

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

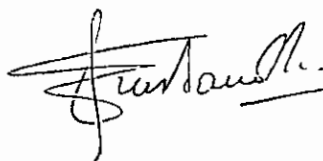
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
SISTEMA DE CONTROL
DE NIVEL DE LIQUIDOS"

DIEGO SANTIAGO BENITEZ MEJIA

TESIS PREVIA A LA OBTENCION
DEL TITULO DE INGENIERO
EN ELECTRONICA Y CONTROL

QUITO, NOVIEMBRE 1994

Certifico que el presente trabajo
ha sido elaborado en su totalidad
por el señor Diego Santiago Benítez
Mejía.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Patricio Burbano Romero". The signature is stylized with a large initial "P" and a horizontal line extending across the middle.

ING. PATRICIO BURBANO ROMERO
Director de Tesis

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios y a todas las personas que de una u otra manera han colaborado en mi formación, y de manera muy especial al señor Ingeniero Patricio Burbano, sin cuya dirección y sabios consejos, no hubiese sido posible culminar este trabajo.

CONTENIDO

CAPITULO I: INTRODUCCION	Páginas
1.1 Introducción.....	1
1.2 Sistema de control de nivel de líquidos.....	2
1.3 Esquema de control.....	4
CAPITULO II: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO	
2.1 Diseño del prototipo de control de nivel de líquidos.....	6
2.1.1 Modelo y pruebas de simulación realizadas para determinar las dimensiones del prototipo.....	6
2.2 Sensor y acondicionamiento de señal.....	15
2.2.1 Descripción general del sensor SCX01DNC de la casa SENSYSM.....	17
2.2.2 Características del sensor de presión SCX01DNC.....	20
2.2.3 Acondicionamiento de señal.....	21
2.2.3.1 Discusión general de la tarjeta SCX-EB.....	21
2.2.3.2 Diseño de la tarjeta SCX-EB.....	24
2.2.3.3 Dimensionamiento de la resistencia R_T	31
2.3 Bomba y acondicionamiento de señal.....	32
2.3.1 Acondicionamiento de señal.....	33
2.4 Válvulas de control de flujo.....	38
2.5 Construcción del prototipo.....	40
2.6 Módulo de control.....	41
2.6.1 Circuitos de señalización.....	44
2.6.2 Fuentes de poder.....	46
2.6.2.1 Fuente para el circuito de control.....	46
2.6.2.2 Fuente para el circuito de potencia de la bomba	47

CAPITULO III: DISEÑO DEL CONTROL

3.1 Control análogo.....	48
3.1.1 Consideraciones previas para el diseño del controlador PID análogo.....	48
3.1.2 Modelación de la planta a compensar.....	49
3.1.2.1 Función de transferencia de la bomba centrífuga.....	49
3.1.2.2. Función de transferencia del sensor de presión diferencial más el acondicionamiento de señal.....	50
3.1.2.3 Función de transferencia del prototipo de tanques acoplados.....	51
3.1.3 Diseño del controlador PID análogo.....	52
3.1.3.1 Sistema de primer orden.....	52
3.1.3.2 Sistema de segundo orden.....	53
3.1.3.3 Sistema de tercer orden.....	55
3.1.4 Circuito implementado para el controlador PID análogo.....	56
3.2 Control digital.....	58
3.2.1 Software desarrollado para control.....	59
3.3 Pruebas de simulación.....	61

CAPITULO IV: RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 Resultados experimentales.....	66
4.1.1 Control manual.....	66
4.1.2 Comprobación del funcionamiento del driver de dc y de la bomba de inmersión.....	66
4.1.3 Comprobación de los interruptores de nivel.....	67
4.1.4 Control de nivel en forma manual.....	67
4.1.5 Pruebas de funcionamiento y calibración del sensor de nivel	68
4.2 Control análogo.....	68
4.2.1 Sistema de primer orden.....	69
4.2.2 Sistema de segundo orden.....	73
4.2.3 Sistema de tercer orden.....	74

4.3 Control digital.....	75
4.3.1 Control digital utilizando el equipo KETHLEY 500A.....	80
4.4 Conclusiones.....	83
4.5 Recomendaciones.....	84

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

A Manual de usuario del equipo

B Manual de calibración del equipo

C Manual de usuario del programa de control

D Fotografías del equipo en operación

E Copias de las especificaciones de los componentes utilizados

F Listado del programa de las subrutinas para control de nivel de líquidos

1.1 INTRODUCCION

El presente trabajo tiene por objetivo diseñar y construir un prototipo para realizar el control de nivel de líquidos tanto de manera analógica como digital, orientado a su utilización en prácticas de control automático sobre un prototipo a escala que representa un sistema real.

Se busca producir un equipo de laboratorio de fácil manejo y mantenimiento; y, que permita entender de manera conveniente los problemas de control de nivel de líquidos en procesos industriales. Cabe mencionar que se escogió este tipo de proceso para implementar el control, pues se trata de un sistema con constantes de tiempo relativamente grandes lo que lo hace muy útil para ensayos, a pequeña escala en laboratorio.

El equipo didáctico a construir permitirá realizar un estudio práctico de las diferentes técnicas de control aplicadas a un sistema real.

El equipo en sí, consta de un prototipo de nivel de líquidos que constituye la planta, formada por tres tanques acoplados, para representar sistemas de primero, segundo y tercer orden, sobre los cuales se va a trabajar, y un módulo de control principal dividido en dos submódulos, analógico y digital, que es el encargado de realizar el control sobre la planta, a fin de cumplir con los requerimientos asignados al sistema.

Una de las características del equipo es poseer fuentes de alimentación propias tanto para la circuitería de control como para el circuito de potencia, lo que le dá cierta autonomía de trabajo. Sin embargo, para realizar el control digital del prototipo se requiere de un sistema de adquisición de datos y de un computador que deben ser conectados al módulo principal de control.

La tesis empieza en el Capítulo I con la parte introductoria del sistema de control de nivel de líquidos a construir, en donde se exponen de manera general las características principales de que dispondrá el sistema.

A continuación, en los Capítulos II y III se presenta de manera detallada el diseño y construcción de las diferentes partes que conforman el prototipo de control de nivel de líquidos, así como también de las partes concernientes a los módulos de control a ser implementados en el presente trabajo.

Finalmente, en los Capítulos III y IV se dedica una sección a realizar pruebas de simulación y análisis de pruebas del equipo bajo distintos esquemas implementados, para obtener una evaluación concreta del funcionamiento del prototipo y las conclusiones pertinentes.

1.2 SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS

Para realizar el control de nivel de líquidos, en el presente trabajo, se ha previsto la utilización de un prototipo de tres tanques acoplados a través de válvulas que permite simular sistemas de primero, segundo y tercer orden si se utiliza un tanque, dos tanques y tres tanques respectivamente.

La parte de control contiene dos tipos de controladores electrónicos exclusivamente. Un control de tipo análogo que cuenta con un controlador del tipo PID y un controlador de tipo digital que se sirve de un sistema de adquisición y salida de datos, el cual está conectado a un computador digital en donde se realiza el control por software.

El controlador sea análogo o digital, operará sobre una señal de error, la cual es la diferencia instantánea entre el valor deseado o de referencia y el valor actual o medido, enviando el resultado hacia un actuador (bomba de Dc) que maneja la variable caudal de entrada del lazo de control, con el objeto de hacer que la salida tienda, en lo posible, a la señal de referencia.

Para el trabajo como sistema de primer orden, es decir un solo tanque, se utilizará un control del tipo PI dadas las características dinámicas del sistema de control de nivel de líquidos. En este caso, la parte derivativa del controlador PID no se utilizará pues el sistema no presenta una adecuada respuesta.

Si se la utiliza, se debe hacerlo en mínimo grado para fines didácticos, o en funcionamiento como sistema de segundo o tercer orden; esto es, de dos o tres tanques acoplados respectivamente .

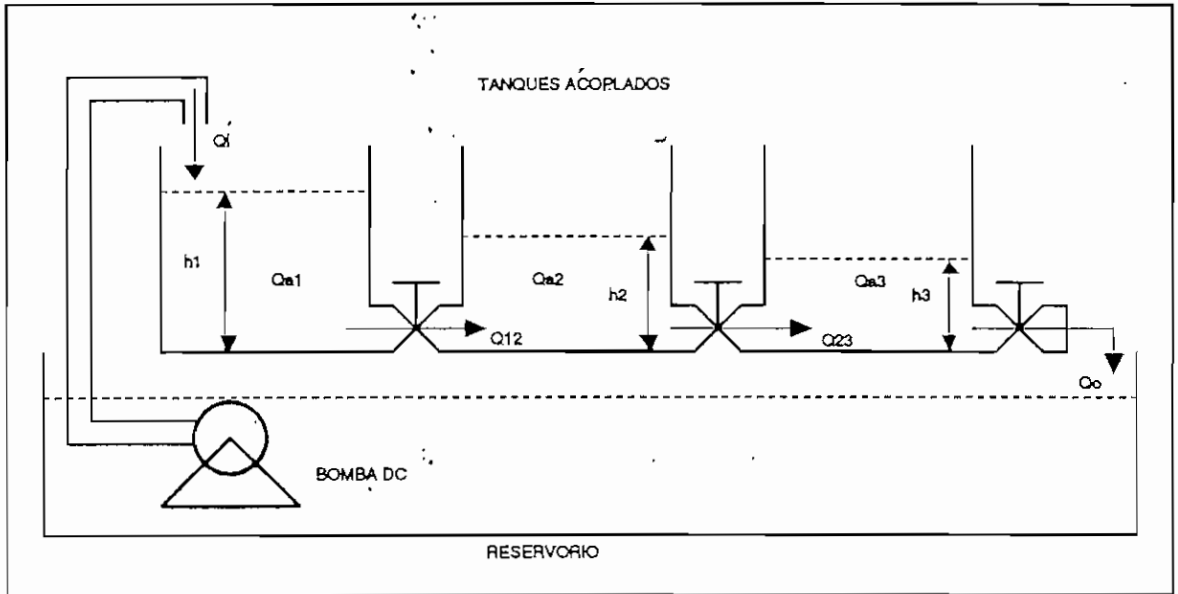


FIGURA 1.1 PROTOTIPO DE TANQUES ACOPLADOS.

La señal de realimentación al sistema de control proviene de un sensor de presión diferencial de estado sólido que sensa indirectamente el nivel de líquido en el último tanque del prototipo, para controlar la variable de salida del lazo de control, que en este caso será la altura o nivel del líquido en el último tanque. Se utilizará un sistema de bombeo de líquido dentro del tanque, como lo muestra la figura 1.1 .

En resumen, el equipo cuenta con dos maneras eficientes de realizar el control y que ofrecen un medio didáctico a través del cual se puede analizar y experimentar con la variable a tratar dentro del proceso.

1.3 ESQUEMA DE CONTROL

El esquema de bloques simplificado con el que se realizará el control del prototipo de control de nivel de líquidos se muestra en la figura 1.2 en donde se ilustra el lazo principal de control, al cual ingresan las señales correspondientes al nivel de referencia y al nivel real, provenientes de los acondicionadores respectivos, la diferencia de dichas señales da como resultado la señal de error del sistema que es con la que se va a trabajar.

En cascada se tiene el módulo de control PID análogo que tiene posibilidad de trabajar en la configuración de controlador tipo P, PI, o PID de acuerdo a como se escoja. En caso de que no se desee trabajar con el controlador análogo, se puede conectar en línea al computador digital mediante un sistema de adquisición y salida de datos. La función tanto del controlador análogo como del digital es compensar el sistema para tener una adecuada respuesta transitoria como en estado estable.

La señal proveniente del controlador, ya sea el análogo o el digital, va a un actuador que en este caso es un drive y bomba de DC, encargado de manejar el sistema de bombeo de líquido dentro del tanque, de tal manera de variar el caudal de entrada a la planta.

La señal de salida de la planta, que en este caso es el nivel o altura del líquido dentro del tanque, es sensada de manera indirecta a través de un sensor de presión diferencial de estado sólido y realimentada luego de un acondicionamiento adecuado al lazo principal de control.

Cada uno de los bloques mostrados en la figura 1.2 se ilustrará con mayor detalle en el desarrollo de la presente tesis.

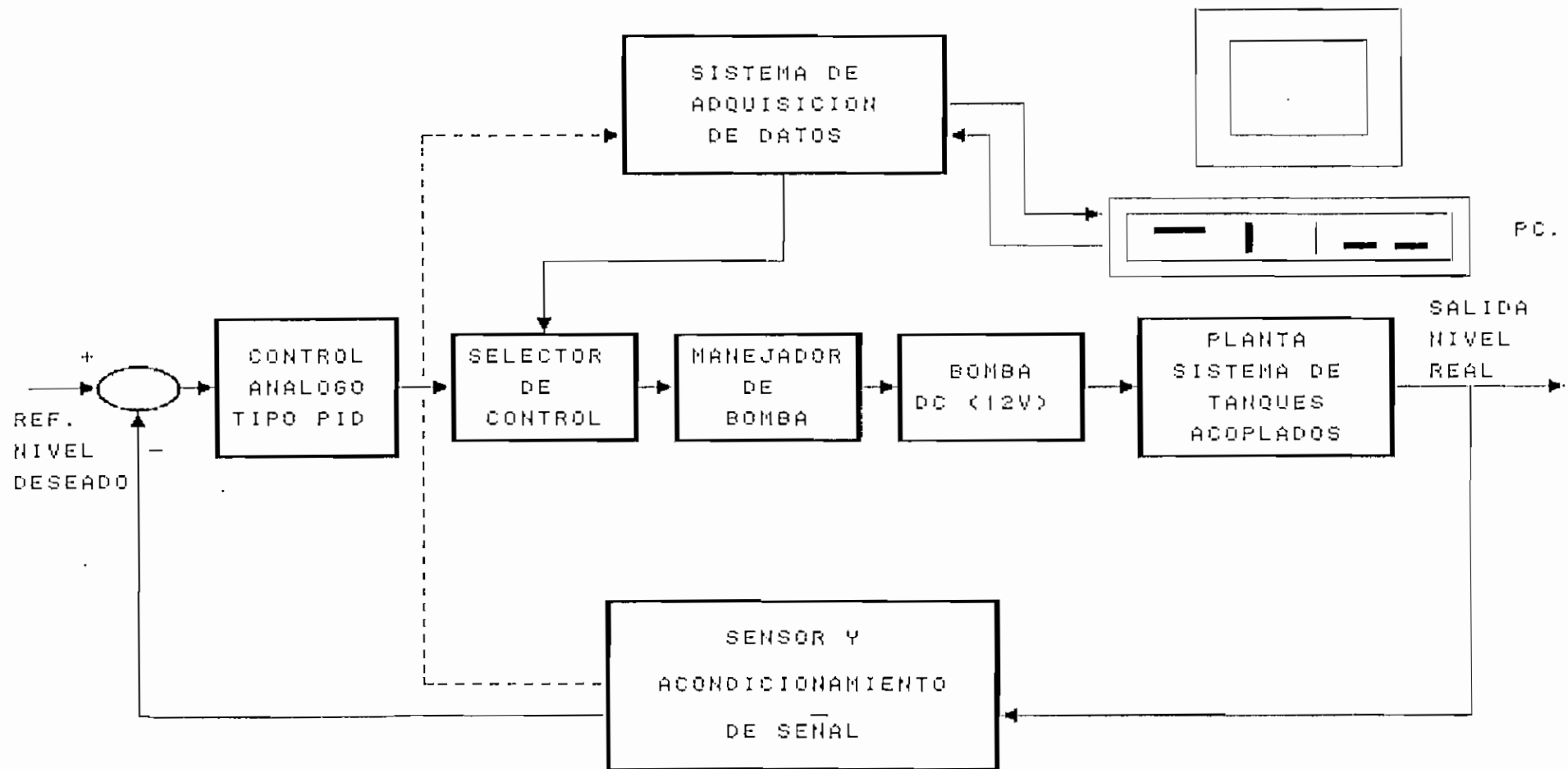


FIGURA 1.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS

CAPITULO II: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

- 2.1 Diseño del prototipo de control de nivel de líquidos
 - 2.1.1 Modelo y pruebas de simulación realizadas para determinar las dimensiones del prototipo
- 2.2 Sensor y acondicionamiento de señal
 - 2.2.1 Descripción general del sensor SCX01DNC de la casa SENSYSM
 - 2.2.2 Características del sensor de presión SCX01DNC
 - 2.2.3 Acondicionamiento de señal
 - 2.2.3.1 Discusión general de la tarjeta SCX-EB
 - 2.2.3.2 Diseño de la tarjeta SCX-EB
 - 2.2.3.3 Dimensionamiento de la resistencia R_T
- 2.3 Bomba y acondicionamiento de señal
 - 2.3.1 Acondicionamiento de señal
- 2.4 Válvulas de control de flujo
- 2.5 Construcción del prototipo
- 2.6 Módulo de control
 - 2.6.1 Circuitos de señalización
 - 2.6.2 Fuentes de poder
 - 2.6.2.1 Fuente para el circuito de control
 - 2.6.2.2 Fuente para el circuito de potencia de la bomba

2.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS

Lo primero que se debe determinar es la forma y dimensiones que va a tener el prototipo de control de nivel de líquidos.

Dado que se trata de un módulo didáctico, se ha previsto que la planta pueda funcionar como un simple sistema de primer orden o como un sistema más complicado de segundo o tercer orden, para ello se ha construído un sistema de tres tanques acoplados entre sí mediante válvulas de control de flujo que permiten variar las características del sistema, con una sola entrada y una sola salida, es decir un sistema univariable. El orden del sistema esta dado por el número de tanques acoplados que se utiliza en una determinada aplicación. Por ejemplo, si se desea trabajar con un sistema de segundo orden se debe trabajar con dos de los tres tanques acoplados del prototipo. Cabe mencionar que siempre el control se realiza sobre la altura o nivel del líquido (en este caso agua) del último tanque, en donde se sensa el nivel del líquido de manera indirecta a través del sensor de presión diferencial.

Para determinar las medidas de los tanques del prototipo es necesario realizar una modelación y simulación de la planta a fin de conocer las dimensiones adecuadas que hacen que el sistema responda adecuadamente a nuestros propósitos. A continuación se presentan las ecuaciones necesarias para representar al sistema de acuerdo al orden del mismo.

2.1.1 MODELO Y PRUEBAS DE SIMULACION REALIZADAS PARA DETERMINAR LAS DIMENSIONES DEL PROTOTIPO

Considérese a la planta como un sistema de primer orden, (un solo tanque) figura 2.1, en estas condiciones las ecuaciones dinámicas que describen al sistema son:

$$Q_i = Q_a + Q_o$$

(2 . 1)

donde: Q_i = caudal de entrada al tanque [m^3/s]

Q_o = caudal de salida del tanque [m^3/s]

Q_a = caudal almacenado en el tanque [m^3/s]

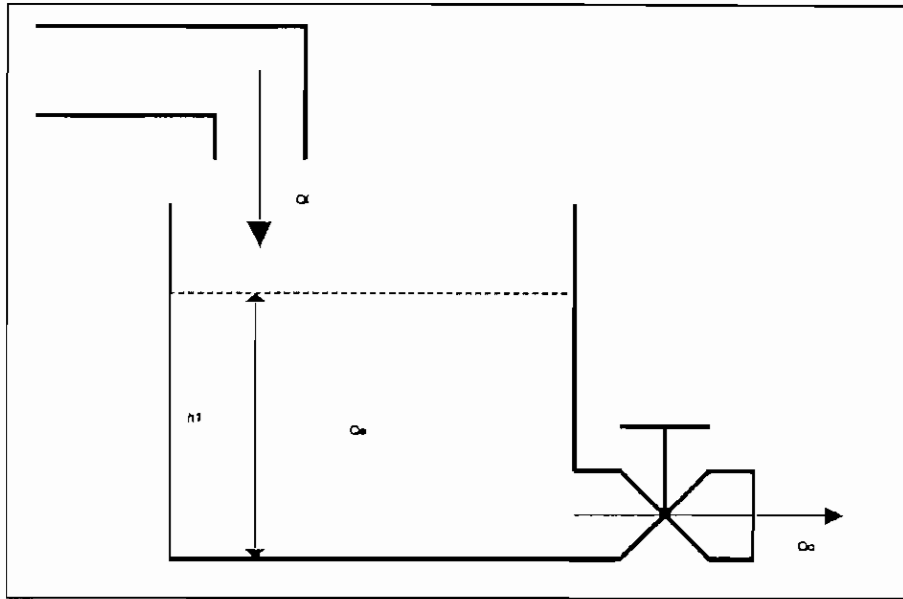


FIG. 2.1 ESQUEMA BASICO DEL PROTOTIPO DE NIVEL DE LIQUIDOS, SISTEMA DE PRIMER ORDEN

El forma el caudal de salida del tanque viene dado por:

$$Q_o = K_v \cdot \sqrt{h_1} \quad (1)$$

(2.2)

donde: h_1 = altura del agua en el tanque [m]

K_v = constante de la válvula [m^3/h]

Se considera que la válvula de desfogue se encuentra al ras de la base del tanque.

⁽¹⁾ Creuss, A. , "Instrumentación Industrial", 2da. Edición, Editorial Marcombo, pág. 389

El volumen almacenado dentro del tanque puede representarse por:

$$Q_a = \frac{dV_a}{dt} = A \frac{dh_1}{dt} = A \dot{h}_1 \quad (2.3)$$

donde: V_a = volumen del tanque ocupado por el agua [m^3]

A = area transversal del tanque [m^2]

Reemplazando las ecuaciones (2.2) y (2.3) en la ecuación (2.1) se tiene:

$$Q_i = A \cdot \frac{dh_1}{dt} + K_v \cdot \sqrt{h_1} = A \cdot \dot{h}_1 + K_v \cdot \sqrt{h_1} \quad (2.4)$$

El segundo término de la ecuación 2.4 no es un término lineal, para linealizarlo, se debe derivar esta expresión y evaluarla en el punto de operación (H_1 = altura de trabajo = 16 cm.).

Linealizando la ecuación 2.4 se tiene:

$$\frac{Q_i}{A} = \dot{h}_1 + \frac{K_v}{2 \cdot A \cdot \sqrt{H_1}} \cdot h_1 \quad (2.5)$$

Aplicando la transformada de Laplace a esta última ecuación queda:

$$k_2 \cdot Q_i(s) = (k_1 + s) \cdot H_1(s) \Rightarrow \frac{H_1(s)}{Q_i(s)} = \frac{k_2}{k_1 + s} \quad (2.6)$$

donde: $k_1 = K_v / (2 \cdot A \cdot \sqrt{H_1})$

$k_2 = 1/A$

H_1 = altura de trabajo = 16 cm.

K_v = constante de la válvula [m^3/h]

Si se considera ahora el sistema de segundo orden (dos tanques acoplados), figura 2.2, las ecuaciones dinámicas que describen al sistema están dadas por:

$$Q_i = Q_{a_1} + Q_{12} \quad (2.7)$$

$$Q_{12} = Q_{a_2} + Q_o \quad (2.8)$$

Haciendo las mismas consideraciones que en el caso anterior, es decir que las válvulas de control de flujo, tanto la de salida como la válvula que comunica a los dos tanques, se encuentran al ras de la superficie del tanque; que las válvulas de control de flujo poseen las mismas características, y que los tanques tienen la misma sección transversal, se puede representar al sistema por:

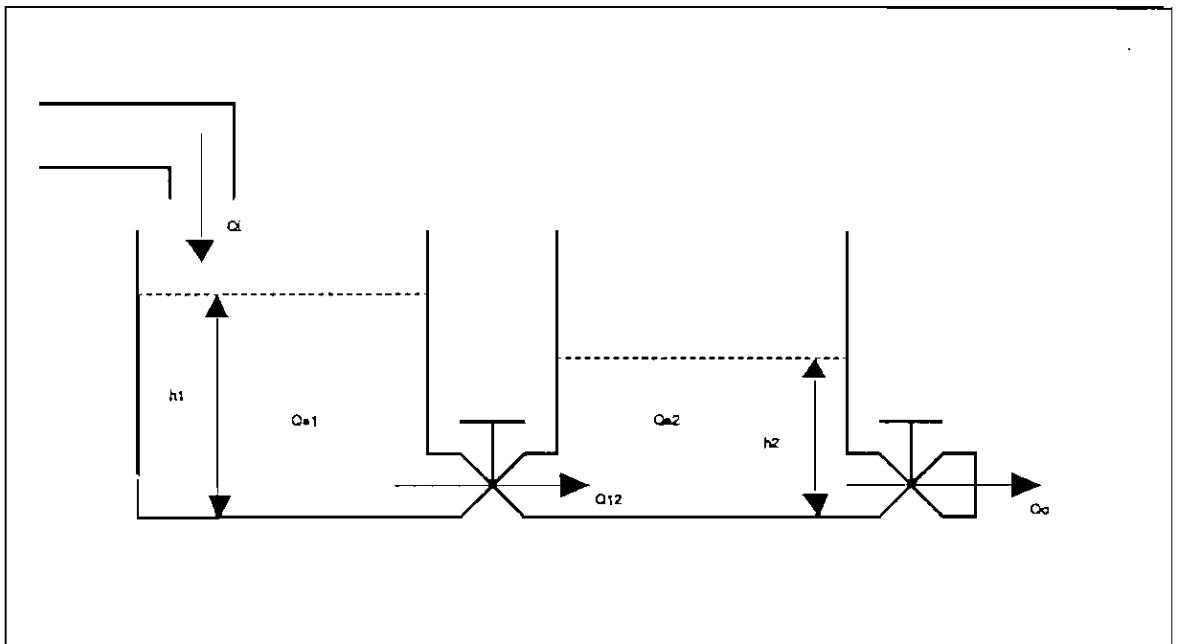


FIG. 2.2 DOS TANQUES ACOPLADOS, SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN

$$Q_i = A \cdot \frac{dh_1}{dt} + Q_{12} \Rightarrow Q_i = A \cdot h_1 + K_v \cdot \sqrt{h_1 - h_2} \quad (2.9)$$

$$Q_{12} = A \cdot \frac{dh_2}{dt} + Q_o \Rightarrow Q_{12} = a \cdot h_2 + K_v \cdot \sqrt{h_2} \quad (2.10)$$

Linealizando las ecuaciones 2.9 y 2.10 en los puntos de operación ($H_2=16$ cm y $H_1=18$ cm) se tiene:

$$Q_i = A \dot{h}_1 + \frac{K_v}{2 \cdot \sqrt{H_1 - H_2}} \cdot h_1 - \frac{K_v}{2 \cdot \sqrt{H_1 - H_2}} \cdot h_2 \quad (2.11)$$

$$\frac{K_v}{2 \cdot \sqrt{H_1 - H_2}} \cdot (h_1 - h_2) = A \cdot \dot{h}_2 + \frac{K_v}{2 \cdot \sqrt{H_2}} \cdot h_2 \quad (2.12)$$

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones 2.11 y 2.12, y resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene la siguiente función de transferencia de la planta:

$$\frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{k_2 \cdot k_1}{s^2 + s(2 \cdot k_1 + k_3) + (k_1 \cdot k_3)} \quad (2.13)$$

donde: $k_1 = K_v / (2 \cdot A \cdot \sqrt{H_1 - H_2})$

$$k_2 = 1/A$$

$$k_3 = K_v / (2 \cdot A \cdot \sqrt{H_2})$$

$K_v =$ constante de la válvula [m^3/h]

Si se asume totalmente abierta a la válvula de control de flujo que comunica a los dos tanques (es decir sin oponer resistencia al paso del fluido), entonces las alturas del agua en los tanques será la misma ($h_1 = h_2$) y el sistema de segundo orden se convierte en un sistema de primer orden, cuya función de transferencia esta dada por:

$$\frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{k_2}{2s + k_3} \quad (2.14)$$

donde: $k_2 = 1/A$

$$k_3 = K_v / (2 \cdot A \cdot \sqrt{H_2})$$

$H_2 =$ altura del punto de operación (16 cm)

$K_v =$ constante de la válvula [m^3/h]

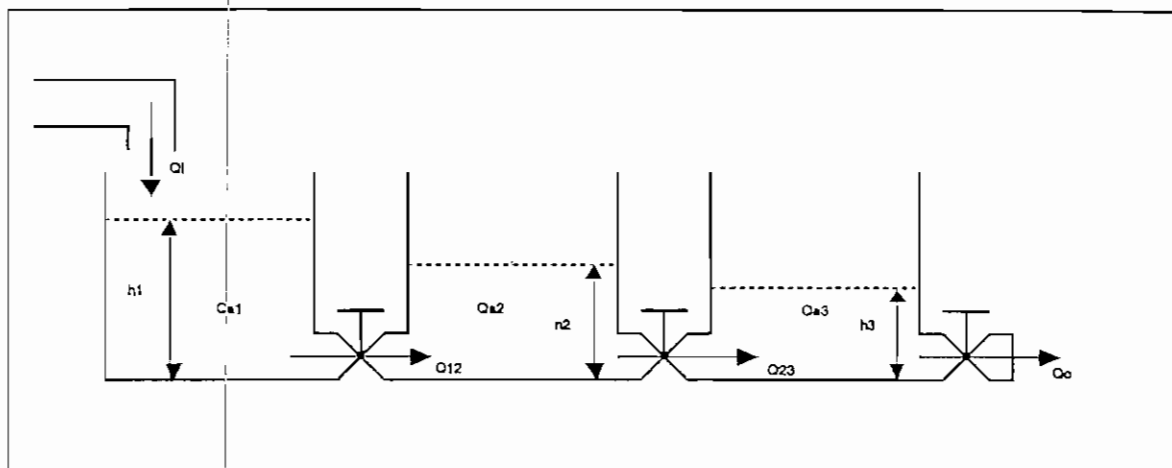


FIG. 2.3 TRES TANQUES ACOPLADOS, SISTEMA DE TERCER ORDEN

De manera similar si se considera al sistema de tercer orden (tres tanques acoplados) de la figura 2.3, las ecuaciones dinámicas que describen al sistema son:

$$Q_i = Q_{a1} + Q_{12} \quad (2.15)$$

$$Q_{12} = Q_{a2} + Q_{23} \quad (2.16)$$

$$Q_{23} = Q_{a3} + Q_o \quad (2.17)$$

Haciendo las mismas consideraciones que en el caso anterior y linealizando los términos no lineales en los puntos de operación $H_1=18,5$ cm, $H_2=16$ cm y $H_3=14$ cm, aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones 2.15, 2.16 y 2.17, y resolviendo el sistema de ecuaciones formado, se obtiene la siguiente función de transferencia de la planta para el sistema de tercer orden:

$$\frac{H_3(s)}{Q_i(s)} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{s^3 + s^2(2 \cdot k_3 + 2 \cdot k_1 + k_4) + s(3 \cdot k_1 \cdot k_3 + k_3 \cdot k_4 + 2 \cdot k_1 \cdot k_4) + k_1 \cdot k_3 \cdot k_4} \quad (2.18)$$

donde: $k_1 = K_v / (2 \cdot A \cdot \sqrt{H_1 - H_2})$

$k_2 = 1/A$

$k_3 = K_v / (2 \cdot A \cdot \sqrt{H_2 - H_3})$

$$k_4 = K_v / (2 \cdot A \cdot \sqrt{H_3})$$

K_v = constante de la válvula [m^3/h]

Si al igual que en el caso anterior se asume que las válvulas que comunican a los tanques entre sí están totalmente abiertas, el sistema de tercer orden se reduce a un sistema de primer orden cuya función de transferencia es:

$$\frac{HX(s)}{Qi(s)} = \frac{k_2}{3s + k_4} \quad (2.19)$$

donde: $k_2 = 1/A$

$$k_4 = K_v / (2 \cdot A \cdot \sqrt{H_3})$$

H_3 = punto de operación (16 cm.)

K_v = capacidad de la válvula [m^3/h]

Realizando pruebas de simulación con las ecuaciones 2.6, 2.14 y 2.19 se determinó que las dimensiones convenientes que debe tener cada tanque para que el prototipo trabaje adecuadamente (constantes de tiempo no muy grandes) son:

A = sección transversal del tanque 144 cm^2

($12 \text{ cm} * 12 \text{ cm}$)

h = altura de cada tanque 40 cm

Se consideran válvulas de control de flujo del tipo de aguja con un $K_v = 0.9288 \text{ [m}^3/h\text{]}$.

El punto de trabajo en el último tanque debe ser aproximadamente 16 cm reemplazando valores en las ecuaciones 2.6, 2.14 y 2.19 y graficando la respuesta en el tiempo, en lazo abierto para una entrada paso unitario en el programa CAD CONTROL se obtienen los siguientes gráficos:

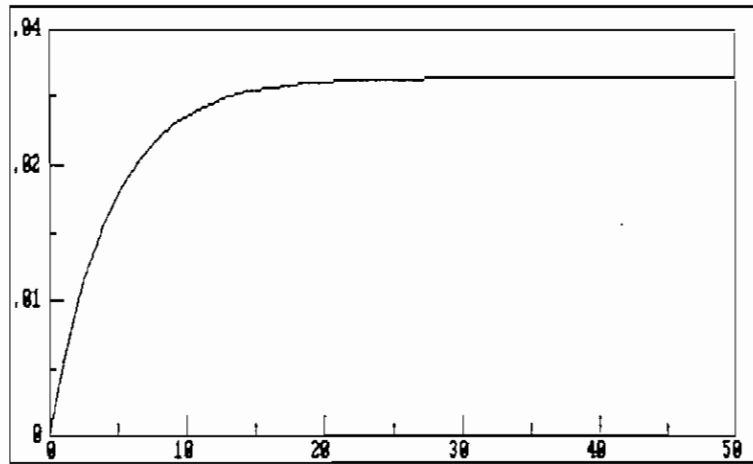


FIG. 2.4 RESPUESTA EN LAZO ABIERTO A FUNCION PASO ECUACION 2.6 (1 TANQUE)

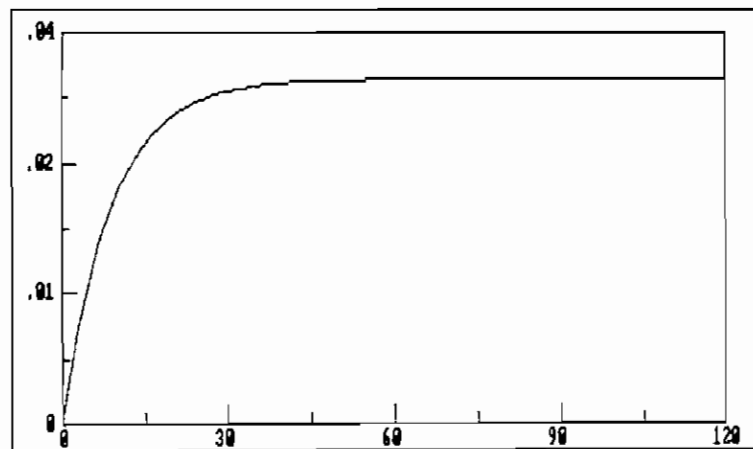


FIG. 2.5 RESPUESTA EN LAZO ABIERTO A ENTRADA PASO ECUACION 2.14 (2 TANQUES)

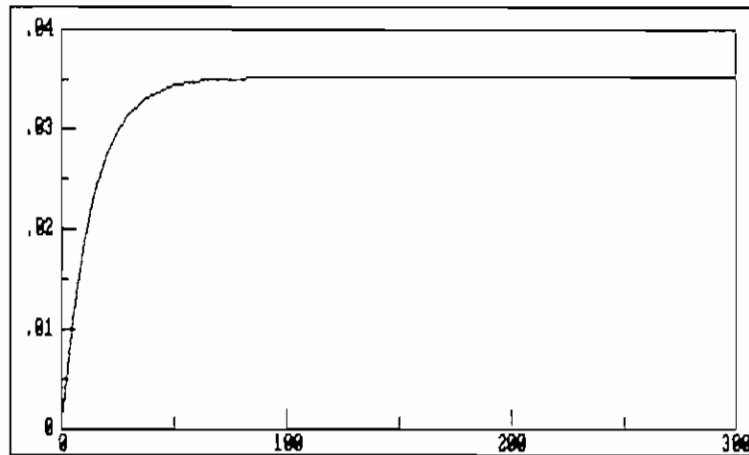


FIG. 2.6 RESPUESTA EN LAZO ABIERTO A ENTRADA PASO ECUACION 2.19 (3 TANQUES)

Cabe mencioar en este punto que las aproximaciones realizadas para convertir al sistema en un sistema lineal son útiles en la vecindad del punto de operación, por ello se las utiliza únicamente para determinar las constantes de tiempo de cada sistema aproximados a uno de primer orden y poder así determinar las dimensiones del prototipo. Esta aproximación es útil además para el diseño del control. Para determinar la respuesta del sistema, es decir simular el proceso, se debe trabajar con las ecuaciones no lineales, empleando el método de integración de Runge Kutta, o en el modelo lineal añadiendo la corrección pertinente.

Se consideran válvulas de control de flujo del tipo de aguja con un $K_v=0.00$ [m³/h]. Según se puede observar de los gráficos anteriores; y, con las dimensiones indicadas las constantes de tiempo no son muy grandes.

En el capítulo III se ampliará en detalle el modelo y la simulación del prototipo tanto para sistemas de primero, segundo y tercer orden así como también se compararán estos modelos con los resultados experimentales obtenidos.

2.2 SENSOR Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

La parte más crítica de todo proceso es la medición exacta de la variable de salida, en este caso el nivel del líquido en el último tanque del prototipo. Por lo tanto el sensor a utilizarse para este propósito debe, a más de ser bastante preciso, presentar una buena insensibilidad al ruido, ser bastante lineal en todo el rango de trabajo, tener una buena sensibilidad y por supuesto no verse afectado por los cambios de temperatura.

En un principio se pensó utilizar un sensor del tipo capacitivo para medir el nivel de agua en el último tanque del prototipo, pero éste tipo de sensor depende de la constante dieléctrica del líquido con el que se está trabajando. En este caso el agua tiene una constante dieléctrica que varía con la temperatura y además depende del grado de impurezas que posee el agua, por tal motivo la calibración del acondicionamiento de señal de este tipo de sensor tendría que ser permanente; además, la señal que produce este tipo de sensor está en el orden de los pF lo que lo hace muy sensible a interferencias por ruido y complica el acondicionamiento de la señal. Por todas estas razones, este tipo de sensor es descartado para esta aplicación.

Otro tipo de sensor que se pensó en utilizar es del tipo flotador potenciométrico, pero fue también descartado por tener partes móviles dentro del tanque que con el tiempo se desgastan y deterioran alterando las medidas, además de ser sensible a las ondulaciones en la superficie del líquido.

Finalmente se optó por utilizar un sensor de presión que carece de las desventajas de los sensores anteriores y además presenta una serie de características que lo hacen ideal para éste propósito.

El sensor utilizado es un sensor de presión diferencial de estado sólido (SCX01DNC) que sensa indirectamente el nivel del líquido en el tanque, fabricado por la casa SENSYM.

Sensa indirectamente el nivel del líquido en el tanque porque en realidad lo que mide es la presión hidrostática en el fondo del último tanque del prototipo, pero como la presión hidrostática es directamente proporcional a la altura del líquido que la produce se puede utilizar a este sensor para medir el nivel del líquido.

Se utiliza la configuración diferencial, pues en el fondo del tanque lo que se tiene es la suma de la presión hidrostática, producida por la columna de agua, más la presión atmosférica, entonces para tener unicamente la presión hidrostática, que es la que interesa, se debe restar la presión atmosférica a la presión sensada en el fondo del tanque. (ver figura 2.7)

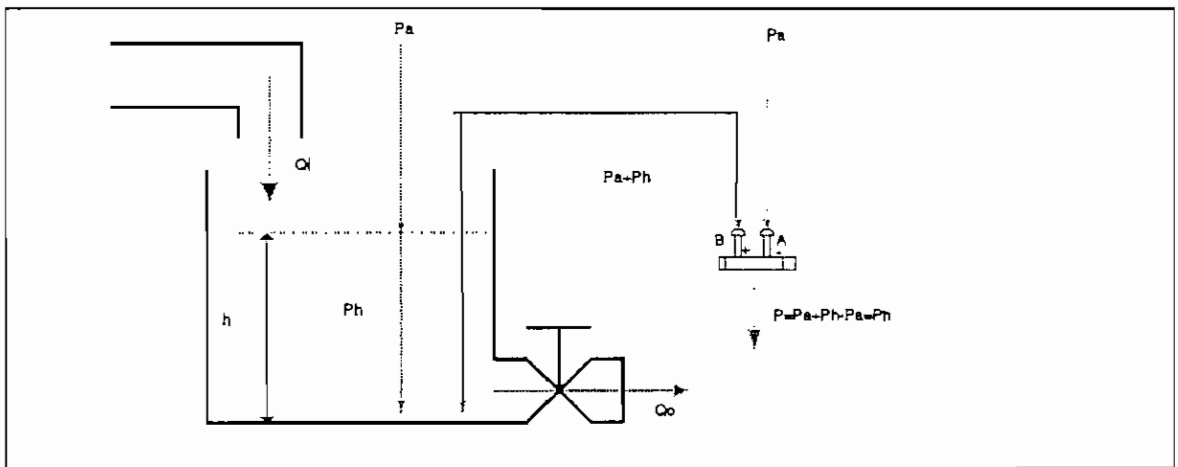


FIG. 2.7 UTILIZACION DEL SENSOR DE PRESION DIFERENCIAL

donde: P_a = presión atmosférica

P_h = presión hidrostática= $\delta \cdot g \cdot h$

δ = densidad del agua [1 Kg/cm^3]

g = gravedad

h = altura del agua dentro del tanque

2.2.1 DESCRIPCION GENERAL DEL SENSOR SCX01DNC DE LA CASA SENSYM

La serie de sensores de presión SCX C de la casa SENSYM a la cual pertenece el sensor SCX01DNC (figura 2.8) que se utiliza en el prototipo son del tipo que dan un voltaje de salida proporcional a la presión aplicada. Son sensores con compensación de temperatura y calibración interna lo que da como resultado una salida estable y confiable en un rango de 0°C a 70°C y están diseñados para trabajar con fluidos gaseosos no corrosivos y no iónicos como son aire y gases secos.

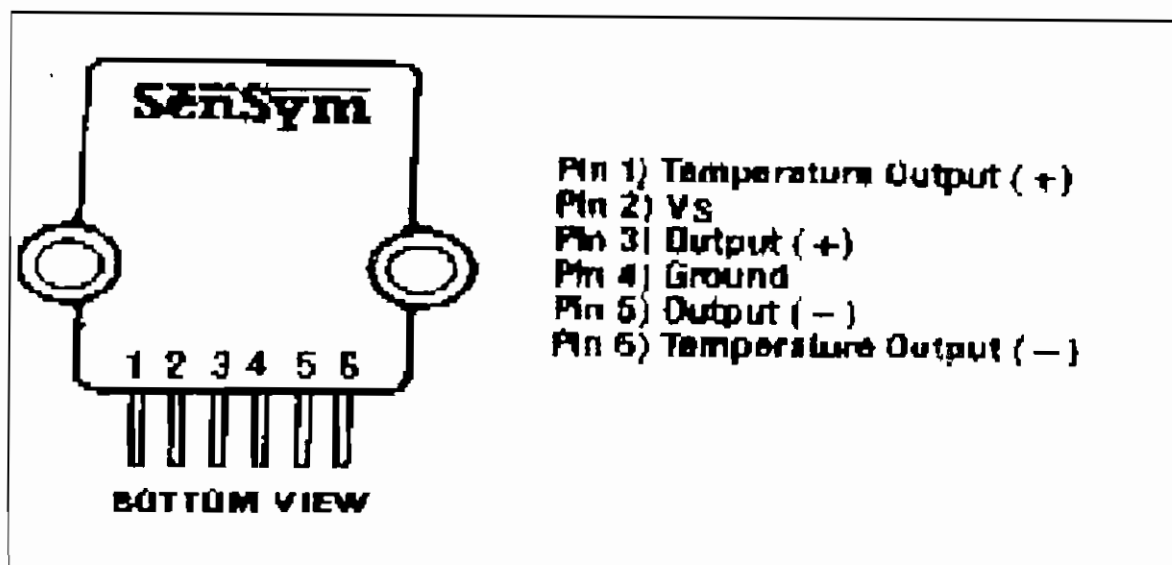


FIG. 2.8 VISTA FRONTAL DEL SENSOR DE PRESION SCX01DNC

El sensor está constituido por un elemento sensor de circuito integrado y una delgada película cerámica cortada con láser, empacados dentro de un encapsulado de nylon (figura 2.9). Este encapsulado presenta una excelente resistencia a la corrosión y previene al sensor de deformaciones por fuerzas externas, el encapsulado tiene dos tubitos o pórticos de presión convenientemente montados compatibles con tubos de plásticos estándares para las conexiones de presión. Para esta aplicación, en el pórtico B se debe conectar la manguerita de plástico que está acoplada a la sonda de vidrio que está introducida en el fondo del último tanque del prototipo, el pórtico A debe permanecer siempre abierto a la atmósfera (para aplicaciones diferenciales en el pórtico B debe conectarse la presión más alta y en el pórtico A la presión baja).

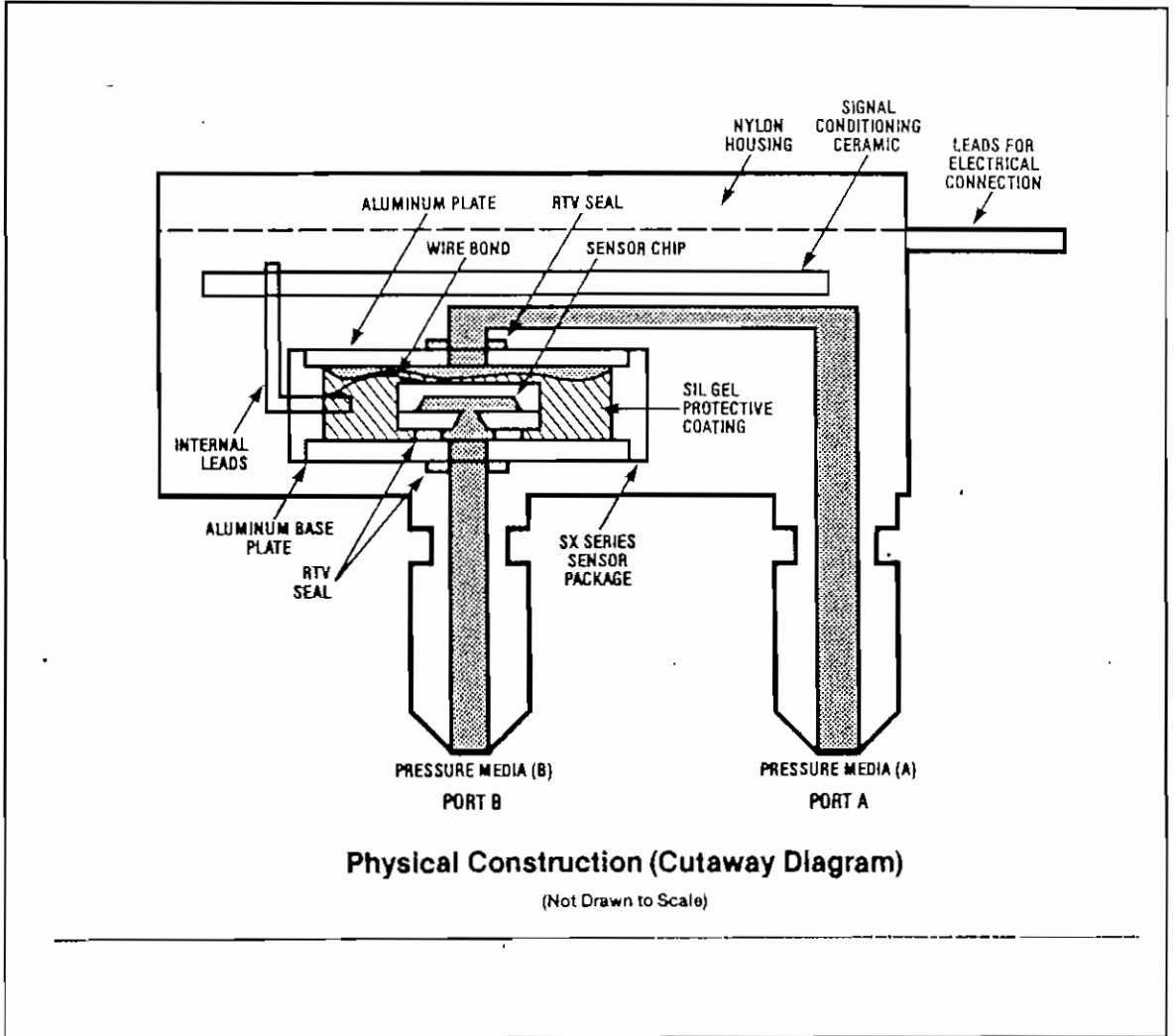


Fig 2.9 CONSTRUCCION FISICA DEL SENSOR

La figura 2.10 muestra las dimensiones físicas del sensor.

