

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA.  
DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA Y CONTROL.

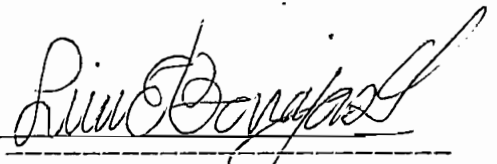
"CONSTRUCCION DEL EQUIPO  
DIDACTICO DE VIGA Y BOLA"

FAUSTO MARCELO LUDEÑA GRANJA.

Tesis previa la obtención  
del título de Ingeniero en  
Electrónica y Control.

Quito, julio 1989.

Certifico que el presente  
trabajo ha sido elaborado  
en su totalidad por el  
señor Fausto M. Ludeña G.

A handwritten signature in cursive script, appearing to read "Luis Barajas", written over a horizontal line.

Ing. Luis Barajas.  
Director de tesis.

A G R A D E C I M I E N T O

A mis padres que con su lucha diaria y amor ayudaron en la culminación de mi carrera, a la Madre Dolorosa que es mi guía, y a todas las personas que de una u otra forma colaboraron con la realización de la presente tesis de grado.

DEDICATORIA

A mis padres que supieron guiarme por el mejor camino.

A mi hija Yajairita que es luz, cariño y alegría.

CONTENIDO

<u>A G R A D E C I M I E N T O</u> . . . . .	iii
<u>D E D I C A T O R I A</u> . . . . .	iv
<u>I N T R O D U C C I O N</u> . . . . .	ix

C A P I T U L O I : ANALISIS DEL SISTEMA

	<u>Pag #:</u>
1.1. - INTRODUCCION. . . . .	1
1.2.- MODELACION Y SIMULACION DEL SISTEMA. .	3
1.2.1.- MODELACION DE LA VIGA Y BOLA. . . . .	11
1.2.2.- SIMULACION DE LA VIGA Y BOLA. . . . .	24
1.3.- METODOS DE COMPENSACION TEORICA DEL SISTEMA. . . . .	34
1.3.1.- COMPENSACION DE ADELANTO DE FASE. . . . .	37
1.3.2.- COMPENSACION MEDIANTE ACCIONES DE CONTROL. . . . .	44
1.3.3.- COMPENSACION POR REALIMENTACION DE ESTADO. . . . .	49

CAPITULO II: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO.

	Pag. #:
2.1. - INTRODUCCION. . . . .	58
2.2.- SISTEMA FISICO A IMPLEMENTARSE: . . .	59
2.2.1.- CONFIGURACION DEL SISTEMA: . . .	59
2.2.2.- VARIABLE A CONTROLARSE: . . . . .	68
2.3.- UNIDAD DE INSTRUMENTACION: Detección y transmisión. . . . .	68
2.3.1.- DETECTORES DE LAS VARIABLES A CONTROLARE: . . . . .	69
2.3.2.- DISEÑO DE LA INTERFASE ENTRE EL SISTEMA Y EL COMPUTADOR: . . . . .	70
2.3.2.i.- DISEÑO DE LA INTERFASE DEL SENSOR ANGULAR Y EL COMPUTADOR. . . . .	72
2.3.2.ii.- DISEÑO DE LA INTERFASE DEL SENSOR DE POSICION Y EL COMPUTADOR. . . . .	75
2.3.2.iii.- DISEÑO DEL COMPARADOR DE SEÑALES DE LOS SENSORES CON EL VALOR DE REFERENCIA. . . . .	78
2.4.- ACTUADOR. . . . .	80
2.4.1.- ESTUDIOS PRELIMINARES: . . . . .	81
2.4.2.- CIRCUITO PARA CONTROLAR EL ACTUADOR. . . . .	86
2.5.- IMPLEMENTACION PRACTICA DE LOS DISEÑOS Y SUS LIMITACIONES. . . . .	91
2.5.1.- CIRCUITO DE PROTECCION DE SOBREVOLTAJE. . . . .	92

2.5.2.-	CIRCUITO DE PROTECCION DE SOBRECORRIENTE. . . . .	94
2.5.3.-	CIRCUITO FINAL DE PROTECCION. . .	96
2.5.4.-	FUENTES DE POLARIZACION. . . . .	97
2.5.4.i.-	FUENTES DE POLARIZACION DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS. .	97
2.5.4.ii.-	FUENTE DE CORRIENTE PARA LA BOBINA CENTRAL. .	98
2.5.5.-	FUENTES DE POLARIZACION PARA EL ACTUADOR. . . . .	99
2.5.6.-	CIRCUITO DE PROTECCION DE BAJOVOLTAJE Y REINICIO DEL SISTEMA. .	101

CAPITULO III: APLICACIONES DEL EQUIPO INTERCONECTADO AL COMPUTADOR ANALOGO.

	Pag. #:
INTRODUCCION. . . . .	118
3.1.- IMPLEMENTACION DE COMPENSADORES EN EL COMPUTADOR ANALOGO PARA CONTROL DEL EQUIPO. . . . .	119
3.1.1.- COMPENSACION EN ADELANTO. . . . .	122
3.1.2.- COMPENSACION PROPORCIONAL-DERIVATIVA. . . . .	122
3.1.3.- COMPENSACION POR REALIMENTACION DE ESTADO. . . . .	124
3.2.- PRUEBAS Y RESULTADOS . . . . .	127
3.3.- CONCLUSIONES. . . . .	130
<u>BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS . . . . .</u>	<u>136</u>

<u>APENDICE A.</u>	MANUAL DE USO DEL EQUIPO. . . . .	A1
<u>APENDICE B</u>	CARACTERISTICAS ELECTRICAS DEL EQUIPO. . . . .	B1
<u>APENDICE C</u>	LIMITACIONES Y PRECAUCIONES PARA SU FUNCIONAMIENTO. . . . .	C1



## INTRODUCCION

## INTRODUCCION

Debido a la necesidad de tener el equipamiento que ayude a la comprensión de la Teoría de Control, se implementa una planta totalmente inestable, como es el caso del equipo de viga y bola, sobre la cual se puede trabajar para observar prácticamente los conceptos básicos y modernos relacionados con el análisis y diseño de sistemas de Control.

La presente tesis tiene por objeto la construcción del equipo antes mencionado pero con la característica que debe ser didáctico para lo cual es necesario tener al alcance del usuario varios puntos de medición y de interconexión, ya que se lo utilizará junto al computador análogo, en el cual se implementan los controles activos para los diferentes casos de estudio, con la opción de poder lograr diferentes resultados e incluso ir a la parte de inestabilidad para su análisis y luego el diseño adecuado de compensadores , por cualquier método.

En la tesis se tiene tres capítulos, en el primero se presenta el fundamento teórico, dentro del cual tenemos la modelación del sistema, para lograr obtener su representación lineal y con ella trabajar en la elaboración de

las simulaciones tanto del sistema original, como con los compensadores en el computador análogo, dejándose abierta la posibilidad de realizar estudios en otros campos del Control. En el segundo capítulo se encuentra la información de la implementación física del sistema, así como cada uno de los componentes necesarios para lograr controlar posición de la bola en la viga, tanto electrónicos como el actuador y sensores necesarios para este trabajo. Por último en el tercer capítulo se tiene los resultados del trabajo del equipo junto al computador análogo, comprobándose la teoría presentada en el primer capítulo, y el trabajo de la parte electrónica para lograr el acondicionamiento de las señales para su interconexión.

Para finalizar fue necesario la elaboración de un conjunto de apéndices que facilitan el uso adecuado del equipo para la realización de prácticas de laboratorio o cualquier función que se le desee dar; además se preparó la información necesaria para el mantenimiento del equipo.

Espero que realmente la presente tesis cumpla con su objetivo, al ser un equipo enteramente didáctico y poder elevar el nivel académico de la Facultad.

CAPITULO I

ANALISIS DEL SISTEMA

## C A P I T U L O    I

### ANALISIS DEL SISTEMA.

#### 1.1 .-        INTRODUCCION.

La realización del análisis de un sistema de control puede ser hecho por varios métodos, con lo cual se logra tener conocimiento del comportamiento del sistema. Es muy importante para esto tener una modelación matemática de la planta sobre la cual se trabajará para obtener el análisis deseado, e incluso se puede realizar simulación con la finalidad de lograr mejores resultados.

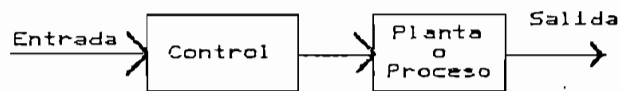
Con la realización de la modelación no únicamente es posible el análisis del sistema sino incluso se puede hacer el diseño de compensadores para lograr obtener ciertas características de respuesta deseadas ya sea en estado transitorio como en estado estable.

En la presente tesis se construye un sistema físico real sobre el cual se puede aplicar los conocimientos teóricos de los Sistemas de Control. Será necesario en primer lugar obtener su modelación matemática para trabajar con la simulación como con el sistema real. Este se trata del "Equipo Inestable de Viga y Bola", y sobre él, se puede trabajar para lograr obtener especificaciones

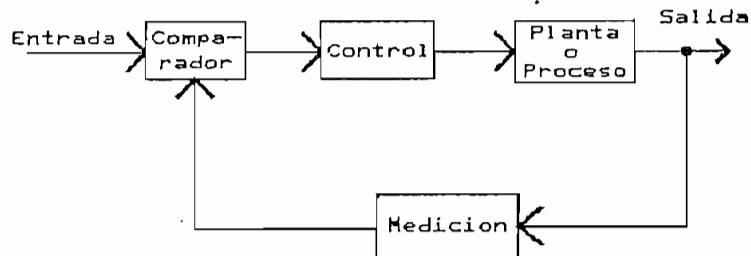
deseadas con la compensación adecuada.

En este caso tenemos que a simple vista el sistema físico o planta es inestable, lo cual será demostrado en forma analítica por medio del modelo matemático. Esto es muy claro para el caso del sistema de lazo abierto.

En forma superficial se pasa a indicar las definiciones más importantes como: Sistema de Lazo Abierto ; que es el sistema cuya salida no tiene efecto sobre la acción de control, en contraste a este sistema tenemos el de Lazo Cerrado; que utiliza una realimentación de la salida real con el objeto de compararla con la respuesta deseada. Una mejor comprensión se logra al presentar las anteriores definiciones en forma gráfica, así tenemos su representación en las Fig.1.1.a y Fig.1.1.b.



a.- Sistema de Lazo abierto.



b.- Sistema de Lazo cerrado.

Fig. 1.1 Tipos de sistemas.

Al realizar una comparación de los sistemas se puede indicar que en el caso del Sistema de Lazo cerrado es posible una mejor precisión a pesar de usar elementos relativamente inexactos y económicos, lo cual no se lograría a lazo abierto. Por último cabe indicar que para situaciones en las cuales es conocida la señal de entrada es preferible el uso de control en lazo abierto ya que incluso se da un ahorro en la magnitud de la potencia requerida por el sistema.

En lo referente al análisis de la respuesta se puede indicar que debido a que todo el sistema de control trabaja en el dominio del tiempo es importante su funcionamiento en la parte transitoria que se relaciona con la estabilidad relativa del sistema, entendiéndose como sistema estable a aquel que tiene una respuesta limitada.

Por último ya que la presente tesis también permitirá el trabajo con compensadores es necesario que la persona que la use tenga las suficientes bases para lograr realizar compensación por cualquiera de los métodos posibles.

## 1.2.- MODELACION Y SIMULACION DEL SISTEMA.

Antes de pasar a indicar la modelación y simulación del equipo en particular, creo conveniente presentar ciertos criterios relacionados con la modelación y simulación de sistemas en general.

En primer lugar es necesario indicar el por qué de la modelación; esto puede justificarse ya que con ella se puede entender y controlar sistemas complejos, y esto se

logra de un análisis de las relaciones entre las variables del sistema. En general los sistemas en estudio son de carácter dinámico razón por la cual sus modelos matemáticos son ecuaciones diferenciales, de cuya solución se puede obtener la respuesta a una entrada dada. Estas ecuaciones diferenciales cuantitativas se las obtiene de las leyes físicas que gobiernan su comportamiento en particular.

Lo anterior se refiere a la parte analítica o matemática existente en todo sistema real, pero en forma general se puede clasificar a los modelos de la siguiente forma:

1.- Modelo a pequeña escala: es un dispositivo físico que mantiene las características del sistema real pero con sus señales escaladas en magnitud y/o tiempo.

2.- Modelos analíticos continuos: que se trata de lo ya indicado anteriormente en los que se procura una abstracción matemática y mantener las características y propiedades de la dinámica del sistema original.

3.- Modelos analíticos discretos: es una alternativa del caso anterior pero en el campo discreto.

4.- Modelos numéricos: orientado básicamente al modelaje de piezas o componentes para la industria manufacturera.



En cuanto se refiere a los métodos de la modelación se puede indicar que los más usados y conocidos son:

a.- Método directo: no es una técnica general, pues cada sistema se lo trata en forma particular, y se debe plantear directamente las ecuaciones a partir del conocimiento de la interconexión de los elementos o componentes básicos.

b.- Método de redes: muy usado en la ingeniería eléctrica y se basa en las ecuaciones de malla y de nodo, pero se puede generalizar para aplicar en otros sistemas permitiendonos el uso del concepto de dualidad.

c.- Método variacional (Lagrange): muy usado en la ingeniería mecánica y es enfocado desde el punto de vista de energía, por lo cual es aplicable en sistemas no lineales, sistemas lineales, sistemas mixtos, etc.

d.- Método de Bond Graph: el cual se trata de un método sistemático y aplicable a computadores, se debe representar por medio de un gráfico de barras la transferencia de energía.

e.- Identificación: es apropiado cuando los sistemas son muy complicados o imprecisamente entendidos, pero su relación entrada/salida es suficientemente regular y puede ser representado por modelos medianamente simples. Se trata de la determinación de los coeficientes de las

ecuaciones que sigue el sistema, y que puede ser resuelto usando técnicas determinísticas o probabilísticas. Su solución implica un problema de optimización para lo cual se usa programación dinámica, cálculo de variaciones o análisis funcional.

Con esto a todos los sistemas se los debe interpretar como manipuladores de energía, pero para ello es necesario el conocimiento de los elementos o dispositivos que la manipulan y luego estudiar su interconexión, lo cual conforman un sistema físico real. Este campo de la modelación es muy amplio pero se ha dado los fundamentos para lograr una mejor comprensión del objetivo de la modelación del sistema físico a ser construido.

