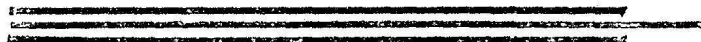


**Universidad Nacional Autónoma de México**

**FACULTAD DE INGENIERIA**



**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA INTERFASE QUE  
PERMITA CONTROLAR UNA PLANTA TERMICA  
DESDE UN MICROPROCESADOR**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A:**

**ARMANDO ANTONIO CARBAJAL VERA**

**MEXICO, D. F.**

**1983**



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 esta 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.

# INDICE

|  |  |    |
|--|--|----|
| INTRODUCCION                               | -----                                      | 1  |
| OBJETIVOS                                  | -----                                      | 2  |
| CAPITULOS                                  | -----                                      |    |
| 1.- CIRCUITERIA                            |  |    |
| 1.1  | Funciones -----                            | 3  |
| 1.2.1                                      | Convertidor Analógico/Digital ADC0804 ---  | 4  |
| 1.2.2                                      | Microprocesador 6802D3 -----               | 5  |
| 1.2.3                                      | Convertidor Digital/Analógico DAC0800 ---  | 7  |
| 1.2.4                                      | Memoria Programable 2716 -----             | 7  |
| 1.3  | Funcionamiento de la Tableta -----         | 8  |
| 1.4  | Niveles de Voltaje -----                   | 11 |
| 11.- PROGRAMACION                          |  |    |
| 2.1  | Consideraciones Generales -----            | 13 |
| 2.2  | Rutina de Suma -----                       | 13 |
| 2.3  | Rutina de Multiplicación -----             | 15 |
| 2.4  | Rutina de Entrada de Datos -----           | 17 |
| 111.- CONTROLADORES: TEORIA Y APLICACIONES |  |    |
| 3.1  | Consideraciones Generales -----            | 20 |
| 3.2  | Controladores Industriales -----           | 22 |
| 3.2.1                                      | Control ON-OFF -----                       | 22 |
| 3.2.2                                      | Control Proporcional -----                 | 25 |
| 3.2.3                                      | Control Proporcional + Integral -----      | 29 |
| 3.2.4                                      | Control Derivativo -----                   | 31 |
| 3.3  | Controladores Analógicos/Digitales -----   | 32 |
| 3.4  | Cálculo Dinámico: Integración y Derivación | 33 |
| 3.5  | Aplicación -----                           | 37 |
| 3.6  | Interfase Microprocesador-Simulador -----  | 39 |
| CONCLUSIONES                               | -----                                      | 41 |
| BIBLIOGRAFIA                               | -----                                      | 42 |

## I N T R O D U C C I O N

Es un hecho que el hombre se hace cada vez más dependiente de los adelantos logrados por él mismo. Así, no es posible pensar en una ciudad medianamente grande sin automóviles o sin electricidad, por mencionar sólo dos de los fenómenos de nuestra vida diaria, en los cuales no reparamos, pero que sin embargo forman ya parte de nuestra rutina.

Es un hecho también, que en las últimas décadas, la Electrónica ha logrado grandes avances. El conjunto de algunos de ellos dio impulso a una de las áreas más extendidas y con mayores campos de desarrollo en la actualidad. La Computación.

El microprocesador, uno de los resultados más significativos de esta conjunción, ha logrado automatizar un sinnúmero de procesos mecánicos, debido a que parámetros como economía, exactitud, flexibilidad de uso, son características de este dispositivo.

El trabajo desarrollado, pretende establecer la siguiente mecánica como apropiada en el control de un proceso térmico:

Fijados los parámetros de presión, cantidad de flujo, y algunos otros que intervengan en el proceso, introducirlos en el microprocesador para que éste pueda, en base al criterio de un algoritmo, controlar la temperatura de una planta térmica. Esta es una opción que resulta muy económica debido a que únicamente cambiando el algoritmo, cambiará el criterio de control.

## O B J E T I V O S

Es objetivo primordial de este trabajo desarrollar un dispositivo en base al cual, un microprocesador pueda controlar un proceso térmico.

Para poder llegar a cumplirlo, se han establecido tres objetivos particulares, que pueden considerarse como objetivos respectivos de cada uno de los tres capítulos siguientes:

- a) Desarrollar la circuitería que permita la interfase del microprocesador con el mundo exterior.
- b) Desarrollar programas en lenguaje comprensible por el microprocesador, que efectúen las operaciones más comunes.
- c) Establecer las bases de control sobre las cuales opera un microprocesador actuando como control de un proceso térmico, tomando así el nombre de controlador.

## CAPITULO I

### C I R C U I T E R I A

#### 1.1 FUNCIONES

1.2.1 Convertidor Analógico/Digital ADC0804

1.2.2 Microprocesador 6802D3

1.2.3 Convertidor Digital/Analógico DAC0800

1.2.4 Memoria Programable 2716

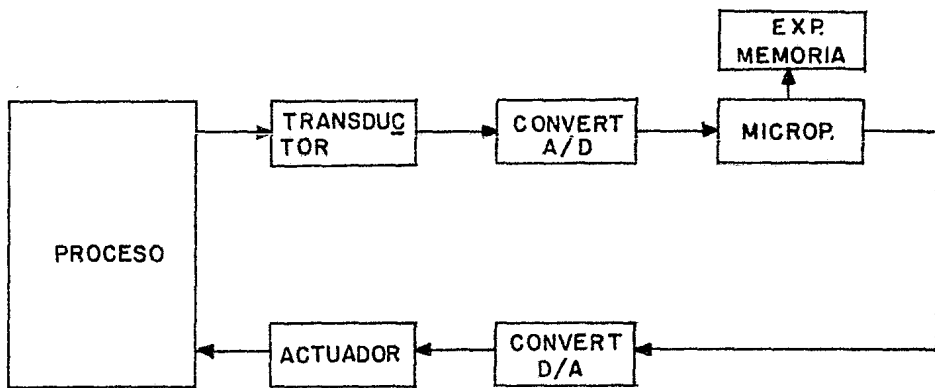
#### 1.3 Funcionamiento de la Tableta

#### 1.4 Niveles de Voltaje

Este capítulo está dedicado a explicar la parte electrónica del sistema. Los componentes básicos son analizados tanto individualmente como en su conjunto.

### 1.1 Funciones

A continuación se presenta un diagrama esquemático del sistema y en base a éste se obtendrán las funciones básicas que cumple.



SISTEMA DESARROLLADO.

FIG. NO. 1

- a) Acepta una señal de voltaje analógico entre cero y cinco volts proveniente de un transductor, la transforma en una señal digital de 8 bits y la deposita en una localidad específica de memoria.
- b) Toma un valor digital de una localidad de memoria, la transforma en un voltaje analógico entre cero y cinco volts y lo entrega al actuador.
- c) Permite al microprocesador el acceso a localidades de memoria adaptadas como una expansión del módulo básico.

A continuación se analiza cada uno de los elementos utilizados, si-

guiendo a la vez el flujo de la señal.

### 1.2.1 Convertidor Analógico/Digital ADC0804.

Opera con un voltaje de +5 volts, su resolución es de ocho bits, la entrada analógica puede ir de cero a cinco volts, y el error máximo es de +1 bit. Las señales de control que lo manejan son:  $\overline{CS}$ ,  $\overline{RD}$  y  $\overline{WR}$ , que se pueden interpretar, de acuerdo a su función, como selección del dispositivo, lectura y "escritura" respectivamente.

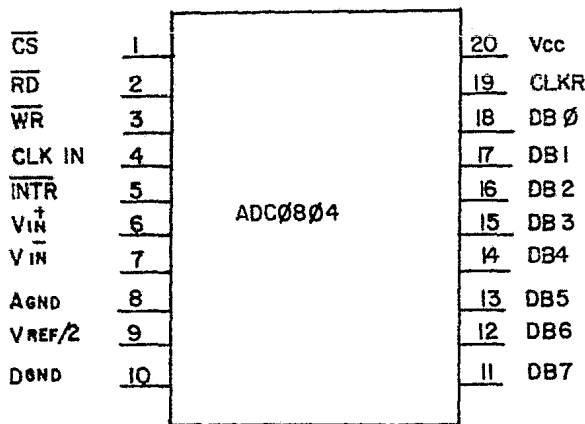


FIG. NO. 2

El convertidor inicia su operación cuando las señales  $\overline{CS}$  y  $\overline{WR}$  tienen ambas un nivel bajo. El proceso termina cuando  $\overline{INTR}$  va a un nivel alto. Cuando los datos van a ser leídos, la combinación de  $\overline{CS}$  y  $\overline{RD}$  en un nivel bajo causarían que la salida digital de ocho bits sea habilitada. Para aplicaciones no basadas en microprocesadores, la entrada  $\overline{CS}$  puede ser enviada a tierra y la señal de inicio de conversión se obtiene por un pulso bajo aplicado a  $\overline{WR}$  y la habilitación de la salida se obtiene aplicando un pulso bajo a  $\overline{RD}$ .



Dentro de la tarjeta, el manejo de cada una de estas señales de control ( $\overline{CS}$ ,  $\overline{WR}$ ,  $\overline{RD}$ ) se hace a través de valores asignados a localidades de memoria dedicadas a tal propósito.

### 1.2.2 Microprocesador 6802D3.

Este microprocesador es una versión avanzada del MC6800, ya que contiene además un reloj oscilador (MC6846) dentro de la misma tableta. Otras características son:

- a) Palabra de ocho bits.
- b) Direccionamiento de memoria de dieciseis bits.
- c) Capacidad de interrupciones.
- d) 128 bytes de memoria de acceso aleatorio localizadas de 0000 a 007F.

Los registros del microprocesador son:

#### 1. Contador de Programa

Registro de dieciseis bits que apunta a la dirección de la última instrucción activa del programa que se está ejecutando.

#### 2. Apuntador de Pila

Registro de dieciseis bits que apunta a la dirección de la siguiente localidad disponible dentro de una pila externa.

#### 3. Registro Índice

Es un registro de dieciseis bits que se utiliza cuando se tiene un modo de acceso indexado.

#### 4. Registros de Trabajo - Dos de ocho bits.

#### 5. Registro de Códigos de Condición

Este registro indica el resultado de una operación en la unidad aritmética y lógica: negativo, cero acarreo desde el bit siete, medio acarreo desde el bit tres, y saturación. Este registro se

usa básicamente para condicionamiento de las instrucciones de salto.