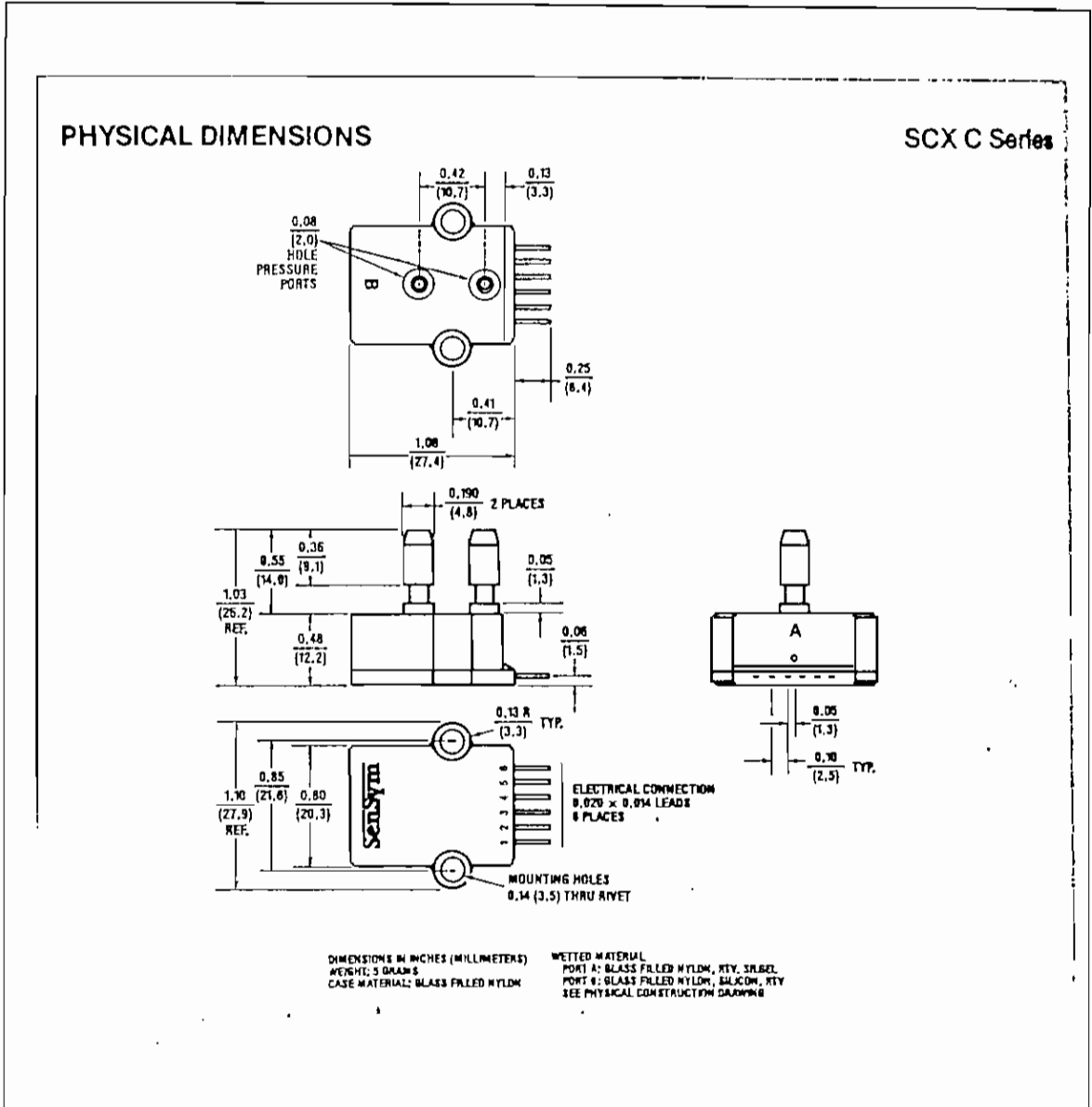


FIG. 2.10 DIMENSIONES FISICAS DEL SENSOR SCX01DNC

En la sección anexos se presentan copias del manual que describen en detalle este tipo de sensor.

2.2.2 CARACTERISTICAS DEL SENSOR DE PRESION SCX01DNC

Rangos máximos:

Voltaje Máximo V_s	+30 V_{DC}
Presión en modo común	50 psig
Temperatura de soldadura	300° C (10 segundos)

Especificaciones Ambientales:

Rango de temperatura:

Compensado	0 a 70° C
Operación	-40° C a +85° C
Almacenamiento	-55° C a +125° C

Limites de humedad 0 a 100% RH

TABLA 2.1 CARACTERISTICAS DE OPERACION DEL SENSOR SCX01DNC

CARACTERISTICA	MINIMO	TIPICO	MAXIMO	UNIDAD
Rango de presión de operación		-	1	psid
Sensibilidad	-	18	-	mV/psid
Rango a plena escala	17.00	18.00	19.00	mV
Offset de presión cero	-1.0	0	+1.0	mV
Histerisis y linealidad combinadas	-	±0.2	±1.0	% FSO
Efecto de la temperatura en el Rango (0-70° C)	-	±0.4	±2.0	% FSO
Efecto de la temperatura en el Offset (0-70° C)	-	±0.20	±1.0	mV
Repetibilidad	-	±0.2	±0.50	% FSO
Impedancia de entrada	-	4.0	-	KΩ
Impedancia de salida	-	4.0	-	KΩ
Voltaje en modo común	5.7	6.0	6.3	V_{DC}
Tiempo de respuesta	-	100	-	μsec
Estabilidad de Offset y rango	-	±0.1	-	% FSO

En la tabla 2.1 se muestran las características de operación del sensor SCX01DNC bajo las siguientes condiciones de prueba:

Voltaje de alimentación: $V_s=12 V_{DC}$

Temperatura ambiente: $T_a=25° C$

Presión en línea en modo común = 0 psig

Presión aplicada al pórtico B

Se escogió el rango de trabajo del sensor de 0 a 1 psi, pues 1 psi es la presión hidrostática ejercida por una columna de 70.308 cm de agua, como en este caso el prototipo tiene una altura máxima de 40 cm, este rango de trabajo estandarizado es el más adecuado.

2.2.3 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

El sensor de presión SCX01DNC esta montado sobre una tarjeta SCX-EB universal de amplificación (figura 2.11) también fabricada por la misma casa SENSYSM, que acondiciona la señal de salida del chip sensor a un voltaje de 0-10 VDC a plena escala, este valor de voltaje a plena escala puede ser variado, pero para este caso 0-10 V es el voltaje adecuado de trabajo. Las principales características de esta tarjeta así como el circuito y su descripción se detallan a continuación.

2.2.3.1 Discusión general de la tarjeta SCX-EB

Referiéndose al diagrama de la figura 2.12 , el amplificador A1 es utilizado para proveer de un voltaje regulado al sensor SCX, de esta manera, el circuito tendrá independencia a las variaciones de voltaje, ruidos en la fuente y rizado. El voltaje, V_S , en el punto de prueba uno (TP1) será de 10 V cuando el jumper J4 está abierto, y V_S será de 5 V cuando J4 esté conectado.

Los amplificadores A3 y A4 están conectados como un amplificador de instrumentación y proveen la ganancia a la señal de entrada, V_{IN} . El amplificador A2, conjuntamente con el potenciómetro R_0 fijan el voltaje inicial de salida (presión cero). La expresión completa para el voltaje de salida V_o está dada por la siguiente ecuación (ver numeral 2.3.3.2):

$$V_o = V_{in} \cdot \left[2 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_T} \right) \right] + V_R \quad (2.20)$$

donde: $R_T = R_S + R_G$

V_R es el voltaje en el punto TP2 seteado por R_0 .

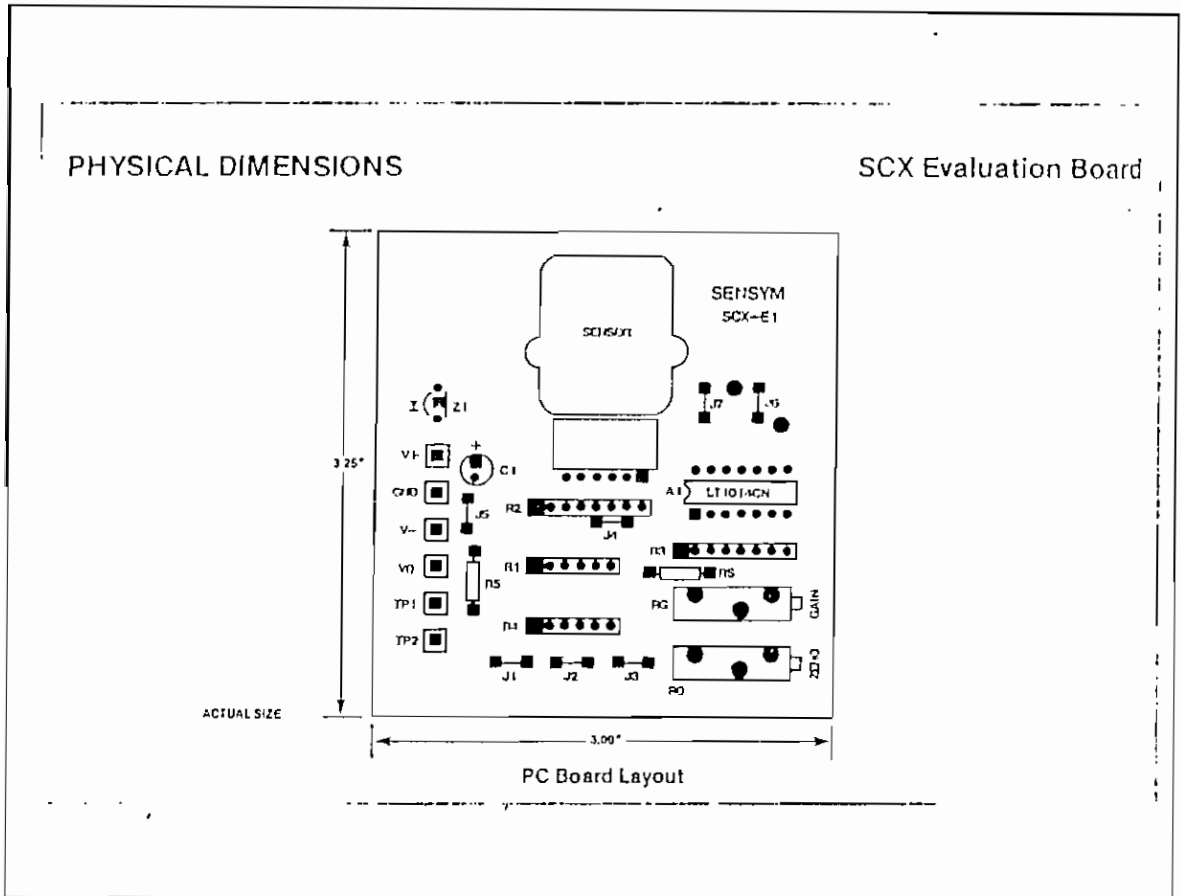
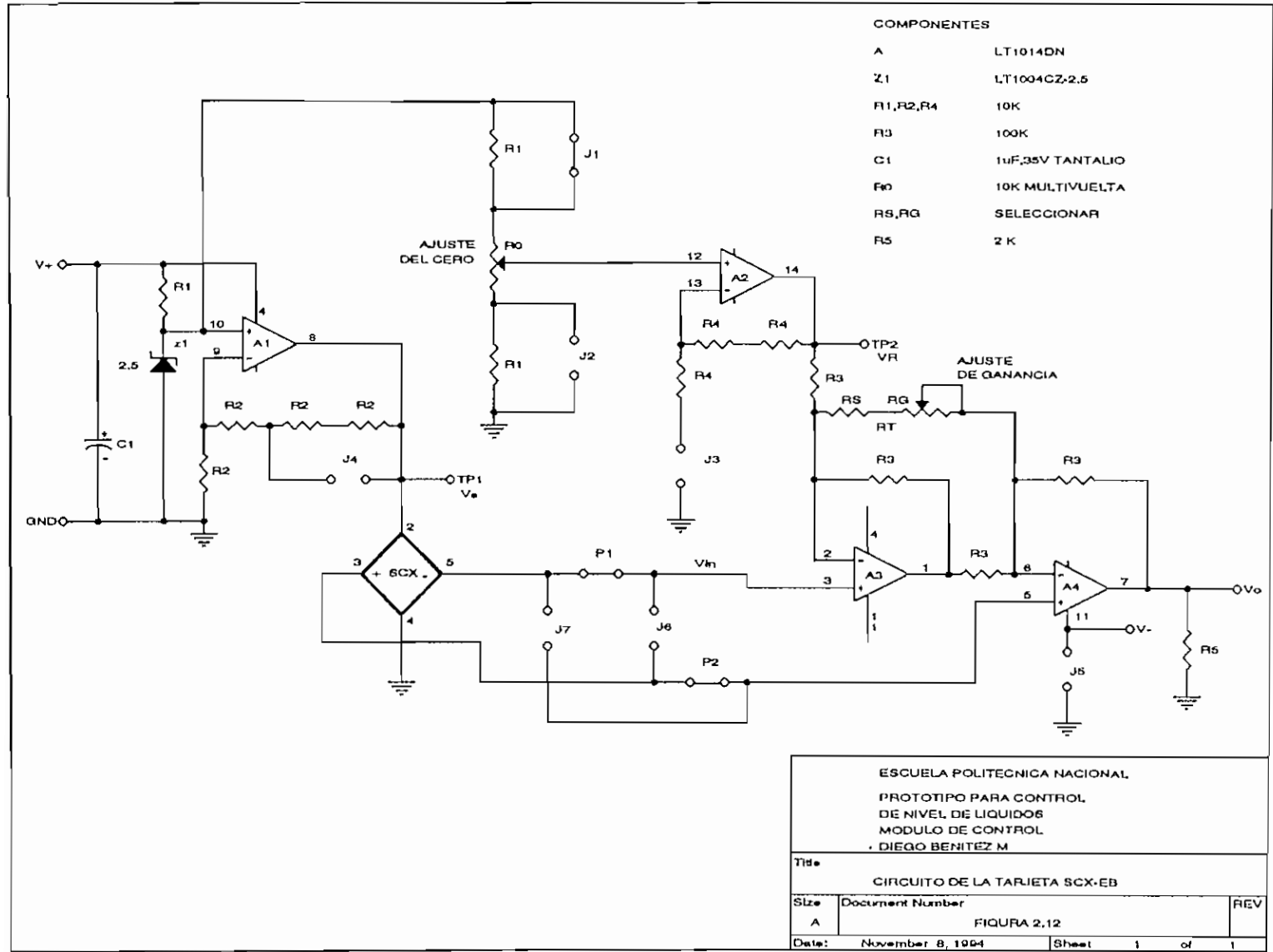


FIG. 2.11 TARJETA SCX-EB

El punto de conexión V - puede ser conectado al negativo de la fuente cuando es disponible; es decir, cuando se dispone de una fuente doble, cuando no se usa fuente negativa el jumper J5 debe ser conectado, entonces V - se conectará a tierra. En este caso se polarizará a la tarjeta SCX-EB con dos fuentes de $+12 V_{DC}$ y $-5 V_{DC}$ por lo tanto el jumper J5 debe estar abierto. En la sección de anexos se incluyen copias del manual de la tarjeta SCX-EB en donde se describe con mayor detalle las conexiones de los jumpers para las distintas posibilidades de configuración de la tarjeta, así como también ejemplos de diseños ilustrativos.



2.2.3.2 Diseño de la tarjeta SCX-EB

Considerando la figura 2.13, el voltaje de salida V del sensor, entre los puntos 3 y 5 esta dado por:

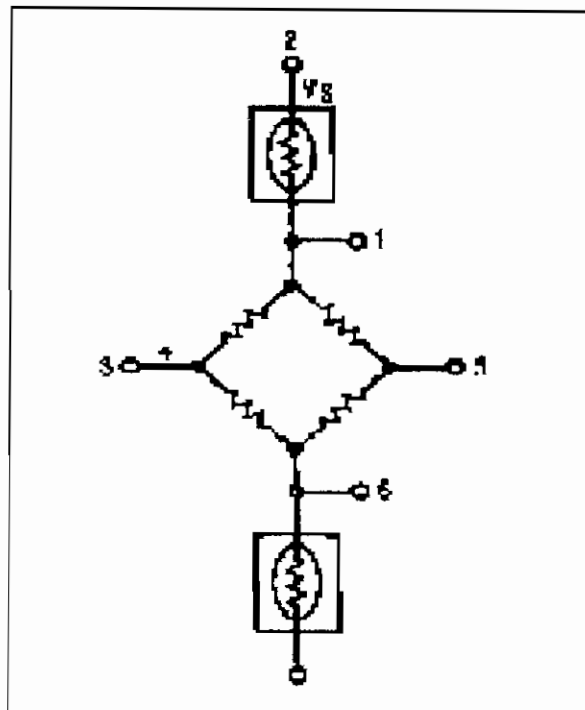


FIG. 2.13 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SENSOR SCX01DNC

$$V = S \cdot V_s \cdot P \pm V_{os}$$

(2.21)

donde: V es el voltaje de salida diferencial del puente en mV

S es la sensibilidad en mV/V por PSI

V_s es el voltaje aplicado al puente

P es la presión aplicada en PSI

V_{os} es el voltaje diferencial de salida (offset) que aparece cuando se aplica presión cero.

El primer termino del lado derecho de ecuación 2.21, $S.V_p.P$ es lo que se conoce como SPAN.

Como la salida de voltaje, dada en la ecuación 2.21, es una salida diferencial, lo primero que debe hacer el amplificador a diseñar es convertir esta salida diferencial en una salida simple referida a tierra. Como segundo punto, el diseño debe proveer un método de eliminación del termino V_{os} , de tal manera que el voltaje de salida del amplificador no contenga este termino de error.

Tercero, como el voltaje en modo común que aparece en los brazos de salida del sensor es aproximadamente una mitad de V_s , el amplificador no debe amplificar este voltaje en modo común, en otras palabras el circuito del amplificador debe tener una muy alta razón de rechazo en modo común. El amplificador no debe cargar el puente, pues esto causaría la inclusión de errores adicionales, y por supuesto el amplificador debe amplificar la señal proveniente de la salida de voltaje deseada.

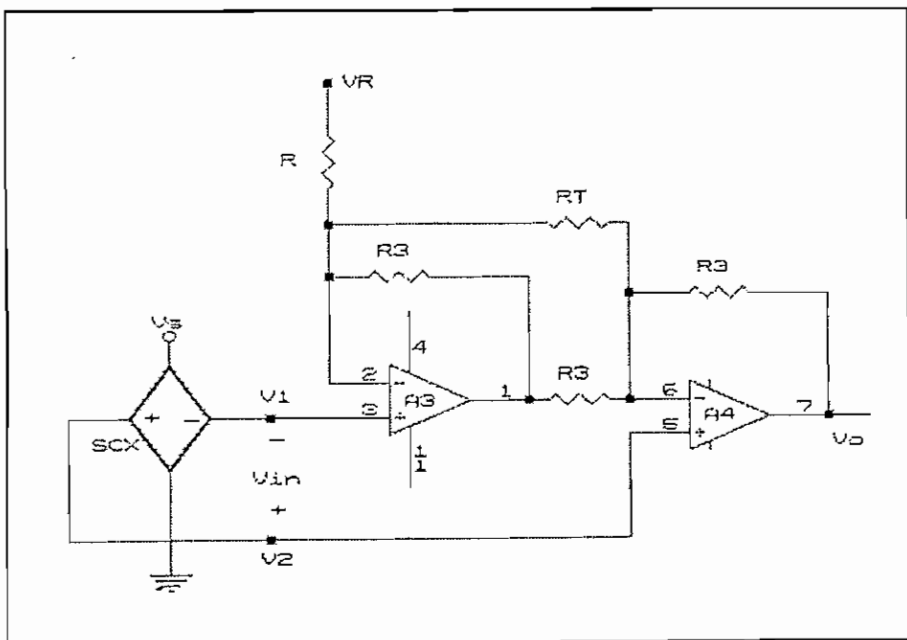


FIGURA 2.13.1 CIRCUITO BASE DE LA TARJETA SCX-EB.

Finalmente, todos los ajustes necesarios para conseguir las acciones antes mencionadas deben ser no-interactuantes. El circuito mostrado en la figura 2.13.1, cumple con todas estas condiciones, y es la base del circuito de la tarjeta SCX-EB, de la figura 2.12..

Refiriéndose al circuito de la figura 2.13.1, si se desprecia los pequeños términos de error de los amplificadores operacionales, y aplicando el teorema de superposición para hallar la expresión del voltaje de salida en función de cada uno de los voltajes aplicados se tiene:

1.- Considerando $V_1=0$ y $V_R=0$, aplicando los conceptos de tierra virtual y superposición se tiene el circuito equivalente de la figura 2.13.2.

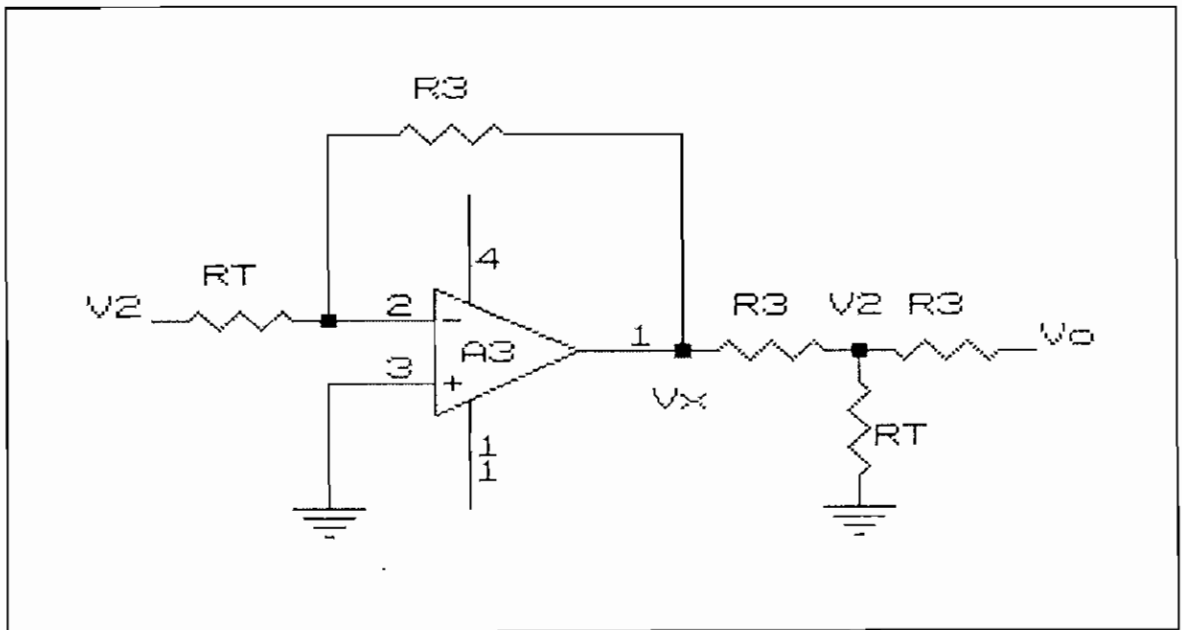


FIGURA 2.13.2

El voltaje V_x esta dado por la siguiente expresión:

$$V_x = -\frac{R_3}{R_T} \cdot V_2 \quad (2.22)$$

Entonces la expresión completa para el voltaje de salida V_o en función del voltaje V_2 esta dada por:

$$V_o = \left[2 + \frac{2 \cdot R_3}{R_T} \right] \cdot V_2 \quad (2.23)$$

2.- Considerando $V_1=0$ y $V_2=0$, aplicando los conceptos de tierra virtual y superposición se tiene el circuito equivalente: de la figura 2.13.3.

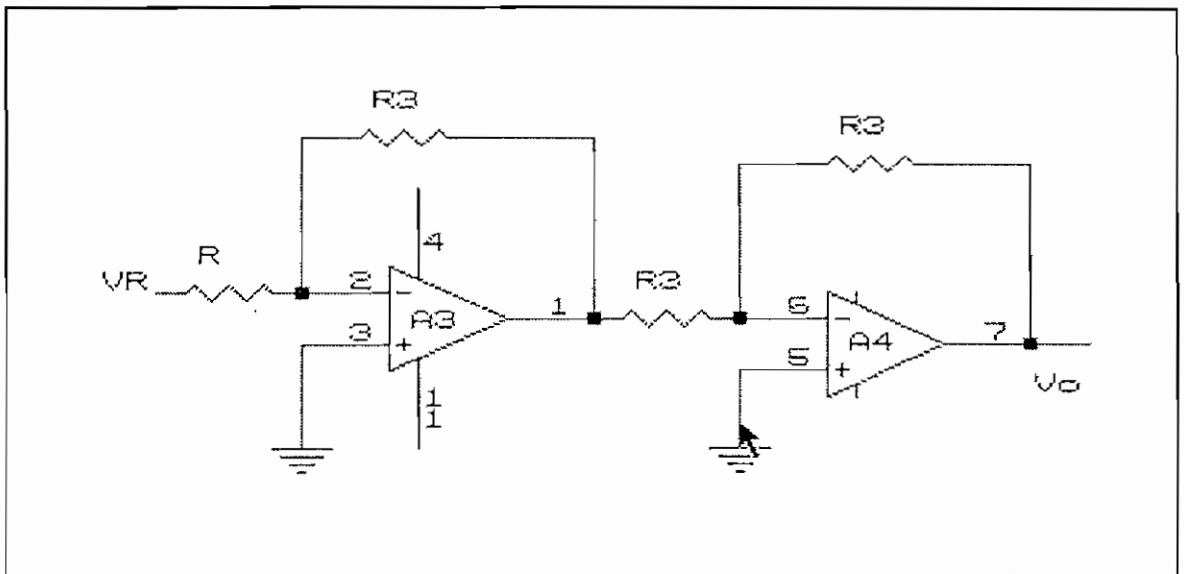


FIGURA 2.13.3

El voltaje de salida V_o para este circuito equivalente esta dado por:

$$V_o = \frac{R_3}{R} \cdot V_R \quad (2.24)$$

3.- Considerando $V_2=0$ y $V_R=0$, aplicando los conceptos de tierra virtual y superposición se tiene los circuitos equivalentes de las figuras 2.13.4 y 2.13.5.

El voltaje de salida V_o para el circuito equivalente 2.13.4 esta dado por:

$$V_o = -\frac{R_3}{R_T} \cdot V_1 \quad (2.25)$$

Debido al ramal de R_T :

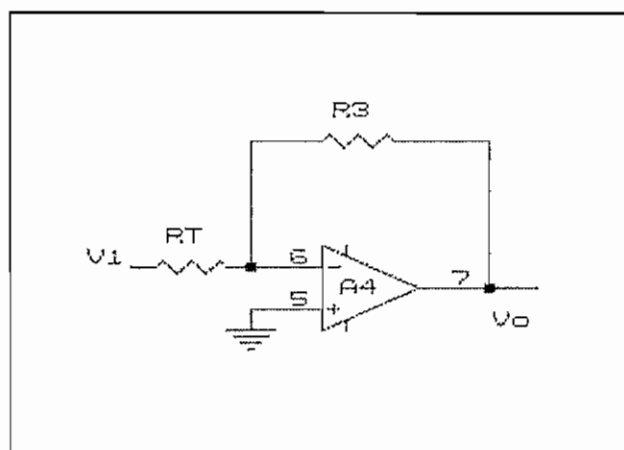


FIGURA 2.13.4

Debido al ramal de R:

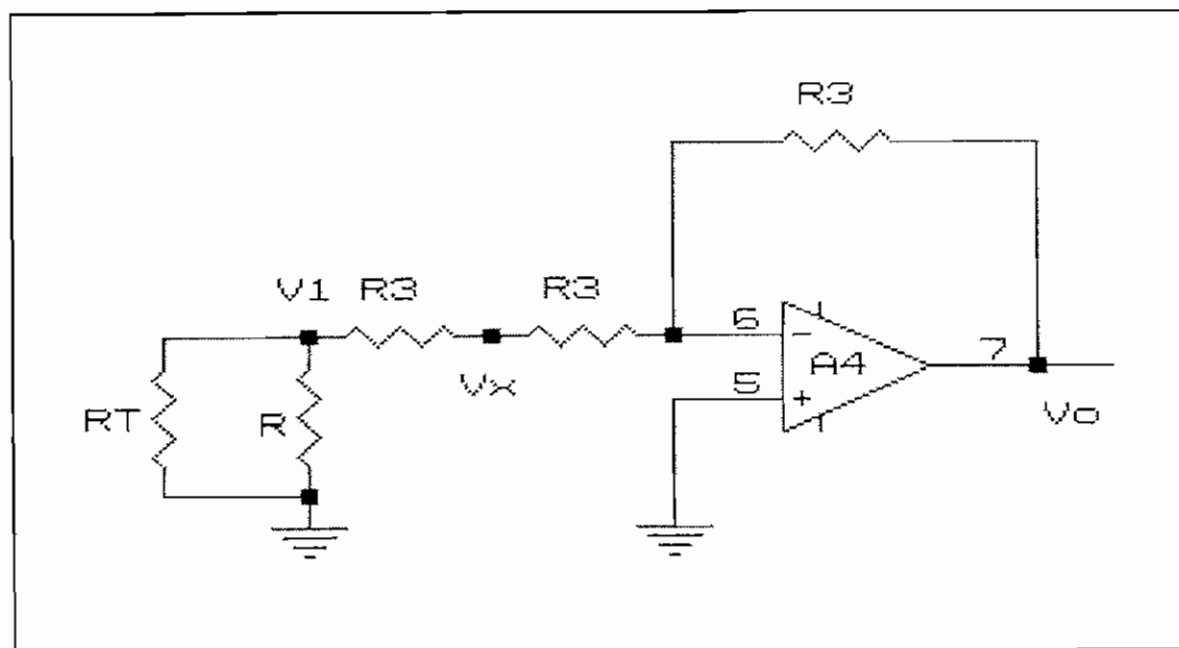


FIGURA 2.13.5

El voltaje V_X esta dado por la siguiente expresión:

$$V_X = \left[1 + \frac{R_3}{R_T} + \frac{R_3}{R} \right] \cdot V_1 \quad (2.26)$$

El voltaje de salida V_O para este circuito equivalente esta dado por:

$$V_O = - \left[1 + \frac{R_3}{R} + \frac{R_3}{R_T} \right] \cdot V_1 \quad (2.27)$$

Entonces la expresión completa para el voltaje de salida V_O en función del voltaje V_1 esta dada por:

$$V_O = - \left[1 + \frac{R_3}{R} + \frac{2 \cdot R_3}{R_T} \right] \cdot V_1 \quad (2.28)$$

La ecuación del voltaje de salida V_O completa, en función de los voltajes de los brazos del puente V_1 , V_2 y V_R estará dada por:

$$V_O = V_2 \left[2 + \frac{2 \cdot R_3}{R_T} \right] - V_1 \left[\left(1 + \frac{R_3}{R} \right) + \frac{2 \cdot R_3}{R_T} \right] + V_R \left[\frac{R_3}{R} \right] \quad (2.29)$$

Nótese que los brazos de salida del puente sensor estan conectados a las entradas no inversoras de los amplificadores de ganancia A3 y A4 para eliminar cualquier carga sobre el sensor.

Ahora si se considera que no existe voltaje de offset del puente y que tampoco existe presión aplicada, es decir $V_1 = V_2 = V_{cm}$, donde V_{cm} es el voltaje en modo común, la última ecuación 2.29, puede ser escrita como:

$$V_O = V_{cm} \left[1 - \frac{R_3}{R} \right] + V_R \left[\frac{R_3}{R} \right] \quad (2.30)$$

Aplicando presión ahora al sensor y si se ajusta R_3 de tal manera que sea igual a R , la ecuación 2.29 se convierte en:

$$V_O = (V_2 - V_1) \left[2 \left(1 + \frac{R_3}{R_T} \right) \right] + V_R = V_{in} \cdot \left[2 \left(1 + \frac{R_3}{R_T} \right) \right] + V_R \quad (2.31)$$

La ecuación 2.31 puede escribirse como:

$$V_O = V \cdot A_V + V_R \quad (2.32)$$

donde A_V es la ganancia de voltaje y esta dada por:

$$A_V = 2 \left[\left(1 + \frac{R_3}{R_T} \right) \right] \quad (2.33)$$

y V es el voltaje de la entrada diferencial (salida del puente) dado por la ecuación 2.21.

Nótese que la resistencia R no aparece en la ecuación para A_V , una vez que el ajuste de la razón de rechazo en modo común se ha hecho, el ajuste de ganancia y el ajuste de la razón de rechazo en modo común son no-interactuantes.

Para la ecuación 2.33 puede verse claramente que la ganancia puede conseguirse fácilmente ajustando el valor de la resistencia R_T .

Es necesario ahora ajustar a cero el valor del offset de presión cero, para ello bastará con introducir en el circuito de la figura 2.13.1 una etapa que reste el valor de V_R y que permita calibrar este valor de acuerdo a las características del sensor, esto se logra con un potenciómetro y una etapa de desacople tal como lo muestra el circuito completo de la figura 2.12 en el punto TP2. Además para lograr que el circuito sea insensible a las variaciones de voltaje en la fuente, el voltaje a través de los brazos del puente (circuito equivalente del sensor de presión) debe ser estabilizado, esto se logra mediante la amplificación a 10V del voltaje de entrada del amplificador A1, que está dado por la polarización del diodo zener, fijando el voltaje de entrada al amplificador A1 a 2.5 V, esto garantiza que la señal del sensor sea completamente independiente de las variaciones en la fuente.

2.2.3.3 Dimensionamiento de la resistencia R_T

Originalmente la tarjeta SCX-EB vino configurada para un rango de trabajo de 0 a 1 psi, con una salida de 0 a 5 VDC. Para la presente aplicación la tarjeta debe trabajar en un rango de 0 a 0.5689 psi; 0.5689 psi es la presión ejercida por una columna de agua de 40 cm, y la señal de salida de la tarjeta debe estar acondicionada en un rango de trabajo de 0 a 10 VDC, por tal motivo fue necesario realizar un cambio en el valor de R_S del circuito original. El dimensionamiento de la resistencia R_T se detalla a continuación:

Primero se debe determinar el voltaje a los terminales del sensor, para la presión máxima de trabajo. De la tabla 2.1 se obtiene el valor de 18 mV/psi para la sensibilidad del sensor SCX01DNC, entonces el voltaje de salida del sensor para una presión aplicada de 0.5689 psi será:

$$V = 18 \text{ mV/psi} * 0.5689 \text{ psi} = 10.24 \text{ mV}$$

Este valor de 10.24 mV es el valor que se obtendría a la salida del sensor si éste estuviera alimentado con una fuente de 12 VDC, en este caso como el jumper J4 en la tarjeta SCX-EB esta abierto, el voltaje sobre el sensor va a ser de 10 VDC, entonces como el voltaje de salida del sensor es directamente proporcional al voltaje de polarización del mismo, el voltaje real de salida del sensor será:

$$V = 10.24 \text{ mV} * 10\text{V}/12\text{V} = 8.534 \text{ mV}$$

La ganancia deseada del circuito A_V estará dada por:

$$A_V = \frac{\Delta V_O}{\Delta V_{in}} = \frac{10 \text{ V} - 0 \text{ V}}{8.53 \text{ mV}} = 1171.79$$

De la ecuación 2.33 se tiene:

$$2 \left(1 + \frac{R_3}{R_T} \right) = 1171.79$$

Como $R_3=100 \text{ K}\Omega$, entonces:

$$R_T = \frac{100 \text{ K}\Omega}{584 \cdot 895} = 170 \cdot 97 \Omega$$

Como:

$$R_T = R_S + R_G$$

Entonces se selecciona $R_s = 100 \Omega$ y R_G sigue siendo el potenciómetro de de valor original 200Ω .

2.3 BOMBA Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

El agua es empujada desde el reservorio hacia los tanques del prototipo mediante una bomba centrífuga accionada por un motor DC, la bomba es del tipo centrífugo sumergible diseñada para ser usada en tanques, sistemas de almacenamiento de agua y otros flúidos. Esta ensamblada en forma muy compacta de manera que no tenga la menor filtración hacia el motor. La bomba no debe operar sin flúido, ya que por sus características físicas, es capaz de bombear unicamente flúidos líquidos, en caso contrario el tiempo de vida de la bomba se reducirá sensiblemente. La bomba puede operar en cualquier posición bajo el nivel del flúido a bombear. Las especificaciones más importantes de esta bomba se detallan a continuación:

Marca: WHIRLWIND

Modelo: 3BPLA 12 V.D.C.

$V_{NOM} = 12 (V_{DC})$

$I_{NOM} = 1.8 (A)$

Entrada flúido = 1/2 " NPT Male

Salida flúido = 3/8 " NPT Male

Descarga Nominal: 6 GPM

2.3.1. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

El circuito implementado permite controlar la velocidad del motor de la bomba en proporción directa al voltaje de entrada al circuito y que proviene del controlador análogo o digital.

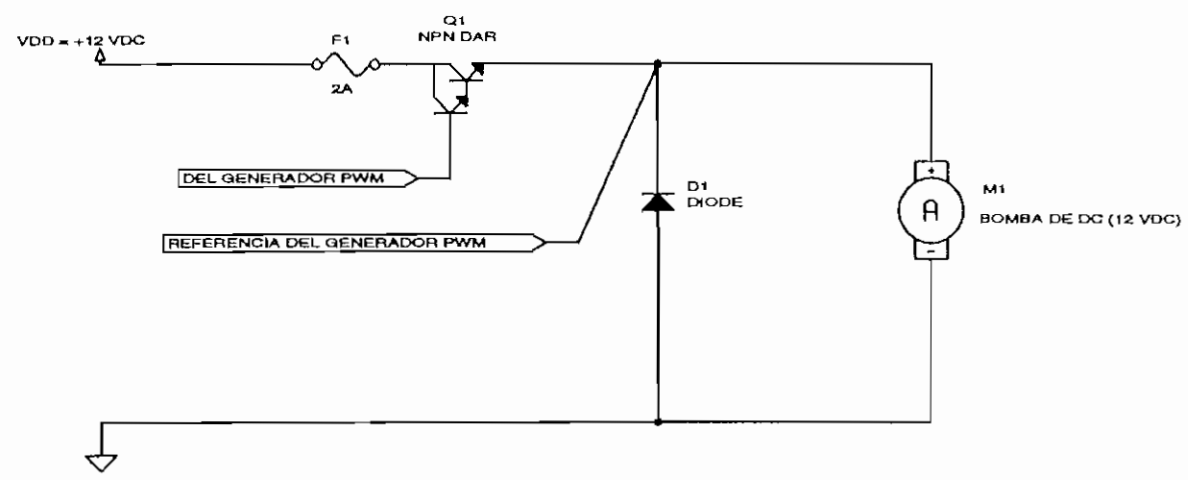
Para controlar la velocidad del motor lo que se hace es un control de velocidad por voltaje, es decir se varía el voltaje de alimentación de la bomba en forma proporcional al voltaje de entrada al circuito del DRIVER, para ello se emplea un "CHOPPER DE DC" que permite trozear la señal continua de potencia y enviar solamente una fracción de la misma en un período de tiempo a la carga.

El chopper diseñado (figura 2.14) está constituido por un interruptor estático, en este caso un transistor de potencia en configuración Darlington monolítico que conecta y desconecta alternadamente la carga a la fuente de alimentación de corriente continua, produciendo sobre la carga un voltaje trozeado, es decir se envía a la carga fracciones de la señal de potencia en intervalos de tiempo.

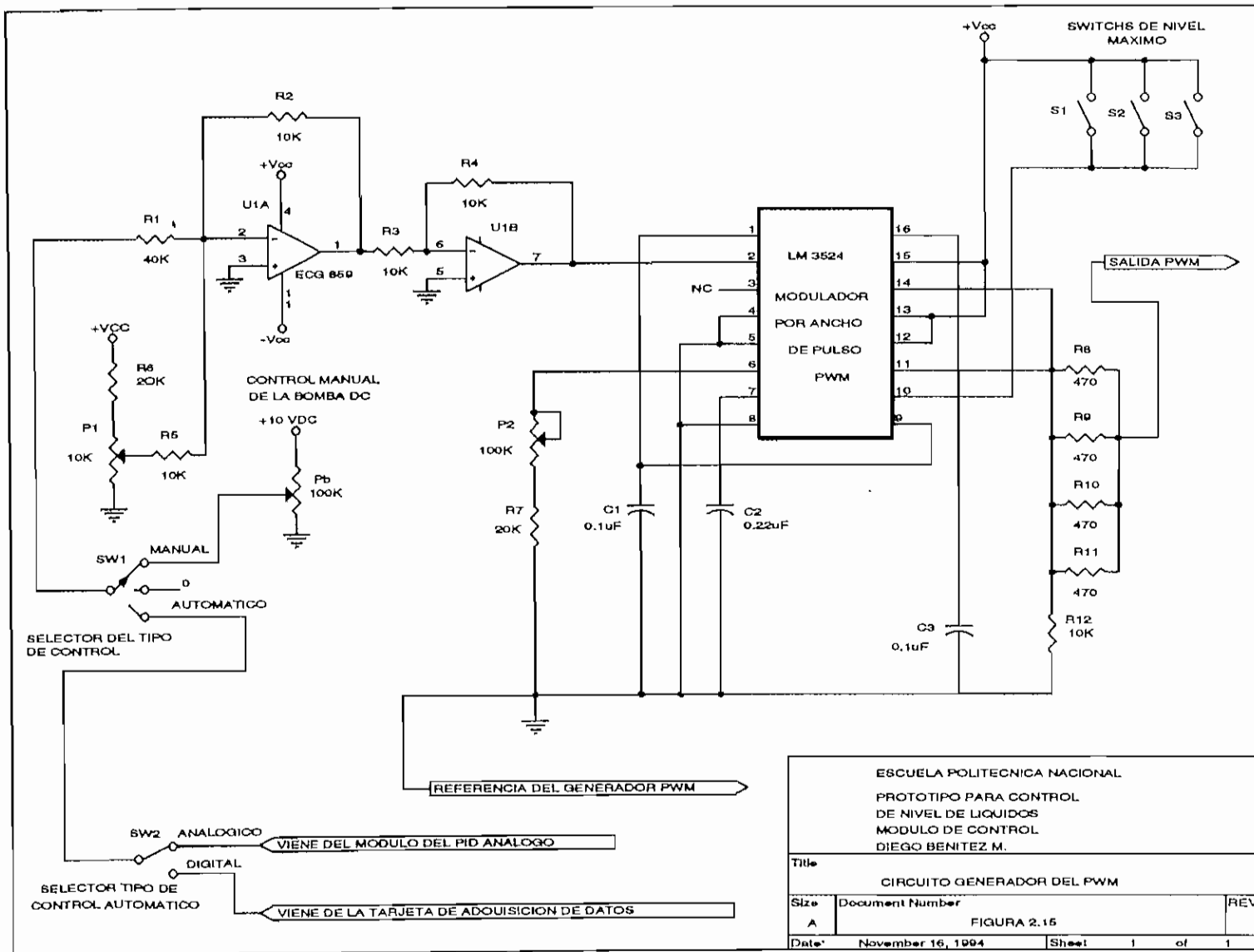
En serie con el interruptor estático, se encuentra un fusible de protección de 2 Amperios que sirve para proteger al motor de bomba centrífuga contra sobrecargas de corriente. El diodo D1 en paralelo con la bomba, es un diodo de conmutación y sirve como camino alterno para la corriente almacenada por la carga inductiva del motor de la bomba, cuando el interruptor estático se abre. Nótese que las referencias del circuito de control, generador de la señal PWM, y el circuito de potencia no son las mismas, pues la señal de pulsos que ingresa a la base del transistor y que comanda la apertura y cierre del transistor esta referida al emisor del transistor y no a la tierra del circuito de potencia.

Para controlar la apertura y cierre del transistor de potencia, se utiliza la técnica de modulación por ancho de pulso PWM, la señal PWM es generada por un circuito integrado (LM3524 modulador por ancho de pulso) con su respectiva circuitería adicional, el circuito implementado para generar la señal PWM se muestra en la figura 2.15. El drive produce una señal modulada por ancho de pulso cuya frecuencia de trabajo esta determinada por

VCC= FUENTE DEL MODULO DE CONTROL
 VDD= FUENTE DEL MODULO DE POTENCIA
 NOTESE QUE LAS REFERENCIAS DEL CIRCUITO DE
 DE CONTROL Y DEL CIRCUITO DE POTENCIA
 NO SON LAS MISMAS



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL PROTOTIPO PARA CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS MODULO DE POTENCIA DIEGO BENITEZ M.		
Title DRIVER DE LA BOMBA DC		
Size A	Document Number FIGURA 2,14	REV
Date: July 26, 1994	Sheet 1	of 1



el capacitor C2 y el potenciómetro P2, los valores de éstos elementos se determinarán experimentalmente basándose en las curvas dadas por el fabricante.

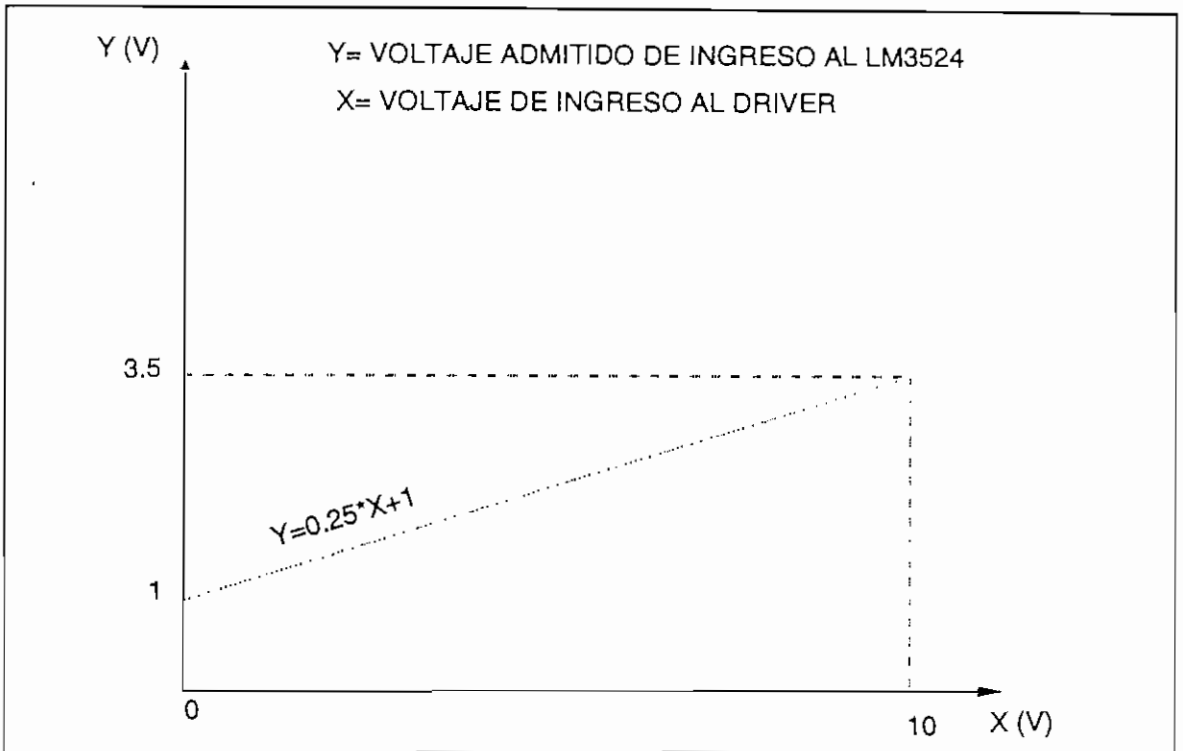


FIGURA 2.15.1 ECUACION DE FUNCIONAMIENTO DEL DRIVER

La señal de control del driver está en el rango de 0 a 10 V, pero el circuito integrado LM3524 solo admite voltajes de entrada entre 1 y 3.5 V, por tal motivo la señal que proviene del control analógico o digital, debe primero ingresar a una etapa de amplificadores en donde se baja el voltaje y se suma el valor del offset, tal como se muestra en la ecuación de la recta de la figura 2.15.1, esto se logra con el circuito formado por los amplificadores operacionales U1A, U1B y el potenciómetro P1 en el circuito de la figura 2.15.2.

En la figura 2.15.2 el voltaje V_o está dado por la siguiente expresión:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_2}{R_5} \cdot V_x \quad (2.34)$$

Entonces, la ecuación 2.34 debe cumplir con la ecuación de la recta de funcionamiento del DRIVER, de aquí se deduce que:

$$R_2 = 0.25 * R_1$$

Si se asume $R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ K}\Omega$, entonces $R_1 = 40 \text{ K}\Omega$. El voltaje V_x debe ser igual a 1V, para cumplir con la ecuación del driver, el voltaje V_x se fija mediante el potenciómetro P1 y la resistencia R6.

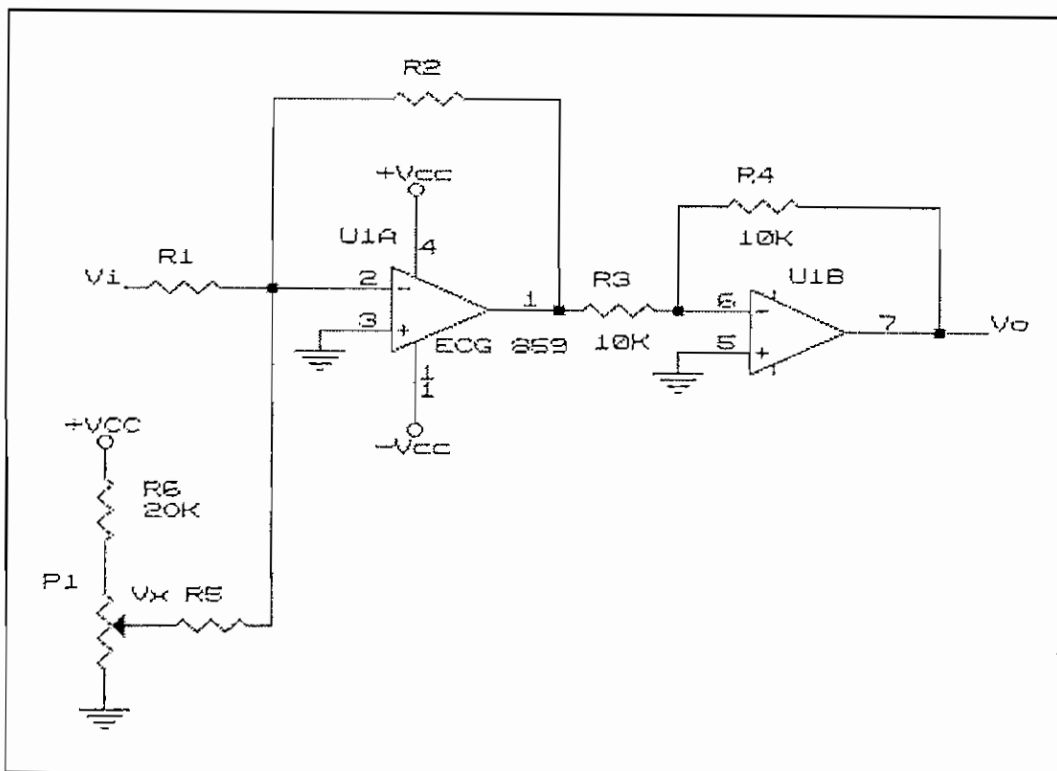


FIGURA 2.15.2

El modulador LM3524 tiene la ventaja de que su salida puede ser inhabilitada, a través de un transistor interno que limita el voltaje de control que ingresa en el mismo cuando se tenga un voltaje alto en el pin 10 (entrada en la base de dicho transistor), esta señal de voltaje alto es enviada a dicho pin por los interruptores de nivel máximo cuando son activados, cortando inmediatamente la operación de la bomba.