Se pasa a realizar la modelación del sistema en estudio, es decir el equipo inestable de viga y bola; cuya representación gráfica se halla en la figura 1.2. Mientras

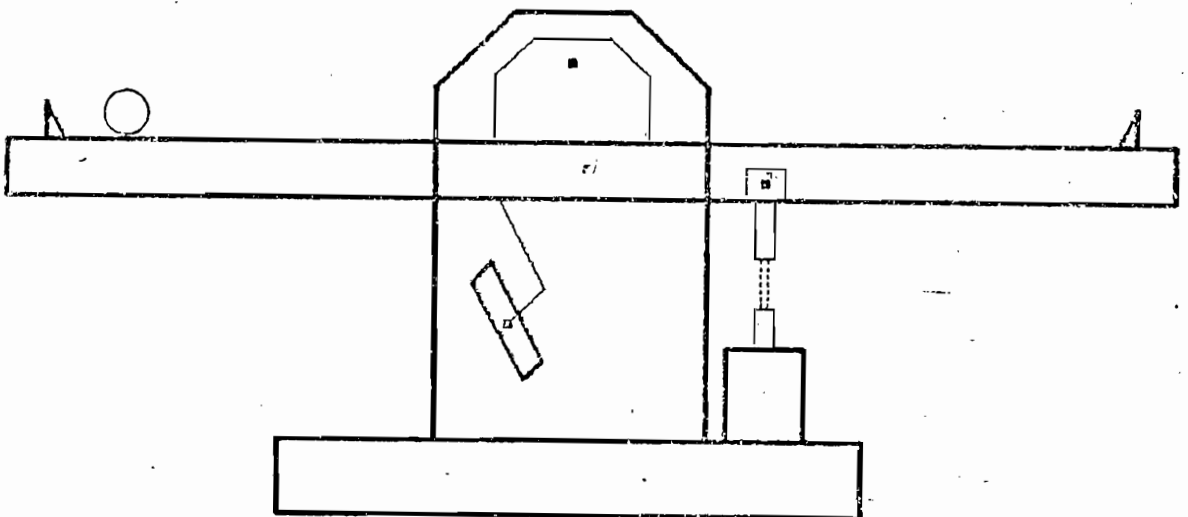


Fig 1.2.- Sistema físico.

en la figura 1.3 se puede apreciar el sistema más simplificado para realizar su modelación, además se coloca en forma literal cada una de las posibles constantes del sistema; como son la fricción que produce el detector de posición como el detector angular, el momento de inercia de la viga, masas de los elementos sobre la viga; longitudes de la localización de los elementos en la viga, y además las variables en estudio como son la posición de la bola, el ángulo de desplazamiento de la viga y fuerza que se aplica por medio del actuador.

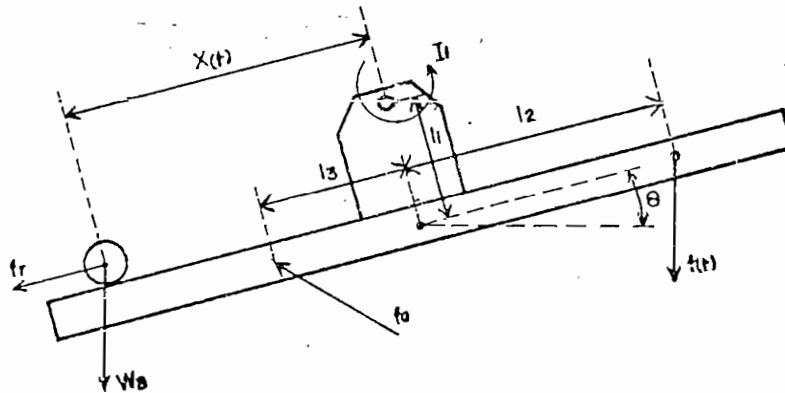


Fig. 1.3 Sistema simplificado.

Podemos pasar a realizar la modelación del sistema, y para ello utilizamos el método variacional, ya que de esta forma únicamente tenemos que trabajar con energías, que nos facilita el trabajo matemático. Razón por la cual se da los conceptos fundamentales en los cuales se basa dicho método.

En este método se trata de estructurar una variable  $V$  (Indicador Variacional), tal que si:  $\delta V = 0$  la restricciones de interconexión de elementos se cumplen.

Dichas restricciones se refieren en el caso de las variables de esfuerzo; que es una variable de tipo estático y puede ser medida sin necesidad de modificar el

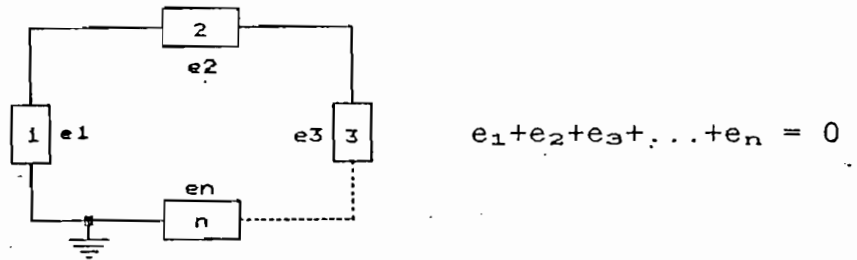


Fig. 1.4 Restricción de esfuerzo.

sistema o interrumpir el funcionamiento, se debe cumplir "que la suma de esfuerzos en un sistema cerrado es igual a cero"; mientras el caso de las variables de flujo que es una variable de índole dinámico, para su medición hay que interrumpir el sistema, se debe cumplir que "el sumatorio de flujos que concurren a un nodo es cero":

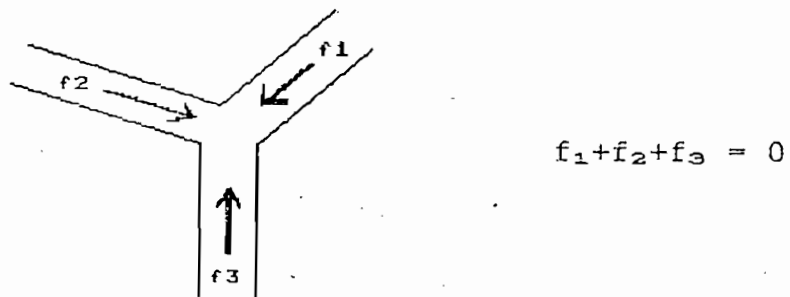


Fig. 1.5 Restricción de flujo.

Con este método se cambia el problema de interconexión a uno de minimización. Se tiene dos subdivisio

nes de este método que son el método variacional nodal y el método variacional de lazo o malla en los cuales se debe expresar la variación permisible en función de energías o coenergías. A continuación se indican los pasos para cada una de las modelaciones; en primer lugar tenemos el procedimiento para el método variacional nodal:

1.- Seleccionar las coordenadas generalizadas; en este caso se tienen en las variables de acumulación de esfuerzo linealmente independientes.

2.- Se selecciona un conjunto de coordenadas variacionales. Se escogen de los anteriores, aquellas que tengan variaciones admisibles.

3.- Se calcula el lagrangiano L del sistema:

$$L = u^* - T$$

Donde:  $u^* \equiv$  Coenergía de acumulación de flujo.  
 $T \equiv$  Energía de acumulación de esfuerzo.

4.- Se calcula el co-contenido J.

5.- Se aplica a cada coordenada variacional la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{e}_a} \right) - \frac{\delta L}{\delta e_a} + \left( \frac{\delta J}{\delta \dot{e}_a} - F \right) = 0$$

Donde:  $e_a \equiv$  Acumulación de esfuerzo.  
 $F \equiv$  Fuentes externas.

6.- Del conjunto de ecuaciones obtenidas se puede llegar a las variables de estado o función de transferencia.

Para el caso del método variacional de malla se sigue un procedimiento similar, lo que cambia es: en el primer paso se selecciona las coordenadas generalizadas y son acumulación de flujo, en el tercer punto se determina el Co-Lagrangiano que se define por:

$$L^* = T^* - u$$

Donde:  $T^* \equiv$  Coenergía de la acumulación de esfuerzo.  
 $u \equiv$  Energía de acumulación de flujo.

Mientras la ecuación que se aplica a cada coordenada variacional es:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L^*}{\delta \dot{e}_r} \right) - \frac{\delta L^*}{\delta e_r} + \left( \frac{\delta G}{\delta \dot{e}_r} - F \right) = 0$$

Donde:  $G \equiv$  Contenido  
 $F \equiv$  Fuentes externas.  
 $e_r \equiv$  Acumulación de flujo.

Se ha dado el conocimiento general de éste método de modelación que se lo usa para hallar la función de transferencia del sistema en estudio, para esto seguimos los pasos indicados anteriormente.

1.2.1.- MODELACION DE LA VIGA Y BOLA.

Para una mejor comprensión de los pasos a seguirse, así como del sistema a modelarse, se ha realizado un gráfico reducido, en el cual se presenta cada una de las variables y parámetros del sistema en estudio. Esto lo tenemos en la Fig.1.6 que se presenta a continuación:

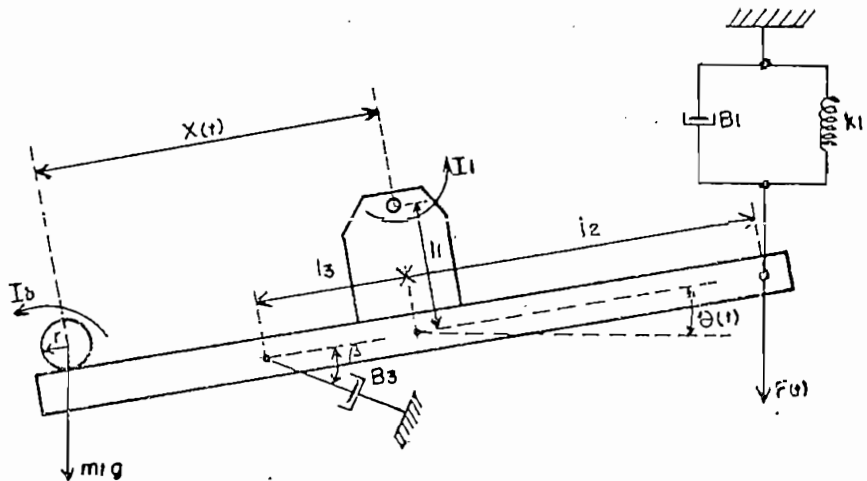


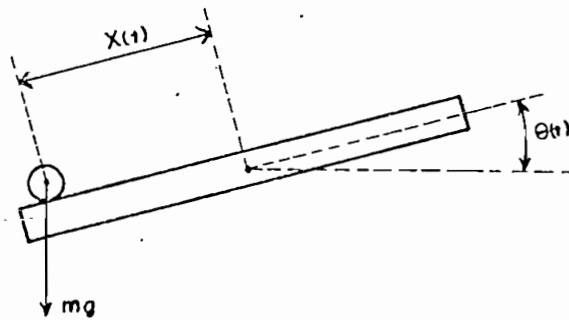
Fig. 1.6 Representación de la viga y bola en forma reducida.

La definición de los parámetros de la figura 1.6 es:

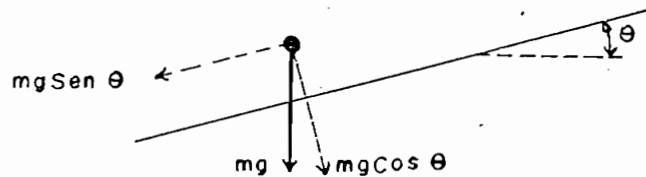
- $B_1$   $\equiv$  Rozamiento en el actuador y en la viga.
- $B_3$   $\equiv$  Rozamiento en el sensor angular.
- $k_1$   $\equiv$  Amortiguamiento en el actuador y ejes.
- $F(t)$   $\equiv$  Fuerza del actuador.
- $\theta(t)$   $\equiv$  Desplazamiento angular de la viga.
- $x(t)$   $\equiv$  Desplazamiento lineal de la bola.
- $m_1$   $\equiv$  Masa de la bola.
- $l_2$   $\equiv$  Distancia de localización del actuador.
- $l_1$   $\equiv$  Longitud del eje vertical.

- $l_s$   $\equiv$  Distancia de localización del sensor angular.
- $I_1$   $\equiv$  Momento de inercia de la viga.
- $I_b$   $\equiv$  Momento de inercia de la bola.
- $g$   $\equiv$  Constante de aceleración de la gravedad.
- $r$   $\equiv$  Radio de rodamiento sobre la viga de la bola.
- $\beta$   $\equiv$  Angulo de inclinación del sensor angular.

Sin embargo, como se dijo anteriormente el sistema en lazo abierto es inestable y en una forma muy sencilla se puede determinar analíticamente, para lo cual consideramos las fig. 1.7a,1.7b en las cuales se controla la



a.- Sistema de viga y bola.



b.- Plano inclinado.

Fig. 1.7 Modelo simple.



posición de la bola de acuerdo a la inclinación de la viga que está dada por el ángulo  $\theta(t)$ , y considerando a la bola como una masa puntual que rueda en el plano inclinado se puede determinar la característica dinámica esencial del sistema, donde  $\theta(t)$  nos da la fracción de fuerza gravitacional que es paralela a la bola y por las leyes de movimiento se tiene:

$$mg \text{ Sen } \theta = ma \quad ; \quad a \equiv \text{aceleración} = \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$$
$$g \text{ Sen } \theta = \ddot{x} \quad (1.1)$$

Linealizando la anterior ecuación, considerando que el ángulo de inclinación  $\theta$  es pequeño se llega a:

$$g\theta = \ddot{x} \quad (1.2)$$

y aplicando Laplace con la condición inicial cero, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$g\theta(s) = s^2 x(s)$$
$$FT = \frac{x(s)}{\theta(s)} = \frac{g}{s^2} \quad (1.3)$$

Y a pesar de ser una simplificación burda nos sirve para demostrar que el sistema en lazo abierto es inestable con el doble integrador que representa un doble polo en el origen, y nos da la propiedad dinámica esencial de la viga y bola en estudio. Y por esta razón es necesario un control de realimentación activo para lograr

estabilizarlo, siendo con ello un ejercicio ilustrativo en el cual se puede aplicar el control clásico y moderno.

Considerando ya el sistema físico construido sin la simplificación anterior y de acuerdo a los parámetros y variables mostradas en la figura 1.6 y siguiendo el método mencionado tenemos:

VARIABLES GENERALIZADAS:

$\theta \equiv$  Desplazamiento angular.

$x \equiv$  Desplazamiento lineal de la bola.

Se debe determinar en primer lugar el Lagrangiano del sistema en estudio; es decir:

$$L = u^* - T$$

Donde la coenergía viene dada por la masa de la bola, su inercia y de la viga, lo cual es:

$$u^* = \frac{1}{2}m_1(v)^2 + \frac{1}{2}I_2w^2 + \frac{1}{2}I_1(\dot{\theta})^2 \quad (1.4)$$

y se debe escribir  $v$  y  $w$  en función de las velocidades generalizadas. Para determinar la velocidad de traslación de la bola se deben tener presentes las siguientes relaciones:

$$v = \sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{\theta}r_1)^2}$$

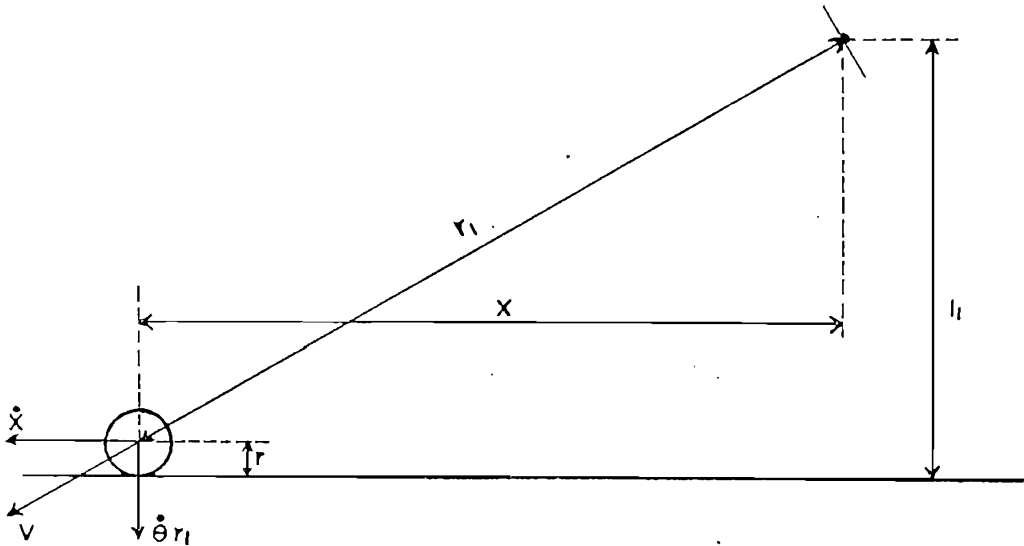


Fig. 1.7 Relación del radio de giro para la bola.