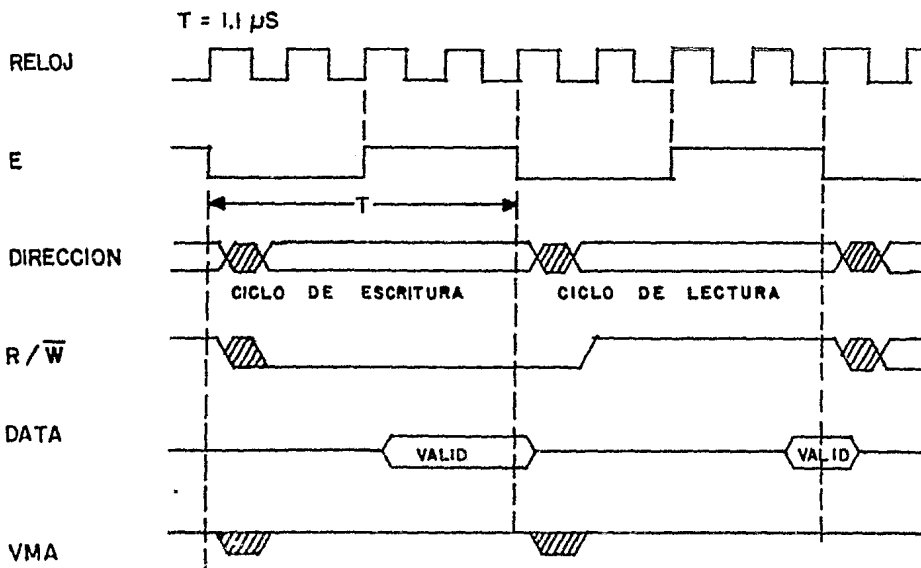
De las señales de control del microprocesador, dos son las que se utilizan: VMA (dirección válida de memoria) y E (reloj del sistema) a continuación se explica su funcionamiento.

1. VMA

Esta salida indica a los dispositivos periféricos que hay una dirección válida en el canal de direcciones. En operación normal, esta señal es utilizada para habilitar interfases periféricas.

2. E

Esta señal es el reloj del sistema un cristal estandar de 3.5795, MHz es usado por el procesador para generar el reloj del sistema de 894.8 KHz



SEÑALES DEL MICROPROCESADOR 680203.

FIG NO. 3

### 1.2.3 Convertidor Digital/Analógico DAC0800.

Sus características básicas son: respuesta en 100 nS, error máximo de  $\pm 1$  bit y niveles básicos propios de TTL. La pata número 1 maneja el nivel de referencia y para el presente caso, se conecta a tierra. Con ajustes sobre el potencial  $V_{LC}$  se puede obtener una interfase con todas las familias lógicas. El funcionamiento y características del dispositivo permanecen sin cambio sobre el rango de  $\pm 4.5$  a  $\pm 18$  volts.

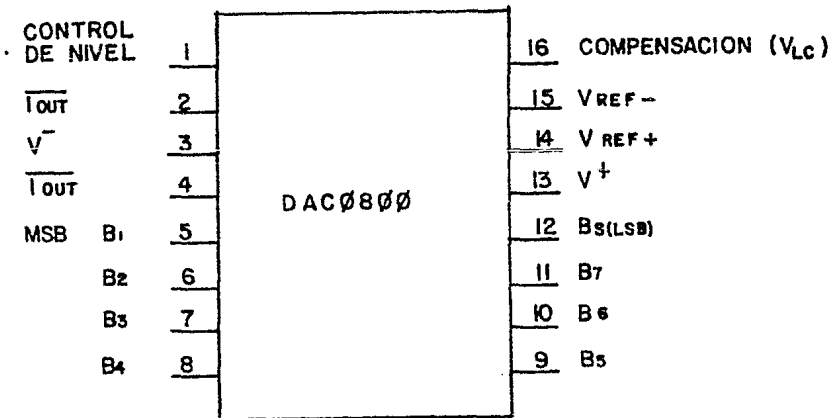


FIG. NO.4

### 1.2.4 Memoria Programable 2716.

Este es un tipo de memoria programable que en operación normal sólo permite lectura. Sus características sobresalientes son: organización de 2048 x 8 bits, máximo tiempo de acceso de 450 nS, salida de ocho bits compatible con cualquier microprocesador y un consumo mínimo de potencia (315 mW).

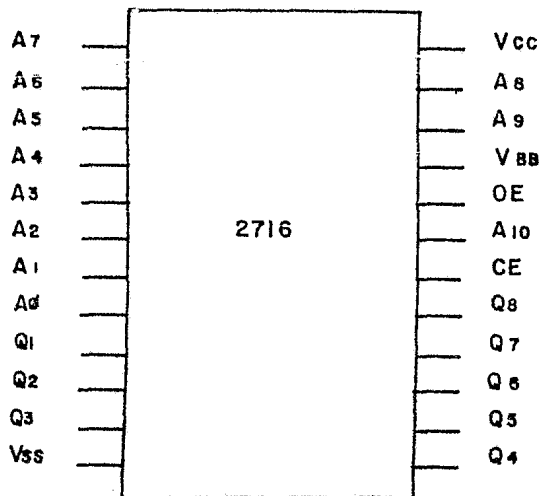


FIG. NO. 5

En modo de lectura,  $V_{BB}$  (21) y  $V_{CC}$  (24) deben estar en cinco volts, además de que  $\overline{CE}$  y  $\overline{OE}$  deben estar en un nivel bajo. Conseguidos estos niveles, las 11 líneas ( $A_0$ - $A_{10}$ ) funcionan como canal de direcciones y presentarán el dato en las líneas  $Q_1$  a  $Q_8$ .

### 1.3 Funcionamiento de la Tableta.

El sistema funciona en base del trabajo de dos decodificadores, que -- permiten a cada uno de los convertidores el acceso por un corto tiempo a determinadas localidades de memoria ( $C0000$ ,  $C0001$ ,  $C0002$ ). Esto se logra manejando las señales  $VMA$  y  $E$  en conjunto con los canales de direcciones y datos. Se requiere tener esta característica en mente para -- poder entender el funcionamiento en detalle de cada uno de los elementos involucrados, que se da a continuación.

Un decodificador (circuito número 2 de la figura n<sup>o</sup> 6) tiene asignadas como entradas, por un lado, la conjunción a través de la compuerta -- NAND (circuito número 1 de la figura n<sup>o</sup> 6) de las señales  $VMA$  y  $E$ , des-- critas previamente; y por el otro lado, los bits 15, 14, 13, 12 y 11 -- del canal de direcciones. Esto tiene como objetivo dividir la parte -- más alta de la memoria del microprocesador ( $80000$  -  $FFFF$ ) en módulos

de 2048 bytes. Así, cuando una de estas localidades es accesada, la pata correspondiente del circuito integrado número 2 de la figura n° 6, tiene una transición de alto a bajo de acuerdo con la siguiente tabla:

| <u>PATA</u> | <u>RANGO DE DIRECCIONAMIENTO</u> |
|-------------|----------------------------------|
| 1           | 8000 - 87FF                      |
| 2           | 8800 - 8FFF                      |
| 3           | 9000 - 97FF                      |
| 4           | 9800 - 9FFF                      |
| 5           | A000 - A7FF                      |
| 6           | A800 - AFFF                      |
| 7           | B000 - B7FF                      |
| 8           | B800 - BFFF                      |
| 9           | C000 - C7FF                      |
| 10          | C800 - CFFF                      |
| 11          | D000 - D7FF                      |
| 13          | D800 - DFFF                      |
| 14          | E000 - E7FF                      |
| 15          | E800 - EFFF                      |
| 16          | F000 - F7FF                      |
| 17          | F800 - FFFF                      |

Para tener acceso a una localidad determinada se requiere del decodificador número 2 (circuito 3 de la figura 6) cuyas entradas son dos: una, el conjunto de bits 4 a 10 del canal de direcciones; y otra, la señal del rango de memoria que interesa unida con los primeros cuatro bits del canal de direcciones.

De igual manera, se tendrá una transición de alto a bajo en la salida correspondiente cuando se haga referencia a cualquiera de las dieciséis localidades más bajas de memoria tomando como base el rango seleccionado del circuito integrado anterior (circuito número 2 de la figura n° 6). Así, en el trabajo desarrollado, las transiciones son como sigue:

| <u>PATA</u> | <u>DIRECCION</u> |
|-------------|------------------|
| 1           | C000             |
| 2           | C001             |
| 3           | C002             |
| 4           | C003             |
| 5           | C004             |
| 6           | C005             |
| 7           | C006             |
| 8           | C007             |
| 9           | C008             |
| 10          | C009             |
| 11          | C00A             |
| 13          | C00B             |
| 14          | C00C             |
| 15          | C00D             |
| 16          | C00E             |
| 17          | C00F             |

Es este circuito el que maneja cada uno de los convertidores. Por principio, se ha designado la localidad C001 para el manejo de la señal  $\overline{CS}$  y la C002 para el manejo de la señal  $\overline{WR}$ , ambas del convertidor Analógico/Digital. Así, al depositar un valor en el último bit de la localidad C001, éste se reflejará en un nivel de voltaje. Este nivel es alimentado al circuito Flip Flop 7474 tipo "D" (circuito número 4 de la figura n° 6) con el objeto de que sea retenido por tiempo indefinido, permitiendo al convertidor que tome los valores adecuados. Los pulsos de reloj necesarios para que este circuito funcione, son generados en forma independiente a través de un circuito 7414 (circuito número 9 de la figura n° 6).

A través de la lectura de la localidad C002 se habilita al convertidor y aún hay tiempo suficiente para que éste deposite el dato en la localidad que le ha sido asignada previamente.

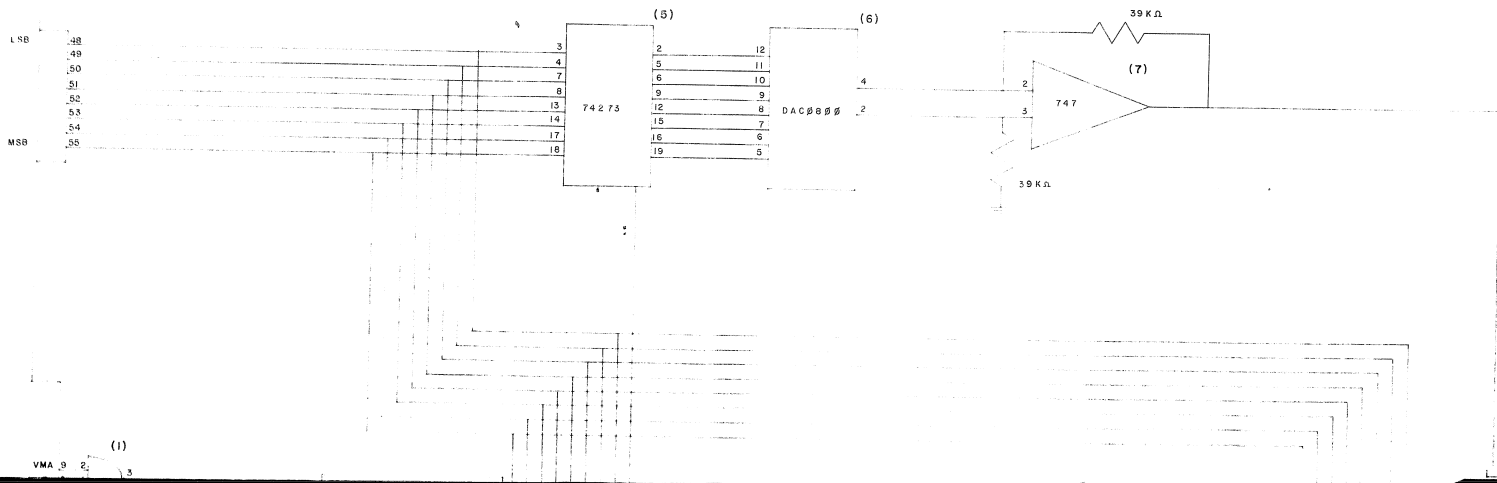
Debido a que el convertidor Digital/Analógico no tiene señales de control, es que se requiere un circuito "Flip Flop" Circuito número 5 de la figura N° 6) que "autorice" la conversión correspondiente. Es decir que si este circuito no existiese, el convertidor Digital/Analógico trataría de tomar todo lo que pasara por el canal de datos, y en un momento dado, lo único que tendría a la salida sería ruido. Tomando esto como base es la referencia a la localidad ~~C000~~ que habilita al convertidor.

