá tomar dicha señal.

La señal de entrada de interés para la presente tesis es de tipo analógico.

1.2.- Conexión entre la interfase y la computadora.

Una computadora para poder interpretar datos y procesarlos en información requiere de señales que recorran sus circuitos para obtener el efecto deseado, la naturaleza de dichas señales es binaria ya que sólo puede tener dos valores, es decir, alto y bajo, correspondientes a 5 y 0 voltios,

análogos a los dígitos binarios 1 y 0. En el Apéndice B se ha incluido con mayor detalle la manera en que la computadora manipula dichos voltajes binarios como si fueran dígitos binarios, de ahí el origen del término señales digitales.

La señal analógica en cuestión llega a través de dos conductores que salen del detector, en tanto que la entrada a la computadora será por medio del puerto de entrada que permite la conexión de más cables de los proporcionados por dicho detector.

Básicamente, dicho puerto es un medio de conexión al sistema de conectores de datos ("data bus") de la computadora con equipos ajenos, en este caso, con la interfase de entrada. El número de cables que dicho puerto permitirá conectar dependerá del tamaño de palabra binaria que maneje la unidad central de proceso de la computadora, siendo tamaños típicos 4, 8, 12, 16 y 32 pulsos. Se requiere de una entrada por cada pulso de palabra binaria en el puerto de entrada.

Además, de la conexión con los conductores portadores de los pulsos que manejará la unidad central de proceso en forma de palabra binaria, es necesario contar con una conexión que permita la comunicación de órdenes entre dicha unidad central de proceso y la interfase, las órdenes básicamente son:

- Orden de lectura de dato desde la interfase, dada por la CPU.
- Orden de espera a la CPU mientras se dispone y envía el dato solicitado, dada por la interfase.
- Mensaje de dato listo para lectura.
- Mensaje lectura terminada por la CPU.

La selección de la interfase de entrada debe tomar en cuenta la congruencia entre los conductores salientes de la misma, y sus respectivos receptores en el puerto de entrada de la computadora.

1.3.- Funcionamiento básico de la interfase de entrada.

Una vez definidos los conectores de entrada y salida a la interfase, para una conexión adecuada al detector y a la computadora, queda definido el tipo de interfase requerido y por lo tanto la función que desempeñará. En el más general de los casos, la interfase de entrada acondicionará el voltaje o amperaje de la señal analógica de entrada, a niveles que sean manejables por la conexión eléctrica, transformación del valor del voltaje o amperaje a un equivalente binario de pulsos agrupados en forma de la palabra binaria y su envío a

la computadora a través de los conductores de salida, ante petición previa de la unidad central de proceso, por medio de las órdenes especificadas subsecuentemente. En el Apéndice B se presenta con mayor detalle el proceso de conversión de señales analógicas en señales digitales por medio del convertidor análogo/digital.

1.4.- Resumen.

En el presente capítulo se han presentado los aspectos relevantes en la selección del tipo de interfase de entrada requerido para la adquisición de datos del proceso a través de un detector. Una vez seleccionado el tipo de interfase la función de la misma consistirá en entregar señales digitales apropiadas para su uso por la computadora. Esto último se lleva a cabo mediante una etapa de acondicionamiento del nivel de la señal original de entrada en un nivel adecuado, para su manejo por el convertidor análogo/digital cuya función será convertir las señales de entrada en sus equivalentes digitales. Obviamente, si la señal de entrada ya tiene el nivel adecuado, no se requerirá de la etapa de acondicionamiento, o bien, si la señal de entrada proviene de un detector que provee de información digitalizada entonces la etapa de conversión será la que estará eliminada. Cabe mencionar que aún en el caso de que la señal de entrada esté en la forma digital y a los niveles adecuados no será posible

la conexión directa del detector a la computadora por requerir de aquella parte encargada de la recepción y envío de órdenes a la unidad central de proceso.

Como se verá en el siguiente capítulo, las señales digitales recibidas por la computadora son procesadas dentro de la misma con el fin de obtener señales que provoquen el efecto de control deseado.

CAPITULO 2
LA COMPUTADORA COMO CONTROLADOR

En el capítulo anterior se contempló el problema relativo a la adquisición de datos del proceso, en el presente capítulo se contempla el proceso de dichas señales.

Las señales digitales entregadas en forma de palabra binaria en el puerto de entrada de la computadora por la interfase de entrada, son procesadas por los circuitos internos de la unidad central de proceso. La forma en la cual dicho proceso se lleva a cabo está determinada por la ejecución de una serie de instrucciones especificadas por el usuario denominadas en conjunto como programa de control.

Cada instrucción especificada por dicho programa de control se ejecuta a través de un ciclo repetitivo que consta de dos partes. La primera consiste en la búsqueda de la instrucción a ejecutar dentro del dispositivo de memoria utilizado para almacenar el programa, la segunda es la ejecución de las instrucciones elementales que constituyen la instrucción en cuestión. La manera en que dicho ciclo se lleva a cabo, así como la interacción de los componentes internos de la computadora para que éste sea llevado a cabo se explica con detalle en el Apéndice B.

El proceso de ejecución de instrucciones por la unidad central de proceso es de interés básico para comprender el proceso de adquisición y generación de señales desde y hacia

el proceso, sin embargo, una vez resuelto el problema de la adquisición de señales el problema inmediato, a resolver, es especificar un algoritmo que permita generar un programa con instrucciones que produzca las señales de salida apropiadas para obtener el efecto de control requerido.

2.1.- Especificación del algoritmo de control.

Básicamente, el programa de control compara la señal recibida por la interfase de entrada con el punto de ajuste, es decir, con el valor que se desea tenga dicha variable, en caso de encontrar diferencia entre ambos valores fuera de una determinada tolerancia, por ejemplo 0.0001, entonces dicha diferencia es asignada a una localidad de memoria y denominada como "error". Este valor es tratado por un proceso matemático cuyas características son definidas por el algoritmo de control empleado y cuya finalidad será obtener una señal de salida que una vez acondicionada pertimentemente actuará el elemento final de control.

Los algoritmos de control han sido extensamente desarrollados, presentando cada uno de ellos características que hacen que algunos presenten mejoras con respecto a los restantes, es decir, todos los algoritmos producen un efecto tendiente a mantener la variable controlada lo más cercana posible al punto de control, sin embargo existen diferencias

sustanciales en cuanto a la manera en que lo llevan a cabo.

Los algoritmos de control más populares son los denominados proporcional, integral y derivativo. En el Apéndice A se describe con detalle la manera en que éstos producen su efecto de control en el proceso.

Como un ejemplo, a continuación se presenta la obtención de un algoritmo de control a partir del modelo denominado "Deadbeat".

Para obtener el algoritmo de control se realiza lo siguiente:

1.-Aproximar el proceso, incluyendo el elemento final de control, a un modelo de comportamiento dinámico de primer orden más tiempo muerto. En el Apéndice D se presenta con mayor detalle las características de tal modelo, así como un método para dicha aproximación.

2.-Obtención del algoritmo de control que produzca la respuesta deseada del circuito cerrado.

Este último paso es el que se desarrolla a continuación. Obtenida la aproximación mediante la evaluación de los parámetros del modelo de primer orden más tiempo muerto se procede a determinar el algoritmo de control, con el fin de

ejemplificar este procedimiento se supone que se ha determinado un modelo que cumple con la Ecuación 2.1. Puesto que dicho ajuste se debe realizar a partir de datos muestreados en un proceso y en el presente trabajo no se llevó a cabo dicha adquisición de datos, la ecuación considerada ha sido tomada de la referencia citada en el Apéndice D.

$$G_p(s) = \frac{1.0 e^{-1.46s}}{3.34 s + 1} \quad (2.1)$$

Primero, se obtiene la función de pulsos generada por el muestreo de la señal continua del proceso en términos de la transformada z.

$$G_p(s) = G(s) e^{-\theta's} \quad (2.2)$$

$$= \frac{1}{3.34 s + 1} e^{-1.46s} \quad (2.3)$$

Definiendo

$$\theta' = N T + \theta$$

en donde N es el número entero más grande de muestreos que se pueden realizar durante el tiempo θ' , si suponemos que el tiempo de muestreo será igual a uno, implica que θ es igual 0.46.

De esta manera se tiene que

$$G_p(s) = [G(s) e^{-0.46s}] e^{-NT} \quad (2.4)$$

Tomando en cuenta que e^{-NT} es igual a z^{-N}

$$Gp(z) = \mathcal{Z}[G(s) e^{-0.46s}] z^{-1} \quad (2.5)$$

En donde \mathcal{Z} es la transformada z de la función entre corchetes. Definiendo la función de pulsos obtenida por el muestreo efectuado por la microcomputadora se tiene la Ec. 2.6.

$$HG(z) = \mathcal{Z}\left[\frac{1 - e^{-sT}}{s} Gp(s)\right] \quad (2.6)$$

$$= z^{-1} \mathcal{Z}\left[\frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{e^{-0.46s}}{3.34s + 1}\right] \quad (2.7)$$

$$= z^{-1} \mathcal{Z}\left[\frac{(1 - e^{-sT}) e^{-0.46s}}{s(3.34s + 1)}\right] \quad (2.8)$$

Aprovechando que e^{-sT} es el término retraso unitario, puede ser sustituido por z^{-1} , lo cual implica que:

$$HG(z) = z^{-1} \mathcal{Z}\left[\frac{e^{-0.46s}}{s(3.34s + 1)}\right] (1 - z^{-1}) \quad (2.9)$$

Con el fin de poder aplicar la transformada z modificada se define

$$m = 1 - e/T$$

$$m = 1 - 0.46 \quad (2.10)$$

$$= 0.54 \quad (2.11)$$

Con lo cual se tiene:

$$HG(z) =$$

$$z^{-1} \delta_m \left[\frac{1}{s(3.34s + 1)} \right] (1 - z^{-1}) \Big|_{m=0.54} \quad (2.12)$$

$$HG(z) =$$

$$z^{-1} \delta_m \left[\frac{1}{s(s + 3.34^{-1})} \right] (1 - z^{-1}) \Big|_{m=0.54} \quad (2.13)$$

Consultando una tabla de transformada z se obtiene

$$HG(z) = \quad (2.14)$$

$$z^{-1} (1 - z^{-1}) \left[\frac{z^{-1}}{3.34} \left(\frac{1}{1 - z^{-1}} - \frac{e^{-(3.34^{-1})(0.54)(1)}}{1 - e^{-(3.34^{-1})(1)} z^{-1}} \right) \right]$$

$$= z^{-1} (1 - z^{-1}) (3.34) \left[\frac{1}{1 - z^{-1}} - \frac{0.851}{1 - 0.741 z^{-1}} \right] \quad (2.15)$$

$$= z^{-2} \left[\frac{0.498 + 0.367 z^{-1}}{1 - 0.741 z^{-1}} \right] \quad (2.16)$$

La ecuación anterior es necesaria para especificar la función de transferencia del controlador D(z).

Un algoritmo "deadbeat" satisface los siguientes criterios:

- 1.- El tiempo de amortiguamiento debe ser finito.
- El tiempo de amortiguamiento es el tiempo en que

tarda la respuesta en llegar al límite preestablecido del valor final y permanecer dentro de éste, el valor típico es más menos 5% del valor final.

2.- El tiempo de elevación debe ser corto. Este tiempo es el que tarda la respuesta en alcanzar por primera vez el valor final.

3.- El error en régimen permanente debe ser cero.

Considerando lo anterior la función $D(z)$ se define por la Ec.

2.17

$$D(z) = \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \frac{1}{HG(z)} = \frac{M(z)}{E(z)} \quad (2.17)$$

$$= \frac{z^{-1}}{(1 - z^{-1})^{-2} (0.498 - 0.367 z^{-1})} \quad (2.18)$$

En donde $M(z)$ es la transformada z de la señal de salida de la computadora y $E(z)$ es la transformada z del error detectado.

En términos de la señal de salida del controlador y del error de entrada al mismo se tiene

$$0.498M(z)z^{-1} - 0.865M(z)z^{-2} + 0.367M(z)z^{-3} = E(z) - 0.741E(z)z^{-1} \quad (2.19)$$

En el dominio del tiempo:

$$0.498 m_{n-1} - 0.865 m_{n-2} + 0.367 m_{n-3} = e_n - 0.741 e_{n-1} \quad (2.20)$$

En dicha ecuación se aprecia que no se obtiene la respuesta m_n por lo que no es de utilidad práctica. Una regla general para resolver este problema consiste en elegir un tiempo de muestreo $t > t_0$, para ello se deben considerar, además, los tiempos de muestreo presentados en el Apéndice C.

Eligiendo un tiempo T igual a dos segundos se sigue un procedimiento análogo para obtenerla señal m_n como función del tiempo, así:

$$Gp(s) = G(s) e^{-1.46s} \quad (2.21)$$

$$= \left(\frac{1}{3.34s + 1} \right) e^{-1.46s} \quad (2.22)$$

$$HG(z) = \mathcal{Z} \left[\frac{1 - e^{-sT}}{s} Gp(s) \right] \quad (2.23)$$

$$= (1 - z^{-1}) \mathcal{Z} \left[\frac{e^{-1.46s}}{s(3.34s + 1)} \right] \quad (2.24)$$

$$\text{Definiendo } m = 1 - 1.46/2 = 0.27 \quad (2.25)$$

$$HG(z) = \mathcal{Z}_m \left[\frac{1}{s(s + 3.34^{-1})} \right] (1 - z^{-1}) \Big|_m = 0.27 \quad (2.26)$$

$$= (1-z^{-1}) \left[\frac{z^{-1}}{3.34} \left(\frac{1}{1-z^{-1}} - \frac{e^{-(3.34)} (0.27) (z)^{-1}}{1 - e^{-(3.34)} (z)^{-1}} \right) \right] \quad (2.27)$$

$$= z^{-1} \left[\frac{0.498 + 1.009 z^{-1}}{1 - 0.549 z^{-1}} \right] \quad (2.28)$$

Sustituyendo en la ecuación del algoritmo "deadbeat"

$$D(z) = \frac{1 - 0.549 z^{-1}}{z^{-1} (0.498 + 1.009 z^{-1}) (1 - z^{-1})} \quad (2.29)$$

En términos de la entrada y salida de D(z)

$$0.498 M(z) + 0.511 M(z)z^{-1} - 1.009 M(z)z^{-2} = E(z) - 0.549 E(z)z^{-1} \quad (2.30)$$

En términos del tiempo:

$$m_n = (e_n - 0.549 e_{n-1} - 0.511 m_{n-1} + 1.009 m_{n-2}) / 0.498 \quad (2.31)$$

Esta última ecuación es el algoritmo de control, con base en ésta se desarrolla un programa de computadora para realizar el control. En la Figura 2 se presenta un diagrama de bloques que puede ser usado como base para un programa de control por computadora, en este diagrama se han utilizado los valores estipulados en la Ec. 2.31.

2.2.- Aspectos relativos al tipo de microcomputadora.