Las resistencias R8, R9, R10 y R11 en paralelo y la resistencia R12 se usan para limitar la corriente en la base del transistor de potencia del driver de la bomba. Los capacitores C1 y C3 sirven para filtrar cualquier señal de ruido.

2.4 VALVULAS DE CONTROL DE FLUJO

Como se mencionó anteriormente los tanques del prototipo se encuentran acoplados mediante válvulas de control de flujo que varían el caudal o flujo de agua de un tanque a otro. Del número de tanques que se utiliza en una determinada aplicación dependerá del orden del sistema con el que se desee trabajar. El caudal de agua que sale del último tanque también es controlado por una de estas válvulas.

Las válvulas que se utilizan son del tipo ALKON JF3, la principal característica de este tipo de válvulas es la de ser graduadas, y tener una respuesta casi lineal de flujo o caudal de salida versus graduación de apertura, esta graduación permite tener un fácil control del flujo o caudal de agua que pasa por cada válvula de un tanque a otro del prototipo lo que facilita el trabajo de modificar los parámetros de la planta y tener una idea cuantitativa del valor al cual se ha modificado dicho parámetro.

Las principales características de este tipo de válvulas son:

- Cuerpo sellado que garantiza que no existirán fugas.
- Dial de precisión calibrado para determinar y permitir el retorno a valores de flujo prefijados.
- Coeficiente C_v con aguja totalmente abierta = 1.08 [galones/min]
- Peso aproximado = 0.54 Kg
- Dimensión NPTF = 3/8"
- Coeficiente K_v con aguja totalmente abierta = $0.86 * C_v = 0.9288$ [m³/h]

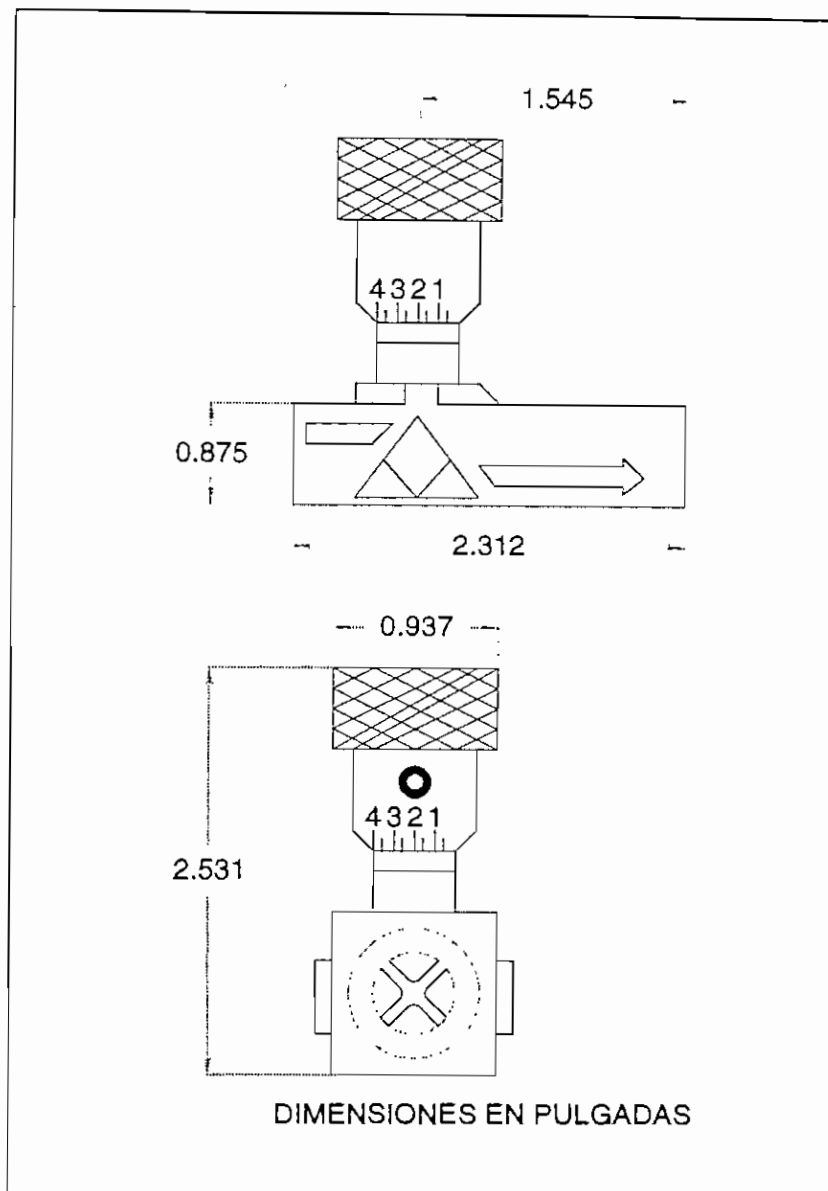


FIGURA 2.16 DIMENSIONES DE LAS VALVULAS DE CONTROL DE FLUJO

El coeficiente K_v se define de la siguiente manera: "Caudal de agua (de 5 a 30° C) en m^3/h que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 Kg/cm^2 ". Según la norma VDI/VDE 2173 (septiembre 1962). ⁽²⁾

⁽²⁾ Creuss A., "Instrumentación Industrial", 2da. Edición, Editorial Marcombo, pág. 387.

2.5 CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

El prototipo en sí está constituido por los tres tanques acoplados principales (cuyas dimensiones fueron determinadas en el numeral 2.1 de este capítulo) contruidos de material acrílico transparente (PLEXY-GLASS) de 4 mm, se escogió este material por ser altamente resistente y liviano, lo que es ideal para el tipo de trabajo al que va a ser sometido el prototipo. En esta estructura de tanques acoplados es en donde se va a realizar el control del nivel de agua en el último tanque, por lo tanto es en el último tanque del prototipo en donde se encuentra localizada la zonda de vidrio que transmite la presión del fondo del tanque al sensor de presión diferencial que está localizado en el módulo de control. El acople entre el tubo de vidrio ubicado en el último tanque del prototipo y el sensor de presión diferencial se realiza mediante una manguera de plástico de fácil manejo y manipulación. La parte frontal de cada uno de los tanques está graduada de manera de poder fácilmente mirar el nivel que va alcanzando el agua en cada uno de los tanques.

En la parte superior de cada uno de los tanques que conforman el prototipo de control de nivel de líquidos, se encuentra localizado un interruptor de nivel máximo, estos interruptores de nivel fueron fabricados como parte de la tesis y están formados por un microswitch ultrasensible (micro suave) en cuya punta se encuentra acoplado un flotador, el micro es accionado cuando el nivel del agua hace subir al flotador, la función de estos interruptores de nivel es evitar que el agua se derrame en el prototipo cuando el nivel del agua supera un cierto nivel máximo.

Esta estructura principal descansa sobre un soporte rectangular, también hecha del mismo material, con refuerzos angulares de acero inoxidable. La función de este soporte es elevar a la estructura principal de la cubeta reservorio a un nivel adecuado de trabajo, a fin de que se pueda tener un fácil acceso a las perillas de graduación de cada una de las válvulas de control de flujo con que cuenta la estructura principal.

Esta estructura completa, (soporte más tanques acoplados) descansa sobre el reservorio o cubeta que es en donde se almacena toda el agua que será bombeada por la bomba de inmersión, que también está alojada en su interior, hacia la estructura de tanques

acoplados. Este reservorio tiene dos señalizaciones de nivel máximo y mínimo, además posee una válvula de desfogeo de agua de ½" que servirá para vaciar el reservorio cuando no se vaya a utilizar al prototipo.

Las dimensiones y forma de cada una de las partes del prototipo se ilustran en las figuras 2.17 y 2.18.

2.6 MODULO DE CONTROL

El módulo de control es la parte principal del equipo pues aquí se encuentra toda la circuitería que controla al prototipo. En la parte frontal superior exterior del módulo se encuentran los circuitos de señalización tanto del nivel de referencia, al que se quiere llegar y que es utilizado por el control analógico, como también el circuito de señalización del nivel real sentido en el último tanque del prototipo. También se encuentran en esta tapa frontal los potenciómetros de perilla que permiten fijar los parámetros de las constantes del control PID analógico, así como también los terminales de conexión del sensor de presión diferencial con el que cuenta el equipo.

En la parte interior del módulo de control se encuentran distribuidas todas las tarjetas de los distintos circuitos electrónicos que conforman al equipo, incluyendo las fuentes de poder, un ventilador de 12 VDC es utilizado para refrigerar dichos circuitos. La entrada de alimentación de voltaje de la red normal (110 VAC) al módulo de control, está protegida contra picos de corriente e interferencias de ruido mediante un filtro de línea en el cual se enchufa el cable de poder del equipo, esto garantiza una buena estabilidad en los circuitos de control del prototipo.

En la parte lateral exterior del módulo de control, se encuentran localizadas las borneras terminales de la bomba de inmersión, en la parte exterior posterior y convenientemente identificados, se encuentran todos los terminales para las distintas conexiones exteriores del modulo de control.

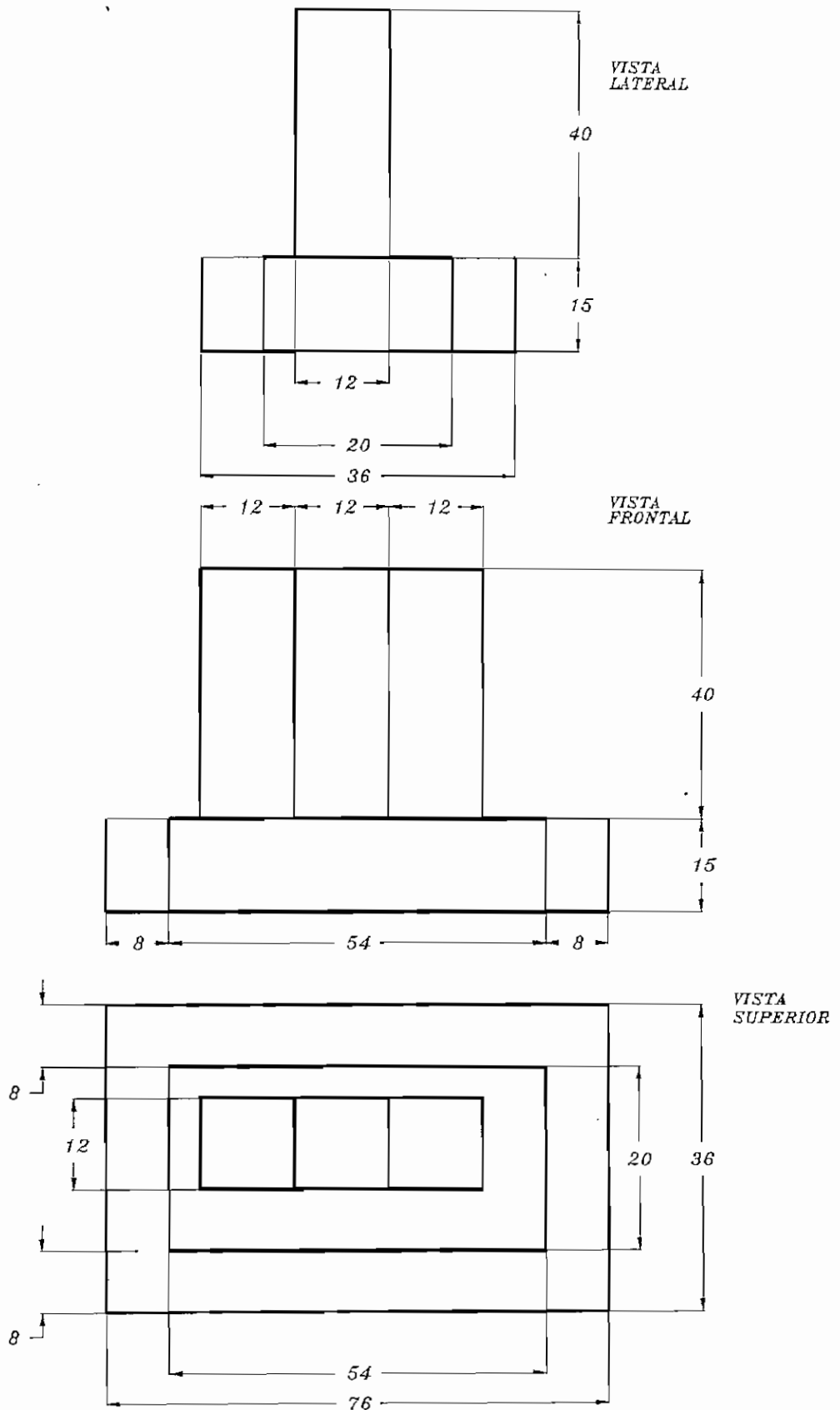


FIGURA 2.17 DIMENSIONES FISICAS DEL PROTOTIPO DE CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS

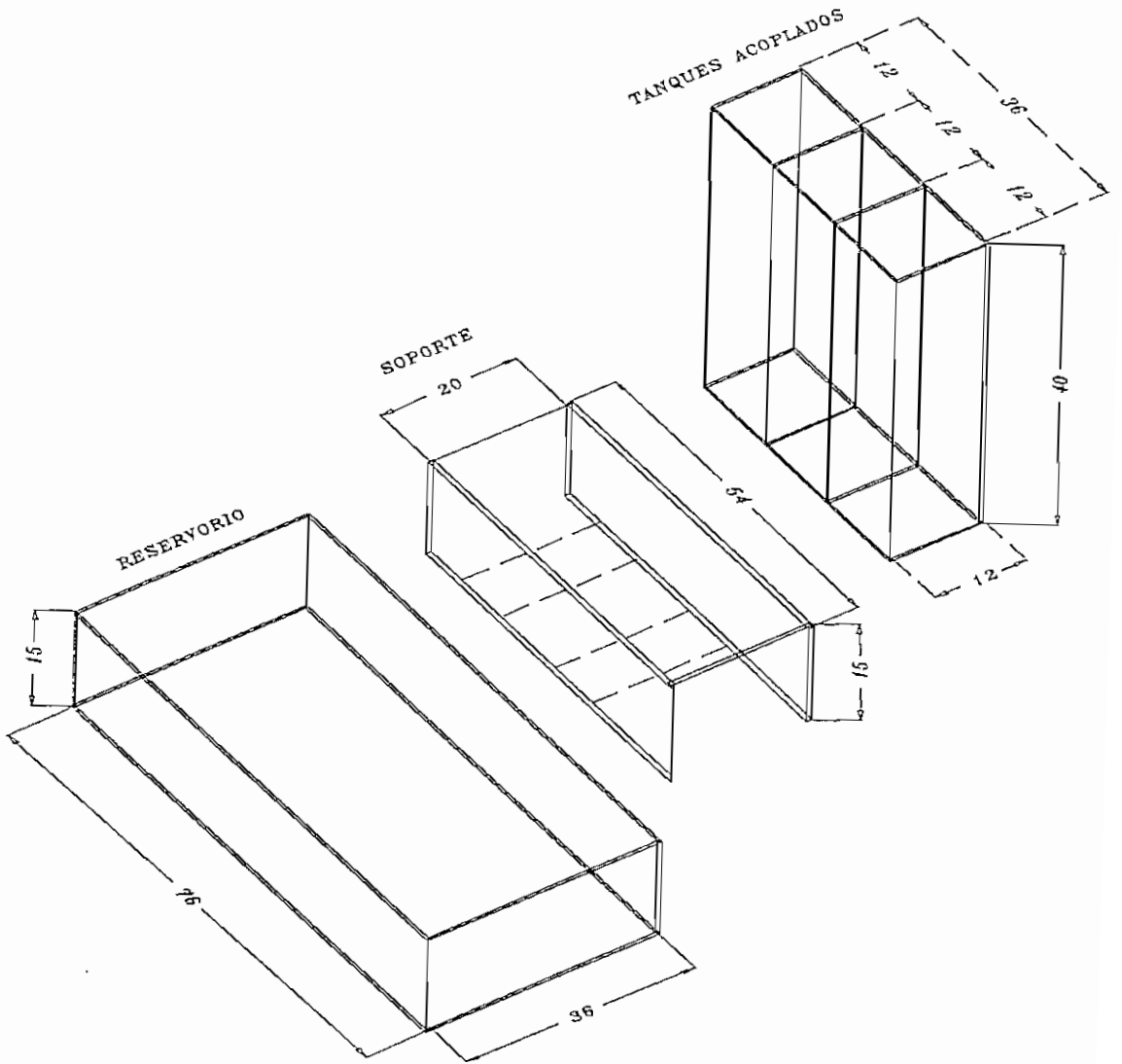


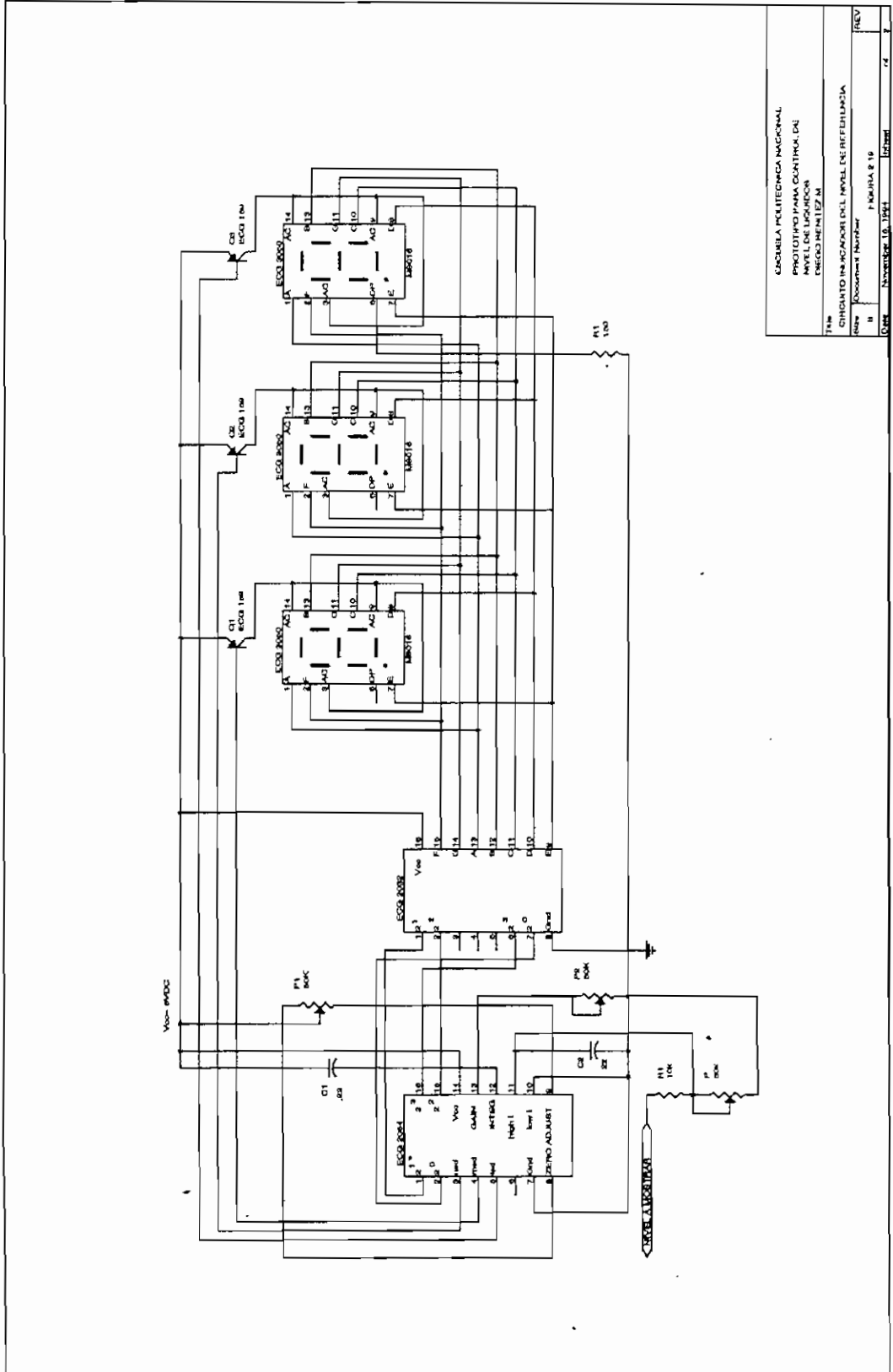
FIGURA 2.18 PRESPECTIVA DEL PROTOTIPO

2.6.1 CIRCUITOS DE SEÑALIZACION

Estos circuitos son utilizados para observar el nivel de referencia al que se desea llegar utilizando el control de tipo analógico con el que cuenta el equipo y para monitorear el nivel real sentido en el último tanque del prototipo.

El circuito que se utiliza, básicamente tiene el mismo principio en ambos casos, lo único que varía es que en el caso del nivel de referencia el voltaje que ingresa al circuito proviene de un divisor de tensión formado por un potenciómetro de perilla, que sirve para fijar la altura de referencia, en paralelo al potenciómetro se encuentra un diodo zener que sirve para fijar el voltaje a los extremos del potenciómetro entre 0 y 10 V; en cambio, para el indicador del nivel real este voltaje de ingreso al circuito proviene directamente del circuito de acondicionamiento de señal de salida del sensor de presión diferencial (tarjeta SCX-EB).

El circuito en cuestión (figura 2.19) está formado por un circuito integrado ECG2054 que es un conversor análogo-digital con barrido de display conectado a otro circuito integrado ECG2032 que es un driver de corriente y que sirve para manejar la corriente de los 3 displays de 7 segmentos de ánodo común ECG3050. El control del barrido de los 3 dígitos formados por estos displays lo realiza el propio conversor A/D mediante el switcheo de los 3 transistores PNP ECG159 que conectan y desconectan la polarización a los displays. Complementan el circuito los capacitores de .22 μF , el capacitor C2 sirve de filtro de la señal de entrada y el otro capacitor C1 para el circuito de integración propio del conversor A/D, los potenciómetros P1 y P2 sirven para ajustar los valores de cero y la ganancia respectivamente de acuerdo a nuestra conveniencia.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	
PROYECTO PARA CONTROLAR LA	
VELOCIDAD DE UN MOTOR	
DE CORRIENTE TRIFÁSICA	
Título	
CARRERA INGENIERO EN ELECTRÓNICA	
Docente	Ing. J. R. P.
Alumno	Ing. J. R. P.
Fecha	10/05/2010
Rev.	1
Figura	8.19
Rev.	1

En la parte de anexos se incluye un manual de calibración de todo el equipo en donde se detalla la forma de calibrar estos circuitos.

2.6.2 FUENTES DE PODER

El equipo cuenta con dos fuentes de poder independientes, una para el circuito de control y otra para el circuito de potencia de la bomba de DC.

Una vez determinados los requerimientos de corriente de los distintos circuitos del prototipo, se decidió por dos fuentes de poder tipo Switching distribuidas por la casa JAMECO que cumplen incluso convenientemente sobredimensionadas con los requerimientos de voltaje y corriente de los circuitos del prototipo. Las características de estas fuentes se detallan a continuación.

2.6.2.1 Fuente para circuitos de control

Para polarizar los distintos circuitos de control se optó por una fuente de cuatro voltajes, cuyas características son:

NÚMERO DE CATÁLOGO: PS1400

POTENCIA: 50 W a convección natural

65 W a 15 CFM aire forzado

VOLTAJE DE ENTRADA: 115/230 V_{AC}

VOLTAJES DE SALIDA DC: +5V @6A +12V @1A

-5V @0.5A -12V @1A

TAMAÑO: 8" L x 4.5" W x 2.25" H

2.6.2.2 Fuente para el circuito de potencia

Para el circuito de potencia se decidió por una fuente que cumpla con los requerimientos a plena carga de la bomba de DC del prototipo, las características de esta fuente son:

NÚMERO DE CATÁLOGO: PS3050

POTENCIA: 73 W a convección natural

VOLTAJE DE ENTRADA: 115/230 V_{AC} @40-450 Hz

VOLTAJES DE SALIDA DC: +5V @5A +12V @4A

TAMAÑO: 6.5" L x 4" W x 1.75" H

Para que que estas fuentes trabajen adecuadamente se recomienda cargar con mínima carga todas sus salidas, esto esta realizado internamente dentro del módulo de control del prototipo, por lo tanto el usuario del equipo no tendrá que preocuparse por esta razón.

CAPITULO III: DISEÑO DEL CONTROL

- 3.1 Control análogo
 - 3.1.1 Consideraciones previas para el diseño del controlador PID análogo
 - 3.1.2 Modelación de la planta a compensar
 - 3.1.2.1 Función de transferencia de la bomba centrífuga
 - 3.1.2.2. Función de transferencia del sensor de presión diferencial más el acondicionamiento de señal
 - 3.1.2.3 Función de transferencia del prototipo de tanques acoplados
 - 3.1.3 Diseño del controlador PID análogo
 - 3.1.3.1 Sistema de primer orden
 - 3.1.3.2 Sistema de segundo orden
 - 3.1.3.3 Sistema de tercer orden
 - 3.1.4 Circuito implementado para el controlador PID análogo
- 3.2 Control digital
 - 3.2.1 Software desarrollado para control
- 3.3 Pruebas de simulación

3.1 CONTROL ANALOGO

Como se mencionó anteriormente el prototipo para control de nivel de líquidos cuenta con un control análogo del tipo PID en el módulo de control, el diseño del controlador PID implementado se detalla a continuación.

3.1.1 CONSIDERACIONES PREVIAS PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR PID ANALOGO

Para realizar la compensación de la planta (prototipo de tanques acoplados), es necesario primero obtener la función de transferencia completa de la planta. En este caso la función de transferencia total estará formada por tres bloques principales (funciones de transferencia individuales) correspondientes a cada uno de los componentes de la planta, y que son:

- Bomba centrífuga
- Prototipo de tanques acoplados, y
- Sensor de nivel más acondicionamiento de señal

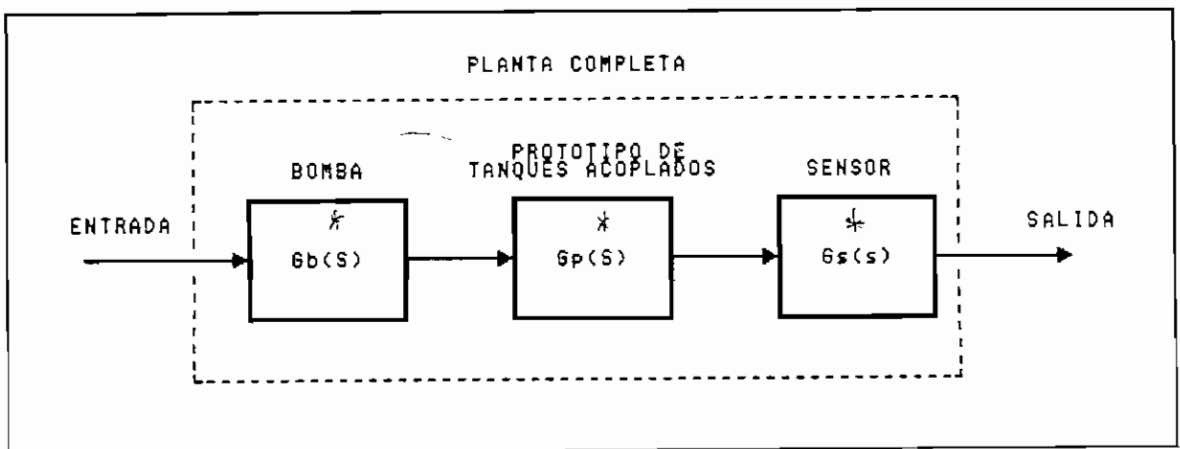


FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PLANTA

Por tal motivo, lo primero que se debe hacer es determinar las funciones de transferencia de cada uno de estos bloques individuales, para luego obtener la función de transferencia total del sistema completo.

3.1.2 MODELACION DE LA PLANTA A COMPENSAR

3.1.2.1 Función de transferencia de la bomba centrífuga

Considérese la característica estática de la bomba centrífuga, figura 3.2, obtenida experimentalmente, si se linealiza esta curva característica que representa el comportamiento de la bomba centrífuga de inmersión, en valores cercanos al punto de operación, se obtiene la siguiente ecuación que describe el funcionamiento de la misma para dicho punto:

$$q_b = k_b * v_i \quad (3.1)$$

donde: q_b = Caudal de salida de la bomba centrífuga [cm^3/s]

v_i = voltaje aplicado a la bomba centrífuga [v]

k_b = pendiente de la curva linealizada en torno al punto de operación, considerado en la region de 3 V a 5 V, e igual a:

$$k_b = 0.26 \text{ [GPM/V]} = 16.26 \text{ [cm}^3/\text{V.s]}$$

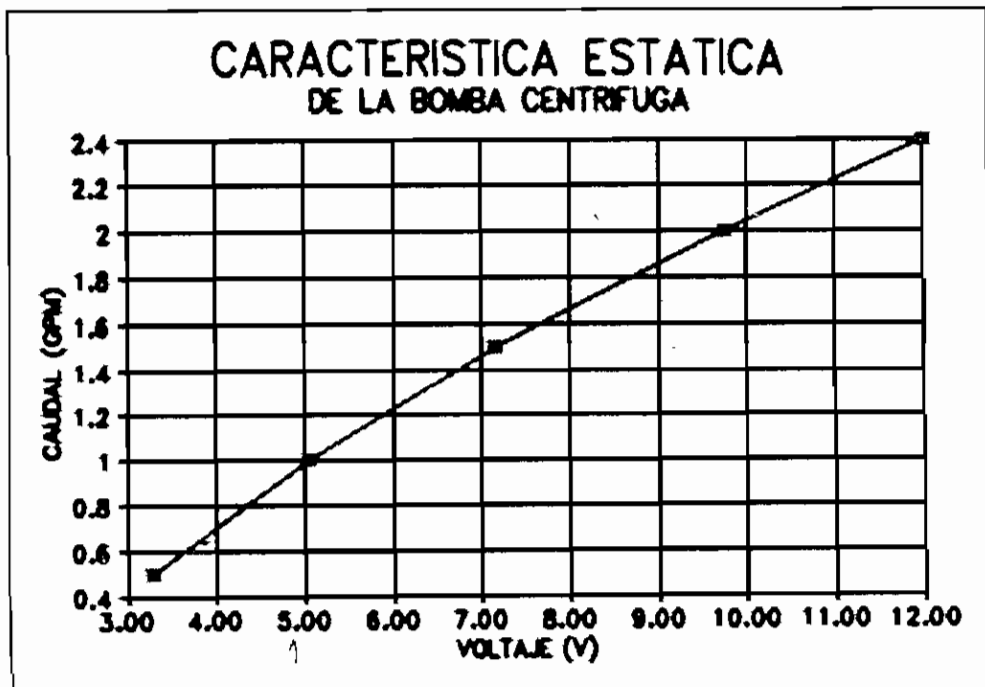


FIGURA 3.2 CARACTERISTICA ESTATICA DE LA BOMBA DE INMERSION.

Si se aplica la transformada de Laplace a la ecuación 3.1 se obtiene la siguiente función de transferencia para la bomba centrífuga de inmersión:

$$G_b(s) = \frac{Q_b(s)}{V_i(s)} = k_b = 16.26 \quad (3.2)$$

3.1.2.2 Función de transferencia del sensor de presión diferencial más el acondicionamiento de señal

Como se mencionó en el capítulo 2, en la parte concerniente al sensor de presión diferencial de estado sólido, este tipo de sensor se caracteriza por su linealidad en todo el rango de trabajo, este comportamiento lineal también se aplica a la tarjeta SCX-EB sobre la cual está montado el sensor, lo que hace que el voltaje de salida de ésta tarjeta (acondicionamiento de señal) sea directamente proporcional a la presión aplicada al sensor, que a su vez es directamente proporcional a la altura del líquido dentro del último tanque del prototipo, por tal motivo, la característica estática de esta parte de la planta es lineal como lo muestra la figura 3.3.

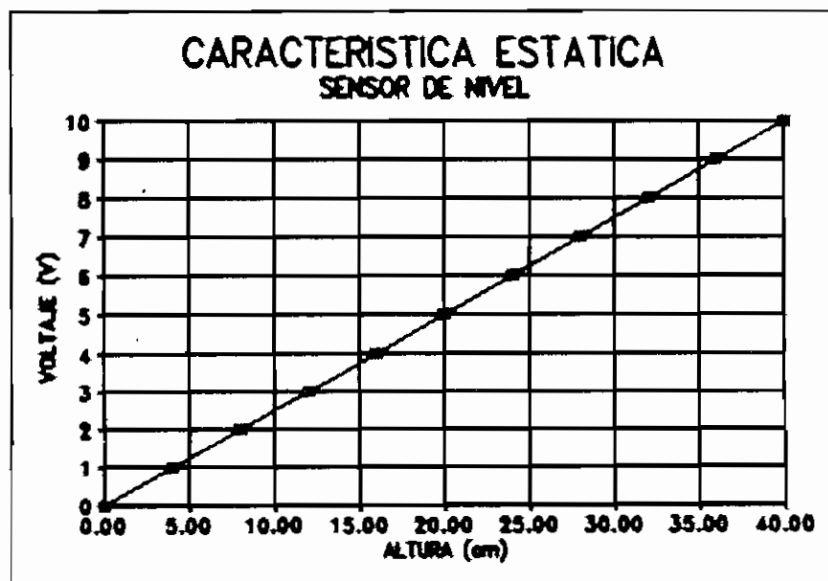


FIGURA 3.3 CARACTERISTICA ESTATICA DEL SENSOR DE NIVEL

La función que describe el comportamiento del sensor más su acondicionamiento de señal es la siguiente:

$$v_o = k_s * h \quad (3.3)$$

donde: v_o = voltaje de salida de la tarjeta de acondicionamiento de señal [V]

k_s = pendiente de la línea = 0.25 [V/cm]

h = altura del líquido en el último tanque del prototipo

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación 3.3 se obtiene la siguiente función de transferencia para el sistema del sensor más el acondicionamiento de señal:

$$G_s(s) = \frac{V_o(s)}{H(s)} = 0.25 \quad (3.4)$$

3.1.2.3 Función de transferencia del prototipo de tanques acoplados

En el capítulo II (numeral 2.1), se realizó la modelación del prototipo de tanques acoplados, incluyendo las válvulas de control de flujo que intercomunican a los tanques del prototipo, por lo tanto, en esta parte se utilizarán las funciones de transferencia encontradas para los sistemas de primero, segundo, y tercer orden deducidas en dicho numeral.

La función de transferencia total de la planta a compensar estará formada por las tres funciones de transferencia obtenidas para cada uno de los componentes de la planta: bomba centrífuga, prototipo de tanques acoplados; y, por último, el sensor de nivel más su acondicionamiento de señal. Aplicando las reglas del álgebra de diagramas de bloques al diagrama de bloques de la planta (figura 3.1), la función de transferencia que respresenta a la planta en conjunto estará dada por:

$$G_{PT}(s) = G_b(s) * G_p(s) * G_s(s) \quad (3.5)$$

donde: G_{PT} = función de transferencia de la planta total

G_b = función de transferencia de la bomba centrífuga

G_p = función de transferencia del prototipo de tanques acoplados

G_s = función de transferencia del sensor de nivel más su acondicionamiento de señal

3.1.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR PID ANALOGO

A continuación se detalla el diseño de las constantes del controlador PID, para cada uno de los sistemas con los que puede trabajar el prototipo de acuerdo al orden del mismo, a fin de poder dimensionar adecuadamente los valores de los elementos del circuito del compensador PID a implementar.

3.1.3.1 Sistema de primer orden

Reemplazando los valores de las constantes k_1 y k_2 en la ecuación 2.6 que representa la función de transferencia para el sistema de primer orden, un solo tanque, se obtiene la siguiente expresión :

$$k_1 = \frac{K_V}{2 \cdot A \sqrt{HI}} = \frac{258}{2 \cdot 144 \cdot \sqrt{16}} = 0.2240$$

$$k_2 = \frac{1}{A} = \frac{1}{144} = 0.0069$$

$$G_p(s) = \frac{HI(s)}{Qi(s)} = \frac{k_2}{s+k_1} = \frac{0.0069}{s+0.2240}$$

Entonces la función de transferencia de la planta total (ecuación 3.5) estará dada por:

$$G_{PT}(s) = \frac{16 \cdot 26 \cdot 0.0069 \cdot 0.25}{s+0.2240} = \frac{0.0280}{s+0.2240} \quad (3.6)$$

Si se considera para este sistema de primer orden, un controlador del tipo PI cuya función de transferencia es:

$$\widehat{G}_c(s) = k_p * \left[1 + \frac{k_i'}{s} \right] \quad (3.7)$$

la función de transferencia total G_T (planta más compensador) estará dada por :

$$G_T(s) = \frac{k_p * [s + k_i']}{s} * \frac{0.0280}{s + 0.2240} \quad (3.8)$$

Aplicando la técnica de cancelación de polos y ceros, y colocando el polo de lazo cerrado en -0.2 (consideración que se comenta en el numeral 4.2), se obtienen los siguientes valores para las constantes k_p y k_i' :

$$s + k_i' = s + 0.2240 = k_i' = 0.2240$$

$$(k_p * 0.0280 = 0.2) \Rightarrow k_p = 7.143$$

$$k_i = k_i' * k_p = 1.6$$

3.1.3.2 Sistema de segundo orden

Reemplazando los valores de las constantes k_1 , k_2 , y k_3 en la función de transferencia obtenida para el sistema de segundo orden, ecuación 2.13 se obtiene la siguiente expresión para el sistema de segundo orden:

$$k_1 = \frac{K_v}{2 \cdot A \cdot \sqrt{H1 - H2}} = \frac{258}{2 * 144 * \sqrt{18 - 16}} = 0.6334$$

$$k_2 = \frac{1}{A} = \frac{1}{144} = 0.0069$$

$$k_3 = \frac{K_V}{2 \cdot A \sqrt{H_2}} = \frac{258}{2 \cdot 144 \cdot \sqrt{16}} = 0.2240$$

$$G_p(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{k_1 \cdot k_2}{s^2 + s(2 \cdot k_1 + k_3) + k_1 \cdot k_3} = \frac{0.0044}{s^2 + 1.4908 \cdot s + 0.1419}$$

Entonces, la función de transferencia total de la planta (ecuación 3.5) estará dada por:

$$G_{PT}(s) = \frac{0.0179}{s^2 + 1.4908 \cdot s + 0.1419} \quad (3.9)$$

Si se considera para este sistema de segundo orden un controlador del tipo PID cuya función de transferencia es:

$$G_c(s) = k_p * \left[1 + k_d' * s + \frac{k_i'}{s} \right] \quad (3.10)$$

La función de transferencia total de la planta más el compensador estará dada por:

$$G_T(s) = k_p * \left[\frac{k_d' * s^2 + s + k_i'}{s} \right] * \frac{0.0179}{1.4908} \cdot \frac{1}{1.4908 \cdot s^2 + s + 0.1419} \quad (3.11)$$

Aplicando la técnica de cancelación de polos y ceros, y colocando el polo de lazo cerrado en -0.2, se obtuvieron los siguientes valores para k_p , k_d' y k_i' :

$$k_d' = \frac{1}{1.4908} = 0.6708$$

$$k_i' = \frac{0.1419}{1.4908} = 0.0952$$

$$\frac{0.0179}{1.4908} \cdot k_p = 0.2 \Rightarrow k_p = 16.657$$

$$k_i = 0.0952 \cdot 16.65 = 1.5851$$

$$k_d = 0.6708 \cdot 16.65 = 11.17$$

3.1.3.3 Sistema de tercer orden

Si se reemplazan los valores de k_1 , k_2 , k_3 y k_4 en la ecuación 2.18 que representa a al sistema de tercer orden, se obtiene la siguiente expresión:

$$G_p(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{0.0025}{s^3 + 2.6364s^2 + 1.4996s + 0.0859} \quad (3.12)$$

entonces, la función de transferencia total para la planta completa (ecuación 3.5) será:

$$G_T(s) = \frac{0.0102}{s^3 + 2.6364s^2 + 1.4996s + 0.0859} \quad (3.13)$$

Si se considera un controlador del tipo PID cuya función de transferencia esta dada por la ecuación 3.12, la función de transferencia total del sistema de la planta más el controlador estará dada por:

$$G_T(s) = k_p * \left[\frac{k_d' * s^2 + s + k_i'}{s} \right] * \frac{0.0102}{0.7849} \cdot \frac{1}{(s + 1.8515) * \left(\frac{1}{0.7849} * s^2 + s + \frac{0.0464}{0.7849} \right)} \quad (3.14)$$

Aplicando la técnica de cancelación de polos y ceros, colocando los polos remanentes en -0.15y -1.7, y aplicando la condición de módulo se obtienen los siguientes valores para k_p , k_d , y k_i :

$$k_p = 20$$

$$k_i' = 0.0591; \quad k_i = 1.182$$

$$k_d' = 1.2740; \quad k_d = 25.4$$

Cabe mencionar, que por la naturaleza del circuito que se utiliza, el valor máximo experimental de saturación del circuito del PID es de 8 V, por tal motivo y para lograr que el valor máximo de la señal de salida del circuito del PID sea de 10 V, la etapa sumadora de los términos del PID debe amplificar este valor a 10 V, esto se logra mediante la resistencia R5 que da una ganancia de 1.2 a la señal proveniente del PID. Esta amplificación en la señal de salida es necesaria por cuanto el DRIVER de la BOMBA de DC trabaja con voltajes estandarizados entre 0 y 10 V.

Además si se estudia la característica estática de la BOMBA DC se observa claramente que está empieza a trabajar adecuadamente (es decir logra empujar agua desde el reservorio) a partir de los 3 V de polarización, de tal manera que esta amplificación ayuda a tener un mejor control sobre el caudal de la bomba cuando la señal de control del PID es mínima.

Esta etapa de amplificación puede ser alterada accionando el interruptor S4 que se encuentra en la parte posterior del módulo de control, cuando en interruptor S4 se cierra la resistencia R6 entra en paralelo con la resistencia R5, logrando de esta manera que la ganancia total de esta etapa disminuya a un valor de 0.4, esto es útil para poder alterar la ganancia de la planta para consideraciones didácticas. El amplificador operacional U1D se emplea como etapa de desacople para enviar la señal del sensor de nivel a la tarjeta de adquisición de datos, para realizar el control digital.

3.2 CONTROL DIGITAL

La señal de control en este caso, proviene de una tarjeta de adquisición y salida de datos que esta conectada a un computador digital. A esta tarjeta también ingresa la señal del sensor de nivel (voltaje estandarizado entre 0 y 10 V) que previamente y por seguridad pasa por una etapa de desacople, esta señal de voltaje es digitalizada en la tarjeta y su valor es almacenado dentro del computador para realizar las operaciones de control. En el computador digital se fija el nivel de referencia, los algoritmos de control se realizan por SOFTWARE y la señal de control sale a través de la tarjeta que convierte su valor digital en analógico (voltaje entre 0 y 10 V) hacia el DRIVER de la bomba dc.

La tarjeta que se utiliza es la tarjeta DAS-128 ⁽³⁾ que esta acoplada al computador existente en el laboratorio de control. Esta tarjeta es manejada desde el computador mediante el programa para control digital directo ⁽⁴⁾ que se utiliza en prácticas dentro del mismo laboratorio.

La idea de la presente tesis es completar este programa, dándole la posibilidad de trabajar con un sistema real, en este caso el prototipo para control de nivel de líquidos, por tal motivo se utilizan los algoritmos de control y las subrutinas de control ya desarrolladas en dicho programa.

En el módulo de control, se encuentran disponibles los terminales tanto de salida como de entrada para conectarse a esta tarjeta a fin de realizar el control de manera digital. La señal de control se encamina al DRIVER de la bomba DC, mediante la selección adecuada del tipo de control en el panel de control. La señal proveniente del sensor de nivel está siempre disponible en los terminales de salida y puede ser utilizada por otros instrumentos como registrador de papel, osciloscopio, etc

3.2.1 SOFTWARE DESARROLLADO PARA CONTROL

Como se mencionó anteriormente, el software desarrollado para realizar el control de manera digital, utiliza las subrutinas y algoritmos de control implementadas en el programa de control digital directo CCD, dichas subrutinas trabajan con señales de voltaje de 0 a 10 V pero las procesa como valores de voltaje tanto a la entrada como a la salida, en este caso se trabaja también con señales de voltaje de 0 a 10 V pero se las procesa como valores de altura para la entrada y voltaje para la salida que maneja al driver, la conversión de voltaje a altura se realiza por software dentro del programa, esta es una de las variaciones realizadas a las subrutinas originales.

⁽³⁾ Cevallos F., "Diseno y construcción de una tarjeta de adquisición de datos para computadores personales", Tesis de grado, 1993, E.P.N.

⁽⁴⁾ Fustillos P., "Algoritmos para control digital directo", Tesis de grado, 1994, E.P.N.

Se crearon dos subrutinas adicionales que permiten graficar dos tipos de gráficos de respuesta para la aplicación de control de nivel de líquidos: la primera (figura 3.5) permite observar en la pantalla del computador unicamente la respuesta en el tiempo del sistema (variación de altura), así como también la señal de control (voltaje de salida al driver), la otra pantalla (figura 3.6) permite además de lo anterior mirar un gráfico representativo del tanque en el cual se observa como varía el nivel del líquido dentro del tanque. El tipo de gráfico que se mostrará en pantalla se escoge en el submenú de opciones dentro del programa principal.

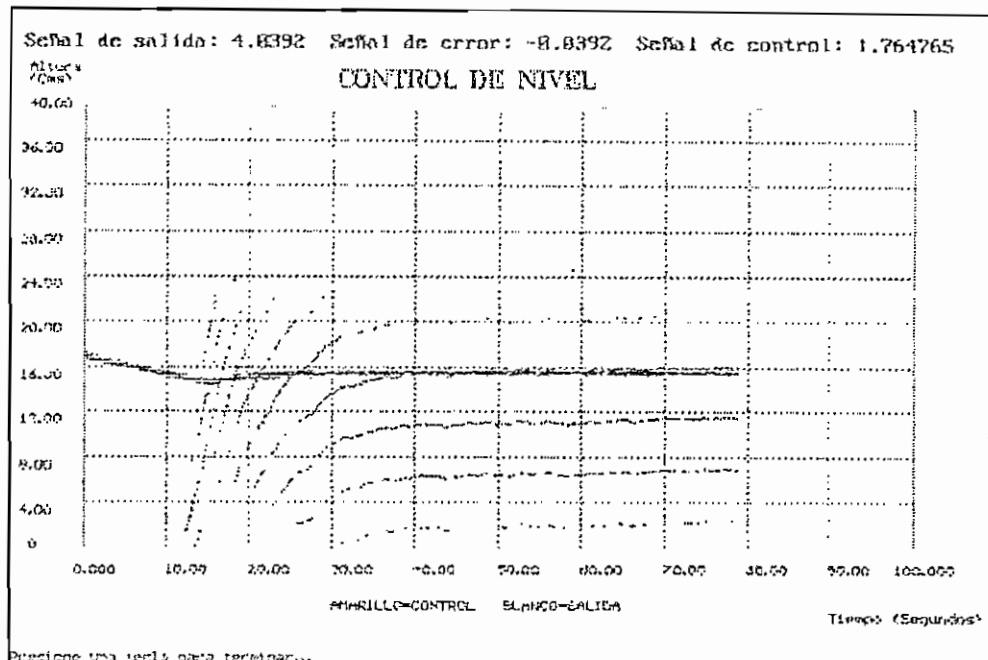


FIGURA 3.5 GRAFICO DE RESPUESTA EN PANTALLA

Además de estas subrutinas fue necesario añadir en la subrutina de presentación del menú principal, las instrucciones necesarias para desplegar los menús y submenús correspondientes a la aplicación de control de nivel de líquidos y que permiten ingresar los parámetros para realizar el control sobre el prototipo de tanques acoplados.

En la sección de anexos se incluye el manual de operación del programa, en donde se indica la manera de ingresar estos parámetros y como seleccionar el tipo de gráficos desplegar en pantalla.