Por otra parte, debido a que el circuito integrado número 6 de la figura N° 6 trabaja en base a corrientes, es que se requiere un convertidor corriente/voltaje circuito N° 7 Fig. N° 6 para tener la misma referencia a la salida que a la entrada de la planta. Las referencias que se manejan en este caso son de cero a cinco volts.

La selección de la expansión de memoria funciona de la siguiente forma: Las once patas dedicadas al direccionamiento están conectadas directamente al canal de direcciones y es la pata número 7 del primer codificador (figura N° 6, circuito número 2) la que genera el impulso necesario tanto para la selección del dispositivo como para habilitación de la salida. Obsérvese, además, que  $V_{BB}$  (pata 21) y  $V_{CC}$  (pata 24) están siempre alimentados con cinco volts, condición necesaria para poner al dispositivo en estado de lectura.

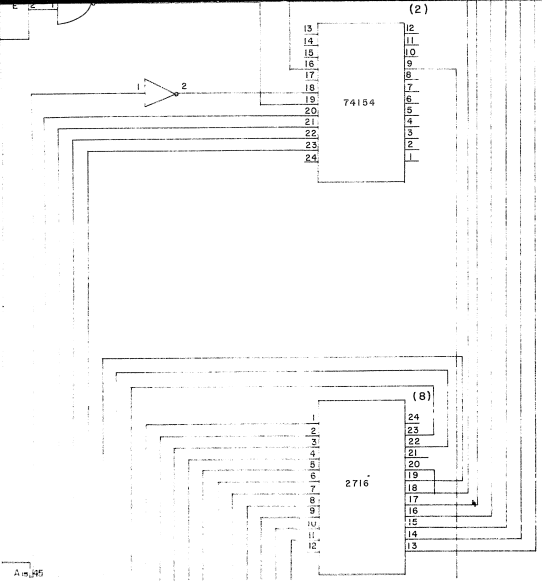
#### 1.4 Niveles de Voltaje

Los amplificadores operacionales y el convertidor Digital/analógico utilizan niveles de voltaje de  $\pm 12$  V y  $-5$  V. Todos los demás circuitos integrados utilizan cinco volts. Todos estos voltajes son generados por una fuente integrada a la tableta.

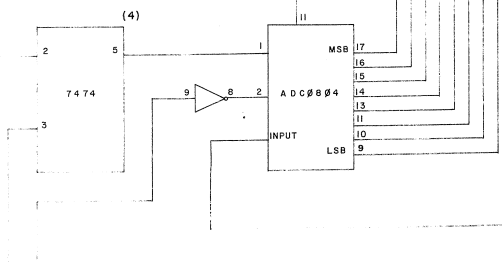
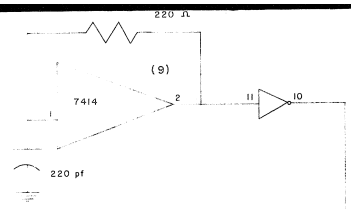


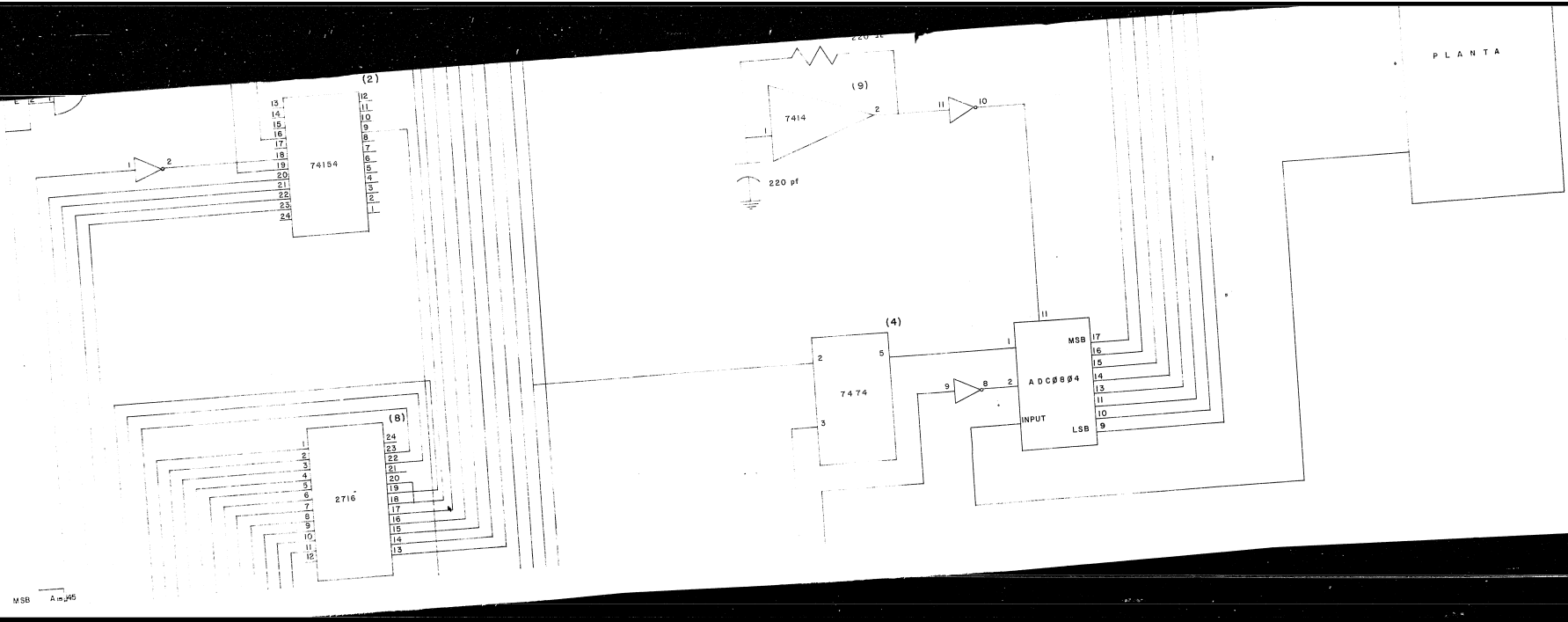
(1)  
 VMA 9 2 3





MGB 2 9 95





MSB A 10 495

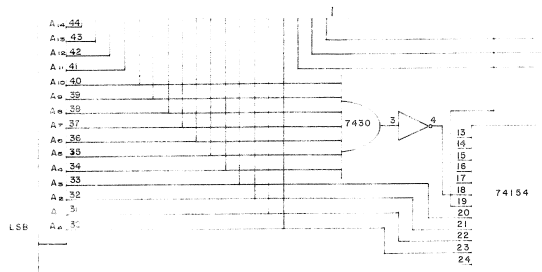


FIGURA NO. 6

## CAPITULO II

### PROGRAMACION

- 2.1 CONSIDERACIONES GENERALES
- 2.2 RUTINA DE SUMA
- 2.3 RUTINA DE MULTIPLICACION
- 2.4 RUTINA DE ENTRADA DE DATOS

Este capítulo describe las rutinas que auxilian al manejo de la circuitería y en la programación de los algoritmos de control.

## 2.1 Consideraciones Generales.

Se implementaron tres rutinas que hacen las funciones de suma, multiplicación y entrada de datos. Como se podrá observar más adelante, están codificadas en lenguaje ensamblador del microprocesador 6800, y fueron grabadas previamente en la memoria programable de sólo lectura para así optimizar al máximo la memoria de acceso aleatorio disponible, que en el mejor de los casos es de 128 bytes. Dicho sea de paso además, que parte de esta memoria es utilizada para el manejo de variables necesarias para cada rutina, por lo que el espacio para uso del usuario en este tipo de memoria se reduce. Al implementar un algoritmo de control, este problema de capacidad en memoria de acceso aleatorio se vuelve crítico por lo que en un momento dado se puede optar por utilizar la memoria de sólo lectura, ya que ahí sí existe el suficiente espacio como para manejar un algoritmo de control relativamente complejo.

La razón principal por la que se han implementado rutinas de suma y multiplicación, es porque éstas son las operaciones básicas, y se trata de dar al usuario el mínimo de problemas al programar, proporcionándole herramientas que seguramente ocupará.

La salida de datos no está considerada debido a que es con el sólo almacenamiento del dato en la localidad 0000 como se refleja éste al exterior, debido a que como se vio anteriormente, el convertidor Digital/Analógico no maneja señales de control.

## 2.2 Rutina de Suma

Esta rutina hace una suma de dos localidades hasta completar cuatro, para así manejar dos dígitos con dos bytes cada uno, y obtener el resultado de la misma longitud.

El procedimiento se muestra en la figura N° 7.