Como fué mencionado con anterioridad, el funcionamiento

interno de la computadora es de interés exclusivo para la comprensión del proceso de acondicionamiento de las señales de y hacia el proceso, sin embargo, de manera implícita el tipo, marca y/o modelo de la computadora a utilizar tiene influencia importante en aspectos tales como el lenguaje de programación y la resolución de la conversión analógica a digital y viceversa.

La resolución o capacidad de distinguir digitalmente entre señales ligeramente diferentes está determinada por el número de pulsos en la conversión. Por ejemplo, una escala binaria de ocho pulsos puede ser usada para contar hasta 256 (desde 0 hasta 255) o para dividir una escala de medición en 256 partes iguales. En un termómetro de escala Fahrenheit se podría tener una escala desde -44 hasta 212 grados. Un convertidor de ocho pulsos daría una salida en aumentos de un grado, ± 0.5 grados de precisión si hay \pm medio pulso de incertidumbre en cualquier conversión de ocho pulsos. Esto es aceptable para algunas aplicaciones, pero para obtener una lectura de décimos de grado, al menos una resolución de 12 pulsos (la cual divide la escala en 4096 intervalos, o intervalos de alrededor de $1/16$ de grado) es necesaria. Según la microcomputadora de que se trate, ésta podrá usar un microprocesador cuyas características determinarán la resolución con la cual se llevarán a cabo las conversiones mencionadas.

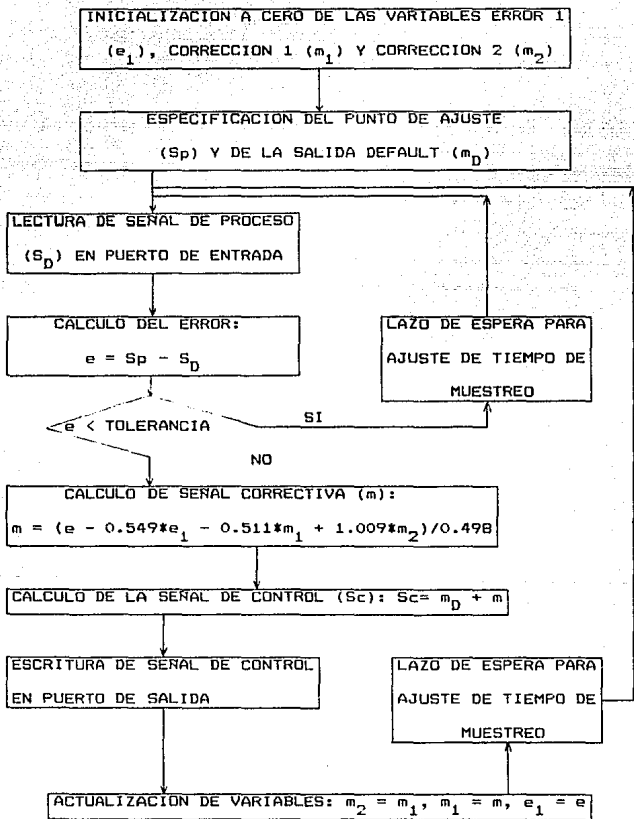


Figura 2.-Diagrama de bloques para un programa de control.

Por otro lado, es obvio suponer que un diagrama de bloques sólo resuelve parcialmente el problema de especificar el algoritmo de control, ya que es necesario que dicho diagrama sea traducido a un programa escrito en un lenguaje de programación que pueda ser manejado por la computadora en cuestión.

Nuevamente, vuelve a ser evidente que la marca y modelo de la computadora es determinante en esta importante etapa. Antes de tomar cualquier acción tendiente a la obtención de dicho programa será necesario adquirir el conocimiento necesario sobre los tipos de lenguaje que tiene capacidad de usar la computadora en cuestión y elegir el de preferencia particular. Posteriormente, se requiere obtener cierta pericia en la estructuración de programas a partir de las órdenes o comandos con los que se cuentan en dicho lenguaje. Cabe mencionar que la experiencia adquirida en la programación de algún equipo diferente al utilizado, será útil pero no suficiente ya que, incluso entre modelos diferentes de microcomputadoras de una misma marca y con el mismo tipo microprocesador, se podrán tener diferencias sustanciales, a grado tal que al ejecutar programas en tales equipos sólo podría ser ejecutable en uno de ellos.

2.3.- Resumen.

En el presente capítulo se estudió la generación de un

algoritmo a servir de base para la elaboración de un programa de control, así como el uso de las señales adquiridas desde el proceso dentro de dicho programa para obtener una señal de control que debidamente acondicionada actúe sobre el proceso a través del elemento final de control.

En el siguiente capítulo se presenta el acondicionamiento de la señal de control.

CAPITULO 3
LA INTERFASE DE SALIDA

Hasta este punto se cuenta con una señal de magnitud adecuada para producir un efecto de control en el proceso, sin embargo, dicha señal al ser pasada por el puerto de salida de la computadora tiene características que hacen imposible su uso, esto es, el microprocesador enviará este valor desde donde la memoria almacena dicha variable de salida, la cual está en forma de palabra binaria, hasta la dirección correspondiente a dicho puerto, manteniéndola disponible sólo durante unos cuantos microsegundos antes de continuar con la siguiente instrucción del programa de control. La palabra binaria constituida por el grupo de pulsos altos o bajos, disponibles en paralelo, no es adecuada para accionar ningún tipo de elemento final de control, aún durante el instante que dure, por lo tanto se requiere de un componente que haga posible su uso, dicho aparato es la interfase de salida.

La interfase de salida tiene que llevar a cabo un acondicionamiento adecuado de la señal correctiva para su uso efectivo. Como fué explicado en el Capítulo 1 la interfase de entrada requerida depende sobre todo del detector que se esté usando, analógicamente la interfase de salida dependerá del elemento final de control que se vaya a utilizar. Puesto que el elemento final de control más utilizado en la planta de proceso son las válvulas de control neumáticas, este capítulo se enfocará a la descripción de una interfase apropiada para dichos artefactos de control, la cual es conocida como

interfase de salida analógica. En el Apéndice C se haya una lista de los tipos de interfase de salida usualmente encontradas en el mercado.

3.1.- Conexión entre la interfase de salida y la microcomputadora.

Esta conexión se lleva a cabo entre los conectores del puerto de salida y los de la interfase, básicamente estos conectores permiten el enlace directo de los circuitos internos de la interfase con el sistema de conectores de datos ("data bus") de la computadora. El número de conectores dependerá del tamaño de la palabra binaria que maneje el microprocesador en cuestión, además se tendrán algunos conectores extras para permitir la comunicación de señales de control entre ambos elementos. De manera muy elemental las señales de control serán:

- Ordenes de escritura de datos en la interfase dadas por la unidad central de proceso.

- Mensajes de datos recibidos por parte de la interfase.

3.2.- Conexión entre la interfase de salida y el convertidor de señal eléctrica a neumática.

Para accionar una válvula de control neumática se requiere una presión de aire de servicios de 3 a 15 psig, para ello la interfase de salida genera una corriente analógica de 4 a 20 mA a partir de la señal digital que recibe desde la computadora. Dicha corriente eléctrica entra en un convertidor de señal eléctrica a neumática que realiza la transformación necesaria para el accionamiento de la válvula. La entrega de la corriente de salida de la interfase se realiza a través de dos conductores que se conectan directamente al convertidor de señal eléctrica/neumática.

3.3.- Funcionamiento elemental de la interfase de salida.

De manera elemental, el acondicionamiento llevado a cabo por la interfase de salida consiste de dos procesos (1) la retención y (2) la conversión de la señal proveniente de la computadora.

El primer problema a resolver por la interfase debe ser el relativo a la duración de la señal digital correctiva. Cuando ésta es recibida por la interfase en forma de pulsos en paralelo sólo estará disponible durante unos cuantos microsegundos, por lo que se requiere aumentar la duración de dicha señal durante el tiempo comprendido entre la recepción de dos señales consecutivas. Esta etapa del acondicionamiento de la señal es conocido como "retención" y se lleva a cabo

por medio de un circuito integrado llamado candado ("latch") el cual funciona como se describe a continuación.

Cuando un pulso de la señal digital aparece en uno de los conectores de entrada del circuito candado, se registra la aparición en la salida correspondiente de una señal de las mismas características binarias, es decir alta o baja, pero constante en el tiempo. Esto ocurre simultáneamente en cada uno de los conectores correspondientes a las respectivas entradas y salidas del circuito candado. Hay candados para tamaño de palabra de cuatro y ocho pulsos con los cuales se puede efectuar la "retención" de cualquier tamaño de dato digital.

Este grupo de señales binarias continuas resultantes del proceso de retención se alimenta a un convertidor digital a analógico cuyo funcionamiento se explica con mayor detalle en el Apéndice B. Como consecuencia de este proceso de conversión se obtiene una corriente eléctrica análoga en la salida de la interfase. Cada vez que se actualice el valor de la señal digital correctiva se tendrá la variación correspondiente de dicha corriente analógica de salida, de manera tal que para el valor digital cero corresponderá una corriente de 4 mA y para el máximo valor digital obtenible corresponderá una corriente de 20 mA. Obviamente dicho valor digital máximo dependerá del tamaño de palabra que maneje el

microprocesador de la computadora.

3.4.- Resumen.

La interfase de salida necesaria para interconectar la computadora con el proceso a través del elemento final de control dependerá del tipo de señal que requiera dicho elemento final de control, en el caso más común se usa una válvula de control neumática, lo cual implica la necesidad de una interfase de salida analógica. Esta interfase recibe la señal digital proveniente de la computadora, generada por el programa de control y la convierte en una corriente continua que variará en el rango de 4 a 20 mA, según el valor de dicha señal digital.

Hasta este capítulo se ha presentado la información propuesta en la introducción para el cumplimiento del objetivo de la presente tesis. Con el fin de ejemplificar la aplicación de la información aquí presentada, en el siguiente capítulo se presenta una interfase de entrada analógica y su programa de aplicación para la adquisición de datos desde un proceso dado.

CAPITULO 4

EJEMPLO PRACTICO: ADQUISICION DE DATOS DESDE UN PROCESO

Con el fin de mostrar la implementación práctica de un caso real, a continuación se presenta un ejemplo basado en el artículo Cameron J., BYTE Publications Inc., Febrero, 378 (1983), titulado "A high-resolution Analog-to-Digital Converter for the TRS-80".

Este circuito lleva a cabo la conversión de señales análogas constantemente cambiantes a la forma digital por medio de un circuito de conversión y de entrada-salida. EL circuito convertidor análogo-digital está basado en circuitos integrados fácilmente adquiribles.

Un circuito integrado convertidor de ocho pulsos es una combinación fácil y natural con un sistema de conectores de datos y con la arquitectura de las microcomputadoras de ocho pulsos más comunes. Sin embargo, rápidamente se descubre que la resolución de ocho pulsos es poco precisa. Si se está interesado en aplicaciones que requieren un amplio rango de medición, o en una precisión mejor que $\pm 0.5\%$, la interfase descrita en este artículo y los principios que permiten la extensión de la interfase a convertidores de 14 ó 16 pulsos podría ser lo que se esté buscando.

Por supuesto, es imposible leer simultáneamente 12 pulsos en un sistema de conectores de datos de 8 pulsos. El truco está en convertir 12 pulsos, retener el dato, leer primero los pulsos bajos, después los pulsos altos, y colocarlos juntos

por medio del programa de aplicación. Todo esto, además de algunas señales de "status", sobre-rango, e información de polaridad pueden ser obtenidos con el convertidor análogo-digital de doce pulsos ICL7109 de Datel/Intersil y otros circuitos integrados comunes.

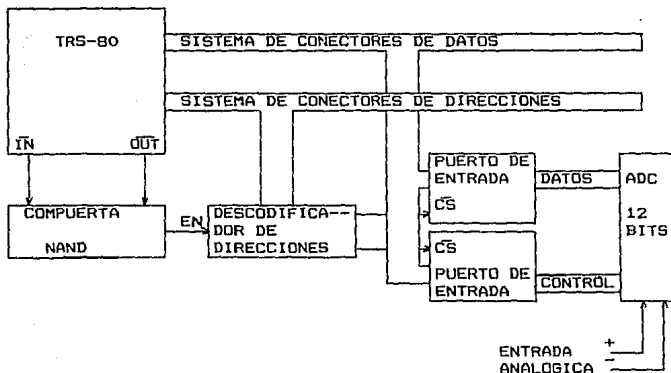


Figura 3.- Diagrama de bloques del circuito.

4.1.- El circuito.

La Figura 3 muestra el circuito de la interfase completo en diagrama de bloques para una computadora Radio Shack modelo TRS-80.

El convertidor análogo-digital está conectado al sistema de

conectores de datos a través de un puerto de entrada y un puerto de salida, ambos de los cuales son habilitados por las líneas "IN" y "OUT" y un descodificador de direcciones. El puerto de salida es usado para controlar el flujo de datos e información dentro del sistema de conectores de datos vía puerto de entrada. Dos candados (Latch) son usados, uno configurado como puerto de salida con la dirección 1, y el otro como puerto de entrada con dirección cero. Las líneas de direcciones menos significativas (A0 a A2) son descodificadas por un descodificador de 3 a 8 líneas para seleccionar el puerto. Las líneas seleccionadas son activadas por las señales "IN" y "OUT" provenientes de la TRS-80. Las señales "IN" y "OUT" son conectadas a las entradas de una compuerta "NAND" de manera tal que si cualquiera de las dos cambia a nivel bajo, el conector habilitador del descodificador cambia a alto, permitiendo a la línea de salida seleccionada cambiar a nivel bajo para encender el puerto correcto.

4.2.- Operación.

La clave para comprender la operación del circuito está en el arreglo de las líneas de control y datos del IC5, el convertidor análogo-digital ICL7109. Diversas opciones están provistas en el diseño del circuito, pero tal como se emplea aquí, éste es habilitado como sigue: un octeto de control se envía al puerto de salida a manera de colocar un 1 sobre la línea "RUN/HOLD" (conector 26) del convertidor

análogo-digital. Después de un breve retardo, este conector es regresado a bajo por envío de un segundo octeto de control al puerto 1. Un alto sobre el conector "RUN/ $\overline{\text{HOLD}}$ " inicia una conversión. Cuando la conversión es terminada, el ICL7109 lo señala con un bajo sobre el conector "status" (conector no.39, "STA"). Para leer el dato de salida desde el ICL7109, se envía un tercer octeto de control al puerto 1, esta vez poniendo un bajo sobre el conector habilitador de pulsos altos (" $\overline{\text{HBEN}}$ ", conector 19). Esto activa del pulso 8 al 11 de la señal convertida, un indicador de sobrerango (pulso 12), y un signo de polaridad (pulso 13). Durante este ciclo, los pulsos de menor orden (0 a 7) están en un estado de alta impedancia, lo cual significa que dichos conectores son "invisibles" para el sistema de conectores de datos.