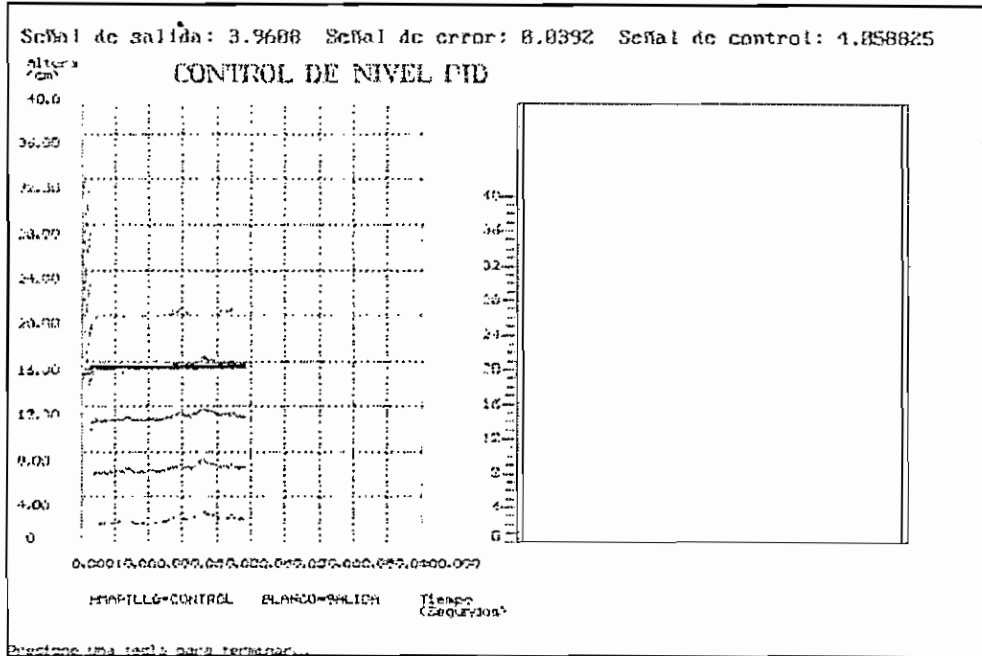


FIGURA 3.6 GRAFICO COMBINADO EN PANTALLA

3.4 PRUEBAS DE SIMULACION

En base a las funciones de transferencia obtenidas en la modelación de la planta realizada en el numeral 3.1, se procede a realizar la simulación de las mismas, tanto para el sistema sin compensar como para el compensado, utilizando el programa CAD CONTROL obteniéndose los siguientes gráficos:

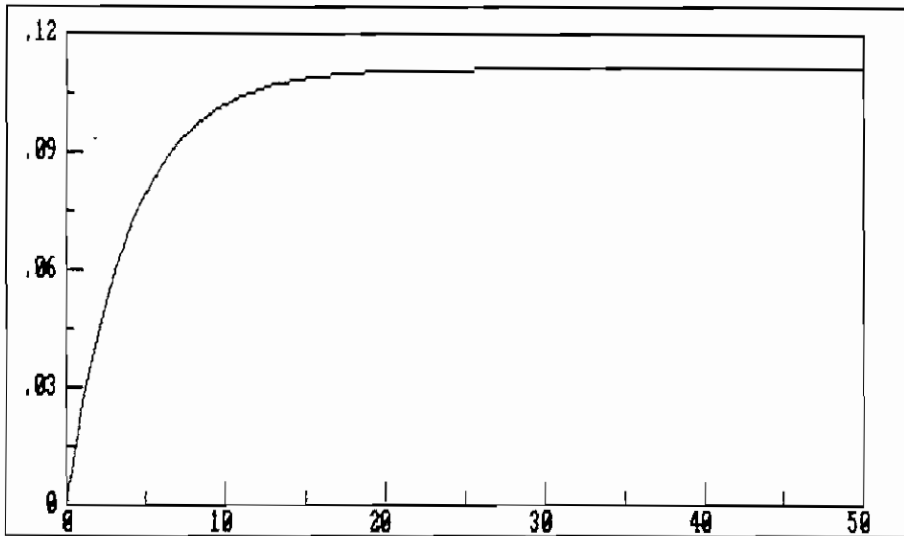


FIG. 3.7 RESPUESTA EN LAZO CERRADO A UNA ENTRADA PASO UNITARIO PARA EL SISTEMA DE PRIMER ORDEN SIN COMPENSAR

Para la figura 3.7 se tiene: $M_p=0\%$; $T_s=9.6$ seg.; $E_p=88.9\%$

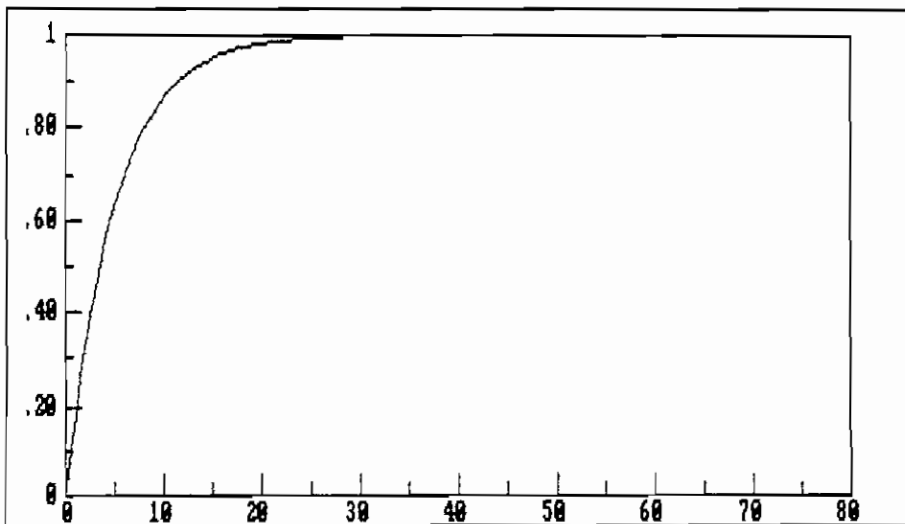


FIGURA 3.8 RESPUESTA EN LAZO CERRADO A UNA ENTRADA PASO UNITARIO PARA EL SISTEMA DE PRIMER ORDEN COMPENSADO

Para la figura 3.8 se tiene: $M_p=0\%$; $T_s=19.5$ seg.; $E_p=0\%$

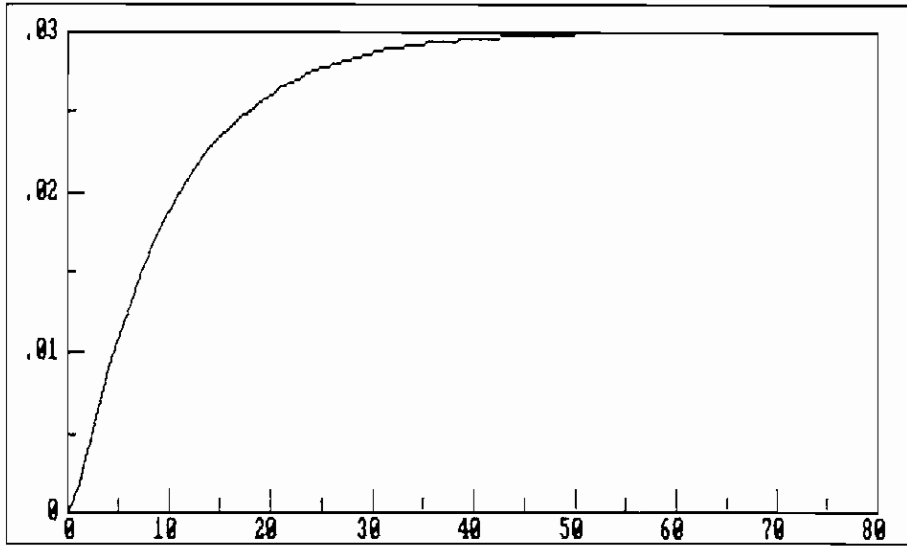


FIGURA 3.9 RESPUESTA EN LAZO CERRADO A UNA ENTRADA PASO UNITARIO PARA EL SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN SIN COMPENSAR

Para la figura 3.9 se tiene: $M_p=0\%$; $T_s=36.7$ seg.; $E_p=97\%$

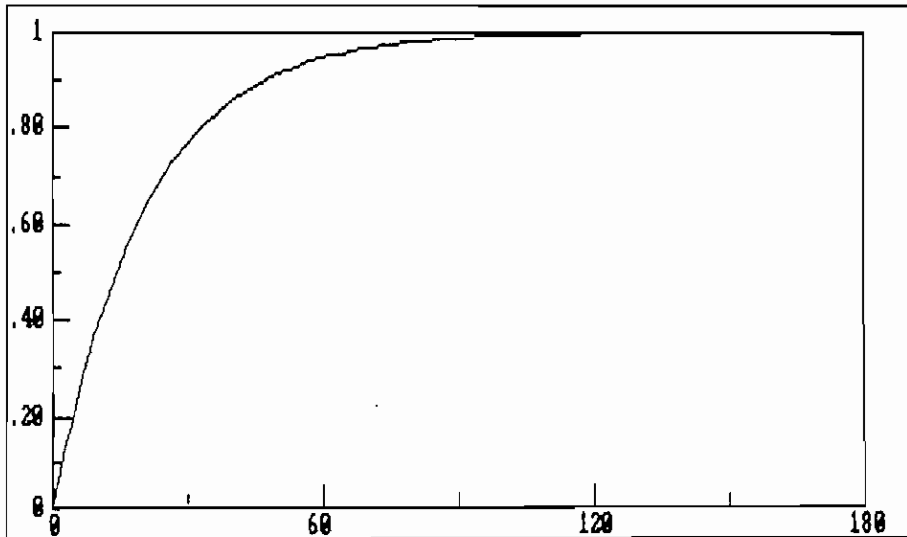


FIGURA 3.10 RESPUESTA EN LAZO CERRADO A UNA ENTRADA PASO UNITARIO PARA EL SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN COMPENSADO

Para la figura 3.10 se tiene: $M_p=0\%$; $T_s=80$ seg.; $E_p=0\%$

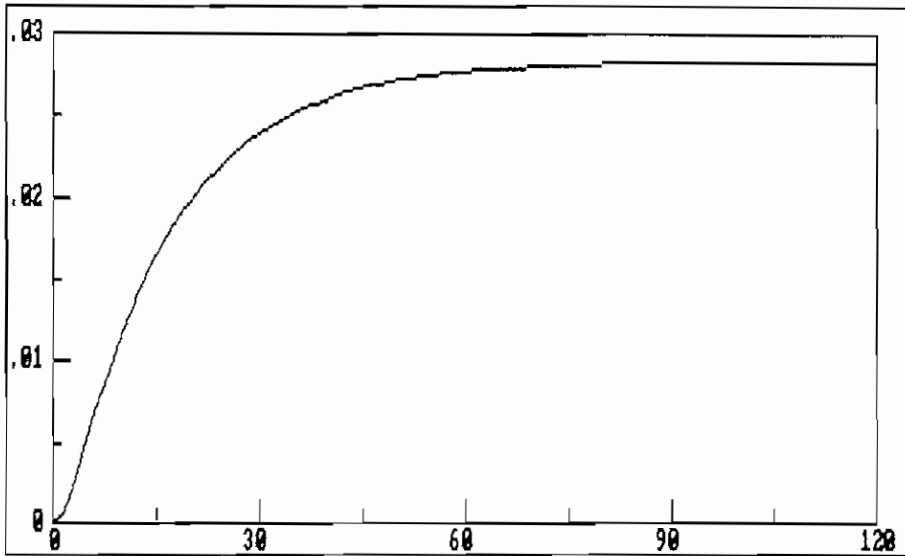


FIGURA 3.11 RESPUESTA EN LAZO CERRADO A UNA ENTRADA PASO UNITARIO PARA EL SISTEMA DE TERCER ORDEN SIN COMPENSAR

Para la figura 3.11 se tiene: $M_p=0\%$; $T_s=62.4$ seg.; $E_p=97\%$

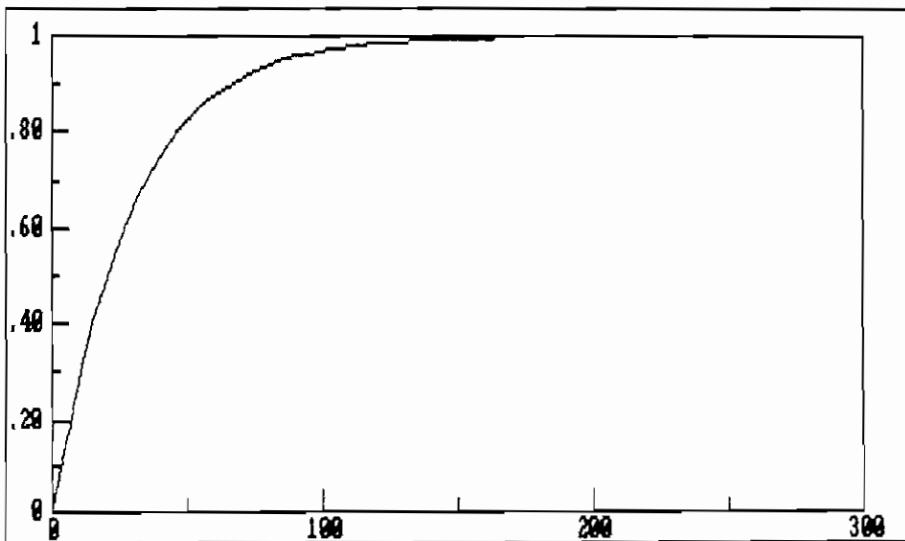


FIGURA 3.12 RESPUESTA EN LAZO CERRADO A UNA ENTRADA PASO UNITARIO PARA EL SISTEMA DE TERCER ORDEN COMPENSADO

Para la figura 3.12 se tiene: $M_p=0\%$; $T_s=112.2$ seg.; $E_p=0\%$

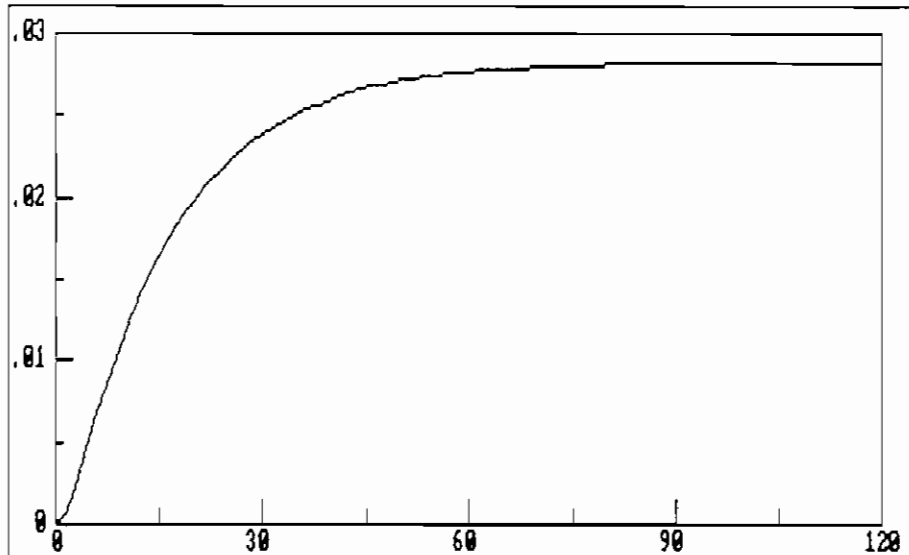


FIGURA 3.11 RESPUESTA EN LAZO CERRADO A UNA ENTRADA PASO UNITARIO PARA EL SISTEMA DE TERCER ORDEN SIN COMPENSAR

Para la figura 3.11 se tiene: $M_p=0\%$; $T_s=62.4$ seg.; $E_p=97\%$

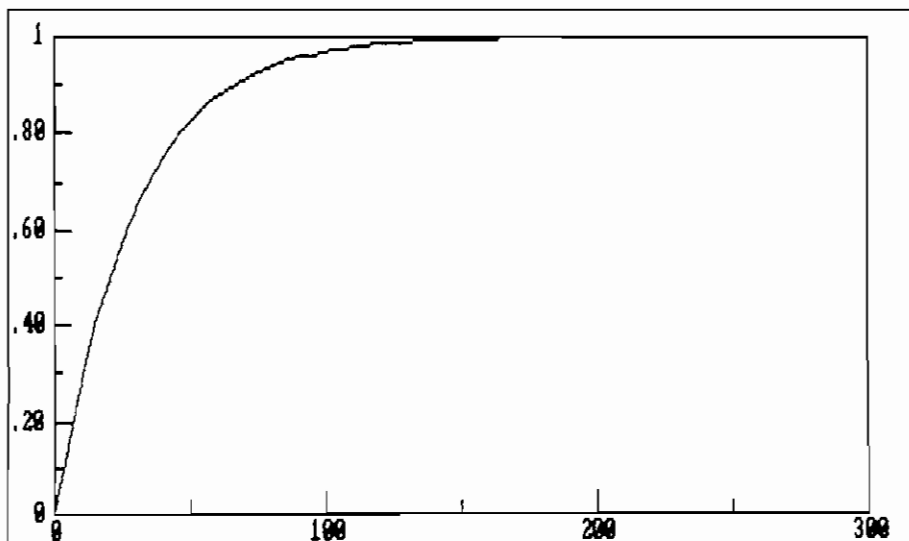


FIGURA 3.12 RESPUESTA EN LAZO CERRADO A UNA ENTRADA PASO UNITARIO PARA EL SISTEMA DE TERCER ORDEN COMPENSADO

Para la figura 3.12 se tiene: $M_p=0\%$; $T_s=112.2$ seg.; $E_p=0\%$

CAPITULO IV: RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 Resultados experimentales

4.1.1 Control manual

4.1.2 Comprobación del funcionamiento del driver de dc y de la bomba de inmersión

4.1.3 Comprobación de los interruptores de nivel

4.1.4 Control de nivel en forma manual

4.1.5 Pruebas de funcionamiento y calibración del sensor de nivel

4.2 Control análogo

4.2.1 Sistema de primer orden

4.2.2 Sistema de segundo orden

4.2.3 Sistema de tercer orden

4.3 Control digital

4.3.1 Control digital utilizando el equipo KETHLEY 500A

4.4 Conclusiones

4.5 Recomendaciones

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez construido el prototipo de control de nivel de líquidos y el módulo de control se procedió a realizar las siguientes pruebas experimentales para comprobar el correcto funcionamiento del equipo. Los resultados que a continuación se muestran son el fiel reflejo de las características del equipo.

Cabe mencionar en este punto, que el funcionamiento individual de cada una de las tarjetas que conforman el módulo de control, se realizó por separado de manera independiente, cada tarjeta fue probada y comprobada de manera satisfactoria, antes de ensamblar el módulo en conjunto. En el manual de operación del equipo, que se incluye en la parte de anexos, se detalla la manera de probar y calibrar cada una de estas tarjetas. Esta acotación es válida, pues el módulo de control fue construido y concebido de manera modular, cada tarjeta es un módulo independiente que realiza una función determinada y específica, el sistema fue diseñado así, pues esto facilita la tarea de calibración y mantenimiento o reparación, pues en caso de que algo suceda solamente será necesario desmontar la tarjeta que presente fallas para su reparación, sin necesidad de desmontar el resto del equipo.

4.1.1 CONTROL MANUAL

Los resultados experimentales se cimentan a tres tipos de pruebas: del prototipo, del control análogo y del control digital. En esta sección se detallan los tipos de pruebas del buen funcionamiento del prototipo.

4.1.2 Comprobación del funcionamiento del driver de DC y de la bomba de inmersión

Para esto, se coloca el selector de tipo de control en la posición de manual, y se procede al variar la posición de la perilla de MANUAL BOMBA, se observa que efectivamente la velocidad de la BOMBA DE INMERSION varía y por lo tanto el caudal del flujo de entrada también varía de acuerdo a la posición de la perilla de control manual

de la bomba de inmersión. Esto además nos indica que el funcionamiento del DRIVER DE DC es adecuado, pues el potenciómetro de perilla que se varia para realizar esta prueba, no actua directamente sobre la bomba sino que lo hace sobre el DRIVER DE DC.

4.1.3 Comprobación de los interruptores de nivel

Utilizando la perilla de control manual en la posición máxima, se procede a llenar cada uno de los tanques de manera individual hasta que la acción de la bomba sea interrumpida por la acción del respectivo switch de nivel, si la válvula de desfogue del tanque en el que se realiza la prueba se encuentra abierta esta acción será intermitente, es decir, la bomba funcionará y llenará el tanque hasta el nivel máximo, cuando el switch de nivel actua la bomba deja de funcionar, y el nivel empezará a descender , pues el agua fluje por la respectiva válvula que se encuentra abierta, hasta el punto en que el switch de nivel deja de actuar, la bomba en ese instante vuelve a funcionar enviando agua al tanque desde el reservorio, el nivel del agua asciende en el tanque hasta que el switch de nivel actua y para la acción de la bomba y así sucesivamente hasta que esta acción sea detenida ya sea cambiando la posición del selector a la posición 0 o colocando la perilla en otra posición en la ingrese menor caudal al tanque.

4.1.4 Control de nivel en forma manual

Se puede llegar a un nivel deseado y mantener este nivel en forma manual, esto se consigue variando la perilla de MANUAL BOMBA hasta llegar al nivel deseado y luego variando nuevamente esta perilla hasta conseguir que el caudal de entrada al tanque sea aproximadamente igual al caudal de salida del tanque a través de la valvula de control de flujo.

4.1.5 Pruebas de funcionamiento y calibración del sensor de nivel

Utilizando el control manual , y con las válvulas del último tanque del prototipo totalmente cerradas se va llenando poco a poco el tanque con agua, y comprobando que el nivel va ascendiendo en el indicador del nivel real, el nivel que se muestra en el display de nivel real debe ser similar al que va alcanzando el líquido en el tanque donde se realiza la medición. Para realizar la calibración del sensor el control manual es útil, pues se puede mediante la utilización de esta opción llevar el agua a un nivel de calibración deseado y proceder a calibrar el sensor tal como se indica en el manual de operación del equipo que se incluye en la sección de anexos.

4.2 CONTROL ANALOGO

De las pruebas realizadas con el control análogo se puede apreciar que no es posible reducir los tiempos de establecimiento, simplemente ubicando los polos del sistema compensado adecuadamente en el semiplano izquierdo, fundamentalmente por la limitación del caudal de la bomba. Cuando se produce el llenado del tanque o cuando existe un cambio en la referencia (aumenta la altura de referencia) la bomba se satura y entrega su caudal máximo, manteniendo esta situación hasta cuando la altura del nivel real llega cerca del nivel de referencia en la cual el sistema se comporta en forma lineal (no existe saturación) y el control actúa en forma normal en base a los parámetros prefijados.

Un problema similar se tiene cuando se produce un cambio en la referencia que disminuye el nivel del tanque, también se tiene el comportamiento no lineal, pues la bomba deja de trabajar, y el tiempo de establecimiento va a estar dado por el caudal de salida a través de la válvula.

Por esta razón en el diseño de los parámetros del control PID (numeral 3.1.3) se trabaja con una localización de polos cercano al origen, típicamente -0.2 , ya que por limitación de la bomba y válvula no se puede acelerar el tiempo de establecimiento.

Así mismo, se trabaja con ganancias bajas, ya que el control funciona con un voltaje de la bomba entre 3 y 5 V en el rango lineal y al triplicar la ganancia ya se produce saturación de la bomba. Adicionalmente cabe señalar que la válvula debe estar totalmente abierta (para el sistema de primer orden).

Estas limitaciones de bomba y válvula no afectan al funcionamiento del sistema de primer orden, por lo que este control es satisfactorio, claro esta que si se manejara un mayor rango de caudales en la bomba y en la válvula se podría acelerar el tiempo de respuesta.

Las limitaciones señaladas si inciden en el control del sistema de segundo orden. Aquí adicionalmente se tiene el efecto de la válvula entre los dos tanques que tiene similares características a la válvula de desfogue, además el efecto de no sentir la altura en el tanque No.2 no permite un adecuado control. Este hecho es definitivamente exagerado en el sistema de tercer orden.

4.2.1 Sistema de primer orden

Para realizar el control sobre un sistema de primer orden, se utiliza únicamente un solo tanque del prototipo, en este caso el último tanque del prototipo (tanque No. 3) que es en donde se realiza la medición del nivel del líquido.

Las condiciones en que se realizó esta prueba son las siguientes:

- La válvula de desfogue se encuentra totalmente abierta
- El control se realizó a 16 cm
- Se realiza un control del tipo PI
- Se varia las constantes k_p y k_i hasta conseguir resultados satisfactorios, partiendo de los valores de diseño. Los valores de k_p y k_i' que logran compensar el sistema para para mantener el nivel a 16 cm son:

$$k_p = 5.89$$

$$k_i' = 0.20$$

Para obtener los gráficos de respuesta del sistema, se utilizó un registrador de papel que fue conectado al equipo.

Las pruebas de perturbación realizadas para el sistema de primer orden, una vez en equilibrio, y sus respectivos resultados se muestran en la tabla 4.1.

PERTURBACION	Mp %	Ts seg.	Ep %
de 16 cm a 18 cm	0	10	0.5
de 16 cm a 20 cm	0	12	0.5
de 16 cm a 26 cm	0	35	0.77

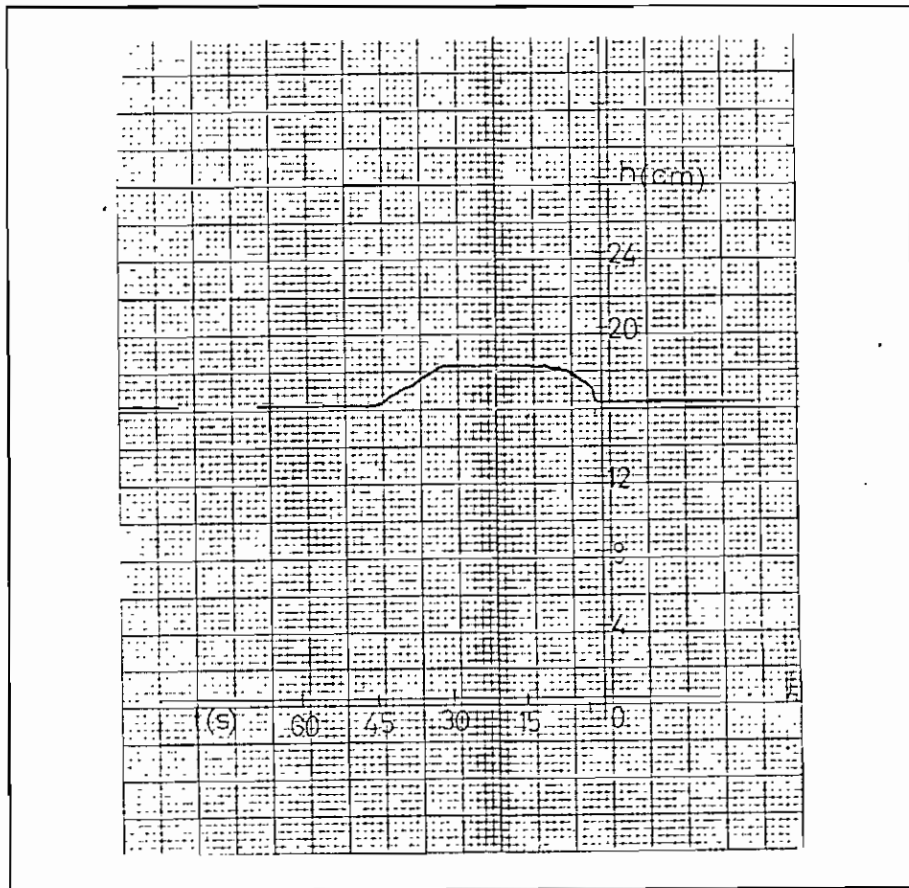


FIGURA 4.1 RESPUESTA DEL SISTEMA DE PRIMER ORDEN PERTURBACION DE 16 a 18 cm

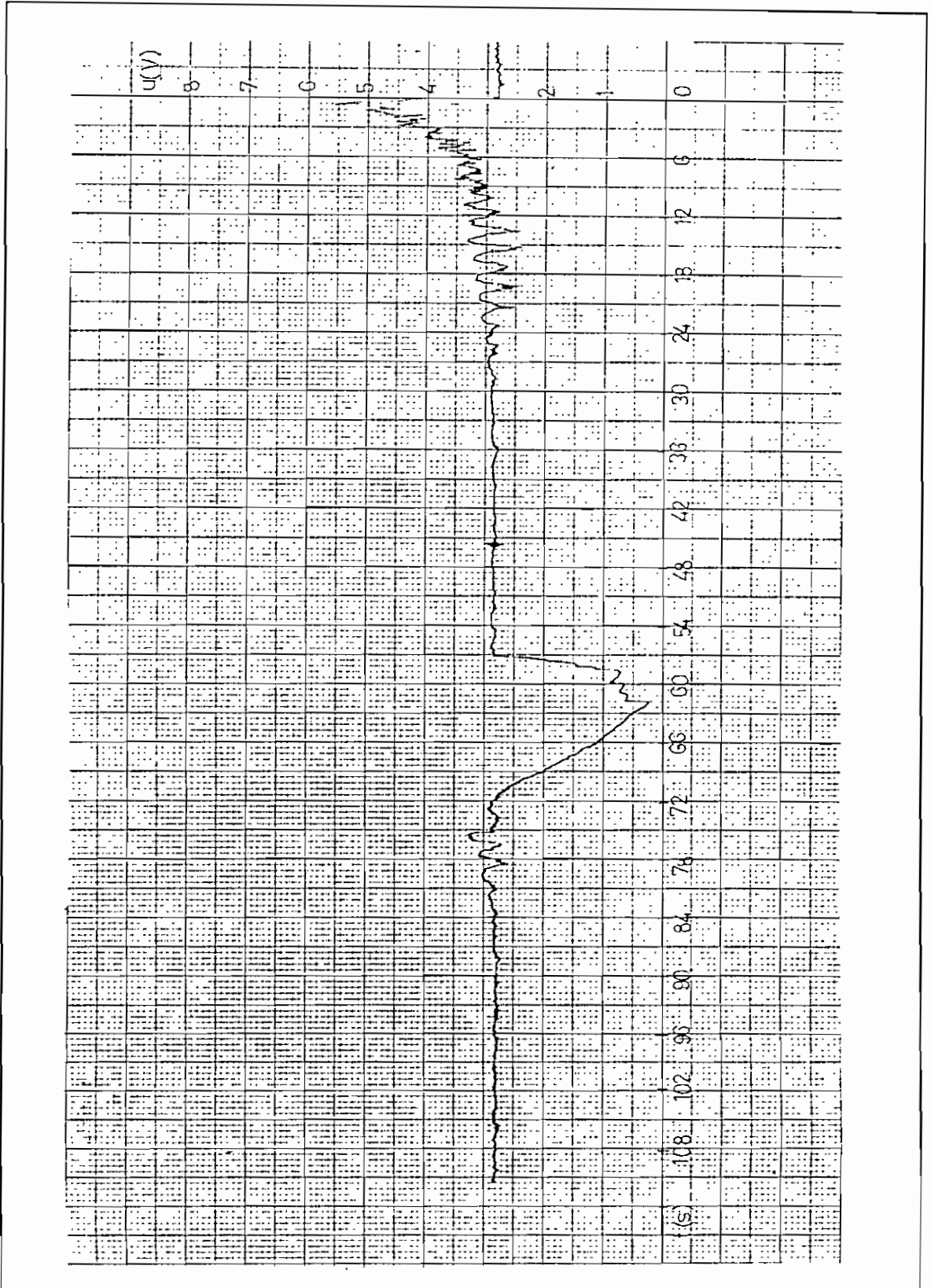


FIGURA 4.2 SEÑAL DE CONTROL PARA EL SISTEMA DE PRIMER ORDEN

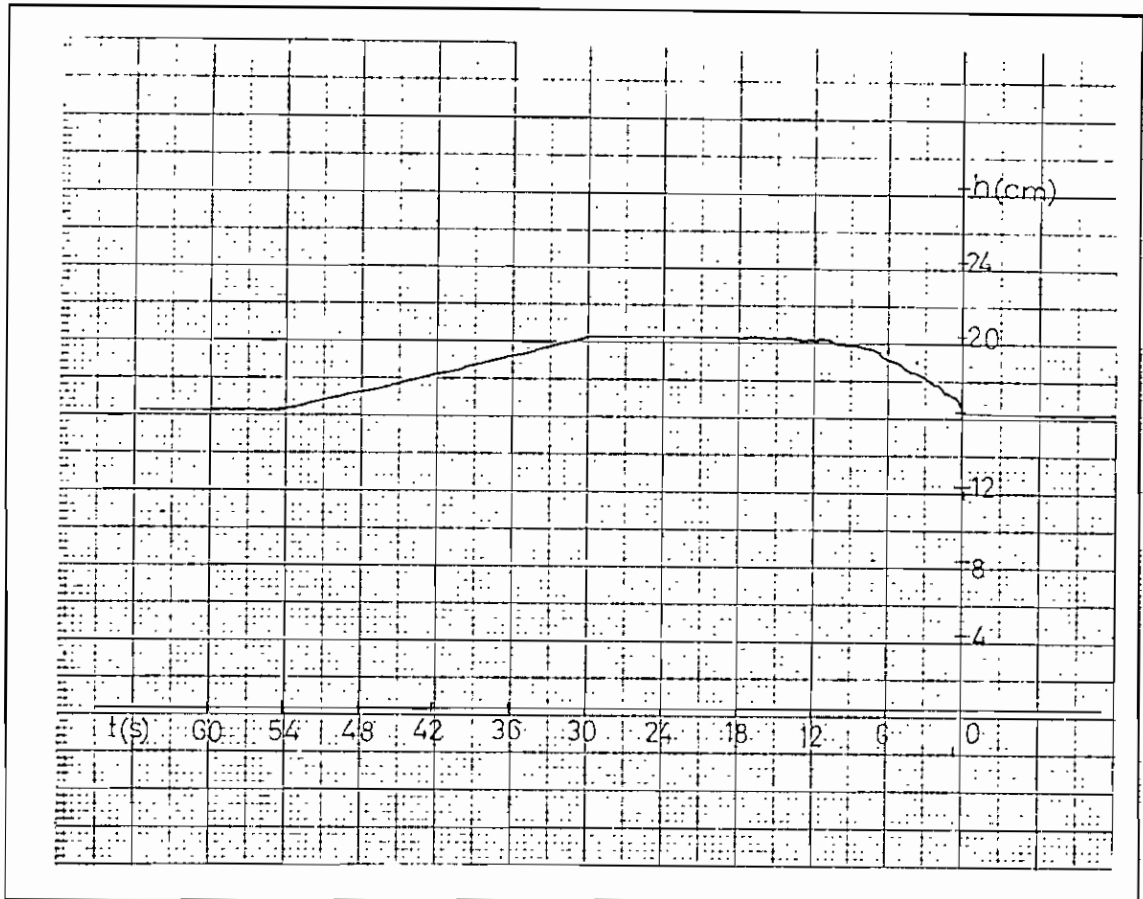


FIGURA 4.3 RESPUESTA DEL SISTEMA DE PRIMER ORDEN
PERTURBACION DE 16 a 20 cm

En la figura 4.1 se muestra la respuesta en el tiempo para la perturbación de 16 a 18 cm, en tanto que la figura 4.2 muestra la señal de control para dicha perturbación. Puede observarse claramente como la señal de control decrece conforme el error va disminuyendo.

Las figuras 4.3 y 4.4 muestran la respuesta en el tiempo para las perturbaciones de 16 a 20 cm y 16 a 26 cm respectivamente, en estas figuras se incluye también la perturbación contraria de 20 a 16 cm y 26 a 16 cm respectivamente.

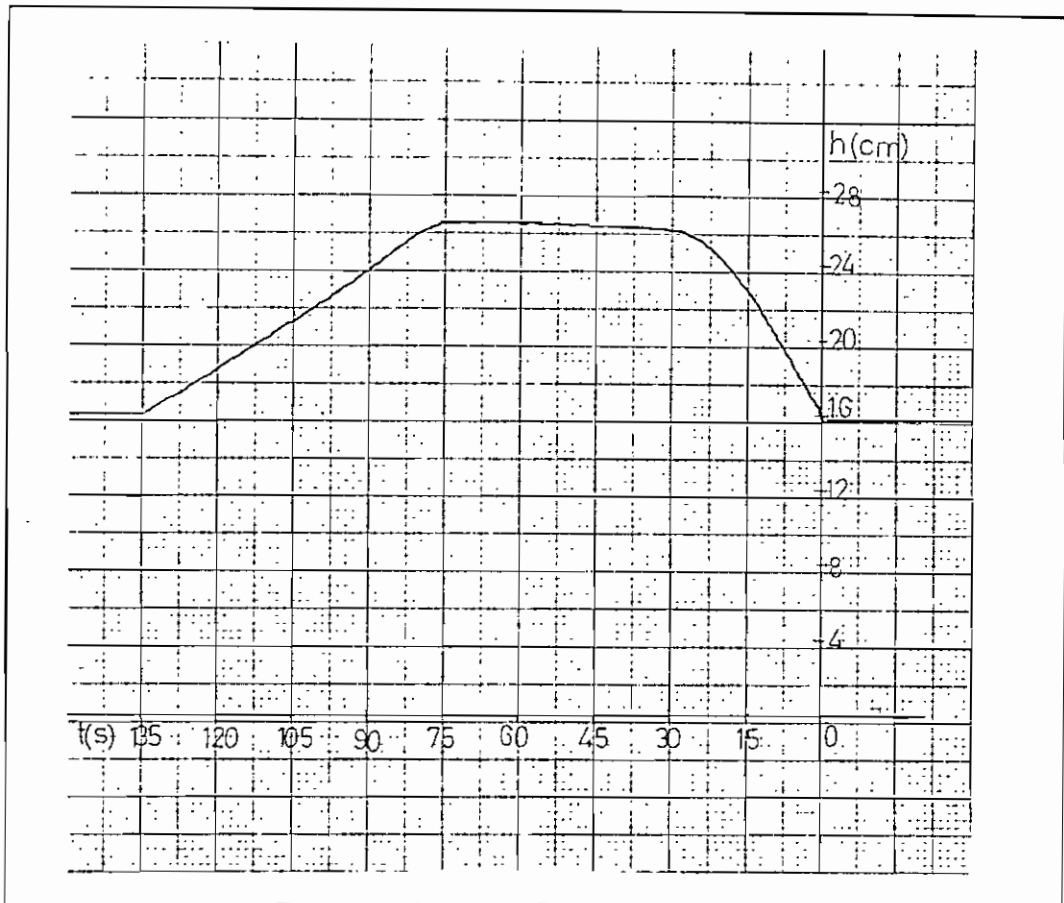


FIGURA 4.4 RESPUESTA DEL SISTEMA DE PRIMER ORDEN
PERTURBACION DE 16 a 26 cm

4.2.2 Sistema de segundo orden

Para realizar las pruebas sobre un sistema de segundo orden, se utilizan dos de los tres tanques del prototipo (tanques No.2 Y No.3), las condiciones en que se realizó esta prueba fueron las siguientes:

- La válvula de desfogeo del tanque No. 3 se encuentra cerrada dos y media vueltas y la válvula que intercomunica los tanques No. 2 y No. 3 se encuentra totalmente abierta.
- El control se realizó a 16 cm
- Se realiza un control del tipo PI

- Las constantes k_p y k_i' son :

$$k_p = 5.89$$

$$k_i' = 0.20$$

Para el sistema de segundo orden, se realizó una perturbación de 16 a 18 cm, la figura 4.5 muestra la señal de respuesta del sistema para dicha perturbación. En la figura 4.6 se muestra la señal de control para dicha perturbación, los resultados obtenidos en esta prueba son los siguientes:

$$M_p = 13.33\%$$

$$T_s = 360 \text{ seg.}$$

$$E_p = 2.2\%$$

4.2.3 Sistema de tercer orden

Para realizar las pruebas sobre un sistema de tercer orden, se utilizan los tres tanques del prototipo, las condiciones en que se realizó esta prueba fueron las siguientes:

- La válvula de desfogeo del tanque No. 3 se encuentra cerrada dos y media vueltas y las válvulas que intercomunican los tanques No. 1, No. 2 y No. 3 se encuentran totalmente abiertas.

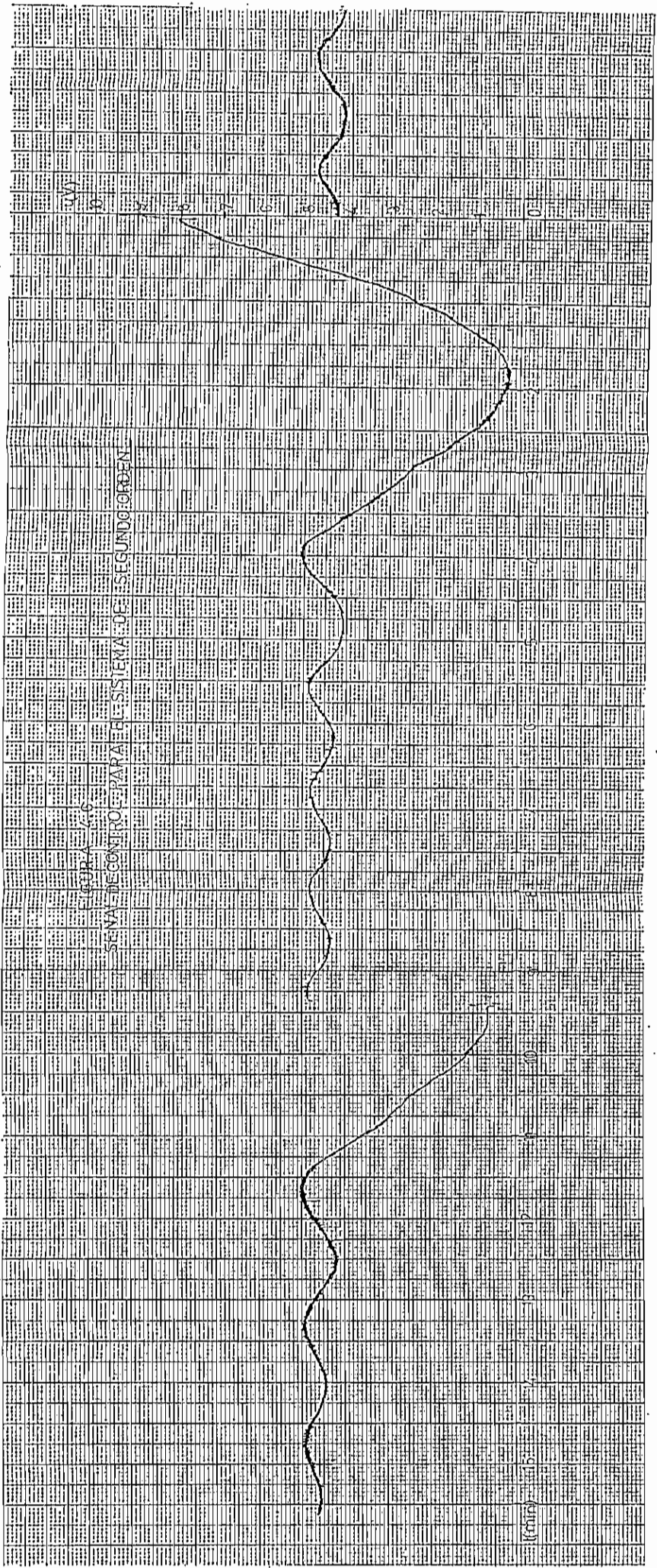
- El control se realizó a 16 cm

- Se realiza un control del tipo PI

- Las constantes k_p y k_i' son :

$$k_p = 5.89$$

$$k_i' = 0.20$$



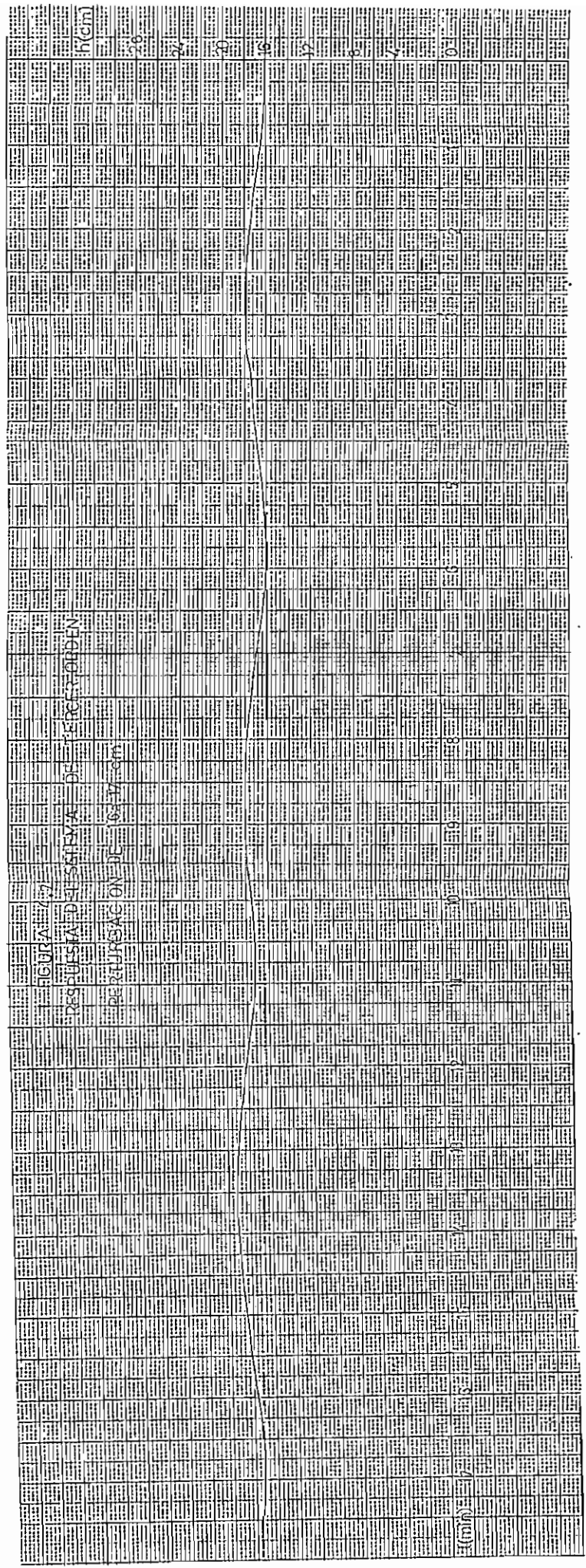
0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000

Figura 1.36

0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000

0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000

0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900 950 1000



Para el sistema de tercer orden, se realizó una perturbación de 16 a 17 cm, la figura 4.7 muestra la señal de respuesta del sistema para dicha perturbación, los resultados obtenidos son los siguientes:

$$M_p = 13 \%$$

$$T_s = 20 \text{ minutos}$$

$$E_p = 6 \%$$

4.3 CONTROL DIGITAL

Para realizar el control digital del prototipo, se conecta el módulo de control a la tarjeta de adquisición de datos DAS-128. Una vez dentro del programa de CONTROL DIGITAL DIRECTO, se ingresa al menú de OTROS y dentro de este se selecciona la opción de TANQUE, luego se escoge la opción de PID ARCHIVO y se procede a ingresar los parámetros de las constantes del controlador PID.

Utilizando la opción de control digital se realizaron las siguientes pruebas para un sistema de primer orden:

Prueba P1:

La figura 4.8 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

- Parámetros utilizados :

$T_i = 300 \text{ ms}$ (Período de muestro)

$k_p = 20$

$k_i = 2$

Perturbación: de 16 a 18 cm

Resultados:

$M_p = 3.7 \%$

$T_s = 7.8 \text{ seg.}$

$E_p = 1.9 \%$

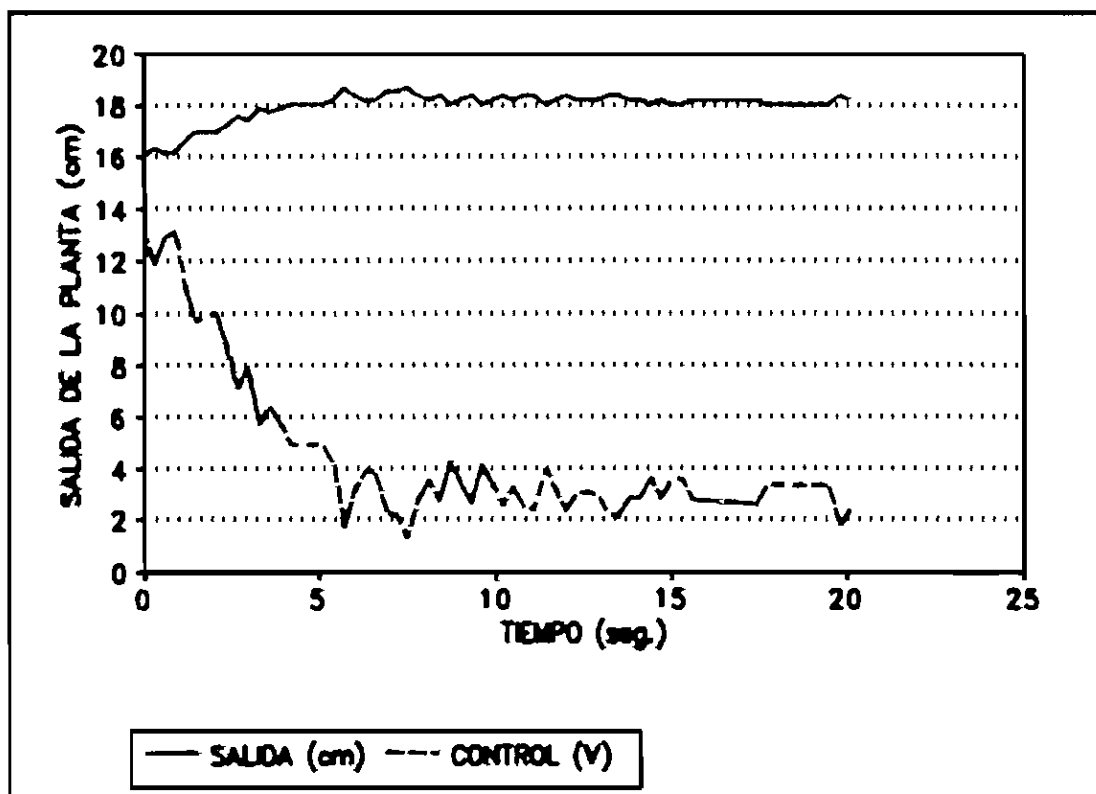


FIGURA 4.8 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er.ORDEN
PERTURBACION DE 16 a 18 cm'

Prueba P2:

La figura 4.9 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

- Parámetros utilizados:

$t_i = 300$ ms (Período de muestreo)

$k_p = 35$

$k_i = 2$

Perturbación: de 16 a 18 cm

Resultados:

$M_p = 0\%$

$T_s = 15$ seg.

$E_p = 1.94\%$

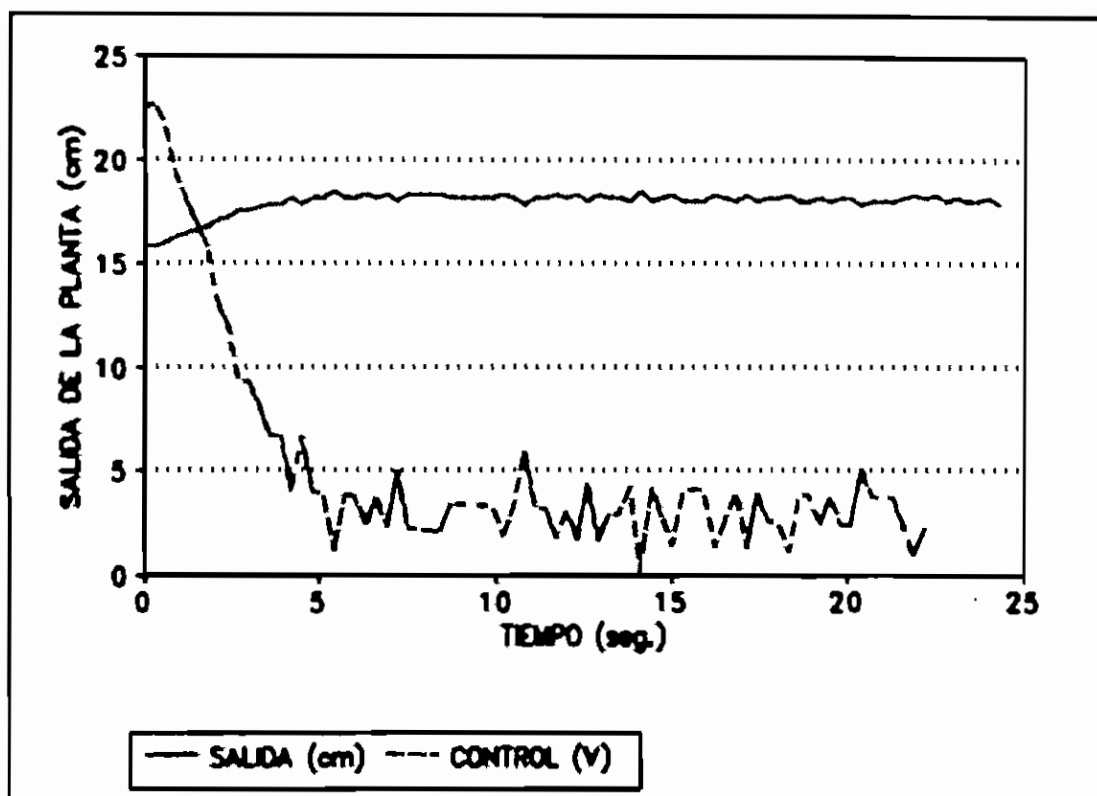


FIGURA 4.9 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er. ORDEN
PERTURBACION DE 16 a 18 cm

Prueba P3:

La figura 4.10 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

- Parámetros utilizados:

$t_i = 300$ ms (Período de muestreo)

$k_p = 35$

$k_i = 2$

Perturbación: de 16 a 24 cm

Resultados:

$M_p = 15.67$ %

$T_s = 59.1$ seg.