Las localidades de las que se auxilia van de 000A a 000F repartidas de la siguiente manera:

- 000A Byte más significativo del Sumando 1
- 000B Byte menos significativo del Sumando 1
- 000C Byte más significativo del Sumando 2
- 000D Byte menos significativo del sumando 2
- 000E Byte más significativo del Resultado
- 000F Byte menos significativo del Resultado

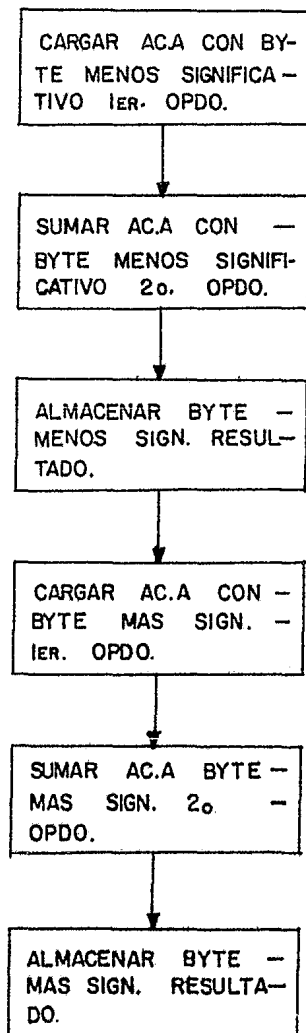


FIG. NO. 7

### 2.3 Rutina de Multiplicación

Multiplica dos dígitos de dos bytes cada uno, dejando un resultado de cuatro bytes. Se pueden manejar números con signo en complemento a - dos y trabaja bajo las siguientes bases:

1. Prueba la transición de los bits del multiplicador de derecha - a izquierda, asumiendo un bit cero imaginario a la derecha del \_ multiplicador.
2. Si los bits en cuestión son iguales, pasar al punto número cinco.
3. Si hay una transición de cero a uno, el multiplicando es sus--- traído del producto. Pasar al punto cinco.
4. Si hay una transición de uno a cero, el multiplicando es sumado al producto.
5. Corre el resultado a la derecha un bit con el bit más significa\_ tivo permaneciendo igual.
6. Pasar al punto número uno.

El diagrama correspondiente se muestra en la figura N° 8., la direc-- ción inicial de la rutina es B000 y las localidades de las que se - auxilia van del 0000 al 0009 repartidas de la siguiente manera:

- |      |  |
|------|--|
| 0000 | Byte más significativo del multiplicador     |
| 0001 | Byte menos significativo del multiplicador   |
| 0002 | Byte más significativo del multiplicando.    |
| 0003 | Byte menos signitifactivo del multiplicando. |
| 0004 | Byte más significativo del resultado.        |
| 0005 | Byte resultado.                              |
| 0006 | Byte reultado.                               |
| 0007 | Byte menos significativo del resultado.      |
| 0008 | Localidad de trabajo.                        |
| 0009 | Localidad de trabajo.                        |

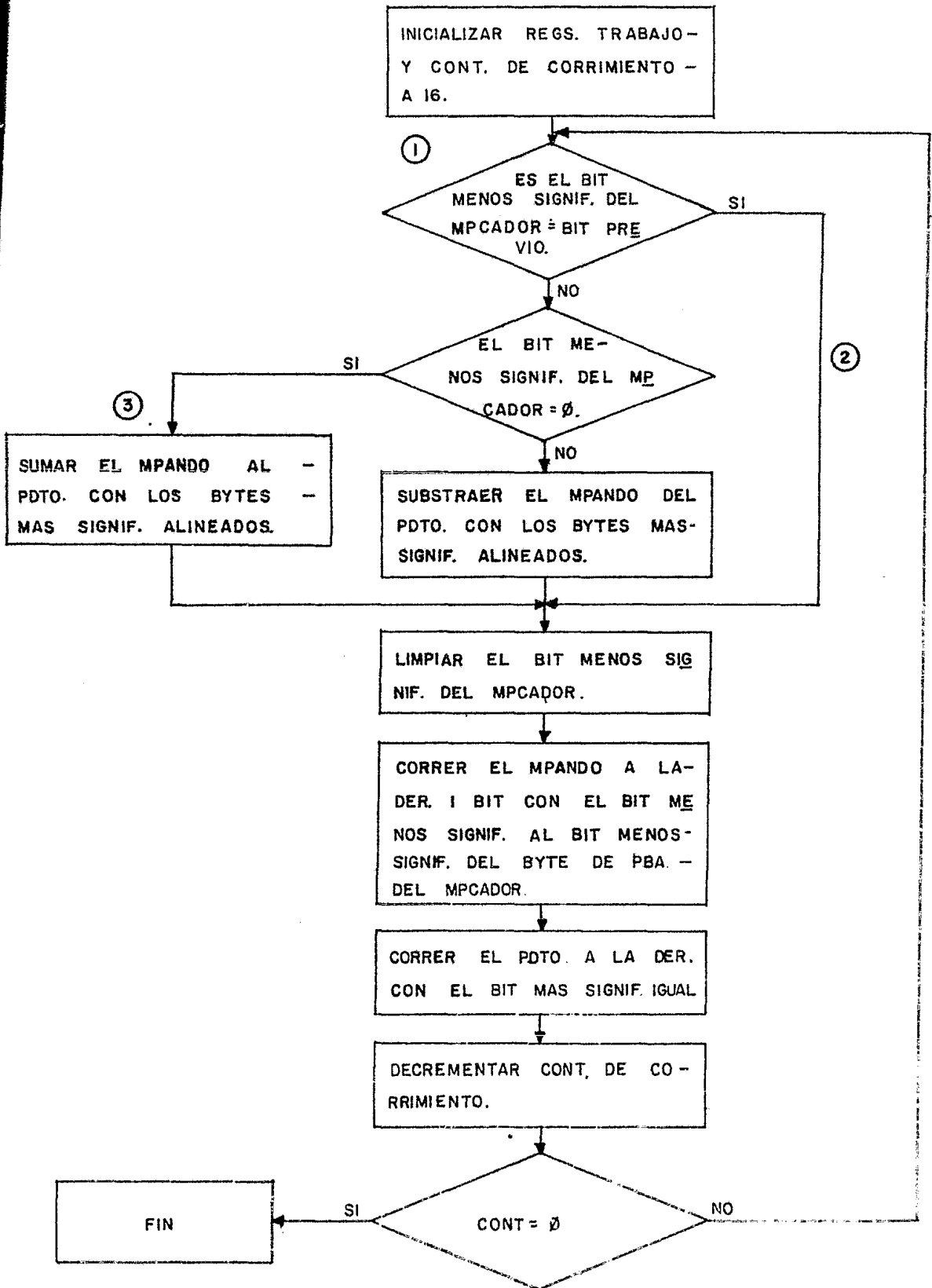


FIG. NO 8



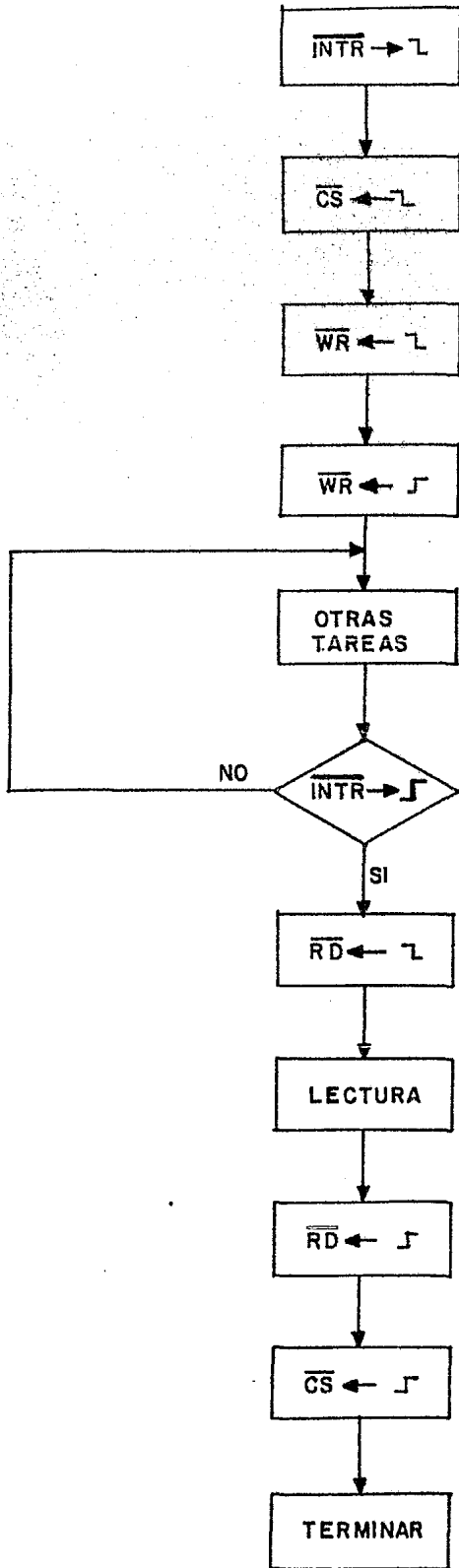
#### 2.4 Rutina de Entrada de Datos.

Esta rutina se encarga de hacer un muestreo de la entrada y de depositar el dato a procesar en una localidad específica.

Controla el convertidor Analógico/Digital a través de dos localidades (C001, C002). En principio, como se puede ver en la figura número 9, se pone un nivel bajo en las líneas  $\overline{WR}$  y  $\overline{CS}$ , para después solo poner un nivel alto en la línea  $\overline{WR}$  que es la indicación de que el convertidor debe tomar un valor analógico y empezar el proceso de conversión. Cuando ésta ha acabado, la línea  $\overline{INTR}$  va a un nivel alto. La forma en que el microprocesador puede esperar esta señal es de dos maneras: primero, hacer que este nivel alto llegue a una localidad de memoria específica, y mientras esto ocurre, el microprocesador está en un círculo de espera. Segundo, calcular previamente el tiempo máximo de conversión y mientras este lapso no ocurre, el microprocesador realiza otras tareas.

Cuando la conversión ha terminado, se requiere bajar la señal de  $\overline{RD}$  que es una señal de habilitación de la salida. En este momento, el dato convertido es puesto en una localidad específica y se requiere subir las señales de  $\overline{RD}$  y  $\overline{CS}$  para volver a iniciar el proceso.

Todo lo anterior queda resumido en el siguiente diagrama.



- $\overline{CS}$  — SELECCION DEL DISPOSITIVO
- $\overline{RD}$  — SEÑAL DE LECTURA
- $\overline{WR}$  — SEÑAL DE INICIO CONVERSION
- $\overline{INTR}$  — SEÑAL DE INTERRUPCION

FIG. NO. 9

Como se podrá observar, estas señales son sensitivas al nivel bajo, para permitir una fácil interfase con el canal de control del microprocesador. Para aplicaciones no basadas en microprocesadores, la señal de selección del dispositivo  $\overline{CS}$  puede ser enviada a tierra y la función de inicialización es obtenida por un pulso bajo aplicado a la entrada  $\overline{WR}$  y la función de salida disponible se establece por un pulso bajo en la entrada  $\overline{RD}$ . El siguiente programa realiza las funciones antes descritas.

|        |                             |                                    |
|--------|-----------------------------|------------------------------------|
| INICIO | LDAA $\emptyset\emptyset$   | 86 $\emptyset\emptyset$            |
|        | STAA $\emptyset\emptyset 1$ | B7C $\emptyset\emptyset 1$         |
|        | STAA $\emptyset\emptyset 2$ | B7C $\emptyset\emptyset 2$         |
|        | NOP                         | $\emptyset 1$                      |
|        | NOP                         | $\emptyset 1$                      |
|        | NOP                         | $\emptyset 1$                      |
|        | LDAA                        | 86 $\emptyset 1$                   |
|        | STAA $\emptyset\emptyset 1$ | B7C $\emptyset\emptyset 1$         |
|        | JSR PIERDE                  | BD $\emptyset\emptyset 2\emptyset$ |
|        | STAA $\emptyset\emptyset 2$ | B7C $\emptyset\emptyset 2$         |
|        | RTS                         |                                    |
| PIERDE | LDAB $\emptyset\emptyset$   | C6 $\emptyset\emptyset$            |
| OTRO   | INCB                        | 5C                                 |
|        | CMPB #1 $\emptyset$         | CI $\emptyset$ CA                  |
|        | BLT OTRO                    | 2DFB                               |
|        | RTS                         | 39                                 |

Debe quedar claro que el dato a trabajar se almacena en la localidad  $\emptyset\emptyset 1$ .