Para obtener los pulsos bajos, se envía otro octeto de control al puerto 1, colocando un bajo sobre el conector habilitador de bajos (conector 18, " $\overline{\text{LBEN}}$ "). Después de aquello, una declaración "INP(0)" lee los pulsos bajos a través del puerto de entrada, 00H. Un nuevo ciclo de conversión toma alrededor de 33 mseg (milisegundos) con el circuito mostrado. La última conversión completada es retenida tanto tiempo como un bajo sea presentado en el conector 26 del IC5.

4.3.- Construcción del circuito

El diagrama esquemático para este circuito se muestra en la

Figura 4 (Al final de este capítulo). Este diagrama muestra además las conexiones a los conectores adecuados para el "conector clavija-orilla de la tarjeta DIP (dual-inline package)" que se requiere para enganchar el circuito a la parte posterior del tablero de la TRS-80 ó a una Interface de Expansión.

El desempeño óptimo del ICL109 depende de un voltaje de referencia preciso, estable y de condensadores de buena calidad. Aunque el convertidor analógico-digital tiene un voltaje de referencia interno, usarlo causa alguna reducción de la flexibilidad del circuito. La referencia de voltaje AD580 de "Analog Devices" mostrado en la Figura 4 tiene características de envejecimiento y térmicos excelentes, tanto como el ICL8049 de Datel/Intersil, que puede ser sustituto. Los resistores de buena calidad deberán ser usados para dividir el voltaje de referencia. Los valores usados en la Figura 4 son para una escala de entrada de 4.096 V (volt), con un voltaje de referencia de 2.048 V (los detalles de ajuste del voltaje de referencia para otras escalas de entrada están dados en la hoja de datos de Datel/Intersil proporcionada con el ICL7109). Los condensadores usados no deberán ser de disco de cerámica, los de polipropileno o teflón son mejores.

Son requeridas fuentes de +5 y -5 V, para lo cual una buena fuente regulada ó el circuito mostrado en la Figura 5 serán

adecuados. La potencia total drenada es alrededor de 180 mA (miliamperes) a +5 V, y sólo unos cuantos mA de la fuente de -5 V. (Las conexiones necesarias entre la clavija DIP y el conector de expansión de la TRS-80 modelo I se dan en la Tabla 1).

Clavija DIP	Funcion	Conector de tarjeta de la TRS-80.
1	GND	8
4	A0	25
5	A1	27
6	A2	40
2	IN(NEGADA)	19
3	OUT(NEGADA)	12
14	D0	30
13	D1	22
12	D2	32
11	D3	26
10	D4	18
9	D5	28
8	D6	24
7	D7	20

Tabla 1.- Conexiones del puerto de expansión.

4.4.- Programas de aplicación.

El programa de aplicación para generar las señales de control para leer y procesar los datos podría ser escrito como parte de un programa "BASIC" o como una subrutina en lenguaje ensamblador. La velocidad no es crítica para esta interfase porque el ICL7109 tiene velocidad de conversión de 33 mseg es relativamente baja. La Tabla 2 muestra un programa en "BASIC"

que incluye un retraso para la conversión, un mensaje de sobre rango, y corrección de polaridad.

```
100  DEFINIT A,B,D
200  P=-1 :OUT 1,7
300  FOR X=1 TO 50: NEXT X
400  OUT 1,6
500  FOR X=1 TO 100: NEXT X
600  OUT 1,4
700  A= INP(0)
800  OUT 1,3
900  B= INP(0)
1100 IF A < 32 GOTO 1300
1200 A= A-32: P=1
1300 IF A >= 16 GOTO 2000
1400 D = ((256*A)+B)*P
1500 PRINT D
1600 FOR X=1 TO 200: NEXT X: GOTO 200
1700 END
2000 PRINT "OUT OF RANGE": GOTO 1600.
```

Tabla 2.- Programa de adquisición de datos

4.5.- Interfases prácticas en la literatura.

Existe gran variedad de publicaciones en las cuales, mediante una investigación bibliográfica, se pueden hallar gran

cantidad de circuitos desarrollados para legos en electrónica que tienen necesidad de adquirir interfases a bajo costo para computadoras no compatibles. Por ejemplo, en una revisión bibliográfica de la publicación "Journal of Chemical Education" se encontraron muchos artículos sobre interfases y equipo de laboratorio químico.

A continuación se presenta una relación de tales artículos.

"Interfacing and data collection with the TRS-80", Gray E.T. & Workman H.J., J. Chem. Educ., 58, 239(1981).

"A teaching gas chromatograph/microcomputer interface using the general-purpose interface bus", Dien K.J. et al., J. Chem. Educ., 58, 243(1981).

"Interfacing microcomputers", Ratzlaff K.L., J. Chem. Educ., 58, 470(1981).

"A versatile and inexpensive instrument/computer interface", Burt J.T., J. Chem. Educ., 58, 549(1981).

"Coulometric titrations using computer-interfaced potentiometric endpoint detection", Greenspan P.D. et al., J. Chem. Educ., 62, 688(1985).

"Interfacing a scanning infrared spectrophotometer to a

microcomputer", Mattson B.M., J. Chem. Educ., 62, 690(1985).

"Inexpensive Apple II/Photometer interfacing", Russo T., J. Chem. Educ., 62, 692(1985).

"Interfacing the TLC548 analogue-to-digital converter", Westling B.D., J. Chem. Educ., 66, 409(1989).

"A low-cost data acquisition system for Apple II+ computer", Wagner S., J. Chem. Educ., 61, 788(1984).

"Stepper motor interfacing to the Apple Game port", Vitz E., J. Chem. Educ., 63, 803(1986).

"Interfacing an EM-360 NMR with an Apple computer", Swartz J., J. Chem. Educ., 63, 1073(1986).

"Computer interface for kinetic experimentation in education", Westerholm et al., J. Chem. Educ., 66, 833(1989).

4.6.- Resumen.

En el presente capítulo y último de esta tesis se ha mostrado el uso de un artículo encontrado en la literatura sobre la implementación de una interfase de entrada analógica como ejemplo de la utilidad práctica de los temas presentados a lo largo de los capítulos precedentes y apéndices referidos en

los mismos.

Dicha interfase puede ser usada para la adquisición de datos de un proceso implementado con fines didácticos con los cuales se puede a su vez realizar la observación del comportamiento dinámico del proceso en cuestión.

Para una aplicación de control la interfase requerida no sólo deberá cumplir con la tarea de adquisición de datos (propia de una interfase de entrada), sino también con la función de la interfase de salida estudiada en el capítulo anterior, sin embargo es necesario tomar en cuenta que la implementación de dicho sistema requiere aún más recursos que los requeridos para el ejemplo práctico aquí presentado.

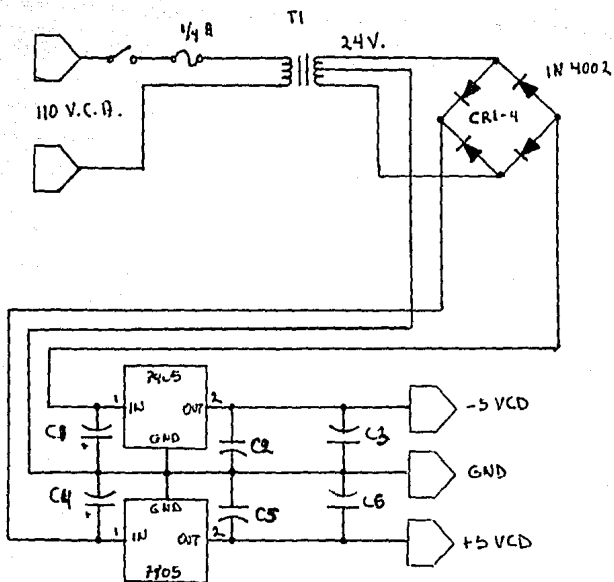


Figura 5.- Circuito de la fuente de poder.

CONCLUSIONES

A través de los temas desarrollados a lo largo de esta tesis se han presentado los elementos necesarios para poder usar una microcomputadora con fines de control en proyectos de carácter didáctico.

El cumplimiento de los objetivos planteados se llevó a cabo presentando los elementos necesarios para obtener el algoritmo de control que produzca una respuesta adecuada a las características del proceso a controlar, junto con la presentación de las especificaciones elementales de las interfase que sirvan para adaptar la microcomputadora a dicho uso.

El algoritmo de control utilizado como ejemplo no es el único existente. Dicho ejemplo puede ser utilizado como punto de partida en la incursión de libros de control en los cuales se propongan otros algoritmos más o menos sofisticados.

Se presentó la terminología elemental para emprender la lectura de la literatura sobre armado de interfases sin demasiadas limitaciones. La extensión del número de temas y términos de sistemas digitales es enorme, sin embargo se considera que aquellos que han sido presentados mediante el desarrollo de los temas en este trabajo son los de uso más común.

De acuerdo con la experiencia adquirida por el autor durante el armado de la interfase presentada en el Capítulo 4, existen aspectos técnicos que sólo pueden ser resueltos mediante la adecuada asesoría por parte de un técnico en electrónica. Obviamente, al adquirir experiencia en el tema esta dependencia es cada vez menor.

Contando con los elementos necesarios, es decir, la microcomputadora, el detector adecuado, el elemento final de control y los conocimientos necesarios para armar una interfase y desarrollar un algoritmo de control, es posible realizar un sistema que puede ser utilizado con fines didácticos en material de control.

La realización de un sistema como el mencionado requiere de apoyo económico, ya que un tesista con sus propios recursos difícilmente puede afrontar los costos de tal proyecto, como ejemplo se puede mencionar que la interfase comentada anteriormente tiene un costo aproximado de trescientos mil pesos en componentes, sin tomar en cuenta que para poder usarla en forma continua debe ser montada en un circuito impreso y protegida con una caja metálica con lo cual dicho costo aumenta.

Una interfase adecuada para la inclusión de la computadora en el lazo de control debe incluir también las funciones de

acondicionamiento de la señal de salida hacia el proceso y es aún más costosa. Además, el elemento final de control y el detector, si se adquieren de fabricación estándar elevarían dicho costo a varios millones de pesos.

El uso de sistemas de control como el propuesto con fines industriales está limitado por el cumplimiento de estándares de seguridad relativos al empleo de equipo eléctrico en ambientes corrosivos ó con riesgo de incendio. Sin embargo, si la naturaleza del proceso lo permite, puede realizarse el control de procesos mediante el desarrollo de un proyecto de control que incluya una microcomputadora con la interfase apropiada.

BIBLIOGRAFIA

Smith C. y Corripio A., Principles and Practice of Automatic Process Control, 1a. ed., Ed. John Willey, E.U.

Ogata K., Dinámica de Sistemas, 1a. ed., Ed. Prentice Hall, México (1987).

Ogata K., Ingeniería de Control Moderna, 1a. ed., Ed. Prentice Hall, México (1980).

Smith C., Digital Computer Process Control, Intext Educational Publishers, E.U (1972).

Apuntes del curso "Instrumentación electrónica de procesos industriales", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México (1991).

Apuntes del curso "Técnico especializado en instrumentación y control industrial", Instituto de Sistemas Electrónicos Avanzados, México (1991).

Andrew W. y Williams H., Applied Instrumentation in the Process Industries, vol.I, 2a. ed., Gulf Publishing Co., 372-395, E.U (1979).

Andrew W. y Williams H., Applied Instrumentation in the Process Industries, vol.II, 2a. ed., Gulf Publishing Co.,

284-307, E.U (1979).

Gray E.T. & Workman H.J., "Application of the TRS-80 in the classroom and the laboratory", J. Chem. Educ., 58, 239 (1981).

Gray E.T. & Workman H.J., "Interfacing and data collection with the TRS-80", J. Chem. Educ., 58, 239 (1981).

Dien K.J. et al., "A teaching gas chromatograph/microcomputer interface using the general-purpose interface bus", J. Chem. Educ., 58, 243 (1981).

Ratzlaff K.L., "Interfacing microcomputers", J. Chem. Educ., 58, 470 (1981).

Burt J.T., "A versatile and inexpensive instrument/computer interface", J. Chem. Educ., 58, 549 (1981).

Greenspan P.D. et al., "Coulometric titrations using computer-interfaced potentiometric endpoint detection", J. Chem. Educ., 62, 688 (1985).

Mattson B.M., "Interfacing a scanning infrared spectrophotometer to a microcomputer", J. Chem. Educ., 62,

690 (1985).

Russo T., "Inexpensive Apple II/Photometer interfacing", J. Chem. Educ., 62, 692 (1985).

Westling B.D., "Interfacing the TLC548 analogue-to-digital converter", J. Chem. Educ., 66, 409 (1989).

Wagner S., "A low-cost data adquisition system for Apple II₊ computer", J. Chem. Educ., 61, 788 (1984).

Vitz E., "Stepper motor interfacing to the Apple Game port", J. Chem. Educ. 63, 803 (1986).

Swartz J., "Interfacing an EM-360 NMR with an Apple computer", J. Chem. Educ. 63, 1073 (1986).

Westerholm et al., "Computer interface for kinetic experimentation in education", J. Chem. Educ. 66, 833 (1989).

Cameron J., "A high-resolution Analog-to-Digital Converter for the TRS-80", BYTE Publications Inc. Febrero, 378 (1983).

APENDICE A
ELEMENTOS DE UN LAZO DE CONTROL

Componentes básicos de todo sistema de control.

Para lograr su objetivo en todo sistema de control automático se realiza la siguiente secuencia.

El primer paso es medir la variable a controlar, esto se hace mediante un detector, por ejemplo un termopar o un dispositivo de resistencia térmica.

El detector se conecta físicamente al transmisor, el cual capta su salida y la convierte en una señal lo suficientemente intensa como para transmitirla al controlador, éste recibe la señal y la compara con el valor que se desea.

Según el resultado de la comparación, dicho controlador decide qué hacer para mantener la variable a controlar en el valor deseado, para ello envía una señal al elemento final de control el cual es normalmente una válvula de control que se abrirá o cerrará en la magnitud precisada por el controlador.

De la secuencia descrita es posible vislumbrar claramente que las operaciones básicas son:

Medición.- la medición de la variable que se controla se hace generalmente mediante la combinación de detector y transmisor.

Decisión.- con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el nivel deseado.

Acción.- como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, ésta es realizada por el elemento final de control.

En congruencia con dichas operaciones básicas los cuatro componentes básicos de todo sistema de control son

Detector.- también conocido como elemento primario.

Transmisor.- se le conoce como elemento secundario.

Controlador.- es este el cerebro del sistema de control.

Elemento final de control.- frecuentemente se trata de una válvula de control. Otros elementos de control final comunmente utilizados son motores de velocidad variable y transportadores.

Estos elementos constituyentes de un lazo de control mencionados se presentan a continuación, de manera breve haciendo énfasis en los controladores.

Detectores y transmisores.