$E_p = 1.96$ %

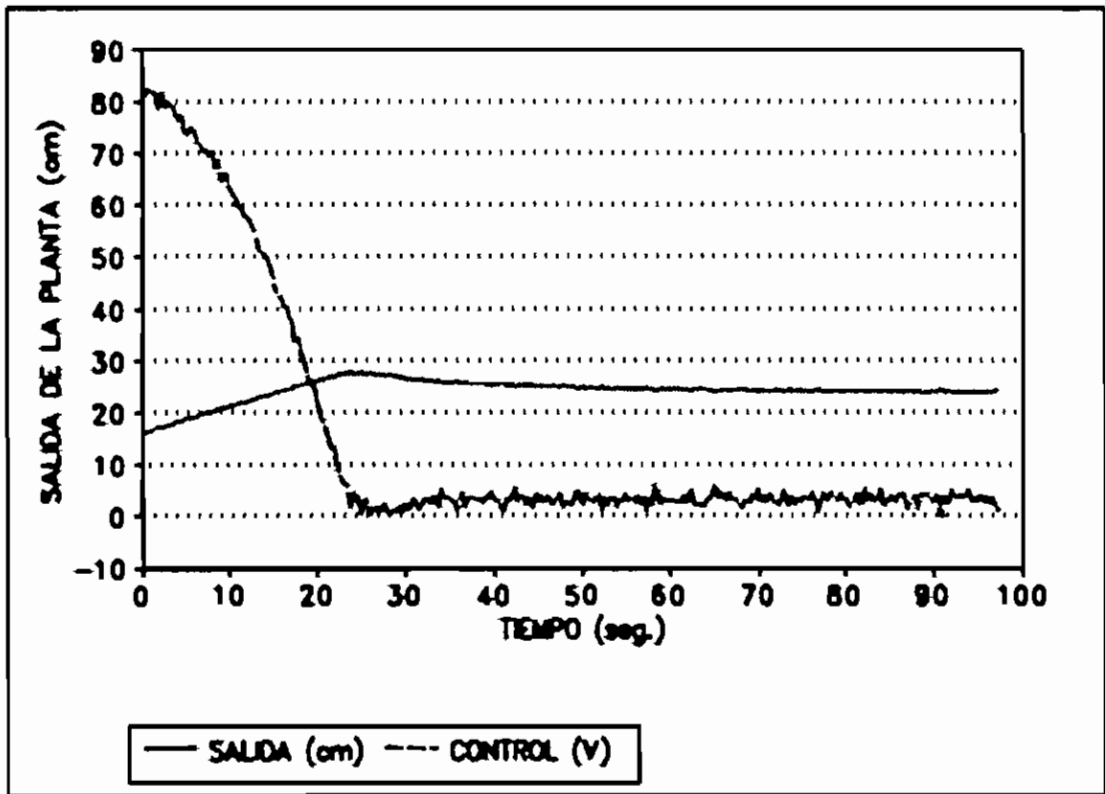


FIGURA 4.10 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er. ORDEN
PERTURBACION DE 16 a 24 cm

Prueba P4:

La figura 4.11 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

- Parámetros utilizados:

$t_i = 50$ ms (Período de muestreo)

$k_p = 50$

$k_i = 4$

Perturbación: de 16 a 18 cm

Resultados:

$M_p = 0 \%$

$T_s = 3$ seg.

$E_p = 1.9 \%$

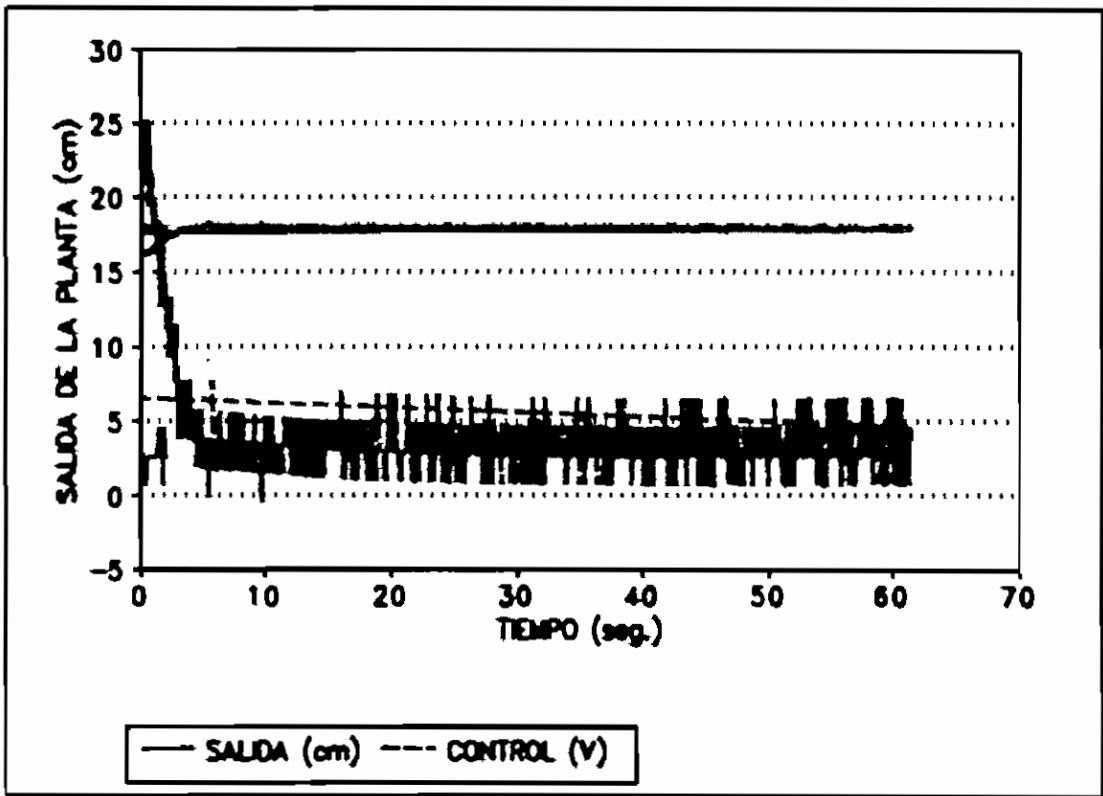


FIGURA 4.11 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er. ORDEN
PERTURBACION DE 16 a 18 cm

Prueba P5:

La figura 4.12 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

- Parámetros utilizados:

$t_i = 50$ ms (Período de muestreo)

$k_p = 30$

$k_i = 4$

Perturbación: de 16 a 20 cm

Resultados:

$M_p = 9\%$

$T_s = 22$ seg.

$E_p = 2\%$

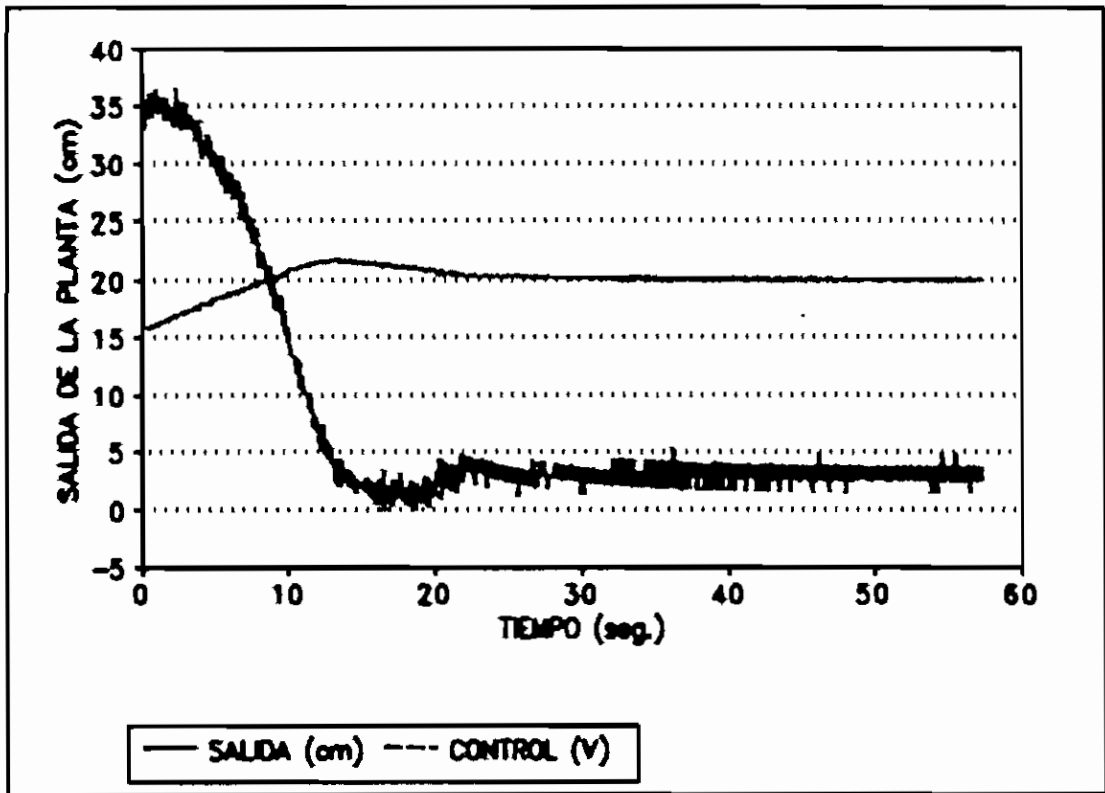


FIGURA 4.12 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er. ORDEN
PERTURBACION DE 16 a 20 cm

4.3.1 CONTROL DIGITAL UTILIZANDO EL EQUIPO KEITHLEY 500A

El control digital con el prototipo también fue probado satisfactoriamente sobre un sistema de primer orden con el equipo de adquisición y salida de datos KEITHLEY 500A disponible en el laboratorio, para lo cual se utilizaron las subrutinas del programa de simulación para control digital directo ⁽⁹⁾, los resultados obtenidos en las pruebas realizadas se muestran a continuación:

⁽⁹⁾ Maldonado F., "Simulación para control digital directo", Tesis de grado, E.P.N., 1993

Prueba K1:

La figura 4.13 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

- Parámetros utilizados:

$t_i = 200$ ms (Período de muestreo)

$k_p = 10$

$k_i = 2$

Perturbación: de 8 a 16 cm

Resultados:

$M_p = 8.73$ %

$T_s = 205$ seg.

$E_p = 2$ %

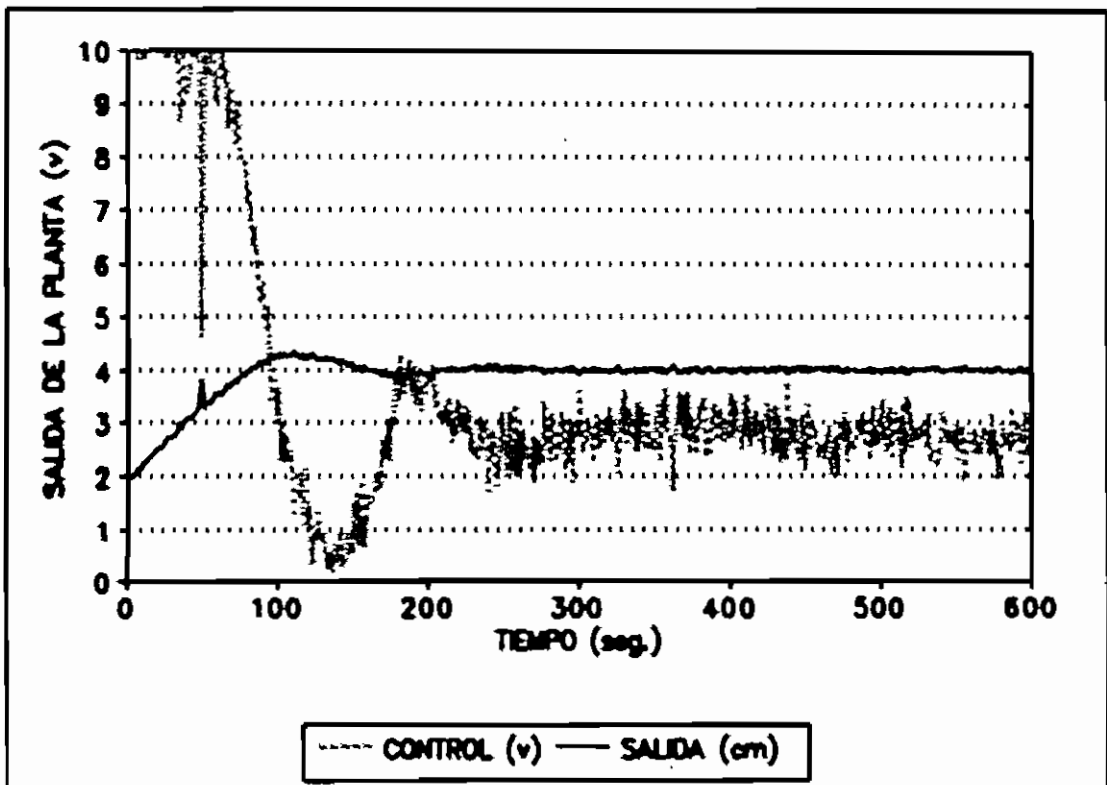


FIGURA 4.13 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er. ORDEN
PERTURBACION DE 8 a 16 cm

Prueba K2:

La figura 4.14 muestra la respuesta del sistema de primer orden para una perturbación bajo las siguientes condiciones:

- Parámetros utilizados:

$t_i = 200$ ms (Período de muestreo)

$k_p = 10$

$k_i = 2$

Perturbación: de 16 a 20 cm

Resultados:

$M_p = 5.2\%$

$T_s = 140$ seg.

$E_p = 1.6\%$

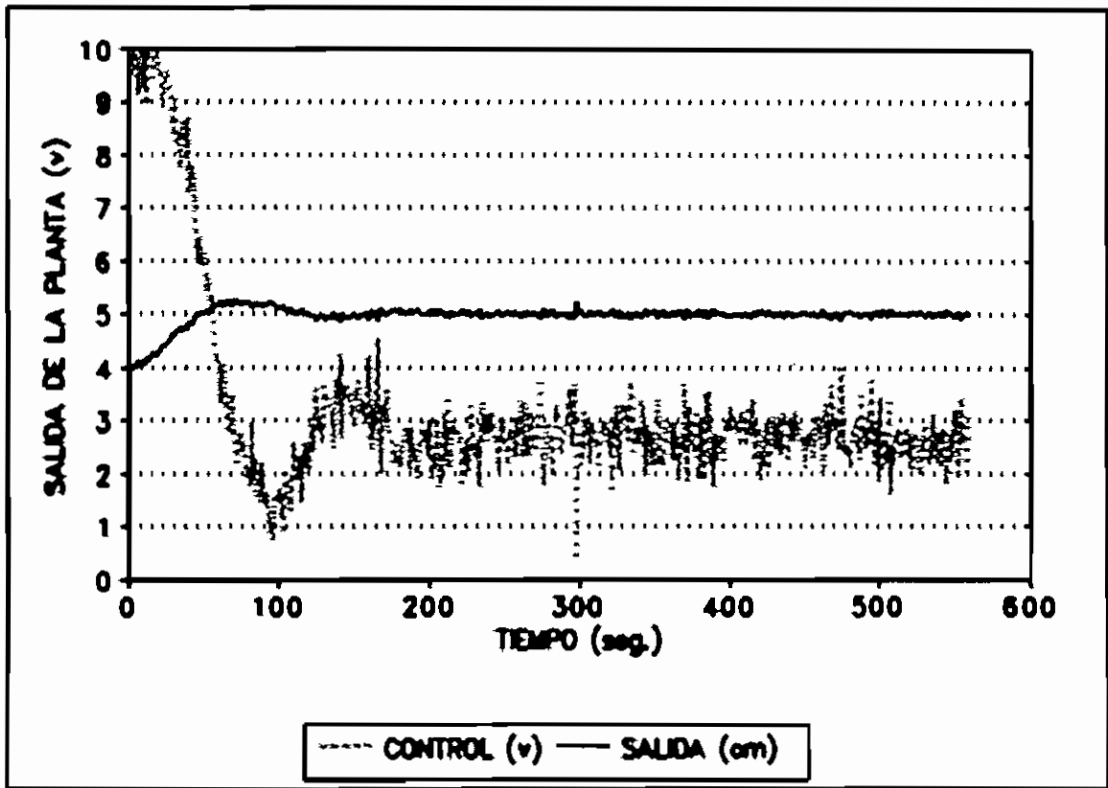


FIGURA 4.14 RESPUESTA Y CONTROL PARA EL SISTEMA DE 1er. ORDEN
PERTURBACION DE 16 a 20 cm

4.4 CONCLUSIONES

El prototipo y el módulo de control construídos satisfacen los objetivos propuestos en el plan de tesis.

El prototipo y el módulo de control han sido probados extensamente, tanto en su operación manual como en el control automático analógico y digital, con resultados satisfactorios. Es de muy fácil uso y calibración, objetivo que también estaba contemplado en el plan de tesis para su uso en el laboratorio. De hecho este equipo ha sido utilizado y será utilizado en prácticas de control automático.

El control de un sistema de primer orden entrega resultados totalmente satisfactorios, es rápido, tiene un error admisible y responde muy bien a perturbaciones. En el caso del control para un sistema de segundo orden, el control es bueno, pero existe un error debido a que no se mide el nivel en el segundo tanque. En el caso de un sistema de tercer orden, se llega a controlar el sistema pero en este caso el control es pobre, pues no se puede manejar el caudal de las válvulas de control de flujo para mejorar el control; por estas razones, es preferible para su uso como prototipo de laboratorio, realizar el control sobre un solo tanque, es decir como un sistema de primer orden. Para fines didácticos se puede utilizar el control sobre dos tanques.

En cuanto al sensor utilizado, éste es bastante bueno y su acondicionamiento de señal fácil de calibrar. Existe un problema con la repetitibilidad de los experimentos debido a las variaciones en la lectura del sensor, pero esto es debido a agentes externos como son la posición del tubo de vidrio introducido en el tanque de sensado y el acople con la manguera de plástico que comunica la señal de presión hacia el sensor, y esto es debido a la manipulación que tienen estas partes tanto para montar como para desmontar el equipo.

Los distintos circuitos que conforman el módulo de control en sí, se hallan configurados en tarjetas individuales, haciendo de esta manera un equipo modular, que hace fácil identificar y manipular individualmente a cada uno de estos circuitos, esto es una gran ventaja para fines de mantenimiento y calibración del equipo.

En cuanto al control digital, este presenta la ventaja de que las constantes del compensador PID pueden ser modificadas fácilmente y no están limitadas a un rango de variación restringido, esto es bastante útil en laboratorio para fines didácticos. La respuesta del sistema utilizando el control digital es aceptable, aunque está limitada a sistemas de primer orden, pues con sistemas de segundo y tercer orden este tipo de control es pobre, debido especialmente a la saturación de la señal de control. De las pruebas realizadas se deduce que el control digital mejora conforme el período de muestreo es menor, sin embargo el mínimo valor del período de muestreo está limitado a la velocidad de barrido del programa en el computador digital.

El sistema de control implementado en este prototipo, puede ser trasladado a un sistema real a gran escala, el principio de control se mantiene y lo único que debería cambiarse es el rango de trabajo del sensor y la potencia del driver que maneja la bomba.

4.5 RECOMENDACIONES

La respuesta del prototipo puede mejorarse si se incorpora al sistema una bomba de inmersión de mayor caudal, para que el tanque se llene más rápido.

Para mejorar la respuesta de los sistemas de segundo y tercer orden el caudal de las válvulas de acoplamiento debe ser mayor para que la transferencia de fluido desde el o los tanques de almacenamiento al tanque de sensado sea más rápida. Adicionalmente se puede convertir al sistema en multivariable sensando el nivel también en los otros tanques, lo que mejoraría ostensiblemente la respuesta de los sistemas de segundo y tercer orden, pues el control de nivel ya no sería únicamente en el último tanque.

También puede mejorarse la respuesta del sistema si se realiza control sobre las válvulas, para ello son necesarias válvulas de control de flujo tipo solenoide para abrir y cerrar las válvulas de acuerdo a la necesidad.

En cuanto al control digital es recomendable trabajar con una tarjeta de mayor número de bits (12 o más) para evitar pérdida de resolución.

BIBLIOGRAFIA

- Creuss A., " **INSTRUMENTACION INDUSTRIAL** ", 2da. Edición, Editotial Marcombo, México 1981
- Bennet B. , " **PRACTICAL CONTROL EXERCISES** ", U.M.I.S.T. , Manchester-Inglaterra 1979
- Sensyn, " **SOLID-STATE SENSOR HANDBOOK** ", USA 1993
- National Semiconductors , " **LINEAR HANDBOOK** ", USA 1982
- Ogata Katsuhiko, " **INGENIERIA DE CONTROL MODERNO** ", 2da. Edición, Pretince Hall, México 1993
- Alkon Corporation, " **IN LINE FLOW CONTROLS, NEEDLE & CHECK VALVES CATALOG** ", USA 1992
- Fustillos P. , " **ALGORITMOS PARA CONTROL DIGITAL DIRECTO** ", Tesis de grado, E.P.N. 1994
- Garzón J. , " **DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONTROL ANALOGO Y DIGITAL DE NIVEL DE LIQUIDOS EN TANQUES ACOPLADOS** ", Tesis de grado, E.P.N. 1990
- Salgado F., " **SIMULADOR PARA MEDICION DE NIVEL DE LIQUIDOS** ", Tesis de grado, E.P.N. 1987
- Cevallos F., " **DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS PARA COMPUTADORES PERSONALES** ", Tesis de grado, E.P.N. 1993

ANEXOS

- A Manual de usuario del equipo
- B Manual de calibración del equipo
- C Manual de usuario del programa de control
- D Fotografías del equipo en operación
- E Copias de las especificaciones de los componentes utilizados
- F Listado del programa de las subrutinas para control de nivel de líquidos

A. MANUAL DE USUARIO DEL EQUIPO

A.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo de control de nivel de líquidos está constituido por dos submódulos principales: el prototipo de tanques acoplados y el módulo de control.

El prototipo de tanques acoplados a su vez está formado por los tres tanques acoplados principales contruídos de material acrílico transparente (PLEXY-GLASS) de 4 mm. En esta estructura de tanques acoplados es en donde se va a realizar el control del nivel de agua en el último tanque, por lo tanto es en el último tanque del prototipo en donde se encuentra localizada la sonda de vidrio que transmite la presión del fondo del tanque al sensor de presión diferencial que esta localizado en el módulo de control. El acople entre el tubo de vidrio ubicado en el último tanque del prototipo y el sensor de presión diferencial se realiza mediante una manguera de plástico de fácil manejo y manipulación. La parte frontal de cada uno de los tanques está graduada de manera de poder fácilmente mirar el nivel que va alcanzando el agua en cada uno de los tanques.

En la parte superior de cada uno de los tanques que conforman el prototipo de control de nivel de líquidos, se encuentra localizado un interruptor de nivel máximo, la función de estos interruptores de nivel es evitar que el agua se derrame en el prototipo cuando el nivel del agua supera un cierto nivel máximo.

Esta estructura principal descansa sobre un soporte rectangular, también hecha del mismo material, con refuerzos angulares de acero inoxidable. La función de este soporte es elevar a la estructura principal de la cubeta reservorio a un nivel adecuado de trabajo, a fin de que se pueda tener un fácil acceso a las perillas de graduación de cada una de las válvulas de control de flujo con que cuenta la estructura principal.

Esta estructura completa, (soporte más tanques acoplados) descansa sobre el reservorio o cubeta que es en donde se almacena toda el agua que será bombeada por la bomba de inmersión, que también esta alojada en su interior, hacia la estructura de tanques acoplados. Este reservorio tiene dos señalizaciones de nivel máximo y mínimo, además posee una válvula de desfogue de agua de ½" que servirá para vaciar el reservorio cuando no se vaya a utilizar al prototipo.

El módulo de control es la parte principal del equipo pues aquí se encuentra toda la circuitería que controla al prototipo. En la parte frontal superior exterior del módulo se encuentran los circuitos de señalización tanto del nivel de referencia, al que se quiere llegar y que es utilizado por el control analógico, como también el circuito de señalización del nivel real sensado en el último tanque del prototipo. También se encuentran en esta tapa frontal los potenciómetros de perilla que permiten fijar los parámetros de las constantes del control PID analógico, así como también los terminales de conexión del sensor de presión diferencial con el que cuenta el equipo.

En la parte interior del módulo de control se encuentran distribuidas todas las tarjetas de los distintos circuitos electrónicos que conforman al equipo, incluyendo las fuentes de poder, un ventilador de 12 VDC es utilizado para refrigerar dichos circuitos. La entrada de alimentación de voltaje de la red normal (110 VAC) al módulo de control, está protegida contra picos de corriente e interferencias de ruido mediante un filtro de línea en el cual se enchufa el cable de poder del equipo, esto garantiza una buena estabilidad en los circuitos de control del prototipo.

En la parte lateral exterior del módulo de control, se encuentran localizadas las borneras terminales de la bomba de inmersión, en la parte exterior posterior y convenientemente identificados, se encuentran todos los terminales para las distintas conexiones exteriores del módulo de control.

A.2 MONTAJE DEL EQUIPO

Para utilizar el equipo, hay que montarlo adecuadamente, para ello se recomienda primero colocar los dos módulos cerca uno del otro, en el lugar donde va a trabajar el equipo, luego extraer los cables de conexión del prototipo de tanques acoplados y conectarlos adecuadamente en el módulo de control, en sus respectivas borneras de conexión, respetando la polaridad de cables (guiarse por las señales de identificación en las respectivas borneras y por los colores entre plugs y borneras), tener cuidado de que el equipo se encuentre desenergizado (la luz del interruptor de encendido debe estar apagada y preferiblemente el cable de poder desconectado), luego antes de conectar el cable de

poder, es recomendable realizar el acople entre la sonda de vidrio y la manguera de plástico que transmite la señal de presión al sensor de presión diferencial, para ello introducir la manguera de plástico en el terminal de metal ubicado en la parte superior de la sonda de vidrio, este acople debe realizarse con sumo cuidado a fin de no romper la sonda. Es importante que el tanque donde se encuentra la sonda de vidrio se encuentre totalmente vacío al momento de realizar este acople.

Una vez que se han realizado estas conexiones, debe procederse a llenar el tanque reservorio con agua hasta que la altura del líquido dentro del tanque supere por lo menos la indicación de nivel mínimo. La cantidad de agua depende del número de tanques acoplados que se desee utilizar, en una aplicación determinada.

Para realizar el control digital es necesario conectar al módulo de control la tarjeta de adquisición de datos DAS-128 al módulo de control, para ello se debe conectar los cables de salida y entrada a la respectiva bornera terminal de la tarjeta conectada al computador, de acuerdo al pórtico de acceso y salida seleccionados. Es importante conectar también para esta aplicación la señal de referencia respectiva (tierra) entre el módulo de control y la bornera terminal de la tarjeta DAS-128.

A.3 UTILIZACION DEL EQUIPO

Una vez que el equipo ha sido adecuadamente montado, esta listo para proceder a trabajar, para ello es necesario conectar el cable de poder al módulo de control en su respectivo terminal, antes de proceder a encenderlo seleccionar el tipo de control a utilizar con los respectivos selectores, y proceder como a continuación se detalla para cada tipo de control, luego encender el equipo (activar el interruptor de encendido, la luz de encendido se enciende y el equipo empieza a funcionar) y proceder a realizar las pruebas requeridas. Tener cuidado de que antes de encender el equipo, la manguera que sube desde la bomba de inmersión a los tanques del prototipo se encuentre dentro orificio de conexión dentro del tanque deseado para evitar que el agua se derrame fuera del prototipo.

A.3.1 Control Manual

Colocar el selector auto-0-man en la posición de manual y variar el caudal de la bomba utilizando la perilla de manual bomba hasta conseguir el caudal deseado, tener cuidado antes de encender el equipo, que la perilla de manual bomba se encuentre en el valor mínimo o el selector de auto-0-man en la posición 0.

A.3.2 Control análogo

Colocar el selector auto-0-man en la posición de auto y luego seleccionar el tipo de control mediante el selector respectivo. Fijar los valores deseados de las constantes del controlador PID mediante las perillas respectivas. El nivel de referencia se fija mediante la perilla de control respectiva, la altura de referencia puede observarse en el indicador respectivo. Tener cuidado de que esta perilla se encuentre en el valor mínimo antes de encender el equipo.

A.3.3. Control digital

Colocar el selector auto-0-man en la posición de auto y luego seleccionar el tipo de control mediante el selector respectivo. Fijar los valores deseados de las constantes del controlador PID mediante software, el control digital empieza a funcionar cuando se han terminado de ingresar por teclado estos parámetros.

A.4 DESCONECCION DEL EQUIPO

Cuando el equipo ha terminado de utilizarse, debe proceder a desmontarse para ello primero desconectar el cable de poder (siempre y cuando el equipo este apagado), luego desconectar los cables de conexión entre el prototipo de tanques acoplados y el módulo de control, tener cuidado de no halar los cables si no sacarlos con el plug respectivo de la respectiva bomera con cuidado. Para sacar la manguera de plástico acoplada a la sonda de vidrio, primero es necesario vaciar por completo el tanque en el que ésta se encuentra

(dejar la válvula de desfogue abierta hasta que salga toda el agua posible) y luego con sumo cuidado sacar la manguera de plástico del terminal de metal ubicado en la parte superior de la sonda de vidrio.

Cuando los cables de conexión han sido removidos, apartar el módulo de control a un lugar seguro. Para proceder a vaciar el tanque reservorio del prototipo de tanques acoplados abrir la llave de desfogue ubicada en el mismo colocando un recipiente bajo la misma, para poder sacar toda el agua del tanque reservorio es necesario remover la base soporte y los tanques acoplados del tanque reservorio, para ello quitar la manguera de plástico que sube desde la bomba de inmersión de los tanques acoplados y proceder a remover los tanques con cuidado, colocar los tanques acoplados en una superficie lisa teniendo cuidado de que no quede levantada la base de los tanques acoplados por la válvula de desfogue. Si hay líquido dentro de los tanques acoplados virar estos con cuidado y verter el líquido en el tanque reservorio. Luego retirar con cuidado la base soporte y ponerla horizontal sobre una superficie plana en lugar seguro.

Cuando el nivel dentro del reservorio sea el mínimo posible voltear este con cuidado sobre un recipiente para vaciarlo por completo, tener cuidado con la bomba de inmersión y de no mojar los terminales de los cables.

Del buen uso que se dé al equipo depende la vida útil del mismo, por lo tanto, es necesario observar con cuidado todas estas normas para su correcta utilización.

B. MANUAL DE CALIBRACION

A continuación se detalla la manera de calibrar cada una de las distintas tarjetas que conforman el módulo de control. Los potenciómetros que se mencionan son referidos a las respectivas tarjetas.

B.1 Calibración del sensor de presión

Esta calibración es necesaria cuando la lectura que se muestra en el display no coincide con la lectura visual del tanque del prototipo, para calibrar el sensor de presión debe procederse de la siguiente manera:

1. Conectar el equipo
2. cerrar la válvula de desfogue completamente
3. con el tanque completamente vacío calibrar el valor de cero, para ello encender el equipo y variar el potenciómetro R_0 en la tarjeta SCX-EB hasta conseguir que el voltaje de salida sea aproximadamente 0 V (ó que la lectura del indicador del nivel real sea aproximadamente 0 cm)
4. Luego llenar el tanque hasta 20 cm (se puede utilizar para ello la opción manual) y variar el potenciómetro R_G hasta conseguir que el voltaje de salida sea de 5 V (ó que la lectura del indicador de nivel real sea aproximadamente 20 cm)
5. Repetir la calibración con puntos intermedios y muevamente los máximos deser necesario. Tomar en cuenta que la presión ejercida por 40 cm de agua debe dar una salida 10 V, es decir la salda de la tarjeta SCX-EB debe ser 0.4 V/cm.

B.2 Calibración del Indicador de nivel de referencia y del nivel real

La calibración para cada una de estas tarjetas debe ser idéntica, por lo que se recomienda realizar la calibración de estas dos tarjetas en forma conjunta.

1. Cortocircuitar los terminales de Vin y tierra en la bamera respectiva, encender el equipo y luego variar el potenciómetro P1 hasta conseguir que la lectura del display sea 00.0,

2. Quitar el cortocircuito y aplicar un voltaje de 10 V mediante una fuente externa al terminal de Vin y variar los potenciómetros P2 y P hasta conseguir que la lectura del display sea de 40.0,
3. Variar este voltaje hasta 5 V y comprobar que la lectura sea de 20.0, en caso contrario realizar los ajustes necesarios hasta conseguir esta lectura
4. Repetir el paso 2 y el paso 3 hasta conseguir las lecturas deseadas
5. Comprobar con valores intermedios y nuevamente con los máximos de ser necesario

B.3 Calibración de la tarjeta del módulo generador de la señal PWM

Para calibrar esta tarjeta debe procederse de la siguiente manera:

1. Cortocircuitar los terminales de conexión de externa para control digital de Vin y Gnd
2. Colocar el selector auto-0-man en la posición de auto y seleccionar control digital
3. Encender el equipo y comprobar que en el pin del circuito integrado LM3524 se tenga un voltaje de 1 V, en caso contrario variar el potenciómetro P1 hasta conseguir este voltaje sobre dicho pin
4. Para calibrar la frecuencia de troceado, valiéndose de un osciloscopio conectado al pin de salida, variar el potenciómetro P2 hasta conseguir una frecuencia de troceado de aproximadamente de 1 KHz.

C. MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA

C.1 Cómo ingresar al programa?

Para ingresar al programa de control digital del prototipo, debe ingresarse primero al programa de CONTROL DIGITAL DIRECTO instalado en el computador del laboratorio de control automático, para ello ingresar desde la raíz del disco duro primero al subdirectorío C:\CCD. Luego digitar el comando CONTROL y luego presionar ENTER.

Cuando se ha ingresado al programa control.exe las primeras pantallas en aparecer son unas cajas de diálogo en el centro de la pantalla con información relativa al programa, (aparecen una después de otra) para quitar la caja de diálogo de la pantalla basta con posicionar el cursor del MOUSE en el botón OK de la caja de diálogo y dar un clic ó presionar las teclas ESC o ENTER.

Inmediatamente en la pantalla del computador se presenta el menú principal del programa en un ambiente de trabajo similar al de la mayoría de paquetes comerciales existentes en el mercado. Referirse al manual de operación del programa CONTROL.EXE^(*) para el manejo de las opciones del menú principal.

C.2 Cómo ejecutar una aplicación de control de nivel de líquidos?

Una vez dentro del programa control.exe seleccionar en la barra de menú principal, la opción OTROS, inmediatamente se despliega en pantalla un submenú con las siguientes opciones:

ON-OFF

DAHLINS

TANQUE

^(*)Fustillos P. " Algoritmos para control digital directo", Tesis de grado, E.P.N., 1994

La opción de tanque es la que nos permite trabajar con el prototipo de control de nivel de líquidos. Cuando se ha seleccionado esta alternativa se despliega un nuevo submenú en pantalla con las siguientes opciones:

CONTROL PID INDEFINIDO CONTROL-F8
CONTROL PID INDEFINIDO-ARCHIVO ALT-F8

Las dos opciones funcionan de idéntica manera, pero la alternativa ARCHIVO permite almacenar los valores de la prueba en un archivo que debe ser seleccionado anteriormente en el menú de OPCIONES DE GRAFICO dentro del menú principal. Nótese que estas opciones también pueden ser ejecutadas presionando las teclas indicadas.

Una vez que se ha seleccionado una de estas alternativas aparece en pantalla un caja de diálogo para ingresar los parámetros del controlador PID digital y la altura de referencia deseada, para ingresar dichos parámetros basta con posicionarse en el lugar deseado y hacer un clic con el mouse, luego ingresar el valor numérico deseado y dar un ENTER.

Cuando se han ingresado todos los parámetros del PID y la altura de referencia el proceso dá inicio y en la pantalla del computador aparece el gráfico de respuesta del sistema de control de nivel de líquidos, en donde se podrá observar como varía tanto la señal de control como la respuesta del sistema. Para detener el proceso debe presionarse cualquier tecla.

C.3 Cómo escoger el tipo de gráfico de respuesta para la aplicación de control de nivel de líquidos?

Antes de proceder a ejecutar una aplicación de control de nivel de líquidos, es necesario definir los parámetros con los que se va a trabajar en pantalla, como son tipo de gráfico de respuesta, período de muestreo, tiempo en pantalla, altura en pantalla, etc. Estos parámetros se escogen dentro de la opción de OPCIONES DE PANTALLA dentro del menú principal.

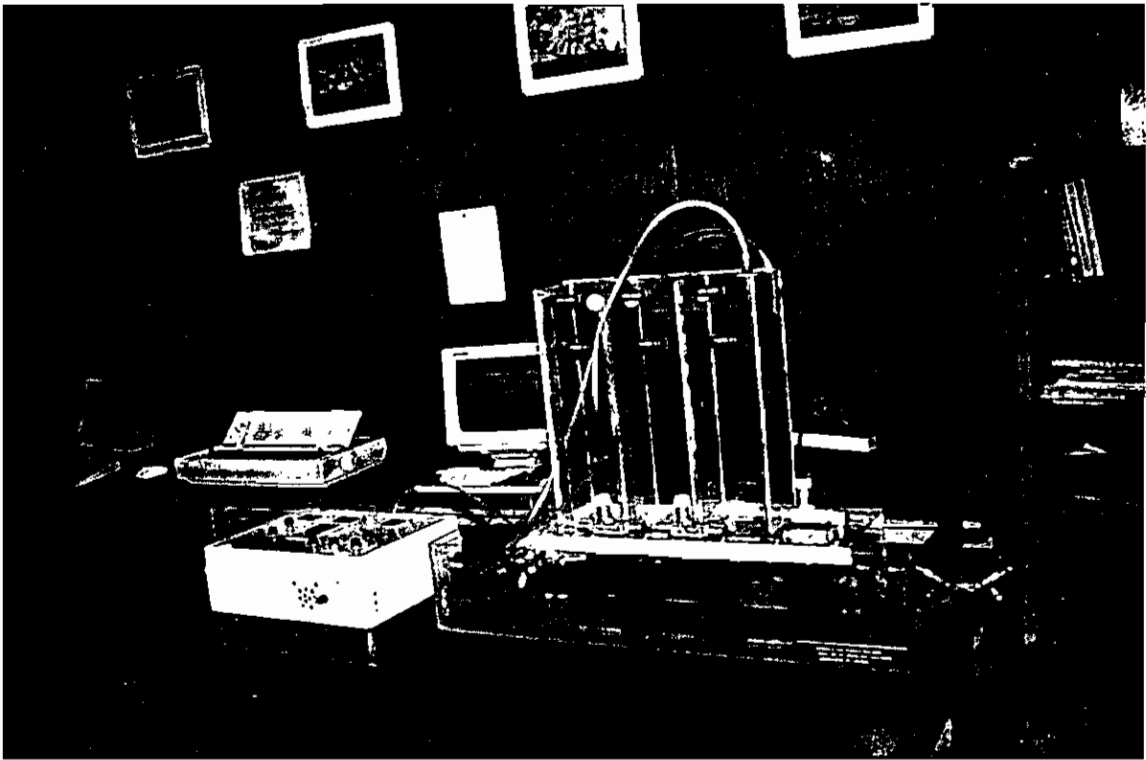
Para la aplicación de control de nivel existen dos tipo de gráficos de respuesta que pueden ser desplegados en pantalla y que son:

COMBINADO que muestra la pantalla dividida en dos secciones: Una donde se observan las curvas de respuesta del sistema y otra donde se puede ver como varía el nivel dentro del tanque.

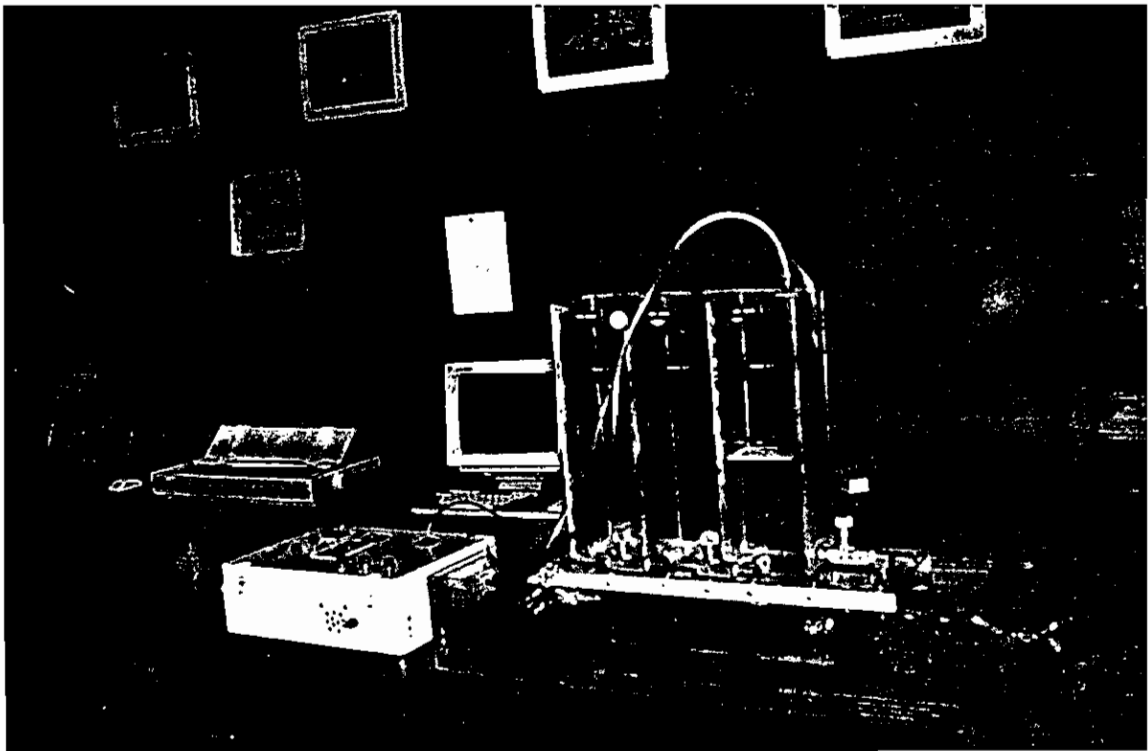
RESPUESTA que muestra únicamente las curvas de respuesta del sistema en la pantalla.

El tipo de grafico a mostrar en pantalla se escoge dentro del submenú TIPO DE GRAFICO TANQUE.

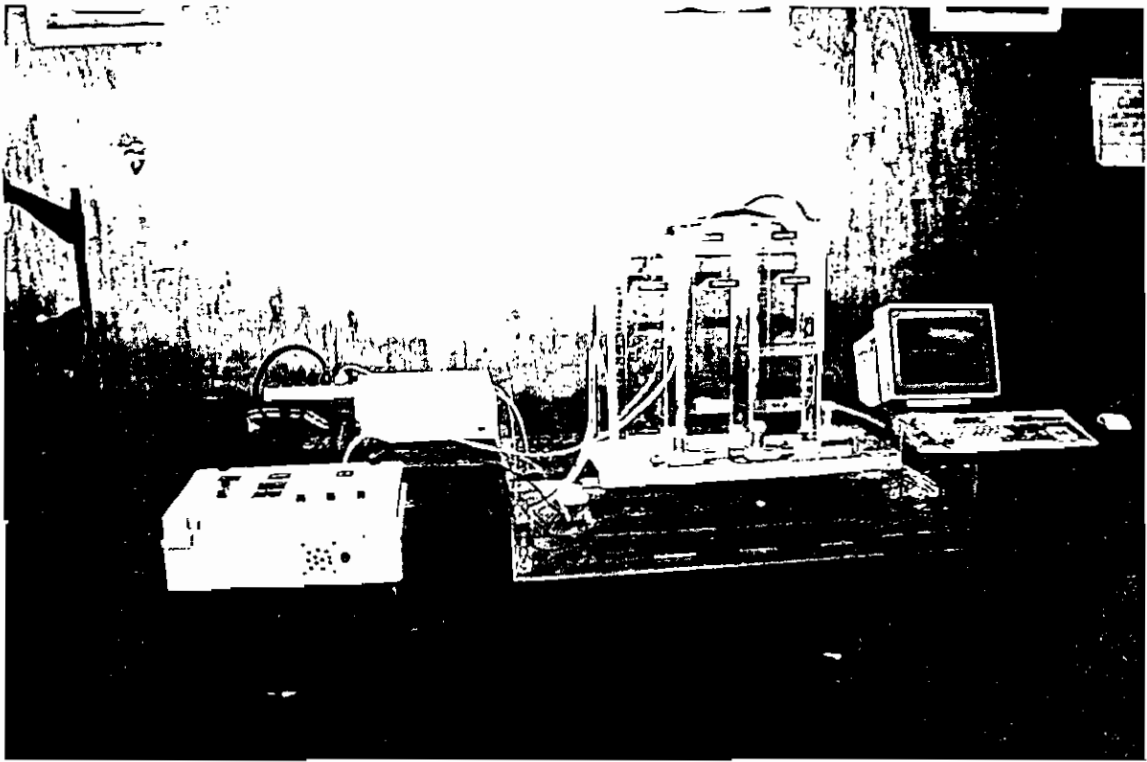
Con el prototipo de control de nivel de líquidos se pueden realizar aplicaciones prácticas de las distintas opciones de control disponibles en el programa control.exe, lo único que se debe tomar en cuenta para poner la referencia es que 10 V son equivalentes a 40 cm de altura dentro del tanque del prototipo.