## CAPITULO III

### CONTROLADORES: TEORIA Y APLICACIONES

- 3.1           CONSIDERACIONES GENERALES
  
- 3.2           CONTROLADORES INDUSTRIALES
  - 3.2.1       CONTROL ON-OFF
  - 3.2.2       CONTROL PROPORCIONAL
  - 3.2.3       CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL
  - 3.2.4       CONTROL DERIVATIVO
  
- 3.3           CONTROLADORES ANALOGICOS Y DIGITALES
  
- 3.4           CALCULO DINAMICO: INTEGRACION Y DERIVACION
  
- 3.5           EJEMPLO DE APLICACION
  
- 3.6           INTERFASE MICROPROCESADOR-SIMULADOR

Este capítulo demuestra la utilidad del dispositivo desarrollado, y establece las bases bajo las cuales funciona. Da un ejemplo de aplicación.

### 3.1 Consideraciones Generales

Lo que sigue no intenta hacer recordar conceptos básicos del control digital debido a que existen textos que tratan este tema a profundidad. Trata simplemente de explicar cuál es la teoría de control en la cual el proceso se apoya, a la vez que centrar al lector para entender el problema que se plantea.

Cuando se habla de un proceso al cual se le aplica un Control, puede dividirse a éste en tres entidades básicas, cada una de las cuales pueden ser representadas matemáticamente como un grupo de propiedades estáticas y dinámicas. Estas son: EL PROCESO (cualquier cantidad física que pueda variar), el INSTRUMENTO DE MEDICION y el CONTROLADOR. El siguiente diagrama puede ser una representación gráfica de estas características.

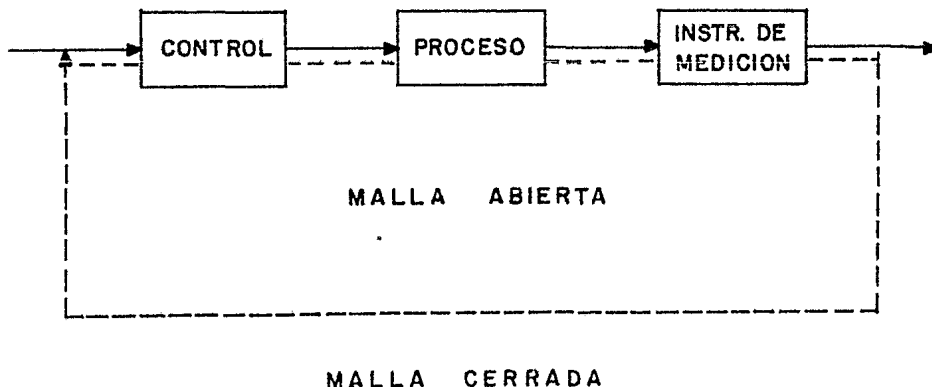


FIG. NO. 10

Si la instrumentación se considera ideal, esto es, que tiene propiedades dinámicas perfectas, se puede omitir del diagrama de bloques. Las flechas representan señales e información interconectando los bloques y determinando la configuración del sistema, que puede ser una malla abierta (línea sólida) o una malla cerrada (línea punteada).

La tarea de un controlador es ajustar el estado de un proceso medido por una variable --la variable de proceso (PV)-- conforme a un valor particular llamado el punto crítico (SP). La diferencia entre ellos se denomina error (E).

$$E = PV - SP$$

El controlador actúa en el error y a través de la función de otro componente, el elemento final de control, actúa sobre el proceso en la dirección adecuada, y así reduce el error. Estas relaciones se muestran en el siguiente diagrama, que es una sofisticación del anterior.

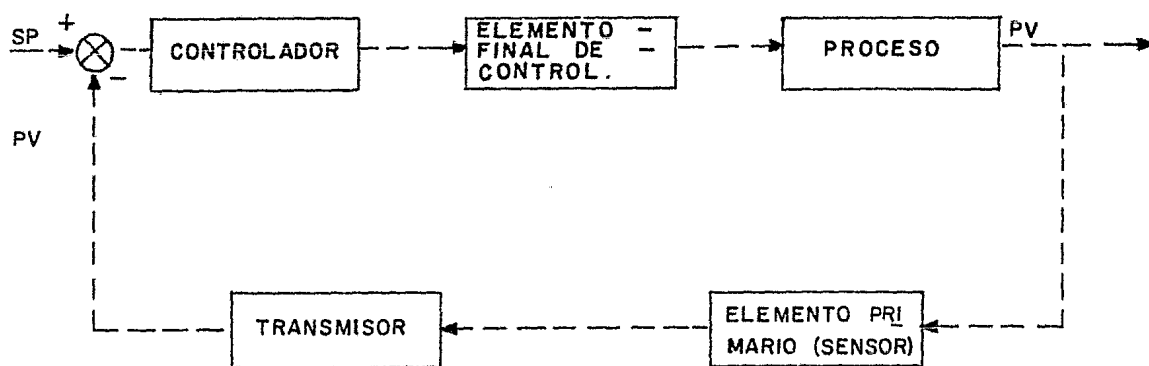


DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL.

FIG. NO. II

En esta figura existen tres elementos dinámicos aparte del controlador. Cualquiera de ellos o todos en su conjunto pueden presentar características dinámicas para el control de (PV). Estos elementos y sus características son comúnmente determinados por factores que deben ser considerados para el diseño del controlador ya sea porque son inherentes al proceso o porque su funcionamiento es requerido por economía del mismo. Esto significa que el controlador ideal deberá

poder compensar características dinámicas indeseables del sistema global.

La forma como el controlador opera su respuesta a una señal de error se llama Modo de Control o Ley de Control. Otro término más adecuado es Algoritmo de Control, significando en este caso un método de cálculo que produce una salida de control operando sobre una señal de error o una serie de señales de error en el tiempo. El número de variables independientes, tales como temperatura, presión, concentración y algunas otras que pueden ser controladas independientemente en un proceso dado está limitado por el número de ecuaciones que pueden relacionarlas. La diferencia entre variables independientes y ecuaciones se denomina grado de libertad del sistema.

### 3.2 Controles Industriales.

Existen ya formas clásicas de operación de un controlador, cada una de ellas regida por un algoritmo de control típico. A continuación se presentan los diversos tipos de control que puede ejercer un controlador.

#### 3.2.1 Control ON-OFF

Asúmase que el elemento final de control en la figura 11 tiene sólo dos estados, activo o inactivo. Un ejemplo es la figura 12. A la cual muestra un calentador que está operando o no, dependiendo del estado abierto o cerrado de un interruptor operado por el termostato. Cuando la temperatura del termostato cae, el interruptor se cierra, el calentador opera y la temperatura se incrementa. Cuando el termostato sensa una alta temperatura, el interruptor es abierto, apagando el calentador. Este ciclo de incremento-decremento continúa indefinidamente. Para prevenir estos cambios repetitivos demasiado rápidos que puedan destruir el equipo, un vacío (también llamado zona diferencial, neutra o muerta) se construye dentro del termostato de tal manera que no sucede nada hasta que la temperatura sobrepasa el punto crítico yendo, ya sea en una u otra dirección. Entonces la característica de la combinación interruptor podría ser como se muestra en la figura número 13.

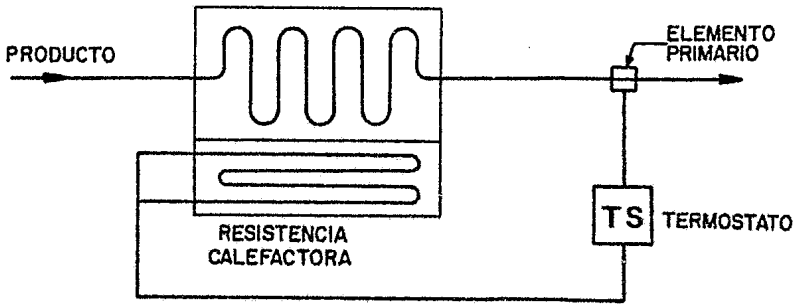


FIG. No. 12A

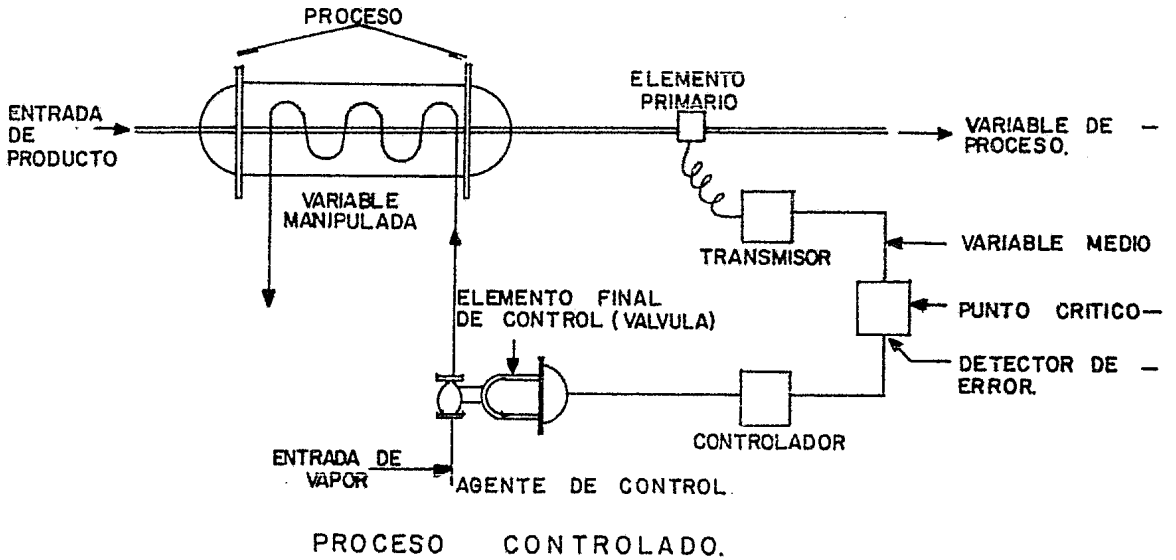
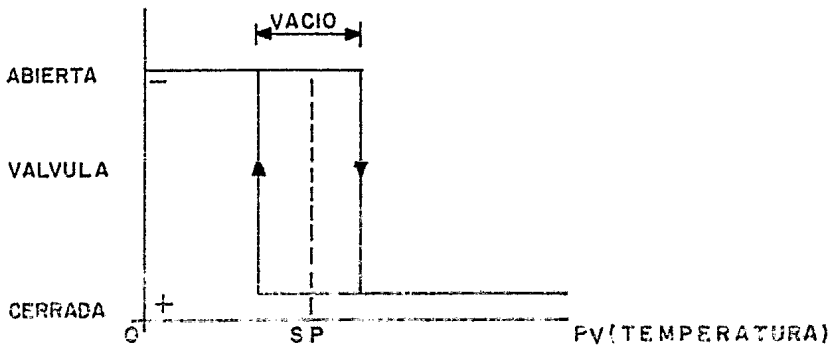


FIG. NO. 12B



MODO DE CONTROL ON-OFF.