Como:

$$r_1 = \sqrt{(l_1 - r)^2 + x^2}$$

$$V = \sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{\theta} \sqrt{(l_1 - r)^2 + x^2})^2} \quad (1.5)$$

Para el caso de la velocidad angular de la bola ( $w$ ), se tiene la siguientes relaciones:

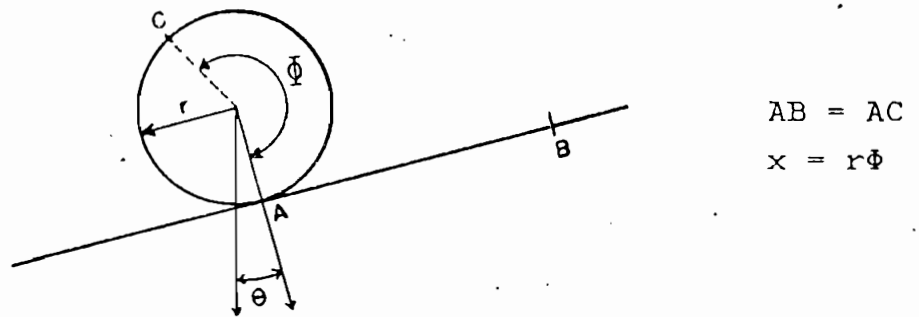


Fig. 1.8 Relación de la velocidad angular de la bola.

En primer lugar podemos determinar el desplazamiento angular ( $\alpha$ ) que esta dado por:

$$\alpha = \theta + \phi = \theta + \frac{x}{r}$$

Donde:  $\alpha \equiv$  Es el desplazamiento respecto a un punto fijo de la bola.

y su velocidad angular se define por:

$$w = \frac{d \alpha}{d t} = \frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \quad (1.6)$$

Con lo cual la coenergía del sistema viene dada por:

$$u^* = \frac{1}{2} m_1 ((\dot{x})^2 + (\dot{\theta} \sqrt{(l_1 - r)^2 + x^2})^2) + \frac{1}{2} I_B \left( \frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \right)^2 + \frac{1}{2} I_1 (\dot{\theta})^2 \quad (1.7)$$

En el caso de la energía potencial se tiene que está dado por el desplazamiento en el actuador y es:

$$T = \frac{1}{2} k_1 p$$

Donde:  $p \equiv$  Desplazamiento del sensor.  
 $T \equiv$  Energía de acumulación de esfuerzo.

El desplazamiento se lo calcula de la siguiente forma:

$$p = l_2 \text{ Sen } \theta$$

y se cumple que para  $\theta$  pequeños:  $\text{Sen } \theta \approx \theta$

$$p = l_2 \theta$$

Con lo cual se tiene:

$$T = \frac{1}{2} k_1 (l_2 \theta)^2 \quad (1.8)$$

Combinando las ecuaciones 1.7 y 1.8 se obtiene la ecuación total del Lagrangiano, que es:

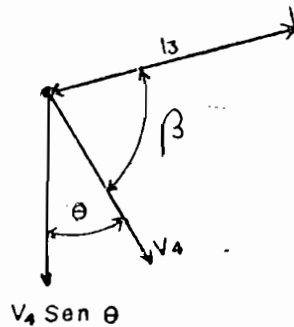
$$L = \frac{1}{2} m_1 [(\dot{x})^2 + (\dot{\theta})^2 ((l_1 - r)^2 + x^2)] + \frac{1}{2} I_B \left( \frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \right)^2 + \frac{1}{2} I_1 (\dot{\theta})^2 - \frac{1}{2} k_1 (l_2 \theta)^2 \quad (1.9)$$

Además necesitamos la expresión del co-contenido del sistema (J), que nos da la medida de la energía de la disipación, y se relaciona con el coeficiente de rozamiento, y viene dado por:

$$J = \frac{1}{2}B_1v_3^2 + \frac{1}{2}B_3v_4^2$$

Donde:  $v_3 \equiv$  Velocidad relacionada con el coeficiente  $B_1$ .  
 $v_3 = l_2\dot{\theta}$   
 $v_4 \equiv$  Velocidad lineal en el sensor angular.

Para el caso de  $v_4$  tenemos:



$\beta \equiv$  Angulo de inclinación del sensor angular.  
 $\beta \equiv \theta + \beta = \beta$   
si  $\beta \gg \theta$

Fig.1.9 Velocidad lineal en el sensor angular.

Con lo cual:

$$v_4 \text{ Sen } \beta = l_3\dot{\theta}$$

$$v_4 = \frac{l_3 \dot{\theta}}{\text{Sen}\beta}$$

De esta forma la expresión del co-contenido es:

$$J = \frac{1}{2} B_1 (l_2 \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} B_3 \left( \frac{l_3 \dot{\theta}}{\text{Sen}\beta} \right)^2 \quad (1.10)$$

Para continuar el procedimiento de modelación escogido, debemos aplicar las ecuaciones de Lagrange que son:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{x}} \right) - \frac{\delta L}{\delta x} + \frac{\delta J}{\delta \dot{x}} = F_1(t) \quad (1.11)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) - \frac{\delta L}{\delta \theta} + \frac{\delta J}{\delta \dot{\theta}} = \tau_2(t) \quad (1.12)$$

Donde:  $F_1(t) \equiv$  Es la fuerza generalizada en la dirección de  $x$ .  
 $\tau_2(t) \equiv$  Es el torque generalizado.

La fuerza asociada a  $x$  está dada por el peso de la bola en la dirección de  $x$ , es decir:

$$F_1(t) = m_1 g \text{ Sen}\theta. \quad (1.13)$$

Mientras el torque o fuente relacionada con el desplazamiento angular ( $\theta$ ), esta dado por las fuerza tanto del peso perpendicular a la viga como la misma fuerza del actuador, para lo cual tenemos:

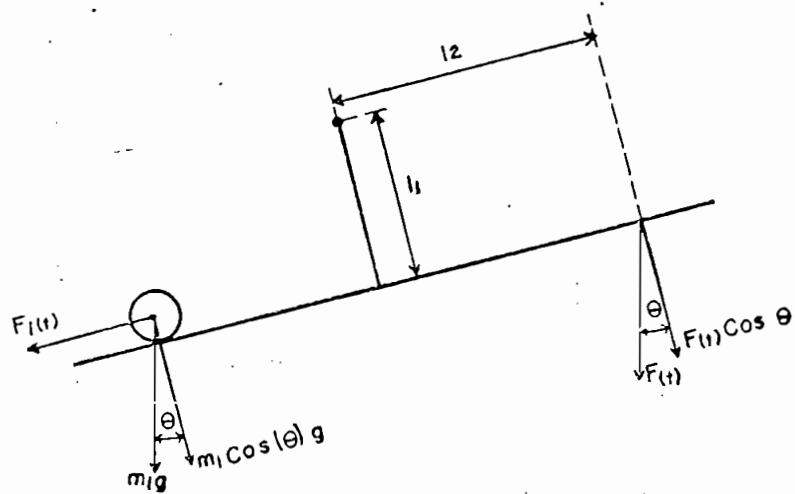


Fig. 1.10 Fuentes del sistema.

y según la figura 1.10 podemos determinar  $\tau_2(t)$  que es:

$$\tau_2(t) = (m_1 g x - F(t) l_2) \cos \theta \quad (1.14)$$

Combinando las ecuaciones 1.9, 1.10, 1.11, 1.12, 1.13, y 1.14 se puede determinar las ecuaciones del sistema, las cuales son:

$$\left(m_1 + \frac{I_b}{r^2}\right) \ddot{x} + \frac{I_b}{r} \ddot{\theta} - x m_1 (\dot{\theta})^2 = m_1 g \text{Sen} \theta \quad (1.15)$$



$$E\ddot{\theta} + F\dot{\theta} + G\theta + \frac{I_b}{r} \ddot{x} - m_1 g x \cos\theta = -F(t) l_2 \cos\theta \quad (1.16)$$

Donde:  $E = m_1 [(l_1 - r)^2 + x^2] + I_b + I_1$

$$F = 2m_1 x \dot{x} + B_1 l_2^2 + B_3 \left( \frac{l_3}{\text{Sen}\beta} \right)^2$$

$$G = k_1 l_2^2$$

En primer lugar se puede notar en la ecuación 1.16, que el coeficiente de rozamiento del sensor angular puede ser incluido en uno solo con el coeficiente del rozamiento de la viga así:

$$B_1 l_2^2 + B_3 \left( \frac{l_3}{\text{Sen}\beta} \right)^2 = B_T l^2 \quad (1.17)$$

Además se puede apreciar que el conjunto de ecuaciones hallados son no lineales, y no se las puede usar para el caso de estudio del control lineal. Y para reducir a ecuaciones más adecuadas para el estudio propuesto se debe asumir:

1.- Debido a que el ángulo de desplazamiento de la viga es pequeño:

$$\text{Sen}\theta \approx \theta \quad \text{y} \quad \text{Cos}\theta \approx 1$$

Y en la ecuación 1.15 se puede deprecia la influencia de  $\dot{\theta}$  y  $\ddot{\theta}$  ya que si  $\theta \rightarrow 0$ , sus derivadas de hecho serán pequeñas.

2.- El momento de inercia de la bola, como su masa son valores pequeños y tienen poca influencia en el comportamiento de la viga, para el caso de la ecuación 1.16.

La validez de estas ecuaciones depende de la construcción del sistema y sus rasgos físicos. En nuestro caso son válidos, y además los errores que involucra su utilización es pequeño en comparación con otros fenómenos que actúan en el sistema. Haciendo uso de estas restricciones se llega a las siguientes ecuaciones lineales:

$$\left(m_1 + \frac{I_b}{r^2}\right)\ddot{x} = m_1 g \theta \quad (1.18)$$

$$I_1 \ddot{\theta} + B_T l_2 \dot{\theta} + k_1 l_2^2 \theta = -F(t) l_2 \quad (1.19)$$

El momento de inercia de la bola esta dado por :

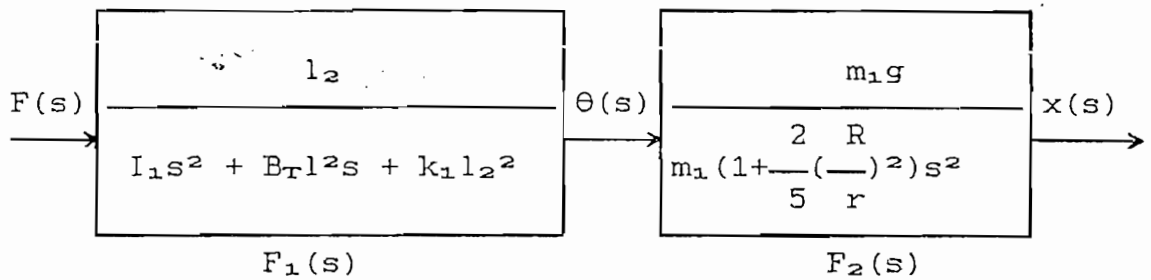
$$I_b = \frac{2}{5} m_1 R^2$$

Donde: R  $\equiv$  Radio de la bola.

y reemplazando en la ecuación 1.18 se llega a:

$$m_1 \left( 1 + \frac{2}{5} \left( \frac{R}{r} \right)^2 \right) \ddot{x} = m_1 g \theta$$

Con estas ecuaciones se puede pasar a obtener el siguiente diagrama de bloques; realizando la respectiva transformación de Laplace:



$F_1(s) \equiv$  Función de transferencia de la viga.  
 $F_2(s) \equiv$  Función de transferencia de la bola.

Fig.1.11 Diagrama de bloques de la viga y bola.

Como puede observarse en la figura 1.11 el sistema se ha reducido a una forma lineal en la cual se tiene una función de transferencia de la viga en cascada con la función de transferencia de la bola. Y se tendrá información de la dinámica de las dos partes que conforman el sistema. Por la construcción y forma del mismo se puede aún reducir más el sistema, ya que la dinámica de la viga

es mucho más rápida que el de la bola, se puede despreciar, lo cual nos da un sistema cuya función de transferencia es:

$$x(s) = \frac{m_1 g F(s)}{k_1 l_2 \left( m_1 \left( 1 + \frac{2}{5} \left( \frac{R}{r} \right)^2 \right) s^2 \right)} \quad (1.20)$$

Que es la función de transferencia simplificada mencionada anteriormente, unicamente con otro valor de ganancia, la misma que depende de la relación entre el radio de la bola (R) y el de rodaje (r), y entra en juego el amortiguamiento del actuador, con lo cual se cambiará la dinámica del sistema.

Con esto se indica que el modelo de la viga y bola se trata de una pareja de ecuaciones no lineales, que bajo ciertas condiciones y despreciando la dinámica de la viga se llega a un modelo adecuado, como se indicó anteriormente.

Además es importante que al ser el objetivo primordial el diseño y construcción del sistema, con su interfase adecuada para el trabajo con los computadores análogos, no se pasa a mayores detalles en su modelación.

### 1.2.2.- SIMULACION DE LA VIGA Y BOLA.

Como ya lo indique anteriormente, un mayor estudio en la modelación y simulación del sistema completo es muy

amplio y puede ser motivo de otra tesis, ya que nos quedaría por estudiar el caso del control no lineal, y para determinar los parámetros se puede utilizar la Identificación de sistemas. Pero debido a las consideraciones anotadas anteriormente, se realizará la simulación de la función de transferencia más sencilla, y su justificación total se tendrá con los resultados obtenidos en el capítulo III, donde se trabaja con el equipo construido.

Para realizar el estudio teórico en esta parte, la función de transferencia utilizada se la puede determinar aplicando un voltaje al actuador y midiendo el tiempo que toma en rodar la bola toda la longitud de la viga, y la ganancia de la función de transferencia se obtiene de las ecuaciones de movimiento.

