

881217
26
24



UNIVERSIDAD ANAHUAC

ESCUELA DE INGENIERIA

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

VINCE IN BONO MALUM

**ESPECIFICACIONES PARA UN CONTROLADOR DEL
SISTEMA DE COMBUSTIBLE DE UNA PLANTA
TERMoeLECTRICA POR MEDIO DE UN
MICROPROCESADOR**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA SISTEMAS ELECTRICOS Y ELECTRONICOS**

P R E S E N T A :
SAIDA GUADALUPE SANCHEZ VALDES

MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA TE CR:GEN

1986



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.

INDICE GENERAL

	PAGINA
INTRODUCCION	
OBJETIVOS Y ALCANCES	
I. ESPECIFICACIONES FUNCIONALES DEL CONTROLADOR	1.1
II. DESCRIPCION GENERAL DEL CONTROLADOR Y FUNDAMENTOS TEORICOS	
II.1 DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA TERMOELECTRICA.	2.1
II.2 DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE DE UNA PLANTA TERMOELECTRICA.	2.5
II.3 DESCRIPCION GENERAL DE LAS PARTES ESENCIALES DEL CONTROLADOR.	2.11
II.4 MICROPROCESADOR Y CIRCUITOS DE ENTRADA Y DE SALIDA	2.15
II.5 SENSORES Y ELEMENTOS FINALES DE CONTROL.	2.30
II.6 MODOS DE CONTROL.	2.49
II.7 SISTEMAS DISCRETOS Y CONTROL DIGITAL.	2.63
III. DISEÑO Y COMPROBACION DEL PROTOTIPO DE UN ALGORITMO DE CONTROL	
III.1 INTRODUCCION	3.1
III.2 DEDUCCION DEL ALGORITMO DE CONTROL PID	3.1
III.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL PID	3.5
III.4 PROGRAMA DEL CONTROL PID PARA EL Z-80	3.12
III.5 ENSAMBLE COMPLETO DEL CONTROLADOR PARA LA PRUEBA DEL ALGORITMO	3.33
III.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES	3.35
III.7 CONCLUSIONES	3.42
IV. ESPECIFICACIONES DEL CONTROLADOR DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE	
IV.1 MICROPROCESADOR	4.1
IV.2 CIRCUITOS DE ENTRADA Y SALIDA	4.13
IV.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE	4.17
CONCLUSIONES	
APENDICE	

INTRODUCCION

En las plantas termoeléctricas de México, el proceso de combustión ocupa un lugar preponderante dentro de la problemática de eficiencia de dichas centrales. Del proceso de combustión se derivan gran parte de los problemas de ensuciamiento y deterioro de los generadores de vapor, los que a su vez constituyen una de las causas más importantes de indisponibilidad, particularmente agravada en México por las características del combustible utilizado, debido a que durante los últimos años la calidad de los combustóleos se ha deteriorado en forma paulatina. El estudio sistemático de muestras provenientes de diversas regiones del país demuestra que una de las características del combustóleo que varía significativamente es la viscosidad. Esta propiedad del combustóleo es importante en su atomización, ya que la función de dicha atomización es inyectar el combustible en la cámara de combustión en forma de pequeñas gotas, con velocidad y trayectorias tales que propicien un buen mezclado con el aire de combustión. Por tanto, es necesario un ajuste adecuado de la viscosidad del combustible.

Hasta ahora, este problema se ha tratado de resolver controlando solamente la temperatura del combustóleo, continuando así con problemas de atomización.

Considerando esta problemática se tomó la iniciativa de realizar este trabajo de tesis para proponer la solución al problema ya mencionado, a saber:

- Proporcionar las especificaciones de un controlador para el sistema de combustible.

Para ello consideramos que debe conducirse el trabajo sin perder de vista dos objetivos que son hoy por hoy una constante en las necesidades:

-Desarrollo de una tecnología propia.

-Aprovechamiento al máximo de los recursos materiales, educativos y económicos disponibles.

Se ha pensado en el empleo de un microprocesador como solución para el controlador, debido a que si un sistema se basa en micro procesadores puede sustituir sistemas de control analógicos y de circuitaría digital aumentando así la capacidad de operación y disminuyendo su costo.

En el capítulo I se da una breve relación de las características y limitaciones de que dispone el controlador a fin de que con base a ellas se desarrolle la teoría y las especificaciones de diseño.

En el capítulo II se da la descripción general del controlador y fundamentos teóricos, se describe el ciclo de trabajo que desarrollará el sistema con el controlador, así como los fundamentos teóricos de sus elementos principales y de su forma de operación.

En el capítulo III que es referente al diseño y comprobación del algoritmo de control en un prototipo, se describe la deducción del algoritmo de control PID así como su diagrama de flujo y el programa para ejecutarlo en un microprocesador Z-80. Realizando en éste algunas pruebas experimentales que muestran la operación del controlador.

Y en el capítulo IV se dan las especificaciones del controlador del sistema de combustible tomando en cuenta las limitaciones técnicas y comerciales que rigen en la actualidad. Proporcionando además el diagrama de flujo del control del sistema de combustible.

OBJETIVOS Y ALCANCES

En este trabajo se propondrán las especificaciones de diseño y los diagramas de flujo para el controlador del sistema de combustible, así como su justificación.

Las especificaciones serán con la finalidad de proporcionar la máxima capacidad de control y señalización cuando se utilice en el sistema de combustible dentro de la planta termoeléctrica, donde se podrá mostrar su verdadera fuerza, como elemento auxiliar, en la optimización del proceso de combustión.

Se instrumentarán los circuitos y la programación para realizar el algoritmo de control proporcional-integral-derivativo, que es la base del control del sistema de combustible. No se llevará a la práctica dicho controlador, cuya utilidad, conveniencia y modo de funcionamiento, dentro del contexto de la planta termoeléctrica, han sido suficientemente tratados y razonablemente evaluados en otros trabajos realizados ya por personal debidamente capacitado en el área de Instrumentación y Control del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

I.- ESPECIFICACIONES FUNCIONALES DEL CONTROLADOR

Es de primera importancia dar a conocer las características con las que deberá contar el controlador, ya que de ellas dependen las especificaciones de las componentes de dicho controlador así como su algoritmo de control. A continuación se mencionan dichas características:

- a) La entrada deberá ser estandarizada, para que se pueda adaptar a los transmisores.
- b) Debe ser capaz de manejar las tres variables del sistema de combustible.
- c) La salida debe ser estandarizada para su fácil empleo en los elementos finales de control.
- d) Debe disponer de un sistema de alarma para prevenir posibles valores altos y bajos peligrosos de las variables en proceso.
- e) Debe tener un selector de control manual o automático.

Ahora se procederá a caracterizar con mas detalle el controlador para que las magnitudes señaladas anteriormente tengan la representación correspondiente en la especificación del controlador. Estas características se han fijado tomando en cuenta las necesidades que se quiere cubrir.

La entrada al controlador estará estandarizada para transductores - cuya salida sea de 4-20 mA, puesto que según el producto de la experiencia, esta clase de transductores son los que tienen más uso en la industria. De forma que sólo con el requisito de que el transductor cuente con dicha salida, es posible utilizar este controlador - para dicho sistema de combustible.

Por otra parte, se utilizará como unidad de proceso de información un microprocesador, del que se darán las especificaciones en un capítulo posterior, para su empleo en el manejo de la información y de procesamiento de datos en la ejecución de acción de control, es decir, tal microprocesador cumplirá básicamente las funciones de:

- Controlar a partir de un algoritmo específico.
- Sistema preventivo de alarmas para indicar posibles valores peligrosos de las variables en proceso.

Se usará un convertidor analógico/digital que es necesario para suministrar la información analógica de los transmisores al microprocesador, dicho convertidor proporcionará palabras de 8 "Bits" que se aplican directamente al puerto de entrada del microprocesador.

Por otra parte también se usará un convertidor digital/analógico, con el objeto de que la señal ya procesada sea capaz de modificar el proceso en cuestión con la ayuda del elemento final de control. En cuanto a las señales del proceso a controlar, deberán cumplir con las condiciones de estandarización, es decir, que tanto la señal del elemento primario como la señal para controlar el elemento final se encuentren en el intervalo de 4 a 20 mA.

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL CONTROLADOR Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

II.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA.

Una planta termoeléctrica es una instalación que tiene como función transformar energía calorífica en energía eléctrica, para su empleo en la industria o en usos domésticos, esta transformación de energía utiliza 3 órganos principales y el equipo auxiliar correspondiente.

Estos órganos se muestran en la figura 2.1 y son:

- Generador de vapor o caldera
- Turbina de vapor.
- Generador de corriente alterna

Se hace necesario considerar que la transformación de energía está basada en los siguientes pasos:

- Combustión del combustible (carbón, petróleo crudo o gas natural), la cual tiene lugar en el hogar de la caldera.
- Calentamiento del agua hasta convertirla en vapor, esta etapa también se lleva a cabo en la caldera.
- El siguiente paso se realiza en la turbina al girar la parte móvil o rotor de esta, por efecto del vapor procedente de la caldera.
- Al girar el rotor de la turbina se hace girar el rotor de un generador con lo que se obtendrá energía eléctrica.

Para realizar la combustión se necesita de una cierta cantidad de --- oxígeno que se toma del aire, el cual es enviado, por un ventilador - de tiro forzado, a un ducto que lo conduce hasta los quemadores, en - donde se mezcla el combustible con el aire (en cantidades adecuadas), y esta mezcla es la que se quema en el hogar de la caldera. En este - paso ocurre la transformación de energía química del combustible --- latente o inactiva, a energía calorífica.

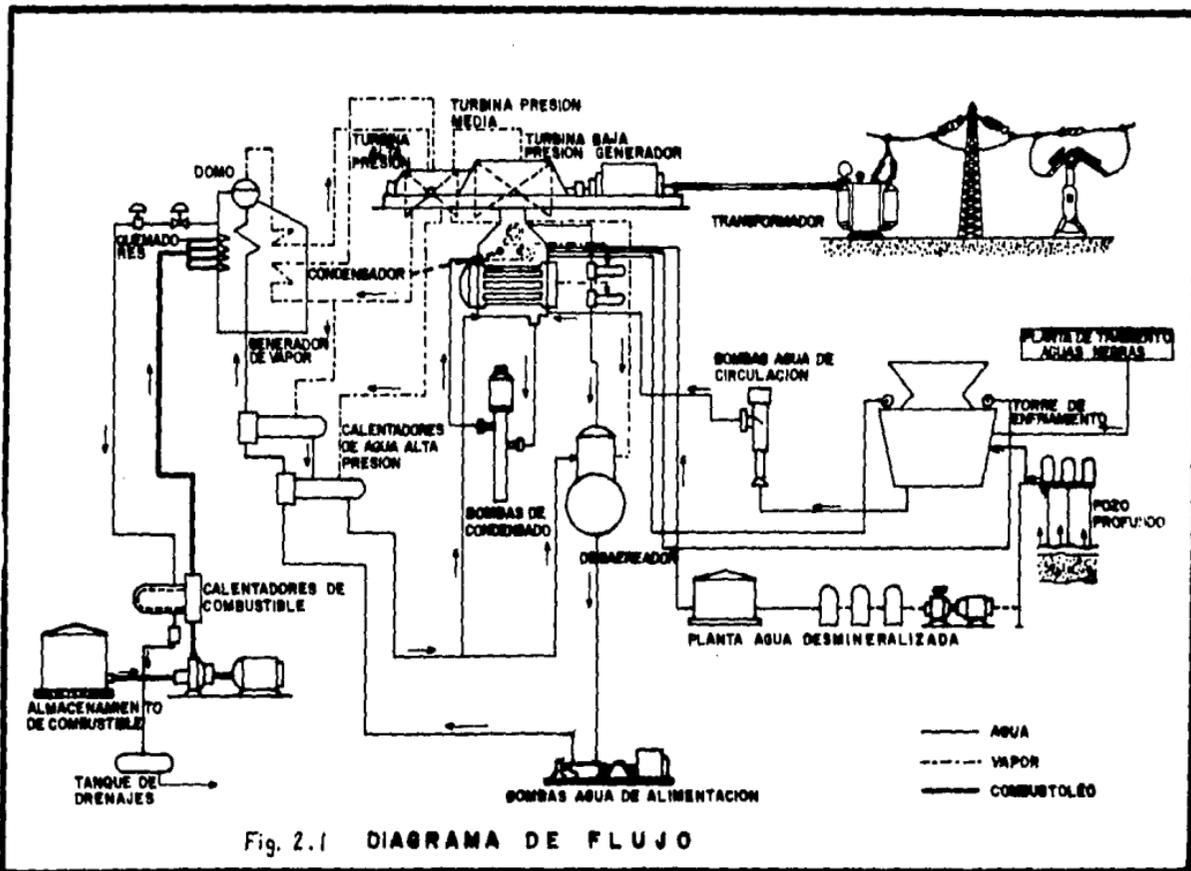


Fig. 2.1 DIAGRAMA DE FLUJO

El calor desprendido, durante el proceso de combustión, es absorbido por el agua presente en los tubos que constituyen "las paredes de agua" de la caldera. Debido al calentamiento del agua, ésta se evapora y el vapor que se produce es saturado, el cual sale por la parte superior del domo o colector de vapor para ser conducido por una serie de "tubos sobrecalentadores" en donde absorbe cierta cantidad de calor, por lo que se convierte en vapor sobrecalentado.

El vapor, en estas condiciones, es conducido al interior de la turbina; en donde su energía térmica se convierte en energía mecánica al hacer girar al rotor. Esta conversión se lleva a cabo en 2 etapas:

- 1.- El vapor se expande en las toberas, descargando a muy alta velocidad, de esta forma el calor total contenido en el vapor se convierte principalmente en velocidad.
- 2.- La fuerza del chorro, producido por esta transformación en las toberas, puede utilizarse en la turbina convirtiéndose en trabajo.

Al girar el rotor de la turbina, la energía mecánica del eje está en condiciones de generar electricidad por medio del generador. Las partes principales de este son: el rotor, el estator, y el excitador. El rotor está acoplado al eje de la turbina y gira en la mayoría de las plantas a 3600 R.P.M.; el excitador, que es un generador de corriente continua, se encuentra acoplado al eje del rotor del generador; rodeando al rotor, se encuentra el estator del generador.

El rotor forma un campo magnético el cual es cortado por el arrollamiento del estator, lo que produce una tensión alta que es inducida en el mismo arrollamiento. Esta tensión se conduce a los transformadores, donde es elevada para su transmisión a las subestaciones, y aquí se disminuye para su distribución en los centros de consumo.

II.2. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA

En una Planta Termoeléctrica se encuentran varios sistemas a controlar, como son el sistema de agua de alimentación, sistema de agua de enfriamiento, sistema de combustión, sistema de suministro de vapor de turbina, sistema de aceite combustible, etc. Todos estos sistemas tienen una gran importancia para el buen funcionamiento de la Planta. Siendo la función principal la generación de vapor, donde el sistema de aceite combustible es uno de los que inician el ciclo.

Descripción del Sistema de Combustible

El abastecimiento del aceite combustible se realiza por oleoducto, barco, ferrocarril o carretera, y se recolecta en grandes tanques de almacenamiento. Este aceite debe recibir un calentamiento tal, que adquiera la viscosidad apropiada para bombeo, ya que si se dejara expuesto a las condiciones ambientales, se ocasionarían problemas para su transferencia. Después de haber recibido el calentamiento necesario, se bombea al "tanque de día". De aquí el combustible se transfiere al calentador principal de aceite combustible. En la figura 2.2 se muestra el sistema de combustible.

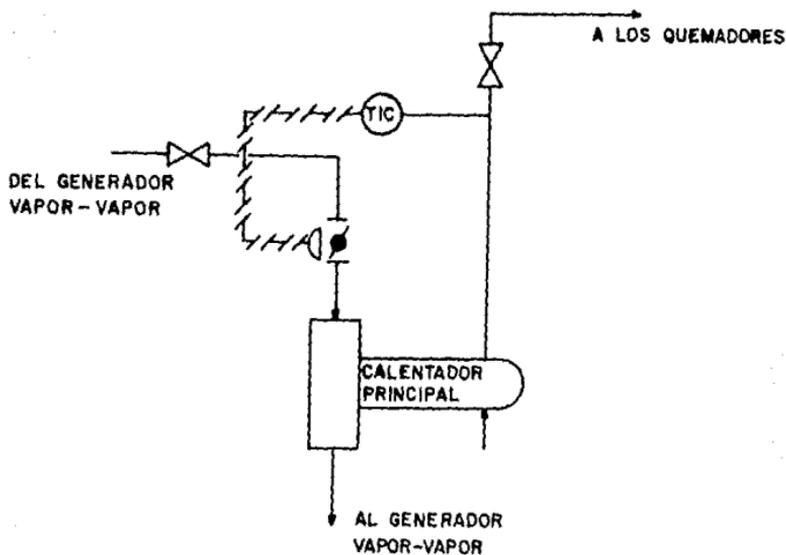


Figura 2.2 Diagrama del sistema de aceite combustible.

Para el calentamiento se emplea vapor proveniente de la caldera y se introduce a los calentadores por medio de tubería. En los calentadores principales, el combustible adquiere la temperatura necesaria para ser transferido a los quemadores.

Anteriormente se indicó que es conveniente controlar la temperatura -

del aceite para mantenerlo a la viscosidad óptima de bombeo, pero existe una razón aún más importante por la que debe ser controlada, dada por el hecho de que la viscosidad del combustóleo afecta directamente la eficiencia, tanto de los quemadores como la de la atomización del aceite antes de su ignición en el hogar de la caldera.

Como se puede ver en la figura 2.3 la viscosidad del aceite combustible es sensible a los cambios de temperatura, por lo que cuando el suministro de aceite es uniforme y consistente, puede confiarse en que la relación viscosidad-temperatura no variará significativamente, y la viscosidad óptima de combustión puede determinarse variando solamente la temperatura del aceite.

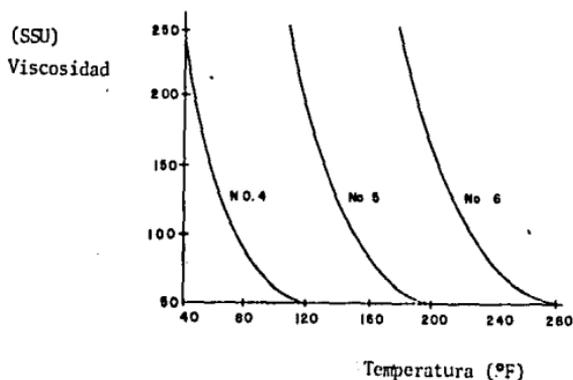


Figura 2.3. Curva de viscosidad-temperatura para varios tipos de aceite combustible.

En las plantas termoeléctricas de México, que se encuentran en la actualidad, se controla la viscosidad del combustóleo, controlando únicamente la temperatura de este.

Esta forma de controlar la viscosidad es apropiada si sólo se empleara un único tipo de combustible con una calidad homogénea, además de mantener la temperatura de suministro constante y de evitar cambios de flujo de combustible. Pero realmente esto no ocurre de ésta manera, debido a que el combustible que se abastece a las plantas varía en su calidad, y en su temperatura de suministro, así como también varía el flujo del mismo debido a los cambios de carga - que varían la demanda del combustible. Para obtener las condiciones requeridas del combustible, y de esta manera mejorar la eficiencia de los quemadores, se hace necesario controlar la viscosidad considerando que se abastece combustible con diferentes grados de viscosidad, a diferentes temperaturas de suministro y que existen cambios de carga, por lo que se sugiere el sistema que se muestra en la figura 2.4.

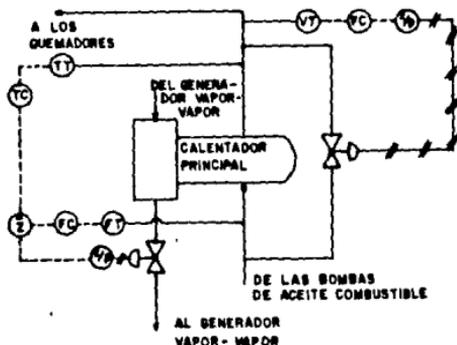


Figura 2.4.- Control de viscosidad del aceite combustible.

Primeramente el aceite combustible se bombea del tanque de almacenamiento al calentador, en donde el combustible adquiere cierta temperatura para su manejo. Un transmisor de temperatura suministra una señal continua al controlador, este compara la señal de temperatura muestreada con la señal de temperatura requerida y se modula la posición de la válvula (de acuerdo al error que aparezca de la comparación) que regula el flujo de vapor. De la misma manera el transmisor de flujo suministra una señal continua al controlador, este compara la señal que recibe con la señal deseada y modula la posición de la válvula de flujo de vapor; la función de este último, es que al detectar la variación en el flujo de combustible, sin que haya ocurrido todavía el cambio de la temperatura, se anticipe a corregir la variación de temperatura, que el cambio de flujo de combustible pueda ocasionar.

Hasta este momento se tiene una viscosidad menor a la que se requiere, ya que la temperatura a la que se está calentando es mayor a la temperatura de la viscosidad deseada (tomando en cuenta el aceite combustible de mayor viscosidad, que se abastece).

Siguiendo con el diagrama de la figura 2.4, se transmite una señal de viscosidad al controlador respectivo, este compara dicha señal con la deseada, y corrige el error, modulando la posición de una válvula situada en la línea de derivación de aceite combustible que se suministra al calentador, de este modo, se mezclan los combustibles (el de la derivación con el que sale del calentador) para tratar de obtener la viscosidad óptima para los quemadores.

La función de los transmisores es recoger la información de las variables en proceso, las cuales para este caso son temperatura, flujo y viscosidad, para después enviarla a su respectivo controlador.

Dicho controlador tiene como función mantener las variables de control del proceso a un valor predeterminado. Para este control de viscosidad se requerirá de un sólo controlador, para manipular las tres variables (temperatura, flujo, viscosidad); es decir, se empleará un microprocesador, que registrará el comportamiento del sistema, siempre y cuando se encuentre en el modo de operación automático.

Y como elementos finales de control para este sistema se tienen válvulas neumáticas que modifican, de acuerdo a la señal transferida -- por el controlador, el caudal de los fluidos (vapor y combustible).

II.3

DESCRIPCION GENERAL DE LAS PARTES ESENCIALES DEL CONTROLADOR.

Con las especificaciones de diseño examinadas en párrafos anteriores, ahora se explica el funcionamiento de cada una de las partes que constituyen el controlador, para tener clara la función que --- ejecuta cada una de ellas, y después pasar al diseño del controlador con lo que las funciones cualitativas que se detallan aquí, toman su forma cuantitativa en la siguiente sección.

El sistema completo de control se muestra en la figura 2.5.

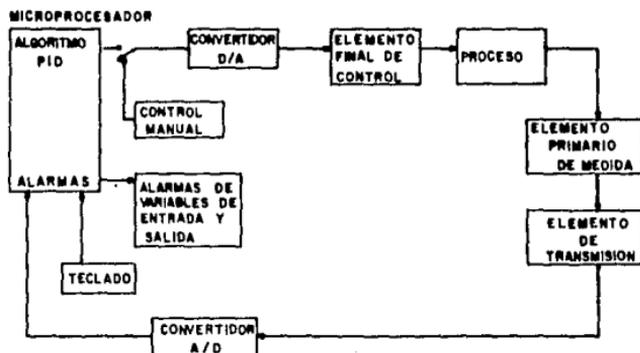


Figura 2.5. Configuración General.

PROCESO

El proceso consiste en un sistema que ha sido desarrollado para lle-

var a cabo un objetivo determinado; tratamiento del material mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación. Los procesos involucran diversas formas, desde las más simples hasta las más complejas, así como un proceso puede tener un tiempo de respuesta tan rápido como el de la figura 2.6 -- ó lento como el de la figura 2.7.

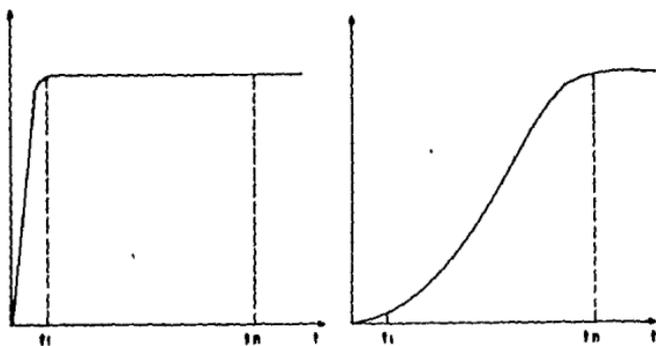


Figura 2.6.- Respuesta del proceso A.

Figura 2.7.- Respuesta del proceso B.

Los procesos presentan dos características principales que deben considerarse:

- a).- Los cambios en la variable controlada debido a alteraciones en las condiciones del proceso y llamados generalmente cambios de carga:
- b).- El tiempo necesario para que la variable del proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este retardo se debe a una o varias propiedades del proceso: capacitancia, resistencia y tiempo de transporte.

ELEMENTO PRIMARIO.

El elemento primario, se encuentra en contacto con la variable controlada y utiliza o absorbe energía de este medio para suministrar al sistema de medición una indicación; como respuesta de la variación de dicha variable.

Para que el usuario pueda conocer el comportamiento del proceso, se hace necesario el elemento primario que recogerá información del estado de la variable en proceso.

ELEMENTO DE TRANSMISION.

Percibe la señal de estado de la variable de proceso, por medio del elemento primario, para ser enviada a distancia en forma de señal neumática, de gama 3 a 15 psi ó como en este trabajo, electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua, y también existen los que envían señales de mV o ± 10 V.

CONVERTIDOR ANALOGICO-DIGITAL

Este convertidor hará posible que la información analógica de la variable de proceso pueda ser manejada por el microprocesador en palabras de ocho "Bits" cada una.

MICROPROCESADOR

Este dispositivo, "centro" de operación del sistema, es el que dirige por completo el comportamiento de dicho sistema (excepto cuando se encuentra en control manual).

Tiene por objetivo, como se mencionó anteriormente:

a).- Control por medio del algoritmo PID.

b).- Sistema indicador de alarmas para límites bajo y alto, Todos los datos como son el punto de referencia, límites de alarmas, tiempo de muestreo, etc., se introducirán mediante teclado o bien mediante potenciómetros.

CONVERTIDOR DIGITAL-ANALÓGICO.

La información que se recibe del microprocesador, está disponible en palabras de 8 "Bits", las cuales se convierten a una señal analógica, ésta transformación ocurre en el convertidor digital/analógico, es necesario esta conversión ya que el proceso admite y genera solo señales analógicas.

ELEMENTO FINAL.

El elemento final de control recibe la señal del controlador y modifica el agente de control, es decir, que corrige el valor de la variable manipulada. Básicamente acondiciona la señal analógica proveniente del convertidor digital/analógico, para que modifique el comportamiento del proceso mediante un actuador.

Hasta aquí se tiene una visión general del sistema total, a continuación se trata específicamente al controlador (Figura 2.8) cuyas partes esenciales son:

- Convertidor analógico-digital
- Microprocesador
- Convertidor digital-analógico
- Programación



Figura 2.8. Configuración del controlador.

II.4. MICROPROCESADOR Y CIRCUITOS DE ENTRADA Y DE SALIDA

TEORIA BASICA DEL MICROPROCESADOR.

A finales de 1971 se inició una nueva revolución en electrónica - al producirse el primer microprocesador en el mercado (intel 4004) y en la actualidad existen más de 30 tipos diferentes de microprocesadores. La aportación de los microprocesadores es la de poner a la disposición de los diseñadores un dispositivo de bajo costo, muy pequeño, de bajo consumo de potencia, y de una flexibilidad tal para configurar funciones complejas por medio de una programación adecuada.

Un sistema microprocesador es un sistema completo con funciones de proceso, memoria y dispositivos de entrada y de salida. Un microcomputador es un sistema microprocesador completo.

El sistema computador básico está formado por cuatro partes principales.

- a).- Unidad de Procesamiento Central, CPU
- b).- Memoria
- c).- Dispositivos de entrada
- d).- Dispositivos de salida

La unidad central de procesos es la parte principal del microcomputador e incluye dos módulos, la unidad de control (CU) y la unidad aritmética y lógica (ALU). La unidad de control busca, decodifica y ejecuta y ejecuta en forma secuencial las instrucciones almacenadas en la memoria; conoce cuando se termina la ejecución de una instrucción e indica cuál es la siguiente a ejecutar.

La ALU puede recibir datos y efectuar con ellos operaciones aritméticas, lógicas, de comparación y corrimiento, entre otras.

Generalmente la CU está asociada físicamente a la ALU que controla, formando como se mencionó anteriormente, la CPU, y un microprocesador es básicamente una CPU en una sola pastilla de circuito.

La memoria contiene las instrucciones y los datos que se van a procesar en la CPU, es decir, que está destinada al almacenamiento de información. Existen diferentes tipos de memoria según su empleo para escribir y leer información (RAM) o solo para leerla (ROM).