FIG NO. 13



Con la temperatura a su valor máximo, el interruptor del termostato está abierto y no pasa energía a la resistencia calefactora y con el valor mínimo el interruptor del termostato está cerrado, pasando energía a la resistencia calefactora.

La ley de control del modo ON- OFF puede ser establecida como sigue:

$$E = PV - SP$$

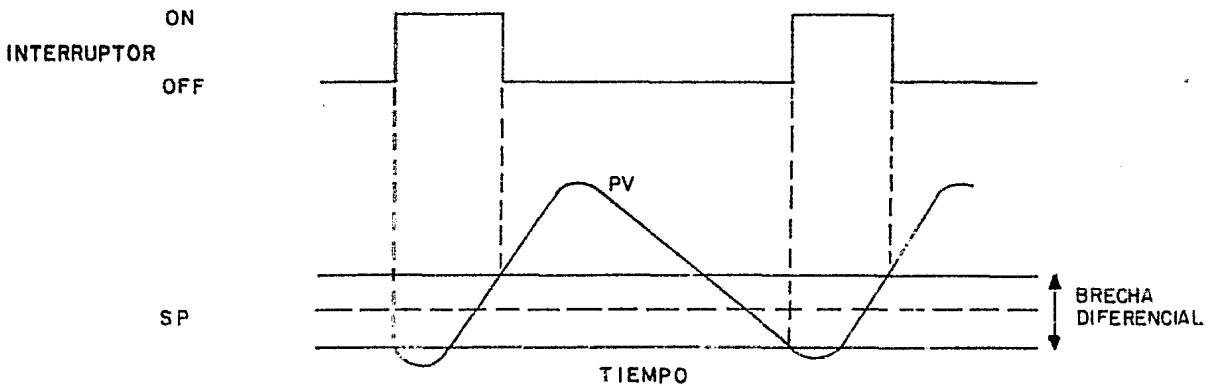
$$V = \text{Signo } E$$

Donde:

E = Error

V = Accionamiento de la resistencia calefactora.

El efecto de esta ley de control el modo ON - OFF sobre el funcionamiento del proceso se muestra en la siguiente figura. Cuando la temperatura cae y pasa a la región inferior de la zona de vacío el interruptor se cierra, pero la inercia determina algún retardo antes de que la temperatura PV empiece a incrementarse de nuevo. Otra vez, cuando PV alcanza el límite superior el interruptor abre, desenergizando la resistencia calefactora y la temperatura se excede un poco.



RESPUESTA DEL CONTROL ON-OFF

FIG. NO. 14

Se puede ver que si no hay una brecha diferencial obligada la inercia térmica demanda continuos excesos y ciclos de PV a alta frecuencia. Estos ciclos y excesos son características del modo ON-OFF de control, independientemente del sistema.

### 3.2.2 Control Proporcional.

Para evitar los problemas inherentes a los continuos ciclos y su consecuente pérdida de energía, deberá ser posible encontrar un valor intermedio que mantendrá la variable de proceso en un valor estable respecto al punto crítico. En el ejemplo presentado en la figura 12-B el valor de la energía de entrada correspondiente al flujo de vapor debe ser igual a la energía que abandona el sistema por calentamiento del producto que fluye a través del intercambiador de calor más las pérdidas. Debe quedar claro que el posicionamiento de la válvula es diferente para cada condición del producto que fluye y para cada factor de pérdidas.

El modo deseado de control entonces consiste de poner manualmente un valor en la posición de la válvula correspondiente a error cero bajo condiciones promedio del proceso o instruir al controlador a cerrar la válvula proporcionalmente a un error positivo ( $PV > SP$ ) y abrirla proporcionalmente a un error negativo. En otras palabras, la ley de control para el modo proporcional es:

$$V = KE + M$$

donde:

$$E = PV - SP$$

K = Una constante de proporcionalidad

M = Valor constante de la válvula puesto cuando  $E = \emptyset$

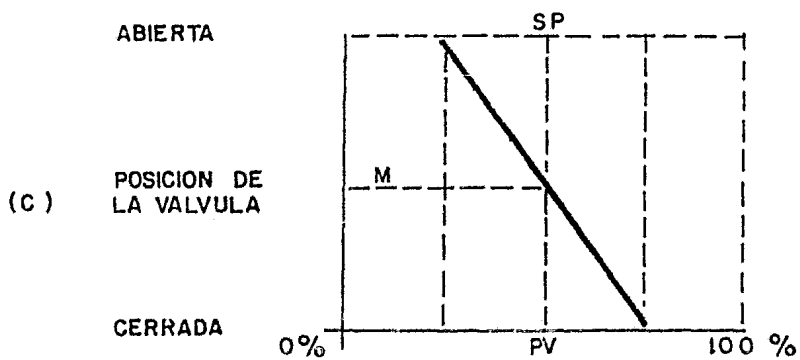
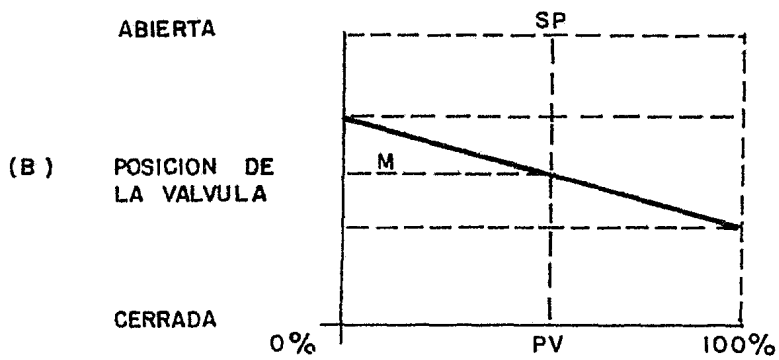
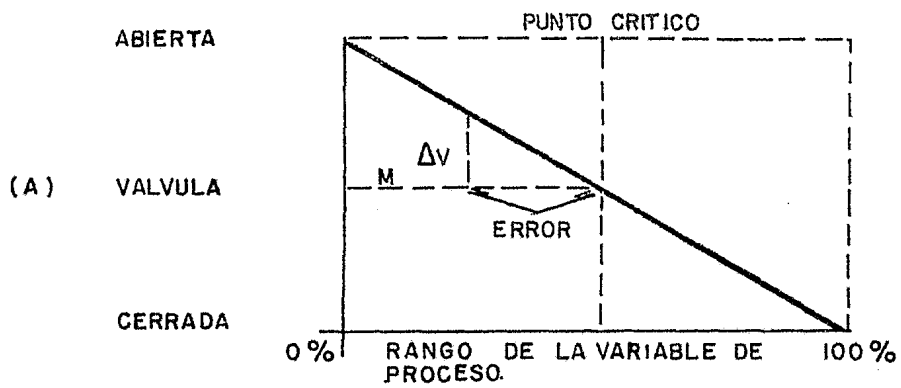
Esta es la ecuación de una línea recta, y como se define en la figura 15 (A) K, la constante de proporcionalidad, es usualmente denominada -

la ganancia del controlador. Como se muestra en las figuras 15 (A), 15 (B) y 15 (C) la ganancia o pendiente de la línea, determina el cambio en la abertura de la válvula correspondiente a un error dado. El cambio porcentual del error necesario para mover la escala completa es llamado BANDA PROPORCIONAL (PB). En la figura 15 (C), un pequeño error se requiere para abrir o cerrar la válvula completamente. Este es un sistema de alta ganancia. En la figura 15 (B) se presenta la situación opuesta. De aquí que la relación entre ganancia y banda proporcional es inversa.

$$K = \frac{100}{PB}$$

donde:

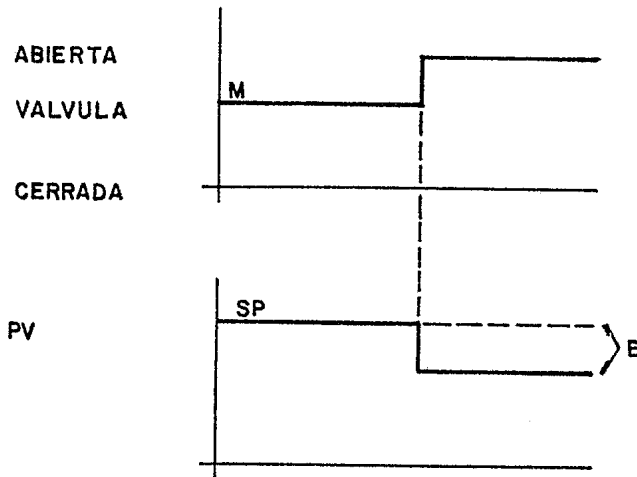
PB = Banda Proporcional en porcentaje.



CONTROL PROPORCIONAL

FIG. NO. 15

La figura número 16 muestra la acción del controlador proporcional en el tiempo. Si por alguna razón, ya sea una inyección del producto frío o un incremento en el flujo del producto, el error brincará rápidamente a un valor fijo, la válvula se moverá o tratará de hacerlo en una cantidad proporcional en la dirección adecuada para reducir el error a cero. Si el error se mantiene constante, la nueva posición de la válvula permanecerá igual. Las desventajas del modo proporcional de control pueden ser determinadas siguiendo las consecuencias de este tipo de perturbación (perturbación en la carga) en un sistema de lazo cerrado.