Lo anterior para determinar en forma práctica la función de transferencia simplificada, pero entre la entrada al actuador y la salida total, que es la posición de la bola, esto como se indica en la figura 1.12 en la

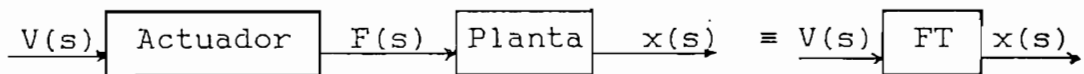


Fig. 1.12 Diagrama de bloques del sistema en forma simplificada.

cual se puede entender que al aplicar un voltaje conocido a la entrada se puede determinar la aceleración de bola por medio de la siguiente ecuación:

$$e = \frac{1}{2}at^2 + V_0t \quad (1.21)$$

Para  $V_0 = 0$

Donde:  $e \equiv$  Espacio recorrido.  
 $t \equiv$  Tiempo.  
 $a \equiv$  Aceleración.  
 $v_0 \equiv$  Velocidad inicial

La ganancia de la función de transferencia considerada simplificada al doble integrador, es la relación entre la aceleración y el voltaje aplicado, esto es:

$$\frac{x(s)}{V(s)} = \frac{K}{s^2}$$

$$\text{De donde: } \frac{\ddot{x}}{V} = K. \quad \text{pero } \ddot{x} = a.$$

$$K = \frac{a}{V} \quad (1.22)$$

En la ecuación 1.22 se conoce el voltaje aplicado y la aceleración se la determina por medio de la ecuación 1.21. Una mejor explicación la tenemos si nos fijamos en la fig 1.13, en la cual tenemos el ángulo de inclinación de la viga y su relación con el desplazamiento vertical en el brazo del actuador, de donde:

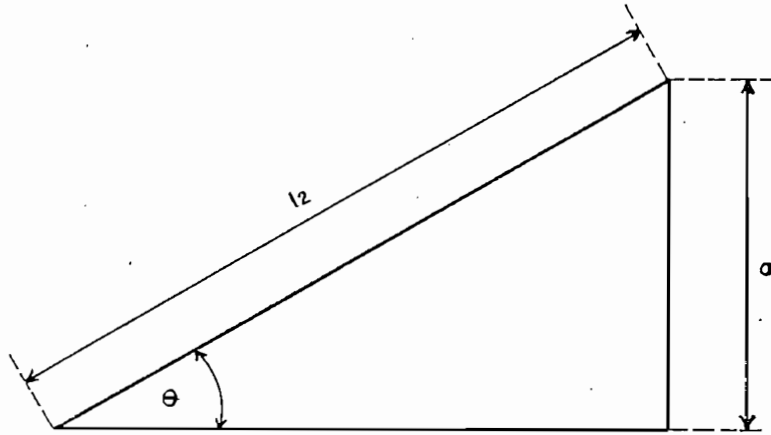


Fig 1.13 Desplazamiento lineal del actuador.

se obtiene:

$$\text{Sen } \theta = \frac{a}{l_2} \text{ pero } \theta \text{ es pequeño.}$$

$$\theta = \frac{a}{l_2}.$$

La relación entre el voltaje de entrada y el desplazamiento es lineal por el actuador utilizando con lo cual:

$$a = K_1 V$$

$$\text{y } \theta = \frac{K_1 V}{l_2}$$

Y si hacemos referencia al sistema simplificado y según la ecuación 1.2 se tiene:

$$\theta = \frac{\ddot{x}}{g}$$

$$\frac{\ddot{x}}{g} = \frac{K_1 V}{l_2}$$

$$\frac{\ddot{x}}{V} = \frac{K_1 g}{l_2} \quad (1.23)$$

Siendo parámetros constantes reemplazamos:

$$\frac{K_1 g}{l_2} = K$$

Se llega a la misma ecuación 1.22, que será nuestra función de transferencia en estudio. Para determinar la ganancia los datos son los siguientes:

$$V = 2.78 \text{ V.}$$

$$e = 0.98 \text{ cm.}$$

$$t = 2.6 \text{ s.}$$



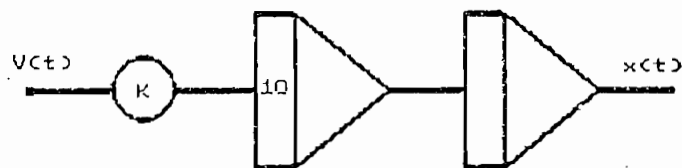
Con lo cual nuestra función es:

$$FT(s) = \frac{x(s)}{V(s)} = \frac{2.128}{s^2} \quad (1.24)$$

Y podemos realizar su simulación en el computador análogo del sistema en lazo abierto, y se tiene:

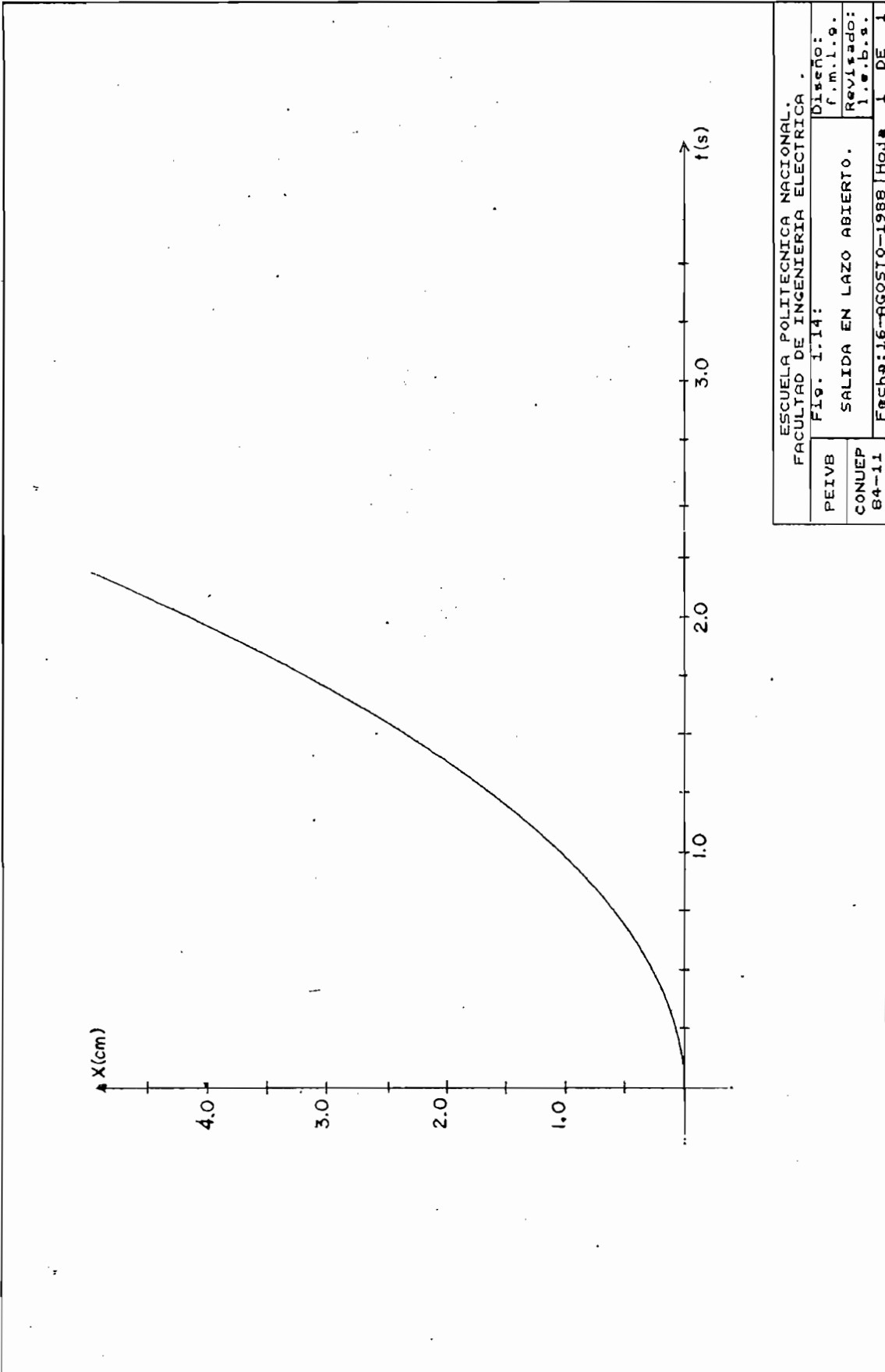
$$\frac{x(s)}{V(s)} = 2.128 s^{-2}$$

Cuya diagrama de simulación análoga es:



$$K = 0.213$$

El resultado de esta simulación se halla en la fig. 1.14, en la cual se puede notar claramente la



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA	
PEIVB	Fig. 1.14:
CONUEP	SALIDA EN LAZO ABIERTO.
84-11	Fecha: 16-AGOSTO-1988 Hora: 1 DE 1
	Diseño: f.m.l.g.
	Revisado: l.e.b.s.

inestabilidad del sistema, y no cabe un mayor análisis para su determinación, ya que tiene un crecimiento brusco a una entrada paso, y también es explicable, si damos una mirada a su lugar geométrico de las raíces (LGR) suponiendo una ganancia variable, se presenta en la figura 1.15 donde podemos observar el doble polo en el origen, y su LGR se halla en el eje imaginario por lo cual se está en el límite de inestabilidad para el caso de realimentación unitaria. La respuesta en el tiempo para esto se halla en la fig. 1.16 y en realidad se nota que estamos en el límite de estabilidad y se tiene un sistema oscilatorio alrededor del valor de entrada. Con lo cual confirmamos la necesidad de realizar un control activo en el sistema para lograr resultados más estables. Los resultados obtenidos son coherentes si tomamos la transformada inversa de Laplace para ambos casos lo cual nos da:

$$\text{- Lazo abierto : FT (s) = } \frac{2.128}{s^2}$$

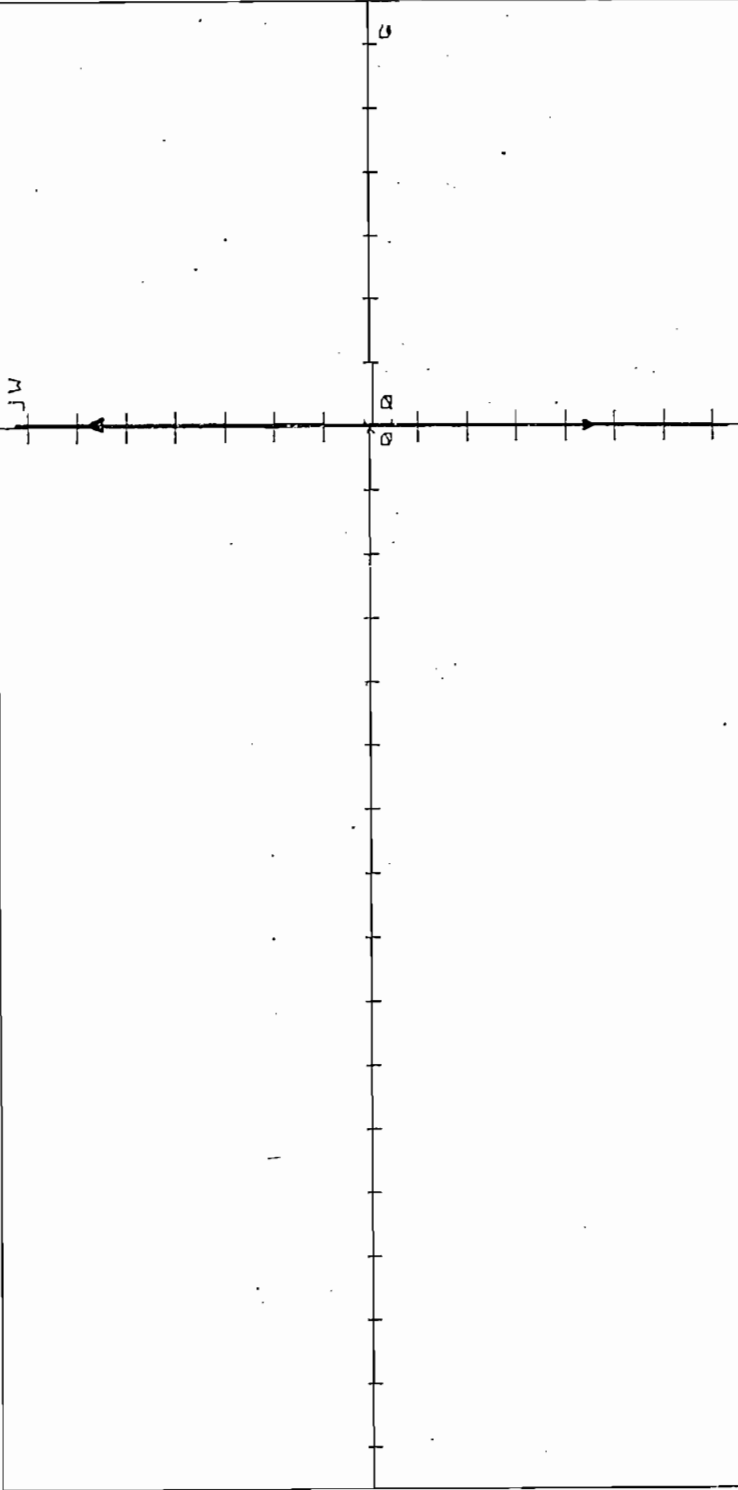
$$\text{Si } V(t) = 1V. \quad x(t) = 1.064*t^2$$

$$\text{- Lazo cerrado : FT(s) = } \frac{2.128}{s^2 + 2.128} \quad \text{y si } V(t) = 1V$$

$$x(t) = 1 - \text{Cos } 1.459*t$$

COMPENSACION MEDIANTE EL LCR

22-AUG-66

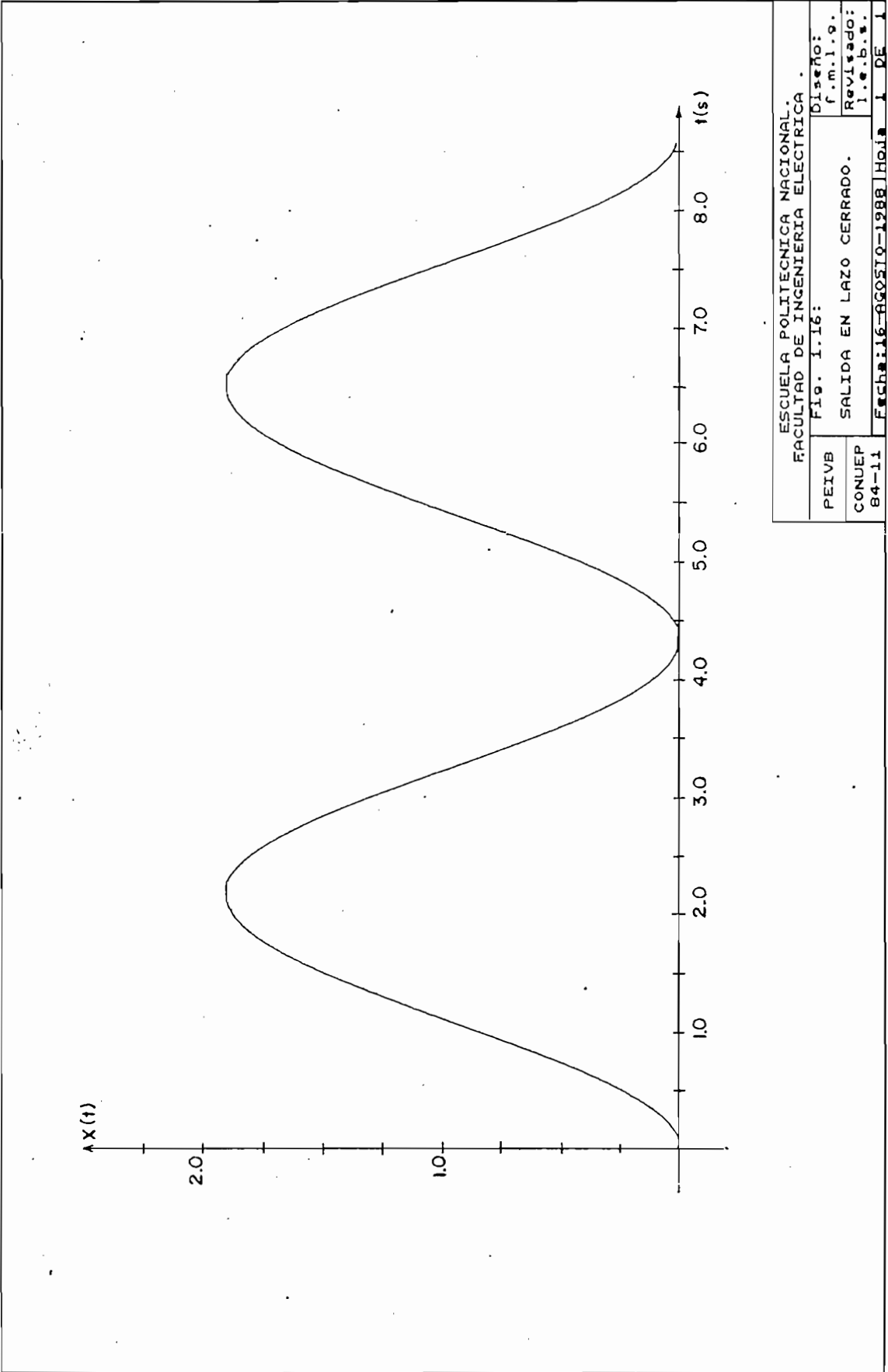


Archivo: VIGA

1 División = 0.3 Unidades

POLO = CERO

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .	
Fig. 1.15:	Diseño:
PEIVB LUGAR GEOMETRICO DE LAS	f.m.l.o.
CONUEP RAICES DEL SISTEMA ORIGINAL	Revisado:
84-11	I.e.b.s.
Fecha: 16-AGOSTO-1988 Hoja 1 DE 1	



Con lo cual se confirma los resultados obtenidos en el computador análogo con la simulación de la función de transferencia del sistema en estudio.