Con los detectores y transmisores se realizan las operaciones de medición en el sistema de control. En el detector se produce un fenómeno mecánico, eléctrico o similar, el cual se relaciona con la variable de proceso que se mide. El transmisor, a su vez, convierte este fenómeno en una señal que se pueda transmitir.

Existen tres términos importantes que se relacionan con la combinación detector-transmisor que son la escala, el rango y el "cero del instrumento". A la escala del instrumento la definen los valores superior e inferior de la variable de proceso. El rango del instrumento es la diferencia entre el valor superior y el inferior de la escala. Por último, el valor inferior de la escala se conoce como "cero del instrumento" (el cual no necesariamente debe valer cero).

Válvulas de control.

Las válvulas de control pueden regular flujos (líquidos, vapores o gases), mediante la producción de una caída de presión en el sistema, la cual es un costo extra en la economía de operación del sistema, puesto que la presurización la suministra regularmente un compresor o una bomba.

Características de flujo de la válvula de control.

Existen tres tipos de comportamiento en el flujo de la

válvula con respecto a la abertura de la misma en condiciones de caída de presión constante, éstas son las siguientes.

1.- La característica de flujo lineal produce un flujo directamente proporcional al desplazamiento de la válvula, o posición de la válvula, por ejemplo, con un 50% de abertura de la válvula el flujo será el 50% del flujo máximo.

2.- La característica de flujo de igual porcentaje produce un cambio muy pequeño en el flujo al inicio del desplazamiento de la válvula, pero conforme ésta se abre hasta la posición máxima, el flujo aumenta cada vez más para las mismas magnitudes de abertura.

3.- La característica de flujo en válvulas de abertura rápida consiste en que al inicio de la abertura se produce un gran flujo, mismo que disminuye respecto a magnitudes de abertura iguales conforme la válvula está más abierta.

Para efectuar ésta selección se pueden usar como ayuda varias reglas basadas en la experiencia. En general, las válvulas con características de flujo lineal se usan para control de niveles de líquido, y en otros procesos en los que la caída de presión a través de la válvula es bastante constante; las válvulas con características de flujo de abertura rápida, se usan principalmente en circuitos "todo o nada" en los que se requiere un gran flujo tan pronto como la válvula empieza a

abrir.

Finalmente, las válvulas con características de flujo de igual porcentaje son probablemente las más comunes y se usan generalmente para servicios donde se esperan grandes variaciones en la caída de presión o en los que se espera que la caída de presión producida por la válvula sea tan sólo un pequeño porcentaje de la caída total de presión producida por el sistema.

Controladores.

El controlador es el dispositivo que toma la decisión en el sistema de control, para hacerlo, la señal que proviene del proceso a través del transmisor es comparada con el punto de control, en caso de detectar algún error (la diferencia entre la variable que se controla y el punto de control), envía la señal apropiada a la válvula de control, o a cualquier otro elemento final de control, para mantener la variable que se controla en el punto de control.

Controladores de acción directa y de acción inversa.

La selección de la acción del controlador depende de los requerimientos de control del proceso y la acción de la válvula de control.

Para ilustrar lo anterior se presentan dos casos, uno con una válvula de aire para abrir y el segundo con una válvula de

aire para cerrar.

En el primer caso, si el controlador decide que se abra la válvula su señal de salida debe aumentarse para lograrlo, por el contrario, para que la válvula sea cerrada dicho controlador envía una señal más débil a su salida. Se dice que el controlador es de acción inversa. Esto queda explicado al analizar la entrada y la salida de dicho controlador, si recibe una señal de flujo muy alto su decisión será disminuirlo (recibe una señal electrónica alta y produce una salida baja).

En el segundo de los casos se utiliza un controlador de acción directa. Análogamente al ejemplo anterior, se tiene que si hay una señal de entrada alta respecto al punto de control, el controlador decidirá cerrar la válvula, sin embargo, puesto que ésta es de aire para cerrar su señal de salida tendrá que ser igualmente alta.

Tipos de controladores.

Todos los controladores toman decisiones tendientes a mantener la variable de control lo más cercana posible al punto de control, sin embargo, existen diferencias sustanciales en cuanto a la manera en que lo llevan a cabo.

Controlador proporcional.

Ecuación que describe su funcionamiento

$$m(t) = \underline{m} + K_c[r(t) - c(t)] \quad (\text{A.1})$$

o

$$m(t) = \underline{m} + K_c e(t) \quad (\text{A.2})$$

en donde:

$m(t)$ = salida del controlador en psig o mA

$r(t)$ = punto de control en psig o mA

$c(t)$ = variable que se controla en psig o mA, ésta es la señal proveniente del transmisor.

$e(t)$ = señal de error en psig o mA, ésta es la diferencia entre el punto de control y la variable que se controla.

K_c = ganancia del controlador, adimensional.

\underline{m} = valor base en psig o mA.

La Ecuación A.2 es para un controlador de acción inversa. Si la variable que se controla se aumenta, la salida del controlador disminuye. Se designa matemáticamente un controlador de acción directa haciendo negativa la ganancia del mismo, sin embargo, físicamente hablando no existen ganancias negativas en los controladores, si se selecciona un controlador de este tipo de acción, la presión o corriente que forma el error simplemente es restada del punto de control. En dicha ecuación también se observa que la salida del controlador es proporcional al error entre el punto de control y la variable que se controla. La proporcionalidad la da la ganancia del controlador, K_c , con esta ganancia o

sensibilidad del controlador se determina cuanto se modifica la salida del controlador con un cierto cambio de error.

La Figura A.1 ilustra gráficamente el cambio que sufre la salida $m(t)$ ante un cambio en la entrada $c(t)$, tanto para un controlador de acción directa (A), así como para un controlador de acción inversa (B).

Con el fin de mostrar el funcionamiento de un controlador proporcional, se utilizará como ejemplo un sistema de control de nivel de líquido en un tanque como el de la Figura A.2 (incluida al final de este apéndice)

Considérese para dicho sistema las condiciones de operación en régimen permanente siguientes.

$$q_i = q_o = 150 \text{ gpm} \quad (\text{A.3})$$

$$h = 6 \text{ ft} \quad (\text{A.4})$$

Además, se supone que para mantener este valor de q_o se alimenta presión neumática con valor de 9 psig, la válvula a utilizar será de aire para abrir, en tanto que el controlador será de acción directa. La ecuación resuelta para dicho controlador, considerando las condiciones especificadas, queda así:

$$m(t) = 9 + (-Kc) e(t) \quad (\text{A.5})$$

supóngase ahora que se presenta un disturbio, tal que el

flujo de entrada es ahora de 170 gpm, cuando esto sucede, el nivel del líquido aumenta y el controlador debe, a su vez, aumentar su salida para abrir la válvula y bajar el nivel para alcanzar una operación estacionaria el flujo de salida,

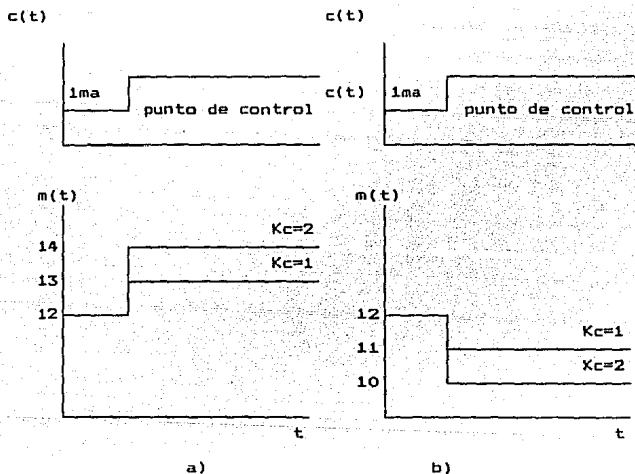


Figura A.1.- Salida de un controlador proporcional. a).- De acción directa. b).- De acción inversa.

qo, debe ser ahora de 170 gpm y para que pase este nuevo flujo, se debe abrir la válvula de salida más que cuando pasaban 150 gpm. Puesto que la válvula es de aire para abrir, supongase que la nueva presión sobre la válvula debe ser de

10 psig, es decir, la salida del controlador, $m(t)$, debe ser de 10 psig.

En la ecuación A.5 se puede observar que la única manera de que la salida del controlador sea 10 psig, es que el segundo término del miembro de la derecha tenga un valor de +1 psig y, para que esto ocurra el término de error, $e(t)$, no puede ser cero en el régimen permanente.

Del ejemplo descrito, se pueden notar dos puntos importantes. El primero se refiere a que el valor de K_c es el único parámetro ajustable en el controlador, el segundo es que para mantener en régimen permanente el nivel del tanque es necesario mantener un error de manera que el término de la ecuación del controlador que contiene a $e(t)$ no caiga a cero, puesto que esto provocaría que la salida $m(t)$ se igualara a 9 psig con el consecuente regreso a $q_0 = 150$ psig y desestabilización del sistema nuevamente. El valor de dicha desviación de régimen permanente ($e(\alpha)$) depende del valor de $-K_c$, tal como se aprecia en la Tabla A.1

Concluyendo respecto a estos dos puntos, se puede decir que todo lo que los controladores proporcionales logran es alcanzar una condición de operación de régimen permanente, la cantidad de alejamiento del punto de operación, o desviación, dependen de la ganancia del controlador.

En consecuencia, aunque estos controladores tienen la ventaja de tener solo un parámetro de ajuste, K_c , la desventaja de los mismos es que operan con una desviación en la variable que se controla, en algunos procesos esto puede no tener ninguna consecuencia.

$-K_c$	$-e(\alpha)$
1	1
2	0.5
4	0.25

Tabla A.1.- Valores de $-K_c$ contra $-e(\alpha)$.

En los casos en los que se controla dentro de dos límites (máximo y mínimo), los controladores proporcionales son suficientes, sin embargo, en los procesos en que el control debe estar en el punto de control, los controladores proporcionales no proporcionan un control satisfactorio.

Controlador proporcional integral.

Como se pudo apreciar, el controlador anterior es capaz de recuperar el régimen permanente una vez perdido por la presencia del disturbio, sin embargo, la variable controlada no puede ser igual al punto de control porque inmediatamente desaparecería la acción correctiva de dicho controlador, una mejora sustancial sería poder contar con un término en la ecuación que mantenga una corrección a la salida aunque el error se haga cero. Dicho término es denominado acción

integral o de reajuste. En consecuencia el controlador se convierte en un controlador proporcional integral -más conocido por "controlador proporcional más integral"- cuya ecuación descriptiva es la siguiente.

$$m(t) = \underline{m} + K_c[r(t) - c(t)] + (K_c/\tau_i) \int [r(t) - c(t)] dt \quad (A.6)$$

ó

$$m(t) = \underline{m} + K_c e(t) + (K_c/\tau_i) \int e(t) dt \quad (A.7)$$

En donde τ_i es el tiempo de integración o reajuste, con unidades de min/repeticición.

De las ecuaciones A.6 y A.7 se nota que, mientras está presente el término de error, el controlador se mantiene cambiando su respuesta y, por lo tanto, integrando el error para eliminarlo; se recurre nuevamente al sistema de control de líquido, esta vez para explicar el funcionamiento del controlador en cuestión.

Cuando el flujo de entrada aumenta a 170 gpm, el flujo de salida se debe aumentar a 170 gpm para alcanzar una condición final de operación en régimen permanente. Para que pasen los 170 gpm por la válvula de salida se necesita una señal de aire de 10 psig, y la única manera de que la salida de un controlador proporcional sea de 10 psig se logra mediante la conservación del término de error.

En un controlador proporcional integral, mientras el error

está presente, el controlador se mantiene integrándolo, es decir, lo añade al valor de la integral. Cuando el error sea cero el controlador añadirá cero a dicho término manteniéndolo constante en su último valor, que en este caso particular tendrá que ser de 1 psig para obtener una salida total de 10 psig.

Más aún, si se presenta un disturbio provocando un efecto contrario al último disturbio dicho término integral sufrirá disminuciones en la medida de lo provocado por este último, dicho de otra manera, si el término integral sumaba valores proporcionales al error en un principio, terminará restando valores proporcionales al error consecuente al segundo disturbio.

Para entender el significado físico del tiempo de reajuste, τ_i , considérese un ejemplo hipotético mostrado en la Figura A.3, en donde τ_i es el tiempo que toma al controlador repetir la acción proporcional y, en consecuencia, las unidades son minutos/repeticición.

Cuanto menor es el valor de τ_i , cuanto más pronunciada es la curva de respuesta del controlador, lo cual significa que la respuesta del controlador se hace más rápida.

Controlador proporcional integral derivativo.

En los controladores analizados anteriormente se nota la

carencia de un "toque de anticipación", cuando un operador controla manualmente algún proceso, observa el curso de la variable controlada, éste es capaz de abrir o cerrar una válvula a fin de controlar el proceso. Además, esta acción la puede llevar a cabo en una magnitud mayor de la necesaria para atenuar el efecto del disturbio, para lo cual utiliza

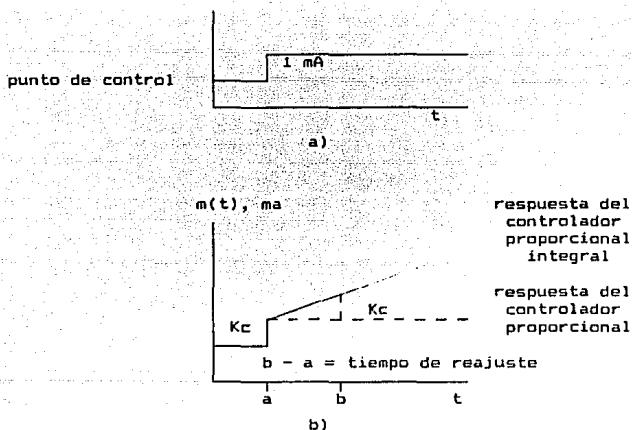


Figura A.3.- a) Entrada escalón. b).- Salida de un controlador PI.

como criterio la velocidad de cambio de dicha variable en observación. Cuando el operador nota una variación más lenta disminuye la apertura, cerrando incluso más de lo necesario con el fin de anticipar nuevamente el rumbo de la dinámica

del sistema, esta habilidad es lo que aquí se ha llamado como "toque de anticipación". En el control automático esta capacidad extra se logra mediante la inclusión del término derivativo en la ecuación descriptiva del controlador, la cual queda así:

$$m(t) = m + K_c e(t) + (K_c / \tau_i) \int e(t) dt + K_c \tau_D (de(t)/dt) \quad (A.8)$$

En donde τ_D es la rapidez de derivación en minutos.

Para explicar el comportamiento de un controlador proporcional integral derivativo (PID) se utilizará el sistema ilustrado por la Figura A.4 (al final del apéndice).