Los dispositivos de entrada se usan para alimentar los datos necesarios para los cálculos. Las unidades de entrada más comunes son: teclado, o un sensor de alguna variable.

Los resultados de las operaciones de la computadora se proporcionan al usuario por medio de las unidades de salida; como son: diodos emisores de luz (LED), o visualizadores de cristal líquido, impresoras, diferentes mecanismos de control.

CIRCUITOS DE ENTRADA.

Dentro de los circuitos de entrada se deben considerar el convertidor analógico-digital y el convertidor corriente tensión. Se hace necesario el convertidor A/D ya que la señal que se recibe de campo es analógica y la que debe recibir el microprocesador es digital. Como se explicó anteriormente un convertidor analógico-digital acepta a su entrada una cantidad analógica y produce a su salida un código binario proporcional a la entrada. Esta conversión se puede llevar a cabo por diferentes técnicas como son:

Por conversión de tensión a frecuencia.

En la figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques de una de las técnicas de conversión analógica-digital. Consiste de un convertidor de tensión a frecuencia y de un contador digital binario.

La señal analógica la tensión se presenta a la entrada de la circuitería de conversión tensión-frecuencia, este circuito produce una señal de onda cuadrada, la frecuencia de dicha señal es proporcional a la magnitud de la tensión de entrada. En realidad, es un convertidor A/D; sin embargo, normalmente se asocia con un contador binario.



Figura 2.9. Diagrama de bloques de un convertidor A/D.

El contador binario recibe una señal de inicio, proveniente de la computadora, para comenzar el conteo de los pulsos que genera el con

vertidor tensión frecuencia, este conteo se hace durante un intervalo de tiempo predeterminado, al finalizar dicho periodo el conteo se detiene. El tren de pulsos en serie modulado en frecuencia se convierte, dentro del contador, en una palabra digital en paralelo, la dimensión de dicha palabra es directamente proporcional a la frecuencia del tren de pulsos que se proporciona a la entrada del contador digital; por lo que es también proporcional a la tensión que se encuentra a la entrada del convertidor tensión-frecuencia. De este modo se realiza la conversión analógica-digital. Esta técnica no es muy empleada debido a algunas desventajas serias en el sistema como son la velocidad y la precisión de conversión. Su aplicación principal es en medidores digitales.

TECNICA DE CODIFICADOR DE RAMPA LINEAL.

La técnica del codificador de rampa lineal tiene un uso extenso además de que es capaz de realizar la conversión analógica-digital en forma precisa y relativamente asequible. La parte principal de este tipo de convertidor, es un circuito que genera una salida de tensión incremental lineal (rampa). La salida de este circuito es tan crítica que cualquier no linealidad presente en su salida limita la linealidad del convertidor analógico-digital. Cualquier imprecisión debido al mismo amplificador operacional, (compensación, desviación, respuesta de frecuencia, etc), también afecta la precisión de este tipo de convertidor analógico-digital; sin embargo, este tipo de convertidor se utiliza frecuentemente donde la velocidad de conversión no es de primera importancia.

La tensión de salida de este generador de rampa lineal (ver figura ---

2.10) se proporciona a la entrada de un comparador de tensión, en la otra entrada del comparador se encuentra la señal analógica, cuyo valor es el que se va a convertir a la forma digital. La salida del comparador es esencialmente una señal digital ya que cuando las dos tensiones (de entrada) son iguales, la salida del comparador -- se interrumpe rápidamente.

Cuando el convertidor A/D recibe una orden de conversión, la señal analógica desconocida debe estar presente a la entrada del comparador. El generador rampa recibe la orden de inicio y la salida del reloj digital es introducida simultáneamente al contador binario. Como el generador rampa elabora su salida de tensión, el contador binario cuenta los pulsos del reloj digital. Ambos trabajan y continúan en operación hasta el instante en que la salida del comparador se interrumpe, señalando que la salida del generador es el mismo -- valor que el de la tensión analógica desconocida. Esta interrupción provoca que el contador binario detenga el conteo de los pulsos de reloj.

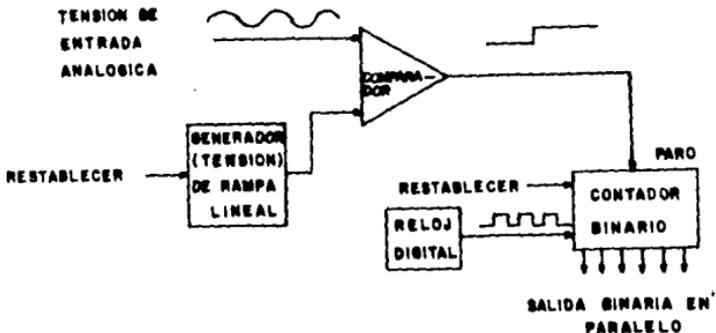


Figura 2.10. Convertidor A/D por generador de rampa lineal.

En este punto el contador tiene el tiempo que le tomó al generador de rampa alcanzar la tensión igual a la de la señal analógica desconocida, la salida del generador de rampa se calibra para que incremente a una razón específica. Por lo que, conociendo qué tiempo le llevó alcanzar el valor de la señal analógica, y aplicando el factor de escala, se puede calcular el valor de la señal analógica.

La resolución del convertidor A/D tipo rampa lineal es dependiente de la frecuencia del reloj digital y del número de "Bits" que el contador binario tenga.

TECNICA DE RAMPA DIGITAL.

La técnica de rampa digital es una variación de la técnica de rampa lineal. La diferencia principal es que el generador de rampa lineal es sustituido por un convertidor digital-analógico. El contador envía su salida a la entrada del convertidor D/A, y su salida analógica proporciona la entrada de referencia del comparador. Los dos sistemas trabajan en una forma semejante, excepto por la forma en que la tensión de referencia es generada.

Ambas técnicas son relativamente baratas para instrumentos, por lo que son utilizadas en convertidores D/A económicos.

TECNICAS DE INTEGRADOR DE DOBLE PENDIENTE.

En esta técnica tanto la tensión de referencia como la señal analógica desconocida son alimentadas secuencialmente al integrador. Estas dos señales deben ser de polaridad opuesta. Esta técnica requiere un comparador, un contador binario, y un reloj binario de la misma forma que el convertidor A/D de codificador de rampa lineal lo utili

za; sin embargo la forma de operar es diferente. En la figura 2.11 se muestra una diagrama bloques de las piezas funcionales de la circuitería empleada para instrumentar ésta técnica.

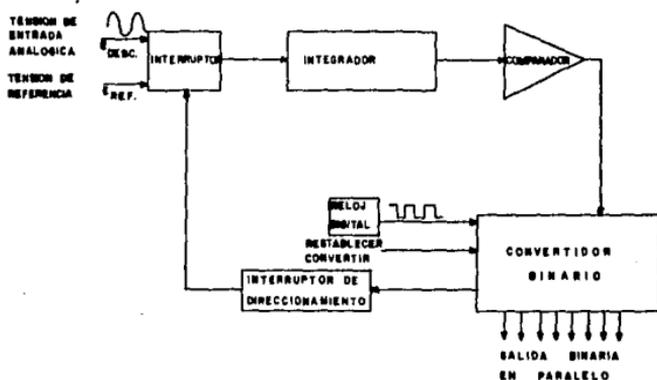


Figura 2.11. Convertidor A/D integrador de doble pendiente.

Cuando se recibe una orden de conversión, el contador restablece su conteo automáticamente a ceros y el interruptor de direccionamiento se encarga de que la tensión desconocida se aplique a la entrada del integrador. La salida del comparador está diseñada de tal forma que para este mismo tiempo habilite al contador para que inicie su conteo durante un período ya fijo de tiempo hasta que el contador llegue a todos los unos. Durante todo este período (desde que se dió la orden de conversión), la salida del integrador ha estado incrementando su valor uniformemente. Para la siguiente cuenta, después que el contador haya llegado a todos los unos, (es decir, la siguiente cuenta causará que el conteo se inicie y que la cuenta comience en ceros), el interruptor cambiará posiciones, desconectando la tensión desconocida de la entrada al integrador y simultáneamente conectando la tensión -

de referencia a dicha entrada. Por lo que ahora el integrador va a integrar la tensión de polaridad opuesta, lo que causa que su salida se decremente hacia cero voltios. Mientras tanto, el contador está contando a partir de cero otra vez.

Cuando la salida del integrador llega a cero, ocasiona que el comparador interrumpa su salida, deteniendo así al contador binario. En este tiempo el número binario en el contador es proporcional al tiempo que le toma al integrador alcanzar el cero a partir de su punto de inicio (el cual fué determinado por la integración de la tensión desconocida durante un período de tiempo específico). Por lo que, la cuenta binaria es proporcional a la tensión desconocida. En la figura 2.12 se ilustra la salida del integrador durante un ciclo de conversión. La diferencia en las pendientes de la curva es debido a la diferencia de los niveles de tensión entre $E_{desconocido}$ y $E_{referencia}$.



Figura 2.12. Explicación de la forma de onda del integrador de doble pendiente.

La ventaja de este tipo de convertidor sobre el de rampa lineal es que la precisión de conversión no depende de las tolerancias (y linealidad) de las componentes del integrador, debido a que afectan la salida del integrador cuando integra la tensión desconocida (en una dirección) y la tensión de referencia (en la otra dirección); por lo tanto, estas imprecisiones cancelan sus efectos.

TECNICA DE APROXIMACIONES SUCESIVAS

Alguna versión de la técnica de generador de rampa es probablemente la técnica más popular, para la aplicación en medidores digitales, pero donde la velocidad de conversión es un requisito se utiliza la técnica de aproximación sucesiva.

La figura 2.13 ilustra un diagrama de bloques del convertidor A/D de aproximación sucesiva de corrimiento programado. En esta técnica, un convertidor D/A asociado con la señal de la referencia produce -- potenciales que representan el estado de decisión de los "flip-flops", cada "flip-flop" representa un "Bit" en la palabra codificada. Un comparador realiza su función haciendo la comparación entre la salida del convertidor D/A y la señal de entrada desconocida y produce una - decisión de comparación la cual determina que "flip-flop" debe permanecer puesto y cual debe ser reestablecido.

La operación es como sigue: al recibir un pulso de disparo, el registro de corrimiento es reestablecido para codificar 10...0, y al mismo tiempo, el bloque de "flip-flops" son puestos para codificar 10...0. De esta forma, el código en el "flip-flop" representa una mitad de la escala completa y la señal emitida del convertidor D/A también representa una mitad de la escala completa. Si la tensión desconocida es ma

por que una mitad de la escala completa, el comparador señala a los puertos de decisión y control mantener al primer "flip-flop" más significativo puesto. Si la tensión es menor que la mitad de la escala completa, el comparador señala una decisión para reestablecer al "flip-flop" más significativo. Subsecuentemente a la decisión, un reloj de pulsos conectado al registro de corrimiento, hace avanzar el bit en el registro de corrimiento un bit a la derecha, y al mismo tiempo, el siguiente "flip-flop" más significativo se pone. La salida del convertidor D/A ahora representa o tres-cuartos de la escala completa o un cuarto de la escala completa, dependiendo si el "Bit" más significativo se había almacenado como "puesto" o "reestablecido". El proceso continúa conforme van reglizando las decisiones sucesivas, refinando las fracciones hasta alcanzar la resolución deseada.

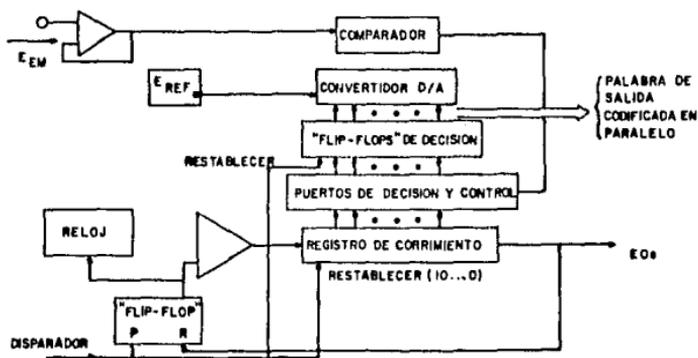


Figura 2.13. Convertidor A/D por aproximaciones sucesivas.

CIRCUITOS DE SALIDA.

En los circuitos de salida se tienen el convertidor digital-analógico (D/A) y el convertidor de tensión-corriente. Es necesario el convertidor D/A ya que la señal que proporciona el microprocesador es una señal digital y, para operar las válvulas se requiere una señal analógica normalizada de 4 a 20 mA este convertidor nos va a traducir la señal del microprocesador de 8 "Bits" (digital) a -- señal analógica en tensión, la cual se debe convertir en corriente, utilizando un convertidor tensión a corriente se puede obtener la - señal en las condiciones deseadas.

Como se mencionó anteriormente el propósito del convertidor D/A es transformar la información contenida en alguna palabra digital binaria a una tensión única. Esta conversión se puede llevar a cabo por diferentes técnicas, como son:

POR SELECCION EN PARALELO

Quizá una de las técnicas de conversión digital-analógica más sencilla, es la de selección en paralelo. En este tipo de convertidor la tensión de referencia es dividida en un número de partes iguales de tal manera que cada una de las tensiones de salida están disponibles en un punto de distribución. El código paralelo (palabra binaria) se aplica a una red de decodificación cuyo control de salida selecciona una de las tensiones disponibles, a través de un árbol multiplexor - de conmutación, transfiriendola a la salida. Este tipo de convertidor se presenta en la figura 2.14.

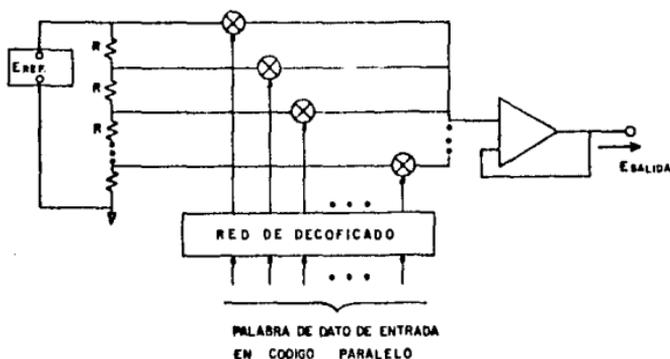


Figura 2.14. Convertidor D/A por selección en paralelo.

POR CICLO EN SERIE

En esta arquitectura, una tensión de salida que representa un código de entrada es generada por una secuencia de fracciones (pasos). En la figura 2.16, una tensión de referencia es conmutada condicionalmente bajo control de un "Bit" disponible en serie, primero el "Bit" menos significativo, y se aplica a una red de adición cuya ganancia de transferencia es 0.5. Suponiendo que las cargas de los dos capacitores, que se muestran en la figura 2.16, están inicialmente en el nivel cero, el potencial transferido a uno de los dos capacitores durante el primer "Bit" menos significativo será cero si el "Bit" es un cero y será E_{ref} si el "Bit" es un uno. Con la aplicación del siguiente "Bit" el potencial reunido es conmutado -

a la entrada de la red de adición, y E_{ref} es conmutado condicionalmente como anteriormente. La conversión continúa hasta que todos los "Bit" son procesados. Se verá que el peso de cada "Bit" es dividido entre dos para cada paso de la secuencia y que la tensión de salida al final de la secuencia será proporcional a la tensión de referencia y al código numérico. Siendo de naturaleza secuencial, este tipo de convertidor es más lento que los tipos de conmutación en paralelo, pero tiene la ventaja de que no requiere muchos resistores de precisión. Como desventaja adicional de este tipo de convertidor D/A es que la tensión de salida no puede permanecer constantemente en una condición de estado estable debido a - que depende de la capacidad de almacenamiento de carga de los capacitores y circuitería asociada.

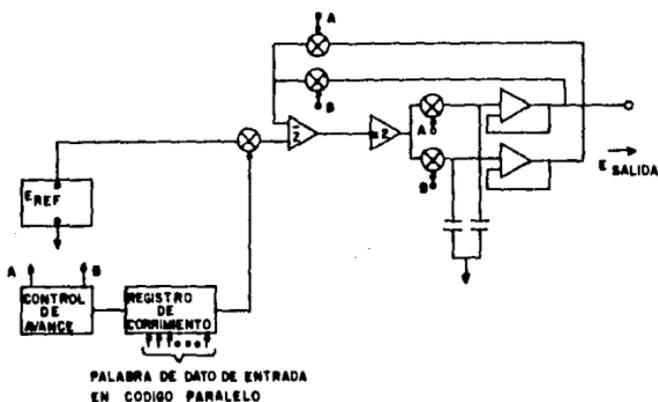


Figura 2.16. Convertidor D/A por ciclo en serie.

Por conmutación de fuente de tensión de "Bit" en paralelo.

En esta arquitectura, las entradas a una red de adición de resistores son conmutadas entre uno de los niveles de tensión de referencia bajo el control de los "Bit" del código asociado. En este tipo de convertidor D/A, la carga en la referencia no es constante y depende de la combinación del código, la ventaja del convertidor--D/A por conmutación de tensión es que, con la circuitería apropiada, los niveles de referencia pueden ser positivos o negativos o, señales de CA de variación dinámica. De este modo éste tipo de convertidor D/A es útil en múltiples aplicaciones. La salida de una red ponderante de resistores tal como una red R-2R se puede utilizar directamente, o la suma de las corrientes de salida que fluyen en la red se puede aplicar a un circuito de salida como se muestra en la figura 2.17.

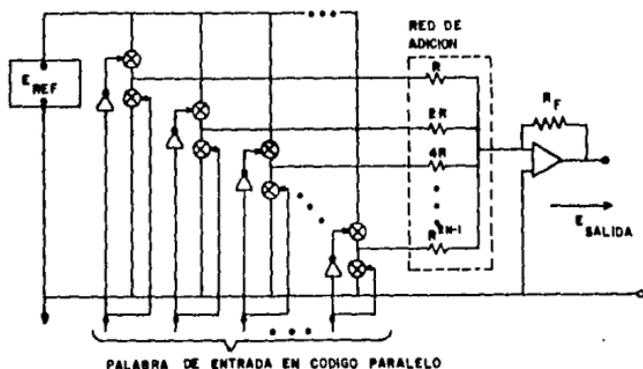


Figura 2.17. Convertidor D/A por fuente de tensión de "Bit" en paralelo.

Por conmutación de circuito mixto de "Bit" en paralelo.

Esta arquitectura D/A como se muestra en la figura 2.18 tiene la ventaja de presentar una carga constante a la referencia y de operar a partir de referencias bipolares. En esta configuración, la corriente establecida en los resistores de ponderación son conmutados a una de dos salidas, ya sea al punto nulo de un amplificador operacional inversor o a una salida alterna como tierra. Note que en esta configuración el potencial a través de todos los interruptores es siempre muy cercano a cero.

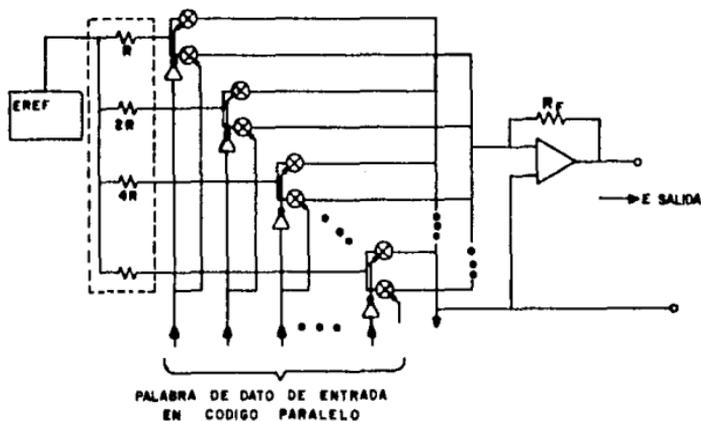


Figura 2.18. Convertidor D/A por conmutación de circuito mixto de "Bit" en paralelo.

II.5. SENSORES Y ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

SENSORES.- Como se mencionó ya en párrafos anteriores un sensor es un dispositivo que mide las condiciones de una variable. Para el desarrollo de este trabajo se requiere medir la temperatura, el flujo y la viscosidad del combustible, por lo que solamente se estudiarán los sensores de estas variables.

SENSORES DE TEMPERATURA.- Dentro de los sensores de temperatura los más comunes son: el termopar, el detector de temperatura por resistencia (RTD), el termistor y el sensor de circuito integrado.

EL TERMOPAR .- El termopar trabaja con el principio que descubrió SEEBECK en 1821 quién observó que cuando dos alambres compuestos de metales diferentes se unen por ambos extremos, y uno de los extremos es calentado, existe una corriente continua que fluye en el circuito termoelectrónico.

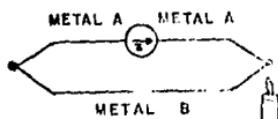


figura 2.19. El efecto SEEBECK.

Si este circuito se abre por el centro, la tensión neta en circuito abierto es función de la temperatura de la unión y de la composición de los dos metales.

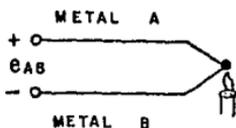


Figura 2.20. La tensión SEEBECK.

Para pequeños cambios en temperatura la tensión de SEEBECK es lineal mente proporcional a la temperatura,

$$e_{AB} = \alpha T$$

De donde α es el coeficiente SEEBECK, es la constante de proporcionalidad que depende del material de los metales. Pero al emplear un factor de escala constante, limitaría el rango de temperatura del sistema y se restringiría la exactitud del sistema. Se puede obtener una exactitud mejor tomando lecturas con un voltímetro y consultando tablas de normas de termopares. Otro método es aproximar los valores de las tablas con un polinomio de series de potencias.

$$T = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n$$

De donde:

T = Temperatura

x = Tensión del termopar

a = Coeficientes polinomiales únicos para cada termopar.

n = Orden máximo del polinomio.

Conforme n se incrementa, la exactitud del polinomio mejora.

El RTD.

En el mismo año que SEEBECK realizó su descubrimiento acerca de la

termoelectricidad, Humphrey Davy anunció que la resistividad de los metales depende de su temperatura. Cincuenta años más tarde - William Siemens utilizó el platino como el elemento en un termómetro de resistencia, de todos los materiales empleados en la fabricación de elementos termoresistivos, el platino tiene las características óptimas para servicio dentro de un rango amplio de temperatura.

El RTD es un dispositivo más lineal que el termopar, pero que de todas formas requiere ajuste de curva.

Se utiliza la ecuación de Callendar-Van Dusen como la relación entre la temperatura y la resistencia.

$$R_t = R_0 + R_0 \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \frac{T^3}{100} \right]$$

Donde:

R_t = Resistencia a la temperatura T

R_0 = Resistencia a $T=0^\circ\text{C}$.

α = Coeficiente de temperatura @ $T=0^\circ\text{C}$.
(Comúnmente $0.00392 \Omega / \Omega / ^\circ\text{C}$)

δ = 1.49 (valor típico para 0.00392 del platino)

β = 0, $T > 0$.
0.11 (Típico) $T < 0$.

EL TERMISTOR.- El termistor es también un resistor sensible a la temperatura. Normalmente está compuesto de material semiconductor.

El termistor es un dispositivo extremadamente no lineal. Y los fabricantes no han estandarizado las curvas del termistor como están estandarizadas las del RTD y del termopar.

La aproximación de la curva para un termistor dado puede darse por la ecuación de Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3$$

Donde:

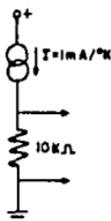
T = Temperatura (*K).

R = Resistencia del termistor,

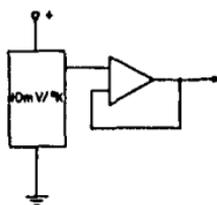
A,B,C = Constantes de ajuste de curva,

EL SENSOR DE TEMPERATURA LINEAL MONOLITICO.- Como inovación reciente en termometría se tiene al transductor de temperatura de circuito integrado. Se encuentran disponibles en las configuraciones con tensión o corriente como salida. Ambas son linealmente proporcionales a la temperatura absoluta. Los valores típicos son $1 \mu A/^{\circ}K$ y $10 \text{ mV}/^{\circ}K$.

Son dispositivos semiconductores por lo que tienen un intervalo de temperatura limitado.



SENSOR DE CORRIENTE



SENSOR DE TENSION

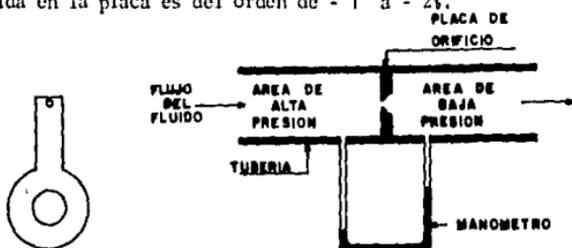
Figura 2.21 Configuraciones del transductor de Temperatura de C.I.

SENSORES DE FLUJO.- Los medidores de flujo pueden subdividirse en dos grupos: a).- aquéllos en que los medidores determinan el flujo directamente (desplazamiento), y b).- aquéllos que lo determinan -

indirectamente por deducción (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida).

Los instrumentos de presión diferencial son elementos de diferentes tipos de restricción al paso del fluido. Dichas restricciones provocan una caída de presión, la cual es detectada por un segundo elemento. Los elementos de presión diferencial son los siguientes:

LA PLACA DE ORIFICIO O DIAFRAGMA .- Consiste en una placa perforada instalada en la tubería. Este elemento es el de mayor uso debido a su bajo costo y facilidad de instalación y de mantenimiento. La precisión obtenida en la placa es del orden de ± 1 a $\pm 2\%$.



PLACA DE ORIFICIO

Figura 2.22.- Placa de orificio ó diafragma.

LA TOBERA.- Permite caudales 60% superiores a los de la placa de orificio en las mismas condiciones de servicio. Puede emplearse para fluidos que arrastren sólidos en pequeña cantidad. El costo de la tobera es de 8 a 16 veces el de una placa de orificio y su precisión es del orden de ± 0.95 a $\pm 1.5\%$.

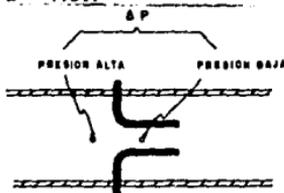


Figura 2.23.- Tobera.

EL TUBO DE VENIURI, En la figura 2.24 se muestra el diagrama de un tubo venturi. Permite la medición de caudales 60% superiores a los de placa de orificio en las mismas condiciones de servicio; posee una gran precisión y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos. El costo del tubo venturi es elevado del orden de 20 veces el de una placa de orificio y su precisión del orden de 0.75%.

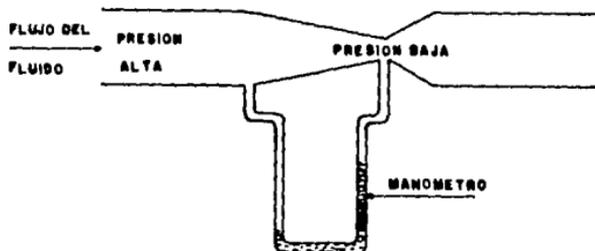


Figura 2.24.- Tubo venturi.

LOS ROTAMETROS son medidores de flujo de área variable en los cuales un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. Las fuerzas que actúan sobre el flotador están representadas en la figura 2.25, este medidor se debe colocar en posición vertical, y conforme el flujo entra por el fondo empuja al flotador hacia arriba hasta abrir a un área suficiente para que el líquido fluya a través de dicha área. Por lo tanto, la altura del flotador es una indicación de la cantidad del flujo.

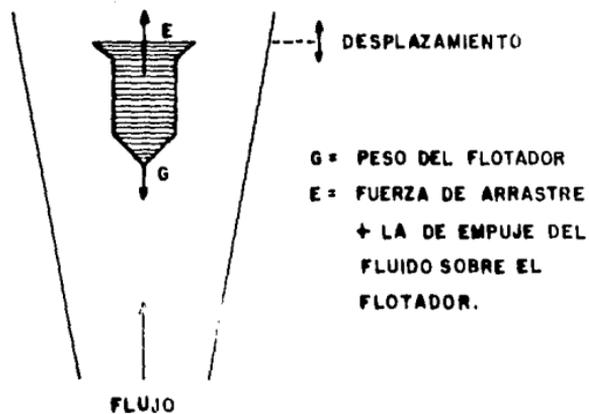


Figura 2.25.- Medidor de flujo de área variable.

Dentro de los instrumentos de velocidad se encuentran el vertedero y la turbina. Los vertederos se utilizan de formas variadas que provocan una diferencia de alturas del líquido en el canal entre la zona anterior del vertedero y su punto más bajo. La diferencia de altura debe medirse en un punto aguas arriba lo suficientemente alejado como para no ser influido por la curva de bajada de la superficie del agua y es conveniente utilizar un pozo de protección para el flotador del instrumento de medida.