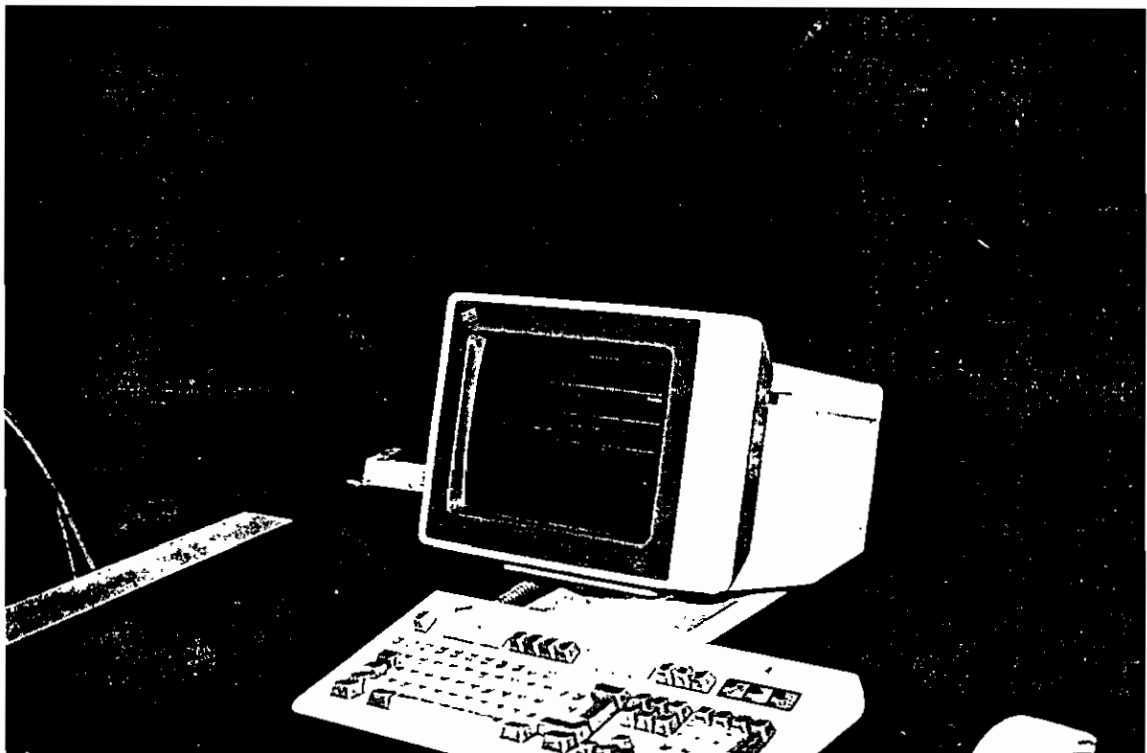
F.1 PROTOTIPO PARA CONTROL DE LIQUIDOS Y MODULO DE CONTROL



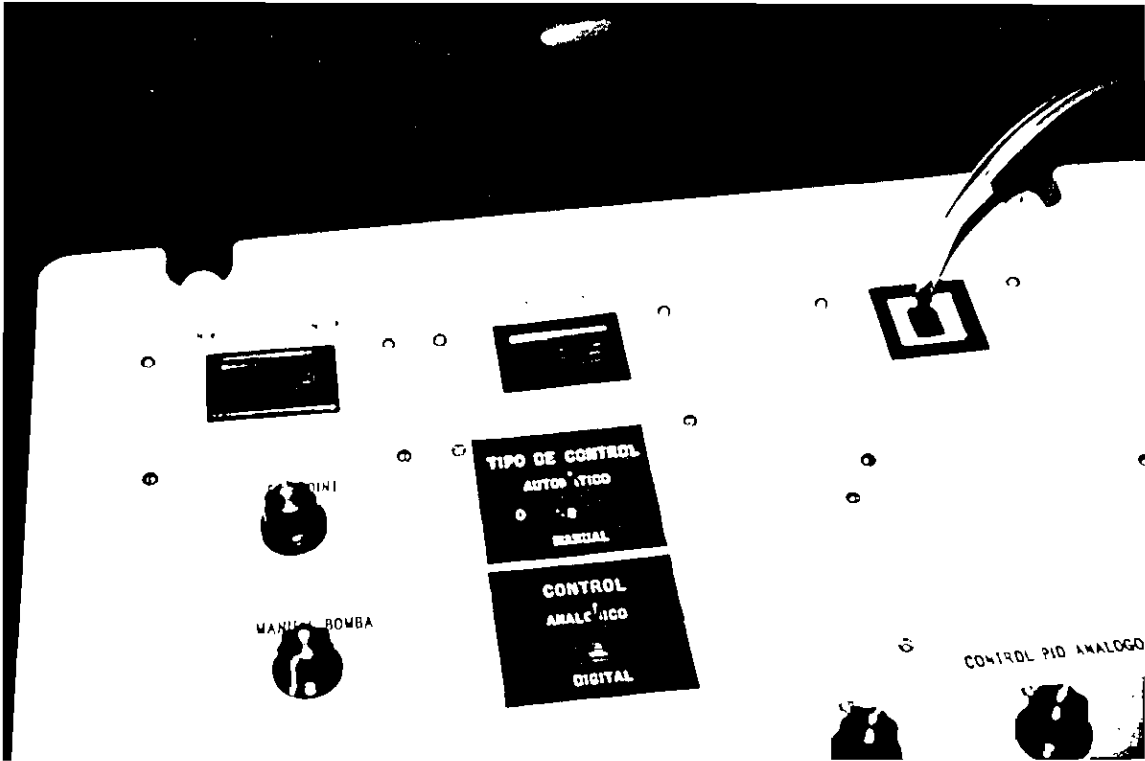
F.2 PROTOTIPO PARA CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS EN OPERACION CON LA TARJETA DAS-128



F.3 PROTOTIPO PARA CONTROL DE LIQUIDOS EN OPERACION CON EL EQUIPO KEITHLEY 500A



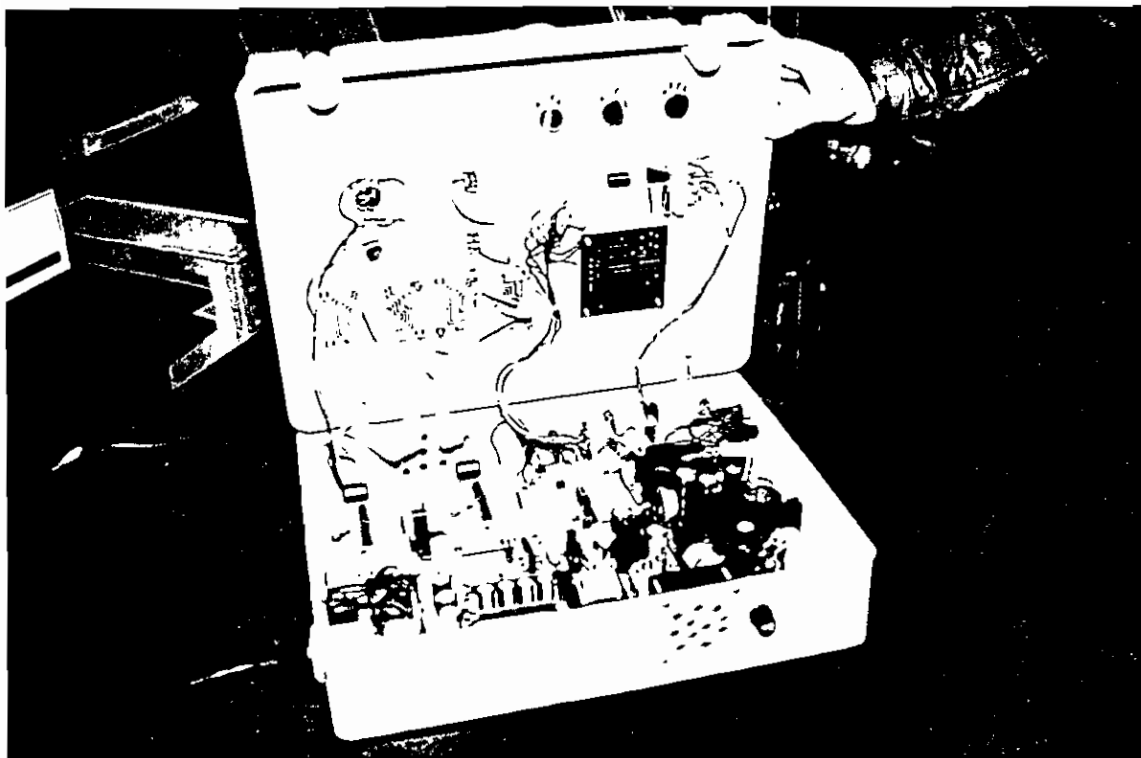
F.4 RESPUESTA DEL SISTEMA CON EL EQUIPO KEITHLEY 500 A



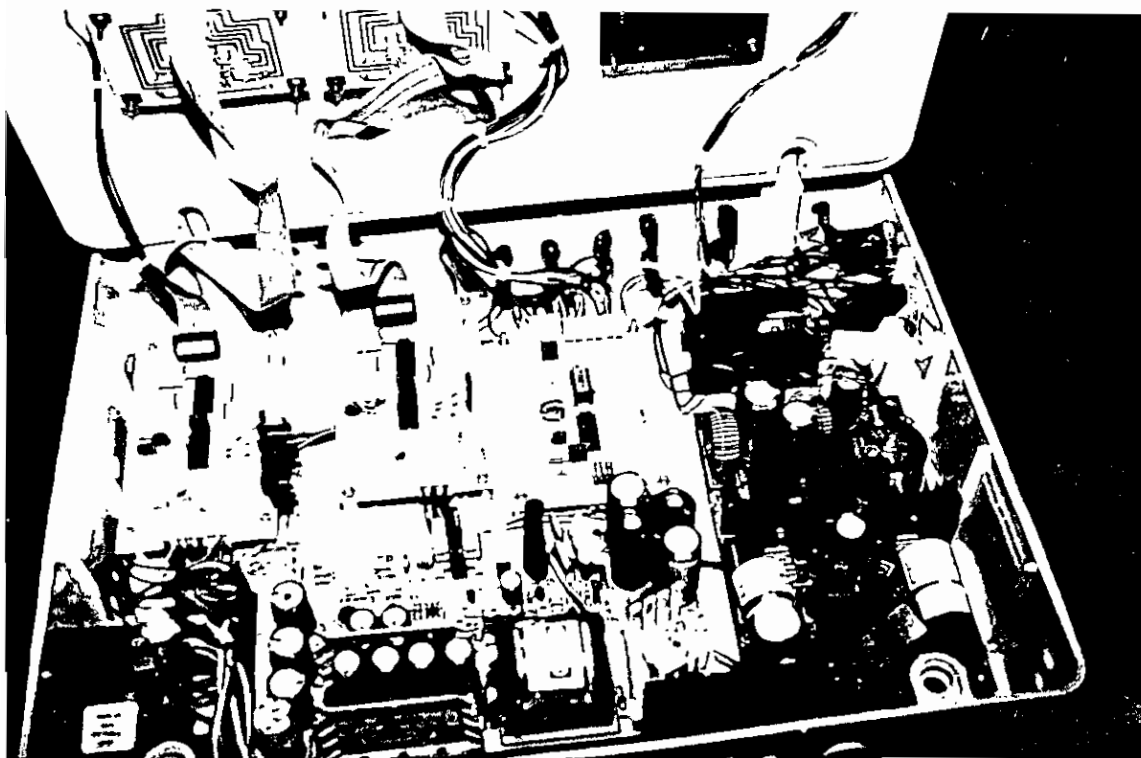
F.5 EXTERIOR DEL MODULO DE CONTROL EN OPERACION CON CONTROL ANALOGO



F.6 RESPUESTA DEL SISTEMA CON LA TARJETA DAS-128



F.7 INTERIOR DEL MODULO DE CONTROL



F.8 INTERIOR DEL MODULO DE CONTROL- DETALLE DE CONECCIONES

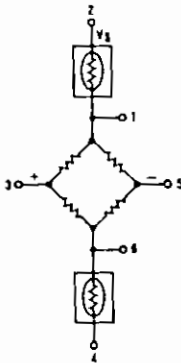
FEATURES

- Low Cost
- Temperature Compensation
- Calibrated Zero and Span
- Small Size
- Low Noise
- High Impedance for Low Power Applications

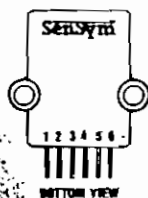
APPLICATIONS

- Medical Equipment
- Computer Peripherals
- Pneumatic Controls
- HVAC

EQUIVALENT CIRCUIT



ELECTRICAL CONNECTION



- Pin 1) Temperature Output (+)
- Pin 2) V_s
- Pin 3) Output (+)
- Pin 4) Ground
- Pin 5) Output (-)
- Pin 6) Temperature Output (-)

Notes: The polarity indicated is for pressure applied to port B.
(For Absolute devices, pressure is applied to port A
and the output polarity is reversed.)

GENERAL DESCRIPTION

The SCX C series sensors will provide a very cost effective solution for pressure applications that require operation over a wide temperature range. These internally calibrated and temperature compensated sensors give an accurate and stable output over a 0°C to 70°C temperature range. This series is intended for use with non-corrosive, non-ionic working fluids such as air, dry gases, and the like.

Devices are available to measure absolute, differential, and gage pressures from 1psi (SCX01) up to 100psi (SCX100). The Absolute (A) devices have an internal vacuum reference and an output voltage proportional to absolute pressure. The Differential (D) devices allow application of pressure to either side of the pressure sensing diaphragm and can be used for gage or differential pressure measurements.

The SCX devices feature an integrated circuit sensor element and laser trimmed thick film ceramic housed in a compact nylon case. This package provides excellent corrosion resistance and provides isolation to external package stresses. The package has convenient mounting holes and pressure ports for ease of use with standard plastic tubing for pressure connection.

All SCX devices are calibrated for span to within $\pm 5\%$ and provide an offset (zero pressure output) of ± 1 millivolt maximum. These parts were designed for low cost applications where the user can typically provide fine adjustment of zero and span in external circuitry. For higher accuracies, refer to the standard SCX series datasheet. If the application requires extended temperature range operation, beyond 0 to 70°C, two pins which provide an output voltage proportional to temperature are available for use with external circuitry.

The output of the bridge is ratiometric to the supply voltage and operation from any D.C. supply voltage up to +30V is acceptable.

Because these devices have very low noise and 100 micro-second response time they are an excellent choice for medical equipment, computer peripherals, and pneumatic control applications.

For further technical information on the SCX series, please contact your local Sensym office or the factory.

PRESSURE SENSOR CHARACTERISTICS

SCX C Series

STANDARD PRESSURE RANGES

PART NUMBER	OPERATING PRESSURE	PROOF PRESSURE*	FULL-SCALE SPAN
SCX01DNC	0-1 psid	20 psid	18 mV
SCX05DNC	0-5 psid	20 psid	60 mV
SCX15ANC	0-15 psia	30 psia	90 mV
SCX15DNC	0-15 psid	30 psid	90 mV
SCX30ANC	0-30 psia	60 psia	90 mV
SCX30DNC	0-30 psid	60 psid	90 mV
SCX100ANC	0-100 psia	150 psia	100 mV
SCX100DNC	0-100 psid	150 psid	100 mV

*Maximum pressure above which causes permanent sensor failure.

Maximum Ratings (For All Devices)

Supply Voltage, V_S	+30 V _{DC}
Common-mode Pressure	50 psig
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	300 °C

Environmental Specifications (For All Devices)

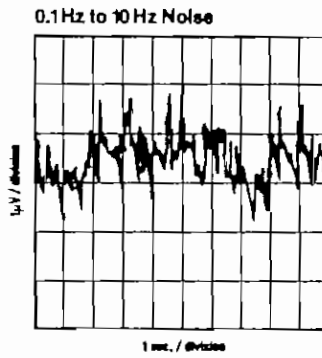
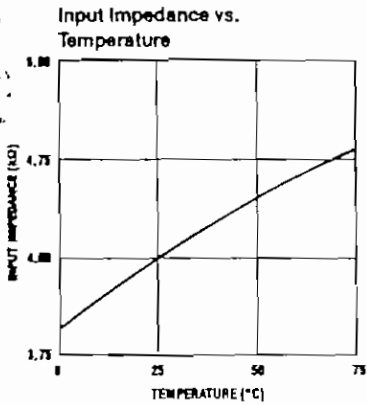
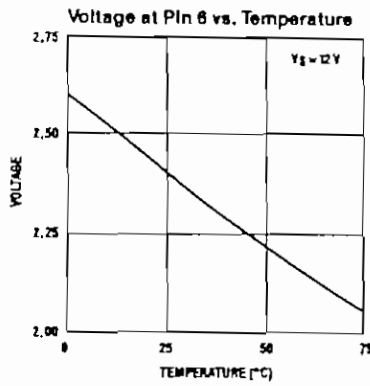
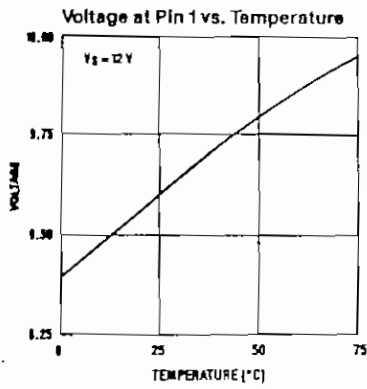
Temperature Range	0 to 70 °C
Compensated Operating	-40 °C to +85 °C
Storage	-55 °C to +125 °C
Humidity Limits	0 to 100% RH

SCX01DNC PERFORMANCE CHARACTERISTICS (Note 1)

CHARACTERISTIC	MIN	TYP	MAX	UNIT
Operating Pressure Range		—	1	psid
Sensitivity	—	18	—	mV/psid
Full-scale Span (Note 2)	17.00	18.00	19.00	mV
Zero Pressure Offset	-1.0	0	+1.0	mV
Combined Linearity and Hysteresis (Note 3)	—	±0.2	±1.0	% FSO
Temperature Effect on Span (0-70 °C) (Note 4)	—	±0.4	±2.0	% FSO
Temperature Effect on Offset (0-70 °C) (Note 4)	—	±0.20	±1.0	mV
Repeatability (Note 5)	—	±0.2	±0.5	% FSO
Input Impedance (Note 6)	—	4.0	—	kΩ
Output Impedance (Note 7)	—	4.0	—	kΩ
Common-mode Voltage (Note 8)	5.7	6.0	8.3	V _{DC}
Response Time (Note 9)	—	100	—	μsec
Long Term Stability of Offset and Span (Note 10)	—	±0.1	—	% FSO

UNIT
psl
mV/psl
mV
mV
% FSO
% FSO
mV
% FSO
kΩ
kΩ
V _{DC}
μsec
% FSO

UNIT
psl
mV/psl
mV
mV
% FSO
% FSO
mV
% FSO
kΩ
kΩ
V _{DC}
μsec
% FSO



Specification Notes: (For All Devices)

- Note 1: Reference Conditions; Unless otherwise noted: Supply Voltage, $V_g = 12V_{DC}$, $T_A = 25^\circ C$, Common-mode Line Pressure = 0 psig, Pressure Applied to Port B. For absolute devices only, pressure is applied to Port A and the output polarity is reversed.
- Note 2: Span is the algebraic difference between the output voltage at full-scale pressure and the output at zero pressure. Span is ratio-metric to the supply voltage.
- Note 3: See Definition of Terms.
Hysteresis — the maximum output difference at any point within the operating pressure range for increasing and decreasing pressure.
- Note 4: Maximum error band of the offset voltage and the error band of the span, relative to the 25°C reading.
- Note 5: Maximum difference in output at any pressure with the operating pressure range and temperature within 0°C to +70°C after:
a) 1,000 temperature cycles, 0°C to +70°C
b) 1.5 million pressure cycles, 0 psig to full-scale span.
- Note 6: Input impedance is the impedance between pins 2 and 4.
- Note 7: Output impedance is the impedance between pins 3 and 5.
- Note 8: This is the common-mode voltage of the output arms (Pins 3 and 5) for $V_g = 12V_{DC}$.
- Note 9: Response time for a 0 psig to full-scale span pressure step change, 10% to 90% rise time.
- Note 10: Long term stability over a one year period.

GENERAL DISCUSSION

The SCX series devices give a voltage output which is directly proportional to applied pressure. The devices will give an increasing positive going output when increasing pressure is applied to pressure port P_B of the device. If the input pressure connections are reversed, the output will increase with decreases in pressure. The devices are ratiometric to the supply voltage and changes in the supply voltage will cause proportional changes in the offset voltage and full-scale span. Since for absolute device pressure is applied to port P_A, output polarity will be reversed.

User Calibration

The SCX devices are fully calibrated for offset and span and should therefore require little user adjustment in most applications. For precise span and offset adjustments, refer to the applications section herein or contact the Sensym factory.

Vacuum Reference (Absolute Devices)

Absolute sensors have a hermetically sealed vacuum reference chamber. The offset voltage on these units is therefore measured at vacuum, 0psia. Since all pressure is measured relative to a vacuum reference, all changes in barometric pressure or changes in altitude will cause changes in the device output.

Media Compatibility

SCX devices are compatible with most non-corrosive gases. Because the circuitry is coated with a protective

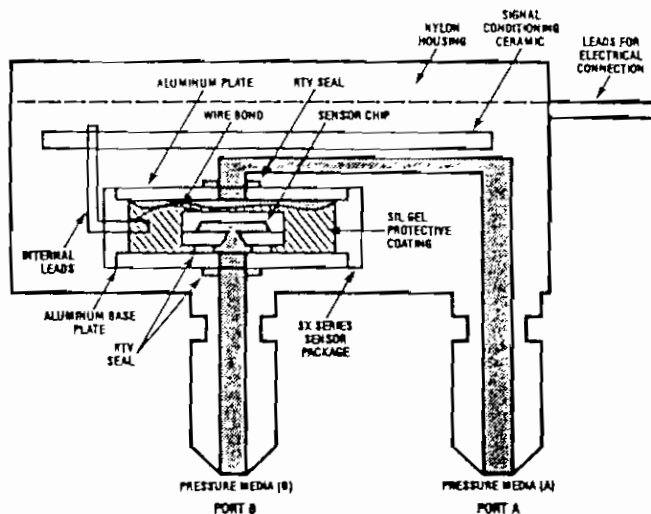
silicon gel, many otherwise corrosive environments can be compatible with the sensors. As shown in the physical construction diagram below, fluids must generally be compatible with silicon gel, plastic, aluminum, RTV, silicon, and glass for use with Port B. For questions concerning media compatibility, contact the factory.

MECHANICAL AND MOUNTING CONSIDERATIONS

The SCX nylon housing is designed for convenient pressure connection and easy PC board mounting. To mount the device horizontally to a PC board, the leads can be bent downward and the package attached to the board using either tie wraps or mounting screws. For pressure attachment, tygon or silicon tubing is recommended.

All versions of the SCX sensors have two (2) tubes available for pressure connection. For absolute devices, only port P_A is active. Applying pressure through the other port will result in pressure dead ending into the backside of the silicon sensor and the device will not give an output signal with pressure.

For gage applications, pressure should be applied to port P_B. Port P_A is then the vent port which is left open to the atmosphere. For differential pressure applications, to get proper output signal polarity, port P_B should be used as the high pressure port and P_A should be used as the low pressure port.



Physical Construction (Cutaway Diagram)

(Not Drawn to Scale)

APF
Show
2-5V
tional
SCX s
eratur
ance,
or the

Low

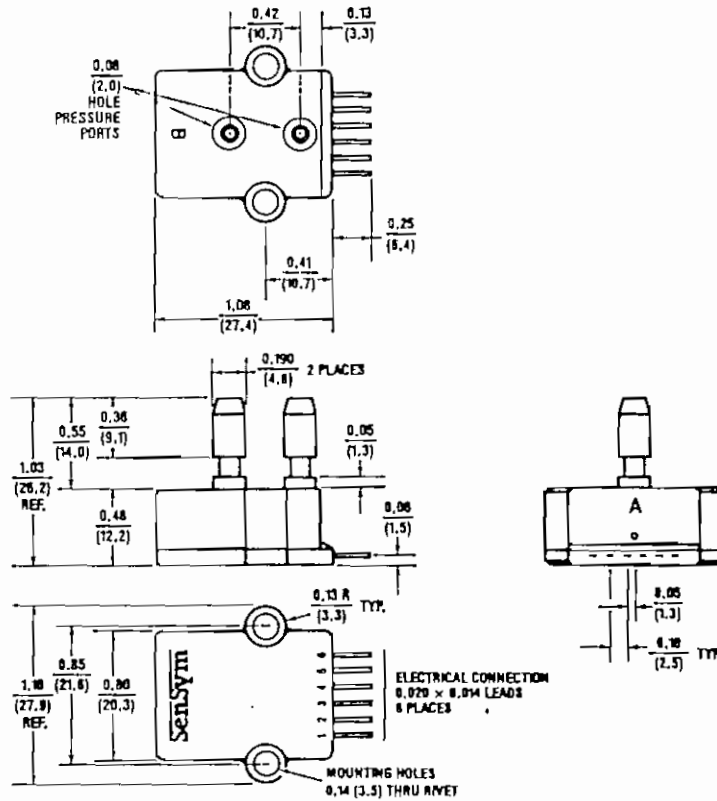
For se
Figure
for a C
output
and he
system
lower
column

Circu

The LM
excitat
With th
noise c
used to
output,

PHYSICAL DIMENSIONS

SCX C Series



DIMENSIONS IN INCHES (MILLIMETERS)
WEIGHT: 5 GRAMS
CASE MATERIAL: GLASS FILLED NYLON

WETTED MATERIAL
PORT A: GLASS FILLED NYLON, ITY, SILBEL
PORT B: GLASS FILLED NYLON, SILICON, ITY
SEE PHYSICAL CONSTRUCTION DRAWING

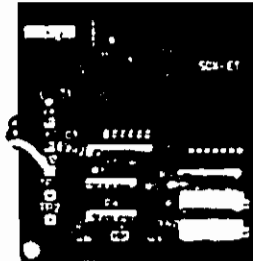
ORDERING INFORMATION

To order, use the following part numbers:

DESCRIPTION	PART NUMBER
0 to 1psi Differential/Gage	SCX01DNC
0 to 5psi Differential/Gage	SCX05DNC
0 to 15psi Absolute	SCX15ANC
0 to 15psi Differential/Gage	SCX15DNC
0 to 30psi Absolute	SCX30ANC
0 to 30psi Differential/Gage	SCX30DNC
0 to 100psi Absolute	SCX100ANC
0 to 100psi Differential/Gage	SCX100DNC

FEATURES

- Selectable Voltage Outputs
- Single or Dual Supply Operation
- Pressure from 0-1 to 0-100 psi
- Instant Prototyping



INTRODUCTION

The SCX-EB universal evaluation board has been designed for use with Sensym's SCX series of pressure sensors to facilitate the breadboarding of virtually any application that involves pressure sensing, from 70mBar (1psi) to 7 Bar (100psi). By simply calculating a single resistor value to set the amplifier gain and understanding the use of the jumper connections, the board should be ready for total circuit evaluation in less than 30 minutes. A general circuit description and several design examples are presented.

GENERAL DISCUSSION

Referring to the schematic diagram shown in Figure 1, amplifier A1 is used to provide a regulated voltage for the SCX sensor. In this manner, the circuit becomes independent of supply variations, power supply noise and ripple. The voltage, V_B , at test point one (TP1) will be 10V when jumper J4 is left open, and V_B will be at 5V when J4 is connected.

Amplifiers A3 and A4 are connected as an instrumentation amplifier and provide gain to the input signal, V_{IN} . A detailed description of this particular instrumentation amplifier configuration can be found in Sensym application Notes 17 and 18, so a rigorous mathematical derivation will be avoided and only final design equations will be presented here.

Amplifier A2, in conjunction with potentiometer R_O set the initial (zero-pressure) output voltage. The complete expression for the output voltage, V_O , is given by the following equation:

$$V_O = V_{IN} \left[2 \left(1 + \frac{R_3}{R_T} \right) \right] + V_R$$

where $R_T = R_B + R_G$
and V_R is the voltage at TP2 as set by R_O .

Connection point V- can be connected to a negative power supply when available. The connection to V- allows the evaluation board to run from dual supplies,

thus giving the output the ability to swing to or below true ground. When a negative power supply is not used, the output of the evaluation board at zero pressure will be 50 to 150mV above ground. This small offset voltage can be suppressed by mounting a 2.0k Ω resistor, R5, on the output stage of the evaluation board. When R5 is in place the zero pressure offset can be reduced to 30 to 80mV above ground. Also, when a negative power supply is not used, jumper J5 must be included such that V- will be eliminated from operation. When jumper J5 is connected, V- will be connected to ground.

The polarity shown for the output voltage of the SCX Sensor assumes that the pressure is applied to port B. By using jumpers J1, J2, and J3, a variety of combinations are possible for V_R , the output voltage that is to represent zero pressure. For example, it is possible to set the output voltage to change from 1.00V at zero pressure to 5.0V at full-scale pressure; or if dual supplies are available, to set the output at 0V at zero pressure and 5.0V at full-scale positive pressure and -5.0V for an equal but negative pressure (vacuum). Also, by using the proper jumper connections, at zero pressure the output could be set to 5.0V with swings to +10 for positive pressure and to ground for negative pressure. These, as well as many other combinations, are possible.

POWER SUPPLY OPTIONS

The evaluation board can be operated from single or dual power supplies. In either case certain voltage limitations do exist.

- Single Supply Operation. The SCX evaluation board requires a supply voltage of 8 to 30V for correct operation.
- Dual Supply Operation. When the SCX evaluation board is powered by dual supplies, the positive power supply must be between 8 and 30V, while the negative voltage supply can be any negative voltage down to -22V. However, the total voltage across the board must be limited to 30V.

JUMPER CONNECTIONS

- (A) Jumper J4. This jumper simply controls the non-inverting gain of amplifier A1. With J4 open, the gain is 4V/V and the voltage at the top of the bridge will be approximately 10V. Leaving J4 open is the proper connection for all applications where V+ is 12V or higher. For applications where V+ is between 8V and 12V, J4 should be connected. This will give A1 a gain of 2V/V and hence V_B will be at approximately 5V.
- (B) Jumpers J1 and J2. This network is a voltage divider, with 2.5V at the top of the divider. Since R1 and R0 are 10kΩ, the range of the wiper arm voltage is easy to determine. With Jumpers J1 and J2 open, the wiper arm will range from 0.83V to 1.67V and hence, this is also the range of adjustment for voltage V_B at TP2 (assuming Jumper J3 is open). If J1 is shorted, the range of adjustment is now from 1.25V to 2.5V. If J2 is shorted and J1 left open, the range is from approximately 0.0V to 1.25V.
- (C) Jumper J3. With Jumper J3 open, the gain of A2 is unity. With J3 shorted, the gain is 3V/V. This jumper is only useful when it is desired to set V_R higher than 2.5V, which is the maximum possible by using only J1 and J2. For example, if it is required to set V_R between 3.75V and 7.5V, the

- best adjustment is accomplished by jumpering J1 and J3. If it desired to set V_R at (or near) ground, Jumpers J1 and J3 should be left open and J2 should be shorted.
 - (D) Jumper J5. This Jumper is used when operation is from a single supply. When a negative power supply is not used, Jumper J5 must be included such that V- will be eliminated from operation. When Jumper J5 is connected, V- will be connected to ground.
 - (E) Jumpers J6 and J7. These jumpers will only be used when an SCX absolute sensor is used on the evaluation board. The absolute sensors have reversed output terminals compared to the differential/gauge SCX devices. When differential/gauge parts are used, jumpers J6 and J7 are not connected and, on the solder side of the evaluation boards, Jumper points P1 and P2 are soldered.
- When using an SCX gauge or differential sensor, P1 and P2 are shorted, and J6 and J7 are left open.
- But, when an absolute sensor is used: P1 and P2 are left open and, J6 and J7 are shorted.

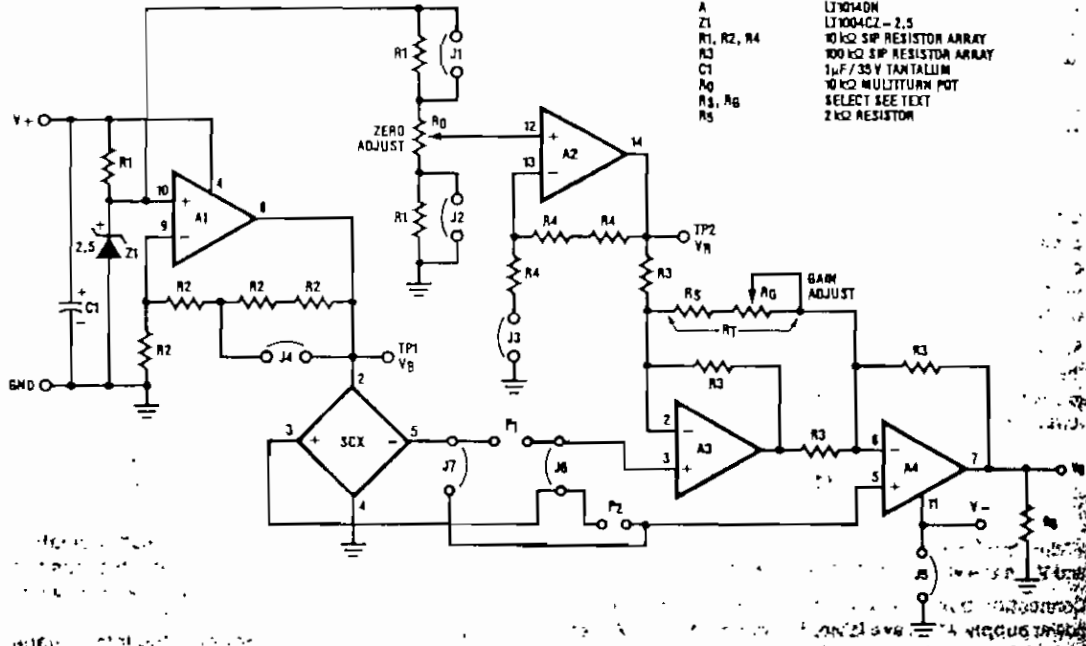


FIGURE 1 Schematic Diagram
2.9

DESIGN Example
Consider 0 to 100 psi supply.
Solution: open w/ SCX1000 input pressure. Because voltage, the Since the voltage ge

For R₃ = 1
R₇ = 3.448 Ω
select R₆ = met pot.
Since the z this is eas open excep nected. Th

ADJUST
(a) With z 1.00V.
(b) Apply 6.00V.
(c) Repea
Example 2:
A dialysis ±500 mmHg, nominally a ±2.5V for available.

Solution: The top of the SC this applica span at 12V 0.5 mV/V, per the output fr required the voltage char Again, using found to be gain adjustm R₆ to be a 5 Since the J4, J6, J7 are ner, the w/ 1.25V to 2.5 V. Thus, V_R c

ADJUSTMENT PROCEDURE

There are two methods to adjust this circuit. If the vacuum pump is turned on, simply adjust R_0 until the output is 5.0V when the picker does not have a component attached. If the pump is not turned on, adjust R_0 until the output is at 6.2V. This is equivalent to offsetting the output by a pressure that is 1.7 psig higher than the actual expected operating pressure of 13psa. This is done because, with no vacuum pump, the sensor will be measuring the ambient pressure of about 14.7psa. This fact also points out that there may be a need to clamp the output voltage to 5V if the logic gate cannot tolerate a 6.2V input if the pump is not on or should fail.

We are particularly proud of the SCX family and we hope this brief technical explanation will help you in the evaluation of the SCX product family. To this end, Figure 6 is provided to aid you with your design.

If you have any questions about this product, your particular application, or any other Sensym product, please call us. We are always happy to assist you in any way we can.

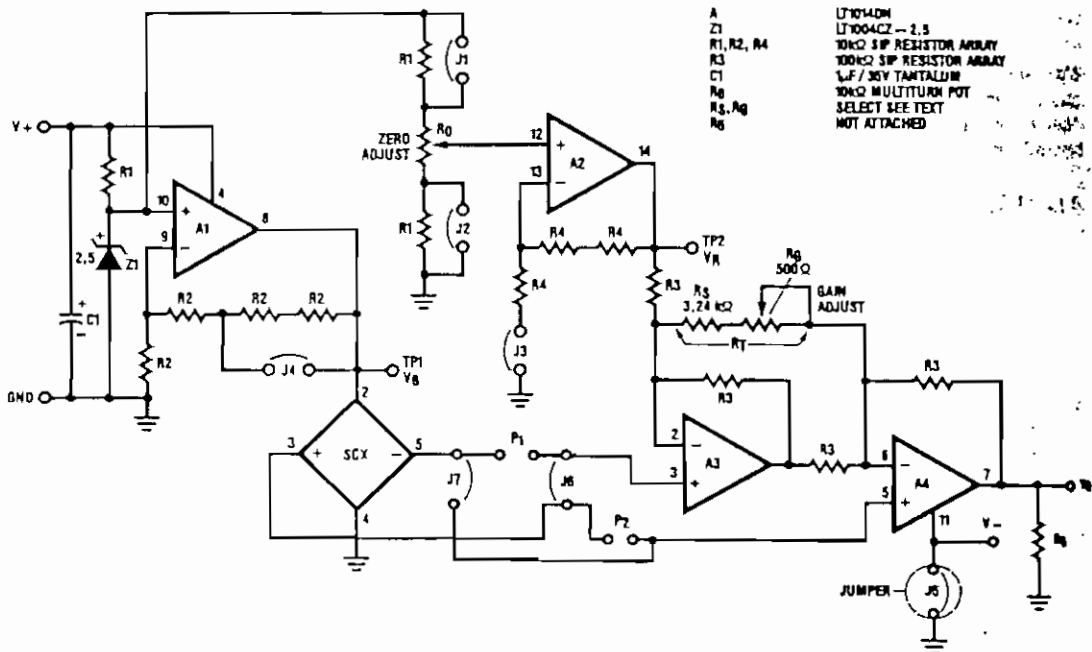


FIGURE II 1V to 8V Output for 0-to-100 psi input

board

ind we
u in the
Figure

our per-
please
way we

SCX Evaluation Board

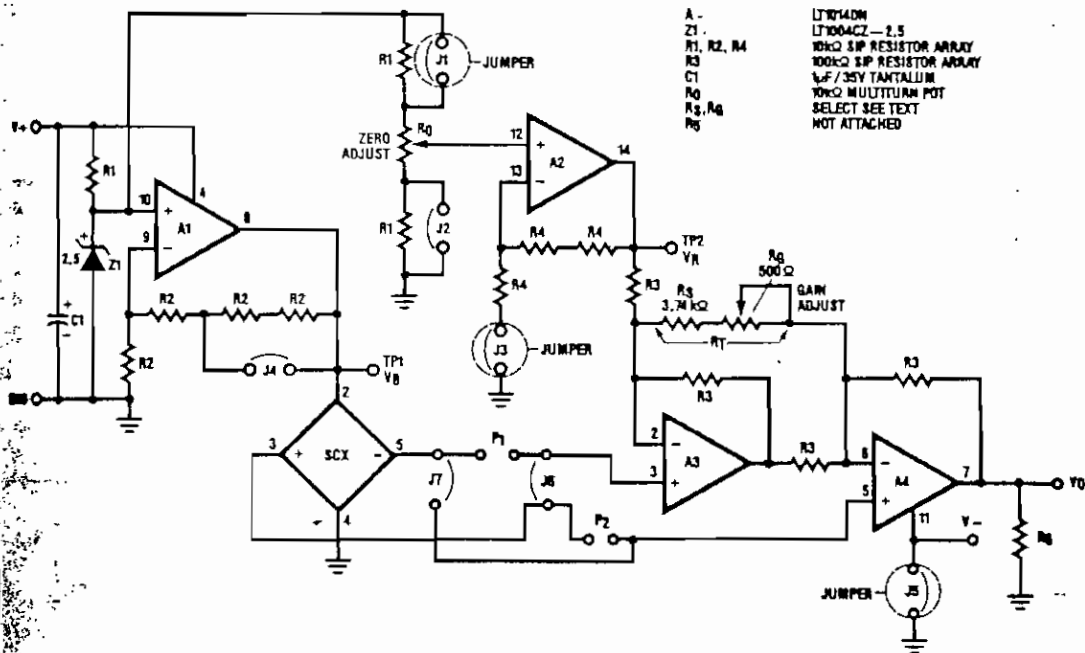


FIGURE III 5V ± 2.5V Output for ± 500 mmHg Input

6

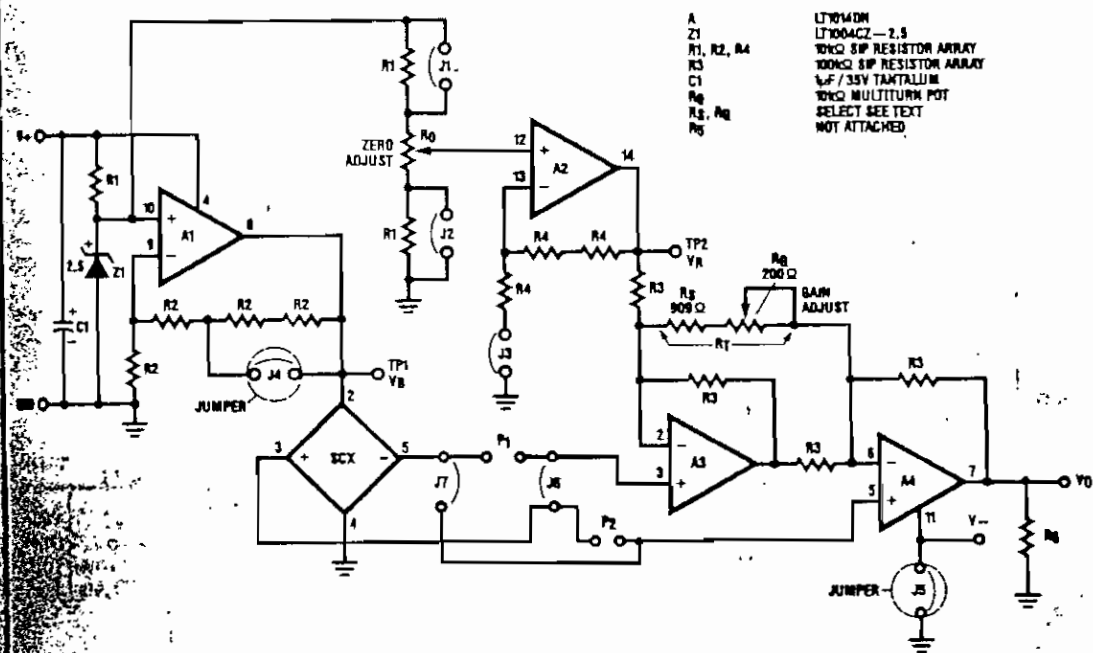
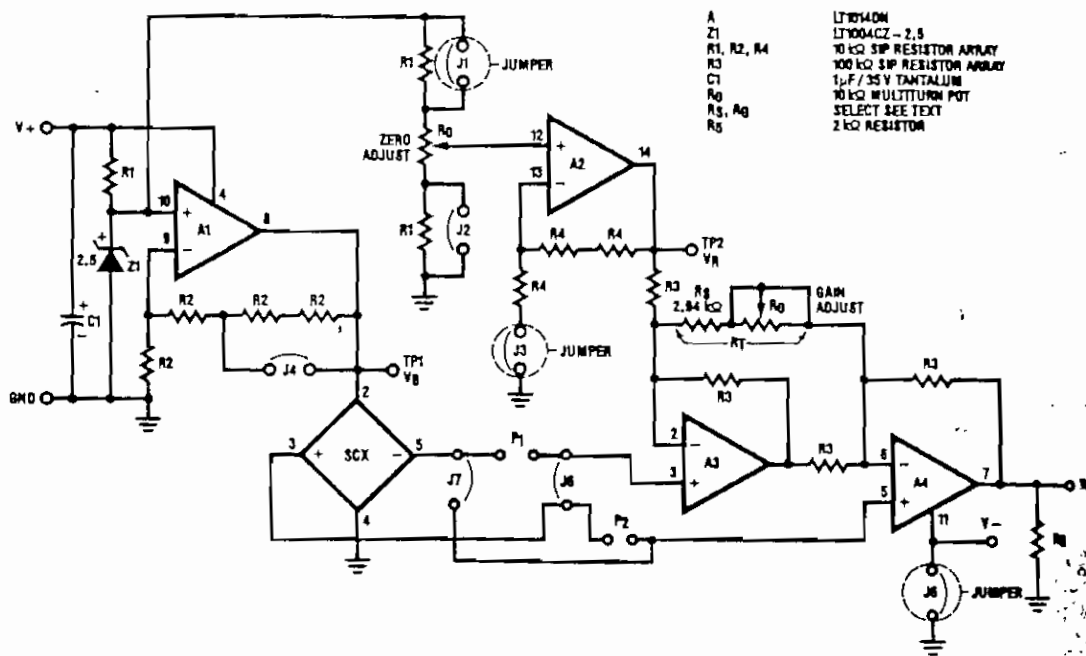


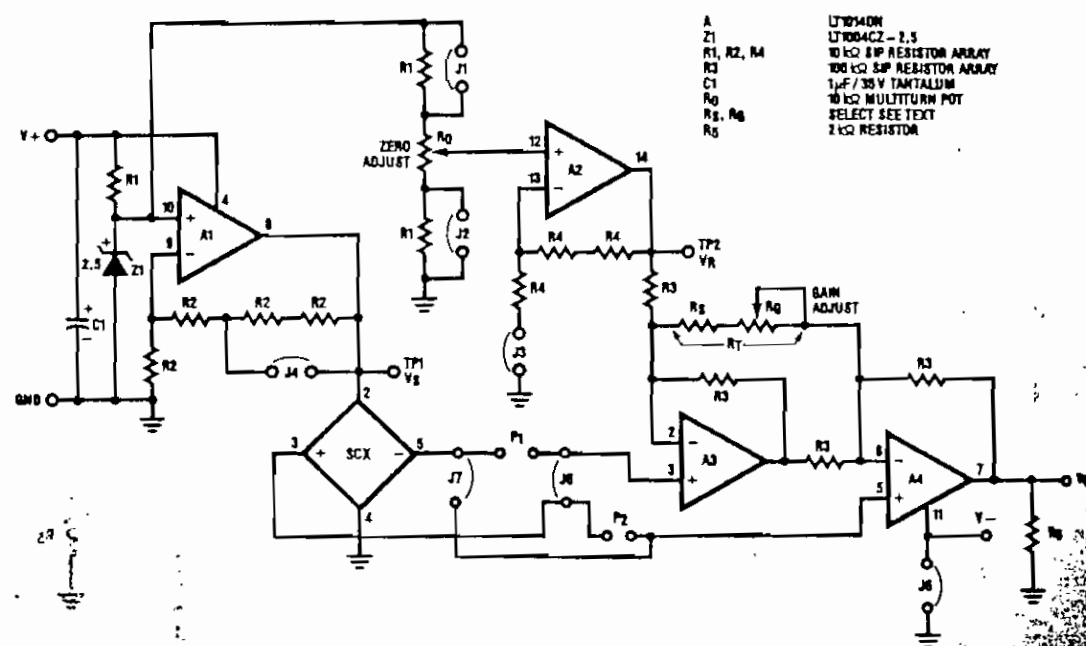
FIGURE IV 1V to 6V Output for 0-to-5 pel Input

SCX Evaluation Board



- A**
 Z1
 R1, R2, R4
 R3
 C1
 R0
 R5, R6
 R7, R8, R9
- LT1014DN**
 LT1004CZ - 2.5
 10 kΩ S/P RESISTOR ARRAY
 100 kΩ S/P RESISTOR ARRAY
 1μF / 35 V TANTALUM
 10 kΩ MULTITURN POT
 SELECT SEE TEXT
 2 kΩ RESISTOR

FIGURE V 0V to 5V Output for Vacuum Sensing



- A**
 Z1
 R1, R2, R4
 R3
 C1
 R0
 R5, R6
 R7, R8, R9
- LT1014DN**
 LT1004CZ - 2.5
 10 kΩ S/P RESISTOR ARRAY
 100 kΩ S/P RESISTOR ARRAY
 1μF / 35 V TANTALUM
 10 kΩ MULTITURN POT
 SELECT SEE TEXT
 2 kΩ RESISTOR

FIGURE VI Your Design Goes Here

Bo
 SC
 SC
 SC
 SC
 PC
 Oth
 SP
 Ope
 S
 Sup
 Outp
 Opti
 Total
 BIL
 Nam
 Com
 Addr
 City/
 Phon
 Mak
 Retu
 Appl
 Sen
 1255
 Sun

SENSYM EVALUATION BOARD
ORDER FORM

Board	Description	Qty.
SCX-EB	Analog Output (0-5V, 1-6V)	_____
SCX-PRL8	8-Bit Parallel Output	_____
SCX-SRL8	8-Bit Serial Output	_____
SCX-LCD	3 1/2-Digit Display	_____
PC-Board	Any Unstuffed Board	_____
Other:	_____	_____

SPECIFICATIONS

Operating Pressure Range _____
SCX-"C" Series Standard

Supply Voltage: EB: ±8V to ±24V
PRL8, SRL8: +5V only
LCD: +7V to +30V

Output Swing / Display Range _____

Options: _____

Total Cost: \$ _____

BILLING INFORMATION

Name: _____

Company: _____

Address: _____

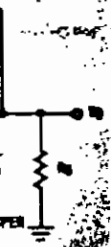
City/State: _____

Phone Number: (____) _____ Date: _____

Make Checks Payable to: Sensym, Inc.

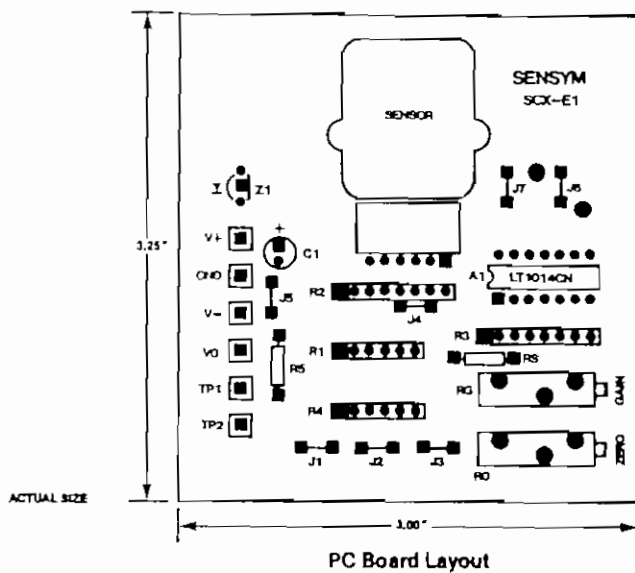
Return This Form to:

Application Department — Eval Board
Sensym, Inc.
1255 Reamwood Avenue
Sunnyvale, CA 94089



PHYSICAL DIMENSIONS

SCX Evaluation Board



ORDERING INFORMATION

To order evaluation boards, complete the form shown on the back page. Evaluation boards are available for all standard SCX Series devices shown below. For other

pressure ranges, please contact the Sensym factory. Each evaluation board includes the PC board with all components, including the SCX "C" series sensor pre-assembled and ready to use.

STANDARD PRESSURE RANGES

PART NUMBER	OPERATING PRESSURE	PROOF PRESSURE*
SCX01DNC	0-1psid	20 psid
SCX05DNC	0-5psid	20 psid
SCX15ANC	0-15psia	30 psia
SCX15DNC	0-15psid	30 psid
SCX30ANC	0-30psia	60 psia
SCX30DNC	0-30psid	60 psid
SCX100ANC	0-100psia	150 psia
SCX100DNC	0-100psid	150 psid

*Maximum pressure above which causes permanent sensor failure.

Other Evaluation Boards

Sensym also offers a complete family of evaluation boards for the SCX and SSX Series pressure sensors. These include output option for 8-bit serial, 8-bit parallel, 3 1/2 digit LCD and 4-20mA. For further information on these products, contact your local Sensym representative or call directly to the Sensym factory.

S

INTF
The S-
board
sors.
the SC
verter,
tion b
from b
calcul
proper

GEN

The fol
board c
Voltage
provide
VCL710
erate f
without
nally re
proxim
100 ho
config
played

Sensor
put, an
Instrum
used to
does n
this co

where:

R_T = R

As see
puffer
three h

To det
the de
play. A
count
200 m

Digital
three
conve

LM2524/LM3524


National Semiconductor

Voltage Regulators

LM1524/LM2524/LM3524 Regulating Pulse Width Modulator

General Description

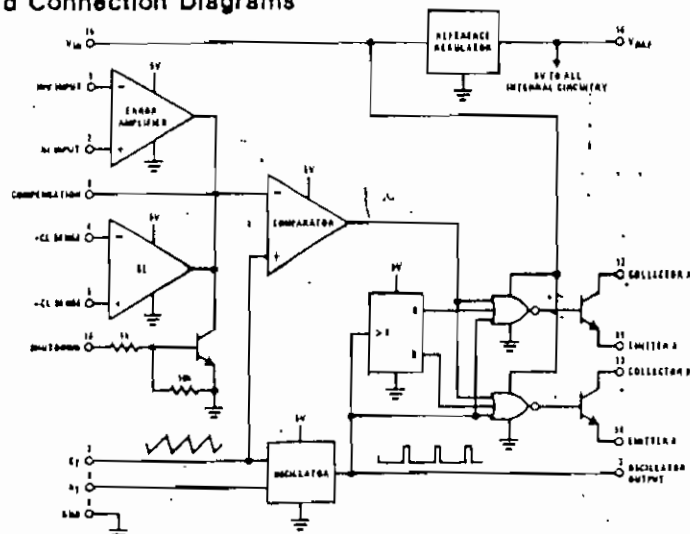
The LM1524 series of regulating pulse width modulators contains all of the control circuitry necessary to implement switching regulators of either polarity, transformer coupled DC to DC converters, transformerless polarity converters and voltage doublers, as well as other power control applications. This device includes a 5V voltage regulator capable of supplying up to 50 mA to external circuitry, a control amplifier, an oscillator, a pulse width modulator, a phase splitting flip-flop, dual alternating output switch transistors, and current limiting and shut-down circuitry. Both the regulator output transistor and each output switch are internally current limited and, to limit junction temperature, an internal thermal shut-down circuit is employed. The LM1524 is rated for operation from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ and is packaged in a hermetic 16-lead DIP (J). The LM2524 and LM3524 are rated for operation from 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$ and are

packaged in either a hermetic 18-lead DIP (J) or a 16-lead molded DIP (N).