Suponiendo que la temperatura de entrada al proceso disminuye cierta cantidad y la temperatura de salida empieza a bajar de manera correspondiente, como se muestra en las gráficas de la Figura A.5 (al final del apéndice), en el tiempo t_a la cantidad de error es positiva y puede ser pequeña. En consecuencia, la cantidad de corrección que suministra el modo proporcional e integral es pequeña, sin embargo, la derivada, es decir, la pendiente de la curva de error, es grande y positiva, lo que hace que la corrección proporcionada por el modo derivativo sea grande.

Mediante la observación de la derivada del error, el controlador sabe que la variable que se controla se aleja con rapidez del punto de control y, en consecuencia, utiliza este

hecho para ayudar en el control.

En el tiempo t_b el error aún es positivo y mayor que antes, la cantidad de corrección de control que suministran los modos proporcional e integral también es más grande que en $t=t_a$ teniendo una contribución tendiente a abrir la válvula. Sin embargo, en este mismo tiempo, la derivada del error es negativa, lo cual significa que el error está disminuyendo, con la utilización de este hecho el término derivativo resta su valor a la suma de los otros dos términos con lo cual se provoca que el proceso tarde más tiempo en alcanzar el punto de control, pero disminuye el sobrepaso y las oscilaciones alrededor del punto de control.

Los controladores PID se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas. Ejemplos típicos de ello son los circuitos de temperatura y los de concentración.

Los procesos en que las constantes de tiempo son cortas (capacitancia pequeña) son rápidos y susceptibles al ruido del proceso, son característicos de este tipo de procesos los circuitos de control de flujo y los circuitos para controlar la presión en corrientes de líquidos, la aplicación del modo derivativo solo da como resultado la amplificación del ruido, puesto que la derivada de éste es un valor muy grande.

Los procesos donde la constante de tiempo es larga

(capacitancia grande) son generalmente amortiguados y, en consecuencia, menos susceptibles al ruido.

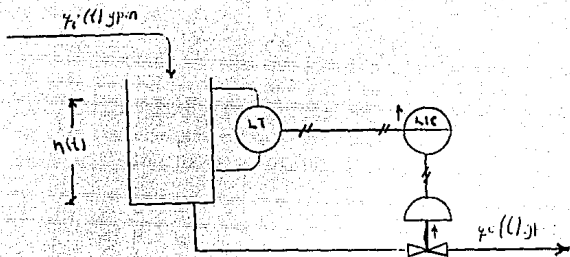


Figura A.2.- Circuito para control de nivel de líquido.

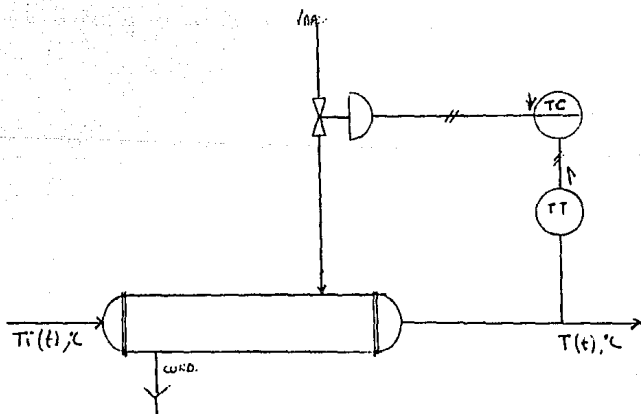


Figura A.4.- Circuito de control para intercambiador de calor

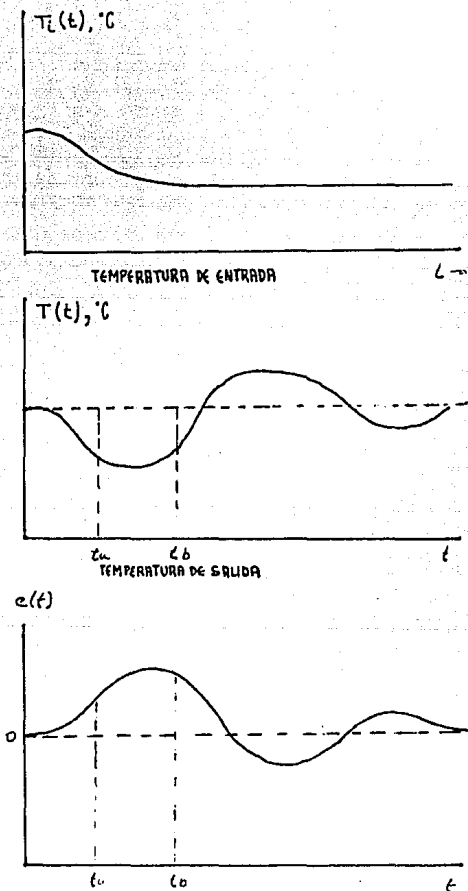


Figura A.5.- Dinámica del controlador PID de temperatura.

APENDICE B
EL LAZO DE CONTROL DIGITAL

Estructura básica del sistema de control por computadora.

Una representación esquemática de los elementos básicos que intervienen en un proceso controlado por computadora se muestra en la Figura B.1.

Breve definición de cada componente:

"*Transducers*". Mejor conocidos como detectores, estos constituyen los elementos de medición de las variables del proceso convirtiendo a señal eléctrica dichas variables. La señal de salida de estos elementos es normalmente analógica, sin embargo, es común en otras áreas ingenieriles detectores con salida lógica (encendido/apagado), por ejemplo los interruptores.

Multiplexor de señales analógicas. Un multiplexor tiene n entradas de señal, una salida de señal y m líneas de direcciones (donde $2^m = n$), esto se muestra en la Figura B.2.

La computadora por medio de un programa selecciona la señal, en este caso analógica, que debe ser leída y la direcciona a través de las m líneas dispuestas para ello, enviando una dirección binaria (0's ó 1's) en pulsos, por ejemplo 0,1,0 (dirección 2), la cual al ser recibida ocasiona que el multiplexor cierre el interruptor correspondiente a la misma, a fin de que la línea de salida quede conectada directamente

con la entrada direccionada.

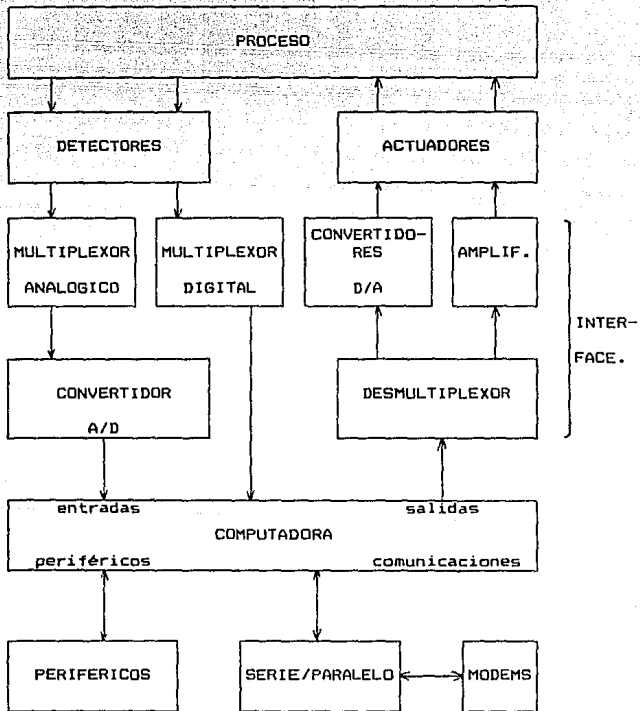


Figura B.1.- Elementos de un lazo de control.

Convertidores A/D. Recibe la señal analógica multiplexada y obtiene su equivalente en forma de octeto, tal como se aprecia en la Figura B.3.

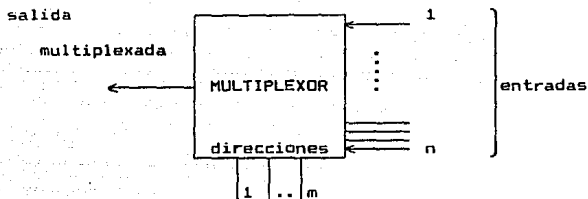


Figura B.2.- Representación de un multiplexor.

Cabe señalar que convencionalmente un número codificado en forma de octeto se representa como b_0, b_1, \dots, b_7 , siendo b_0 el pulso de menor contribución al valor de dicho número.

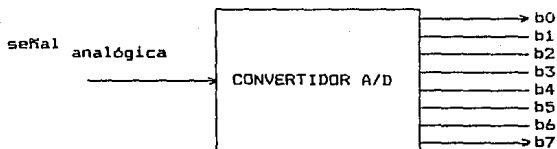


Figura B.3.- Representación de un convertidor A/D.

Un parámetro importante de este componente es su velocidad de conversión, medida en Kiloherztz, o sea, conversiones por

segundo, por ejemplo 30 KHz, o bien el tiempo de conversión medido en microsegundos, por ejemplo 70 μ seg.

Multiplexor de señales digitales. La función del multiplexor de señales digitales es similar al de señales analógicas.

Computadora o Unidad Central: Un sistema de control digital tiene como base una microcomputadora y un paquete de programación ("software"), los cuales pueden ser empleados satisfactoriamente en el control de procesos industriales.

El paquete de programación incluye los algoritmos que realizan las acciones más comunes de control tales como proporcional, integral y derivativa.

Por medio de un tablero de comunicación con el operador, éste puede realizar la selección de las acciones de control a través de menús de selección, por medio de gráficas puede observar el desempeño del sistema, a la vez que interactúa con él mismo, fijando el punto de operación deseado, además de la posibilidad de cambiar la frecuencia de muestreo y los parámetros de sintonía del controlador.

Un sistema puede presentar las siguientes características.

Equipo.

Memoria principal de 256 Kb o mayor.

Unidad controladora de disco flexible.

Velocidad de reloj con 4.77 MHz.

Monitor monocromático con capacidad de gráficos.

Programa de aplicación.

Capacidad de lectura y escritura en puertos de la computadora, para poder comunicarla con la interface.

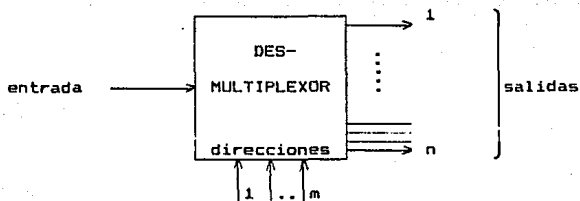


Figura B.4.- Representación de un desmultiplexor.

Desmultiplexor. La señal correctiva saliendo de la computadora será invariablemente una señal digitalizada, y es necesario enviarla hacia el actuador o elemento final de control correspondiente, para lo cual se requiere de un desmultiplexor.

Un desmultiplexor tiene m entradas de direccionamiento y n salidas direccionables tal como se aprecia en la Figura B.4.

Su funcionamiento es simple ya que a una dirección enviada por la computadora, por ejemplo 0,1,0 (dirección de salida número 2), el desmultiplexor cerrará el interruptor correspondiente a fin de conectar directamente la entrada, conteniendo el dato digitalizado, con dicha salida direccionada, logrando de esta manera que la señal correctiva sea enviada al destino correcto.

Convertidores D/A. Normalmente la salida digitalizada no será apropiada para lograr una respuesta en el actuador del elemento final de control, es decir, estos casi siempre requieren de una señal analógica para obtener la acción que de ellos es esperada. El convertidor Digital/Analógico recibe la señal digital desmultiplexada y la convierte en una señal analógica de voltaje y/o amperaje apropiado.

Amplificadores: Algunos actuadores o elementos finales de control si requieren de pulsos para su funcionamiento, por ejemplo los motores por pasos aunque en la industria de proceso químico raramente se presenten estos casos. Cuando es necesario, entonces, los pulsos en cuestión deben ser acondicionados a los niveles de voltaje y/o amperaje requeridos. Un amplificador recibe en su alimentación una señal muy pequeña y tomando la alimentación necesaria de una fuente de poder entrega una señal amplificada análoga, por ejemplo recibiendo un pulso de 10 mV a su entrada y

entregando un pulso de 100mV a su salida. Un parámetro importante de este componente es su ganancia, es decir, el número de veces que es amplificada la señal de entrada (en el ejemplo, dicha ganancia fue de 10).

Actuadores. Básicamente un actuador es un transformador o convertidor de energía, en este caso recibe una señal electrónica (energía eléctrica) y la transforma en energía neumática, hidráulica, etc.

Modems. Cuando se requiere enviar datos obtenidos por la computadora a través de grandes distancias, se necesita de un sistema modulador-desmodulador para la transmisión por medio de líneas telefónicas, microondas, u otro medio.

La computadora.

Los circuitos procesadores de señales digitales inicialmente fueron elaborados con componentes de pequeña y mediana escala de integración, pero con la aparición de la tecnología de gran escala de integración surgen en el mercado pequeñas máquinas de escritorio que tenían muchas de las capacidades de las computadoras disponibles: la Era de las Microcomputadoras (de ocho pulsos) había llegado.

Sus diseños fueron enfocados para su uso en negocios, procesamiento de palabras, archivos de datos y documentos,

contabilidad, usos personales y entretenimiento. Con excepción de algunas computadoras de la marca Hewlett-Packard[®], pocas intentan ser usadas con propósitos de instrumentar laboratorios científicos, aunque muchas pueden cubrir este papel sorprendentemente bien.

Una computadora es un procesador de señales digitalizadas en forma de octetos, éstos pueden ser tratados en cierto número de formas. Por ejemplo (1) los octetos pueden ser tratados como números y la microcomputadora hace operaciones aritméticas con ellos, (2) dos octetos diferentes pueden ser comparados para verificar la identidad en sus valores o identificar si uno es más grande en valor que el otro.

Los octetos pueden ser almacenados dentro de la computadora o leídos a partir de ella, o transmitidos hacia un componente externo. Para ello, es importante contar con un código binario de ocho pulsos (un octeto) que pueda representar un valor, un carácter, una dirección, un par de dígitos en BCD, un par de dígitos en hexadecimal, y así sucesivamente.

Los octetos son usados como instrucciones codificadas (llamadas "Código de Máquina") las cuales controlan la operación de la computadora, de esta manera un programa no es otra cosa que una serie de octetos tratados en forma particular por la computadora.

Afortunadamente, no es necesario profundizar en la programación en lenguaje de máquina, mencionada anteriormente, puesto que las microcomputadoras más apreciadas en laboratorio están abastecidas con paquetes de aplicación comercial los cuales permiten al usuario programar la microcomputadora usando lenguaje de alto nivel.

Elementos de una computadora.

Los elementos típicos de una computadora son listados a continuación.

Unidad microprocesadora (MPU) ó Unidad Central de proceso (CPU).

Memoria ROM/RAM.

Teclado.

Periféricos.

Pantalla de video.

Para estas microcomputadoras de ocho pulsos, la MPU es generalmente un circuito integrado de 40 conectores de los cuales el 6502 (Tecnología MOS), el 6800 (Motorola), el 8080 (Intel) y el Z80 (Zilog) son algunos ejemplos.