El flujo es proporcional a la diferencia de alturas según la fórmula general empírica:

$$Q = K L H^n$$

Donde:

Q = Flujo

K = Constante que depende del tipo de vertedero

L = Anchura de la garganta del vertedero

H = Diferencia máxima de alturas

n = Exponente que depende del tipo de vertedero o canal

LOS MEDIDORES DE TURBINA consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al flujo. La turbina está limitada por la viscosidad del fluido. La precisión es muy elevada, del orden de $\pm 0.3\%$.

El medidor de placa es un instrumento de transmisión de fuerza. Consiste de una placa instalada directamente en el centro de la tubería y sometida al empuje del fluido. La placa está conectada a un transmisor neumático o bien a un transductor eléctrico.

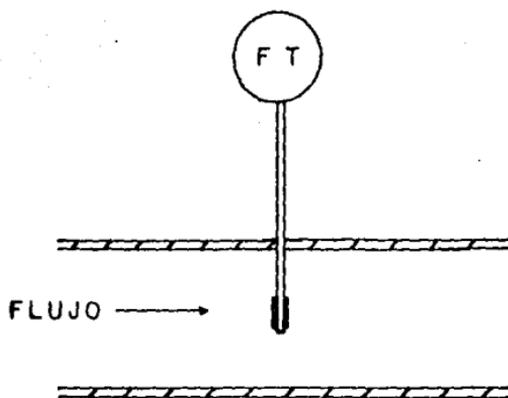


Figura 2.26.- Medidor de flujo de fuerza (Placa).

El instrumento de tensión inducida es un medidor magnético de flujo que está constituido por un ducto no magnético a través del cual pasa el fluido cuyo flujo se desea medir.

Por fuera del ducto se encuentran dos bobinas, opuestas una a la otra, por las cuales circula corriente eléctrica para crear un campo magnético de características bien definidas en el interior del ducto. El dispositivo cuenta con dos electrodos insertados en el ducto, diametralmente opuestos, y situados perpendicularmente respecto del campo creado por las bobinas. También se cuenta con un núcleo de hierro laminado que permite cerrar el circuito magnético por fuera del ducto. En la figura 2.27 se muestra el diagrama de -

tipo de medidor de flujo.

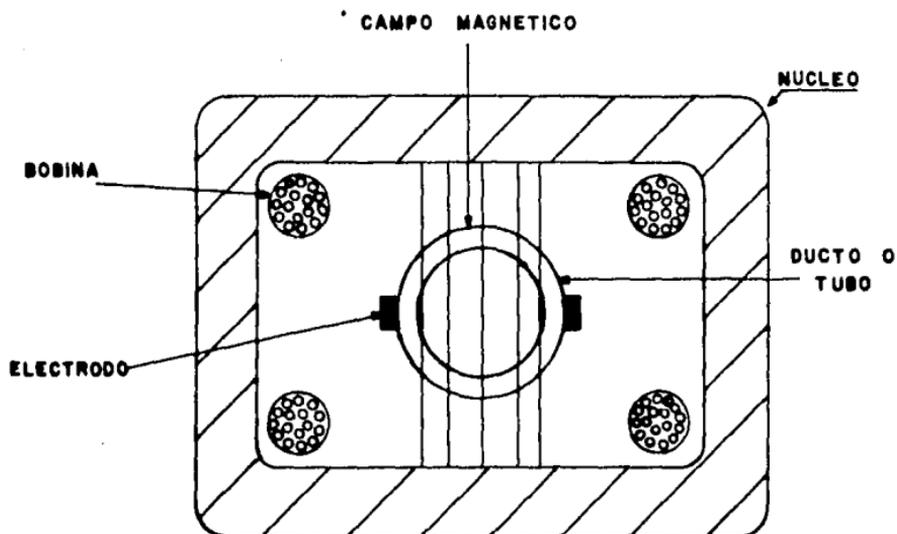


Figura 2.27.- Sección transversal del medidor de flujo magnético.

Los medidores magnéticos de flujo se apoyan en la ley de inducción de Faraday que establece lo siguiente: cuando un conductor se mueve a cierta velocidad a través de un campo magnético, se inducirá una tensión proporcional a la velocidad del conductor y a la magnitud del campo magnético.

En el medidor magnético el fluido actúa como conductor, por lo que se requiere que el fluido medido presente cierto valor de conductividad.

Los electrodos captan la fem inducida.

Los medidores de desplazamiento miden el flujo contando o integrando volúmenes separados de líquido, requiriendo una base de tiempo. Este tipo de medidores no ha sido muy empleado en procesos industriales como los medidores antes mencionados.

MEDIDORES DE VISCOSIDAD

Son pocos los tipos de viscosímetros más comunes en la industria de proceso, de la selección completa sólo se describen los siguientes que se basan en:

- 1).- Medir el tiempo que emplea un volumen dado del fluido para descargar a través de un orificio, un tipo similar emplea un tubo capilar en lugar del orificio.
- 2).- Por tiempo de caída de un pistón en un cilindro, es decir, el elemento de medición consiste de un pistón que es periódicamente elevado, en forma neumática o mecánica, para pasar una muestra de aceite dentro de un cilindro, entonces se deja caer el pistón dentro del cilindro, con la fuerza de su propio peso a

trayés del medio aceite-o. Se registra el tiempo de caída y se transmite como una señal de viscosidad,

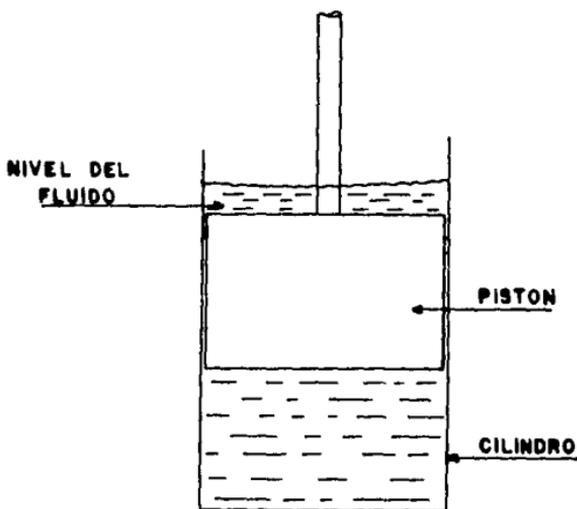


Figura 2.28.- Viscosímetro empleando el tiempo de caída de un pistón dentro de un cilindro.

- 3).- Par de torsión necesario para hacer girar un elemento en el fluido. El elemento de forma dada gira por medio de un resorte calibrado y este al mismo tiempo por medio de un motor síncrono. El ángulo de desviación en el movimiento entre el eje del motor y el elemento sumergido en el fluido es proporcional

a la viscosidad. Este ángulo se mide en desplazamiento de con
tactos o en variación de resistencia o capacidad (Figura 2.29).

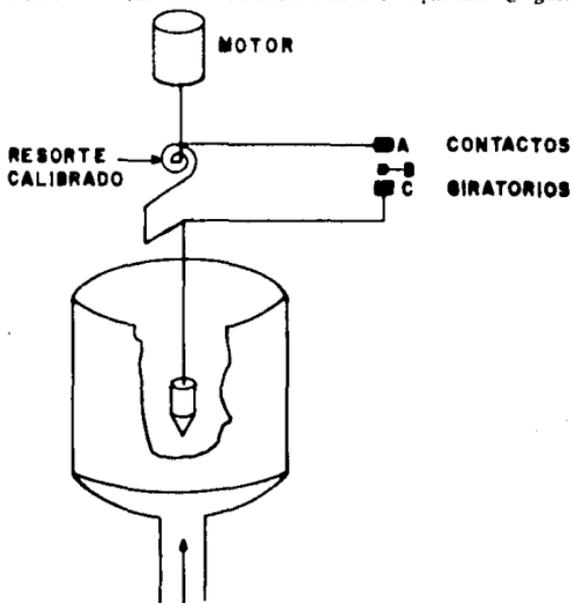


Figura 2.29.- Viscosidad que emplea el par de torsión.

- 4).- Rotámetro con flotador sensible a la viscosidad. Manteniendo un flujo constante del fluido, el flotador variará su posición dependiendo de la viscosidad del fluido (Figura 2.30).

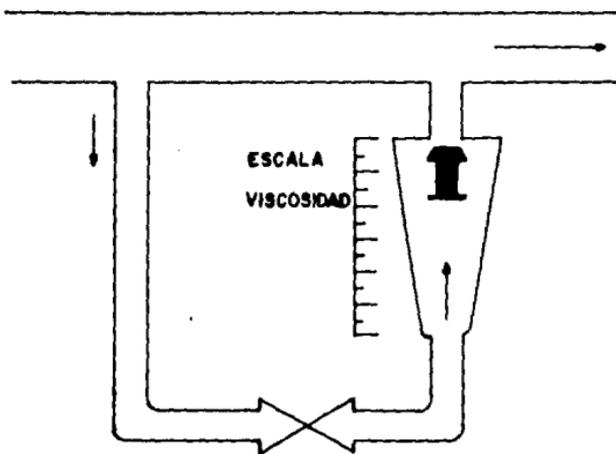


Figura 2.30.- Viscosímetro que emplea el rotámetro.

- 5).- Por caída de presión producida por un tubo capilar. El fluido a ser medido es bombeado a través de un tubo capilar a una --- razón de flujo constante. La presión diferencial es medida --- por un transmisor de presión.

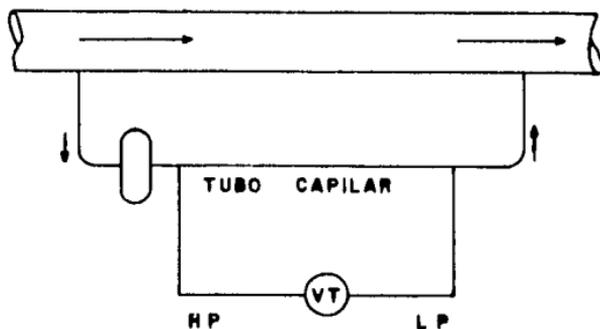


Figura 2.31.- Viscosímetro empleando la caída de presión de un tubo capilar.

ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

Los elementos finales de control son dispositivos que reciben los comandos del controlador para actuar sobre el proceso, entre estos dispositivos se encuentran las válvulas de control y elementos finales electrónicos.

VALVULAS DE CONTROL.- Estas como elementos finales de control son las más empleadas comúnmente. Su aplicación dentro de procesos industriales ha ido avanzando enormemente desde principios de 1930.

La válvula de control realiza la función de variar el flujo del fluido de control (variable manipulada) que a su vez modifica el valor de

la variable controlada. En la figura 2,32 se muestra el diagrama de una válvula de control típica. Se compone básicamente del cuerpo, actuador, y obturador.

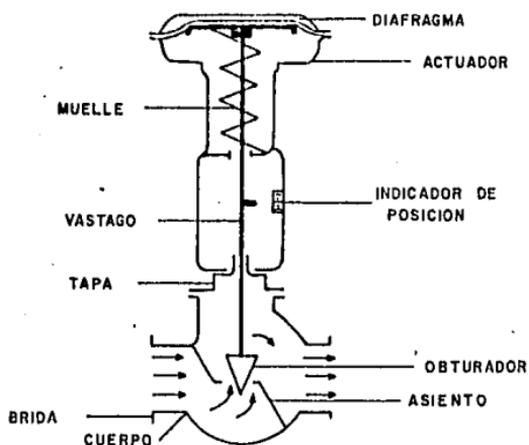


Figura 2.32.- Representación de una válvula de control.

El cuerpo de la válvula es la cavidad por la cual pasa el fluido del proceso cuya flujo se desea modificar, en general el cuerpo de la -

válvula se diseña de tal modo que tenga la capacidad adecuada para la cantidad máxima de flujo que se desea manejar, y puede ser de dos asientos, como en la mayoría de los casos, o de un asiento.

El actuador es la parte que opera la válvula, es decir, controla el flujo a través del cuerpo variando el área de paso para el flujo. Los actuadores generalmente son de diafragma, y como parte esencial tiene un muelle cuya función es proporcionar las características del movimiento del vástago de acuerdo con la presión aplicada al actuador.

Como se muestra en la figura 2.32, el vástago es una barra que une al actuador con el posicionador; este último es la parte que fija las características del flujo de la válvula, ya que al ser movido por el vástago altera el área de paso del fluido. La forma en que varía el área de paso con el movimiento del vástago (distancia entre el posicionador y el asiento) depende de la forma del posicionador, de tal modo que éste es el que fija las características de una válvula, por lo que los diferentes nombres de las válvulas corresponden a las formas del posicionador. La figura 2.33 muestra los diversos tipos de tapones más empleados.

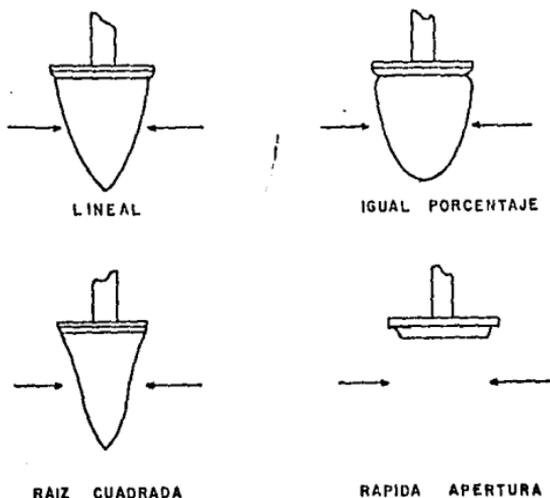


Figura 2.33.- Diversos tipos de obturadores.

Elementos finales electrónicos.- En algunos procesos industriales - tales como tratamientos térmicos, hornos, máquinas, de extrusión, - etc., se requiere una regulación precisa de la variable controlada, lo cual obliga a controlar la potencia entregada ya sea a motores o bien resistencias finales de calefacción.

Los primeros elementos que salieron al mercado y que permitieron el control continuo de la potencia (sin considerar el control de dos - posiciones) fueron el tiratrón y el ignitrón que eran un tubo de vacío de gas y uno de mercurio respectivamente; eran demasiado grandes y costosos. Después apareció el amplificador magnético de bajo costo, relativamente, que ha sido un equipo robusto que aportó la primera - solución práctica de aplicación industrial. Y el rectificador contro-

lado de silicio apareció hace pocos años, representó un revolución en el control de potencia por sus dimensiones reducidas y por trabajar con una capacidad alta de corriente. Características que entre otras hacen que sea el más utilizado actualmente.

Estos elementos se comportan en forma parecida a una válvula de control; varían la corriente en la línea de alimentación a la carga en la misma forma en que una válvula cambia el flujo del fluido en una tubería.

La función de un controlador automático es mantener una variable de proceso a un valor predeterminado, comparando el valor presente de la variable con el deseado, proporcionando una señal de salida - hacia el elemento final de control, como respuesta de la diferencia entre dichos valores, con el propósito de reducir al valor más pequeño posible dicha diferencia. La forma en que el controlador va a operar al actuador se le llama acción de control, y existen varios tipos de controladores automáticos según su acción de control, a continuación se enumeran.

- Acción de 2 posiciones
- ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL (P)
- ACCION DE CONTROL INTEGRAL
- Controlador de 2 modos

Acción proporcional + integral (PI)

Acción proporcional + derivativo (PD)

- Controlador de 3 modos

Acción proporcional + integral + derivativo (PID)

Todos los controladores además de presentar un tipo de acción específica (2 posiciones, P, I, PI, PD, PID), presentan a la vez otra característica, que depende de la relación entre la señal de la variable controlada y la señal, de la variable manipulada (salida del controlador), ésta acción puede ser directa cuando un aumento en la señal de la variable controlada produce un aumento en la señal de control; o inversa cuando una disminución en la señal de medición produce un aumento en la señal de control.

CONTROLADOR DE 2 POSICIONES

Este tipo de controlador se aplica en un proceso en el cual el elemento de acción final, toma una de dos posiciones posibles, la característica de operación del controlador se da en la figura 2.34, llamándole $u(t)$ a la señal de control (variable manipulada) y $e(t)$ a la señal de error.

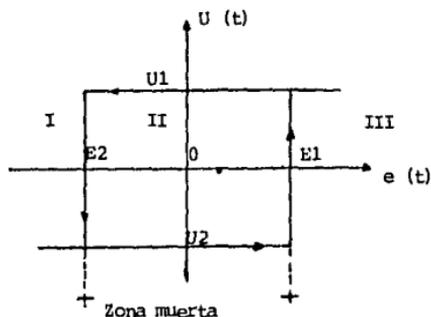


Figura 2.34.- Característica de un controlador de dos posiciones.

Como se observa en la figura 2.34, la señal de control sólo adopta 2 valores constantes U_1 ó U_2 , de acuerdo con lo siguiente:

$$u(t) = U_1 \quad \text{si} \quad e(t) > e_1 \quad ; \quad \text{región III}$$

$$u(t) = U_2 \quad \text{si} \quad e(t) < -e_2 \quad ; \quad \text{región I}$$

Se interpreta de la siguiente manera:

Si la señal $e(t)$ es mayor o igual que el valor e_1 , la señal -

de control asumirá el valor U_1 a través de toda la región II hasta que $e(t)$ sea igual a e_2 , donde tomará el valor U_2 , manteniéndose dicho valor en la región II hasta que $e(t)$ sea igual a e_1 , a partir de lo cual se iniciará el siguiente ciclo y si $e(t)$ es menor o igual a e_2 , la señal de control asumirá el valor U_2 hasta que $e(t)$ sea igual a e_1 , con lo cual tomará el valor U_1 y así repitiéndose la secuencia descrita. Esta operación cíclica es intrínseca de todos los controladores de dos posiciones.

A la distancia que existe entre e_1 y e_2 se le conoce como zona muerta o brecha diferencial, la cual se fija de acuerdo con las características del proceso. En algunos casos la zona muerta es un resultado de fricción no intencional y movimiento perdido, sin embargo, normalmente se le prevee deliberadamente para evitar la acción excesivamente frecuente del mecanismo de 2 posiciones. Este controlador tiene gran uso en procesos industriales y domésticos ya que es muy sencillo y económico.

Los controladores que a continuación se describen son los que se desarrollarán en el microprocesador.

CONTROLADOR PROPORCIONAL

En la acción de control proporcional (control + modulante), existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (variable manipulada), es decir:

$$u(t) = \pm K_c e(t) \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1), $u(t)$ es la salida del controlador, el término K_c recibe el nombre de sensibilidad proporcional o ganancia, siendo:

$$e(t) = r(t) - c(t)$$

$e(t)$ = señal de error

Donde:

$c(t)$ = valor de la variable controlada

$r(t)$ = señal de consigna

En la figura 2.35 se muestra la característica de la acción de control proporcional tomando como elemento de control final una válvula y como variable controlada la temperatura. Se puede notar que la posición de la válvula cambia en proporción exacta a la desviación de temperatura, en la figura también se muestra que la acción de control proporcional responde solamente a la cantidad de desviación,--- más no obedece a la velocidad de la desviación.

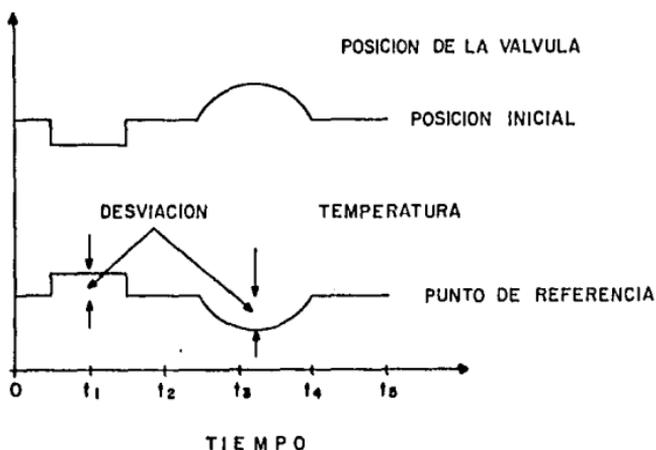


Figura 2.35.- Relación entre posición de la válvula y variable controlada bajo acción de control proporcional.

Por otro lado, si la acción del controlador es directa, un aumento en la señal de medición $c(t)$ debe producir un aumento en la señal de control $u(t)$, por lo tanto:

$$u(t) = K_c e(t)$$

Y si es de acción inversa, una disminución en la señal de medición debe producir un aumento en la señal de control por lo que:

$$u(t) = -K_c e(t)$$

Normalmente los controladores cuentan con una escala de banda proporcional para ajustar la ganancia permitida por el controlador. Cuando se habla de banda proporcional se refiere al cambio del valor de la variable controlada que es necesario para producir el desplazamiento completo del elemento final de control. En la figura 2.35 se muestra la relación entre la posición de la válvula y la temperatura para 2 diferentes bandas proporcionales; si la banda proporcional es alta, el controlador proporciona muy poca ganancia y viceversa. El valor de banda proporcional se expresa en porcentaje de variación de la señal controlada que origina que la salida del controlador cambie en su rango. Mientras que la ganancia es el recíproco del valor de la banda proporcional:

$$K_c = \frac{100}{B. P.}$$

La figura 2.36 ayuda a explicar el concepto de porcentaje de banda proporcional, como se puede ver las bandas proporcionales arriba del 100% no puede provocar el desplazamiento completo de la válvula aunque se produzca un cambio de rango completo en la variable controlada, pero si la banda proporcional es igual a 100%, una variación de

100% de la medición origina una variación de 100% en la salida,

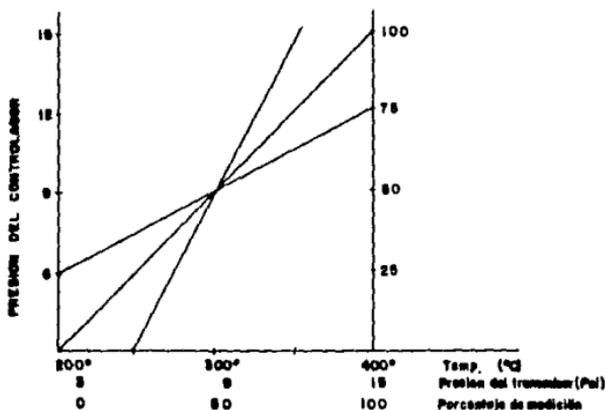


Figura 2.36.- Característica del controlador proporcional

Cualquier cambio en la carga de proceso requiere una nueva posición de válvula para corregirlo. Pero como se muestra en la figura 2.35, la acción de control proporcional requiere un cambio de desviación - para proporcionar la nueva posición de la válvula.

La figura 2.37 muestra la carga, temperatura y posición de la válvula para un proceso de intercambiador de calor, bajo acción de control proporcional inicialmente. El punto deseado está en valor de -- 100%, en el tiempo t, un cambio escalón ocurre en la carga, se puede ver que la temperatura no regresa al valor deseado de 100% por con-

trol proporcional, pero iguala a un nuevo valor de 90° .

La acción de control proporcional puede producir una corrección para solamente una condición de carga, para todas las otras cargas siempre existe alguna desviación en estado permanente (offset), - este error es una característica intrínseca de la acción de control proporcional. En la figura 2.37 se puede ver que la desviación en estado permanente de las unidades de tiempo de t_3 a t_8 fué 10° . La desviación de estado permanente se puede eliminar reestableciendo manualmente el punto de consigna. Volviendo a la figura 2.37 en el tiempo t_8 el punto de referencia fué incrementando manualmente para llevar la temperatura al valor deseado de 100° .

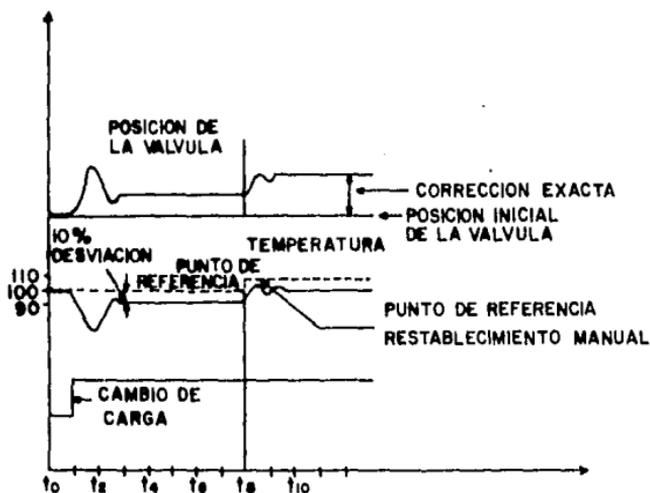


Figura 2.37.- Característica de la desviación de estado permanente de la acción de control proporcional.

Tal restablecimiento manual elimina la desviación en estado permanente solamente para un valor de carga. Lo importante de esta acción de control es que es estabilizante, con capacidad de aplicación y -ajuste amplios, con la característica indeseable del error en estado permanente.

CONTROLADOR INTEGRAL

Para eliminar el error del estado permanente, del que se hablaba en párrafos anteriores, suele utilizarse acción integral. En este tipo de acción la variación de la salida del controlador es proporcional a la integral del error, lo cual se puede representar matemáticamente como:

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt$$

En donde:

$u(t)$ = Salida del controlador

T_i = Constante de tiempo integral

$e(t)$ = Señal de error del sistema

La figura 2.38 , muestra la relación de temperatura-posición de la válvula, característica de acción de control integral, siguiendo un cambio de carga de forma escalón, se puede ver que cuando la desviación es máxima (tiempo 1/2 min.), la razón del desplazamiento de la válvula es también máximo. La característica importante de esta acción de control, es que según el tiempo que la desviación en estado permanente continúe la corrección de la posición de la válvula --- continúa. Normalmente este tipo de control es acompañado de acción --

proporcional.

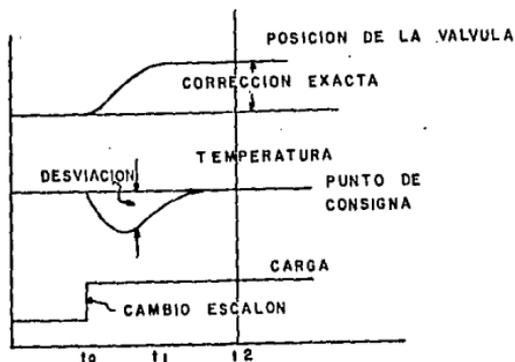


Figura 2.38.- Respuesta del proceso bajo control integral, al cambio escalón en la carga.

CONTROLADORES DE DOS MODOS

En este tipo de controladores se utilizan 2 modos de acción, una de ellas es proporcional a la magnitud del error y la otra es proporcional a la integral del mismo o a la derivada del error con respecto al tiempo del mismo.

CONTROLADOR PROPORCIONAL + INTEGRAL.

Como ya se mencionó, la única ventaja de la acción de control integral es la de continuar corrigiendo la posición del elemento final

de control hasta reducir la desviación en el estado permanente al mínimo valor, por lo que agregando la acción de control integral - a la acción de control proporcional, la característica de desviación en el estado permanente, indeseable de la acción de control proporcional, es reducida. La señal de salida de la combinación -- de acción proporcional + acción integral, viene dada como:

$$u(t) = \pm K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (2.2)$$

Donde:

$u(t)$ = salida del controlador

K_c = ganancia proporcional

T_i = constante de tiempo de acción integral

$e(t)$ = señal de error del sistema

De la ecuación (2.2) tanto K_c como T_i son regulables, el tiempo integral regula la acción de control integral, mientras que una modificación en K_c afecta tanto a la parte proporcional como a la integral de la acción de control.

En la figura 2.39 se muestra la componente del movimiento de la válvula debida a la acción de control PI. para un tiempo dado ocurre una desviación de función escalón. La componente del movimiento de la válvula debida a la acción (movimiento) proporcional ocurre inmediatamente como se ve en la figura 2.35, pero debido a la componente integral la válvula continúa el movimiento a una razón constante.

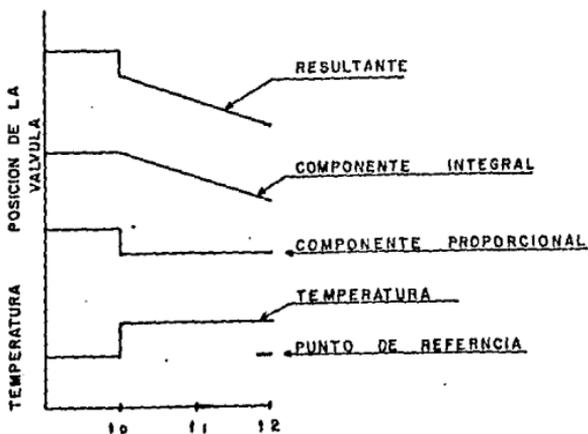


Figura 2.39.- Relación entre la posición de la válvula y la desviación bajo la acción proporcional y la acción integral.

El modo de control PI combina los efectos de las dos acciones, ya que la acción proporcional tiene por objeto dar estabilidad y evitar un sobre paso inicial, mientras que la acción integral tiene como fin, eliminar el error en el estado permanente. La necesidad de añadir acción integral depende de la naturaleza del proceso y de la exactitud de control deseada.