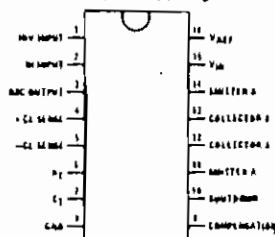
Features

- Complete PWM power control circuitry
- Frequency adjustable to greater than 100 kHz
- 2% frequency stability with temperature
- Total quiescent current less than 10 mA
- Dual alternating output switches for both push-pull or single-ended applications
- Current limit amplifier provides external component protection
- On-chip protection against excessive junction temperature and output current
- 5V, 50 mA linear regulator output available to user

Block and Connection Diagrams



Dual-In-Line Package



Order Number LM1524J, LM2524J
or LM3524J
See NS Package J16A

Order Number LM2524N
or LM3524N
See NS Package N16A

Absolute Maximum Ratings

Input Voltage	40V	Maximum Junction Temperature (J Package)	150°C
Reference Voltage, Forced	8V	(N Package)	125°C
Reference Output Current	50 mA	Storage Temperature Range	-65°C to $+150^{\circ}\text{C}$
Output Current (Each Output)	100 mA	Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	300°C
Oscillator Charging Current (Pin 6 or 7)	5 mA		
Internal Power Dissipation (Note 1)	1W		
Operating Temperature Range			
LM1524	-55°C to $+125^{\circ}\text{C}$		
LM2524/LM3524	0°C to $+70^{\circ}\text{C}$		

Electrical Characteristics

Unless otherwise stated, these specifications apply for $T_A = -55^{\circ}\text{C}$ to $+125^{\circ}\text{C}$ for the LM1524 and 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$ for the LM2524 and LM3524, $V_{IN} = 20\text{V}$, and $f = 20\text{ kHz}$. Typical values other than temperature coefficients, are at $T_A = 25^{\circ}\text{C}$.

PARAMETER	CONDITIONS	LM1524/ LM2524			LM3524			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Reference Section								
Output Voltage		4.8	5.0	5.2	4.6	5.0	5.4	V
Line Regulation	$V_{IN} = 8-40\text{V}$		10	20		10	30	mV
Load Regulation	$I_L = 0-20\text{ mA}$		20	50		20	60	mV
Ripple Rejection	$f = 120\text{ Hz}, T_A = 25^{\circ}\text{C}$		66			66		dB
Short-Circuit Output Current	$V_{REF} = 0, T_A = 25^{\circ}\text{C}$		100			100		mA
Temperature Stability	Over Operating Temperature Range	0.3	1		0.3	1		%
Long Term Stability	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$	20			20			mV/yr
Oscillator Section								
Maximum Frequency	$C_T = 0.001\ \mu\text{F}, R_T = 2\ \text{k}\Omega$	350			360			kHz
Initial Accuracy	R_T and C_T constant	5			5			%
Frequency Change with Voltage	$V_{IN} = 8-40\text{V}, T_A = 25^{\circ}\text{C}$					1		%
Frequency Change with Temperature	Over Operating Temperature Range					2		%
Output Amplitude (Pin 3)	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$		3.5			3.5		V
Output Pulse Width (Pin 3)	$C_T = 0.01\ \mu\text{F}, T_A = 25^{\circ}\text{C}$		0.5			0.5		μs
Error Amplifier Section								
Input Offset Voltage	$V_{CM} = 2.5\text{V}$		0.5	5		2	10	mV
Input Bias Current	$V_{CM} = 2.5\text{V}$		2	10		2	10	μA
Open Loop Voltage Gain		72	80		60	80		dB
Common-Mode Input Voltage Range	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$	1.8			1.8			V
Common-Mode Rejection Ratio	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$		70			70		dB
Small Signal Bandwidth	$A_V = 0\ \text{dB}, T_A = 25^{\circ}\text{C}$		3			3		MHz
Output Voltage Swing	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$	0.5		3.8	0.5		3.8	V
Comparator Section								
Maximum Duty Cycle	% Each Output ON	46			46			%
Input Threshold (Pin 9)	Zero Duty Cycle	1			1			V
Input Threshold (Pin 9)	Maximum Duty Cycle	3.5			3.5			V
Input Bias Current		-1			-1			μA
Current Limiting Section								
Sense Voltage	$V(\text{Pin } 2) - V(\text{Pin } 1) \geq 50\ \text{mV},$ $\text{Pin } 9 = 2\text{V}, T_A = 25^{\circ}\text{C}$	190	200	210	180	200	220	mV
Sense Voltage T.C.			0.2			0.2		mV/°C
Common-Mode Voltage		-0.7			-0.7		1	V
Output Section (Each Output)								
Collector-Emitter Voltage		40			40			V
Collector Leakage Current	$V_{CE} = 40\text{V}$		0.1	50		0.1	50	μA
Saturation Voltage	$I_C = 50\ \text{mA}$		1	2		1	2	V
Emitter Output Voltage	$V_{IN} = 20\text{V}, I_E = -250\ \mu\text{A}$	17	18		17	18		V
Rise Time (10% to 90%)	$R_C = 2\ \text{k}\Omega, T_A = 25^{\circ}\text{C}$		0.2			0.2		μs
Fall Time (90% to 10%)	$R_C = 2\ \text{k}\Omega, T_A = 25^{\circ}\text{C}$		0.1			0.1		μs
Total Standby Current	$V_{IN} = 40\text{V}$, Pins 1, 4, 7, 8, 11 and 14 are grounded, Pin 2 = 2V, All Other Inputs and Outputs Open	6	10		5	10		mA

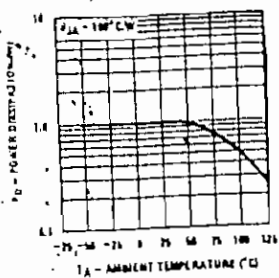
Note 1: For operation at elevated temperatures, devices in the J package must be derated based on a thermal coefficient of 1.0 mW/°C.

LM2524/LM3524

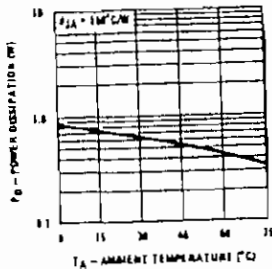
1

Typical Performance Characteristics

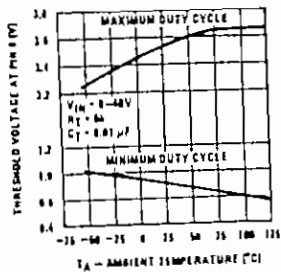
Maximum Average Power Dissipation (J Package)



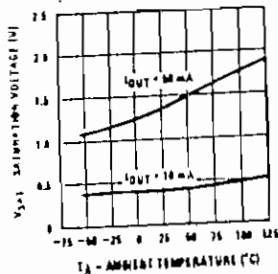
Maximum Average Power Dissipation (N Package)



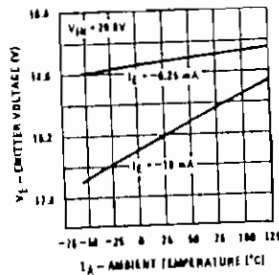
Maximum and Minimum Duty Cycle Threshold Voltage



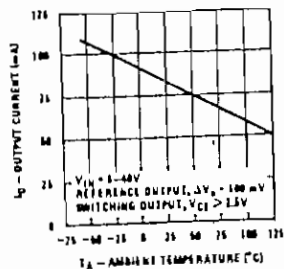
Output Transistor Saturation Voltage



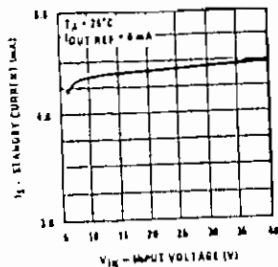
Output Transistor Emitter Voltage



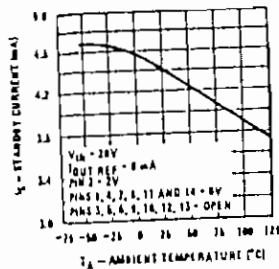
Reference and Switching Transistor Peak Output Current



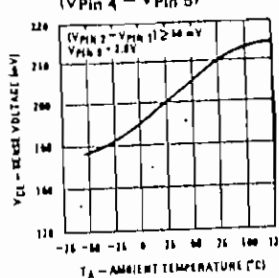
Standby Current



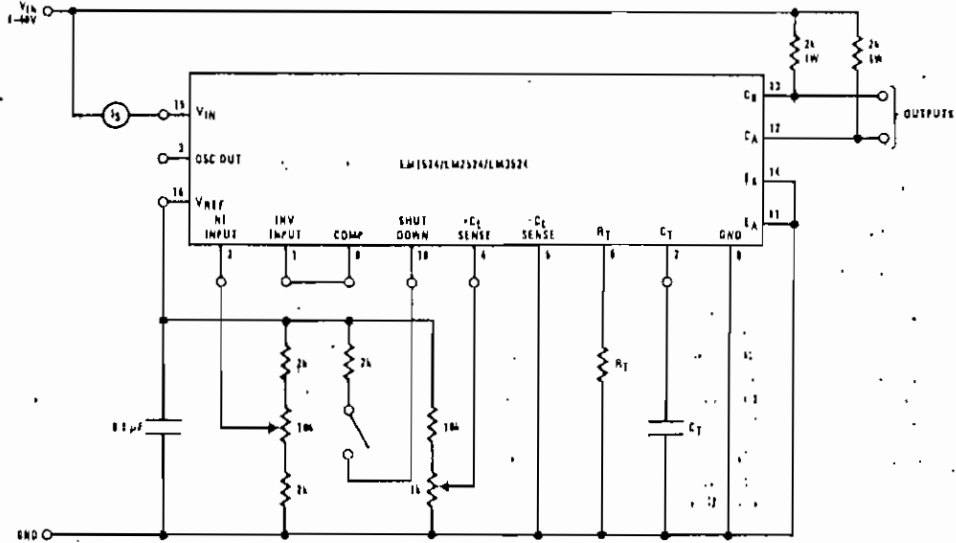
Standby Current



Current Limit Sense Voltage (VPin 4 - VPin 5)



Test Circuit

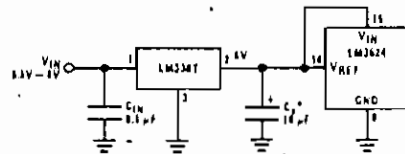


Functional Description

INTERNAL VOLTAGE REGULATOR

The LM3524 has on chip a 5V, 60 mA, short circuit protected voltage regulator. This voltage regulator provides a supply for all internal circuitry of the device and can be used as an external reference.

For input voltages of less than 8V the 5V output should be shorted to pin 16, V_{IN} , which disables the 5V regulator. With these pins shorted the input voltage must be limited to a maximum of 6V. If input voltages of 6-8V are to be used, a pre-regulator, as shown in Figure 1, must be added.



* Minimum C_0 of 10 μF required for stability.

FIGURE 1

OSCILLATOR

The LM3524 provides a stable on-board oscillator. Its frequency is set by an external resistor, R_T and capacitor, C_T . A graph of R_T , C_T vs oscillator frequency is shown in Figure 2. The oscillator's output provides the signals for triggering an internal flip-flop, which directs the PWM information to the outputs, and a blanking pulse to turn off both outputs during transitions to ensure that cross conduction does not occur. The width of the blanking pulse, or dead time, is controlled by the value of C_T , as shown in Figure 3. The recommended

values of R_T are 1.8 k Ω to 100 k Ω , and for C_T , 0.001 μF to 0.1 μF .

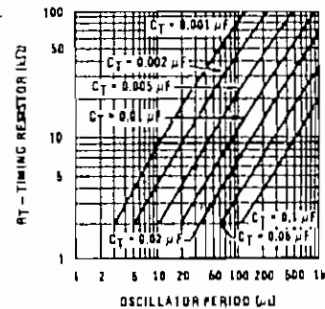


FIGURE 2

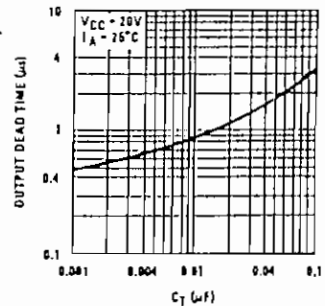


FIGURE 3

Functional Description (Continued)

ERROR AMPLIFIER

The error amplifier is a differential input, transconductance amplifier. Its gain, nominally 80 dB, is set by either feedback or output loading. This output loading can be done with either purely resistive or a combination of resistive and reactive components. A graph of the amplifier's gain vs output load resistance is shown in Figure 4.

The output of the amplifier, or input to the pulse width modulator, can be overridden easily as its output impedance is very high ($Z_o \approx 5 \text{ M}\Omega$). For this reason a DC voltage can be applied to pin 9 which will override the error amplifier and force a particular duty cycle to the outputs. An example of this could be a non-regulating motor speed control where a variable voltage was applied to pin 9 to control motor speed. A graph of the output duty cycle vs the voltage on pin 9 is shown in Figure 5.

The amplifier's inputs have a common-mode input range of 1.6V-3.4V. The on board regulator is useful for biasing the inputs to within this range.

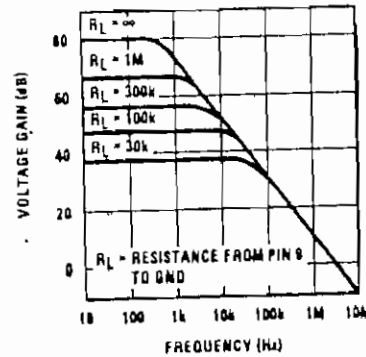


FIGURE 4

CURRENT LIMITING

The function of the current limit amplifier is to override the error amplifier's output and take control of the pulse width. The output duty cycle drops to about 25% when a current limit sense voltage of 200 mV is applied between the +CL and -CL terminals. Increasing the sense voltage approximately 5% results in a 0% output duty cycle. Care should be taken to ensure the -0.7V to +1.0V input common-mode range is not exceeded.

OUTPUT STAGES

The outputs of the LM3524 are NPN transistors, capable of a maximum current of 100 mA. These transistors are driven 180° out of phase and have non-committed open collectors and emitters as shown in Figure 6.

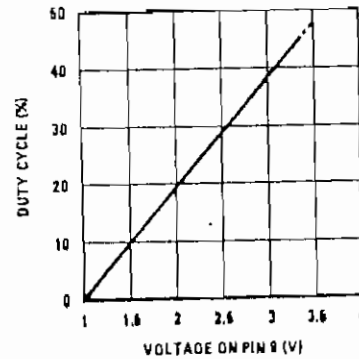


FIGURE 5

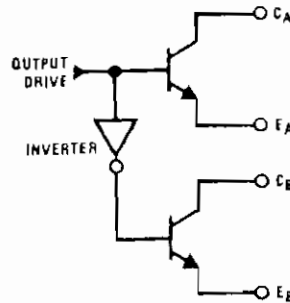
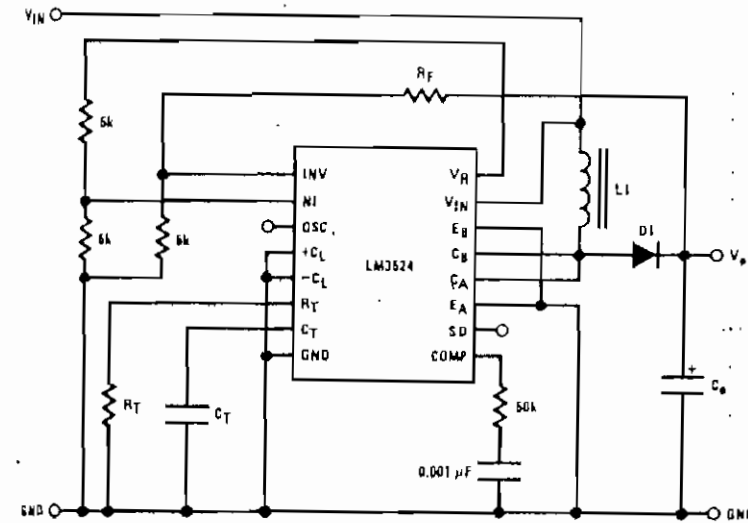


FIGURE 6

Typical Applications



DESIGN EQUATIONS

$$R_F = 5k \left(\frac{V_O - 1}{2.5} \right)$$

$$f_{OSC} \approx \frac{1}{R_T C_T}$$

$$L_1 = \frac{2.5V_{IN}^2 (V_O - V_{IN})}{f_{OSC}^2 \Delta V_O V_O}$$

$$C_O = \frac{I_O (V_O - V_{IN})}{f_{OSC} \Delta V_O V_O}$$

$$I_{O(MAX)} = I_{IN} \frac{V_{IN}}{V_O}$$

FIGURE 7. Positive Regulator, Step-Up Basic Configuration ($I_{IN(MAX)} = 80 \text{ mA}$)

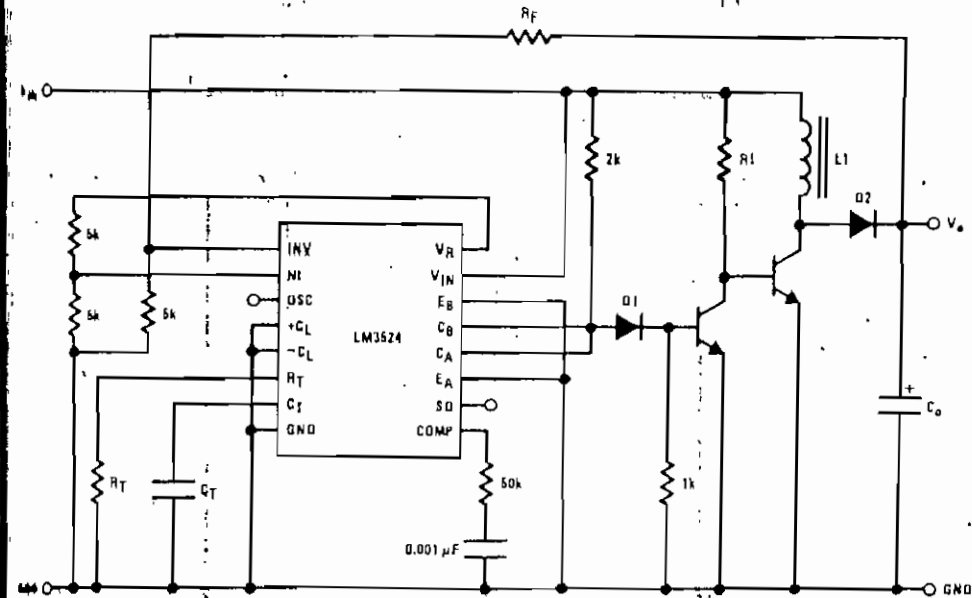


FIGURE 8. Positive Regulator, Step-Up Boosted Current Configuration

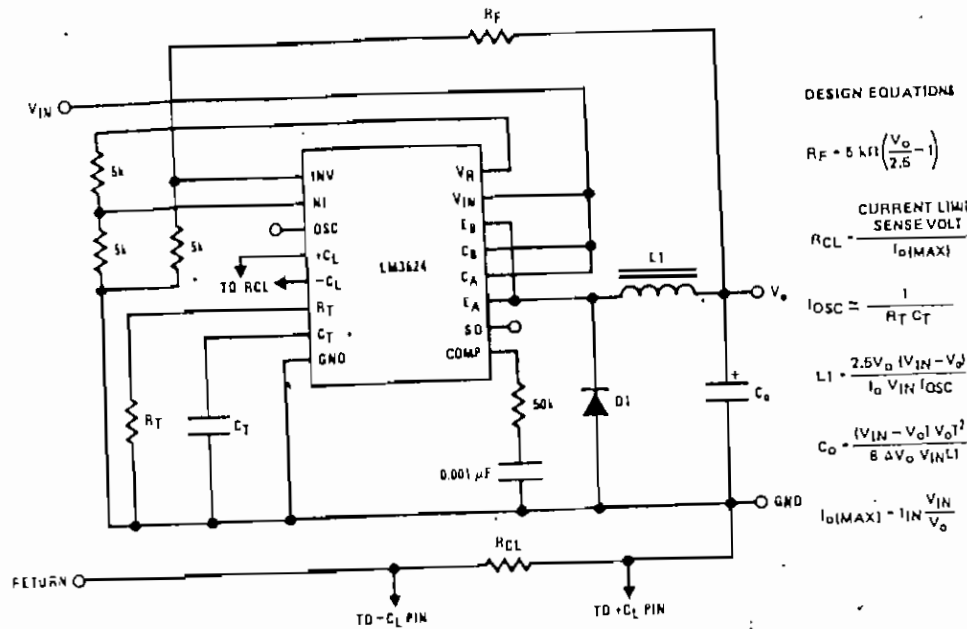


FIGURE 9. Positive Regulator, Step-Down Basic Configuration ($I_{IN(MAX)} = 80 \text{ mA}$)

DESIGN EQUATIONS

$$R_F = 5 \text{ k}\Omega \left(\frac{V_O}{2.5} - 1 \right)$$

CURRENT LIMIT SENSE VOLT

$$R_{CL} = \frac{I_{O(MAX)}}{I_{OSC}}$$

$$I_{OSC} = \frac{1}{R_T C_T}$$

$$L_1 = \frac{2.5 V_O (V_{IN} - V_O)}{I_O V_{IN} I_{OSC}}$$

$$C_O = \frac{(V_{IN} - V_O) V_O I_O^2}{8 \Delta V_O V_{IN} L_1}$$

$$I_{O(MAX)} = I_{IN} \frac{V_{IN}}{V_O}$$

FIGURE 10. Positive Regulator, Step-Down Boosted Current Configuration

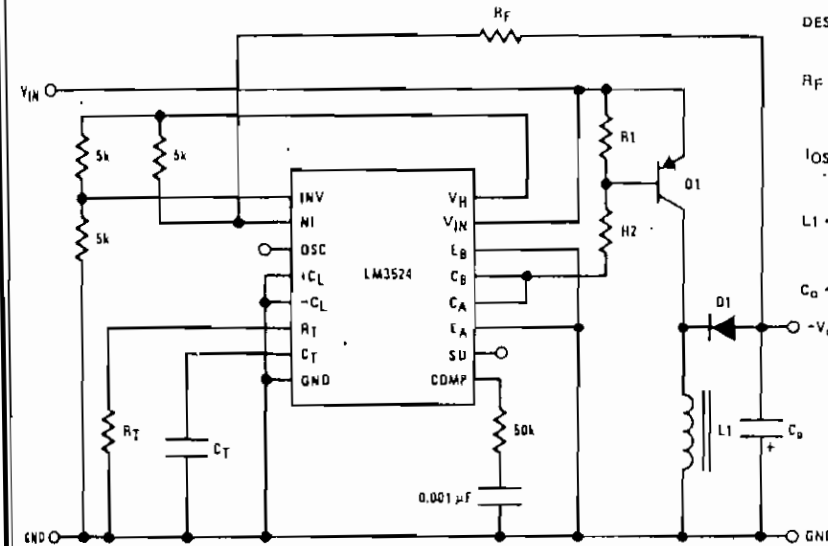
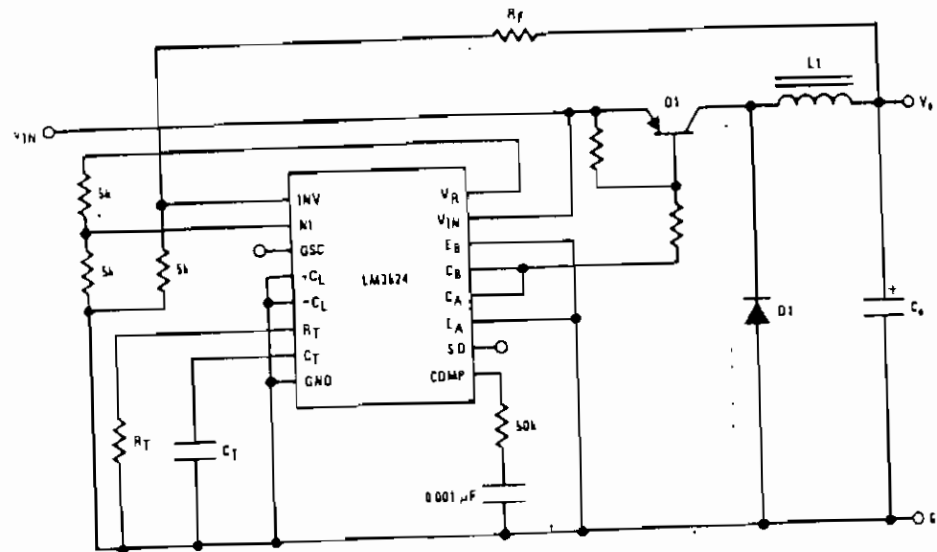


FIGURE 11. Boosted Current Polarity Inverter

DESIGN EQUATIONS

$$R_F = 5 \text{ k}\Omega \left(1 - \frac{V_O}{2.5} \right)$$

$$I_{OSC} = \frac{1}{R_T C_T}$$

$$L_1 = \frac{2.5 V_{IN} V_O}{I_{OSC} (V_O + V_{IN}) I_O}$$

$$C_O = \frac{I_O V_O}{8 \Delta V_O (I_{OSC} (V_O + V_{IN}))}$$

BASIC SWITCHING REGULATOR THEORY AND APPLICATIONS

The basic circuit of a step-down switching regulator circuit is shown in Figure 12, along with a practical circuit design using the LM3524 in Figure 15.

The circuit works as follows: O1 is used as a switch, which has ON and OFF times controlled by the pulse width modulator. When O1 is ON, power is drawn from V_{IN} and supplied to the load through L_1 ; V_A is at approximately V_{IN} . D_1 is reverse biased, and C_O is

charging. When D_1 turns OFF the inductor L_1 will force V_A negative to keep the current flowing in it, D_1 will start conducting and the load current will flow through D_1 and L_1 . The voltage at V_A is smoothed by the L_1 , C_O filter giving a clean DC output. The current flowing through L_1 is equal to the nominal DC load current plus some ΔI_L which is due to the changing voltage across it. A good rule of thumb is to set $\Delta I_{Lpp} \approx 40\% I_O$.

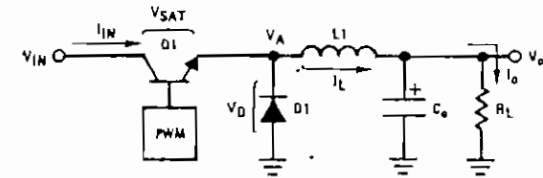


FIGURE 12. Basic Step-Down Switching Regulator

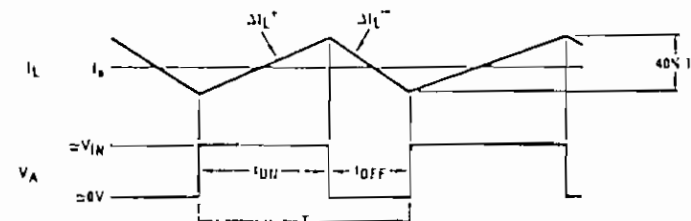


FIGURE 13

Typical Applications (Continued)

$$\text{From the relation } V_L = L \frac{di}{dt}, \Delta I_L = \frac{V_L T}{L}$$

$$\Delta I_L^+ = \frac{(V_{IN} - V_o) t_{ON}}{L}, \Delta I_L^- = \frac{V_o t_{OFF}}{L}$$

Neglecting V_{SAT} , V_D , and setting $\Delta I_L^+ = \Delta I_L^-$:

$$V_o = V_{IN} \left(\frac{t_{ON}}{t_{OFF} + t_{ON}} \right) = V_{IN} \left(\frac{t_{ON}}{T} \right);$$

where $T = \text{Total Period}$

This above shows the relation between V_{IN} , V_o and duty cycle.

$$I_{IN(DC)} = I_{OUT(DC)} \left(\frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \right),$$

as Q1 only conducts during t_{ON} .

$$P_{IN} = I_{IN(DC)} V_{IN} = I_o t_{ON} \left(\frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \right) V_{IN}$$

$$P_o = I_o V_o$$

The efficiency, η , of the circuit is:

$$\eta_{MAX} = \frac{P_o}{P_{IN}} = \frac{I_o V_o}{I_o t_{ON} V_{IN} + (V_{SAT} t_{ON} + V_D t_{OFF}) I_o}$$

$$\approx \frac{V_o}{V_{IN} + 1} \text{ for } V_{SAT} = V_D + 1V.$$

η_{MAX} will be further decreased due to switching losses in Q1. For this reason Q1 should be selected to have the maximum possible f_T , which implies very fast rise and fall times.

CALCULATING INDUCTOR L_1

$$I_o = \frac{(\Delta I_L^+) \cdot L_1}{(V_{IN} - V_o) \cdot t_{OFF}} = \frac{(\Delta I_L^-) \cdot L_1}{V_o}$$

$$\begin{aligned} I_o \cdot t_{OFF} &= T \cdot \frac{(\Delta I_L^+) \cdot L_1}{(V_{IN} - V_o)} + \frac{(\Delta I_L^-) \cdot L_1}{V_o} \\ &= \frac{0.4 I_o L_1}{(V_{IN} - V_o)} + \frac{0.4 I_o L_1}{V_o} \end{aligned}$$

$$\text{Since } \Delta I_L^+ = \Delta I_L^- = 0.4 I_o$$

Solving the above for L_1

$$L_1 = \frac{2.5 V_o (V_{IN} - V_o)}{I_o V_{IN} f}$$

where, L_1 is in Henrys

f is switching frequency in Hz

CALCULATING OUTPUT FILTER CAPACITOR C_o :

Figure 14 shows L_1 's current with respect to Q1's t_{ON} and t_{OFF} times. This current must flow to the load and C_o . C_o 's current will then be the difference between I_L and I_o .

$$I_{C_o} = I_L - I_o$$

From Figure 14 it can be seen that current will be flowing into C_o for the second half of t_{ON} through the first half of t_{OFF} , or a time $t_{ON}/2 + t_{OFF}/2$. The current flowing for this time is $\Delta I_L/4$. The resulting ΔV_c or ΔV_o is described by:

$$\begin{aligned} \Delta V_{op-p} &= \frac{1}{C} \cdot \frac{\Delta I_L}{4} \cdot \left(\frac{t_{ON}}{2} + \frac{t_{OFF}}{2} \right) \\ &= \frac{\Delta I_L (t_{ON} + t_{OFF})}{4C} \end{aligned}$$

$$\text{Since } \Delta I_L = \frac{V_o (T - t_{ON})}{L_1} \text{ and } t_{ON} = \frac{V_o T}{V_{IN}}$$

$$\Delta V_{op-p} = \frac{V_o \left(T - \frac{V_o T}{V_{IN}} \right) \left(\frac{T}{2} \right)}{4C L_1} = \frac{(V_{IN} - V_o) V_o T^2}{8 V_{IN} C_o L_1} \text{ or}$$

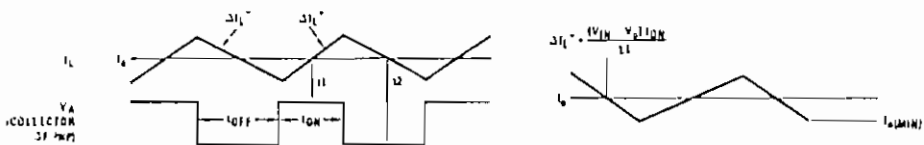
$$C_o = \frac{(V_{IN} - V_o) V_o T^2}{8 \Delta V_o V_{IN} L_1}$$

where: C is in farads, T is $\frac{1}{\text{switching frequency}}$

ΔV_o is p-p output ripple

The inductor's current cannot be allowed to fall to zero, as this would cause the inductor to saturate. For this reason some minimum I_o is required as shown below:

$$I_o(\text{MIN}) = \frac{(V_{IN} - V_o) t_{ON}}{2L_1} = \frac{(V_{IN} - V_o) V_o}{2f V_{IN} L_1}$$



Typical Applications (Continued)

A complete step-down switching regulator schematic, using the LM3524, is illustrated in Figure 15. Transistors Q1 and Q2 have been added to boost the output to 1A. The 5V regulator of the LM3524 has been divided in half to bias the error amplifier's non-inverting input to within its common-mode range. Since each output transistor is on for half the period, actually 45%, they have been paralleled to allow longer possible duty cycles, up to 90%. This makes a lower possible input voltage. The output voltage is set by:

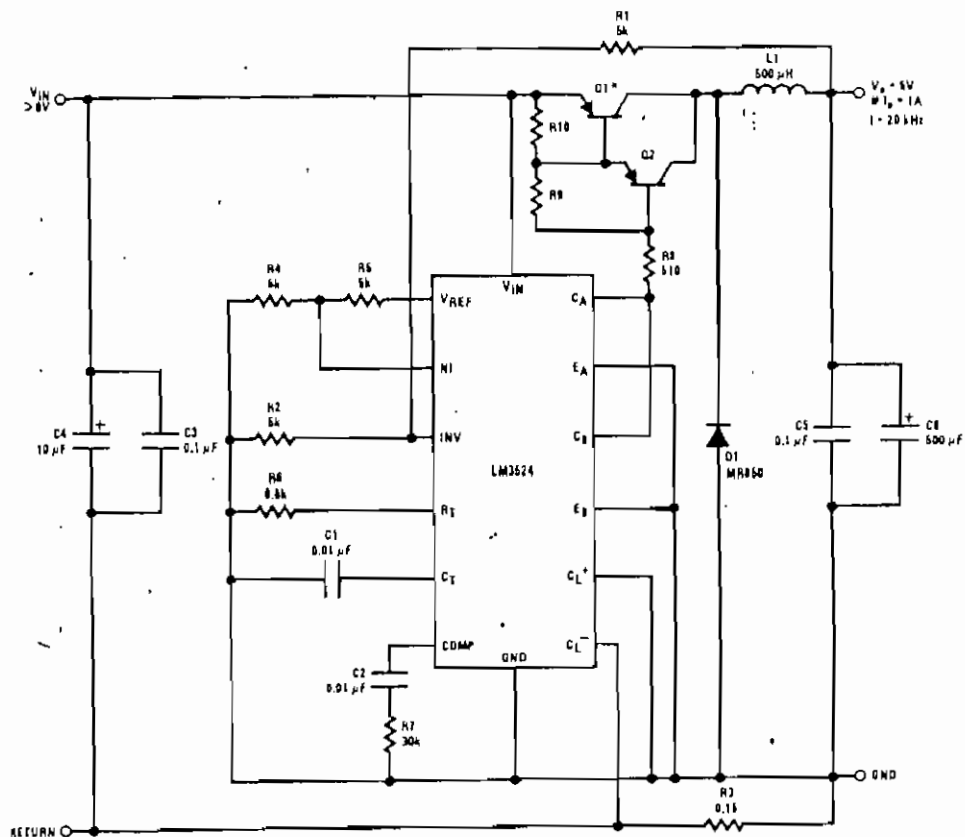
$$V_o = V_{NI} \left(1 + \frac{R1}{R2} \right),$$

where V_{NI} is the voltage at the error amplifier's non-inverting input.

Resistor R3 sets the current limit to:

$$\frac{200 \text{ mV}}{R3} = \frac{200 \text{ mV}}{0.15} = 1.3A.$$

Figure 16 and 17 show a PC board layout and stuffing diagram for the 5V, 1A regulator of Figure 15. The regulator's performance is listed in Table 1.



* Mounted to Slaver Heatsink No. V5-1.

Q1 - BD344

Q2 - 2N5023

L1 - > 40 turns No. 22 wire on Ferroxcube No. K300502 Torroid core.

FIGURE 15. 5V, 1 Amp Step-Down Switching Regulator

LM1524/LM3524

1

TABLE I

PARAMETER	CONDITIONS	TYPICAL CHARACTERISTICS
Output Voltage	$V_{IN} = 10V, I_O = 1A$	5V
Switching Frequency	$V_{IN} = 10V, I_O = 1A$	20 kHz
Short Circuit Current Limit	$V_{IN} = 10V$	1.3A
Load Regulation	$V_{IN} = 10V,$ $I_O = 0.2 - 1A$	3 mV
Line Regulation	$\Delta V_{IN} = 10 - 20V,$ $I_O = 1A$	6 mV
Efficiency	$V_{IN} = 10V, I_O = 1A$	80%
Output Ripple	$V_{IN} = 10V, I_O = 1A$	10 mVp-p

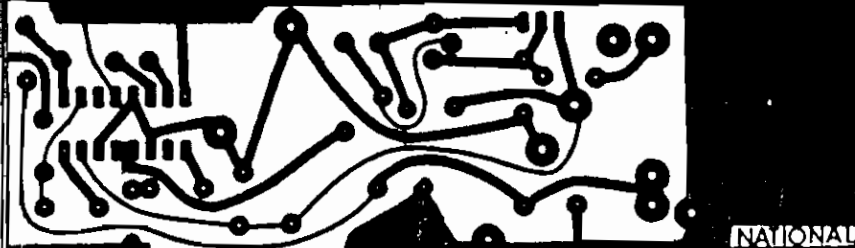


FIGURE 18. 5V, 1 Amp Switching Regulator, Foil Side

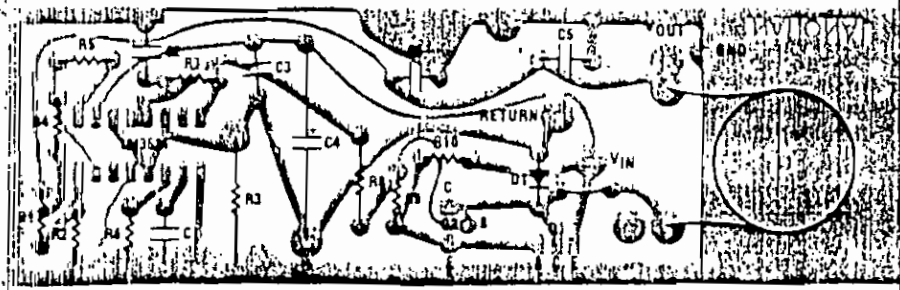


FIGURE 17. Stuffing Diagram, Component Side.

THE STEP-UP SWITCHING REGULATOR

Figure 18 shows the basic circuit for a step-up switching regulator. In this circuit Q1 is used as a switch to alternately apply V_{IN} across inductor L1. During the time, t_{ON} , Q1 is ON and energy is drawn from V_{IN} and stored in L1; Q1 is reverse biased and I_O is supplied from the charge stored in C_O . When Q1 opens, t_{OFF} , voltage V_1 will rise positively to the point where D1 turns

ON. The output current is now supplied through L1, D1 to the load and any charge lost from C_O during t_{ON} is replenished. Here also, as in the step-down regulator, the current through L1 has a DC component plus some ΔI_L . ΔI_L is again selected to be approximately 40% of I_L . Figure 19 shows the inductor's current in relation to Q1's ON and OFF times.

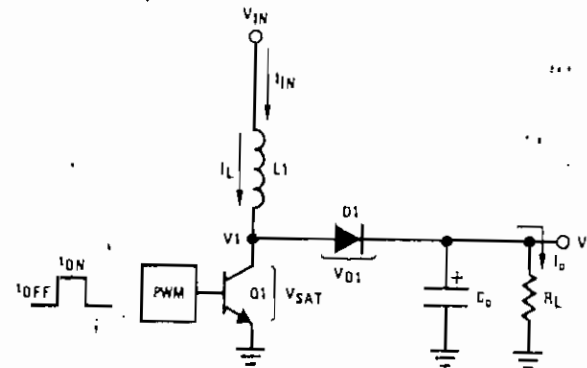


FIGURE 18. Basic Step-Up Switching Regulator

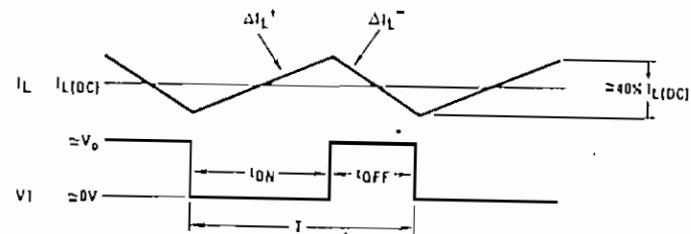


FIGURE 19

Typical Applications (Continued)

$$\text{From } \Delta I_L = \frac{V_L T}{L}, \Delta I_L^+ = \frac{V_{IN} t_{ON}}{L}$$

$$\text{and } \Delta I_L^- = \frac{(V_o - V_{IN}) t_{OFF}}{L}$$

$$\text{Since } \Delta I_L^+ = \Delta I_L^-, V_{IN} t_{ON} = V_o t_{OFF} - V_{IN} t_{OFF}$$

and neglecting V_{SAT} and V_{D1}

$$V_o = V_{IN} \left(1 + \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \right)$$

The above equation shows the relationship between V_{IN} , V_o and duty cycle.

In calculating input current $I_{IN}(DC)$, which equals the inductor's DC current, assume first 100% efficiency:

$$P_{IN} = I_{IN}(DC) V_{IN}$$

$$P_{OUT} = I_o V_o = I_o V_{IN} \left(1 + \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \right)$$

$$\text{for } \eta = 100\%, P_{OUT} = P_{IN}$$

$$I_o V_{IN} \left(1 + \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \right) = I_{IN}(DC) V_{IN}$$

$$I_{IN}(DC) = I_o \left(1 + \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \right)$$

The equation shows that the input, or inductor, current is larger than the output current by the factor $(1 + t_{ON}/t_{OFF})$. Since this factor is the same as the relation between V_o and V_{IN} , $I_{IN}(DC)$ can also be expressed as:

$$I_{IN}(DC) = I_o \left(\frac{V_o}{V_{IN}} \right)$$

So far it is assumed $\eta = 100\%$, where the actual efficiency or η_{MAX} will be somewhat less due to the saturation voltage of $O1$ and forward on voltage of $D1$. The internal power loss due to these voltages is the average I_L current flowing, or I_{IN} , through either V_{SAT} or V_{D1} . For $V_{SAT} = V_{D1} = 1V$ this power loss becomes $I_{IN}(DC) (1V)$. η_{MAX} is then:

$$\eta_{MAX} = \frac{P_o}{P_{IN}} = \frac{V_o I_o}{V_o I_o + I_{IN} (1V)} = \frac{V_o I_o}{V_o I_o + I_o \left(1 + \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \right) (1V)}$$

$$\text{From } V_o = V_{IN} \left(1 + \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \right)$$

$$\eta_{MAX} = \frac{V_{IN}}{V_{IN} + 1}$$

This equation assumes only OC losses, however η_{MAX} is further decreased because of the switching time of $O1$ and $D1$.

In calculating the output capacitor C_o it can be seen that C_o supplies I_o during t_{ON} . The voltage change on C_o during this time will be some $\Delta V_c = \Delta V_o$ or the output ripple of the regulator. Calculation of C_o is:

$$\Delta V_o = \frac{I_o t_{ON}}{C_o} \text{ or } C_o = \frac{I_o t_{ON}}{\Delta V_o}$$

$$\text{From } V_o = V_{IN} \left(\frac{T}{t_{OFF}} \right); t_{OFF} = \frac{V_{IN}}{V_o} T$$

$$\text{where } T = t_{ON} + t_{OFF} = \frac{1}{f}$$

$$t_{ON} = T - \frac{V_{IN}}{V_o} T = T \left(\frac{V_o - V_{IN}}{V_o} \right) \text{ therefore:}$$

$$C_o = \frac{I_o T \left(\frac{V_o - V_{IN}}{V_o} \right)}{\Delta V_o} = \frac{I_o (V_o - V_{IN})}{f \Delta V_o V_o}$$

where: C_o is in farads, f is the switching frequency, ΔV_o is the p-p output ripple

Calculation of inductor $L1$ is as follows:

$$L1 = \frac{V_{IN} t_{ON}}{\Delta I_L}, \text{ since during } t_{ON},$$

V_{IN} is applied across $L1$

$$\Delta I_{Lp-p} = 0.4 I_L = 0.4 I_{IN} = 0.4 I_o \left(\frac{V_o}{V_{IN}} \right), \text{ therefore:}$$

$$L1 = \frac{V_{IN} t_{ON}}{0.4 I_o \left(\frac{V_o}{V_{IN}} \right)} \text{ and since } t_{ON} = \frac{T(V_o - V_{IN})}{V_o}$$

$$L1 = \frac{2.5 V_{IN}^2 (V_o - V_{IN})}{f I_o V_o^2}$$

where: $L1$ is in henrys, f is the switching frequency in Hz

Typical Applications (Continued)

To apply the above theory, a complete step-up switching regulator is shown in Figure 20. Since V_{IN} is 5V, V_{REF} is tied to V_{IN} . The input voltage is divided by 2 to bias the error amplifier's inverting input. The output voltage is:

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) \cdot V_{INV} = 2.5 \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

The network $D1, C1$ forms a slow start circuit.

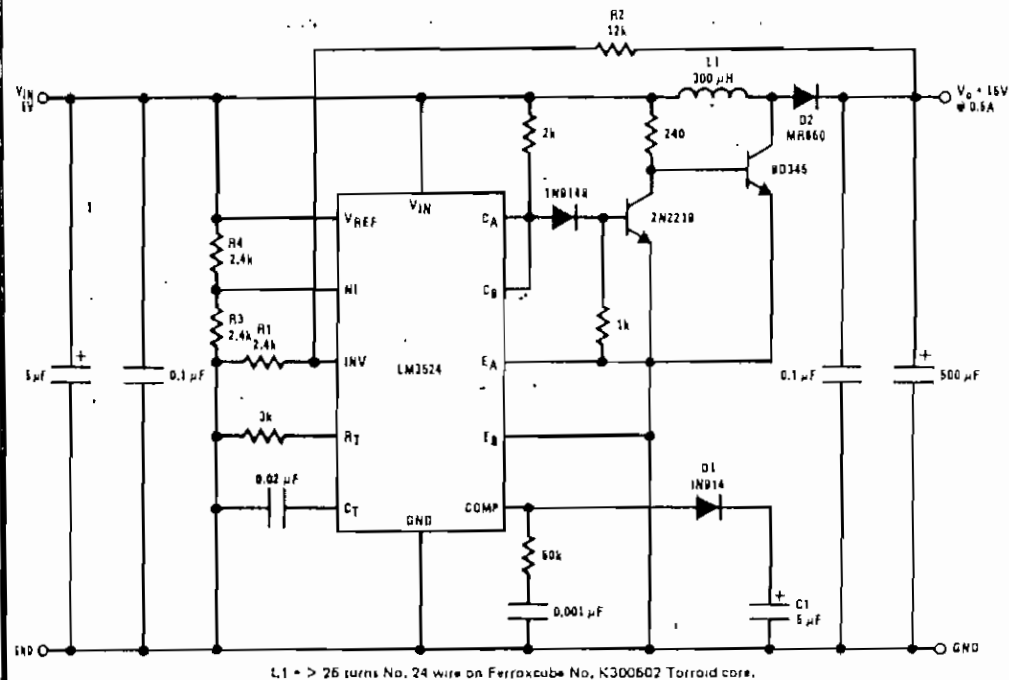
This holds the output of the error amplifier initially low thus reducing the duty-cycle to a minimum. Without the slow start circuit the inductor may saturate at turn-on because it has to supply high peak currents to charge the output capacitor from 0V. It should

also be noted that this circuit has no supply rejection. By adding a reference voltage at the non-inverting input to the error amplifier, see Figure 21, the input voltage variations are rejected.

The LM3524 can also be used in inductorless switching regulators. Figure 22 shows a polarity inverter which if connected to Figure 20 provides a -15V unregulated output.

MOTOR SPEED CONTROL

Figure 23 shows a regulating series DC motor speed control circuit using the LM3524 for the control and drive for the motor and the LM2907 as a speed sensor for the feedback network.



$L1 = > 26$ turns No. 24 wire on Ferracube No. K300602 Torroid core.

FIGURE 20. 15V, 0.5A Step-Up Switching Regulator

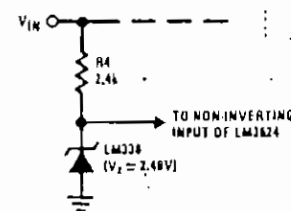


FIGURE 21

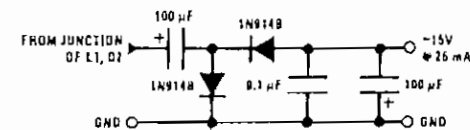


FIGURE 22

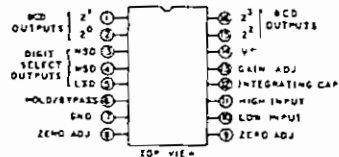
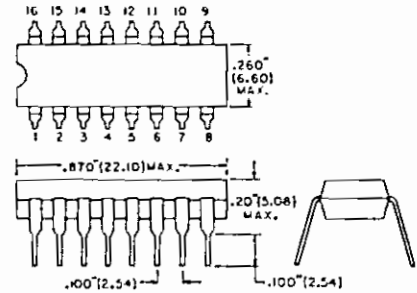
ECG[®] Semiconductors

ECG2054

3 Digit Analog to
Digital Subsystem

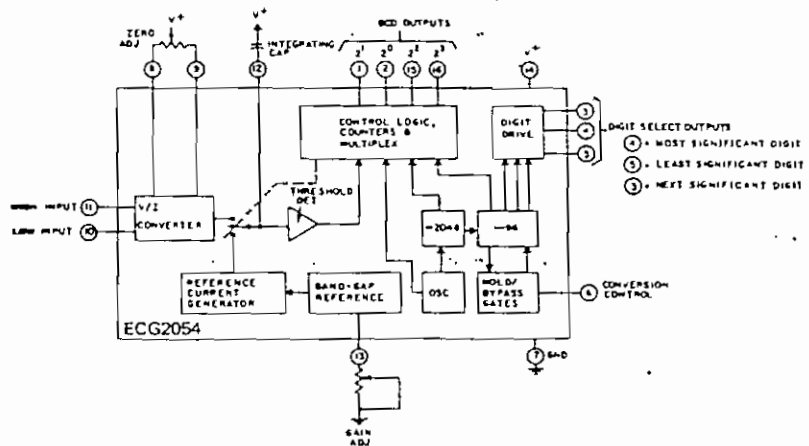
Features

- Dual-slope A/D conversion
- Ultra-stable internal band-gap voltage reference
- Capable of reading 99 mV below ground with single supply
- Differential input
- Internal timing -- no external clock required
- Choice of low-speed (4-Hz) or high-speed (96-Hz) conversion rate
- "Hold" inhibits conversion but maintains display
- Multiplexed operation for high efficiency
- Overrange indication -- "EEE" for reading greater than +999 mV, "--" for reading more negative than -99 mV when used with ECG2032 BCD-to-Seven Segment Decoder/Driver



The ECG2054 is a monolithic integrated circuit that comprises the A/D converter section of a 3-digit digital readout system. It is used with the ECG2032 BCD-to-Seven-Segment Decoder/Driver and a minimum of external parts to implement a complete system.