La MPU usada por la microcomputadora no es de gran importancia a menos que sea necesario programar en lenguaje de bajo nivel tal como el Ensamblador. Las microcomputadoras contienen al menos dos tipos de memoria. El primer tipo son

memorias de "Sólo-Lectura" (ROM), la cual contiene un programa almacenado permanentemente previsto para controlar la manera de operar de la computadora en el momento de ser encendida.

El segundo tipo es la memoria de lectura y escritura (RAM) la cual es usada para almacenar los programas y datos utilizados por el usuario.

La memoria es medida en octetos. Cada octeto comprende ocho pulsos alto/bajo y cada octeto representa aproximadamente un carácter. Usualmente, la memoria es contada como Kilo-octetos (Kb) o Mega-octetos (Mb). Un Kb es 1024 octetos y un Mb es 1024 Kb ó 1048576 octetos.

Las computadoras personales tipo XT originales usan una CPU 8088 de Intel, las versiones denominadas "clones" usan el 8088 ó uno de los circuitos integrados similares (8086, 80188, 80186 de Intel V-20, V-30 de NEC).

Todos estos circuitos integrados pueden direccionar un total de 1 Mb de memoria. La memoria prevista originalmente para estas PC's es 640 Kb y es denominada memoria DOS (Sistema Operativo de Disco por sus siglas en inglés), o memoria convencional.

Microprocesadores.

Los elementos que constituyen la estructura básica de un microprocesador son:

Contador de programa.

Registros de instrucción.

Unidad Lógica Aritmética.

Registros acumuladores.

Unidad de control.

Sistema de conectores internos y memoria temporal asignada de entrada/salida.

Reloj (Solo algunos microprocesadores lo tienen integrado).

Contador de Programa.

El microprocesador requiere instrucciones almacenadas en la memoria ROM ó RAM, cada una de ellas está señalada por una dirección en memoria, el microprocesador posee un registro de m-pulsos que contiene en cada instante la dirección de la instrucción a ejecutar.

Este registro es el contador de programa. Cuando la máquina es encendida este contador tiene inicialmente la dirección de la primera instrucción del programa de arranque. Por otra parte, las instrucciones están colocadas en direcciones sucesivas de memoria, este contador debe aumentarse automáticamente para permitir el paso desde una instrucción hacia la siguiente.

Registro de instrucciones.

Es un registro de n-pulsos donde es almacenada la instrucción recién direccionada y permanece ahí el tiempo necesario para su ejecución.

Unidad Lógica Aritmética (U.L.A.).

Conjunto de circuitos capaces de efectuar las operaciones aritméticas y lógicas sobre los operandos (datos).

En general, la U.L.A., tiene dos entradas y una salida debido a que normalmente las operaciones se llevan a cabo con dos operandos.

Registro Acumulador.

Los microprocesadores cuentan al menos con un registro acumulador, el cual tiene la función de almacenar datos en curso de tratamiento, por ejemplo, en la suma de dos números se requieren dos operandos pero el microprocesador sólo puede direccionar uno a la vez, por lo tanto primero lee uno de la memoria y lo almacena en el acumulador, después lee el segundo de la memoria y lo envía a la U.L.A., ésta última recibe ambos por sus entradas obteniendo a la salida el resultado, el cual es almacenado en el acumulador, desplazando al operando inicialmente colocado ahí.

Dicho resultado se mantiene en ese lugar para su posterior

utilización ó para almacenarlo en alguna celda de memoria.

Si el microprocesador cuenta con varios acumuladores, estos pueden ser utilizados para almacenar constantes que se utilicen continuamente ahorrando de esta manera tiempo de ejecución por lectura continua de las mismas.

Unidad de control.

Son un conjunto de circuitos de control que descodifican las instrucciones y las hacen ejecutar por los "órganos ejecutivos", por ejemplo, indica a la U.L.A., la operación a ejecutar, indica al Acumulador la recepción de datos proveniente de memoria, ordena al Contador coloque su contenido sobre el sistema de conectores de direcciones interno, etc. También, consta de un descodificador el cual interpreta los pulsos correspondientes al campo de código de operación.

Sistema de conectores internos y memoria temporal asignada de entrada/salida.

Las memorias temporales asignadas de entrada/salida (entrada/salida de datos e instrucciones, salida de direcciones), son la conexión del microprocesador con los sistema de conectores externos (el de datos y el de direcciones).

El funcionamiento de una memoria temporal asignada es similar al de una válvula, ya que puede permitir el paso de un pulso en uno o en otro sentido del conductor eléctrico, pero también puede impedirlo, a esto último se le denomina estado de alta impedancia.

Las memorias temporales asignadas de direcciones y de datos e instrucciones se conectan con los sistema de conectores internos del circuito integrado (microprocesador), la primera con el sistema de conectores interno de direcciones y la segunda con su respectivo sistema de conectores interno de datos.

Reloj.

Algunos microprocesadores tienen integrado un generador de impulsos que sincronizan el funcionamiento del mismo, así como el de los periféricos, cuando no lo tiene integrado se requiere de un circuito oscilador que realice esta función.

Interacción entre componentes.

En la Figura B.5 se presenta un esquema a fin de ilustrar la interrelación guardada por los diferentes componentes del circuito integrado.

Conociendo la organización física de un microprocesador, se puede estudiar cómo se ejecutan y encadenan las instrucciones

de un programa.

Las Figuras B.6, B.7 y B.8 describen de manera muy elemental el funcionamiento del circuito integrado durante un ciclo completo de ejecución.

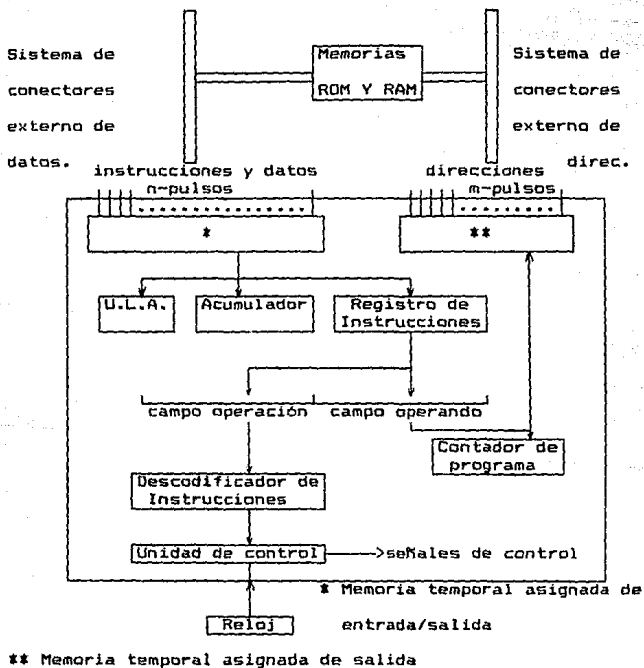


Figura B.5.- Componentes de un microprocesador.

Al inicio de la secuencia, el contador contiene la dirección "a" de una instrucción, la unidad de control se encarga de ordenar al contador que ponga su contenido en el sistema de

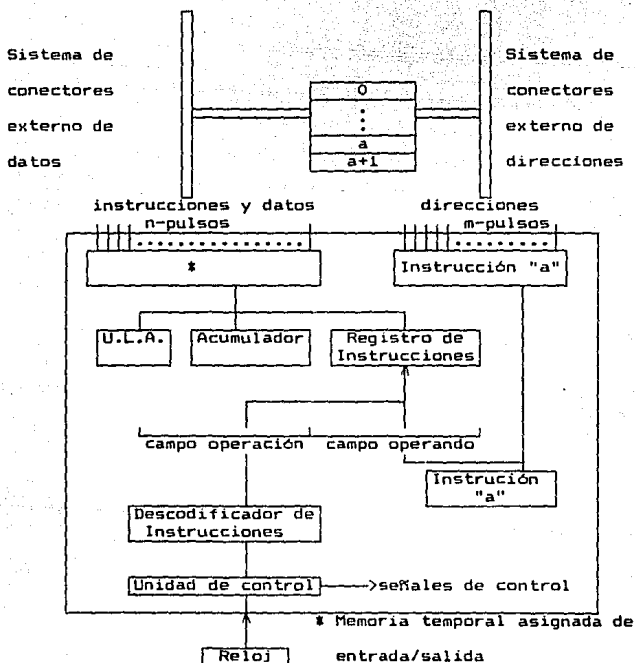
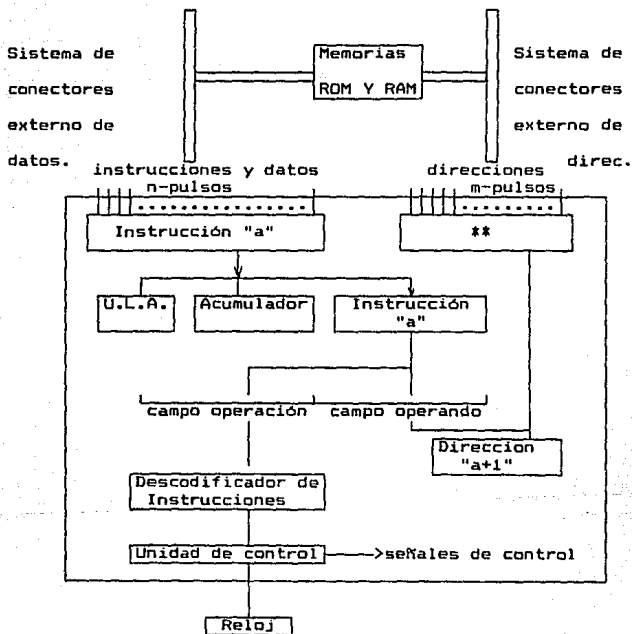


Figura B.6.- Búsqueda de la instrucción (1a. parte).

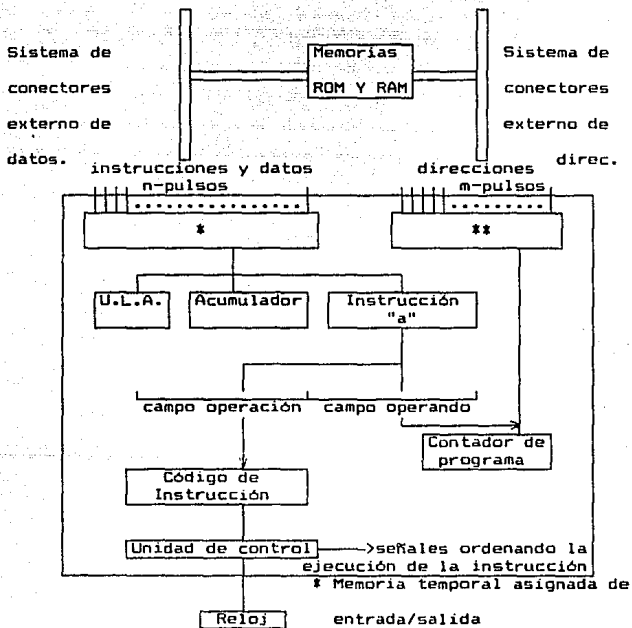
conectores interno de direcciones, "abre" la memoria temporal asignada de salida para permitir el paso de dicha dirección y envía una señal de control, a través del sistema de



** Memoria temporal asignada de salida

Figura B.7.- Búsqueda de la instrucción (2a. parte).

conectores de control externo, el cual se estudia en detalle posteriormente, hacia los circuitos integrados de memoria indicándoles que se llevara a cabo una operación de lectura.



** Memoria temporal asignada de salida

Figura B.8.- Ejecución de la instrucción.

Entre el último paso descrito y el inicio de la 2a parte de la búsqueda de la instrucción transcurre el suficiente tiempo para que la memoria coloque el contenido de la celda direccionada en el sistema de conectores externo de datos.

Una vez devuelto el dato por la memoria, la unidad de control "abre" la memoria temporal asignada de entrada/salida para permitir la entrada de la instrucción hacia el sistema de conectores interno de datos e instrucciones, ordena al registro de instrucción que almacene dicho dato y ordena el cambio automático del contenido del contador.

Ambas Figuras B.6 y B.7 complementan la búsqueda de la instrucción, la cual es idéntica para todas las instrucciones, puesto que consiste simplemente en leer de memoria la instrucción a ejecutar.

Los pulsos de la instrucción correspondientes al campo código de operación llegan al descodificador de instrucciones, gracias a una orden por parte de la unidad de control. Estos son descodificados e interpretados ocasionando consecuentemente la generación secuencial de señales de control, cuya finalidad será ejecutar la instrucción en proceso. La conclusión será más o menos tardía según la complejidad de la instrucción.

Señales de control hacia el exterior.

Analizando las descripciones anteriores se nota la carencia de comunicación de la unidad de control del microprocesador con el exterior del mismo. Las señales de control encadenadas con el exterior cubren esta carencia, permitiendo coordinar y sincronizar el funcionamiento del microprocesador con los órganos exteriores (memorias o periféricos), en general más lentos.

Status. - Generalmente es un par de salidas del microprocesador (S_0, S_1), que dependiendo del valor que tomen indican a los periféricos o memorias el tipo de actividad en curso de ejecución, de acuerdo a la tabla B.1.

S_1	S_2	
0	0	Operación interna en el microprocesador
0	1	El microprocesador envía una dirección
1	0	Operación de lectura
1	1	Operación de escritura

Tabla B.1- Tabla de verdad del "status"

Ready. - Señal enviada por una memoria más lenta que el microprocesador, para solicitar que éste interrumpa momentáneamente su ciclo de ejecución y se coloque en espera hasta que termine su función.

Interrupt.- Señal enviada por un periférico para solicitar al microprocesador que interrumpa la ejecución de la instrucción en curso hasta que el periférico demandador haya terminado su trabajo.

Synchro.- Señal de salida del microprocesador en forma de pulsos que definen las fases sucesivas (reloj de sincronización).

Dando un vistazo al microprocesador resultante se tiene la estructura de la Figura B.9.

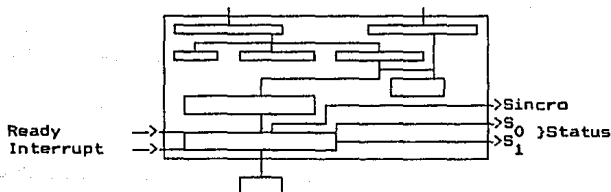


Figura B.9.- Señales de control.

Más sobre los elementos del microprocesador.

Una vez comprendido el funcionamiento elemental de los componentes del microprocesador es posible agregar información sobre estos, lo cual no se hizo anteriormente a fin de hacer más "digerible" su comprensión.

Registros acumuladores.

La mayoría de los microprocesadores disponen de un conjunto de registros volátiles, denominados en conjunto "Block de notas" (Scratchpad Registers), que permiten almacenar datos provisionales sin tener que recurrir a una memoria externa (que penalizaría la rapidez del tratamiento).

Contador de programa.

Al inicio de un ciclo de ejecución, la unidad de control ordena al acumulador colocar su contenido en la memoria temporal asignada de salida, esto marca el principio de la búsqueda de la instrucción, al final de la cual el acumulador aumenta su contenido automáticamente.