CONTROLADOR DE ACCIÓN PROPORCIONAL + DERIVATIVA

En un controlador con este modo de acción, existe una relación -- lineal continua entre la razón de cambio de la variable controlada y la posición del elemento final de control. El modo de acción proporcional + derivativa se representa matemáticamente como:

$$u(t) = \pm K_c (e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

Donde:
 $u(t)$ = salida del controlador
 K_c = ganancia proporcional
 T_d = constante de tiempo de acción derivativa
 $e(t)$ = señal de error del sistema

En la figura 2.40 se muestra la característica de la acción de control proporcional + derivativa, en este modo de acción el movimiento de la válvula es proporcional a la velocidad a la cual la temperatura está cambiando, entre más rápido sea el cambio de temperatura mayor es el movimiento de la válvula.

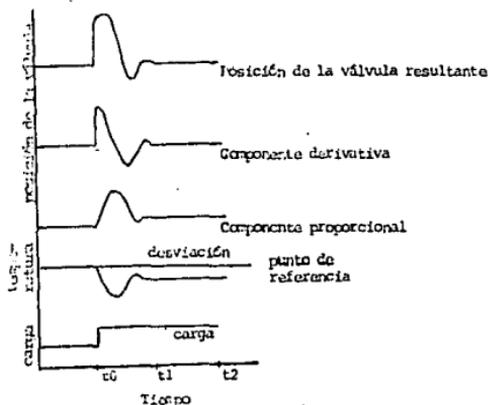


Figura 2.40.- Relación de la posición de la válvula a temperatura bajo acción de control proporcional + derivativa.

En la figura 2.10 se muestra que el tamaño de la corrección de la acción derivativa es proporcional a la razón de cambio (pendiente) de la curva de la variable controlada, como se puede ver la acción de control derivativo tiene carácter de anticipación; sin embargo, después de que la variable detiene su variación, la corrección de la válvula debido a la acción proporcional se detiene, por lo que la acción derivativa no tiene efecto directo sobre el error de desviación en tiempo permanente.

Mientras la acción derivativa tiene la ventaja de ser anticipatoria tiene la desventaja de que amplifica las señales de ruido. Además hay que hacer notar que nunca se puede tener acción de control derivativa sola, ya que este modo sólo es efectivo durante periodos transitorios.

CONTROLADORES DE 3 MODOS

CONTROLADORES DE ACCION PROPORCIONAL + INTEGRAL + DERIVATIVO.

Las acciones de control descritas anteriormente pueden ser combinadas en un instrumento de control para obtener todas sus ventajas.

Un controlador que combina las 3 acciones (PID) tiene como salida:

Donde: $U(t)$ = salida del controlador
 T_i = constante de tiempo integral
 T_d = constante de tiempo derivativo
 $e(t)$ = señal de error del sistema
 K_c = ganancia proporcional!

En la figura 2.41 se muestran por separado las componentes del movimiento de la válvula producido por cada acción después de un cambio escalón en la carga en el tiempo cero, y también se muestra -- la suma de las 3 acciones.

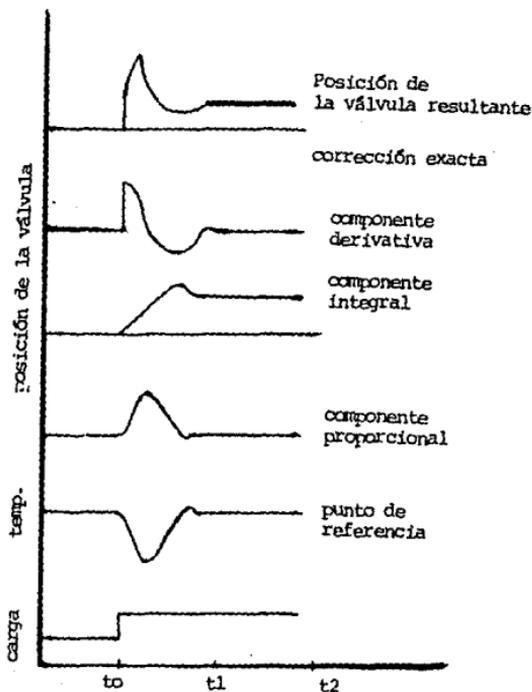


Figura 2.41.- Relación de posición de válvula a temperatura bajo la acción de control proporcional + integral + derivativa.

Un sistema discreto es un sistema en el cual una o más variables pueden variar solamente en ciertos instantes. Esos instantes se indican por kT ($k = 1, 2, 3, \dots$) donde el índice representa un instante específico de muestreo y T el intervalo entre los puntos de datos, es decir, que dichos instantes kT especifican el momento en el cual se realiza alguna medición física. El intervalo de tiempo debe tomarse entre dos instantes suficientemente pequeños, de tal forma que los datos que aparezcan entre esos instantes, se puedan aproximar por interpolación.

La diferencia que existe entre los sistemas de tiempo discreto y los de tiempo continuo, es que las señales para un sistema de tiempo discreto aparecen en forma de datos muestreados. Los sistemas de tiempo discreto se presentan normalmente cuando se obtienen las mediciones necesarias para el control en forma intermitente o cuando se comparte una computadora entre diversas plantas, de manera que se envía una señal de control a cada planta solo periódicamente, o cuando se emplea una cierta computadora para realizar las operaciones necesarias para el control. Actualmente existen muchos sistemas de control industrial que son sistemas discretos debido a que influyen algunos elementos cuyas entradas y/o salidas son discretas en el tiempo.

Al introducir un computador digital en un sistema, aunque sea analógico, produce señales en forma digital en parte del sistema, por lo que tal sistema toma la forma de una combinación analógico-digital. Dicha inclusión del computador digital en un sistema de control, exi

ge el uso de convertidores digital a analógico y analógico a digital. La conversión última (analógico-digital) es una cuantificación, debido a que la señal analógica puede tomar una cantidad infinita de valores, mientras que la señal digital es limitada.

En la figura 2.42 se muestra el proceso de cuantificar (convertir una señal analógica a la forma digital). El rango se divide en un número finito de intervalos h_i , que no necesariamente son iguales. Todos los valores que quedan dentro de cada intervalo son igualados a un único valor dentro de ese intervalo. Este valor es la aproximación digital a los distintos valores de la señal de entrada analógica. Si x es la entrada analógica, la salida digital está dada por $y = Q(x)$ donde Q es la función cuantificante.

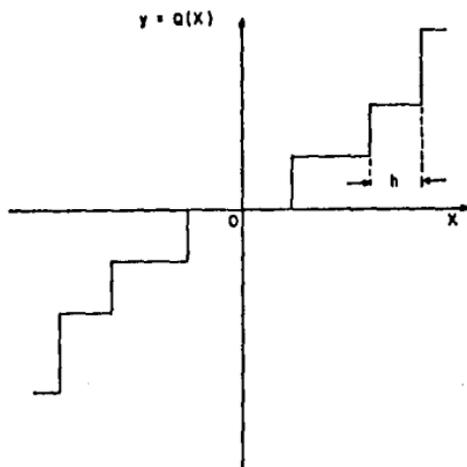


Figura 2.42.- Curva que indica la cuantificación.

TRANSFORMADA Z.

Al estudiar la transformada de Laplace, se puede apreciar la capacidad de tal transformada, para simplificar un modelo matemático. Además de reducir una ecuación diferencial a una ecuación algebraica, permitiendo así efectuar el manejo de las matemáticas en un dominio más sencillo. Para el tiempo discreto también existe una transformada del tipo de la de Laplace llamada la transformada Z. A continuación se establecen algunas de las relaciones importantes del dominio Z.

Un conjunto de datos de muestreo, $f(0), f(1), \dots$, consiste de pulsos separados Δt . Por lo que, $f(k)$ se encuentra en el punto $K \Delta t$ o se retrasa del origen del tiempo por una longitud de tiempo $K \Delta t$. De esta forma, el muestreo retrasado, en el dominio de Laplace, se expresa como $e^{-sk\Delta t} f(k)$. Denominando a $e^{s\Delta t}$ como Z.

$$z = e^{s\Delta t}$$

entonces $f(k)$ en el dominio z es $f(k) z^{-k}$. Aplicando esta notación a todos los muestreos de la serie en tiempo $f(0), f(1), f(2), \dots$, se obtiene la transformada z de la serie.

$$F(z) = Z[f(k)] = f(0) + f(1) z^{-1} + \dots + f(k) z^{-k} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} f(k) z^{-k}$$

Esta ecuación se asemeja a la transformada de Laplace de una señal continua $f(t)$, que a continuación se muestra:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

Con:

$$Z[f(k)] = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k \Delta t) e^{-sk \Delta t} = \sum_{k=0}^{\infty} f(k) z^{-k}$$

La transformada z de la función escalón unitario ($f(k) = 1$ para todo k) se puede obtener a partir de la ecuación como:

$$F(z) \text{ escalón unitario} = 1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots = \frac{1}{1-z^{-1}} = \frac{z}{z-1}$$

En el apéndice C se muestra una tabla de una lista de transformadas Z de funciones de tiempo comunes además de una tabla de propiedades útiles de la transformada Z .

CONTROL DIGITAL

Al empleo de una computadora digital para el control de procesos se conoce como control digital. Existen varios esquemas de control que involucran una computadora para realizar el control de un proceso, entre los que han sido más utilizados se pueden mencionar los siguientes:

- Control supervisor. En este esquema la computadora solo realiza una supervisión del proceso, fijando las referencias de los controladores de lazos individuales ya existentes.
- Control digital directo. Consiste en emplear una computadora digital en un lazo de control, tanto para fijar la referencia como para actuar como controlador.
- Control centralizado. Este tipo de control utiliza solo una computadora para manejar toda la información proveniente del proceso y, en base a ella y a criterios específicos a optimizar, genera las acciones de control requeridas.
- Control distribuido. En este esquema se utiliza una red de microcomputadoras, cada una de las cuales realiza el control, a nivel local,

de una parte del proceso. La información de cada unidad de control local puede ser centralizada en una computadora.

El propósito de este trabajo se desarrolla dentro del control digital directo, en el cual la microcomputadora calcula los valores de las variables manipuladas a partir de los valores de las referencias, variables controladas y otras mediciones del proceso. En la figura 2.43 se muestra el esquema del CDD.

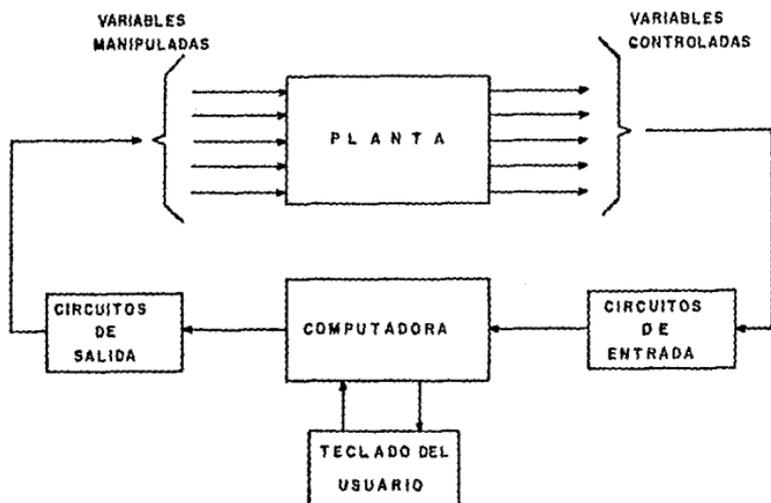


Figura 2.43.- Control digital directo.

III. DISEÑO Y COMPROBACION DEL ALGORITMO DE CONTROL EN UN PROTOTIPO.

III.1 INTRODUCCION

Después de conocer las características del controlador en los capítulos anteriores, en esta parte se procede, en primer lugar, a la deducción del algoritmo de control PID, para después obtener el diagrama de flujo y la programación. En siguiente término, se procede al diseño del controlador PID y su implementación física.

III.2 DEDUCCION DEL ALGORITMO DE CONTROL PID.

Las computadoras digitales tienen varios usos comunes en las situaciones de control real, como ya se mencionó anteriormente: control de supervisión, control digital directo. (CDD), donde la computadora digital está realmente en el lazo de control. En base a este último, se realiza este trabajo; control centralizado y control distribuido.

A pesar de que las leyes de control se implementan por programación en los sistemas de control digital directo y aunque las restricciones de "circuitería" de los controles tipo analógico no existen, las leyes de control lineal en la forma de acciones P, PI, PID también son básicamente en el CDD, la ley de control continua para PID, en la forma más general, Ec. (3.1), puede convertirse en el dominio discreto escribiéndolo primero en el dominio del tiempo.

$$U(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.1)$$

Donde:

$$e(t) = r(t) - c(t)$$

es la señal de error (entrada del controlador), $r(t)$ es la entrada de referencia (punto de referencia), $c(t)$ es el valor de la variable controlada y $u(t)$ es el valor de la variable manipulada (salida del controlador). En términos de los datos de muestreo para un intervalo de muestreo ΔT , éstas son:

$$e(k) = e(k\Delta T) \quad U(k) = U(k\Delta T) \quad r(k) = r(k\Delta T) \quad C(k) = C(k\Delta T)$$

donde k es un entero, $k=1, 2, 3, \dots$ la ec. (3.1) en el dominio discreto es:

$$U(k) = K_c \left\{ e_k + \frac{1}{T_i} \left[\frac{1}{2} (e_0 + e_1) + \dots + \frac{1}{2} (e_{k-1} + e_k) \right] \Delta T + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta T} \right\} \quad (3.2)$$

Donde la integración en el tiempo para la acción I se reemplazó por una suma trapezoidal y la diferenciación ideal en el tiempo para la acción D por una forma de diferencia de dos puntos. El algoritmo de CDD normalmente aceptado en la práctica, tiene la diferencia:

$$\Delta U_k = U_k - U_{k-1}$$

como salida del controlador (éste se denomina algoritmo de velocidad). La ecuación (3.2) en el algoritmo de velocidad se convierte en:

$$\Delta U_k = K_c \left\{ (e_k - e_{k-1}) + \frac{1}{T_i} \left(\frac{e_k + e_{k-1}}{2} \right) \Delta T + T_d \left(\frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{\Delta T} \right) \right\} \quad (3.3)$$

Sustituyendo

$$e_k = r_k - c_k$$

en la ec. (3.3) y considerando

$$r_k = r_{k-1} - r_{k-2}$$

se obtiene:

$$\Delta U_k = K_c \left\{ (C_{k-1} - C_k) + (r_k - \frac{C_{k-1} + C_k}{2}) \frac{\Delta T}{T_i} + T_d \left(\frac{2C_{k-1} - C_{k-2} - C_k}{\Delta T} \right) \right\} \quad (3.4)$$

Sustituyendo los parámetros de control (K_c , T_i , y T_d) por

$$K_p = K_c - \frac{1}{2} K_I ; K_I = \frac{K_c}{T_i} \Delta T ; K_d = \frac{K_c T_d}{\Delta T}$$

Se obtiene la siguiente forma:

$$\Delta U_k = K_p (C_{k-1} - C_k) + K_I (r_k - C_k) + K_d (2C_{k-1} - C_{k-2} - C_k)$$

En 1970 Takahashi, Chan y Auslander recomendaron un conjunto de reglas para el controlador PID discreto, con el fin de determinar valores aceptables para K_p , K_i y K_d , dichas reglas utilizan los dos métodos propuestos por Ziegler y Nichols para el controlador PID continuo (apéndice) método de la respuesta transitoria, método de la ganancia límite, en la tabla 3.1 se muestran las reglas antes mencionadas.

Para el método de la respuesta transitoria, los valores de K_p y K_i para el controlador PI, son sumamente elevados cuando $\frac{L}{\Delta T}$ tiende a cero, por lo que no se recomienda su uso.

Se muestra que el valor de K_i , [11], para el método de la ganancia límite, dado en la tabla 3.1 es bastante alto cuando $L = \frac{\Delta T}{4}$, por lo que, recomienda una reducción en K_i cuando tal condición se pre

	RESPUESTA TRANSITORIA			GANANCIA LIMITE		
	K_p	K_i	K_d	K_p	K_i	K_d
P	$\frac{1}{R(L\Delta T)}$			$\frac{K_v}{2}$		
P I	$\frac{0.9 - 1K}{R(L\frac{\Delta T}{2})^2}$ EXCEPTO SI $L/\Delta T \rightarrow 0$	$\frac{0.27 \Delta T}{R(L + \frac{\Delta T}{2})^2}$		$0.45K_v - \frac{1}{2}K_i$	$0.54 \frac{K_v \Delta T}{P_v}$	
P I D	$\frac{1.2 - 1K_i}{R(L + \Delta T) 2}$ EXCEPTO SI $L/\Delta T \rightarrow 0$	$\frac{0.6 \Delta T}{R(L + \frac{\Delta T}{2})}$	$\frac{0.6}{R\Delta T}$	$0.6K_v - \frac{1}{2}K_i$	$\frac{1.2K_v \Delta T}{P_v}$	$\frac{3 K_v P_v}{40 \Delta T}$

Tabla 3.1.- Reglas para el ajuste de controladores P, PI y PID -- discretos.

señala; en el caso en que $\frac{L}{\Delta T} \rightarrow 0$, el método de la ganancia límite proporciona mejores resultados que el de la respuesta transitoria. Mientras que en el rango $0.5 \leq \frac{L}{\Delta T}$, los dos métodos proporcionan resultado similares.

Para el controlador PID, en el caso del método de la respuesta transitoria, el valor de K_d que se recomienda utilizar es de $\frac{0.5}{R\Delta T}$, cuando el valor de $\frac{L}{\Delta T}$ esté cercano a un número entero. En el caso del método de ajuste de la ganancia límite, las reglas propuestas son aceptables para el rango $\frac{L}{\Delta T} \geq 0.5$ aún cuando las reglas proporcionan resultados más o menos aceptables en el límite $\frac{L}{\Delta T} \rightarrow 0$, no son nunca recomendables cuando $\frac{L}{\Delta T} \approx \frac{1}{4}$.

III.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL PID.

La programación consiste de un conjunto de instrucciones ordenadas adecuadamente para realizar una función específica, para su elaboración se requiere de realizar diagramas de flujo, es decir, bosquejos que muestran paso a paso la secuencia de operaciones a seguir para resolver un problema.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo del programa principal, que tiene como función el control PID el cual se va a llevar a cabo en el microcomputador "MKE Z-80", el cual se basa en el microprocesador Z-80. Este diagrama de flujo deberá tener en cuenta las siguientes consideraciones:

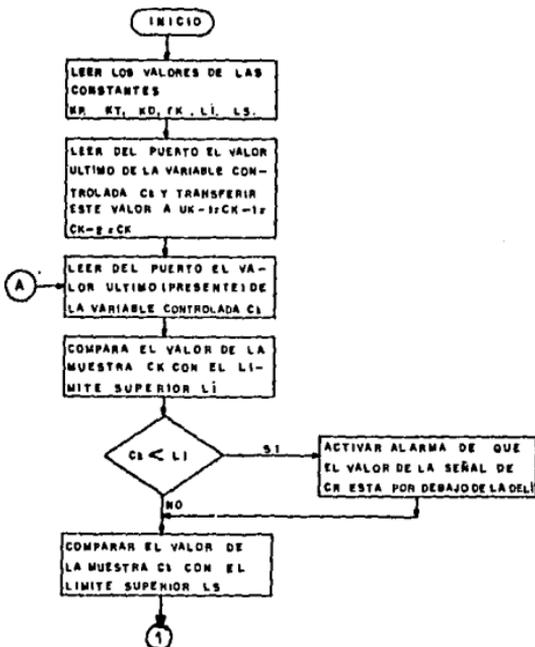


Figura 3.1 .- Diagrama de flujo del programa principal.

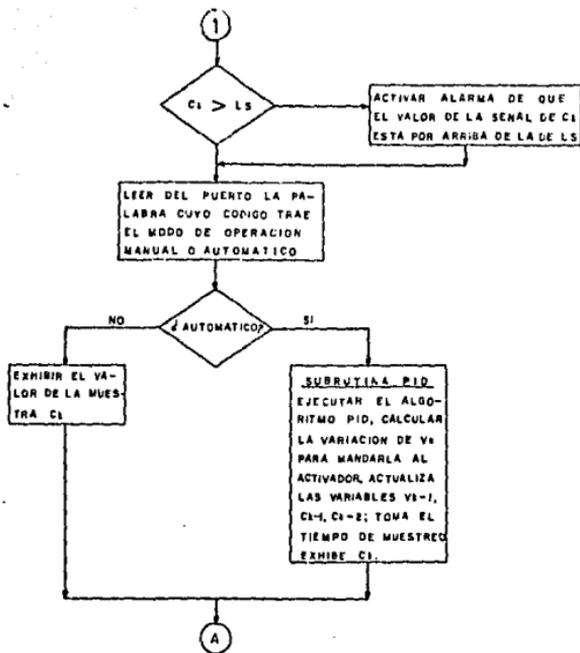


Figura 3.1.- Diagrama de flujo del programa principal. (continuación).

- 1.- Determinar el intervalo de operación del sistema, es decir, conocer el límite superior y el inferior de la variable controlada.
- 2.- Suministrar el valor del punto de referencia.
- 3.- Fijar el límite superior y el inferior de alarma, ya que si la variable controlada sobrepasa estos límites se encenderá un "LED" indicando qué límite ha sido pasado.

- 4.- Determinar los valores de los parámetros de control a emplear por el algoritmo.
- 5.- Suministrar el valor del tiempo de retardo que le tomará al controlador antes de leer cada muestra.

Habiendo ya proporcionado estos datos, se procede a correr el programa principal, empezando por tomar una lectura de la variable controlada C_k , para así determinar los valores de las variables a utilizar por el algoritmo de control, es decir, que al iniciar el programa las variables U_{k-1} , C_{k-2} y C_{k-1} tomen el valor de C_k , habiendo determinado el valor de estas, se toma otra lectura de C_k , ésta muestra se compara con el límite inferior L_i , y con el superior L_s , y si C_k se encuentra por debajo de L_i o por arriba de L_s , se encenderá el "LED" correspondiente, anunciando que C_k está fuera de rango; siguiendo con el programa, ahora se preguntará sobre la posición del modo de operación (automático o manual) si es automático, el programa llevará a cabo el cálculo del valor de la variable manipulada U_k , mediante el algoritmo de control PID, y dicho valor será enviado al convertidor D/A, después se procede a tomar otro valor de C_k , para volver a realizar la secuencia ya descrita a partir del punto A. En el caso de que el modo de operación sea manual el programa manda a una subrutina desplegado, el valor de C_k , la cual tiene la función de exhibir en indicadores de 7 segmentos el valor de C_k , después de haberlo exhibido durante el tiempo de muestreo, regresará a leer otro valor de C_k , repitiéndose nuevamente el ciclo ya descrito a partir del punto A.

En las siguientes secciones se explicará la función de cada subrutina del programa principal.

SUBROUTINA PID.

Como se menciona en un capítulo anterior el método a utilizar por el controlador es del tipo PID el cual se caracteriza por la siguiente expresión:

$$\Delta U_k = K_P (C_{k-1} - C_k) + K_I (r_k - C_k) + K_D (2C_{k-1} - C_{k-2} - C_k)$$

$$\Delta U_k = U_k - U_{k-1}$$

Donde:

U_k - es el valor último de la variable manipulada del proceso (salida del controlador).

U_{k-1} - Es el valor penúltimo de la variable manipulada del proceso.

C_k - Es el valor último de la variable controlada.

C_{k-1} - Es el valor penúltimo de la variable controlada.

C_{k-2} - Es el valor antepenúltimo de la variable controlada.

K_P - Constante proporcional

K_I - Constante integral.

K_D - Constante derivativa

En la figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo general del algoritmo de control PID de velocidad, el cual calculará el valor de la variable manipulada U_k , que es enviada al elemento final de con-

trol.

La subrutina PID lleva a cabo, el cálculo de la variable manipulada la transferencia de este valor al puerto de salida y por consiguiente al actuador; la actualización de las variables, que es necesaria para el cálculo del valor de U_k siguiente; también lleva a cabo el tiempo de retardo necesario para tomar la siguiente señal de muestra este tiempo es determinado por el tiempo de muestreo asignado por el usuario y por último exhibe en los indicadores de 7 segmentos -- el valor de la variable controlada.

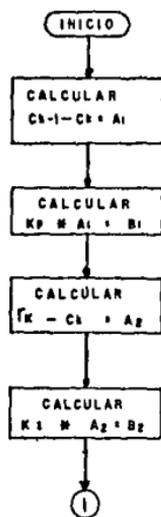


Figura 3.2.- Diagrama de flujo de la subrutina PID.

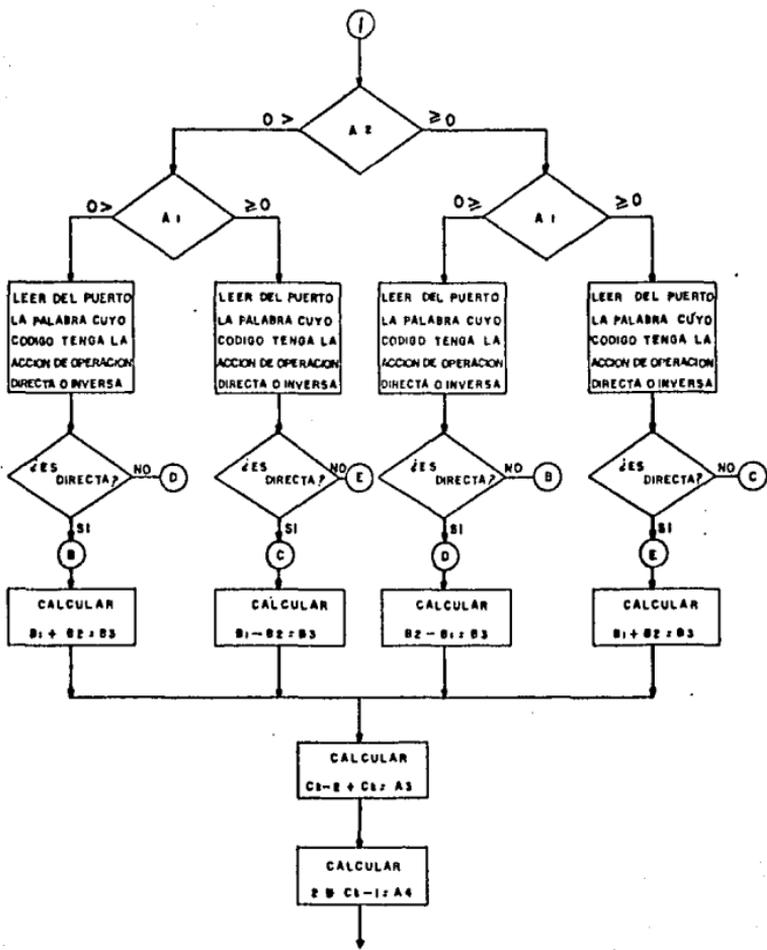


Figura 3.2.- Diagrama de flujo de la subrutina PID. (continuación).

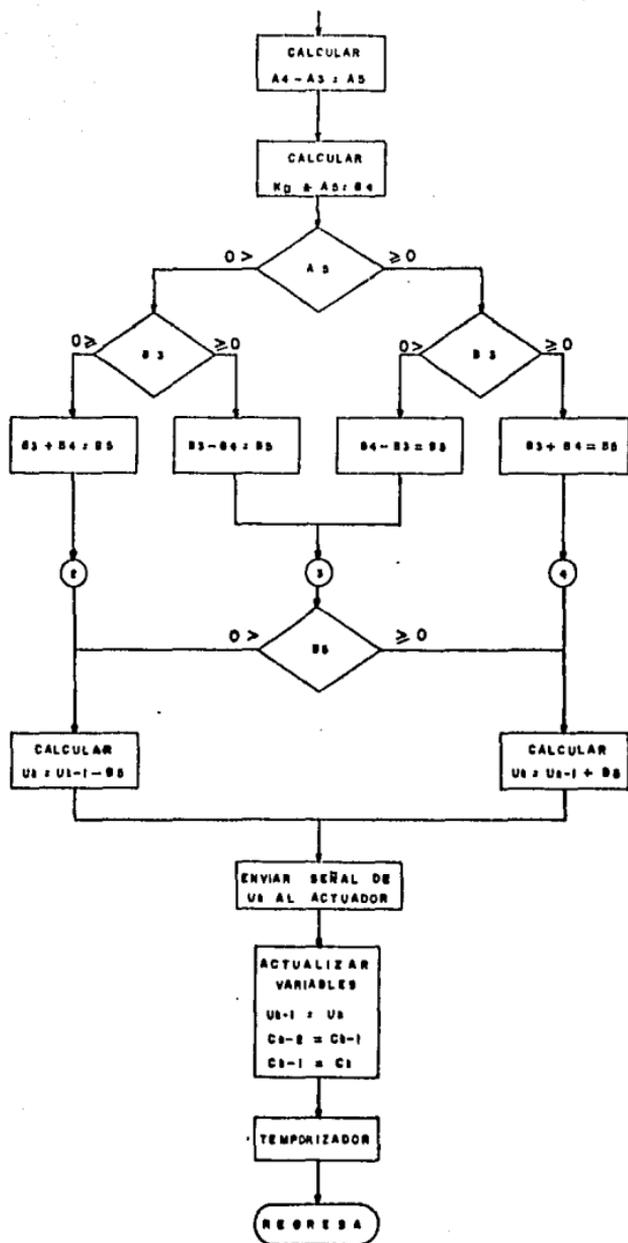


DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA P I D

III.4.