Para demostrar el cambio en la dinámica del sistema con otra bola de diferente diámetro se obtuvieron los siguientes datos:

$$\begin{aligned}V &= 1.63 \text{ V.} \\e &= 0.98 \text{ cm.} \\t &= 2.5 \text{ s.}\end{aligned}$$

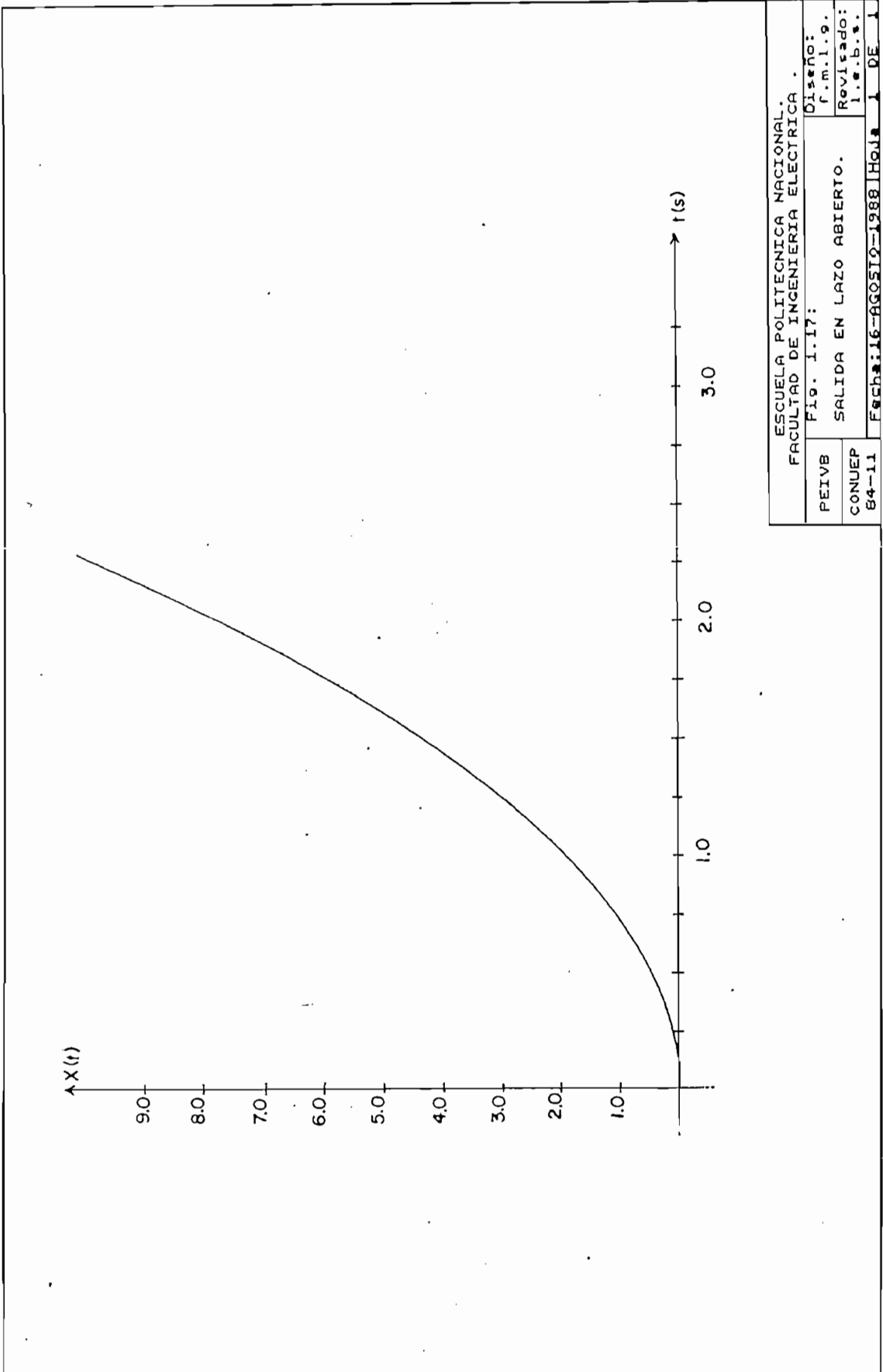
Que nos da la función de transferencia:

$$FT(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{3.926}{s^2} \quad (1.25)$$

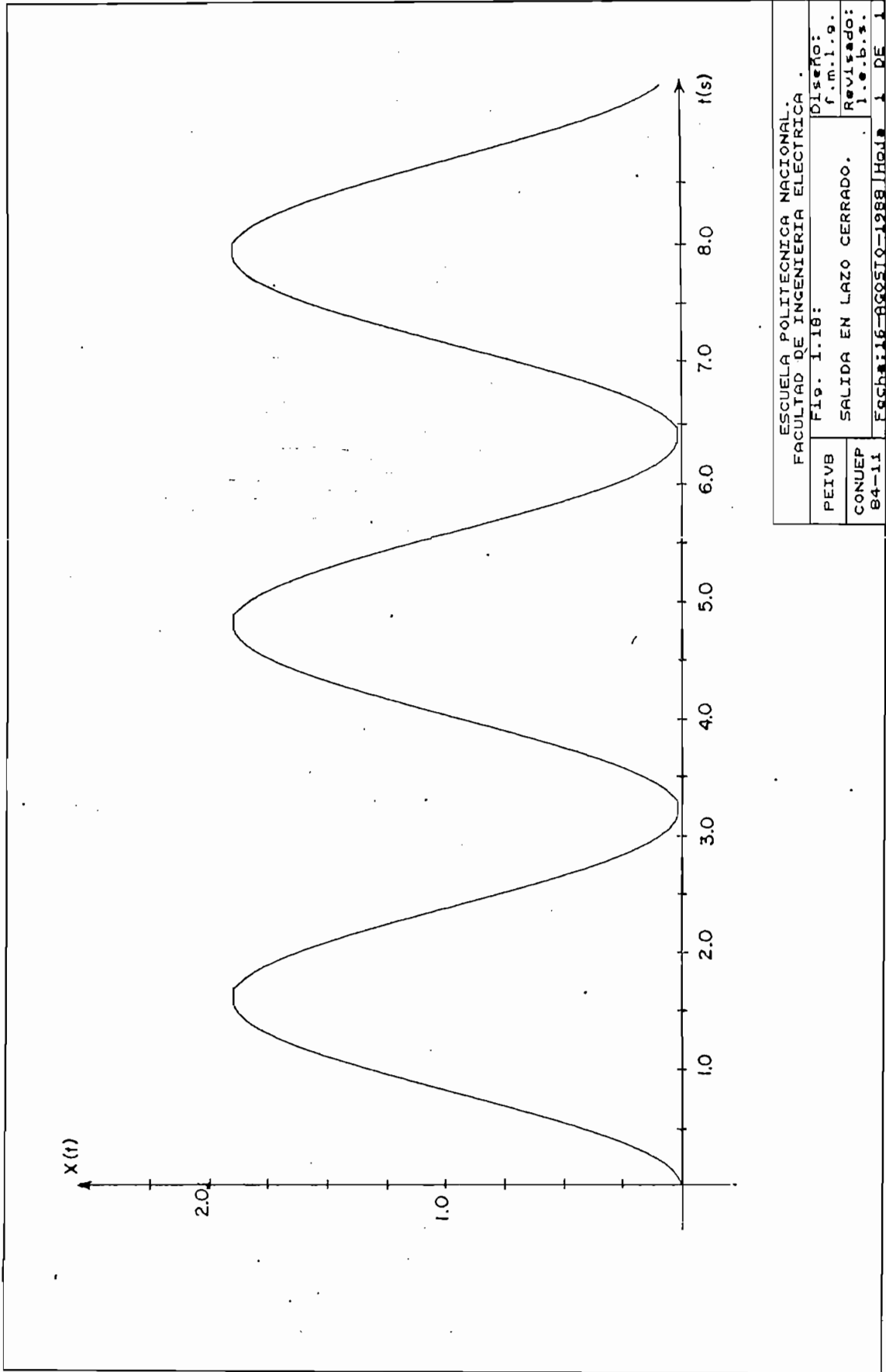
Y es muy claro su cambio, no en la forma de su respuesta, sino en las características de su dinámica. Los resultados de su simulación en lazo abierto y cerrado se hallan en las fig. 1.17 y 1.18.

### 1.3.- METODOS DE COMPENSACION TEORICA DEL SISTEMA.

Una vez obtenida la función de transferencia del sistema mediante su modelación, se trabaja sobre ella para obtener especificaciones de respuesta deseada, para esto es necesario incluir en el sistema de control una compensación activa, la cual dependerá de la persona que realice el diseño, ya que es conocido que existen diferentes formas de realizarlo, tanto con las técnicas llamadas



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .	
PEIVB	Fig. 1.17:
CONUEP	Salida en lazo abierto.
84-11	Fecha: 16-AGOSTO-1988
	Diseño: f.m.l.g. Revisado: l.e.b.s. Hoja 1 DE 1



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .	
PEIVB	Fig. 1.18:
CONJEP	Salida en lazo cerrado.
84-11	Fecha: 16-Agosto-1988 Hoja 1 DE 1



clásicas (Redes de adelanto, atraso y atraso-adelanto) así como con las llamadas técnicas de diseño modernas.

En general en nuestro equipo al tener la modelación de la planta se puede aplicar varios métodos de compensación, e incluso es posible realizar un control no lineal, control óptimo, control por realimentación de estado, control por realimentación de salida y con la interfase adecuada se puede realizar el control discreto. Bien en realidad una gran variedad de posibilidades y la opción que se tome dependerá del diseñador.

Ya que la tesis comprende el diseño y construcción del equipo, no cabe realizar un estudio más profundo de cada uno de los posibles métodos de compensación y únicamente en una forma demostrativa del alcance, uso del equipo y de su funcionamiento se indicará tres formas de lograr la estabilización, así como especificaciones de respuesta requeridas.

#### 1.3.1.- COMPENSACION DE ADELANTO DE FASE.

Se empieza con una técnica clásica de compensación, la misma que se trata de una técnica de prueba y error, pues es necesario antes lograr obtener el compensador final, realizar varias pruebas y comprobaciones, que es una desventaja de éste método que no nos indica si existe una solución para el problema. Además se puede tener exigencias muy restringidas o contradictorias que no pueden ser satisfechas.

En general el problema consiste en encontrar una

señal de mando ( $m(t)$ ) apropiada tal que la variable controlada ( $c(t)$ ) sea la deseada. Para ello es importante reconocer la naturaleza del sistema que se va a diseñar y su funcionamiento, para lograr las características del sistema que están dadas en términos de su estabilidad, seguridad, respuesta transitoria y precisión.

Las especificaciones exactas son usualmente dadas por los requerimientos de funcionamiento del sistema y ciertas características son más importantes en algunos que en otros. Siendo posible además que el equipo de compensación pueda ser insertado en cascada con el lazo directo, como parte de la realimentación o en lazo menor, esto de acuerdo a las características de la planta a controlar.

Para nuestro caso particular en primer lugar indicamos las especificaciones de respuesta deseada. Y para una mejor comprensión de los requerimientos se los da en el dominio del tiempo, en ellas se debe tener presente las características físicas del equipo construido, ya que si se exige demasiado se puede producir inestabilidad, esto especialmente en la rapidez de respuesta que debido a la inercia de la bola podría salirse de la viga.

Bajo estas consideraciones podemos presentar las siguientes especificaciones deseadas:

$$M_p \leq 15\%$$

$$t_s = 5 \text{ s.}$$

Donde:  $M_p$   $\equiv$  Máximo sobreimpulso.  
 $t_s$   $\equiv$  Tiempo de establecimiento.

Con esto se pretende mejorar la respuesta transitoria del sistema como la parte estable. Por las características del sistema sin compensación utilizamos una red de adelanto que mueve el L.G.R. hacia la izquierda, además en sistemas realimentados se utilizan para que con su efecto derivativo sean fuertemente realimentados los cambios bruscos de la diferencia entre la entrada y la salida para lograr un mejor comportamiento dinámico. El compensador es de la forma:

$$R.A. = \frac{s + 1/T}{s + 1/(\alpha T)} \quad \text{con } \alpha < 1$$

Para la determinación de los parámetros de la red compensadora existen varios métodos, pero se llegan a obtener los mismos resultados, el que se usa se conoce como diseño del punto, en el cual se determina la posición de un polo permitido de lazo cerrado a partir de las especificaciones del sistema, se cambia el L.G.R. para asegurar que una rama del lugar pasa por dicho punto.