Figure 1. Functional Block Diagram



Absolute Maximum Ratings

DC Supply Voltage (Between Terminals 7 and 14)	+7 V
Input Voltage (Terminal 10 or 11 to Ground)	±15 V
Device Dissipation:	
Up to $T_A = +55^\circ\text{C}$	750 mW
Above $T_A = +55^\circ\text{C}$	Derate linearly at 7.9 mW/ $^\circ\text{C}$
Operating Temperature Range	0 to +75 $^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	-65 to +150 $^\circ\text{C}$

Electrical Characteristics

($T_A = 25^\circ\text{C}$, $V^+ = 5\text{ V}$, Zero pot centered, gain pot = 2.4 k Ω unless otherwise stated)

Characteristic	Test Conditions	Min	Typ	Max	Units
Operating Supply Voltage Range, V^+		4.5	5	5.6	V
Supply Current, I^+	100 k Ω to V^+ on Terminals 3, 4, 5	--	--	17	mA
Input Impedance, Z_I		--	100	--	m Ω
Input Bias Current, I_{IB}	Terminals 10 and 11	--	-80	--	nA
Unadjusted Zero Offset	$V_{11} - V_{10} = 0\text{ V}$, Read Decoded Output	-12	--	+12	mV
Unadjusted Gain	$V_{11} - V_{10} = 900\text{ mV}$, Read Decoded Output	846	--	954	mV
Linearity	See Notes 1 and 2	-1	--	+1	Count
Conversion Rate:					
Slow Mode	Terminal 6 = Open or Gnd	--	4	--	Hz
Fast Mode	Terminal 6 = 5 V	--	96	--	
Conversion Control Voltage (Hold Mode) at Terminal 6		0.8	1.2	1.6	V
Common-Mode Input Voltage Range, V_{ICR}	See Note 3	-0.2	--	+0.2	V
BCD Sink Current at Terminals 1, 2, 15, 16	$V_{BCD} \leq 0.5\text{ V}$, at Logic Zero State	0.4	1.6	--	mA
Digit Select Sink Current at Terminals 3, 4, 5	$V_{\text{Digit Select}} = 4\text{ V}$ at Logic Zero State	1.6	2.5	--	mA
Zero Temperature Coefficient	$V_I = 0\text{ V}$, Zero Pot Centered	--	10	--	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Gain Temperature Coefficient	$V_I = 900\text{ mV}$, Gain Pot = 2.4 k Ω	--	0.005	--	%/ $^\circ\text{C}$

Note 1: Apply zero volts across V_{11} to V_{10} . Adjust zero potentiometer to give 000 mV reading. Apply 900 mV to input and adjust gain potentiometer to give 900 mV reading.

Note 2: Linearity is measured as a difference from a straight line drawn through zero and positive full scale. Limits do not include ± 0.5 count bit digitizing error.

Note 3: For applications where negative terminal 10 is not operated at terminal 7 potential, a return path of not more than 100 k Ω resistance must be provided for input bias currents.

The functional block diagram of the ECG2054 is shown in Figure 1. The heart of the system is the V/I converter and reference-current generator. The V/I converter converts the input voltage applied between terminals 10 and 11 to a current that charges the integrating capacitor on terminal 12 for a pre-determined time interval. At the end of the charging interval, the V/I converter is disconnected from the integrating capacitor, and a band-gap reference constant-current source of opposite polarity is connected. The number of clock counts that elapse before the charge is restored to its original value is a direct measure of the signal induced current.

The restoration is sensed by the comparator, which in turn latches the counter. The count is then multiplexed to the BCD outputs.

The timing for the circuit is derived from a 786-kHz ring oscillator. The oscillator frequency is divided by 2048 to provide the multiplex rate of 384 Hz. This rate is further divided by 96 to obtain the slow-speed conversion rate of 4 Hz (terminal 6 open or grounded). When the "hold" terminal (terminal 6) is biased to $\pm 1.2\text{ V}$, conversion ceases, but multiplex continues and the reading is held and displayed continuously.

When terminal 6 is biased at +5 V, a portion of the divide-by-96 circuitry is disabled so that the conversion rate increases to 24 times the slow-speed rate ($4 \times 24 = 96\text{ Hz}$). Note that the multiplex rate is unchanged. Figure 3 shows the timing of conversion and digit select pulses for the high-speed mode. Note that the basic A/D conversion process requires approximately 5 ms in both modes.

range of the system has been exceeded in the positive or negative direction, respectively. Negative voltages -99 mV are displayed with the minus sign in the MSD. The BCD code is 1010 for a negative overrange (...) and 1011 for a positive overrange (EEE).

Applications

Figure 2 is the block diagram of a basic system using the ECG2054 and the ECG2032. An actual-size PC board layout for this circuit is shown in Figure 4. The BCD outputs of the ECG2054 drive the BCD inputs of the ECG2032 BCD-to-7-segment decoder directly. The seven-segment outputs are multiplexed to the three LED displays. The digits are selected by terminals 3, 4, and 5 (ECG2054), which provide base current to the external p-n-p transistors. The p-n-p's, in turn, provide current to the anodes of the display. Adjustment procedures for the gain and zero potentiometers are given in Note 1 of the Electrical Characteristics chart.

Figure 3. High Speed Mode Timing Diagram

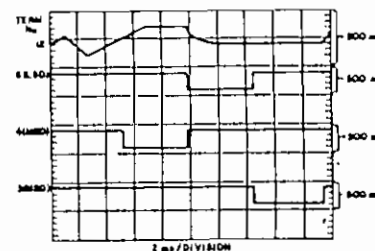
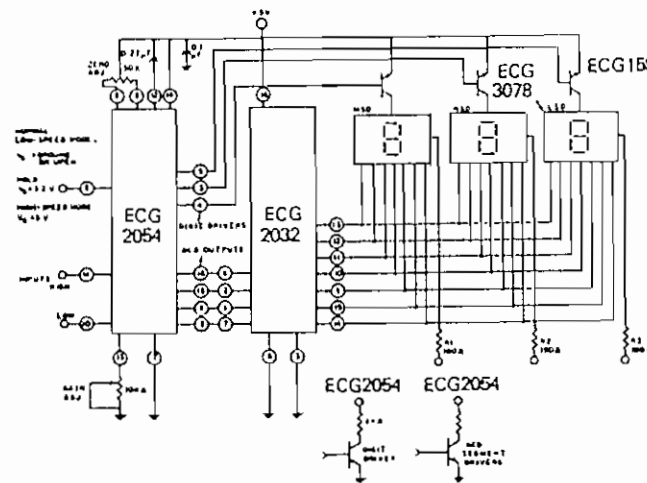


Figure 2. Basic Digital Readout System Using the ECG2054 and the ECG2032

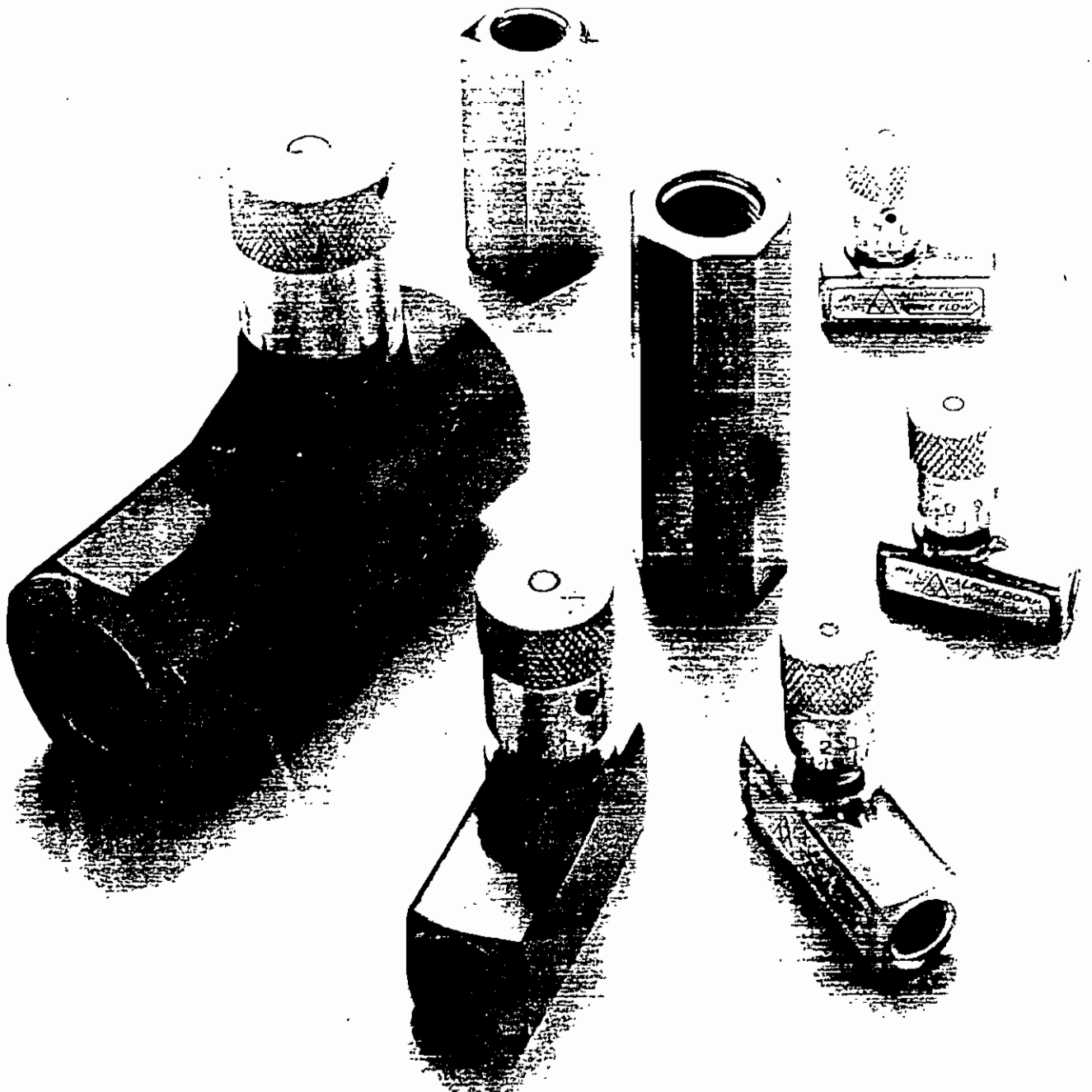




ALCON SERIES J

Flow Control, Needle and Check Valves

**Sensitive Metering, Higher Flow,
Calibrated Knob, 250 psi Air, 3000 psi Heavy
Duty (Oil), 5000 psi Non-Shock (Oil).**



ALKON J VALVE - The Designer's Choice

Engineering *two-taper needle* and *In-line flow path* designs, Alkon's Series J flow control, needle and check valves offer a substantially higher flow on both hydraulic and pneumatic installations than any other 2,000 - 3,000 PSI valve, while providing the most sensitive flow metering from full-closed to full-open available.

Flow control and needle valve designs employ a four stage needle action with a 3° taper for finer metering requirements, a 15° taper for higher flow and a true full-open for maximum flow.

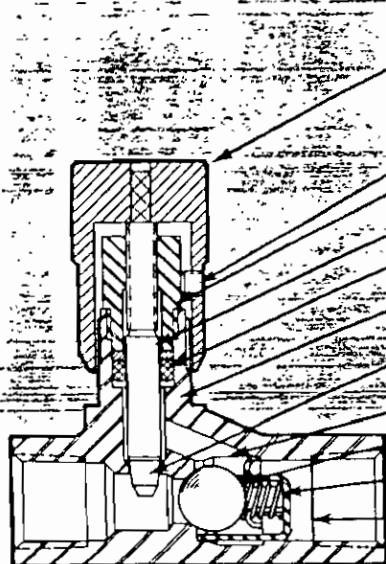
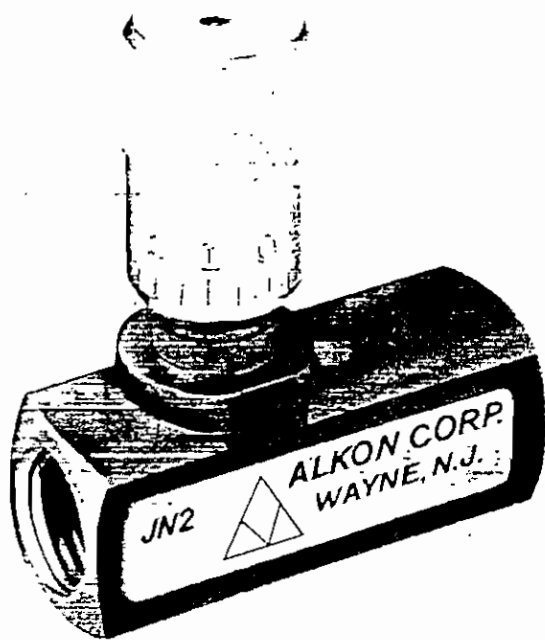
Other features for designed-in quality:

- POSITIVE NO-LEAK STEM SEAL
- PRECISION CALIBRATED DIAL TO DETERMINE AND ALLOW A RETURN TO REQUIRED FLOW SETTINGS
- SAFE POSITIVE STOP FOR NEEDLE TRAVEL
- ONE PIECE FORGED HOUSING
- 2 PSI CHECK CRACKING PRESSURE

Optional features include:

- NICKEL PLATING FOR SERVICE WITH CORROSIVE MEDIA
- FRICTION O-RING FOR MICRO-METER ADJUSTMENT
- VITON SEALS
- BRITISH STANDARD PARALLEL PIPE THREADS
- REMOVABLE KNOB

All this is available and at a price no higher than ordinary flow controls.



Design Features

Aluminum control knob permits adjustment of flow with valve under pressure. The calibrated knob acting with the calibrated dial plate permits return to a previous setting.

Locking set screw to prevent accidental movement of control knob.

Needle retainer of cold drawn brass acts as a positive stop for the needle travel.

Needle is heat treated, ground and polished 416 stainless steel.

The Buna-N seal is standard (Viton seal available) and is backed up by one-piece Teflon ring to prevent extrusion.

The body is a one-piece, high tensile strength brass forging. Nickel plating is available for high corrosion resistance.

Four stage needle provides the most sensitive flow metering from full close to full open with a 3° taper for finer metering requirements and a 15° taper for higher flow rates.

The needle valve has large unobstructed orifices.

Ball of 440 stainless steel acts against a lapped seat to provide best sealing.

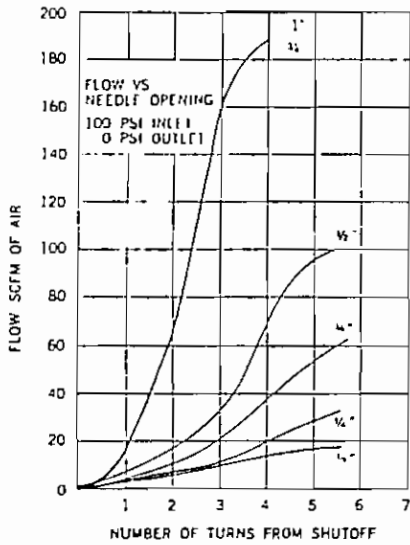
The cage of 304 stainless steel acts as a spring support and as a ball guide and ball stop. The spring is 302 stainless steel wire.

The check valve is in-line and has an orifice larger than the nominal pipe size. It operates at a low pressure differential with no chatter and slow friction loss.

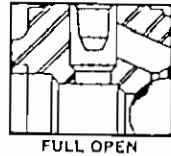
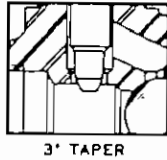
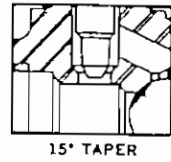
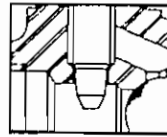
Patents 3,421,547 and 3,441,249

*Note: 1/2" and 1" bodies are constructed from steel forgings.

Needle Sensitivity Chart



4 Stage Needle



FLOW CONTROL VALVE

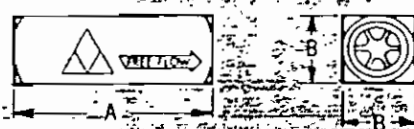
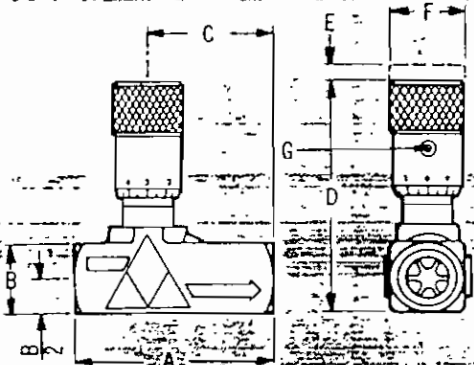
ALCON MODEL NO.		VALVE DIMENSIONS, INCHES										C _v FACTOR*		
BRASS BODY	NICKEL PLATED	PIPE SIZE NPTF	A	B	C	D	E	F	G HEX SIZE	CHECK VALVE ORIFICE	NEEDLE VALVE ORIFICE	CHECK VALVE	NEEDLE FULL OPEN	APPROX. WEIGHT
JF1	JF1N	1/8	1.468	.562	.913	1.803	.250	.687	1/2"	.206	.125	.60	.30	.19
JF2	JF2N	1/4	1.937	.687	1.232	2.000	.250	.687	3/8"	.281	.167	1.30	.60	.28
JF3	JF3N	3/8	2.312	.875	1.545	2.531	.300	.937	1/2"	.421	.250	2.85	1.08	.54
JF4	JF4N	1/2	3.250	1.250	2.117	3.218	.375	1.250	3/4"	.515	.375	4.96	1.75	1.75
--	JF6N	3/4	4.000	1.750	2.625	3.906	.375	1.250	1/2"	.718	.500	9.00	3.20	2.32
--	JF8N	1	4.000	1.750	2.625	3.906	.375	1.250	3/4"	.718	.500	9.20	3.20	2.20

NEEDLE VALVE

ALCON MODEL NO.		VALVE DIMENSIONS, INCHES										C _v FACTOR*	
BRASS BODY	NICKEL PLATED	PIPE SIZE NPTF	A	B	C	D	E	F	G HEX SIZE	ORIFICE	NEEDLE FULL OPEN		
JN1	JN1N	1/8	1.468	.562	.913	1.803	.250	.687	1/2"	.125	.30		
JN2	JN2N	1/4	1.937	.687	1.232	2.000	.250	.687	3/8"	.167	.60		
JN3	JN3N	3/8	2.312	.875	1.545	2.531	.300	.937	1/2"	.250	(1.08)		
JN4	JN4N	1/2	3.250	1.187	2.117	3.218	.375	1.250	3/4"	.375	1.75		
--	JN6N	3/4	4.000	1.750	2.625	3.906	.375	1.250	1/2"	.500	3.20		
--	JN8N	1	4.000	1.750	2.625	3.906	.375	1.250	3/4"	.500	3.20		

CHECK VALVE

ALCON MODEL NO.		VALVE DIMENSIONS, INCHES				C _v FACTOR	
BRASS BODY	NICKEL PLATED	PIPE SIZE NPTF	A	B	ORIFICE		
JC1	JC1N	1/8	1.468	.562	.206	.64	
JC2	JC2N	1/4	1.937	.687	.281	1.35	
JC3	JC3N	3/8	2.312	.875	.421	3.22	
JC4	JC4N	1/2	3.250	1.187	.515	4.96	
--	JC6N	3/4	4.000	1.750	.718	9.00	
--	JC8N	1	4.000	1.750	.718	9.20	



specifications subject to change without notice

```

/*-----*/
/*  APLICACION DE CONTROL DE NIVEL                                */
/*  TESIS: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA           */
/*          CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS                        */
/*  Autor: DIEGO BENÍTEZ M.                                     */
/*-----*/

```

```
// DECLARACION DE OBJETOS A SER UTILIZADOS EN EL PROGRAMA
```

```

#define Uses_TKeys
#define Uses_TApplication
#define Uses_TEvent
#define Uses_TRect
#define Uses_TDialog
#define Uses_TButton
#define Uses_TMenuBar
#define Uses_TSubMenu
#define Uses_TMenuItem
#define Uses_TStatusLine
#define Uses_TStatusItem
#define Uses_TStatusDef
#define Uses_TDeskTop
#define Uses_MsgBox
#define Uses_TChDirDialog
#define Uses_THistory
#define Uses_TWindow
#define Uses_TInputLine
#define Uses_TLabel

```

```
// ARCHIVOS .H A SER LLAMADOS
```

```

#include <tv.h>
#include <math.h>
#include <stdarg.h>
#include "control.h"
#include <stdlib.h>
#include <graphics.h>
#include <string.h>
#include <strstrea.h>
#include <dos.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>

```

```
// VARIABLES EXTERNAS Y GLOBALES
```

```

extern char aArchivo[9],aAmplitud[6],aAltura[6],tiempo[20],
dIvisionest[6],dIvisionesv[6],eNtrada[6],sAlida[6],pEriodo[6];
extern float Amplitud,Altura,tiempo,divisionest,divisionesv,
entrada,salida,periodo,ymax,unidadx,unidady;
char KI[10],KD[10],KP[10],Ref[10],Coefa[6][10],Coefb[6][10],
L[10],B[10],A[10],Umax[10],Umin[10];
float ki,kd,kp,ref,cœefa[6],coefb[6],l,bb,aa,umax,umin;
int veces;
int Tipo=cmDoTipotan;

```

```
// DECLARACION DE LAS PRINCIPALES FUNCIONES A UTILIZARSE
```

```

void dibujaborde(int right, int left,int bottom,int top );
void dibujaeje(int alto,int ancho,int right,int left,int bottom,
int top,float divisionest,float divisionesv,float Amplitud,

```



```

int veces, float tiempo,int h);
void graficos(float divisionesv,float divisionest,float tiempo,
float Amplitud,char *titulo, int veces,int var);
void graficoRes(float divisionesv,float divisionest,float tiempo,
float Altura,char *titulo, int veces,int var);
void grafico_tanque(float divisionesv,float divisionest,
float tiempo,float Amplitud,char *titulo, int veces, int var);
void dibuja_tanque(int right,int left,int bottom,int top);
void tanque();
void vacia(int datoin,int datoinl,int maxX,int maxY);

float conseguir_tiempo(void);
int gprintf( int *xloc, int *yloc, char *fmt, ... );
void guardar(void);
void recuperar(void);

```

```
// INICIALIZACION DE STATUSLINE, MENUBAR, DESKTOP
```

```

TBGIApp::TBGIApp() :
  TProgInit( &TBGIApp::initStatusLine,
             &TBGIApp::initMenuBar,
             &TBGIApp::initDeskTop )
{
  TEvent event;
  event.what = evCommand;
  event.message.command = cmAboutBox;
  putEvent( event );
  fexpand(pathToDrivers);
  bgiPath = new char[sizeof(pathToDrivers)];
  strcpy(bgiPath, pathToDrivers);
  appDriver = DETECT;
  appMode = 0;
  if (graphAppInit(appDriver, appMode, bgiPath, True) == False)
    messageBox("No puede cargar el Adapataador Gr fico.",
              mfError | mfOKButton);
}

```

```
// MANEJO DE LAS APLICACIONES
```

```

TBGIApp::~TBGIApp()
{
  graphAppDone();
  delete bgiPath;
}

```

```
// PID DE TIEMPO INDEFINIDO
```

```

void TBGIApp::PIDI(int p, int t)
/* t=1 Simulaci"n de Tanque */
{
  register int datoin,datoInl,x,k,regreso,w;
  register float lapso,tiempo_inicial,tiempo_final,
u,u1,u2[2],u3,e[2];
  struct viewportttype vp;
  TEvent event;
  int maxX,maxY;
  veces=0;
  char errorMsg[MAXSIZE];
  regreso=0;
  u=u1=u3=u2[0]=u2[1]=0;

```

```

e[0]=e[1]=0;
TDialog* d=new TDialog(TRect(7,3,75,16),"Ingrese Kp,Kd,Ki");
TInputLine* a=new TInputLine(TRect(17,4,25,5),10);
d->insert(new THistory(TRect(24,4,27,5),a,hlpIDD));
char buffer1[20],buffer2[20],buffer3[20],buffer4[20],
aboutMsg[83];
strcpy(buffer1,KP);
a->setData(buffer1);
d->insert(a);
d->insert(new TLabel(TRect( 24, 2, 42, 3 ),
"~PID=Kp+Ki/s+Kd*s~",a));
d->insert(new TLabel(TRect( 12, 4, 17, 5 ), "PID=",a));
d->insert(new TLabel(TRect( 26, 4, 28, 5 ), "+",a));
TInputLine* b=new TInputLine(TRect(28,4,37,5),10);
d->insert(new THistory(TRect(36,4,39,5),b,hlpIDD));
strcpy(buffer2,KI);
b->setData(buffer2);
d->insert(b);
d->insert(new TLabel(TRect( 38, 4, 42, 5 ), "/s+",b));
TInputLine* c=new TInputLine(TRect(42,4,50,5),10);
d->insert(new THistory(TRect(49,4,52,5),c,hlpIDD));
strcpy(buffer3,KD);
c->setData(buffer3);
d->insert(c);
d->insert(new TLabel(TRect( 51, 4, 54, 5 ), "*s",c));
TInputLine* r=new TInputLine(TRect(41,6,49,7),10);
d->insert(new THistory(TRect(48,6,51,7),r,hlpIDD));
strcpy(buffer4,Ref);
r->setData(buffer4);
d->insert(r);
if(t==0)
{
d->insert(new TLabel(TRect( 20,6, 41, 7 ),
"Valor Referencial=",r));
}
else
{
d->insert(new TLabel(TRect( 12,6, 39, 7 ),
"Altura de Referencia (cm)=",r));
}
d->insert(new TButton(TRect(25,8,35,10),"Cancel",
cmCancel,bfNormal));
d->insert(new TButton(TRect(37,8,47,10),"OK",
cmOK,bfNormal));
d = (TDialog *) validView(d);
if (d != NULL)
{
if (deskTop->execView(d) == cmOK)
{
r->getData(buffer4);
c->getData(buffer3);
b->getData(buffer2);
a->getData(buffer1);
for(x=0;buffer4[x];++x)
{
if(isdigit(buffer4[x]) || buffer4[x] == '.'){}
else
{
strcpy(aboutMsg,
"\x3 Ingresado dato alfanumrico \n\n\x3
Intentelo Nuevamente \n\n\x3 Mantenido Ultimo valor");
messageBox(aboutMsg, mfError | mfOKButton);
strcpy(buffer4,Ref);
regreso=1;
}
}
}
}

```

```

}
for(x=0;buffer2[x];++x)
{
  if(isdigit(buffer2[x]) || buffer2[x] == '.' ||
  buffer2[x]=='-'){
  else
  {
    strcpy(aboutMsg,
    "\x3 Ingresado dato alfanumrico \n\n\x3
    Intentelo Nuevamente \n\n\x3 Mantenido Ultimo valor");
    messageBox(aboutMsg, mfError | mfOKButton);
    strcpy(buffer2,KI);
    regreso=1;
  }
}
for(x=0;buffer1[x];++x)
{
  if(isdigit(buffer1[x]) || buffer1[x] == '.' ||
  buffer1[x]=='-'){
  else
  {
    strcpy(aboutMsg,
    "\x3 Ingresado dato alfanumrico \n\n\x3
    Intentelo Nuevamente \n\n\x3 Mantenido Ultimo valor");
    messageBox(aboutMsg, mfError | mfOKButton);
    strcpy(buffer1,KP);
    regreso=1;
  }
}
for(x=0;buffer3[x];++x)
{
  if(isdigit(buffer3[x]) || buffer3[x] == '.' ||
  buffer3[x]=='-'){
  else
  {
    strcpy(aboutMsg,
    "\x3 Ingresado dato alfanumrico \n\n\x3
    Intentelo Nuevamente \n\n\x3 Mantenido Ultimo valor");
    messageBox(aboutMsg, mfError | mfOKButton);
    strcpy(buffer3,KD);
    regreso=1;
  }
}
strcpy(KI,buffer2);
strcpy(KP,buffer1);
strcpy(KD,buffer3);
strcpy(Ref,buffer4);
ki=atof(KI);
kp=atof(KP);
kd=atof(KD);
ref=atof(Ref);
if(t==1)
{
  ref=ref*10.0/40.0;
}
ref=ref*255.0/10.0;
regreso=0+regreso;
}
else regreso=1;
destroy( d );
}
if(ref>255 || ref <0)
{
  strcpy(aboutMsg,
  "\x3 El valor de referencia solo puede estar

```

```

entre 0 y 10 V \n\n\x3 Intentelo Nuevamente");
messageBox(aboutMsg, mfError | mfOKButton);
regreso=1;
}

switch(regreso)
{
case 0:
suspend();
if (graphicsStart() == False)
{
strcpy(errorMsg, grapherrormsg(graphresult()));
strcat( errorMsg, "." );
messageBox(errorMsg, mfError | mfOKButton);
}
else
{
maxX=getmaxx();
maxY=getmaxy();
switch(p)
{
case 1:
k=-1;
tiempo_inicial=conseguir_tiempo();
for(x=0;x<=10;++x)
{
k=k+1;
datoin=inportb(entrada);
e[0]=ref-datoin;
putpixel(float(k)*periodo/1000.0*unidadx,
ymax-datoin*unidady,0);
u1=kp*e[0];
u2[0]=ki*periodo/2000.0*e[0]+ki*periodo/2000.0*e[1]+u2[1];
if( k==0 || k==1)
{
u3=0;
}
else
{
u3=kd/periodo*1000.0*e[0]-kd/periodo*1000.0*e[1];
}
u=u1+u2[0]+u3;
if(u>=255)
{
outp(salida,0);
}
if(u<=0)
{
outp(salida,0);
}
if(0<u && u<255)
{
outp(salida,0);
putpixel(float(k)*periodo/1000.0*unidadx,ymax-u*unidady,0);
}
gotoxy(2,2);
printf("Se$al de salida: %2.4f Se$al de error: %2.4f
Se$al de control: %2.4f",
datoin*10.0/255.0,e[0]*10.0/255.0,u*10.0/255.0); e[1]=e[0];
e[1]=e[0];
u2[1]=u2[0];
}
tiempo_final=conseguir_tiempo();
lapso=(tiempo_final-tiempo_inicial)*100.0;
u=u1=u3=u2[0]=u2[1]=0;
}
}

```

```

e[0]=e[1]=0;
do
{
    veces++;
    cleardevice();
    datoin=inportb(entrada);
    datoinl=datoin;
    if(t==1)
    {
        if (Tipo==cmDoTipores)
        {
            getviewsettings(&vp);
            graficoRes(divisionesv,divisionest,tiempo,Altura,
"CONTROL DE NIVEL",veces,1);
            /* Copiar de la funci"n graficos cambiando eje y */
        }
        else
        {
            grafico_tanque(divisionesv,divisionest,tiempo,
Altura,"CONTROL DE NIVEL PID ",veces,1);
            getviewsettings(&vp);
            for(w=1;w<=datoin;w++)
            {
                setcolor(BLUE);
                line((vp.right-vp.left)/2+19,vp.bottom-vp.top-w,
vp.right-vp.left-5,vp.bottom-vp.top-w);
            }
        }
    }
    else
    {
        graficos(divisionesv,divisionest,tiempo,Amplitud,
"PID INDEFINIDO",veces,1);
    }
}
/* LLENADO Y VACIADO DE TANQUE */

k=-1;
tiempo_inicial=conseguir_tiempo();
do
{
    k=k+1;
    datoin=inportb(entrada);
    e[0]=ref-datoin;

    if ((Tipo==cmDoTipocom) || (Tipo==cmDoTipores) ||
(t==0))
        putpixel(float(k)*periodo/1000.0*unidadx,
ymax-datoin*unidady,WHITE);

    if (Tipo==cmDoTipocom)
    {
        if(datoin>datoinl)
        {
            for(w=datoinl;w<=datoin;w++)
            {
                setcolor(BLUE);
                line((vp.right-vp.left)/2+19,vp.bottom-vp.top-w-1,
vp.right-vp.left-5,vp.bottom-vp.top-w-1);
            }
        }
        else
        {

```

```

        for(w=datoinl;w>datoin;w--)
        {
            setcolor(0);
            line((vp.right-vp.left)/2+19,vp.bottom-vp.top-w-1,
            vp.right-vp.left-5,vp.bottom-vp.top-w-1);
            setcolor(15);
        }
    }
    datoinl=datoin;
}

    u1=kp*e[0];
    u2[0]=ki*periodo/2000.0*e[0]+ki*periodo/2000.0*e[1]+u2[1];
if(k==0 || k==1)
{
    u3=0;
}
else
{
    u3=kd/periodo*1000.0*e[0]-kd/periodo*1000.0*e[1];
}
    u=u1+u2[0]+u3;
    if(u>=255)
    {
        outp(salida,255);
    }
    if(u<=0)
    {
        outp(salida,0);
    }
if(0<u && u<255)
{
    outp(salida,u);
    putpixel(float(k)*periodo/1000.0*unidadx,
    ymax-u*unidady,YELLOW);
}
    gotoxy(2,2);
if(t==1)
{
    printf("Se$al de salida: %2.4f  Se$al de error: %2.4f
    Se$al de control: %2.4f",
    datoin*10.0/255.0*4.0,e[0]*10.0/255.0*4.0,
    u*10.0/255.0*4.0);
}
else
{
    printf("Se$al de salida: %2.4f  Se$al de error: %2.4f
    Se$al de control: %2.4f",
    datoin*10.0/255.0,e[0]*10.0/255.0,u*10.0/255.0);
}
e[1]=e[0];
    e[1]=e[0];
    u2[1]=u2[0];
    delay(periodo - lapso);
}while((conseguir_tiempo()-tiempo_inicial)<tiempo+4 &
& !kbhit());
    event.getKeyEvent();
}while( event.what == evNothing);
do
{
    event.getKeyEvent();
}while( event.what == evNothing);
graphicsStop();
break;
case 2:

```

```

FILE *archidat;
if((archidat=fopen(aRchivo,"w"))==NULL)
{
    printf("No es posible abrir el archivo");
    exit(1);
}
k=-1;
tiempo_inicial=conseguir_tiempo();
for(x=0;x<=10;x++)
{
    k=k+1;
    datoin=inportb(entrada);
    e[0]=ref-datoin;
    putpixel(float(k)*periodo/1000.0*unidadx,
    ymax-datoin*unidady,0);
    u1=kp*e[0];
    u2[0]=ki*periodo/2000.0*e[0]+ki*periodo/2000.0*e[1]+u2[1];
    if(k==0 || k==1)
    {
        u3=0;
    }
    else
    {
        u3=kd/periodo*1000.0*e[0]-kd/periodo*1000.0*e[1];
    }
    u=u1+u2[0]+u3;
    if(u>=255)
    {
        outp(salida,0);
    }
    if(u<=0)
    {
        outp(salida,0);
    }
    if(0<u && u<255)
    {
        putpixel(float(k)*periodo/1000.0*unidadx,ymax-u*unidady,0);
        outp(salida,0);
    }
    fprintf(archidat," %f          %f          %f\n",
    k*periodo/1000.0,datoin*10.0/255.0,e[0]*10.0/255.0);
    gotoxy(2,2);
    printf("Se$al de salida: %2.4f  Se$al de error: %2.4f
    Se$al de control: %2.4f",
    datoin*10.0/255.0,e[0]*10.0/255.0,u*10.0/255.0);
    e[1]=e[0];
    u2[1]=u2[0];
}
tiempo_final=conseguir_tiempo();
lapso=(tiempo_final-tiempo_inicial)*100.0;
fclose(archidat);
if((archidat=fopen(aRchivo,"w"))==NULL)
{
    printf("No es posible abrir el archivo");
    exit(1);
}
if (t==1)
{
    fprintf(archidat,"
    ARCHIVO DE CONTROL DE NIVEL PID DE TIEMPO INDEFINIDO\n");
    fprintf(archidat," TIEMPO          SALIDA DE LA PLANTA
    CONTROL          CONTROL\n");
    fprintf(archidat,"(segundos)          (Cm)
    (Cm)          (Cm)\n");
}

```

```

else
{
fprintf(archidat, "
ARCHIVO DE CONTROL PID DE TIEMPO INDEFINIDO\n");
fprintf(archidat, " TIEMPO          SALIDA DE LA PLANTA

ERROR          CONTROL\n");
fprintf(archidat, "(segundos)          (Voltios)
(Voltios)          (Voltios)\n");          x=-1;
}
u=u1=u3=u2[0]=u2[1]=0;
e[0]=e[1]=0;
do
{
veces=veces+1;
cleardevice();
if(t==1)
{
grafico_tanque(divisionesv,divisionest,tiempo,Altura,
"CONTROL DE NIVEL PID-ARCHIVO ",veces,1);
getviewsettings(&vp);
datoin=inportb(entrada);
datoinl=datoin;
for(w=1;w<=datoin;w++)
{
setcolor(BLUE);
line((vp.right-vp.left)/2+19,vp.bottom-vp.top-w,
vp.right-vp.left-5,vp.bottom-vp.top-w);
}
}
else
{
graficos(divisionesv,divisionest,tiempo,Amplitud,
"PID INDEFINIDO-ARCHIVO",veces,1);
}
k=-1;
tiempo_inicial=conseguir_tiempo();
do
{
x=x+1;
k=k+1;
datoin=inportb(entrada);
e[0]=ref-datoin;
putpixel(float(k)*periodo/1000.0*unidadx,
ymax-datoin*unidady,WHITE);
if(datoin>datoinl)
{
for(w=datoinl;w<=datoin;w++)
{
setcolor(BLUE);
line((vp.right-vp.left)/2+19,vp.bottom-vp.top-w-1,
vp.right-vp.left-5,vp.bottom-vp.top-w-1);
}
}
else
{
for(w=datoinl;w>datoin;w--)
{
setcolor(0);
line((vp.right-vp.left)/2+19,vp.bottom-vp.top-w-1,
vp.right-vp.left-5,vp.bottom-vp.top-w-1);
setcolor(15);
}
}
}
datoinl=datoin;

```



```

        u1=kp*e[0];
        u2[0]=ki*periodo/2000.0*e[0]+ki*periodo/2000.0*e[1]+u2[1];
if(k==1 || k==2)
{
    u3=0;
}
else
{
    u3=kd/periodo*1000.0*e[0]-kd/periodo*1000.0*e[1];
}
    u=u1+u2[0]+u3;
    if(u>=255)
{
    outp(salida,255);
}
    if(u<=0)
{
    outp(salida,0);
}
if(0<u && u<255)
{
    putpixel(float(k)*periodo/1000.0*unidadx,
    ymax-u*unidady,YELLOW);
    outp(salida,u);
}

    fprintf(archidat,"%f          %f
%f          %f\n",
    veces*k*periodo/1000.0,datoin*10.0/255.0,
    e[0]*10.0/255.0,u*10.0/255.0);
    gotoxy(2,2);
    printf("Se$al de salida: %2.4f  Se$al de error:
%2.4f  Se$al de control: %2.4f",
    datoin*10.0/255.0,e[0]*10.0/255.0,u*10.0/255.0);
    e[1]=e[0];
    u2[1]=u2[0];
    delay(int(periodo - lapso));
}while((conseguir_tiempo()-tiempo_inicial)<tiempo+4
&& !kbhit());
event.getKeyEvent();
}while( event.what == evNothing);
do
{
    event.getKeyEvent();
}while( event.what == evNothing);
graphicsStop();
fclose(archidat);
break;
}
}
    outp(salida,0);
    resume();
    break;
case 1:
    break;
}
}

```

// ESTRUCTURA PRINCIPAL DEL PROGRAMA

```
int main()
```

```

/*-----*/
/*  APLICACION DE CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS      */
/*  TESIS: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA  */
/*           CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS            */
/*  AUTOR: DIEGO BENITEZ M.                          */
/*  DECLARACION DE FUNCIONES                          */
/*-----*/

```

```

#include <math.h>
#include<stdarg.h>
#include <stdlib.h>
#include <graphics.h>
#include <string.h>
#include <strstrea.h>
#include <dos.h>
#include <stdio.h>
#include<conio.h>

```

```

void dibujaborde(int right, int left,int bottom,int top );
void dibujaeje(int alto,int ancho,int right,int left,
int bottom,int top,float divisionest,float divisionesv,
float Amplitud, int veces, float tiempo,int h);
void graficos(float divisionesv,float divisionest,
float tiempo,float Amplitud,char *titulo, int veces,int var);
void graficoRes(float divisionesv,float divisionest,
float tiempo,float Altura,char *titulo, int veces,int var);
void grafico_tanque(float divisionesv,float divisionest,
float tiempo,float Altura,char *titulo, int veces, int var);
void dibuja_tanque(int right,int left,int bottom,int top);
void dibujaejetan(int right, int left,int bottom,int top);
void tanque();
void vacia(int datoin,int datoinl,int maxX,int maxY);

```

```
extern int Tipo;
```

```
float conseguir_tiempo(void);
int gprintf( int *xloc, int *yloc, char *fmt, ... );
```

```
float unidadx,unidady,ymax;
```

```
//FUNCIONES DE USO GENERAL
```

```

void graficoRes(float divisionesv,float divisionest,
float tiempo,float Altura,char *titulo,int veces, int var)
{
    struct viewporttype vp;
    int maxX,maxY,ancho,alto,xl,y1;
    float altura;
    altura=Altura*255.0/40.0;
    maxX=getmaxx();
    maxY=getmaxy();
    cleardevice();
    setviewport(0,0,maxX,maxY,1);
    getviewsettings(&vp);
    settxtstyle(SMALL_FONT,HORIZ_DIR,4);
    xl=0;
    y1=vp.bottom-vp.top-textheight("M");
    gprintf(&xl,&y1,"Presione una tecla para terminar...");
    setviewport(0,0,maxX-1,(maxY-(textheight("M")+2)),1);
    getviewsettings(&vp);
    dibujaborde(vp.right, vp.left, vp.bottom, vp.top );

```

```
// Escribir el encabezado
```

```

settextstyle(TRIPLEX_FONT,HORIZ_DIR,1);
setcolor(2);
alto=textheight("M");
ancho=textwidth("M");
x1=(vp.right-vp.left-15*ancho)/2;
y1=2*alto+2;
gprintf(&x1,&y1,titulo);

settextstyle(SMALL_FONT,HORIZ_DIR,4);
alto=textheight("M");
ancho=textwidth("M");
dibujaeje(alto,ancho,vp.right,vp.left,vp.bottom,
vp.top,divisionest,divisionesv,Altura,veces,tiempo,0);

//Escribir los valores en los ejes
x1=2*ancho;
y1=4*alto;
gprintf(&x1,&y1,"Altura");
x1=2*ancho;
y1=5*alto;
gprintf(&x1,&y1,"(Cms)");
x1=vp.right-vp.left-17*ancho;
y1=vp.bottom-vp.top-3*alto;
gprintf(&x1,&y1,"Tiempo");
x1=vp.right-vp.left-10*ancho;
y1=vp.bottom-vp.top-3*alto;
gprintf(&x1,&y1,"(Segundos)");
x1=2*ancho;
y1=7*alto;
outtextxy(2*ancho,vp.bottom-vp.top-9*alto,"0");
gprintf(&x1,&y1,"%.2f",Altura);
x1=vp.right-vp.left-10*ancho;
y1=vp.bottom-vp.top-7*alto;
gprintf(&x1,&y1,"%.3f",tiempo*float(veces));
x1=7*ancho;
y1=vp.bottom-vp.top-7*alto;
gprintf(&x1,&y1,"%.3f",tiempo*float(veces-1));
if(var==1)
{
    x1=35*ancho;
    y1=vp.bottom-vp.top-4*alto;
    gprintf(&x1,&y1,"AMARILLO=CONTROL    BLANCO=SALIDA");
}
getviewsettings(&vp);
setviewport(8*ancho,8*alto,vp.right-vp.left-8*ancho,
vp.bottom-vp.top-8*alto,1);
getviewsettings(&vp);
unidady=(vp.bottom-vp.top)/altura;
unidadx=(vp.right-vp.left)/(tiempo);
ymax=(vp.bottom-vp.top);
}

```

```

void grafico_tanque(float divisionesv,float divisionest,
float tiempo,float Altura,char *titulo,int veces, int var)
{
    struct viewporttype vp;
    int maxX,maxY,ancho,alto,x1,y1;
    float altura;
    altura=Altura*255.0/40.0; /* AQUI*/
    maxX=getmaxx();
    maxY=getmaxy();
    cleardevice();
    setviewport(0,0,maxX,maxY,1);
    getviewsettings(&vp);
}

```

```

settextstyle(SMALL_FONT,HORIZ_DIR,4);
x1=0;
y1=vp.bottom-vp.top-textheight("M");
gprintf(&x1,&y1,"Presione una tecla para terminar...");
setviewport(0,0,maxX-1,(maxY-(textheight("M")+2)),1);
getviewsettings(&vp);
dibujaborde(vp.right, vp.left, vp.bottom, vp.top );

// Escribir el encabezado

settextstyle(TRIPLEX_FONT,HORIZ_DIR,1);
setcolor(2);
alto=textheight("M");
ancho=textwidth("M");
x1=(vp.right-vp.left)/2-15*ancho;
y1=2*alto+2;
gprintf(&x1,&y1,titulo);

settextstyle(SMALL_FONT,HORIZ_DIR,4);
alto=textheight("M");
ancho=textwidth("M");
dibujaeje(alto,ancho,(vp.right-vp.left)/2.0,vp.left,
vp.bottom,vp.top,divisionest,divisionesv,
Altura,veces,tiempo,1);
/* CAMBIE altura POR Altura*/
//Escribir los valores en los ejes
x1=2*ancho;
y1=4*alto;
gprintf(&x1,&y1,"Altura");
x1=2*ancho;
y1=5*alto;
gprintf(&x1,&y1,"(cm)");
x1=vp.left+45*ancho;
y1=vp.bottom-vp.top-4*alto;
gprintf(&x1,&y1,"Tiempo");
x1=vp.left+45*ancho;
y1=vp.bottom-vp.top-3*alto;
gprintf(&x1,&y1,"(Segundos)");
x1=2*ancho;
y1=7*alto;
outtextxy(2*ancho,vp.bottom-vp.top-9*alto,"0");
gprintf(&x1,&y1,"%.1f",Altura); /* CAMBIE %.3f po %.1f */
x1=vp.left+45*ancho;
y1=vp.bottom-vp.top-7*alto;
gprintf(&x1,&y1,"%.3f",tiempo*float(veces));
x1=7*ancho;
y1=vp.bottom-vp.top-7*alto;
gprintf(&x1,&y1,"%.3f",tiempo*float(veces-1));
if(var==1)
{
x1=9*ancho;
y1=vp.bottom-vp.top-4*alto;
gprintf(&x1,&y1,"AMARILLO=CONTROL   BLANCO=SALIDA");
}
setviewport(8*ancho,8*alto,vp.right-vp.left-8*ancho,
vp.bottom-vp.top-8*alto,1);
getviewsettings(&vp);
dibuja_tanque(vp.right,vp.left,vp.bottom,vp.top);
unidady=(vp.bottom-vp.top)/(altura); /*AQUI QUITE /4*/
unidadx=((vp.right-vp.left)/2-18*ancho)/(tiempo);
ymax=(vp.bottom-vp.top);

```

```

void dibujaejetan(int right, int left,int bottom,int top)
{
    int MaxColors,x1,x2,y1,y2,d,h;
    float Divisionesv; /* cambie int por foat*/

    MaxColors=getmaxcolor();
    setcolor( MaxColors-4);
    Divisionesv=6.375;
    /* este valor para conseguir que el
    nivel suba hasta 40 en 255*/
    x1=(right-left)/2+12;
    x2=x1-20;
    for(d=0;d<=40;d++)
    {
        y1=(bottom-top)-Divisionesv*d;
        y2=y1;
        y1=y1-Divisionesv;
        h = d % 4;
        if (h == 0)
        {
            if (d==0)
                y1=y1-4;
            gprintf(&x2,&y1,"%2i",d);
            line(x1-8,y2,x1,y2);
        }
        else
            line(x1-5,y2,x1,y2);
        y1=y2;
    };
}

```

```

void dibuja_tanque(int right,int left,int bottom,int top)
{
    setlinestyle(0,3,1);
    rectangle((right-left)/2+18,0,right-left-4,bottom-top);
    setlinestyle(0,3,1);
    rectangle((right-left)/2+14,0,right-left,bottom-top);
    dibujaejetan(right,left,bottom,top);
}

```

```

void vacia(int datoin,int datoinl,int maxX,int maxY)
{
    int w;
    if(datoin>datoinl)
    {
        for(w=datoinl;w<=datoin;w++)
        {
            setcolor(BLUE);
            line(maxX-294,maxY-130-w-1,maxX-151,maxY-130-w-1);
            setcolor(12);
            line(maxX-299,maxY-130-w-1,maxX-296,maxY-130-w-1);
            setcolor(BLUE);
        }
    }
    else
    {
        for(w=datoinl;w>datoin;w--)
        {
            setcolor(0);
            line(maxX-294,maxY-387-w-1,maxX-151,maxY-387-w-1);
            setcolor(12);
            line(maxX-299,maxY-387-w-1,maxX-296,maxY-387-w-1);
        }
    }
}

```