PROGRAMA DEL CONTROL PID PARA EL Z-80.

Cuando se elaboran los programas, frecuentemente se cometen errores, pero el equipo "MKE Z-80" presenta facilidades para localizar errores, examinando las localidades de memoria, o los registros, los puertos, etc., además que para obtener mayor facilidad, para la programación objetivo de este trabajo, se ha construido un circuito interfaz para almacenar los programas en cintas magnéticas de audio que se pueden emplear posteriormente.

El "MKE Z-80" tiene su memoria de acceso aleatorio desde la localidad 2000H a la 2BFFF donde se almacenan los programas del usuario. Lo cual es suficiente, aunque se necesita una gran cantidad de programas para realizar el controlador.

Es importante mencionar que para los fines de este trabajo (experimental). La manera de almacenar los programas en forma permanente, es mediante la cinta de audio ya que se pueden corregir o modificar y volverse a almacenar en la cinta.

Aunque también se puede disponer de la ventaja de almacenar el programa en memoria de solo lectura programable EPROM, teniéndose las localidades disponibles desde 1000H hasta la 1FFFFH.

Programa principal.

Antes de llevar a cabo la descripción de la codificación del programa principal es necesario mencionar que se emplearon bloques de la memoria de acceso aleatorio como archivo donde se almacenan todas las variables a utilizar, esas variables serán del tamaño de 1 ó 2

6 3 palabras (bytes) el valor de estas variables están en sistema hexadecimal. Para las variables de 2 y 3 palabras, las direcciones más bajas indican el valor menos significativo y las más altas el más significativo.

A continuación se especifica la tabla de las localidades donde se almacenan las variables a utilizar por el programa:

DIRECCION	PESO	VARIABLE	DESCRIPCION
2800	Entero mes.	Kp	Valor de la constante de proporcionalidad.
2801	Entero mas.	Kp	
2802	Entero mes.	KI	Valor de la constante de integración.
2803	Entero mas.	KI	
2804	Entero mes.	KD	Valor de la constante derivativa.
2805	Entero mas.	KD	
2806	Entero	r_k	Valor de la variable de referencia.
2807	Entero	Ck-1	Valor de la muestra penúltima a la actual.
2808	Entero	Ck	Valor de la muestra actual.
2809	Entero	A1	Resultado de la operación Ck-1 - Ck
280A	Entero	A2	Resultado de la operación $r_k - Ck$.
280B	Entero mes.	B1	Resultado del producto de
280C	Entero	B1	(Kp)(A1).
280D	Entero mas.	B1	
280E	Entero mes.	B2	Resultado del producto de
280F	Entero	B2	(KI)(A2).
2810	Entero mas.	B2	
2811	Entero	Ck-2	Valor de la muestra antepenúltima a la actual.
2812	Entero mes.	B3	Resultado de la suma algebraica de

2813	Entero	B3	$B1 + B2.$
2814	Entero mas.	B3	
2815	Entero mes.	A3	Resultado de la operación
2816	Entero mas.	A3	$Ck-2 + Ck.$
2817	Entero mes.	A4	Resultado de la operación
2818	Entero mas.	A4	$2(Ck-1).$
2819	Entero mes.	A5	Resultado de la operación
281A	Entero mas.	A5	$A4 - A3$
281B	Entero mes.	B4	Resultado del producto
281C	Entero	B4	$(KD)(A5).$
281D	Entero mas.	B4	
281E	Entero mes.	B5	Resultado de la suma
281F	Entero	B5	algebraica de
2820	Entero mas.	B5	$B3 + B4.$
2821	Entero mes.	Uk-1	Valor de la variable
2822	Entero	Uk-1	de control, anterior
2823	Entero mas.	Uk-1	a la actual.
2824	Entero mes.	Uk	Valor de la variable
2825	Entero	Uk	de control actual.
2826	Entero mas.	Uk	
2827	Entero	LI	Límite inferior de la variable
2828	Entero	LS	Límite superior de la variable
2829	Entero	MOP	Indica el modo de operación (manual o automático).
282A	Entero	SA1	Indica el signo que tiene A1.
282B	Entero	SA2	Indica el signo que tiene A2.
2838	Entero	DOI	Indica si el tipo de acción es directa o inversa.

2839	Entero	SB3	Indica el signo que tiene B3.
283A	Entero	SA5	Indica el signo que tiene A5.
283B	Entero	SB5	Indica el signo que tiene B5.
283E	Entero	SUk	Indica el signo que tiene Uk.
2848	Entero	UKS	Señal de control a enviar por un puerto de salida hacia el actuador.

A continuación se describe la codificación ensamblador del -- programa completo, el cual se encuentra a partir de la localidad 2000 H y termina en la 2447 H.

SUBROUTINA SUMA

Esta se encuentra a partir de la localidad 2000 H, y efectúa la suma de dos cantidades de 1 o más palabras cada una.

Uno de los sumandos se encuentra en la localidad apuntada por el par de registros HL, y el otro de los sumandos se encuentra en la localidad apuntada por el par IX, el resultado se almacena a partir de la dirección apuntada por IY.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2000	AF	SUMA	XOR A	Limpia el acumulador.
2001	7E	ADD B	LD A, (HL)	Carga el primer dato.
2002	DD 8E 00		ADC (IX)	Sumar con el segundo dato.
2005	FD 77 00		LD (IY), A	Salva el resultado.
2008	23		INC HL	Incrementar
2009	DD 23		INC IX	los
200B	FD 23		INC IY	registros.
200D	0D		DEC C	Decrementar contador.
200E	C2 01 20		JP NZ,ADD B	Continuar con la suma.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2011	C9		REST.	

SUBROUTINA RESTA

Esta subrutina realiza la resta de dos cantidades de una ó varias palabras. Si el minuendo es mayor que el sustraendo, se obtiene el complemento a dos del resultado, asignando el valor de FF H en el registro D, para indicar esta situación. Si fuese lo contrario (el minuendo mayor que el sustraendo) se almacena el valor de 00-H en el mismo registro. Fuera de esta subrutina, el valor contenido en el registro D se guarda en la localidad de memoria correspondiente a la bandera de interés. El minuendo se encuentra en la localidad apuntada por el par de registros HL, el sustraendo por IX y el resultado por IY. La subrutina se encuentra a partir de la localidad 2012 H.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2012	97	RESTA	SUB A	Limpiar el acumulador.
2013	47		LD B,A	Limpiar el registro B.
2014	7E	SUSTR	LD A, (HL)	A = minuendo
2015	DD 9E 00		SBC A, (IX)	Rëstar el sustraendo
2018	FD 77 00		LD (IY), A	Salvar el resultado
201B	23		INC HL	Incre-
201C	DD 23		INC IX	mentar
201E	FD 23		INC IY	los
2020	04		INC B	registros.
2021	0D		DEC C	Decrementar contador

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2022	C2 14 20		JP NZ, SISTR	Terminar de realizar la res- ta.
2025	D2 4A 20		JP NC, POS	Si el resultado es positivo, ir a POS.
2028	16 00		LD D, 00 H	Indica el signo negativo.
202A	05		DEC B	Inicializar
202B	FD 2B	INIC	DEC IY	de nuevo
202D	0C		INC C	los registros.
202E	10 FB		DJNZ INIC	
2030	97		SUB A	Limpiar el acumulador.
2031	FD7E 00		LD A, (IY)	Pasar al acumulador el resul- tado.
2034	2F		CPL	Se obtiene
2035	C6 01		ADD 01 H	el complemento a dos.
2037	FD 77 00		LD (IY), A	Salvar el resultado.
203A	FD 23	REP	INC IY	Incrementar el registro IY
203C	FD 7E 00		LD A, (IY)	Pasar al acumulador el resul- tado.
203F	2F		CPL	Se obtiene el
2040	CE 00		ADC 00 H	complemento a uno.
2042	FD 77 00		LD (IY), A	Salvar el resultado.
2045	0D		DEC C	Terminar de realizar la res-
2046	C2 3A 20		JP NZ, REP	ta.
2049	C9		RET	
204A	16 FF	POS	LD D, FF H	Indicar el signo positivo.
204C	C9		RET	

SUBROUTINA MULTIPLICA.

Esta es una subrutina de multiplicación multibyte la cual multiplica un dato de una o más palabras por otro también de una o más palabras. El multiplicando se encuentra en la localidad de memoria apuntada por el RY y el multiplicador se encuentra apuntado por el registro IX. El resultado es un número cuyo número de palabras es igual a la suma de las palabras del multiplicando más las del multiplicador, este producto se guarda en las localidades apuntadas por el par de registros HL. Esta subrutina se encuentra a partir de la localidad 204 D H.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
204D	AF	MULTIPLICA	XOR A	Limpiar la localidad
204E	32 3028		LD (2830H),A	2830.
2051	3A 2C 28	MLTN	LD A, (2820H)	Cargar en el registro B
2054	47		LD B, A	el # de bytes del producto.
2055	21 3528		LD HL, 2835H	En HL se encontrará el <u>resul</u>
2058	36 00	INIT	LD (HL), 00H	do.
205A	23		INC HL	Se limpian las localidades -
205B	10 FB		DJNZ INIT	donde se almacenará el resul-
205D	3A 2D28	SHIFTX	LD A, (282DH)	tado.
2060	47		LD B, A	Cargar en el registro B el #-
2061	DD 213028		LD IX, 2830H	de bytes del multiplicador.
2065	AF		XORA	Pasar a IX el multiplicador.
2066	DD CB 001E	RTX	RR (IX)	Limpiar el acumulador.
206A	DD 2B		DEC IX	Rotar el multiplicador hasta-
206C	10 F8		DJNZ RTX	terminar de rotar todos los -

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
206E	D2 8720		JPNC, ZERO	bytes.
2071	3A2C28		LDA, (282C1)	Si Z acarreo ir a zero.
2074	47		LD B, A	Cargar en el registro B el
2075	213528		LD HL, 2835H	# de bytes del producto.
2078	FD213128		LD/Y, 2831H	Transferir el producto par-
207C	3F		CCF	cial a HC.
207D	FD7E-DO	NXTBYT	LD A, (IY)	Transferir a IY el multipli-
2080	8E		ADCA, (HL)	cando.
2081	77		LD (HL), A	Negar el acarreo.
2082	FD23		INC IY	Cargar el multiplicando.
2084	23		INC HL	Sumar con el producto parcial.
2085	10 F6		DJNZ NXTBYT	Salvar resultado.
2087	3A2028	ZERO	LDA, (282D1)	Repetir la
208A	47		LDB, A	operación
208B	DD212F28		LDIX, 282FH	con todos los bytes.
208F	AF		XORA	Almacenar en B el
2090	DDB600	ZCHK	OR(IX)	# de bytes del multiplicador.
2093	CA AA20		JPZ, FINI	Cargar el multiplicador en IX.
2096	3A 2E28		LD A, (282E1)	Limpiar el acumulador.
2099	47		LD B, A	Si ya se terminó de multiplicar
209A	FD213128		LD IY, 2831H	ir a la dirección de fini.
209E	AF		XORA	Pasar en B el # de bytes del -
209F	FDCB0016	LFTY	RL (IY)	multiplicando.
20A3	FD23		INC IY	Pasar a IY el multiplicando.
20A5	10 F8		DJNZ LFTY	Limpiar el acumulador.
20A7	C3 5D20		JP SHIFTX	Desplazar hacia la izquierda los bytes del multiplicando.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
20AA	DD 23	FINI	INC IX	Regresar por el siguiente - bit.
20AC	10 E2		DJNZ ZGHK	Si el multiplicador # 0 se
20AE	C9		RET.	regresa por otro bit.

SUBROUTINA DIVISION.

Esta subrutina se encuentra a partir de la localidad 20AFH y divide un número de una o más palabras entre otro, también de una o -- más palabras, en ésta subrutina siempre el dividendo deberá ser ma yor o igual al divisor, ya que no se obtienen números fraccionarios.

El dato del dividendo se encuentra en la localidad de memoria apunta da por el registro DE, y el divisor por el registro HL, almacenando el resultado o cociente en el registro IX. El método de división es por rotación.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
20AF	DE 18	DIVISION	LD C, 18H	Proporcionar el # de bits del
20B1	DD360000		LD(IX), 00H	dividendo.
20B5	3A 4428		LD A, (2844H)	Limpiar el registro para el <u>re</u>
20B8	47		LD B, A	sultado.
20B9	FD 360000	INIT	LD (IY), 00H	Cargar en el registro B el # -
20B0	FD 23		INC IY	de bytes del remanente.
20BF	10 F8		DJNZ INIT	Limpiar los registros donde se
20C1	3A 4328	INICIAR	LD A, (2843H)	encontrará el remanente.
20C4	47		LD B, A	Cargar en el registro B el # -
20C5	AF		XOR A	de bytes del dividendo.

DIRECCION	COMIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
20C6	1A	RTX	LD A, (DE)	Limpia el acumulador.
20C7	CB 17		RL A	Rotar a la izquierda
20C9	12		LD (DE), A	todos los
20CA	13		INC DE	bytes del
20CB	10 F9		DJN7 RTX	dividendo.
20CD	D2 DE 20		JPNL CONTINUA	Si acarreo seguir en continua.
20DD	3E FF		LDA, FRI	Indicar con FRI que
20D2	32 3D 28		LD (283DH),A	existe acarreo.
20D5	3A 44 28		LD A, (2844H)	Cargar en el registro B
20D8	47		LD B, A	el # bytes del remanente.
20D9	AF		XOR A	Asegurarse de que
20DA	37		SCF	existe acarreo.
20DB	C3 E820		JP continua 1	Seguir en continua 1.
20DE	3 E 00	CONTINUA	LD A, DDI	Indicar con 00H que
20E0	32 3D28		LD (283DH),A	no existe acarreo.
20E3	3A 4428		LD A, (2844H)	Cargar en el registro B
20E6	47		LD B, A	el # de bytes del dividendo.
20E7	AF		XOR A	Asegurar que no hay acarreo.
20E8	FD 214528	CONTINUA 1	LD IY,2845H	Rotar a la
20EC	FD CB0016	CONTINUA 2	RC (IY)	izquierda los
20F0	FD 23		INC IY	bytes del
20F2	10 F8		DJNZ CONTINUA 2	remanente.
20F4	3A 4428		LD A, (2844H)	Cargar en el registro B
20F7	47		LD B, A	el # de bytes del dividendo.
20F8	AF		XOR A	
20F9	FD 214528		LDIY,2845H	Inicializar los registros
20FD	21 3F28		LD HL,283FH	del remanente y del divisor.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2100	FD 7E00	DIF	LD A, (IY)	Efectuar la resta entre
2105	9E		SBC A, (HL)	el remanente y el divisor.
2104	.FD 7700		LD (IY), A	Salvar resultado como remanente.
2107	25		INC HL	Realizar la resta a
2108	FD 25		INC IY	todos los bytes del
210A	10 F4		DJNZ DIF	remanente con el divisor.
210C	3F		CCF	Complementar el acarreo.
210D	D2 1C21		JPNC SUMAR	Si acarreo seguir en sumar.
2110	DD213E28		LD IX, 283EH	Rotar a la izquierda
2114	DD CB0016		RL (IX)	en resultado.
2118	C3 3C 21		JP FINAL	Seguir en final.
211B	AF	SUMAR	XOR A	Limpiar el acumulador.
211C	DD 213E28		LD IX, 283EH	Rotar a la izquierda
2120	DD CB0016		RL (IX)	el resultado.
2124	5A 4428		LD A, (2844H)	Cargar en el registro B
2127	47		LD B, A	el # de bytes del dividendo.
2128	21 3F28		LD HL, 283FH	inicializar los
212B	FD 214528		LD IY, 2845H	registros.
212F	AF		XOR A	Limpiar el acumulador.
2130	FD 7E 00	SUMAS	LD A, (IY)	Efectuar la suma entre el
2133	8E		ADC A, (HL)	remanente y el divisor.
2134	FD 7700		LD(IY), A	Salvar resultado en remanente.
2137	25		INC HL	Sumar todos los
2138	F 25		INC IY	bytes del remanente
213A	10 F4		DJNZ SUMA 1	con los del divisor.
213C	11 24 28	FINAL	LD DE, 2824#	Actualizar registros.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
213F	OD		DEC C	decrementar contador.
2140	C2 C120		JPNZ INICIAR	Si conteo 0 seguir en iniciar.
2143	C9		RET.	

SUBROUTINA LIMPIEZA.

Esta se encuentra a partir de la localidad 2144# se encarga de limpiar las localidades de memoria apuntadas por el registro índice IY.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2144	3A 2E28	LIMPIEZA	LD A, (282EH)	Cargar en el registro B el
2147	47		LD B, A	de byte que se van a limpiar.
2148	FD 213128		LDIY, 2831H	IY= localidad a iniciar.
214C	FD 360000	AQUI	LD(IY), 00H	Cargar ceros en
2150	FD 23		INC IY	todas las localida-
2152	10F8		DJNZ AQUI	des que se deseen.
2154	C9		RET	

SUBROUTINAS CHG1, CHG2, CHG3, CHG4.

Las subrutinas CHG1, CHG2, CHG3 y CHG4 son semejantes en su función. Se encargan de inicializar los registros HL, IX, IY, C; cada una de las subrutinas carga a estos registros diferentes localidades de memoria. La subrutina CHG1 se encuentra a partir de la dirección 2155H; la subrutina CHG2 a partir de 2163H; la subrutina CHG3 a partir de - 2171H; y la subrutina CHG4 a partir de la dirección 217FH.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2155	210B28	CHG 1	LD HL, 280BH	Inicializar
2158	DD210E28		LD IX, 280EH	los registros
215C	FD211228		LD IY, 281ZH	HL, IX, IY, C.
2162	C9		RET.	
2163	21 0E28	CHG2	LD HL, 280EH	Inicializar los
2166	DD210B28		LD IX, 280BH	registros
216A	FD 211228		LD IY, 281ZH	HL, IX, IY, C.
216E	OE 03		LD C, 03H	
2170	C9		RET.	
2171	211228	CHG3	LD HL, 2812	Inicializar los
2174	DD211B28		LD IX, 281B	registros
2178	FD 211E28		LD IY, 281E	HL, IX, IY, C.
217C	OE03		LD C, 03H	
217E	C9		RET.	
217F	21 2128	CHG4	LD, HL, 2821	Inicializar los
2182	DD21 1E28		LD IX, 281E	registros.
2186	FD 212428		LD IY, 2824	HL, IX, IY, C.
218A	OE 03		LD C, 03H	
218C	C9		RET.	

PROGRAMA PRINCIPAL

A partir de la dirección 21FD se encuentra el programa principal- en el cual se lleva a cabo el control PID, la explicación de como lo ejecuta se mencionó dentro de la explicación del diagrama de - flujo en secciones anteriores. En la explicación de la codificación ensamblador se notará la solicitud de las subrutinas antes descri- tas.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
21FD	3E90		LD A, 90H	Programación de
21FF	D3 07		OUT (07H), A	los puertos.
2201	DB 04		IN A, (04H)	Toma una muestra
2203	320728		LD(2807H), A	salvar el dato leído y trans-
2206	32 11 28		LD (2811H), A	ferir a Ck-1, Ck-2, Uk-1.
2209	00 00 00			
220C	3E 90	EMPIEZO	LD A, 90H	Leer otra muestra
220E	03 07		OUT (07H), A	del puerto y
221D	DB 04		IN A, (04H)	almacenarla
2212	320828		LD (2808H), A	en la localidad de Ck.
2215	47		LD B, A	hacer la
2216	3A 2728		LD A, (2827H)	comparación entre el
2219	38		CPB	límite inferior y la muestra
221A	DA2122		JP C,continuar_1	Ck. Si Ck > Li ir a continuar 1.
221D	3E 08		LD A, 08H	Si Ck < Li se energi-
221F	D3 01		OUT (01H), A	zará la alarma.
2221	3A 0828	CONTINUAR 1	LD A, (2808H)	Hacer la comparación
2224	47		LD B, A	entre el límite supe-

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2225	3A2828		LD A, (2828H)	rrior Ls y el valor
2228	B8		CP B	de la muestra Ck.
2229	F23022		JP P,continuar 2	Si Ck < Ls ir a continuar 2.
222C	BE 10		LD A, 10H	Si Ck > LI se energi-
222E	D3 01		OUT (01H), A	zará la alarma.
2230	DB 01	CONTINUAR 2	IN A, (01H)	Rectificar el
2232	32 29 28		LD (2829H), A	modo de operación.
2235	CB 6F		BIT 5, A	Manual o automático.
2237	CA 4424		JPZ, manual	Si es manual ir a manual.
223A	3A 08 28		LD A, (2808H)	
223D	57		LD D, A	
223E	3A0728		LD A, (28007H)	Realizar la diferen-
2241	92		SUBD.	cia Ck-1- Ck.
2242	DA 4A22		JP C, A, NEG.	Si resultado < 0 ir a A1NEG.
2245	OE FF		LD.C, FFH	Si resultado > 0 poner bandera
2247	C3 4E22		JP continuar 3	de positivo, ir a CONTINUAR 3.
224A	OE 00	A1NEG	LD C, 00H	Poner la bandera
224C	ED 44		NEG.	de resultado negativo.
224E	32 09 28	CONTINUAR 3	LD(2809H), A	Transferir A1 al
2251	32 2F 28		LD (282FH), A	multiplicador,
2254	79		LD A, C	Y guardar el signo
2255	322A28		LD (282AH), A	resultante de A1.
2258	CD 4421		CALL LIMPIEZA	
225B	2A0028		LD HL, (2800H)	Transferir Kp al
225E	22 31 28		LD(2831H), HL	multiplicando.
2261	CD 4D20		CALL MULTIPLICA	Realiza la multiplicación A,
2264	AF		XORA	* Kp.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2265	2A3528		LDHL, (2835H)	Almacena el resultado
2268	3A 3728		LD A, (2837H)	de la multiplicación
226B	22 0B 28		LD(280BH), HL	a las localidades
226E	32 0D 28		LD(280DH), A	de B ₁ .
2271	3A 0628		LD A, (2806H)	Calcular la dife-
2274	92		SVB D	rencia entre r _k - C _k .
2275	DA 7D22		JPC, A2NEG	Si resultado <0 ir a A2NEG.
2278	OE FF		LDC, FFI	Si resultado >0 poner bande
227A	C3 8122		JP CONTINUAR 4	ra positivo, ir a continuar 4.
227D	OE 00	Az NEG	LD C, 00H	Poner la bandera
227F	ED 44		NEG	de resultado negativo.
2281	320A28	CONTINUAR 4	CD(280AH), A	Transferir A2 al
2284	322F28		LD(282FH), A	multiplicador.
2287	78		LD A, C	Guardar el signo
2288	32 2B28		LD(282BH), A	resultante de A2.
228B	CD 4421		CALL LIMPIEZA	
228E	2A 0228		LD HL, (2802H)	Tranferir K ₁ al
2291	22 31 28		LD(2831H), HL	multiplicando.
2294	CD4D20		CALL MULTIPLICA	Realiza la multiplicación -
2297	AF		XOR A	A ₂ * K ₁
2298	2A 3528		LD HL, (2835H)	Almacena el resultado
229B	3A 37 28		LD A, (2837H)	de la multiplicación
229E	220E28		LD(280EH), HL	en las localidades
22A1	321028		LD(2810H), A	de B ₂ .
22A4	AF		XOR A	
22A5	3A 2B 28		LD A, (282BH)	Revisar que signo
22A8	F6 00		OR 00H	tiene A ₂ .

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
231C	57		LD D, A	La operación
231D	3A0828		LD A, (2808H)	de adición entre
2320	82		ADD D	Ck-2 + Ck.
2321	DA 2923		JPC, GUAR	Si \bar{J} acarreo ir a GUAR.
2324	OE 00		LD C, 00H	Almacenar el acarreo en C.
2326	C3 2823		JP CONTINUAR 5	
2329	OE 01	GUAR	LD C, 01 H	Almacenar el acarreo en C.
232B	321528	CONTINUAR 5	LD(2815H), A	
232E	79		LD A, C	
232F	32 16 28		LD (2816H), A	
2332	3A 07 28		LD A,(2807H)	Realizar.
2325	6F		LD L, A	la operación
2336	2600		LD H, 00H	de
2338	29		ADD HL, HL	2* Ck-1.
2339	221728		LD(2817H), HL	Guardar el resultado.
233C	DD21 1528		LD IX,2815H	Inicializar los
2340	211728		LD HL, 2817H	Registros para así
2343	FD 211928		LD IY, 2819H	calcular la
2347	OE 02		LD C, 02H	diferencia entre
2349	CD 1220		CALL RESTA	A4-A3.
234C	7A	LD A, D	Guardar el signo resultante	
234D	323A28		LD(283AH), A	de la resta.
2350	FD2A1918		LD IY,(2819H)	Inicializar los
2354	FD222F28		LD(282FH), IY	registros para así
2358	2A0428		LD HL,(2804H)	calcular la
235B	223128		LD(2831H), HL	multiplicación de

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
235E	CD 4D20		CALE MULTIPLICA A5 * K _D .	
2361	2A 3528		LD HL,(2835H)	Guardar
2364	3A 3728		LD A,(2837H)	el resultado
2367	22 1B28		LD(281BH),HL	de la
236A	32 1D28		LD(281DH),A	multiplicación.
236D	3A 3A28		LD A,(283AH)	Preguntar por el
2370	F6 00		OR 00H	signo de A5.
2372	CAA223		JP Z,NEGA3	Si es negativo ir a NEGA3.
2375	#A3928		LD A,(2839H)	Si es positivo preguntar
2378	F6 00		OR 00H	por el signo de B3.
237A	CA 8B23		JP Z,NEGA 4	Si es negativo ir a NEGA 4.
037D	CD 7121		CALL CHG 3	Calcular la
2380	CD 0020		CALL SUMA	suma B3 + B4.
2383	3E FF		LD A, F _H	Almacenar el signo positivo
2385	32 3B28		LD(283BH), A	de la operación.
2388	C3 C2 23		JP PREG. BE	Preguntar por las condiciones
238B	211B28	NEGA 4	LD HL,281BH	de BE.
238E	DD 21 12 28		LD IX,281ZH	Inicializar los registros
2392	FD21 1E28		LD IY,281EH	para realizar
2396	OE 03		LD C, 03H	la resta entre
2398	CD 1220		CALL RESTA	B4-B3.
239B	7A		LD A, D	Salvar el signo resul-
239C	323B28		LD(283BH),A	tante de la resta.
239F	C3C223		JP PREG B5	ir a PREG B5
23A2	3A3928	NEGA 3	LD A,(2839H)	preguntar por el signo
23A5	F6 00		DR 00H	de B3.
23A7	CA B723		JPZ,NEGA A2	Si es negativo ir a NEGA A2.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
23AA	CD 7121		CALL CHG3	Si es positivo realizar
23AD	CD 1220		CALL RESTA	la resta B3-B4
23B0	7A		LD A, D	Almacenar el signo re-
23B1	323B28		LD(283BH),A	sultante de la resta.
23B4	C3C223		JP PREG B5	Ir a PREG B5.
23B7	CD 7121	NEGA A2	CALL CHG3	Calcular la
23BA	CD 0020		CALL SUMA	Suma B3+B4.
23BD	3E 00		LD A, 00H	Almacenar el signo
23BF	323B28		LD(283BH),A	negativo de la suma.
23C2	3A 3828	PREG B4	LD A,(283BH)	Preguntar por el
23C5	F600		DR 00H	signo de B5.
23C7	CAD323		JPZ,NEGA5	Si es negativo ir a NEGA5.
23CA	CD7F21		CALL CHG4	Calcular la
23CD	CD0020		CALL SUMA	suma Uk-1+B5=Uk
2300	C3DF23		JP DIVISION	Ir a división.
23D3	CD7F21	NEGA 5	CALL CHG4	Calcular la
2306	CD 1220		CALL RESTA	resta Uk-1 -B5=Uk
23D9	7A		LD A, D	preguntar por
23DA	F600		OR 00H	el signo de Uk
23DC	CA A600		JP Z,ERROR	si es negativo ir a ERROR
23DF	213F28	DIVISION	LD HL,283FH	
23E2	DD213E28		LD IX,283EH	Incializar
23E6	FD214528		LD IY,2845H	
23EA	112428		LD DE,2824H	registros
23ED	3E01		LD A, 01H	
23EF	324228		LD(2842H),A	para realizar
23F2	3E03		LD A, 03H	

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
23F4	324328		LD(2843H),A	una división.
23F7	3E03		LD A,03H	
23F9	324428		LD12844H),A	
23FC	2A2428		LD HL,(2824H)	Actualiza el
23FF	3A2628		LD A,(2826H)	valor de
2402	222128		LD(2821H),HL	Uk-1 = Uk
2405	322328		LD(2823H),A	
2408	CD AF20		CALL DIVISION	realizar la división
240B	3E90		LD A,90H	programar el modo
240D	0307		OUT(7),A	de salida del puerto.
240F	3A3E28		LD A,(283EH)	Mandar al puerto B
2412	0305		OUT(05H),A	la señal de Uk.
2414	3A0728		LDA,(2807H)	Actualizar valores
2417	321128		LD(2811H),A	Ck-2 = Ck-1.
241A	3A0828		LD A,(2808H)	
241D	320728		LD(2807H),A	Ck-1 = Ck.
2420	3A3E28		LD A,(283EH)	
2423	324828		LD(2848H), A	Uk-1 = Uk.
2426	3E 01	RETARDO	LD A,#mseg	Cargar el # de
2428	06 01	TIEMPO	LD B,FACTOR	milisegundos
242A	05	CUENTA	DEC B	de retardo para
242B	C22A24		JPNZ CUENTA	muestreo.
242E	3D		DECA	
242F	C2 2824		JPNZ TIEMPO	
2432	C3)C22		JP EMPIEZO	Regresar al inicio del progra
2435	CD A600	ERROR	CALL DESPLERROR	ma.