La localización de los polos dominantes según las especificaciones anteriores es:

$$s_{1-2} = -0.8 \pm j 1.234$$

Y se debe modificar el L.G.R. de tal forma que pase por estos puntos, con lo cual la red compensadora necesaria es:

$$R.A. = 26.56 * \frac{s + 1.3}{s + 35.57}$$

El L.G.R. sin compensar y variando la ganancia se halla en la figura 1.15, mientras en la figura 1.19 se halla el L.G.R. compensado con la red de adelanto indicada anteriormente. Su respuesta en el tiempo está en la figura 1.20, en la misma que puede ser comprobado las especificaciones deseadas, como son su máximo sobreimpulso que en este caso es:

$$M_p = 30\%$$

Y su tiempo de establecimiento es:

$$t_s = 5 \text{ s.}$$

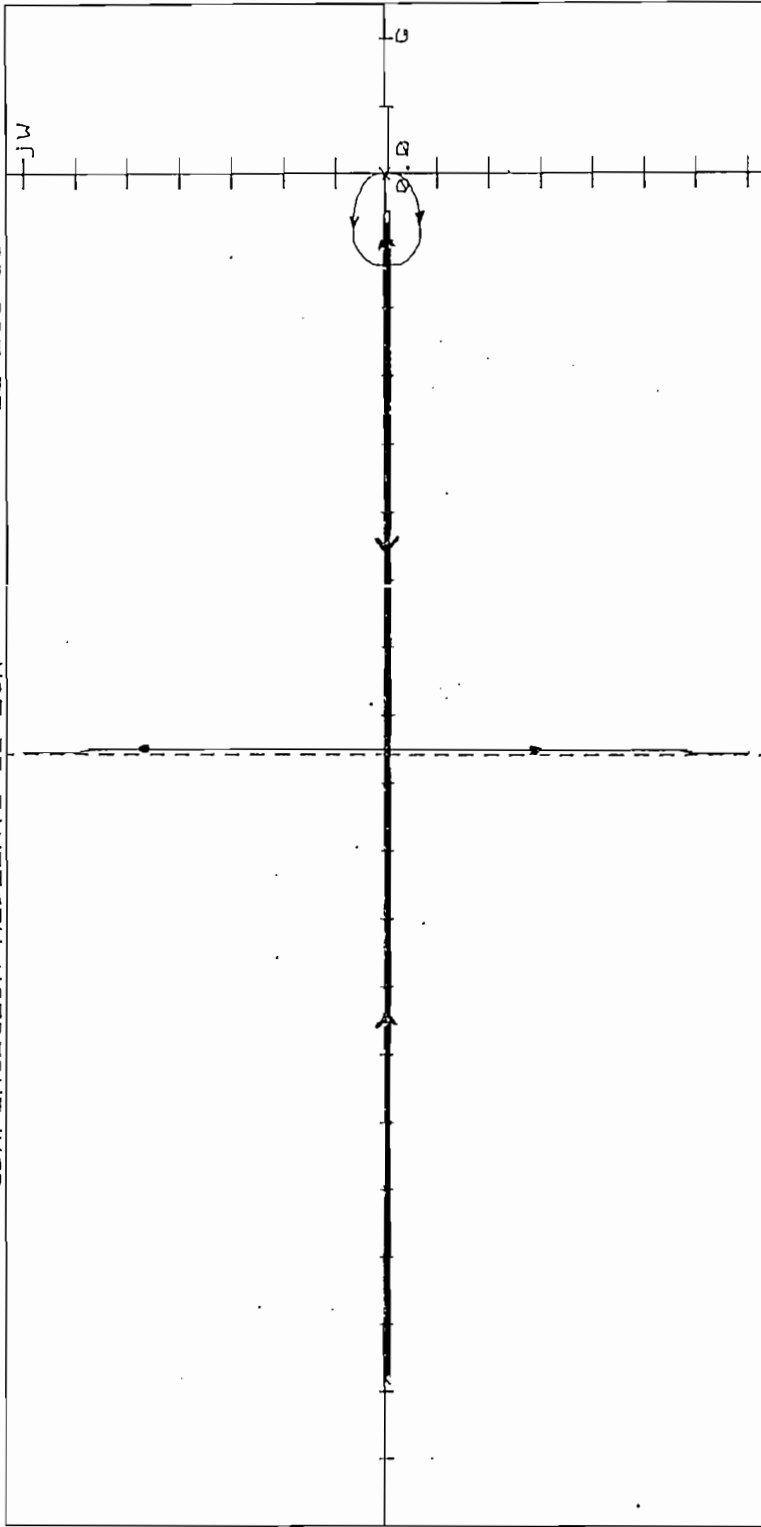
Mientras que su error de posición es cero como se esperaba al ser un sistema tipo dos, para el cual se tendrá un error de aceleración, que para éste es:

$$K_a = 2.07$$

Es importante indicar que para obtener el compensador final fue necesario realizar varias pruebas y corregir errores para cada localización del polo y cero de la red de adelanto, para su comprobación se utilizó el computador análogo. Luego en el capítulo III se implementará el mismo compensador planteado y se obtendrá la respuesta de la planta real. Al ser la compensación teórica y usando únicamente la simulación de la función de

22-AUG-66

COMPENSACION MEDIANTE EL LCR

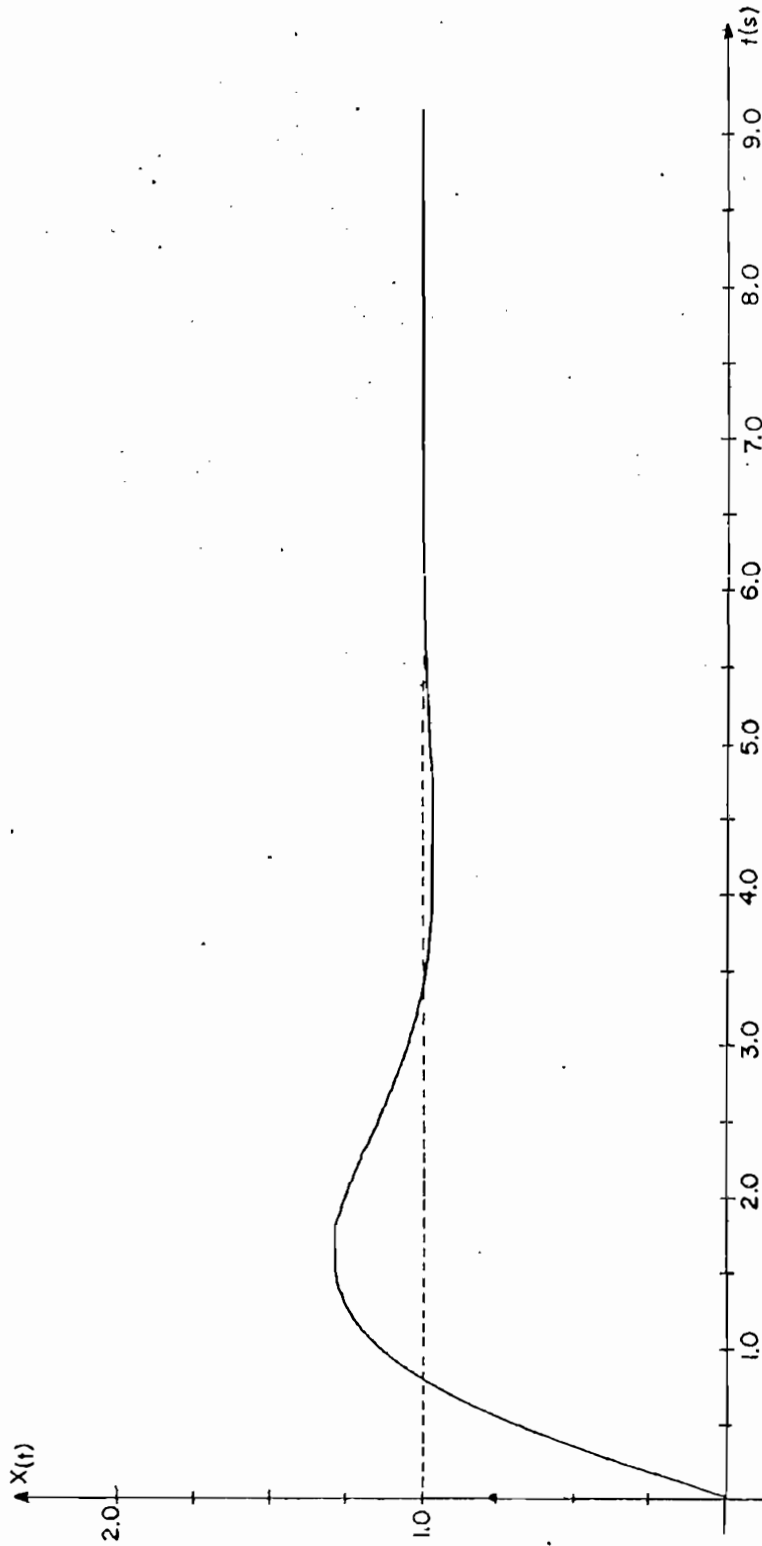


Archivo: VIGA.AD

1 División = 2 Unidades

$s = \text{POLO} = \text{CERO}$

ESUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA		Diseño:
PEIVB	LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES CON COMPENSADOR EN ADELANTO.	f.m.l.g.
CONUEP 84-11	Fecha: 16-AGOSTO-1988	Revisado: I.E.B.S.
		1 DE 1



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA .	
PEIVB	FIG. 1.20:
CONUEP	RESPUESTA EN EL TIEMPO DEL
84-11	SISTEMA COMPENSADO.
	Diseño: f.m.l.g.
	Revisado: l.e.b.s.
	Fecha: 10-AGO-510-1988   Hoja 1 de 1

transferencia que modela nuestra planta se observa que los resultados obtenidos son buenos, a pesar de no lograr precisión especialmente en el caso del sobreimpulso, para un mejor análisis cuantitativo se presenta el cuadro de errores porcentuales en los resultados obtenidos y los deseados:

	Deseado	Obtenido	€%
$M_p$	15%	30%	100%
$t_s$	5 s.	5 s.	0%

Se confirma el trabajo adecuado del compensador implementado, lográndose obtener un sistema estable. En cuanto al compensador se puede indicar que su polo está alejado de la parte real de los polos deseados, lo cual realmente los convierte en dominantes y el sistema se comportará como uno de segundo orden, pero es importante indicar que la presencia del cero remanente hace crecer el sobreimpulso de la respuesta del sistema, y es necesario tener presente para la determinación de los parámetros del compensador. En este caso particular a pesar de ello, no fue posible lograr bajar el sobreimpulso con el cambio en la localización del cero y polo de la red compensadora, y se optó por la que dio menor sobreimpulso.

Para su implementación física no se tiene ninguna complicación, pues la red compensadora será simulada

fácilmente, como lo muestra la figura 1.21, en el computador análogo, y su entrada será la salida del comparador que se halla en el equipo, y su salida irá a la entrada del actuador, lo cual permite la estabilización del sistema real.

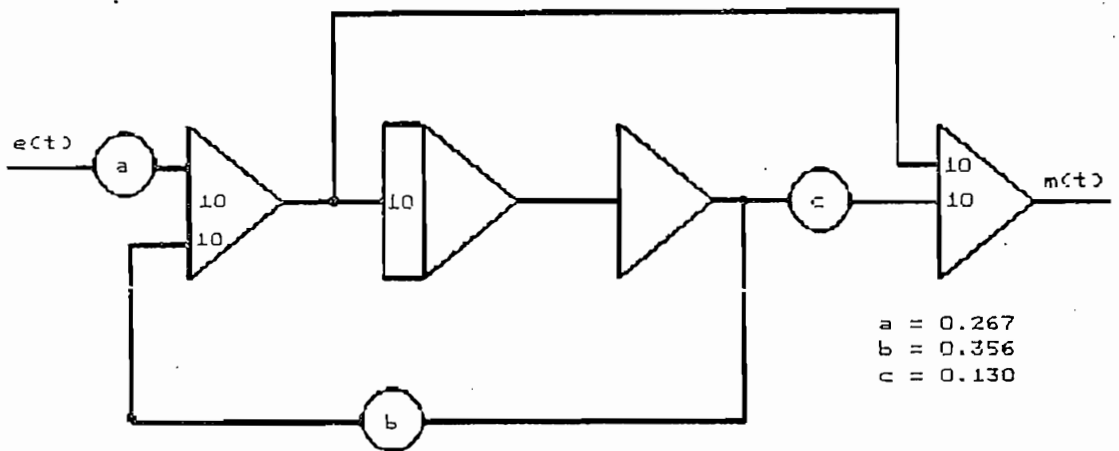


Fig. 1.21 Simulación de la compensación en adelanto.

### 1.3.2.- COMPENSACION MEDIANTE ACCIONES DE CONTROL.

Otra posibilidad de lograr alcanzar la estabilización del sistema es por medio de la aplicación de las acciones de control combinadas como es el caso del controlador proporcional-integral-derivativo.

La razón para su utilización es por cuanto deseamos mejorar la rapidez de respuesta (Respuesta transitoria) y no perder la exactitud de error de posición



de estado estable. Bajo estas consideraciones se debe utilizar un P.D. (Proporcional-Diferencial) ya que al ser un sistema tipo dos su error de posición es cero. Siendo el P.D. una red de adelanto en la cual la posición del polo se halla muy alejada del cero, se logrará los resultados deseados en la parte transitoria, como ya ocurrió en el numeral anterior.

Para su implementación tenemos que valernos de un artificio, en el cual tenemos que si la entrada al sistema es constante se puede obtener la derivada del error de la siguiente forma:

$$e = R - C$$

Con  $R = \text{Constante}$

$$\frac{de}{dt} = - \frac{dc}{dt}$$

Y podemos implementar fácilmente el compensador deseado. Para obtener los valores adecuados para los parámetros del P.D. existen varios métodos de cálculo, como son el de Ziegler-Nichols, el método de Cohen-Coon y el método del tanteo. Para el caso de estudio debido a la facilidad de trabajo con el computador análogo se optó por el último método. Es decir por el de tanteo, para esto se utiliza la simulación de la planta y se implementa el siguiente circuito análogo:

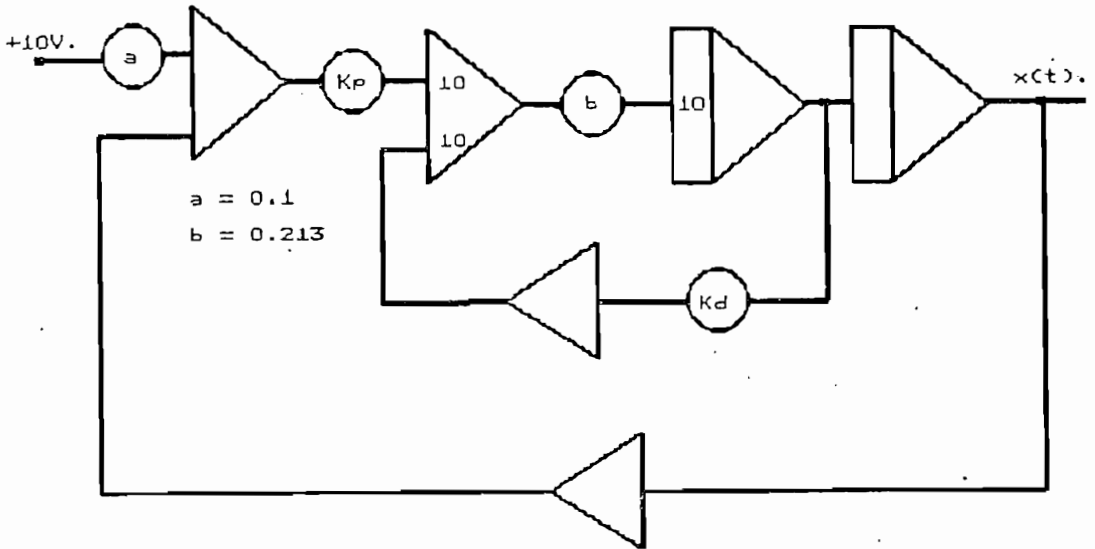


Fig. 1.22 Simulación de la compensación P.D.