RESPUESTA AL CONTROL PROPORCIONAL

FIG. NO. 16

### 3.2.3 Control Proporcional + Integral

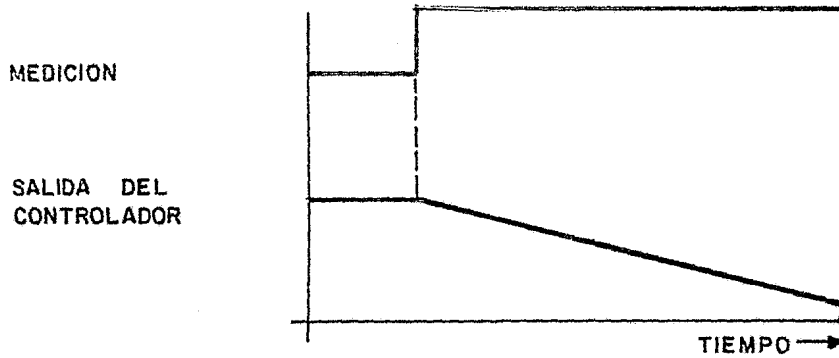
Se ha visto que si las condiciones de carga requieren una salida diferente, una diferencia entre el nivel de salida y el punto crítico ha de existir para este nivel de salida. El control proporcional puede reducir el efecto del cambio en la carga, pero no puede eliminarlo. La diferencia resultante entre el nivel de la salida y el punto crítico, después de que se alcanza un nuevo equilibrio se llama OFFSET (DESAJUSTE).

Si este desajuste no puede ser tolerado, otro modo de control se puede usar. La acción de control integral integra cualquier diferencia entre el nivel de salida y el punto crítico, y causa que la salida cambie hasta que la diferencia con el punto crítico sea cero.

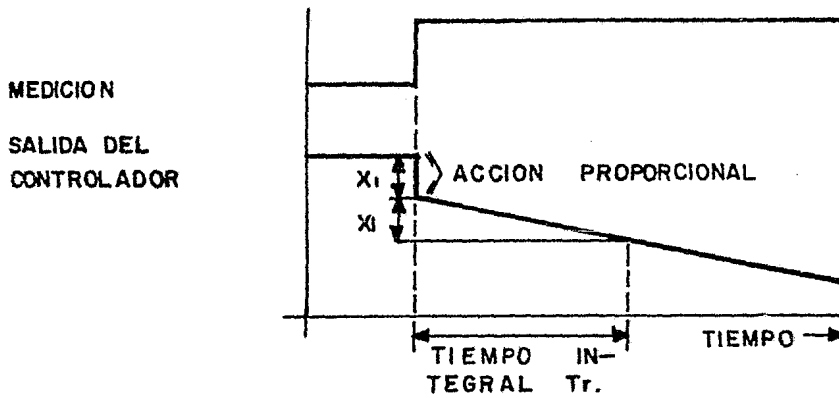
La diferencia de un control integral puro a un cambio ya sea en la salida o en el punto crítico se muestra en la figura número 17. La salida del controlador cambiará hasta que ésta no retorne al punto crítico. Esta figura asume una condición de malla abierta donde la salida del controlador termina en un dispositivo medidor y no está conectada al proceso.

Esta figura también muestra la respuesta proporcional + integral en malla abierta a un cambio. El tiempo integral es la cantidad de tiempo requerida para repetir la cantidad de cambio causada por el error o acción proporcional. En esta figura, el tiempo integral es igual a  $t_r$  o la cantidad de tiempo requerida para repetir la cantidad de cambio en la salida ( $X_1$ ). (Algunos fabricantes definen integral como el número de veces por minuto que la cantidad de cambio causada por la acción integral se repite).

Se puede pensar en el control integral como una fuerza para la banda proporcional que la obligará a cambiar y así, causar una nueva salida del controlador para una relación entre la medición y el punto



(A) ACCION INTEGRAL PURA



(B) ACCION PROPORCION + INTEGRAL

FIG. NO. 17

crítico. La acción integral continuará haciendo que cambie la banda proporcional tanto como exista la diferencia entre el punto crítico y la medición. La ecuación clásica o expresión para un controlador proporcional + integral es:

$$m = \frac{100}{PB} \cdot \left[ e + \frac{1}{R} \int e \cdot dt \right]$$

donde:

$m$  = salida

$\frac{100}{PB}$  = ganancia

$e$  = error de desviación

$R$  = tiempo integral

En operación, la salida de este controlador cambiará continuamente con la presencia de una señal de error. Una vez que el error ha si-

do reducido a cero, la salida no cambiará en tanto otro error no se presente.

### 3.2.4 Control Derivativo.

Cuando se controlan procesos de capacidad múltiple, un tercer método puede ser necesitado.

Por definición, derivación es el intervalo de tiempo en el cual la acción derivativa adelantará el efecto de la acción proporcional.

La acción derivativa ocurre siempre y cuando la señal medida cambie. Cuando existe un cambio en la medición la acción derivativa diferenciará el cambio y mantendrá un nivel tanto tiempo como la medición continúe cambiando a un ritmo dado. Bajo condiciones de estado estable, la acción derivativa actúa como un repetidor 1 a 1. No tiene influencia en la salida del controlador. Reaccionando al cambio en la entrada la acción derivativa le permite al controlador inducir una acción más correctiva que la inicialmente necesaria para contrarrestar la inercia del sistema. Este tipo de acción no debe ser usada en procesos que son caracterizados por tiempos muertos predominantes, o procesos que tienen un alto ruido, esto es, señales extrañas de alta frecuencia que están presentes en la aplicación.

La ecuación para un controlador proporcional + integral + derivativo se da a continuación:

$$m = \frac{100}{PB} \cdot \left[ e + \frac{T}{R} \int e \cdot dt + D \frac{de}{dt} \right]$$

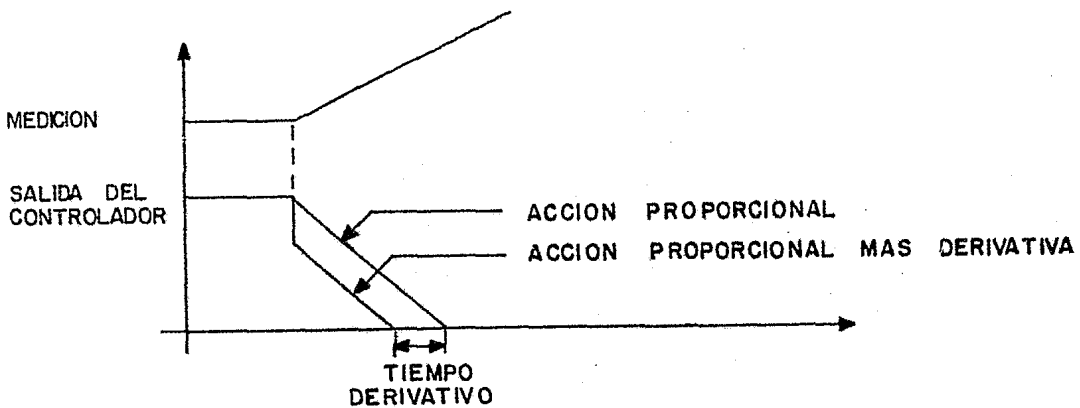
donde:

e = error

R = tiempo integral

D = tiempo derivativo





ACCION PROPORCIONAL+DERIVATIVA.

FIG. NO. 18

### 3.3 Controles Analógicos y Controles Digitales.

Habiendo quedado establecidas las funciones de un controlador, se pueden mencionar dos tipos de ellos:

1. Control Analógico - Representa las variables de las ecuaciones por cantidades físicas continuas.
2. Control Digital - Funciona con base numérica.

Refiriéndonos específicamente a control de procesos industriales existen varias ventajas de los controles digitales sobre los controles analógicos a continuación expuestas:

1. Los controles digitales pueden realizar complejos cálculos con exactitud constante a alta velocidad.
2. Los controles digitales son extremadamente versátiles. Simplemente colocando un nuevo programa se pueden cambiar totalmente las operaciones a efectuar.

Es debido a estas características que se ha elegido un microprocesador para actuar como control digital. los siguientes párrafos explican parte de las consecuencias de trabajar con un control de este tipo.

### 3.4 Cálculo Dinámico: Integración y Derivación.

Toda aplicación de control tiene como interés básico el ajuste de la dinámica del proceso así como del error. Por lo tanto un procesador digital actuando como un controlador debe ser capaz no sólo de multiplicar (por un factor proporcional) sino también de integrar y derivar acciones. ¿Cómo trabaja el microprocesador para lograr esto?

Las primeras computadoras analógicas y algunas digitales también, tenían dispositivos especiales que efectuaban integración. Una máquina puramente digital puede aproximar integración continua muy cercanamente asumiendo que la curva a ser integrada  $y=f(t)$  está hecha de un gran número de secciones rectangulares cada una de las cuales es de ancho  $\Delta t$ . Cada segmento tiene el área  $Y_i \Delta t$  y la integral es-

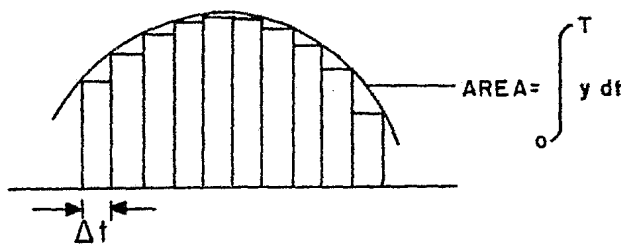


FIG. NO. 19

tá dada por:

$$z = \sum_{i=0}^n Y_i \Delta t_i = \Delta t \sum_{i=0}^n Y_i$$

Entonces, sólo se requiere sumar los valores discretos de  $Y$  al inicio de cada intervalo de tiempo  $\Delta t$  y multiplicar la suma por  $\Delta t$ . Cuando  $\Delta t$  es hecha muy pequeña la aproximación se vuelve más exacta. El diagrama muestra que siempre hay un error residual en esta aproximación, representado por el área triangular aproximada entre la parte superior del rectángulo y la curva verdadera. El área de este

triángulo es:

$$(Y_{n-1} - Y_n) \frac{\Delta t}{2} = \Delta Y \frac{\Delta t}{2}$$

Entonces con una fórmula de integración más exacta:

$$z = \sum_0^n (Y + \frac{\Delta Y}{2}) \Delta t$$

Con esta regla, el intervalo de muestreo no requiere ser pequeño. En cualquier caso, no es necesario desarrollar circuitería para la función de integración, puesto que puede ser acompañada por medio de adición, multiplicación y división. Por lo tanto la función de integración puede ser realizada por un programa.

Derivación está definida por la operación:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=x_0} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

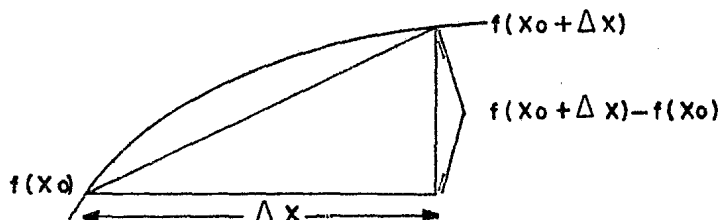


FIG. NO. 20

que representa la pendiente de la tangente dibujada por la curva  $y=f(x)$  en  $X=X_0$ . Aproximando:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

El valor antes calculado por la computadora digital también se vuelve muy pequeño y el cálculo resultante (con sólo unos pocos bits de exactitud) puede estar muy lejos del valor real.