DIRECCION	CODIGO	ETIQUETA	INSTRUCCION	COMENTARIOS
2438	3E 90		LD A,90H	Desplegar la señal de error.
243A	D3 07		OUT(07H),A	Mandar al puerto B
243C	3A4828		LD A,(2848H)	la señal
243F	D305		OUT(05H),A	de Uk-1.
2441	C32624		JP RETARDO	Ir a retardo.
2444	C32624	MANUAL	JP RETARDO	Ir a retardo.

III-5 ENSAMBLE COMPLETO DEL CONTROLADOR PARA LA PRUEBA DEL ALGORITMO.

Con el objeto de comprobar el funcionamiento del control PID, se requiere aplicar una función escalón unitario como un disturbio en la variable controlada, con la finalidad de observar la respuesta del control.

La función escalón unitario tendrá un valor de 10V, por lo que se requiere un convertidor A/D para aplicar dicha señal al microprocesador (control PID). Para este objetivo se usa el convertidor analógico digital -- ADC 0800 que tiene las características de ser rápido (50 μ s para cada -- conversión), una exactitud de ± 1 LSB ("BIT" menos significativo) y capacidad para trabajar en un intervalo de frecuencia de 50 a 850 KHz; dispone de una red de 256 resistores e interruptores analógicos, y "Latches" de salida que mantienen la señal hasta que se completa una conversión, cargando los "Latches" con nuevos datos; la conversión necesita 40 períodos de reloj. En la figura 3.3 se muestra la distribución de las terminales, así como el arreglo necesario para que el convertidor opere como se requiere

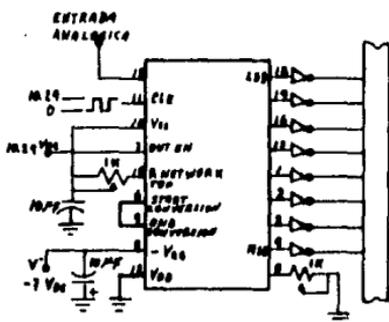


Figura 3.3.- Convertidor analógico a digital ADC0800.

El sistema de microprocesador que se utiliza es el MCE Z80, para fines del algoritmo.

En el apéndice B se examinan con detalle las principales características de este equipo así como su funcionamiento.

Puesto que el microprocesador al terminar con su función proporciona una salida en forma digital, se tiene la necesidad de utilizar un convertidor digital-analógico para que la señal que se obtenga como respuesta pueda ser analizada fácilmente.

Para tal propósito se utiliza el convertidor D/A DAC0800, el cual tiene tiempos de fijación típicos de 100 ns por lo que podemos considerarlo rápido. Las entradas inmunes al ruido del DAC0800 aceptan niveles TTL; cuenta además con un bajo consumo de potencia. De la misma forma que para el convertidor A/D, en la figura 3.4 se muestra la distribución de las terminales y el arreglo para el funcionamiento del convertidor D/A.

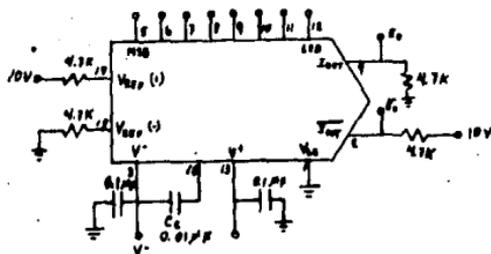


Figura 3.4.- Convertidor digital analógico DAC0800.

III.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En cualquier circuito de control, se presentan algunos retardos de tiempo; el retardo que involucra la válvula está presente en todos los circuitos de control. Algunos retardos de tiempo tienen lugar en el transcurso de la medición entre un cambio en el bulbo del termómetro o de la conexión de presión y la indicación del cambio en la pluma del graficador; además de estos dos se puede presentar una serie de retardos en el aparato bajo control.

El hecho de tratar matemáticamente con procesos que involucran una serie de retardos o incluso cuantificar los diferentes retardos y sumarlos involucra un grado de dificultad alto. Sin embargo, teniendo un proceso, un graficador, y un medio de controlar el proceso (una válvula), es posible obtener la suma total de los retardos modificando simplemente la posición de la válvula y analizando la curva resultante trazada por la pluma del graficador. Esta curva denominada curva de reacción presenta dos características que se usan para determinar los ajustes del controlador, dichas características son la velocidad de reacción (R), y el retardo (L) del circuito de control (en el apéndice A se muestra como se obtienen estos dos factores a partir de la curva de reacción).

Teniendo un proceso cuya curva de reacción es la que se muestra en la figura 3.5 y utilizando las relaciones de la tabla 3.1 se obtienen los valores de las constantes de proporcionalidad, de integración y derivativa para -

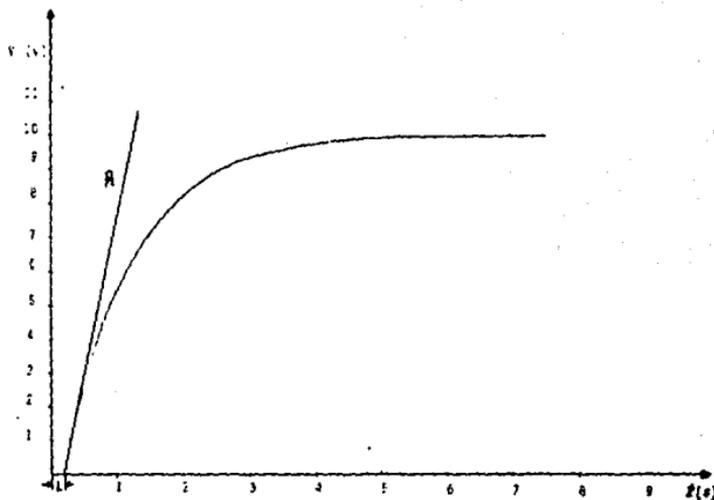


Figura 3.5.- Curva de reacción.

los diferentes tiempos de muestreo que a continuación se presentan:

$R = 8.5$ Volt/seg.

$L = 0.2$ seg.

	$\Delta T = 0.08$ seg	$\Delta T = 0.16$ seg	$\Delta T = 0.3$ seg.	$\Delta T = 0.4$ seg.
Sistema K_p 0.41	0.32	0.20	0.15	
decimal K_I 0.10	0.14	0.17	0.18	
K_D 0.74	0.37	0.20	0.18	
Sistema K_p 0029	0020	0014	000F	
Hexade- cimal. K_I 000A	000E	0011	0012	
K_D 004A	0025	0014	0012	

En las páginas siguientes se encuentran las respuestas del controlador para 4 diferentes tiempos de muestreo, con un valor de 5 volt como punto de referencia.

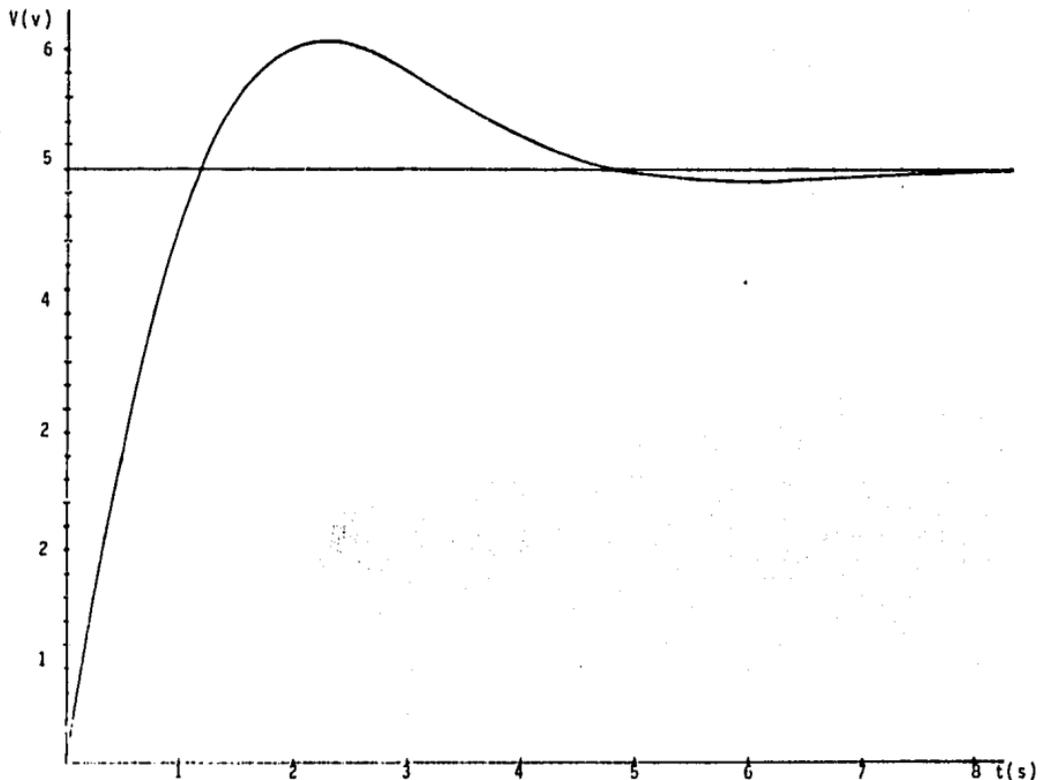


FIGURA 3.6.- Respuesta del controlador con tiempo de muestreo de 0.08 seg y punto de referencia en 5 volt.

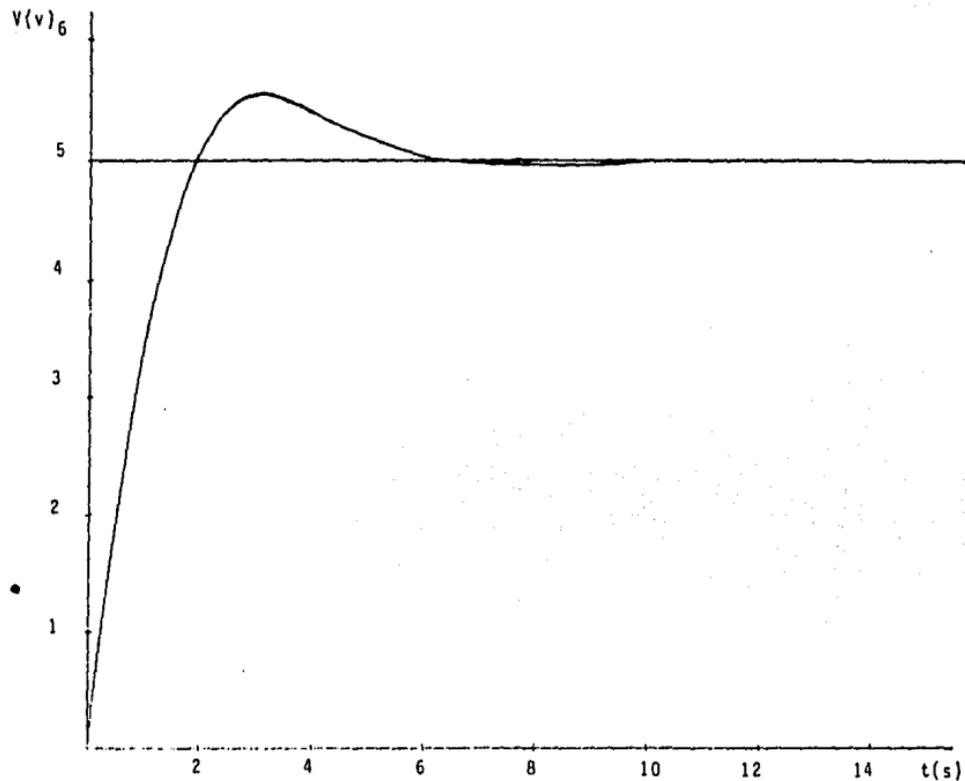


FIGURA 3.7.- Respuesta del controlador con tiempo de muestreo de 0.16 seg y punto de referencia en 5 volt.

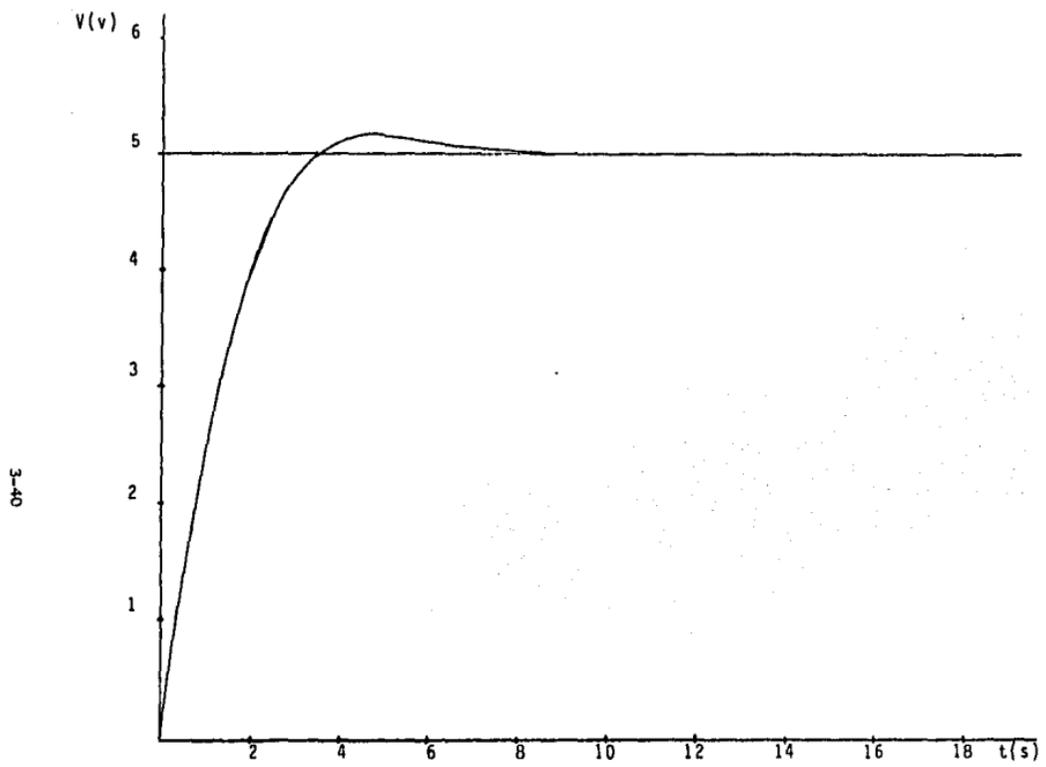


FIGURA 3.8.- Respuesta del controlador con tiempo de muestreo de 0.3 seg. y punto de referencia en 5 volt.

3-40

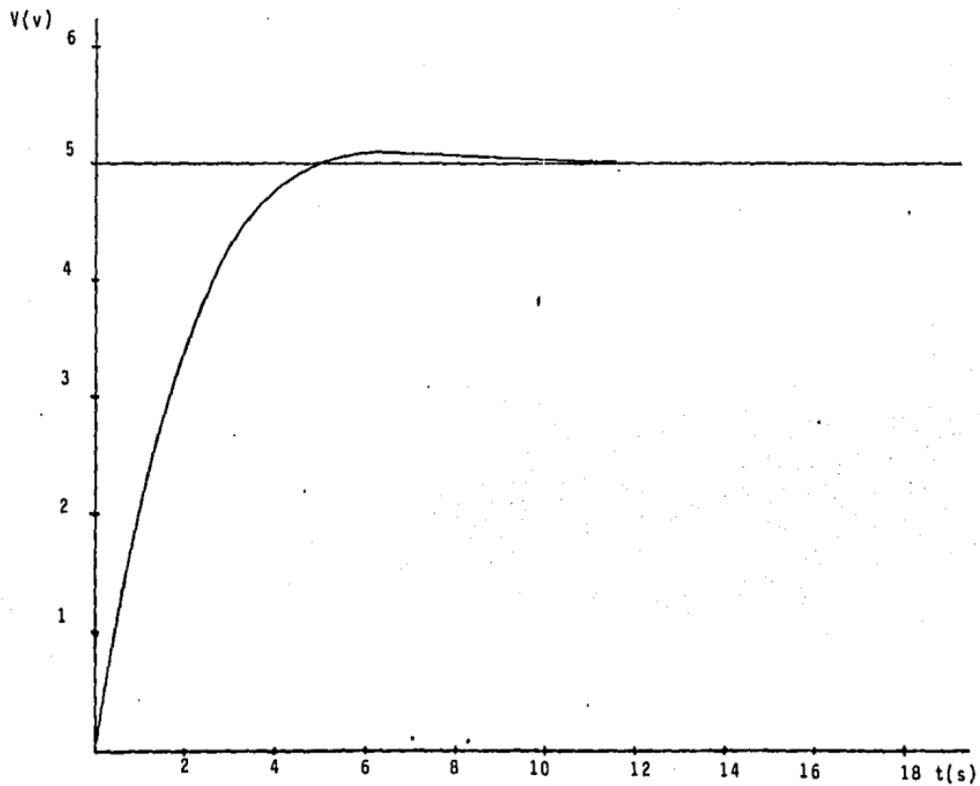


FIGURA 3.9.- Respuesta del controlador con tiempo de muestreo de 0.4 seg. y punto de referencia de 5 volt.

III.7.- CONCLUSIONES.

Las conclusiones parciales referentes a las respuestas del controlador presentadas con anterioridad son:

Las gráficas de respuesta con tiempo de muestreo de 80 ms tiene tiempo de estabilización aceptable, aunque existe sobretiro considerable (de 1.8 volt aproximadamente).

Cuando el tiempo de muestreo se fija en 160 ms también cuenta con un tiempo de estabilización aceptable obteniendo un sobretiro, aunque menor al anterior, considerable todavía (de 0.6 volt. aproximadamente).

Cuando el tiempo de muestreo se fija en 400 ms prácticamente no hay sobretiro, pero el tiempo de estabilización aumenta.

Finalmente, cuando el tiempo de muestreo es de 300 ms, el sobretiro es mínimo, consiguiéndose de la misma forma un tiempo de estabilización aceptable (8 seg. aproximadamente).

Pueden compararse las gráficas para concluir que el mejor tiempo de muestreo es 300 ms. para este sistema.

IV.- ESPECIFICACIONES DEL CONTROLADOR DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE.

IV.1 MICROPROCESADOR.

La elección del microprocesador es una de las necesidades primarias para poder realizar el controlador. Para esta elección, lo lógico sería tratar de obtener la mayor información posible sobre cada uno de los microprocesadores existentes, para no dejar fuera de consideración características importantes de algún microprocesador que serían útiles para lograr mejoras en el controlador.

Pero realmente ésta es una técnica que maneja mucha información por lo que una forma más sencilla para elegir el microprocesador adecuado es agrupando la información en los siguientes puntos:

- Disponibilidad.- Es de gran importancia saber cuales microprocesadores son accesibles comercialmente. Ya que existen microprocesadores, contando elementos de circuitería y programación, que no existen en el mercado nacional.

Número de "Bits".- Esta es una condición dependiente del sistema a controlar. Pero cabe mencionar que en la actualidad existe aproximadamente un 60% de microprocesadores de 8 "Bits", un 20% de 4 "Bits", 15% de 16 "Bits", y un 5% de 12 y de más de 16 "Bits".

Además la mayoría de los fabricantes se preocupan por el desarrollo de periféricos y circuitos auxiliares para los microprocesadores de 8 "Bits".

Comparando un microprocesador de 4 "Bits" con uno de 8 "Bits", se tiene que el de 4 "Bits" requiere mayor número de circuitería auxiliar que el de 8 "Bits", además que la cantidad de instrucciones,-

y por lo tanto, el soporte de programación es mayor en un microprocesador de 8 bits, lo que los hace más potentes que los de 4 "Bits". Así que, si alguna aplicación puede tener lugar en un -- microprocesador de 4 "Bits", tal vez, es más rentable llevarla a cabo en uno de 8 "Bits".

- Número de fuentes de alimentación.- Otro aspecto importante es considerar el número de fuentes adicionales a la que se emplea para el microprocesador, ya que el precio de cada fuente adicional adquiere gran importancia comparado con el de la CPU.
- Velocidad, número de instrucciones, capacidad de memoria.- Es -- muy importante la evaluación de la eficiencia de cada una de las instrucciones ya que depende de éstas, en gran parte, el soporte de programación. El microprocesador trabaja en forma serie; la ejecución de un determinado programa exigirá un tiempo igual a la suma de tiempos de cada instrucción por el número de veces que debe ser ejecutada dentro del programa. Si alguna operación debe ejecutarse a una elevada frecuencia o los cálculos van a -- ser muy complicados, el tiempo con que dispone un microprocesador para realizarlos puede ser insuficiente, mientras que otro microprocesador podría disponer de menos tiempo para realizar los mismos cálculos. Dentro de la memoria se debe distinguir entre memoria de programa y memoria de datos. La cantidad de memoria de programa vendrá determinada por la complejidad del problema a resolver, es difícil calcular éste valor antes de realizar el programa, pero se puede estimar aproximadamente, por semejanza con otros -- problemas. La memoria de datos que se precise será más fácil de -

determinar, sólo se necesita conocer el número de datos que se -
deben almacenar.

La ecuación de la velocidad, de la eficiencia del número de ins-
trucciones y del direccionamiento de memoria, debe considerarse-
no sólo para el proceso actual sino pensando en desarrollos futuro
ros en función de flexibilidad de estructura y de operación.

- Tipos de periféricos necesarios.- Una unidad consta de circuite-
ría fundamental pero además se debe considerar circuitos acceso-
rios que pueden ayudar a facilitar el diseño.

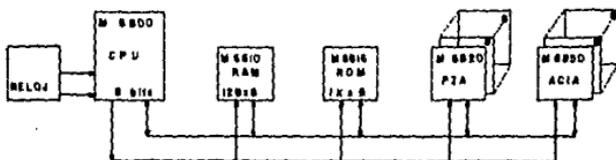
De acuerdo con los puntos anteriores lo primero que se especi-
ficará, para la elección del microprocesador a utilizar para el con-
trolador del sistema de combustible, es un microprocesador de 8 -
"Bits", debido a que proporciona una resolución satisfactoria para
el proceso. Cabe mencionar que éste tipo de microprocesador, así -
como sus componentes accesorios, están disponibles comercialmente
en México. A continuación se menciona tanto las características --
como los fabricantes de dichos microprocesadores.

Motorola 6800

El microcomputador 6800 cuyo fabricante es motorola, está consti-
tuido por el microprocesador 6800 y ciertos circuitos integrados-
RAM, ROM y de entrada/salida. Lo que constituye un microcomputador
completo de forma, que las aplicaciones sencillas pueden realizarse
sin circuitos adicionales.

El sistema está constituido por los componentes que a continuación
se enumeran:

- RAM de 128 palabras x 8 "Bits" expandible a 256 palabras.
- RAM de 1024 " " " " a 2048 " "
- Interface Bidireccional para periféricos (PIA)
- Interface para comunicación asíncrona (ACIA).



La CPU está organizada como un computador convencional de palabra de 8 "Bits". Los tiempos de ejecución de una instrucción varía de 2×10^{-6} a 12×10^{-6} segundos, la CPU dispone de 2 acumuladores, un registro de 16 "Bits" y un apuntador de pila.

El 6800 permite 7 tipos de direccionamiento;

- De acumulador
- Inmediato
- Directo (a las primeras 256 palabras)
- Extendido (directo a toda la memoria)
- Indexado
- Implícito
- Relativo

El 6800 posee un circuito de interrupciones enmascarable a 4 niveles en una sola línea.

MOTOROLA MC 6802

Este microprocesador de la familia MC6800, mantiene las características de este, ofreciendo además un nivel de integración más alto ya que reúne en un sólo circuito integrado, una unidad central 6800, un generador de reloj y 128 palabras de memoria RAM. Lo que permite realizar los sistemas, con un número de componentes y de costo reducido.

Un MC6802 conectado con un MC 6808 (memoria EPROM 1 K palabra x 8 "Bits" y un PIA MC6820 constituyen un microcomputador completo. El MC6802 conserva todas las características del MC6800. Únicamente se requiere de un cristal externo de 4 MHz para que funcione el generador de reloj.

INTEL 8080

Dentro del mercado nacional ésta familia de microprocesadores no es accesible; sin embargo, se les hace mención debido a que compiten dentro de los microprocesadores de mayor aplicación.

Este microprocesador fabricado por INTEL es el que le ha dado el nombre a la llamada segunda generación de microprocesadores. Aunque es compatible con su predecesor dentro de la programación, en su arquitectura es sustancialmente diferente.

Las principales diferencias de ésta generación a la anterior son:

el encapsulado de 40 terminales en lugar de 18. Lo cual permite - disponer en paralelo los "buses" de datos y de direcciones ahorrándose así el uso de multiplexores, la utilización de tecnología --- N-MOS en lugar de P-MOS incrementándose así la velocidad del micro procesador 8080 en diez veces, además un enriquecimiento en el número de instrucciones. En general se pueden señalar dos inconvenientes en el 8080 como es la ausencia de direccionamiento indexado, y desde el punto de vista de circuitería requiere de 3 tensiones de alimentación.

INTEL 8085

Al igual que el INTEL 8080, este microprocesador no es accesible - comercialmente en México. Consta de instrucciones y de arquitectura completamente compatible con el 8080, es decir, participa de todas las características del 8080 contando además con las siguientes ventajas.

- En las velocidades de proceso, el ciclo básico de instrucción es de 1.3×10^{-6} segundos mientras que en el 8080 es de 2×10^{-6} segundos.
- En el sistema de interrupciones, además de la línea de interrupción del sistema 8080, presenta otras 2 líneas de interrupción enmascarables por programa y 1 línea de interrupción de alta prioridad no enmascarable.
- Alimentación a una sola tensión de 5 voltios, mientras que el 8080 requiere de 3 niveles de alimentación de 5, + 12, -12 voltios.
- Generador de reloj incluido en el circuito integrado.

- Decodificador de estados incluido en el circuito integrado con este microprocesador se puede llevar a cabo un sistema completo con 3 -- circuitos integrados (CPU 8085, memoria de programa ROM 2Kx8 "Bits" 8355, y memoria de datos RAM 256x 8 "Bits" 8155).

ZILOG Z-80

Este microprocesador se puede considerar como un 8080 extraordinario, además que mantiene compatibilidad con el mismo, incorpora en una sola pastilla al 8080, el reloj 8224, y su controlador 8228. Comparándolo con el 8080, presenta principalmente dos ventajas:

- 1.- Dispone de 2 bancos de registros, además de que cada banco tiene todos los registros de que está dotado el 8080. Además de estos el Z-80 lleva un juego de registros índice.
- 2.- El Z-80 tiene la posibilidad de refresco para memorias dinámicas. Además de estas ventajas el Z-80 dispone de otras pero ya de menor importancia:
 - Un conjunto de instrucciones amplio (150 instrucciones a 78 del microprocesador 8080).
 - Una mayor flexibilidad en el sistema de interrupciones.
 - Emplea una sola tensión de alimentación.