Para la obtención de los parámetros con el criterio anterior, en primer lugar con la ganancia derivativa en cero se incrementa la ganancia proporcional hasta que el sistema comience a oscilar y luego se incrementa la acción derivativa para eliminar, de esta forma se logra obtener la respuesta representada en la figura 1.23 que se obtuvo con:

$$k_p = 1.40$$

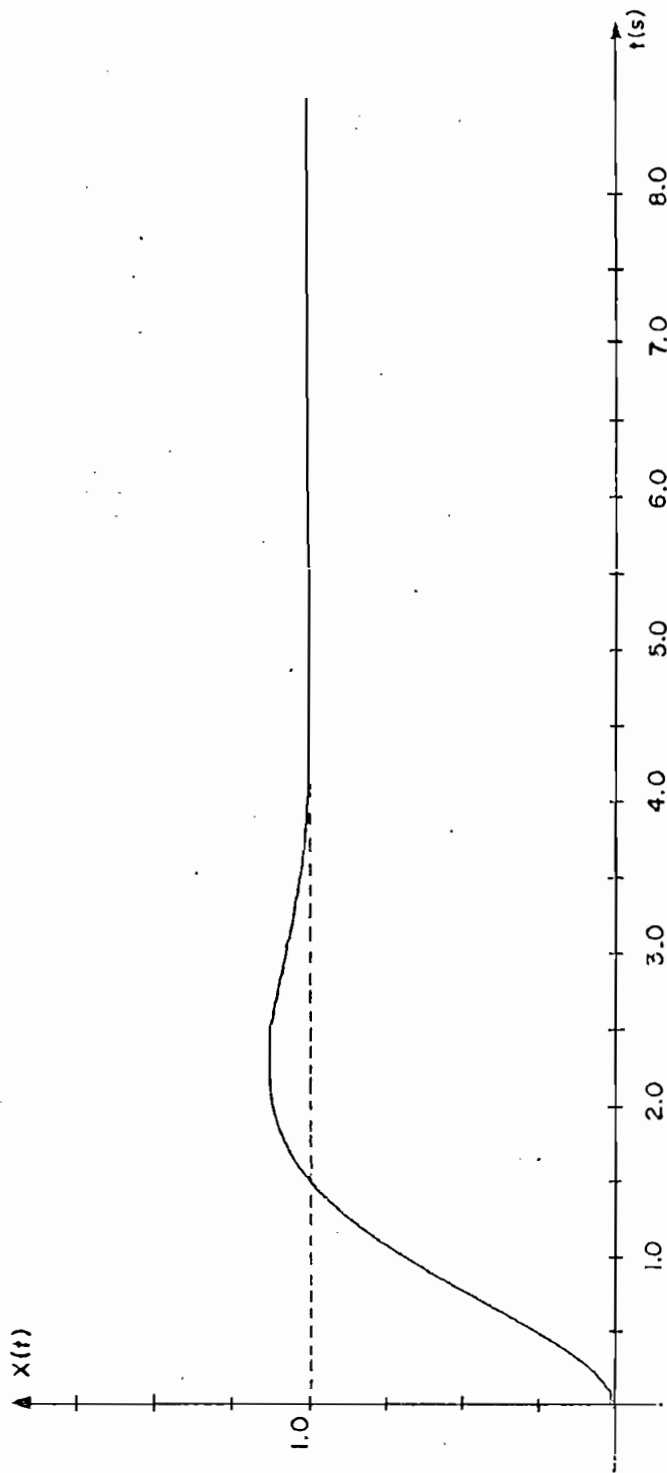
$$K_d = 0.90$$

Con estos valores se obtiene una respuesta adecuada cuyas especificaciones son:

$$M_p = 12\%$$

$$t_s = 5 \text{ s.}$$

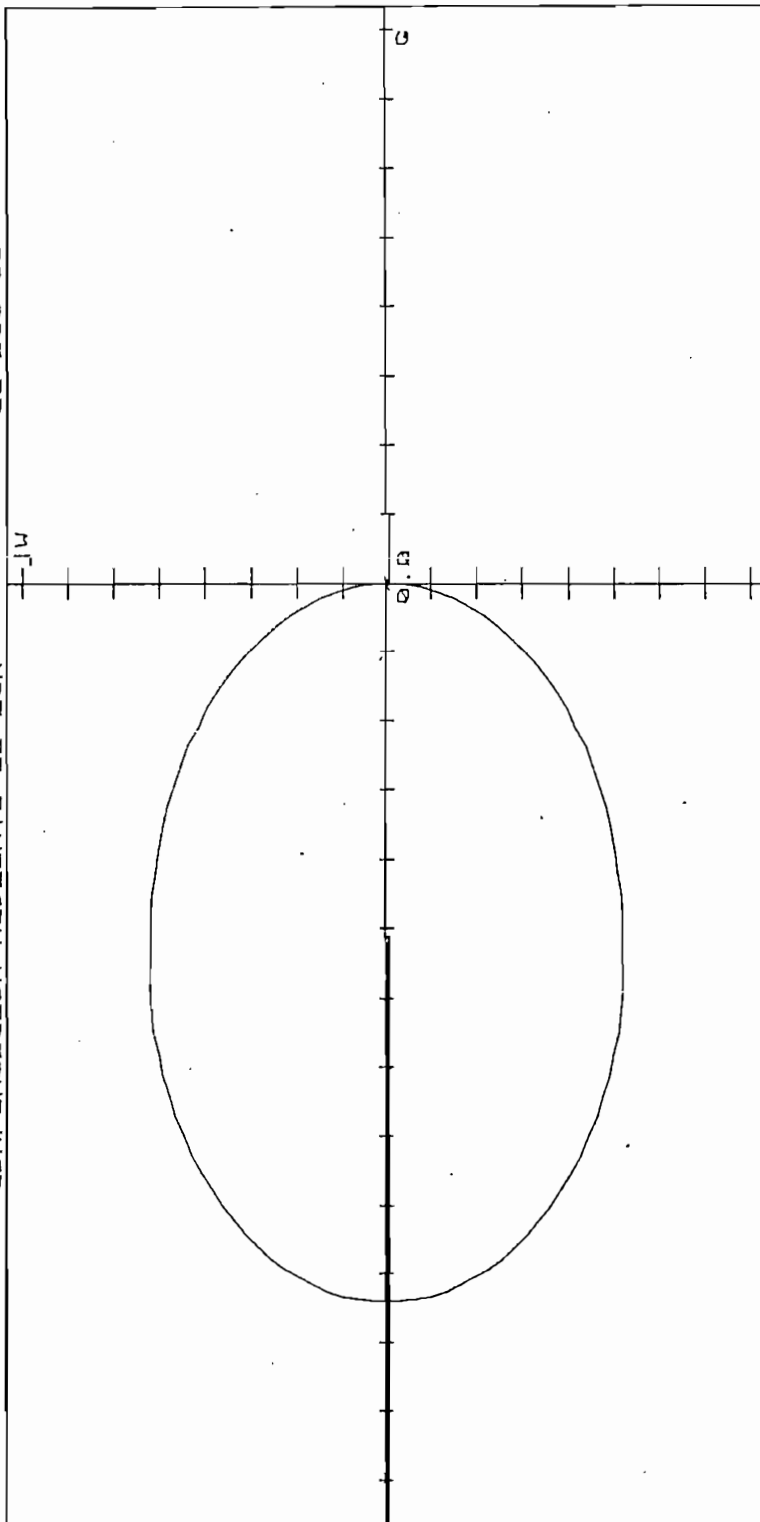
$$e_{ss} = 0$$



ESUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA		DISEÑO: f.m.l.g.	
PEIBS CONJEP 84-11	SALIDA CON COMPENSADOR PROPORCIONAL-DERIVATIVO.	REVISADO: l.e.b.s.	
Fecha: 15-ENERO-1988		Hoja 1 de 1	

COMPENSACION MEDIANTE EL LCR

22-AUG-66



\*=POLO =CERO

1 División = 0.3 Unidades

Archivo.VIGA.PD1

ESUELA POLITECNICA NACIONAL.		
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .		
PEIVB	Fig. 1.24:	Diseño:
CONUEP	LUGAR GEOMETRICO DE LAS RAICES CON COMPENSADOR PROPORCIONAL-DERIVATIVO.	f.m.l.o.
84-11	Fecha:16-AGOSTO-1988	Revisado: I.e.b.s.
		Hoja 1 DE 1

Que es un sistema con una estabilidad relativa muy buena, y mejor aún que el logrado con el compensador en adelanto, considerando que se ha obtenido un menor sobreimpulso con un tiempo de establecimiento similar y su error en estado estable cero.

Se presenta además el L.G.R. obtenido con este tipo de compensador en la figura 1.24, en la cual se puede observar lo referente a la estabilidad relativa del sistema. Todo ello considerando la modelación simplificada encontrada anteriormente. Para su implementación práctica será necesario obtener de alguna forma la derivada del error o de la salida, esto se analizará más detenidamente en el tercer capítulo, junto a la planta física real.

### 1.3.3.- COMPENSACION POR REALIMENTACION DE ESTADO.

Esto es parte de lo conocido como asignación de polos, que es un método de síntesis y da lugar a un solo controlador para ciertas especificaciones. Para ello es necesario que el sistema esté representado por:

$$X = AX + Bu$$

$$y = CX + Du$$

Los polos del sistema están determinados por la matriz A que da las características del sistema, la misma que puede ser modificada por la realimentación de estado o

de salida. Es necesario tener presente la ley de control que está dada por:

$$u = r - K_p^T X_p$$

Donde:  $u \equiv$  Señal de entrada a la planta.  
 $r \equiv$  Señal de referencia.  
 $X_p \equiv$  Vector de estado.  
 $K_p \equiv$  Vector columna de ganancias constantes =  $[K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_p]^T$

Con esto se logra modificar la matriz de lazo cerrado así:

$$A_c = A - B K_p^T$$

La misma que tiene los valores propios deseados, y pueden ser variados según la matriz de realimentación  $K_p^T$ .

Para el caso de estudio particular en primer lugar es necesario obtener la representación del sistema por medio de variables de estado, lo cual nos entrega las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2.128 \end{bmatrix} u \quad (1.28)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Donde:  $X_1$   $\equiv$  Variable de estado  $\equiv$  Posición de la bola.  
 $X_2$   $\equiv$  Variable de estado  $\equiv$  Velocidad de la bola.  
 $u$   $\equiv$  Señal de entrada.  
 $y$   $\equiv$  Señal de salida.

Y se obtiene las siguientes matrices de la planta:

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.128 \end{bmatrix} \quad C_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Para determinar el vector de realimentación con ganancias constantes se sigue el siguiente procedimiento:

- 1.- Determinar en primer lugar si el sistema es controlable; para lo cual obtenemos la matriz  $N_p$ :

$$N_p = \begin{bmatrix} B_p & A_p B_p & A_p^2 B_p & \dots & A_p^{n-1} B_p \end{bmatrix}$$

Siendo en nuestro sistema  $n = 2$  se llega a:

$$N_p = \begin{bmatrix} 0 & 2.128 \\ 2.128 & 0 \end{bmatrix}$$

La misma que tiene un rango de 2 que nos indica que el sistema es controlable.

2.- Obtener la descripción del sistema en la forma canónica controlable; y para el sistema es:

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad C_c = \begin{bmatrix} 2.128 & 0 \end{bmatrix}$$

3.- Seleccionar los valores de los polos deseados y obtener el polinomio característico deseado, para el sistema se tomará los valores sugeridos en la compensación por adelanto de fase para lograr una comparación, lo cual nos da:

$$\tau_{1-2} = -0.8 \pm j 1.234$$



$$P_d(\tau) = \tau^2 + 1.6 \tau + 2.16$$

4.- Realizar la realimentación de estado en la forma controlable para lo cual tenemos que:

$$A_{pcc} = A_c - B_c K_c^T$$

$$y \quad \det[\tau I - A_{pcc}] = P_d(\tau) = \det[\tau I - A_{dc}] \quad (1.30)$$

Es decir:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_{c1} & -K_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2.16 & -1.6 \end{bmatrix}$$

$$Y \text{ se obtiene:} \quad \begin{aligned} K_{c1} &= 2.16 \\ K_{c2} &= 1.6 \end{aligned}$$

Para tener los valores de ganancia con la planta original se hace:

$$K_p^T = K_c^T * T^{-1} \quad (1.31)$$

y para hallar  $T^{-1}$ :

$$T = N_p * N_c^{-1} \quad (1.32)$$

En el sistema en estudio nos hace falta determinar

la matriz  $N_c$  que es:

$$N_c = \begin{bmatrix} B_c & A_c B_c & A_c^2 B_c & \dots & A_c^{n-1} B_c \end{bmatrix}$$

Para nuestro sistema con  $n = 2$  se obtiene:

$$N_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Con lo cual se puede calcular T:

$$T = \begin{bmatrix} 2.128 & 0 \\ 0 & 2.128 \end{bmatrix}$$

Y se obtiene los valores del vector de realimentación de la planta original que es:

$$K_p^T = \begin{bmatrix} 1.02 & 0.75 \end{bmatrix}$$

5.- Calcular  $A_{pc} = A_p - B_p * K_p^T$

$$A_{pc} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2.16 & -1.6 \end{bmatrix}$$

Con esto se tiene la matriz del sistema de lazo cerrado con la localización deseada de los valores propios o polos de la planta.

Lo anterior es posible realizarlo siempre y cuando sean medibles los estados del sistema, en el caso particular de estudio para la simulación. esto es factible, mientras en el caso práctico se puede obtener en una forma aproximada la medición de la velocidad de la bola; debido a la distribución del sistema, se lo tiene por medio de la integración de la señal del transductor angular de la viga.