Cuando la instrucción encontrada es una "de salto", se está pidiendo al microprocesador que altere el orden secuencial de ejecución del programa y "salte" a la dirección indicada por la misma. La mayoría de los microprocesadores disponen de una "pila" (Stack) de registros volátiles que permiten almacenar un número determinado de direcciones provisionales que permiten realizar saltos a subprogramas.

Una pila de N-registros permite N-niveles de subprogramas. Cuando se llama a un subprograma por medio de una instrucción de salto, la dirección secuencial de la próxima instrucción es almacenada en un registro de la pila, y se restituye en el

contador de programa una vez que se regresa de éste.

Para conservar el orden de aparición de los saltos, las direcciones van siendo "recorridas" dentro de la pila conforme va siendo necesario, para este fin se utiliza un registro especial denominado "puntero de pila" (Stack Pointer).

Arquitectura base de un microcomputador.

Para poder construir un microordenador (mc), en inglés "Microcomputer", los elementos que deben acompañar a un microprocesador son principalmente:

Memorias.

Circuitos de entrada/salida.

Sistema de conectores de unión.

Memorias.

Son necesarias porque contienen todas las instrucciones en forma de programas, físicamente son los circuitos integrados agrupados en forma de módulos (RAM, ROM, PROM, etc.), directamente conectados al microprocesador por medio de los sistema de conectores de uniones. Las microcomputadoras disponibles en el mercado tienen acoplados memorias externas, llamadas también "de masa" (por ejemplo discos, cintas magnéticas), siendo en este caso tratadas como

periféricos, es decir, el microprocesador tiene acceso a ellas por medio de operaciones de entrada/salida.

Circuitos de entrada/salida.

Se entiende como tales todo lo que asegura la adaptación entre el microprocesador y el exterior. El "exterior" engloba todos los órganos "periféricos" que permiten la comunicación entre el usuario y el microprocesador, o entre este último y un sistema cualquiera, según el uso que se haga del microprocesador.

Uso clásico. - Si el microprocesador se utiliza en un papel clásico de computador, los periféricos serán habitualmente:

Teletipo

Memorias masivas

Impresora

Teclado

Monitor

Usos especiales. - Si el microprocesador se utiliza en algo especial, como en el control de un proceso (por ejemplo automatismo, adquisición de datos), los periféricos podrán ser diversos.

Convertidores A/D y D/A

Mandos de motores

Anuncios de consignas, etc.

Cada periférico necesita un circuito de entrada salida, más o menos complejo según sea su naturaleza, los periféricos de uso clásico tienen su circuito de entrada/salida incluido dentro de las microcomputadoras comerciales. De manera general se puede decir que estos tienen un doble papel:

1.- Transmitir un dato, efectuando eventualmente la adaptación necesaria (compatibilidad entre circuitos integrados MOS-TTL, transferencia en serie o en paralelo, etc.).

2.- Obedecer las señales de control enviadas por el microprocesador, o por el periférico inclusive.

Cuando el periférico en cuestión es de uso especial, el circuito de entrada/salida normalmente es denominado interfase. Su función es más amplia que la de los circuitos de entrada/salida, sin embargo, dicha función incluye el desempeño descrito para éstas.

Sistema de conectores de uniones.

Comunican los elementos del microordenador (microprocesador, memorias y circuitos de entrada/salida). Existen diferentes estructuras de sistema de conectores, presentando aquí una muy frecuentemente adoptada.

Sistema de conectores de direcciones.- Unidireccional, a través del cual el microprocesador envía las direcciones de selección de las memorias y de los circuitos de entrada/salida de los periféricos. El número de conductores de este sistema de conectores es el número de pulsos de direcciones del microprocesador.

Sistema de conectores de datos.- Bidireccional, por el cual se intercambian las instrucciones y los datos entre diferentes componentes. Comúnmente se le conoce como "Data Bus". El número de conductores de este sistema de conectores corresponde a la capacidad de tratamiento del microprocesador.

Sistema de conectores de control.- Donde circulan las diferentes señales de control ("ready", "interrupt", "synchro", etc.)

Sincronización entre componentes del microordenador.

Es esencial asegurar la sincronización de los elementos del microordenador bajo pena de obtener resultados incoherentes en caso de no hacerlo. Dos hechos deben ser tomados en cuenta (1) una memoria puede ser mas lenta que el microprocesador, (2) un periférico es siempre más lento que el microprocesador.

Sincronización con memorias.- Usando como ejemplo el caso de lectura en memoria ("LDA m"), suponiendo que el microprocesador ejecuta la instrucción en un ciclo. Si la memoria es demasiado lenta, el dato no estará disponible sobre el sistema de conectores de datos en el momento en que lo deba tomar en cuenta, por lo tanto el dato que cargue en el acumulador no tendrá entonces ningún sentido. Por ello los microprocesadores disponen de una entrada "READY". Mientras la memoria no está preparada, envía la señal "READY" que ocasiona la puesta en espera del microprocesador. Dicha señal es restaurada cuando el dato está disponible.

Sincronización con un periférico.- Tomando como ejemplo la escritura sobre un periférico "x" ("OUT x"), suponiendo que el periférico es una impresora, mientras que el microprocesador tendrá que cargar el dato en la memoria temporal asignada de la interfase "x" este será lentamente impreso en relación a la velocidad del microprocesador. Si un segundo dato es enviado antes que la impresión del primero termine, la impresora suministrará resultados incoherentes. Dada la magnitud del problema de entrada/salida hacia los periféricos este es uno de los principales aspectos en la concepción de un microordenador.

Interfases estándar.

Como fué mencionado anteriormente, los tres sistemas de

conectores tienen otros sistemas conectados, siendo el más importante en el presente contexto el circuito PIA ("Peripheral interface adapter"), el cual es conocido algunas veces como PIO ("Peripheral input/output") o VIA ("Versatile interface adapter").

Los circuitos PIA son usados para permitir la comunicación de la CPU con otros sistemas manejadores de octetos que no están sincronizados con el reloj del ordenador, lo cual podría acarrear problemas de sincronización en caso de usar directamente los sistemas de conectores para la conexión de dichos sistemas (periféricos). El teclado e impresora son ejemplos de sistemas frecuentemente conectados a circuitos PIA.

Las microcomputadoras más usuales están provistas de al menos una conexión conocida como puerto paralelo mapeado en memoria, el cual es frecuentemente controlado por medio de un circuito PIA y consiste de un multi-conector que contiene las entradas constituyentes del sistema conector de datos y una o más señales usadas para propósitos de control.

A través de tales circuitos es posible introducir octetos en los sistemas periféricos por medio de los conductores del puerto, o recibirlos inclusive, tratando para tales efectos al circuito como una celda de dirección específica en memoria.

(de ahí el término "mapeado en memoria"), y direccionando tales octetos por programa.

Algunas micros usan instrucciones específicas como "IN" o "OUT" para transferir los octetos desde o hacia un puerto paralelo, mientras que, cuando se programa usando un lenguaje de alto nivel, el usuario no tiene que preocuparse por la forma en la que los pulsos viajan, a través de los sistemas de conectores, entre uno y otro de los componentes internos de la microcomputadora, sin embargo, un octeto específico de memoria puede ser referido por una instrucción del programa, en "BASIC" por ejemplo, usando las instrucciones "PEEK" y "POKE". La primera lee el dato de una memoria de dirección "x" y lo almacena en una memoria "y", la segunda almacena el valor "y" en una memoria de dirección "x".

Un segundo sistema de conexión provisto en muchas computadoras es una interfase I/O estándar, siendo las más populares la "IEEE 488 standard system", "Centronics parallel standard port" (el cual provee únicamente salida), y la "RS232C-type standard system", mejor conocido como RS232C o, en una forma modificada, como RS423.

Con excepción del primero, estas conexiones son previstas principalmente para permitir la conexión con periféricos de computadora mas que con instrumentos de laboratorio, sin

embargo, la RS232C se ha convertido en una conexión estandar popular para dicho uso.

La principal ventaja de los circuitos de I/O discutidos es que su uso desde un programa en BASIC podría ser mucho más simple que los sistemas alternativos de interfase menos estandarizados.

Tipos de interfases.

Las funciones de medición o control de los circuitos de los instrumentos producen o utilizan señales las cuales pueden ser voltajes, corrientes o pulsos, mientras que la computadora es un artefacto orientado a usar o producir señales binarias paralelas agrupadas en octetos. Para permitir señales de un instrumento en forma de entrada o salida de datos para una microcomputadora se requiere de un tercer artefacto a fin de traducir un tipo de señal en otra. Tal artefacto es conocido como interfase. Una señal de instrumento puede ser un valor constante, o bien, dependiente del tiempo, mientras que la señal de la computadora debe ser uno o más octetos especificados en un instante de tiempo en particular. por esa razón la traslación llevada a cabo por la interfase debe ser disparada de alguna manera, ya sea por el instrumento o por la computadora, esta última es capaz de iniciar el proceso de traslación con una señal lógica sobre una línea de control.

Tipos de interfases de instrumentos básicas.

Para adecuar los diferentes tipos de señales instrumentales hay disponibles diferentes tipos de interfases. En esta sección se considerará brevemente la naturaleza de cada tipo de interfases comunes. La mayoría están disponibles comercialmente en una forma apropiada para conexión directa a las micros más populares, aunque, si no es necesaria una precisión o velocidad muy altas, las interfases pueden ser construidas muy fácilmente por un técnico competente.

Interface de entrada analógica.

La interfase de entrada analógica (o de conversión analógica a digital) traslada señales analógicas constantes o lentamente variantes en octetos con valores binarios proporcionales. Una interfase de entrada analógica típica consta de dos etapas. La primera es un amplificador de ganancia ajustable basado en un circuito integrado denominado "amplificador operacional" cuya característica fundamental es una alta impedancia de entrada (resistencia infinita). Este convierte una señal de entrada dentro de un rango de medición (0 ~ 10 mV por ejemplo) a un rango de entrada estandar de un circuito integrado convertidor analógico digital "ADC" (típicamente de 0 a 1 V). Cuando una señal de control apropiada es aplicada al circuito integrado ADC (conector convertidor) el voltaje analógico a su entrada es convertido en un valor digital el cual es almacenado en una memoria

temporal asignada interna. El valor digital podría aparecer como una señal digitalizada paralela de ocho pulsos sobre las líneas de salida, aunque normalmente ello está bajo control de una señal aplicada a un conector denominado "disable", de manera tal que la salida puede ser impedida cuando no es requerida. La etapa de amplificación cuenta con dos resistencias variables que sirven para ajustar la salida a cero para una entrada de 0 V, una salida doscientos cincuenta y cinco (binario 1111 1111) para una entrada de 1 V, y así sucesivamente.

El tiempo tomado por el convertidor para transformar una entrada analógica en una salida digital es el tiempo de conversión, el cual varía ampliamente con el tipo de circuito integrado utilizado (y usualmente con su costo). Los convertidores están disponibles con tiempos de conversión en el rango de menos de unos microsegundos hasta varios milisegundos. Evidentemente la velocidad de conversión requerida en una aplicación particular dependerá de la rapidez con la cual la señal analógica esté variando y de con qué frecuencia la señal debe ser muestreada.

Interface de salida analógica.

Una interfase de salida analógica (o conversión digital a analógica) desarrolla la transformación opuesta a la descrita en el inciso anterior, tomando un valor de palabra entre cero

y doscientos cincuenta y cinco convirtiéndolo a una señal de salida analógica.

Dos convertidores representativos son el ZN428E y el AD7523, obviamente la conversión requiere de una etapa posterior de amplificación para obtener los niveles de voltaje de salida analógica requeridos. Nuevamente, la conversión a partir del valor binario presente en las ocho líneas paralelas de datos puede ser iniciada por la aplicación de una señal de nivel apropiado sobre el conector "enable" del circuito integrado convertidor, aunque no todos éstos proveen de esta ventaja, y muchos ofrecen una memoria temporal asignada para mantener el dato digitalizado de manera que la salida analógica pueda ser mantenida después de que la señal de entrada digital haya sido eliminada

Estos circuitos convertidores de salida analógico producen voltajes típicos en rangos desde 0 a 1 V hasta 0 a 10 V. El voltaje de salida puede ser calibrado con un amplificador de ganancia seleccionable o un atenuador para caer en el rango deseado.

Los convertidores digital-analógicos son más veloces que los convertidores analógico-digitales equivalentes en precio y para la mayoría de aplicaciones de laboratorio la velocidad de conversión no constituye una limitación.

Interface de entrada lógica.

La interfase de entrada lógica usa un candado (latch) octal para detectar niveles lógicos sobre hasta ocho líneas detectadas. Las señales en este caso normalmente surgen de relevadores, microinterruptores o circuitos lógicos, aunque en algunos casos es posible usar fuentes de señales analógicas variables, sin embargo, si hay riesgo de que dicha señal caiga dentro de un rango de voltaje indefinido (es decir que no esté especificado como un valor alto o bajo) es mejor convertir el voltaje a un nivel lógico mediante el uso de un circuito apropiado (denominado comparador).

Cada uno de los niveles Alto/Bajo de las ocho líneas detectadas se almacena en la memoria temporal asignada como un pulso de un octeto, toda vez que la señal de control apropiada se aplique al conector "enable" del circuito integrado "lacth". El octeto se lee luego por la computadora como un número binario, así por ejemplo, una lectura de 255 (1111 1111) indicará que todas las líneas detectadas estuvieron en nivel alto.

Interface de salida lógica.

La interfase de salida lógica o interfase de salida de interruptor (switch) produce ocho niveles lógicos (ceros o unos) de salida con voltajes de 0 ó 5 V, por supuesto éstos pueden ser posteriormente convertidos a otros voltajes. En

este caso un octeto proveniente de la computadora se almacena en un lugar de memoria octal cuando su conector "enable" es activado, y cada línea de la memoria temporal asignada de salida produce cero voltios si el pulso correspondiente es cero, o cinco voltios si es un nivel lógico uno.

Interface de datos digitales.

Ambas interfases de entrada y salida lógica pueden ser operadas como transmisores de dígitos de ocho pulsos, y en este aspecto se haya aplicación para la comunicación con instrumentos los cuales cuentan con facilidad para transferir datos de ocho pulsos.

Interface contadora de pulsos.

Esta interfase acepta pulsos (usualmente pulsos lógicos o pulsos con características específicas, las cuales son convertidas en pulsos lógicos) y los cuenta en un contador binario. Los pulsos de entrada se convierten en pulsos lógicos de ancho específico (por medio de un circuito integrado denominado monoestable), el ancho de los pulsos de salida es seleccionable y debe ser adecuado para la entrada al contador.

El contador es uno binario de ocho pulsos y puede contar de cero a doscientos cincuenta y cinco, cuando la cuenta llega a este último número el contador se inicializa en cero. Además,

el octeto almacenado en la memoria temporal asignada representa la cuenta hasta el momento en que dicha memoria recibió la última señal "enable", y no cambiará si se siguen contando nuevos pulsos antes de que dicho octeto sea transferido a la computadora.