En la tabla 4.1 se puede ver la lista de los microprocesadores antes mencionados mostrando sus principales características:

	INTEL 8080	INTEL 8085	MOTOROLA 6800	MOTOROLA 6802	ZILOG 2-80
T I P O	ESTANDAR	ESTANDAR	ESTANDAR	ESTANDAR	ESTANDAR
Repert. Instrc.	78	80	89	89	150
Tiempo Ciclo (μ S)	2	1.3	2	2	1.6
Direc. Directo (BITS).	16	16	16	16	16
Registros	7	7	3	3	17
Pila(niveles)	RAM	RAM	RAM	RAM	RAM
Líneas de Interrupción.	1	4	1	1	2
Incorpora en el circ. Reloj.	NO	SI	NO	SI	SI
Rom	NO	NO	NO	NO	NO
Ram	NO	NO	NO	128	NO
Temporizador					
Otros		8228			8228+Refresc.
Capsula(terminales).	40	40	40	40	40
Alimentación(v)	+5;-5;+12	+5	+5	+5	+5

TABLA 4.1.- Características de los microprocesadores.

Basándose en la tabla anterior y en las características ya mencionadas de los microprocesadores, el Z-80 es el más óptimo para la aplicación en el control del sistema de combustible, debido a que es de los que emplea menos circuitería para su aplicación, cuenta con mayor soporte de programación, y es accesible comercialmente.

El siguiente paso a realizar, es dependiente de la programación - que se desarrolle para el controlador, tomando en cuenta que se trata del microprocesador Z-80; se debe de cuantificar la memoria necesaria, para poder llevar a cabo la programación que se requiere, con el objeto de realizar las funciones que se esperan del controlador.

La aplicación que requiere de este microprocesador es posible construirla con muy pocos circuitos de interface de la misma familia - del Z-80, el sistema consiste del procesador central (CPU), del circuito de interface "entrada/salida paralela" (PIO), una memoria de solo lectura borrable/programable (EPROM) para almacenar el programa una memoria de acceso aleatorio (RAM) para almacenamiento de datos, circuito de restablecimiento, y una fuente de suministro.

La unidad central de proceso es el cerebro del sistema, y normalmente controla a todos los elementos del sistema. La CPU tiene acceso a las instrucciones almacenadas en memoria y así manipula los datos que se encuentran ya sea en memoria o en sus registros internos. - Es capaz de tomar decisiones, realiza subrutinas y puede procesar - interrupciones. Tiene disposiciones que permiten el acceso directo a memoria por otros dispositivos, y la interface para circuitos de entrada/salida. Hablando de la arquitectura interna del microprocesador

Z-80; las instrucciones están contenidas en el registro de instrucciones (IR). Las operaciones aritméticas y la manipulación de datos son realizadas por la unidad lógica aritmética (ALU) y el acumulador. Las banderas de estado están contenidas en el registro de banderas de estado. Así como el acumulador se encuentran 14 registros de propósito general; que se utilizan para almacenar información o para proporcionar un operando. El direccionamiento indexado se puede llevar a cabo por dos registros índice (IX e IY). Contiene además un registro para dirección a página de interrupción (I), un registro de refrescar memoria (R). Las operaciones de apilamiento son bajo control del puntero de pila (SP). El registro que contiene la dirección de la localidad de memoria que se va a acceder para obtener la instrucción que se va a ejecutar es el contador de programa (PC). En la figura 4.2 se muestra la distribución de la CPU Z-80.

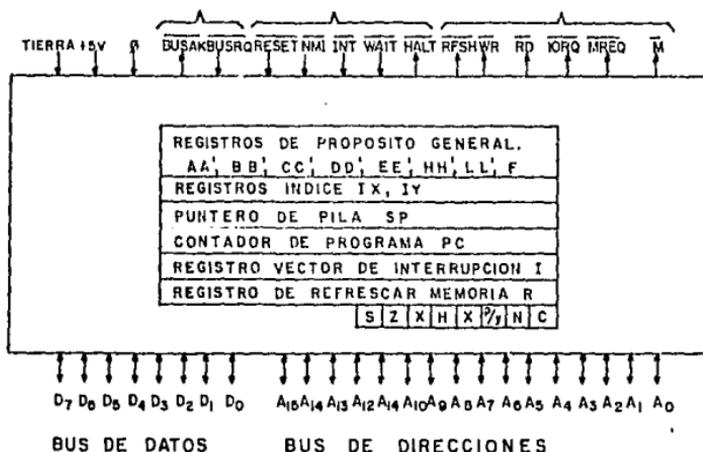


Figura 4.2.- Distribución de las terminales de la CPU Z-80.

Las operaciones de entrada/salida (I/O) se simplifican enormemente con el empleo del circuito integrado PIO, designado para realizar la interface directamente con la CPU. Tiene dos puertos de 8 "Bits" (A7- A0 y B-7 - B0) que se pueden programar individualmente para transferencias de entrada, de salida o ambas (bidireccional) de datos. Cada puerto cuenta además con dos señales de control que se utilizan para el protocolo entre el circuito PIO y el periférico, otra característica de la interface PIO es que la transferencia de datos entre los dispositivos periféricos y la CPU Z-80 se puede realizar por medio de interrupciones. Se tiene acceso a todos los registros de la PIO por la CPU de la misma forma que se tiene para las localidades de memorias; por lo tanto, todas las instrucciones de transferencia, lógicas y aritméticas empleadas con las memorias se pueden, utilizar con los datos de entrada/salida.

El sistema de control a utilizar para el sistema de combustible, tomando en cuenta las variables a emplear, debe contener por supuesto a la CPU, dos interfaces PIO, una RAM de 256 palabras de 8 "Bits", se requiere 3072 palabras de memoria EPROM, además de una interface PIO para manejo de teclado y visualizador (LED), al igual que una memoria ROM de 1024 palabras que contiene el programa monitor. El diagrama de bloques del sistema se muestra en la figura 4.3.

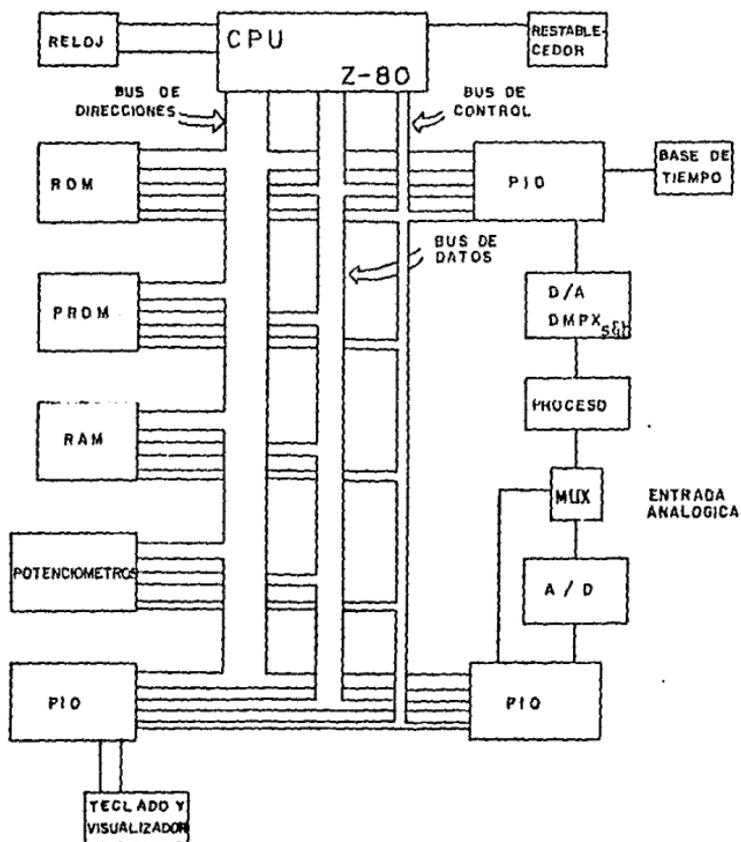


Figura 4.3.- Diagrama de bloques del controlador.

La CPU está conectada al resto del sistema por medio de tres buses: El BUS de direcciones, el BUS de datos y el BUS de control.

La memoria ROM contiene el programa monitor el cual permite la programación y la recepción de datos por medio del teclado visualizador.

La memoria EPROM contiene el programa de control incluyendo al algoritmo de control, la evaluación del algoritmo, rutinas de entrada/salida, y el manejo de interrupción.

En la memoria RAM se almacenan todos los datos y resultados intermedios, producto de los cálculos del algoritmo de control. Esta memoria es volátil, por lo que retiene los datos sólo cuando se encuentra energizada.

IV.2 CIRCUITOS DE ENTRADA Y DE SALIDA.

Para que el controlador tenga disponibilidad para usarse con equipos adicionales se ha especificado para que la entrada cumpla con el estándar internacional de 4-20 mA.

Se considera que la entrada debe ser estandarizada, pero antes que nada, se toma en cuenta que son tres variables que se van a controlar y solo una entrada al microprocesador, por lo que se requiere de un multiplexor para manejar 3 señales de entrada. Este multiplexor es operado por el mismo microprocesador.

Después de dicho multiplexor viene la red que hace posible conectar la entrada de 4-20 mA con el convertidor analógico/digital. En la figura 4.4. se muestra dicha red.

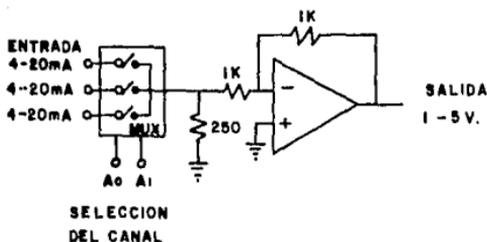


Figura 4.4.- Multiplexor y convertidor de corriente (4-20 mA) a tensión (1-5 V).

Con el objeto de que la información analógica pueda ser manejada por el microprocesador, el cual sólo acepta información digital - en forma de palabras hexadecimales de 8 "Bits", se usa un convertidor analógico/digital, el cual debe contar con ciertas características, como son: rapidez (50 μ S para cada conversión), lógica de control, salida con candado, con un rango de tensión de entrada mínimo de 0-5 V.

Ahora bien, cuando el microprocesador ya ha terminado en su ciclo de trabajo con la variable de proceso y proporciona la salida en forma digital (palabras de 8 "Bits"), surge la necesidad de disponer de un convertidor digital/analógico para que la señal analógica producida por éste, sea capaz de modificar el proceso en la planta. Tal convertidor debe contar con entradas inmunes al ruido,

con corriente a escala completa mejor que ± 1 LSB, y no linealidades mejores que $\pm 0.1\%$.

Hasta aquí se tiene disponible la señal analógica proporcionada por el convertidor digital/analógico pero es necesario acondicionarla para que su uso con equipo adicional no ofrezca dificultades.

De acuerdo a las especificaciones de diseño, la salida del controlador es de 4-20 mA, por lo que la señal que viene del convertidor digital/analógico deberá de introducirse a la red que se muestra en la figura 4.5 que es un convertidor de tensión a corriente.

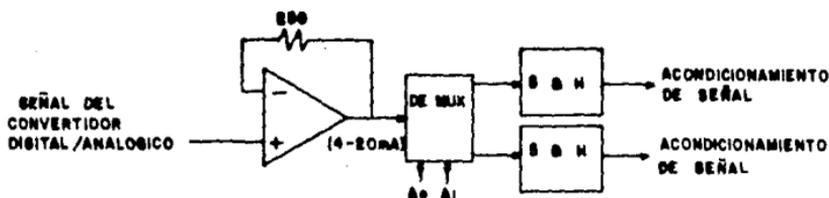
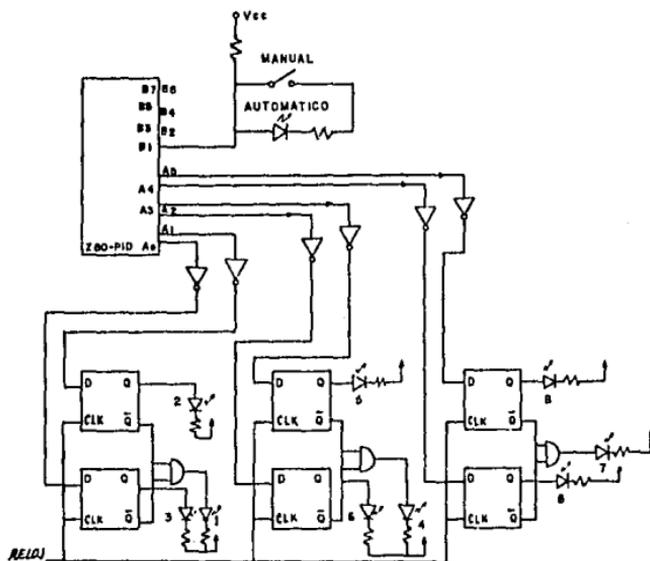


Figura 4.5.- Convertidor de tensión a corriente (4-20 mA), demultiplexor, y soporte de la señal.

Recordando que los elementos finales de control a modular son dos y que la salida del microprocesador es sólo una, se tendrán los valores para cada elemento final en forma secuencial, por lo que se hace necesario un demultiplexor que será controlado por el --

mismo microprocesador, y además para poder mantener la señal de salida para cada uno de los elementos finales de control durante el tiempo que se requiera para el nuevo muestreo, se sugiere utilizar circuitos de "Sample and Hold", en la figura 4.6 se ilustra las conexiones necesarias para que el equipo ejecute las funciones mencionadas en uno de los capítulos anteriores.



- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 1.- Temp. dentro de rango. | 6.- Abajo del límite inferior. |
| 2.- Sobrepasso del límite sup. | 7.- Viscosidad dentro de rango. |
| 3.- Abajo del límite inferior. | 8.- Arriba del límite superior. |
| 4.- Flujo dentro de rango. | 9.- Abajo del límite inferior. |
| 5.- Arriba del límite superior. | |

Figura 4.6.- Diagrama de conexiones de alarmas y del modo de operación.

IV.3

DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE.

Como se menciona en capítulos anteriores, para controlar la viscosidad del combustible que se suministra a los quemadores de una planta termoeléctrica, se requiere tomar en cuenta, tanto la temperatura, el flujo, así como la misma viscosidad del combustible.

Además de tener en cuenta las variables antes mencionadas para dicho controlador, éste debe de contar con las siguientes características:

- Entrada y salida estandarizadas (4-20 mA).
- Disponer de un sistema de alarma, para prevenir posibles valores del rango de operación, tanto los del proceso como los de los elementos de medición.
- Selector de control manual y automático.

A continuación se explica el diagrama de flujo, que se presenta en la figura 4.7, en el que se muestra la secuencia que sigue el programa principal para el control de viscosidad.

La programación se inicia introduciendo los valores de las constantes a utilizar por el programa (constantes de proporcionalidad, de integración, de punto de referencia, etc.); estas constantes son almacenadas en las localidades de la memoria de acceso aleatorio, por medio de teclado o por medio de la señal recibida por potenciómetros.

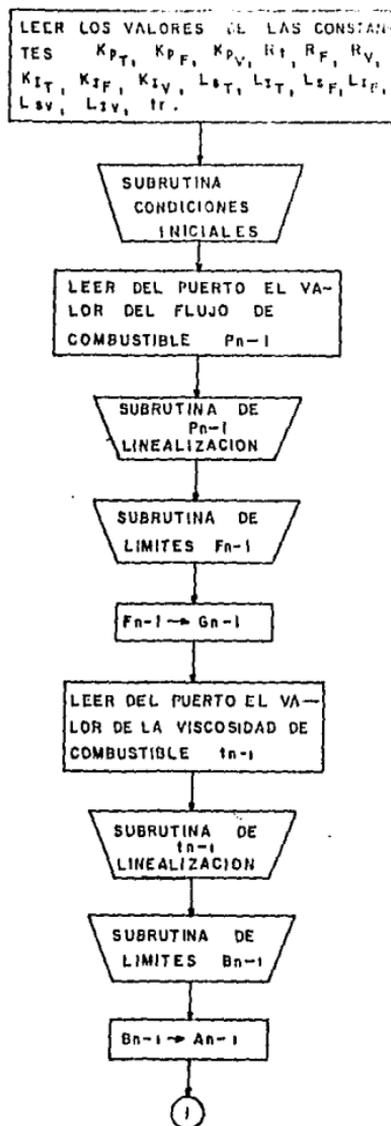


Figura 4.7.- Diagrama de flujo del programa principal.

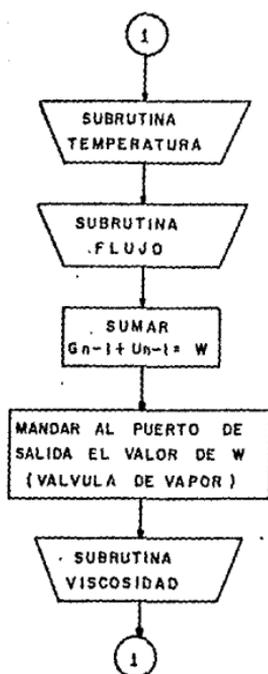


Figura 4.7.- Diagrama de flujo del programa principal (continuación).

Contando con las constantes en memoria se procede a realizar la subrutina de condiciones iniciales, en la cual se llevan a cabo ciertas operaciones, con el fin de obtener las condiciones necesarias para que el sistema de combustible empiece a operar en circunstancias favorables (todas las subrutinas se detallan en párrafos posteriores).

En el siguiente paso se lee una muestra del flujo de combustible- F_{n-1} , este valor se linealiza por medio de la subrutina correspondiente, y se revisa que dicho valor se encuentre dentro de los límites de operación a través de la subrutina de límites, se transfiere F_{n-1} a G_{n-1} .

Ahora se procede a leer una muestra de la viscosidad del combustible t_{n-1} , se linealiza, se revisa que el valor correspondiente a la muestra se encuentre dentro del rango de operación, y también como en el caso del flujo, este valor se transfiere a otra localidad de memoria asignándose ahora como A_{n-1} .

Estos últimos pasos, que se hacen para leer las señales de las variables, son con el fin de poder inicializar el control del sistema ya que para esto se requiere de las muestras de las variables.

Después de obtener los valores de las variables, se procede a efectuar la subrutina de temperatura por medio de la cual se va a controlar la temperatura del combustible, inmediatamente de realizar la subrutina de temperatura se lleva a cabo la subrutina de flujo la que va a controlar, junto con la subrutina de temperatura, el flujo de vapor que entra al calentador del combustible, que depende tanto del flujo de combustible como de la temperatura del mismo. -

Por lo que se suman los valores tanto de temperatura como de flujo del combustible, y después se envía esta señal al puerto de --- salida donde se encuentra el convertidor digital/analógico.

Finalmente se realiza la subrutina de viscosidad, por medio de la cual se controla la viscosidad del combustible, modificando la válvula de derivación del combustible frío. Al ejecutar esta subrutina se procede a ejecutar nuevamente las subrutinas de temperatura y flujo, para así realizar el control de viscosidad de una forma eficiente.

A continuación se describen las subrutinas que forman parte, del programa principal.

Subrutina de condiciones iniciales.

El diagrama de flujo de la subrutina de condiciones iniciales se -- muestra en la figura 4.8. Esta subrutina se inicia con una operación manual. Esta operación es abrir la válvula de derivación del vapor, para calentar las tuberías donde circulará el combustible. En el -- momento en que se haya abierto la válvula de derivación, se le indica al controlador de dicha operación, para que este tome el valor de la temperatura de la tubería y lo compare con el valor deseado, no -- será sino hasta cuando se alcance la temperatura requerida en la tubería, el momento en que se dé una señal de que las tuberías tienen la temperatura adecuada y entonces se realice una segunda operación manual, que es la de abrir la válvula de flujo de combustible. Después de esta operación se detectará si existe flujo de combustible en las tuberías; si ya existe se toma una lectura de la temperatura del combustible que está fluyendo, se linealiza este valor y se revi-

sa que este dentro del rango de operación para después transferirlo a Un-1.

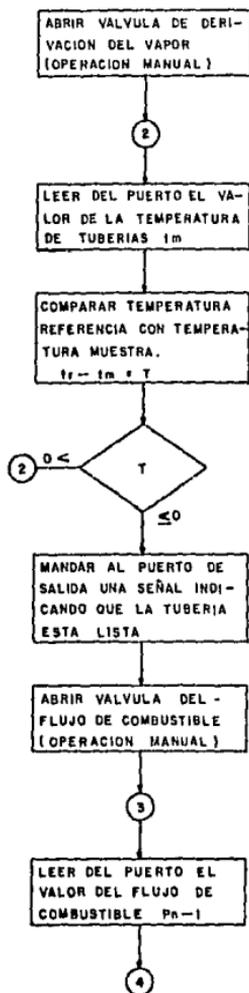


Figura 4.8.- Diagrama de flujo de la subrutina de condiciones iniciales.

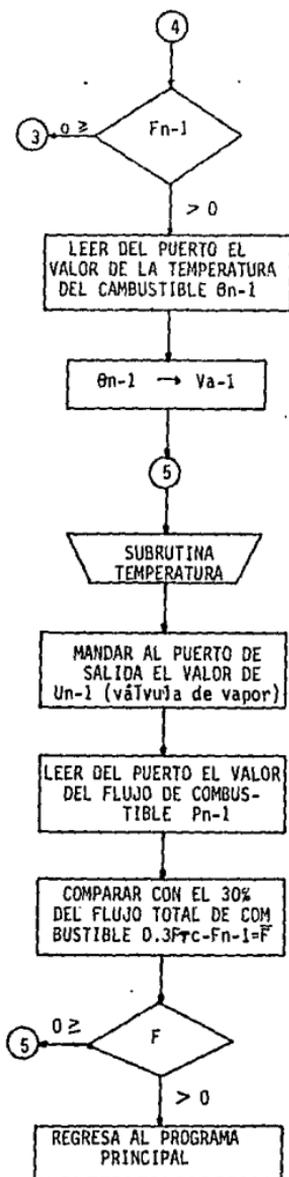


Figura 4.8.- Diagrama de flujo de la subrutina de condiciones iniciales. (continuación).

Dependiendo del valor de T_{n-1} , se va a modificar la válvula principal de vapor del calentador de combustible, por medio de la subrutina de temperatura. Con el fin de ir controlando la temperatura del combustible. Después de este paso se procede a tomar una muestra de la cantidad de flujo de combustible que existe en las tuberías, para más tarde compararlo con el 30% del flujo total de combustible, si este flujo no ha alcanzado dicha cantidad la subrutina se regresa a efectuar los mismos pasos a partir de la subrutina de temperatura pero en el caso dado que el flujo ya haya alcanzado el 30% del flujo total el siguiente paso sería regresar al programa principal a ejecutar su siguiente instrucción.

Subrutina de linealización para el flujo.

Se hace necesario introducir esta subrutina debido a que el medidor de flujo envía una señal no lineal, porque se trata de un instrumento de presión diferencial cuya fórmula que relaciona dicha presión diferencial con el flujo que se requiere medir es:

$$Q_v = k \sqrt{h}$$

Siendo K una constante que depende del fluido y de la tubería, h la presión diferencial producida por el elemento, y Q_v es el flujo del fluido. Entonces, la señal que se recibe como medición de flujo es realmente la de presión diferencial por lo que se requiere extraerle raíz cuadrada y multiplicarla por la constante K .

El diagrama de flujo de esta subrutina sería el que se muestra en la figura 4.9.

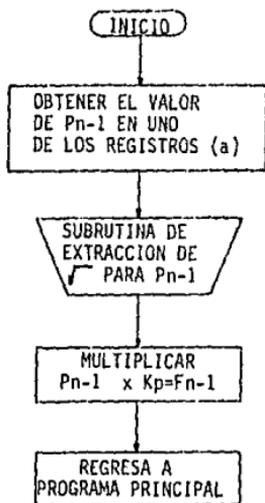


Figura 4.9.- Diagrama de flujo de la subrutina de linealización del - flujo.

Subrutina de extracción de raíz cuadrada.

Esta subrutina será capaz de calcular la \sqrt{a} donde $a \geq 0$, con la restricción de que en ciertos valores obtendrá una aproximación del valor de la raíz cuadrada, pero se tiene la opción de determinar la aproximación deseada. \square .

En la figura 4.10 se muestra el diagrama de flujo de esta subrutina. Se inicia proporcionando el valor de \sqrt{x} y del valor al que se le desea extraer la raíz cuadrada, a . El siguiente paso es establecer el intervalo inicial $[0, a]$, es decir, como límite inferior el 0 y como límite superior a ,

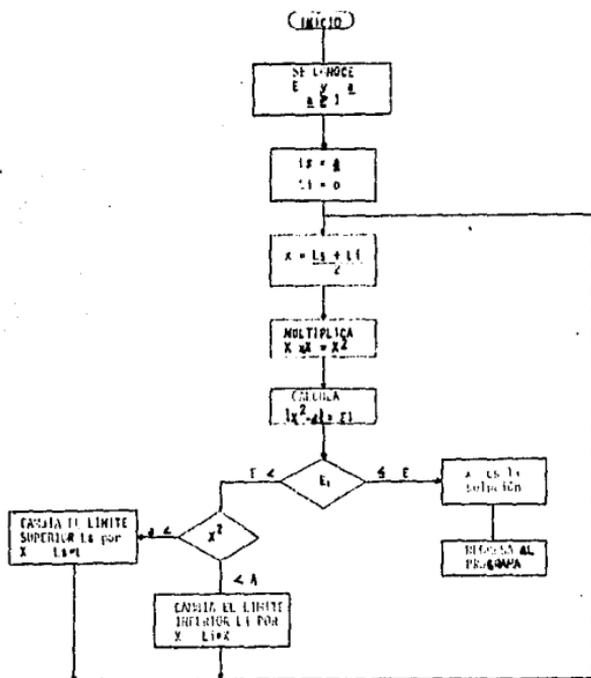


Figura 4.10.- Diagrama de flujo de la subrutina de raíz cuadrada.

El siguiente paso es calcular \underline{x} como un posible valor de \sqrt{a} , este se obtiene encontrando el valor intermedio del intervalo - dado por los límites antes mencionados, se calcula el cuadrado - del valor de \underline{x} y se compara ese resultado con a , como producto - de la comparación se obtiene ϵ_1 , cuyo valor se vuelve a comparar con el valor de la aproximación requerida, si ϵ_1 es mayor que la aproximación que se requiere entonces se procede a evaluar si \underline{x}^2 es mayor o menor que a ; si es mayor ahora el límite superior, - del intervalo anterior, tomará el valor de la última x ; en el caso de que sea \underline{x}^2 menor que a el límite inferior será el que tomó el valor de la última \underline{x} calculada; habiendo modificado el intervalo se procede a calcular una nueva \underline{x} con los límites actuales hasta que ϵ_1 , sea menor que ϵ ; cuando esto suceda significa que x es el valor de la \sqrt{a} quedando dicho valor almacenado en una dirección de memoria, para su empleo posteriormente. Habiéndose calculado la raíz cuadrada de a , la subrutina finaliza regresando a su programa de origen.

Subrutina de límites.

El objeto de esta subrutina es investigar si el valor de la variable se encuentra dentro del rango de operación. En la figura 4.11 se muestra el diagrama de flujo, teniendo los valores de límite inferior de la muestra se hace una comparación entre ambos, dependiendo del resultado de dicha comparación se activará una alarma siempre y cuando el valor de la variable se encuentre por debajo del límite inferior de no ser así, teniendo presente el valor del límite superior de la variable ahora se procede a comparar es-

te límite con el valor de la muestra, si este último es mayor que el del límite se activará la alarma indicando que el valor de la muestra está fuera de condiciones de operación, termina la subrutina regresando al programa que la solicitó,

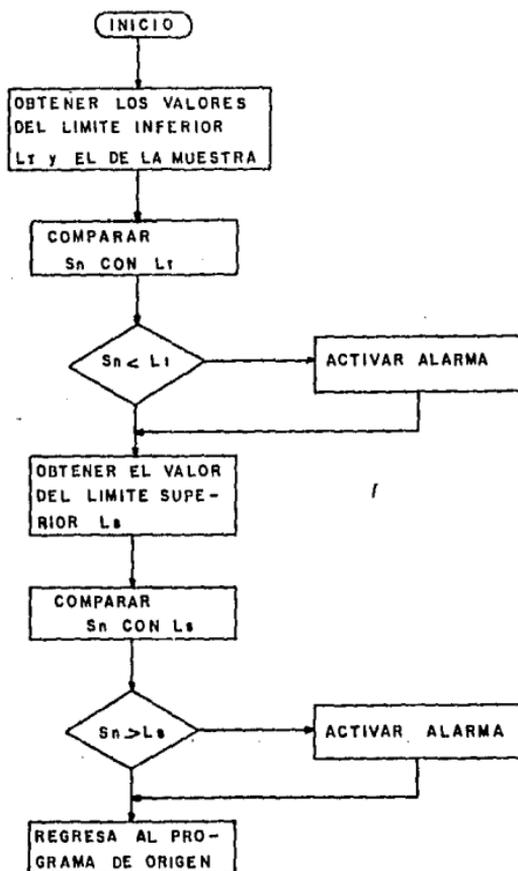


Figura 4.11.- Diagrama de flujo de la subrutina de límites.