Tómese el caso de un filtro de primer orden. Asíumase que se desea calcular por una computadora digital la salida  $D$  como una función de la entrada  $X$ .

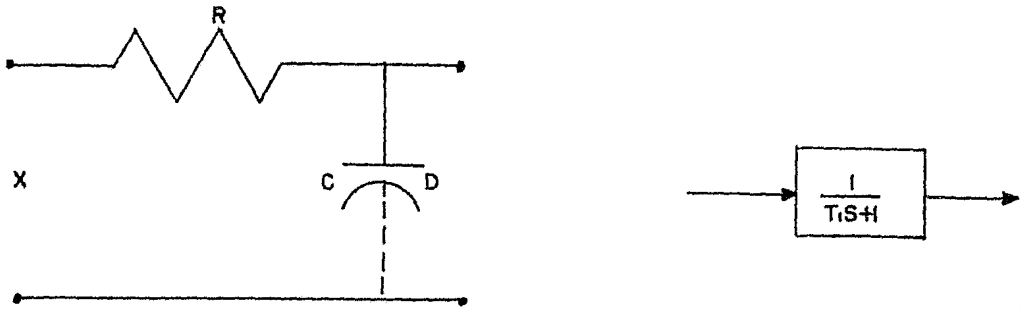


FIG. NO. 21

Si la constante de tiempo es  $T_1 = RC$ , la función de transferencia en notación de transformada de Laplace es como se muestra en el bloque. Esto puede ser convertido a forma diferencial por medio de la transformada inversa  $SF(S) = \frac{df(t)}{dt}$  de tal manera que:

$$\frac{D}{X} = \frac{1}{T_1 S + 1} = T_1 S D + D = X$$

Por la transformada inversa para diferenciación:

$$T_1 \frac{dD}{dt} + D = X$$

Pasando a la forma de diferenciación:

$$T_1 \frac{(D_n - D_{n-1})}{T_s} + D_n = X$$

Donde  $T_s$  es el tiempo de muestreo  $T_n - T_{n-1}$

Resolviendo para  $D_n$

$$T_1 (D_n - D_{n-1}) + D_n T_s = T_s X =$$

$$D_n = D_{n-1} + \frac{T_s}{T_s + T_1} (X - D_{n-1}) : \text{ si } k = \frac{T_s}{T_s + T_1} =$$

$$D_n = D_{n-1} + k (X - D_{n-1})$$

De aquí, el valor más reciente de la salida  $D_n$  es obtenido en términos del valor previo de  $D$ , la entrada a la malla  $X$  modificada por el período de muestreo y la constante de tiempo de la malla. Este resultado es útil y económico en tiempo de ejecución, ya que calcula el nuevo valor en base al valor anterior  $D$ . La salida calculada se muestra en el siguiente diagrama:

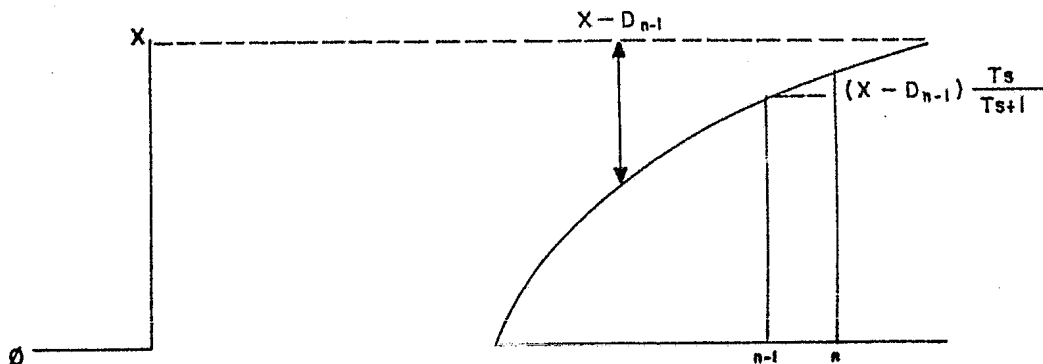


FIG. NO. 2 2

Obsérvese que sólo se necesita almacenar el último valor de la salida  $D_{n+1}$ , sustraer éste de la entrada actual, multiplicar por una constante y sumar el resultado al valor  $D_{n-1}$  en el siguiente intervalo de muestreo.

La constante del filtro  $K$  puede ser fija o ajustable. Si es fija será almacenada con el programa. Si es ajustable puede ser calculada de la siguiente manera:  $T_s$ , el período de muestreo es constante y  $T_1$  es determinado por el valor que  $C$  y  $R$  pueden tomar.

Cabe hacer notar que el hecho de mejorar un control es enormemente empírico y en la práctica se reduce a fijar y probar los diversos ajustes ya sea en línea con el proceso o a través de una simulación por computadora. El incremento en el uso de métodos analíticos en el diseño del control naturalmente lleva al concepto de usar modelos analíticos para compensación. Un modelo completamente exacto de una situación relativamente simple puede ser muy complejo e imponer el modo

laje en tiempo real en aún grandes computadoras analógicas y digitales. Sin embargo, en muchos casos la aproximación por modelos que incluya todas las variables significativas puede justificar su uso. El arte del buen modelaje implica el hecho de saber, de todas las variables del proceso, cuales deben ser tomadas en cuenta, y esto se adquiere sólo con experiencia específica en el proceso.

### 3.5 Aplicación.

El dispositivo y las rutinas desarrolladas tienen como objetivo, como ya fue establecido, controlar una planta térmica.

Se ha tomado como elemento de prueba un simulador de procesos PT326, cuya descripción se da a continuación.

El PT326 es un equipo de control autocontenido, ya que además de generar cambios de temperatura en un flujo de aire, contiene los elementos necesarios para ejercer sobre este proceso, un control.

El flujo de aire de las atmósfera es acelerado, pasado a un calentador y a través de una turbina a la atmósfera nuevamente. El proceso consiste en calentar el flujo de aire en el tubo al nivel de temperatura deseado, y el propósito del equipo de control es medir la temperatura del aire, compararla con un valor puesto por el operador y generar una señal de control que determinará la cantidad de electricidad que deberá ser proporcionada al elemento corrector, en este caso, un calentador montado adyacente al soplador, para mantener la temperatura del aire dentro del valor deseado.

Refiriéndose específicamente al elemento controlador, éste puede ejercer dos tipos de control elegibles por el usuario: control continuo o control de dos pasos.

El control continuo puede ser de dos tipos:

- a) Interno - Este da acción proporcional que significa de ajuste de "banda Proporcional", esto es, el rango de valores de desviación que causará la salida del controlador puede variar sobre su rango completo de trabajo, expresado como un porcentaje del rango del elemento medidor.
- b) Externo - El ajuste de banda proporcional puede ser ejercido desde fuera del circuito por un simulador de control de procesos. Esto permite utilizar controles de otro tipo, tales como:
- Proporcional e Integral
  - Proporcional y Derivativo
  - Proporcional Integral y Derivativo

El control de dos pasos es elegido cuando el elemento controlador es cambiado a una acción de dos pasos o de SI - NO. El ajuste de la banda proporcional es puenteado y el ajuste de máxima potencia y "OVERLAP" introducido dentro del sistema.

Los elementos constitutivos de este controlador son como sigue:

- a) ALIMENTACIONES  
220-250 volts o 100-120 volts, seleccionables por un interruptor.
- b) PROCESO  
Este término general es usado para describir un cambio físico o químico, o la conversión de energía, e inclusive un cambio de presión, temperatura o velocidad de un fluido, el nivel de un tanque, etc. En este caso, la temperatura del aire que fluye en el proceso es incrementada del valor deseado dentro del rango de la temperatura ambiente a 60°C.
- c) ELEMENTO DETECTOR  
Un termistor incluido al final de la prueba puede ser insertado dentro del flujo de aire en cualquiera de tres puntos a lo largo del tubo.

d) ELEMENTO MEDIDOR

El termistor forma un brazo de un puente de corriente directa que está en balance a  $40^{\circ}\text{C}$ . Este voltaje de salida es aplicado a un amplificador de corriente directa y produce un voltaje que varía de  $0$  a  $10$  volts para un cambio de temperatura en el aire de  $30$  a  $60^{\circ}\text{C}$ . La salida del elemento medidor puede ser monitoreada.

e) VALOR MEDIDO  $\theta_0$

Esta es la señal de salida del elemento medidor, correspondiente al valor de la condición controlada.

f) VALOR PUESTO  $\theta_1$

Este es el valor de la condición controlada a la cual el controlador automáticamente es puesto. El valor puesto interno puede ser usado para incrementar la temperatura del aire del proceso a  $60^{\circ}\text{C}$ . El valor puesto puede ser ajustado exteriormente aplicando un voltaje entre  $0$  y  $-10$  volts.

g) DESVIACION  $\theta$

La diferencia entre el valor medido y el valor puesto.

h) ELEMENTO COMPARADOR

Un amplificador es usado para comparar el valor medido con el valor puesto.

i) ELEMENTO CONTROLADOR

Una señal proporcional de desviación es aplicada al elemento controlador que entonces genera una señal de control para transmitir a la unidad correctora.

### 3.6 Interfase Controlador - Microprocesador.

Por el párrafo anterior es posible concluir que este controlador tiene la posibilidad de ser dirigido desde el exterior, por lo que es aquí donde el dispositivo desarrollado junto con el microprocesador



ejercerán una acción de control a través de algoritmos y parámetros previamente almacenados.

CONCLUSIONES

1. Este trabajo propone un método alternativo de control digital sobre una planta térmica en base a un microprocesador. Sus características más importantes son flexibilidad en el criterio de control, capacidad de almacenamiento y velocidad en la respuesta.
2. La lógica de la circuitería está hecha de tal manera que en un momento dado podría funcionar con algunos de los diferentes microprocesadores que existen en el mercado. Se eligió como prototipo el 6802D3.
3. Las rutinas desarrolladas son consideradas como básicas para la implementación de cualquier algoritmo. El usuario puede desarrollar otras que llenen una necesidad en particular.
4. Se establecieron los algoritmos típicos de control. En base a las características del proceso se puede escoger el más adecuado, de acuerdo a la función que se desea realice el controlador.

B I B L I O G R A F I A

BIBBERO, Robert J.  
Microprocessors In Instruments and  
Control

MOTOROLA 6800  
Microprocessor Applications Manual

MOTOROLA 6802D3  
Supplementary User Instructions

NATIONAL CONDUCTOR  
Analog to Digital Converters

ANDERSON, Norman A.  
Instrumentation for Process Measurement  
and Control

TEXAS INSTRUMENTS TTL  
Integrated Circuits