Interface de salida de pulsos.

Las interfases de salida de pulsos pueden ser construídas, aunque cuando se necesita una interfase de éstas normalmente es suministrada con el instrumento. Además, pueden ser distinguidas dos distintas categorías de interfases (1) aquellas en las cuales la salida consiste de un tren continuo de pulsos o de una onda cuadrada con una velocidad de pulso seleccionable y (2) aquellas para las cuales la salida consiste en un número seleccionable de pulsos.

La primera es útil cuando se requiere de una señal de salida de frecuencia determinada y la segunda tiene aplicación en el suministro de trenes de pulsos para la operación de motores a pasos.

APENDICE C
INTERFASES Y TIEMPO DE MUESTREO TÍPICOS

Interfases típicas.

Los fabricantes de sistemas de control computarizado tienen disponibles las interfases que permiten la conexión de sus unidades de proceso en ambos sentidos de entrada y de salida. Obviamente, dentro de esta variedad de interfases están las que permiten la comunicación con unidades de proceso de la propia línea o de marcas ajenas dentro de una red jerárquizada, además de la conexión normal con la instrumentación de campo.

En lo referente a ésta última, el fabricante tiene disponibles dichas interfases en la variedad suficiente para comprender la conexión de instrumentos de su propia manufactura, así como también la de otros fabricantes.

En la Tabla C.1 se presenta un listado de interfases, o mejor conocidos como módulos de campo típicamente disponibles.

TIPO	CARACTERISTICAS
Interfase de entrada	0 a 20 mA
Interfase de entrada/salida	0 a 20 mA
Interfase de entrada/salida	Pulsos/0 a 20 mA
Interfase de entrada/salida	4 a 20 mA
Interfase de entrada	Termopar/milivoltios

Tabla C.1.- Módulos de campo típicos

Interfase de entrada/salida	0 a 10 V cd/ contacto cd
Interfase de entrada	Contacto cd
Interfase de entrada/salida	Contacto cd
Interfase de entrada	Contacto 125 V cd
Interfase de entrada/salida	Contacto 125 V cd
Interfase de entrada	120 V ca
Interfase de entrada/salida	120 V ca
Interfase de entrada	240 V ca
Interfase de entrada/salida	240 V ca

Tabla C.1.- Módulos de campo típicos (Continuación)

TIPO DE LAZO	TIEMPO DE MUESTREO
	T(seg)
Flujo	1
Nivel	5
Presión	5
Temperatura	20

Tabla C.2.- Tiempos de muestreo.

Tiempo de muestreo.

Este tiempo tiene la condicionante de ser al menos el doble

del máximo tiempo de oscilación de la señal de respuesta,
eurísticamente se aplican los tiempos de de la Tabla C.2.

APENDICE D
DINAMICA DE SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

Un lazo de control está constituido por varios componentes en arreglo tal que tengan como desempeño conjunto el mantener el proceso bajo control, resulta por lo tanto obvio que uno de los constituyentes del lazo es el proceso mismo.

Los procesos presentan diferentes formas de comportamiento dinámico. Este comportamiento se plantea inicialmente en términos de ecuaciones diferenciales cuya solución es necesaria para obtener una ecuación que describa la respuesta de la variable que se necesita controlar con respecto a cambios dinámicos de las variables restantes, es decir, de las que representan disturbios y de aquella con la que se pretende controlar el proceso, o sea, la variable manipulada.

El uso de la transformada de Laplace para resolver tales ecuaciones diferenciales tiene la ventaja de poder generalizar el comportamiento de gran variedad de procesos según el tipo de función de transferencia que presenten. El uso de funciones de transferencia permite caracterizar el comportamiento de una variable a controlar o variable de salida como respuesta a una variación dinámica o función de forzamiento de alguna de las variables restantes, generalmente la manipulada. Como consecuencia, se puede muestrear la respuesta de un proceso a una función de forzamiento y aproximar la curva obtenida a una curva de respuesta característica de un proceso de primer orden [1], la validez de este ajuste dependerá de que tan cercano al

primer orden sea realmente el proceso ajustado.

En el presente Apéndice se hace una breve descripción de los modelos dinámicos resultantes de procesos con una función de transferencia de primer orden. Además, se muestra un método de aproximación de respuesta dinámica de proceso a modelos de primer orden.

Sistemas dinámicos de primer orden.

A continuación se presenta una introducción al desarrollo de modelos simples de procesos, específicamente se tratará el modelo de sistemas de primer orden en términos de transformada de Laplace y a partir de éste se presentará la respuesta del mismo ante una función de forzamiento tipo escalón. Puesto que el tiempo muerto es un concepto importante en el modelado de sistemas se introduce aquí el significado de dicho término y su planteamiento matemático.

Procesos de primer orden.

Considerar la Figura D.1 en la cual se representa esquemáticamente un proceso del cual se supone cumple con la Ec. diferencial lineal D.1.

$$\alpha x(t) - \alpha y(t) = \beta dy(t)/dt \quad (D.1)$$

Reordenando.

$$(\beta/\alpha) dy(t)/dt + y(t) = x(t) \quad (D.2)$$

En donde:

$x(t)$ = función de forzamiento o variable de entrada.

$y(t)$ = variable de salida o respuesta.

Considerando que el proceso ocurre a régimen permanente se tiene la Ec. D.3.

$$\alpha \bar{x}(t) - \alpha \bar{y}(t) = 0 \quad (D.3)$$

En donde $\bar{x}(t)$, $\bar{y}(t)$ son los valores de operación. Restando la Ec. D.3 de la D.1 se obtiene la Ec. D.4.

$$\alpha(x(t) - \bar{x}(t)) - \alpha(y(t) - \bar{y}(t)) = \beta \, dy(t)/dt \quad (D.4)$$



Figura D.1.- Representación de un proceso.

Haciendo uso de las variables de desviación se tiene:

$$X(t) = x(t) - \bar{x}(t) \quad (D.5)$$

$$Y(t) = y(t) - \bar{y}(t) \quad (D.6)$$

$$dY(t) = dy(t) \quad (D.7)$$

Sustituyendo estas tres últimas ecuaciones en la Ec. D.4 se obtiene la Ec. D.8.

$$\alpha X(t) - \alpha Y(t) = \beta \, dY(t)/dt \quad (D.8)$$

En función de $X(t)$

$$(\beta/\alpha) \, dY(t)/dt + Y(t) = X(t) \quad (D.9)$$

Definiendo la Ec. D.10.

$$\beta/\alpha = \tau \quad (D.10)$$

En donde τ se denomina constante de tiempo del proceso.

Sustituyendo la Ec. D.10 en la D.9 se obtiene la Ec. D.11.

$$\tau \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = X(t) \quad (D.11)$$

Utilizando la transformada de Laplace en la Ec. D.11 se obtiene la Ec. D.12.

$$\tau s Y(s) - \tau Y(0) + Y(s) = X(s) \quad (D.12)$$

Tomando en cuenta que al usar variables de desviación se considera que la condición inicial es igual a cero por partir de régimen permanente, la Ec. D.12 se simplifica.

$$\tau s Y(s) + Y(s) = X(s) \quad (D.13)$$

De esta manera, la Ec. para la función de transferencia es la siguiente.

$$Y(s)/X(s) = 1/(\tau s + 1) \quad (D.14)$$

Esta ecuación queda generalizada por la Ec. D.15.

$$Y(s)/X(s) = k/(\tau s + 1) \quad (D.15)$$

en donde k se conoce como ganancia del proceso o ganancia de régimen permanente.

Todos los procesos que se representan mediante esta última ecuación se denominan procesos de primer orden o retardos de primer orden.

Respuesta de sistemas de primer orden.

Considerando la señal de entrada o función de forzamiento $X(t)$ como una función escalón de magnitud A se tiene lo siguiente:

$$X(t) = A/s \quad (D.16)$$

Sustituyendo la ec. D.16 en la D.14 resulta la ec. D.17.

$$Y(s) = (k/(\tau s + 1)) A/s \quad (D.17)$$

Aplicando la transformada inversa para obtener la ec. D.18 en el dominio del tiempo.

$$Y(t) = k A (1 - e^{-t/k}) \quad (D.18)$$

Notar que cuando $t=\tau$ la respuesta $Y(t)$ ha alcanzado un 63.2% de su valor al nuevo régimen permanente.

En la Figura D.2 se puede apreciar una gráfica típica de la respuesta $Y(t)$ ante una función de forzamiento $X(t)$ tipo escalón para un proceso de primer orden como el representado por la ec. D.18.

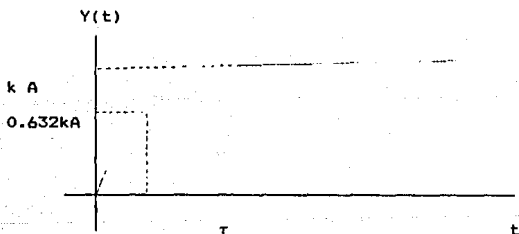


Figura D.2.- Respuesta de procesos de primer orden.

Tiempo muerto.

Suponer que el proceso representado por la Figura D.3 sea un tanque con líquido que fluye a través de un tubo de descarga, siendo entonces la variable de salida el flujo $q(t)$ y la función de entrada será entonces la columna de líquido $h(t)$ la cual es mantenida de alguna manera, por ejemplo mediante un flujo de entrada, el sistema se halla inicialmente a

régimen permanente.

Si se considera que se está siguiendo la respuesta del proceso $q(t)$ ante un cambio $h(t)$, dicha respuesta será el flujo registrado desde el momento en que se introduce el cambio dinámico de la columna de líquido hasta que se alcanza el nuevo valor a régimen permanente. La manera correcta de



Figura D.3.- Representación de un tanque con líquido.

registrar dicha respuesta será midiendo el flujo inmediatamente a la descarga del tanque, sin embargo, si se cuenta con una descarga consistente de un tubo significativamente largo la respuesta medida al final de dicho conducto tendrá un retraso con respecto al tiempo. Es decir que el flujo en un instante dado a una distancia corta del tanque diferirá del valor registrado al final del tubo y tendrá que pasar un cierto tiempo antes de que dicho valor para el instante mencionado se manifieste en el extremo referido.

La curva de respuesta en ambos puntos de muestreo tendrá la misma forma, solo que una estará trasladada con respecto de la otra sobre el eje del tiempo como puede ser apreciado en

la Figura D.4. Este fenómeno se conoce como tiempo muerto. En todos los procesos en que se presenta este retraso en la respuesta dinámica pueden existir diversas causas que lo producen, como la mencionada en el párrafo anterior. Una función afectada por tiempo muerto se dice que es una función trasladada y se representa como $f(t - t_0)$.

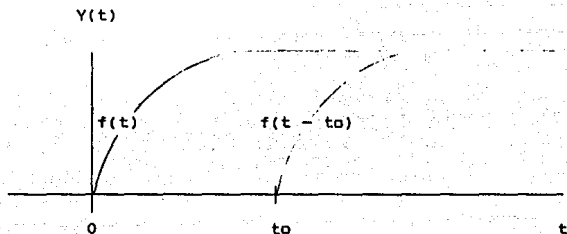


Figura D.4.- Función trasladada.

La transformada de Laplace de este tipo de función está dada por la Ec. D.19.

$$\mathcal{L} [f(t - t_0)] = e^{-s t_0} F(s) \quad (D.19)$$

De acuerdo con esto la función de transferencia de un proceso de primer orden afectada por tiempo muerto de magnitud t_0 tendrá la forma mostrada en la ecuación D.20.

$$G(s) = \frac{k e^{-s t_0}}{r s + 1} \quad (D.20)$$

En la Figura D.5 se aprecia una gráfica de la respuesta de un proceso de primer orden más tiempo muerto.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Aproximación de procesos al modelo de primer orden más tiempo muerto.

La aproximación del sistema a un modelo de primer orden más tiempo muerto se realiza mediante la prueba del proceso de escalón. Se aplica al proceso un cambio escalón a través de la señal de entrada al proceso (o sea, por medio del elemento final de control).

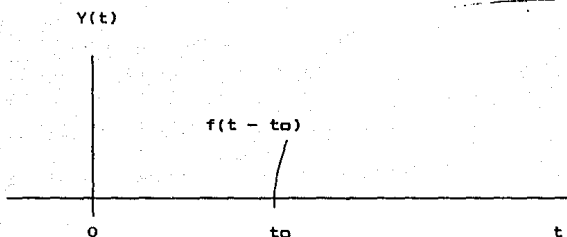


Figura D.5.- Respuesta de un proceso de primer orden más tiempo muerto.

La magnitud del cambio debe ser lo suficientemente grande como para que se pueda medir el cambio en la salida del proceso (o sea, por medio del detector), pero no tanto como para que las no linealidades del proceso ocasionen la distorsión de la respuesta. La señal de salida del transmisor se muestrea por la computadora, a través de una interfase apropiada como se explica en el Capítulo 1, procediendo a graficar estos datos muestreados durante la prueba completa, es decir desde la introducción de la prueba escalón hasta que

el sistema alcanza un nuevo estado estacionario. La prueba dura generalmente entre unos cuantos minutos y varias horas, según la velocidad de respuesta del proceso.

EL modelo aproximado para la función de salida $G(s)$ será:

$$G(s) = \frac{k \cdot e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (D.21)$$

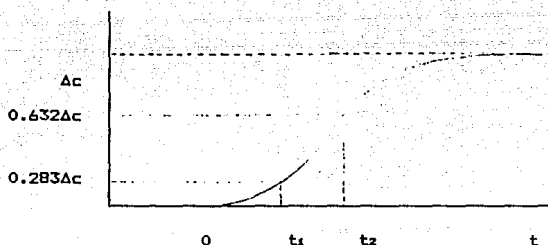


Figura D.6.- Ajuste de procesos a modelo de primer orden

Los parámetros k , t_0 y τ se obtienen por medio de las ecuaciones D.22, D.23 y D.24; los datos Δc , t_1 y t_2 se leen de la gráfica, generada por el muestreo de datos, en donde t_1 es el valor del tiempo cuando se alcanza el 28.3% del valor de Δc y t_2 es el valor del tiempo cuando se alcanza el 63.2% del valor de Δc . Esto se aprecia gráficamente en la Figura D.6.

Considerando que Δm es la magnitud del escalón introducido al

proceso, se tiene:

$$k = \frac{\Delta c}{\Delta m} \quad (\text{D.22})$$

$$\tau = \frac{3}{2} (t_2 - t_1) \quad (\text{D.23})$$

$$t_0 = t_2 - \tau \quad (\text{D.24})$$

El modelo ajustado se usa, por ejemplo, para obtener el algoritmo de control que sirve de base para programar la computadora que efectuará el control según se explica en el Capítulo 2.

Referencias.

- 1.- Smith C., "Digital Computer Process Control", International Textbook Co. 136 (1972).