Subrutina de linealización para la viscosidad.

Con esta subrutina se linealiza la señal que se tiene de viscosidad, debido a que se utiliza comúnmente el viscosímetro de SAYBOLT, cuyo principio se basa en un tubo capilar corto, midiendo el tiempo que tardan en fluir 60 cm^3 de fluido a través de dicho tubo. El tiempo en segundos es la lectura SAYBOLT. La ecuación que relaciona a la viscosidad con los segundos SAYBOLT es:

$$\nu = 0.0022 t - \frac{1.8}{t}$$

En la cual ν es la viscosidad cinemática, cuya unidad es el STOKE, y t es el tiempo en segundos.

La señal que se recibe, en realidad, es el tiempo t , por lo que se requiere la subrutina que relacione esta lectura con la que se desea de viscosidad. En la figura 4.12, se muestra el diagrama de flujo de dicha subrutina.

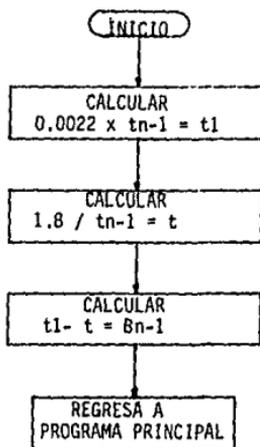


Figura 4.12.- Diagrama de flujo de la subrutina de linealización de viscosidad.

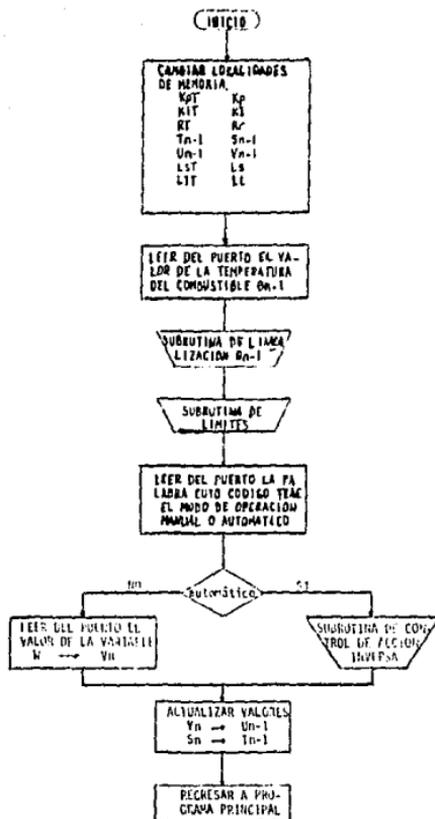


Figura 4.13.- Diagrama de flujo de la subrutina de temperatura.

Subrutina temperatura.

Esta subrutina se utiliza para mantener la temperatura constante - del combustible el tipo de control que se emplea es de acción proporcional + integral.

El diagrama de flujo que se sigue para la finalidad antes mencionada se muestra en la figura 4.13 cuyo primer bloque muestra que se requiere cambiar algunas localidades de memoria, esto se debe a que se va a utilizar una subrutina que es común para otras subrutinas, como son la de flujo y de viscosidad, esta es una forma de reducir el número de pasos de programación. El siguiente paso es obtener una muestra del valor de la temperatura actual, para que después se linealice, y se compare con los límites superior e inferior para comprobar que está dentro del rango de operación. La secuencia se sigue con la pregunta de que en que modo se encuentra operando el sistema, si es automático o manual. Ya sea que el modo de operación es manual se pregunta en qué valor se encuentra la señal de salida de control para la válvula, solo para actualizar valores, y en el caso que el modo de operación sea automático se procede a realizar la subrutina de control por medio de la cual se calcula el valor de la señal que se envía a la válvula, se actualizan valores y se regresa al programa que hizo la petición de esta subrutina.

SUBROUTINA DE LINEALIZACION PARA LA TEMPERATURA

Se requiere emplear una subrutina que linealice la señal de temperatura, debido a que el medidor que se utiliza para sensar dicha variable es un termopar, cuyo principio fué descubierto por Thomas Seebeck, y establece que para pequeños cambios en la temperatura - la tensión que produce el termopar, la tensión Seebeck e_{ab} , es linealmente proporcional a la temperatura T.

$$e_{ab} = \alpha T$$

Donde α , el coeficiente Seebeck, es la constante de proporcionalidad. Examinando las variaciones del coeficiente Seebeck, se puede ver que utilizando un factor de escala constante, limitará el rango de temperatura del sistema y su precisión. Se puede obtener una mejor precisión, tomando lecturas del voltímetro y consultando tablas. Una técnica más apropiada es aproximar los valores de la tabla utilizando una serie de potencias polinomial.

$$T = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n$$

Donde:

T = Temperatura

x = Tensión del termopar

a = Coeficiente polinomiales características de cada termopar.

n = Orden máximo del polinomial

Conforme se incremente n, la precisión del polinomio se mejora. Un número representativo es n = 9 para ± 1 °C de precisión. Se puede utilizar polinomios de menor orden para rangos de temperatura más -

pequeños para incrementar la velocidad del sistema.

En la figura 4.14 se muestra el diagrama de flujo para esta subrutina de linealización, cuya finalidad es convertir la señal recibida del termopar a temperatura por medio del polinomio antes descrito.

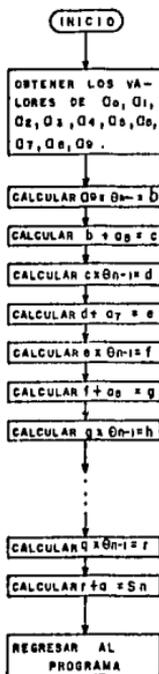


Figura 4.14.- Diagrama de flujo de la subrutina de linealización de la temperatura.

Subrutina flujo

Esta subrutina se utiliza no para controlar el flujo del combustible sino para controlar su temperatura dependiendo del flujo de -- combustible que se demande. Debido a que la temperatura del combustible varía si existe una variación en el flujo de dicho combustible. El modo de control que se emplea es de acción proporcional + integral.

En la figura 4.15 se muestra el diagrama de flujo que se sigue para este control, empezando por hacer un cambio en algunas localidades de memoria, las cuales se emplean en una subrutina que es común a - otras, terminando dicho cambio se procede a leer el valor de la muestra actual de flujo P_n , para después linealizar dicha señal y comprobar que esté dentro de rango de operación, comparándola con los límites superior e inferior de trabajo. Se continúa con la pregunta del modo a operar, es decir, si se operara en manual o en automático. En el caso de que el modo de operación sea manual, sólo se pregunta en que valor se encuentra la señal de salida de control para la válvula de flujo de vapor, y se actualizan valores; y si el modo de operación es automático se ejecuta la subrutina de control la cual calcula el - valor de la señal que se debe enviar a la válvula, dicho valor depende como se mencionó anteriormente, de la variación de flujo del com bustible; se actualizan valores y se regresa al programa donde se hizo la petición de esta subrutina.

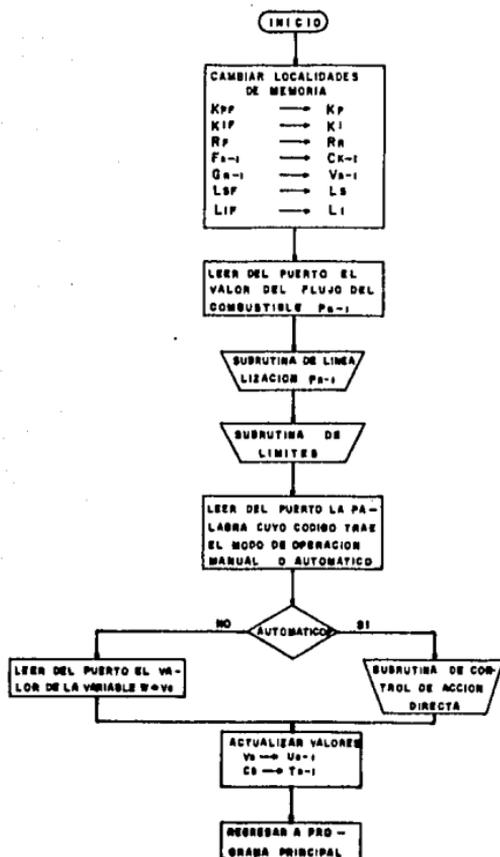


Figura 4.15.- Diagrama de flujo de la subrutina de flujo.

Subrutina viscosidad

En la figura 4.16 se muestra el diagrama de flujo de esta subrutina la cual tiene la finalidad de calcular la señal de salida de control para la válvula de derivación del combustible. Dicha señal va a depender de la viscosidad del combustible que se está suministrando. El modo de control que se emplea en esta subrutina es del tipo proporcional + integral, y se inicia por cambiar algunas localidades de memoria, debido a que éstas se emplean en una subrutina que es común a otras, el siguiente paso es leer el valor de la muestra actual de la viscosidad $tn-1$, para que después se linealice y se investigue si dicho valor se encuentra dentro del rango de operación, comparándolo con los límites superior e inferior de trabajo. El siguiente paso es investigar el modo de operación en que se encuentra el sistema, es decir, si se encuentra trabajando en automático o en manual. En el caso de que el modo de operación sea manual, solamente se pregunta sobre el valor en que se encuentra la señal de salida que controla la válvula de derivación del combustible, se actualizan valores y se regresa al programa principal; y en el caso de que el modo de operación sea automático se ejecuta la subrutina de control en la cual se calcula el valor de la señal que se debe enviar a la válvula de derivación del combustible, dicha señal se envía al puerto de salida para que realice su función. Se actualizan valores y finalmente se regresa al programa principal.

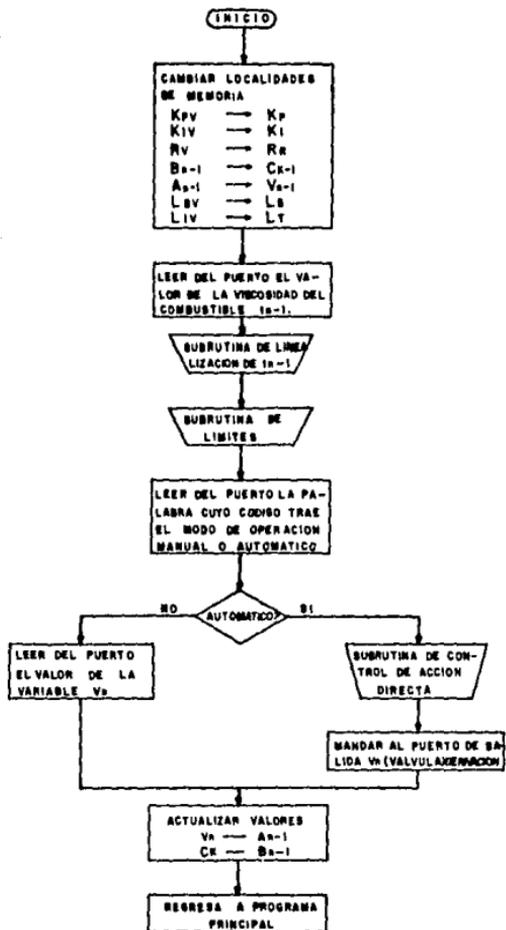


Figura 4.16.- Diagrama de flujo de la subrutina de viscosidad.

Subrutina de control

El diagrama de flujo de la subrutina de control se muestra en la figura 4.17. Dicha subrutina se basa en el algoritmo de control mencionado en el capítulo III utilizando solamente el modo de control proporcional + integral, cuya ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$U_k = K_p (C_{k-1} - C_k) + K_i (r_k - C_k) + U_{k-1}$$

para acción inversa y:

$$U_k = K_p (C_{k-1} - C_k) - K_i (r_k - C_k) + U_{k-1}$$

para acción directa

El diagrama de flujo de esta subrutina es parecido al ya descrito en el capítulo III con la diferencia de que esta subrutina no utiliza acción derivativa. Se inicia calculando la diferencia entre el valor de la muestra actual C_k menos el valor de la muestra anterior C_{k-1} ; al resultado de esta diferencia se le llama R_1 a este se le multiplica por K_p para obtener R_2 . Después se hace la diferencia entre la señal de referencia r_k y la señal de la muestra actual C_k y así se calcula R_3 y este resultado multiplicado por K_I proporciona el valor de R_4 . El siguiente paso es preguntar si R_3 y R_4 son positivos o negativos y además se cuestiona sobre el tipo de acción, si es directa o inversa, estas preguntas son para sumar algebraicamente R_2 y R_4 y el resultado de esta operación será R_5 , este valor se suma algebraicamente con U_{k-1} para obtener U_k . Terminando de esta forma la subrutina para después regresar al programa que hizo la petición de ésta.

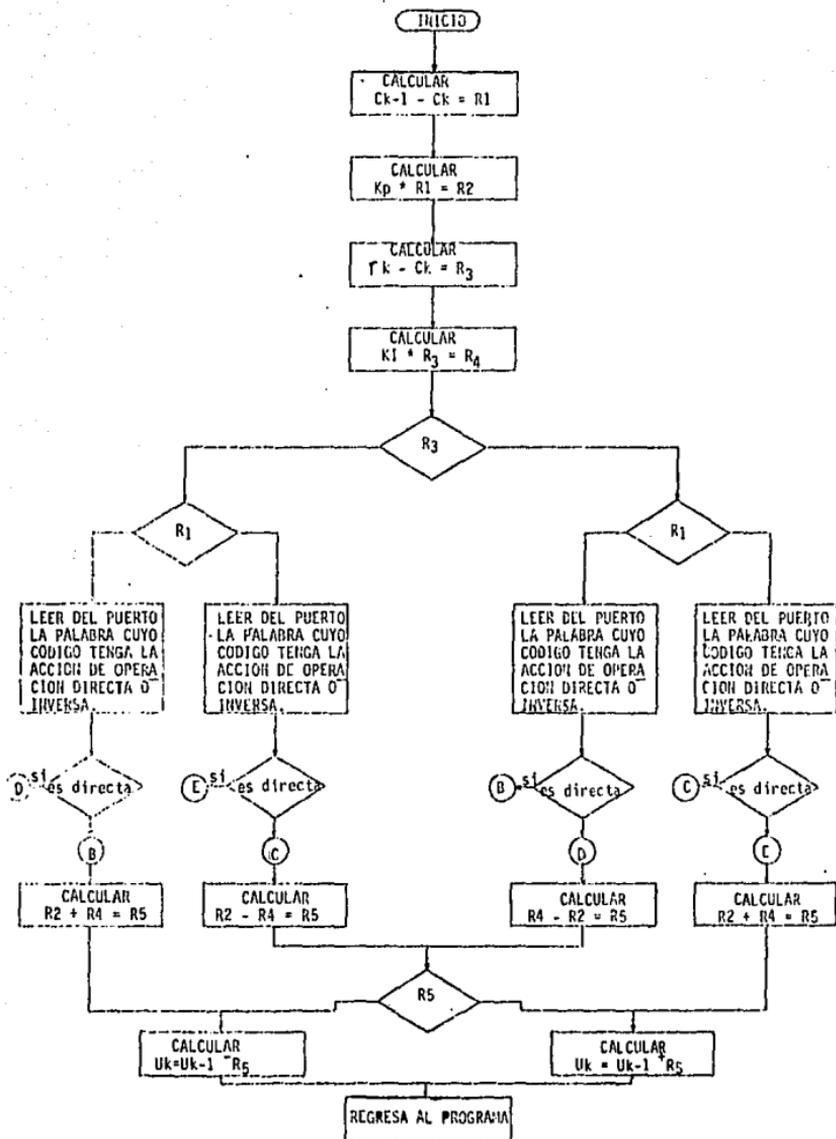


Fig. 4-17 Diagrama de Flujo de la Subrutina de Control

CONCLUSIONES

Al desarrollar la especificación general y diagramas de flujo del controlador del sistema de combustible se concluyó que deberá constar de las siguientes partes, las cuales fueron especificadas por separado:

- Unidad Central de Procesos (CPU) - Z-80 de Zilog
- Tres interfaces de E/S en paralelo con dos puertos de 8 --- bits cada una - Z-80 PIO
- Memoria RAM - 256 palabras X 8 bits
- Memoria de Lectura ROM - 1024 palabras X 8 bits
- Memoria Programable PROM - 3072 palabras X 8 bits
- Multiplexor para 3 señales de entrada analógicas 0-5 V
- Convertidor de corriente-tensión [4-20 mA @ 1-5 V]
- Convertidor Analógico-Digital - 8 bits, 0-5 V de entrada
- Convertidor Digital-Analógico - 8 bits, 0-5 V de salida
- Convertidor de tensión--corriente [1-5 V @ 4-20 mA]
- Demultiplexor de dos salidas analógicas
- Dos circuitos "Sample & Hold"
- Sistema de Alarmas

Además deberá contar con los transmisores y elementos finales de control para señales estandarizadas de 4-20 mA.

El algoritmo de control PID desarrollado en el microcomputador MKE-Z80, es lo suficientemente versátil como para poder ser utilizado en el control de las variables del Sistema de Combus

tible -temperatura y viscosidad. Los parámetros de ajuste para el control de las dos variables se deberán proponer, conociendo las respuestas de los sistemas de temperatura y de viscosidad.

En la actualidad, se utiliza la computadora como herramienta de apoyo al diseño, con el objetivo de comprobar las estructuras y los ajustes propuestos, antes de colocarlos en las plantas. Para el diseño de estructuras de control de una unidad termoeléctrica se requiere contar con un modelo matemático tal que la represente de manera funcional. A partir de este modelo es posible instalar el control propuesto en esta tesis para que, asociados el modelo y el controlador, se tenga la representación total del Sistema de Combustible y así poder observar su comportamiento.

El producto de la simulación es un conjunto de valores numéricos de aquellas variables que se han definido como las más importantes del sistema. Para observarlos con eficiencia se recurre a la graficación en pantalla, y como ayuda al análisis pueden definirse las zonas de validez de la respuesta mediante valores como sobrepaso, tiempo de elevación, tiempo de asentamiento, etc., de tal manera que rápidamente puede verse si la variable de interés cumple con lo especificado. Además del análisis visual, de las curvas de respuesta sobre las variables que definen el comportamiento de la unidad termoeléctrica, es muy importante utilizar técnicas menos heurísticas para determinar las características dinámicas del proceso y poder diseñar esquemas de regulación y control que mejoren globalmente su comportamiento. Un ejemplo son los

análisis en el dominio de la frecuencia que permiten tener información sobre conceptos, tales como ancho de banda y márgenes de ganancia y fase, que hablan de la validez de una solución.

Puesto que las unidades termoelectricas presentan condiciones y características como:

- Gran acoplamiento entre algunas variables,
- no linealidades,
- efectos de envejecimiento, corrosión, etc., que hacen variar su comportamiento, y
- ruidos en medición y fenómenos aleatorios, etc.,

que limitan el funcionamiento satisfactorio del control tradicional, dentro de la simulación deben incorporarse algunas técnicas de control avanzado que mejoren su capacidad de control en este entorno.

Una vez obtenidos los parámetros de ajuste y teniendo el controlador ya especificado, se podrá desarrollar físicamente el control del Sistema de Combustible. Contando así con una solución de uno de los problemas fundamentales del Sistema de Combustión, influyen do favorablemente en la eficiencia de la generación eléctrica; y de esta forma se cumple con otro de los objetivos planteados en un principio al desarrollar una tecnología propia.

APENDICE A.

Ziegler y Nichols [15] presentaron sus fórmulas de ajuste en dos formatos diferentes, el método de respuesta transitoria y el método de sensibilidad última. Del método de la respuesta transitoria se obtienen dos factores característicos del proceso, de los cuales los ajustes del controlador se calculan con ecuaciones simples, estos dos factores son R y L , donde R es el valor de la pendiente de la recta tangente máxima que sea posible trazar sobre la curva de la respuesta escalón del proceso, y L es el tiempo al cual la recta tangente cruza el eje del tiempo (cer fig. A.1)

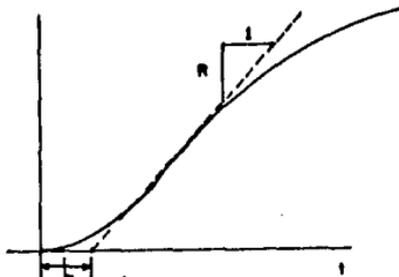


Figura A.1.- Respuesta al escalón unitario de un proceso.

En el método de sensibilidad última, los dos parámetros que se utilizan son K_u y P_u , donde K_u es la ganancia de un controlador proporcional que lleva al proceso al límite de su estabilidad, P_u es el período de la oscilación resultante.

Las formas canónicas de la ley de control del tiempo continuo lineal son:

Para control proporcional:

$$G_c(s) = K_c$$

Para control proporcional + integral:

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Para control proporcional + integral + derivativo:

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Los parámetros de control en estas leyes son:

K_c = Ganancia del controlador.

T_i = Constante de tiempo de la acción integral.

T_d = Constante de tiempo de la acción derivativa.

Las fórmulas de ajuste dadas por Ziegler y Nichols, se muestran en la tabla A.1.

ESTA
TESIS
NO DEBE
SALIR DE LA
BIBLIOTECA

	K_c	$1/T_i$	T_d	K_c	$1/T_i$	T_d
P	$\frac{1}{RL}$			0.5 K_u		
PI	$\frac{0.9}{RL}$	$\frac{0.5}{L}$		0.45 K_u	$\frac{1.2}{P_u}$	
PID	$\frac{1.2}{RL}$	$\frac{0.5}{L}$	0.5 L	0.6 K_u	$\frac{2}{P_u}$	$\frac{P_u}{8}$

METODO DE RESPUESTA
TRANSITORIA

METODO DE SENSIBILIDAD
ULTIMA.

Tabla A.1.- Reglas de ajuste óptimo para las leyes de control lineales de tiempo continuo.

Las reglas anteriores provienen de una búsqueda de los parámetros de control que facilitarían un amortiguamiento adecuado del modo de oscilación dominante en lazo cerrado y un valor razonablemente pequeño del valor absoluto del error integrado para una entrada escalón. Las reglas son fundamentalmente empíricas más que alguna optimización teórica.

APENDICE B

Micro kit educacional MKE Z-80.

El MKE es una microcomputadora integrada en una sola placa de circuito impreso.

Cuenta con un teclado y un desplegado pseudo alfanumérico.

El programa monitor que maneja los recursos de la microcomputadora MKE Z-80 está contenido en una EPROM de 4 k BYTES que mediante el teclado - permite al usuario:

- Examinar localidades de memoria.
- Modificar localidades de memoria.
- Insertar programas.
- Examinar cualquiera de los 20 registros internos del Z-80.
- Modificar cualquiera de los 22 registros internos del Z-80.
- Examinar el contenido de los puertos de entrada.
- Modificar el contenido de los puertos de salida.
- Correr programas.
- Inicializar el sistema.
- Simular solicitudes de WAIT a la CPU.
- Simular solicitudes de interrupción a la CPU.
- Calcular desplazamiento para saltos relativos.
- Mover bloques de memoria.
- Comparar dos áreas de memoria.
- Solicitar desplegado automático de memoria.
- Solicitar desplegado automático de registros.
- Programar EPROMS (requiere hardware exterior)

La unidad central de proceso del MKE Z-80 es el microprocesador Z-80 de 8 "Bits" con 158 instrucciones, 22 registros internos y 10 diferentes modos de direccionamiento.

Especificaciones del MKE Z-80

Procesador

- Z-80
- Microprocesador de 8 Bits.
- 158 instrucciones
- 22 registros internos
- 10 modos de direccionamiento

Memoria

- EPROM: 4 k bytes (expansible a 8 K bytes).
2732.
- RAM: 3 K bytes.
2114
- Direcciones:
EPROM 0000 H- 0FFFH
EPROM 1000 H- 1FFFH (opcional)
RAM 2000 H - 2BFFH

Puertos E/S

- Paralelo: 48 canales programables como entradas o salidas.
- Nota: El MKE Z-80 utiliza 15 de los canales y le deja 33 al usuario.
8255.

Interfaces

- 2 Conectores de 26 terminales con:
 - 33 canales (E/S) TTL
 - 2 canales (S) colector abierto
 - Reloj del sistema (S) TTL
 - Interrupción NMI (E) TTL
 - Wait (E) TTL
 - Reset (E) TTL
 - Referencia (Tierra)

Interrupciones

- Un solo nivel de interrupción (NMI)

Software

- Monitor HOLA y MICRO KITS grabado en EPROM 2732, con dirección 000H-OFFFH

Comandos

- COM 1:

MEM Memoria

REG Registros

E/S Entrada/Salida

- COM 2:

CDR Cálculo de desplazamiento relativos

MBM Mueve bloques de memoria

CM Compara memoria

DAM Desplegado automático de memoria

DAR Desplegado automático de registros

PM Programa memorias

Puntos de interrupción por programa

- 7 puntos de interrupción por programa
(Break points) RST 08H - RST 38H

Teclado

- De membrana, contactos de oro
23 teclas simuladas.

APENDICE C

Tabla para Transformadas Z.

	$X(z)$	$x(t)$ or $x(k)$	$X(z)$
1	1	$\delta(t)$	1
2	e^{-sT}	$\delta(t - kT)$	z^{-k}
3	$\frac{1}{s}$	1(t)	$\frac{z}{z-1}$
4	$\frac{1}{s^2}$	t	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$
5	$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}	$\frac{z}{z-e^{-aT}}$
6	$\frac{a}{s(s+a)}$	$1 - e^{-at}$	$\frac{(1 - e^{-aT})z}{(z-1)(z - e^{-aT})}$
7	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	sen ωt	$\frac{z \text{ sen } \omega T}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$
8	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$	cos ωt	$\frac{z(z - \cos \omega T)}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$
9	$\frac{1}{(s+a)^2}$	te^{-at}	$\frac{Tze^{-aT}}{(z - e^{-aT})^2}$
10	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \text{ sen } \omega t$	$\frac{ze^{-aT} \text{ sen } \omega T}{z^2 - 2ze^{-aT} \cos \omega T + e^{-2aT}}$
11	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \text{ cos } \omega t$	$\frac{z^2 - ze^{-aT} \cos \omega T}{z^2 - 2ze^{-aT} \cos \omega T + e^{-2aT}}$
12	$\frac{2}{s^2}$	t^2	$\frac{T^2 z(z+1)}{(z-1)^3}$
13		a^k	$\frac{z}{z-a}$
14		$a^k \text{ cos } k\pi$	$\frac{z}{z+a}$

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Creus Antonio, INSTRUMENTACION INDUSTRIAL, Publicaciones Marcombo S. A., 1981.
- 2.- Davis T. P., Good E. M., Smith C. A., "Fuel Viscosity Control", Instrumentation Technology, August 1975, pp 41-44.
- 3.- Dooley Daniel J., DATA CONVERSION INTEGRATED CIRCUITS, IEEE Press, 1980.
- 4.- Hunter Ronald, AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEMS, Prentice-Hall Inc., 1978.
- 5.- López A. M., Murrill P. W., and Smith C. L., "Tuning PI and PID Digital Controllers", Instruments and Control Systems, vol. 42, Feb. 1969, pp 89-95.
- 6.- Nichols Joseph C., Nichols Elizabeth A., Rong Peter R., MICROPROCESADOR Z-80, PROGRAMACION E INTERFACES, Publicaciones Marcombo S. A., 1984.
- 7.- Nichols Joseph C., Nichols Elizabeth A., Rong Peter R., PROGRAMACION DEL MICROPROCESADOR Z-80, Publicaciones Marcombo S.A., 1982.
- 8.- Ogata Katsuhito, INGENIERIA DE CONTROL MODERNA, Editorial Prentice-Hall Internacional, 1980.
- 9.- Saucedo Flores S., Rodríguez García J. L., Apuntes de CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS, Instituto Politécnico Nacional, ESIME 1980.
- 10.- Streeter V. L., FLUID MECHANICS, McGraw-Hill Book Co., 1971.
- 11.- Takahashi Y., Schan C., Auslander M., "Parameter einstellung bei linearen DDC Algorithmen", Regelenstechnik und Prozess-Datenverarbeitung, vol. 19, N. 6, 1971, pp 327-244.
- 12.- Takahashi Y., Rabins M. S., Auslander D., INTRODUCING SYSTEMS AND CONTROL, McGraw-Hill Book Co., 1974.

- 13.- Varios autores bajo la coordinación de Mompin Poblet J., - - MICROPROCESADORES Y MICROCOMPUTADORES, Publicaciones Marcombo S.A., 1981.
- 14.- Zaks Rodney, MICROPROCESADORES, Publicaciones Marcombo S.A., - 1980.
- 15.- Ziegler J. G., Nichols N. B., "Optimum Settings for Automatic Controllers", Transactions of de ASME, Vol. 64, Nov. 1942, pp. 759-768.