Para su implementación en el computador análogo hacemos uso del diagrama presentado en la figura 1.25 que es la simulación de la planta reducida al doble integrador, y su respuesta a una entrada paso unitario la podemos ver en la figura 1.26 de donde se pudieron obtener los siguientes datos experimentales:

$$M_p = 12\%$$

$$t_o = 5 \text{ s.}$$

$$e_{ss} = 0$$

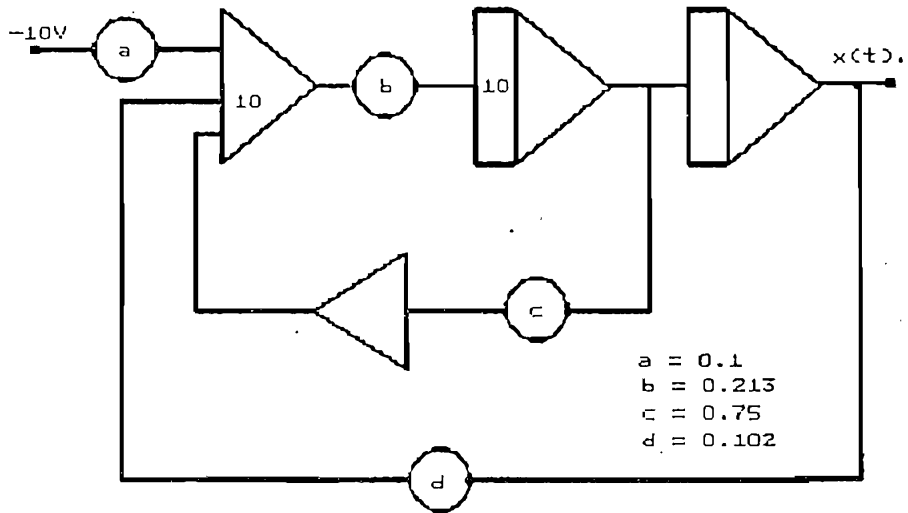
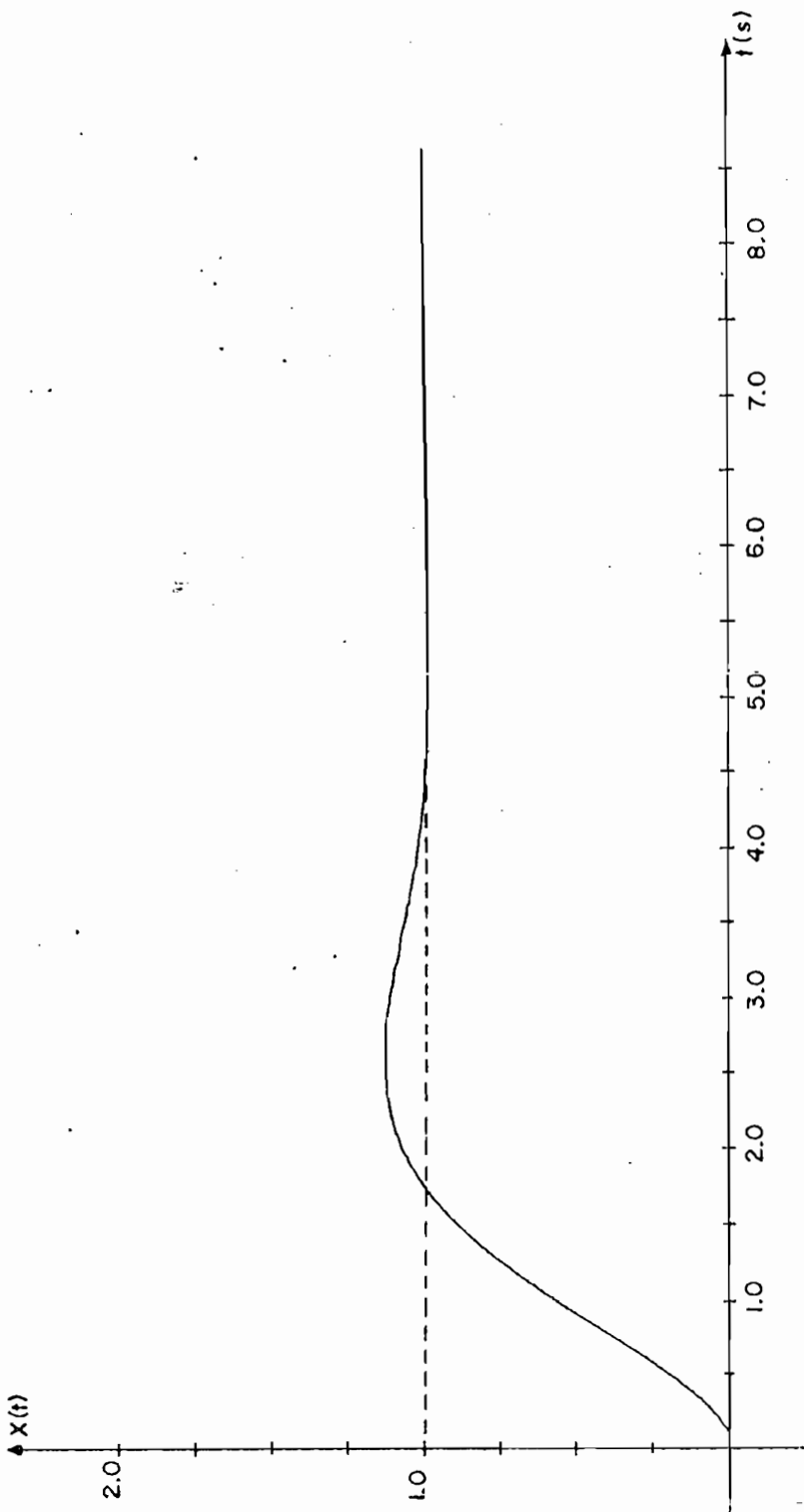


Fig. 1.25 Simulación para realimentación de estado.

Que es el sistema deseado, con una estabilidad relativa muy buena y mejor al logrado con el compensador en adelanto y en una forma mucho más fácil, ya que únicamente se trata de ganancias constantes en la realimentación. En el tercer capítulo se afronta esta solución con la planta física real.

De esta forma se ha presentado tres formas de lograr estabilizar y compensar el sistema original, pero es claro que sobre esto se puede trabajar aún más, pero es importante notar su aplicación y realmente convertirse en un equipo didáctico para el área de Control y Sistemas. Queda abierta la posibilidad de realizar cualquier adecuación para obtener diferentes resultados y poder aplicar el análisis y síntesis de los sistemas de control.

Además no se ha profundizado en su análisis ya que se lo hará en forma comparativa en el último capítulo con los resultados que se obtengan con el equipo diseñado.



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .	
PEIVB	Fig. 1.26:
CONUEP	SALIDA DEL SISTEMA CON
84-11	REALIMENTACION DE ESTADO.
	Diseño: f.m.l.g.
	Revisado: l.e.b.s.
	Fecha: 16-AGOSTO-1988   Hoja 1 DE 1

CAPITULO I I

DISEÑO Y CONSTRUCCION  
DEL EQUIPO.

## CAPITULO II

### DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO.-

#### 2.1. - INTRODUCCION.

En el presente capítulo se indicará la construcción del sistema físico, como el diseño e implementación de la circuitería electrónica necesaria para el funcionamiento deseado, es decir la interconexión con el elemento de control activo y lograr su estabilización.

Se indicará la construcción de acuerdo a las posibilidades disponibles y por tanto no es la única forma como se lo puede hacer, de igual forma en el caso del diseño electrónico; para el tratamiento de las señales que se obtienen de los sensores, como en el caso del actuador. Con esto se pretende dar los fundamentos para ser aplicados en la construcción de otro equipo similar y de ser posible mejorar sus características, por cuanto se trata de un prototipo.

Los cálculos para ciertos componentes del diseño electrónico no constan por considerarse de conocimiento general, pero para aquellos que tengan mucha importancia se lo hace en forma pormenorizada.

## 2.2.- SISTEMA FISICO A IMPLEMENTARSE:

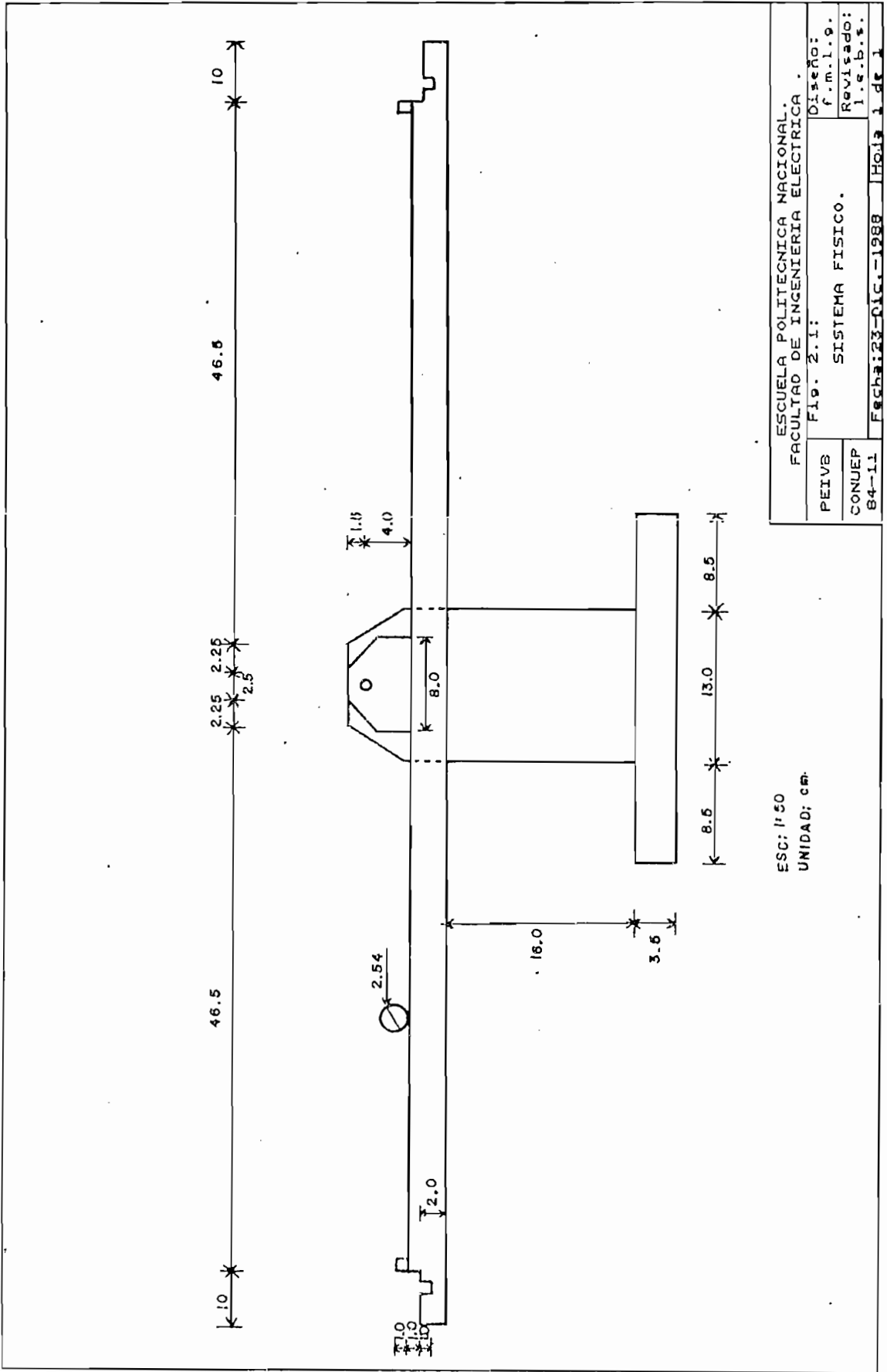
### 2.2.1.- CONFIGURACION DEL SISTEMA:

La planta a implementarse consiste de una bola de acero que corre libremente sobre una viga pivoteada, donde será necesario la instalación de los sensores para la detección de la posición de la bola como del ángulo de la viga. El problema de control es regular la posición de la bola variando el ángulo de la viga pivoteada. En forma practica el sistema implementado se lo puede apreciar en la figura 2.1, en la cual se halla a escala todos los elementos que lo conforman.

De la figura. 2.1 se puede apreciar que el pivotaje de la viga no se lo hace en su centro, y se tiene la adecuación para lograr una mejor linealidad en el movimiento del sensor angular, lo cual se puede demostrar en forma gráfica como lo indica la figura. 2.2. Con esto se facilita la circuitería para el tratamiento de la señal eléctrica que es proporcional a la posición angular de la viga, pero se da un sistema cuya modelación matemática difiere y es más complicada que al tener el eje en el centro de la viga.

Para la determinación de la posición adecuada del sensor angular como del actuador es necesario determinar ciertos parámetros como son el ángulo de inclinación de la viga y el ángulo que forma el eje vertical con la base de rotación. Por lo cual se pasa a realizar la demostración





ESC: 1:50  
UNIDAD: cm.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .	
PEIVB	Diseño:
CONUEP	f.m.l.g.
84-11	Revisado:
	l.e.b.s.
Fecha: 23-OCT.-1988	Hoja 1 de 1



Es decir que  $\sphericalangle\Phi = \sphericalangle\alpha$ . Para esto tenemos que en el  $\triangle OKM$  se debe cumplir:

$$\alpha + 2\beta = 180^\circ \qquad 2\beta = 180^\circ - \alpha$$

y en el  $\triangle O'KM$  :

$$\Gamma + 2(90 - \beta) = 180^\circ$$

$$\Gamma + 180^\circ - 2\beta = 180^\circ$$

$$\Gamma = 2\beta \qquad (2.1)$$

En cuanto a los ángulos formados sobre el punto  $O'$ , se debe cumplir que:

$$2\Gamma + 2\Phi = 360^\circ$$

$$\Gamma + \Phi = 180^\circ \qquad (2.2)$$

Reemplazando (2.1) en (2.2) se tiene:

$$2\beta + \Phi = 180^\circ$$

como:  $2\beta = 180^\circ - \Phi$

$$180^\circ - \alpha + \Phi = 180^\circ$$

$$\alpha = \Phi \qquad (2.3)$$

Con esto podemos calcular la posición que debe tener tanto el actuador como punto de acción y la barra

que moverá el sensor angular; en primer lugar y haciendo uso de los anteriores cálculos y de la figura. 2.3 se pasa el cálculo de la posición del actuador para lograr un máximo desplazamiento angular en un sentido de  $\pm 10^\circ$  y un desplazamiento lineal del actuador de  $\pm 1\text{cm}$ .

En primer lugar se debe indicar que por ser el  $\Delta OO'K$  y el  $\Delta OO'M$  iguales se da que:

$$\Omega = \frac{\alpha}{2}$$

En el  $\Delta OKO'$  se tiene:

$$c = R \tan \frac{\alpha}{2}$$

Para calcular la posición del actuador (b) tenemos:

$$\text{Sen } \Phi = \frac{a}{b + c} \quad b = \frac{a}{\text{Sen } \Phi} - c$$

y reemplazando los resultados anteriores se llega:

$$b = \frac{a}{\text{Sen } \Phi} - R \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.4)$$

Donde:  $b \equiv$  Posición del actuador.  
 $a \equiv$  Desplazamiento lineal del actuador.  
 $R \equiv$  Longitud entre el centro de rotación y el centro de la viga.  
 $\alpha \equiv$  Angulo de inclinación de la viga  
 $= \phi$ .

Considerando que el desplazamiento deseado del actuador es de 1 cm y que el valor de  $R = 7$  cm se obtiene el siguiente resultado para el valor de  $b$ ; según la ec.2.4:

$$b = \frac{1\text{cm}}{\text{Sen}10^\circ} - 7\text{cm} \cdot \tan 5^\circ$$

$$b = 5,15\text{cm}.$$

Su comprobación se la puede hacer en forma gráfica para lo cual tenemos el gráfico a escala normal en la figura. 2.2.

En cuanto a la posición en la cual se debe colocar el brazo que mueve el sensor angular se tiene la figura 2.4 en donde se colocan las variables utilizadas para la determinación de dicha posición. Como ya se pudo apreciar en la anterior demostración, los  $\Delta OAB$  y  $\Delta OBC$  son iguales y además isósceles; con esto se da la igualdad de los que



$$l = \sqrt{\frac{a^2 - 2b^2(1+\cos\theta)}{2(1 - \cos \theta)}} \quad (2.6)$$

Donde:  $l \equiv$  Posición del brazo de sensor  
 $a \equiv$  Mitad de la magnitud del potenciómetro.  
 $\theta \equiv$  Inclinação de la viga.

Y para este valor se debe conocer los valores de  $b$ ,  $\theta$  y  $a$ ; en nuestro caso sabemos que el  $\theta_{\max} = 10^\circ$  y  $2a = 1.6\text{cm}$ , lo que nos falta es hallar el valor de  $b$ ; para esto podemos hacer uso de la ley de senos en el  $\triangle ADB$  de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Sen } \beta}{b} = \frac{\text{Sen } \theta}{l_2}$$

$$b = \frac{\text{sen } \beta}{\text{sen } \theta} * l_2 \quad (2.7)$$

Para obtener este valor de  $b$ , es necesario el valor de  $l_2$ , el cual se obtiene por medio de la ley de cosenos en el  $\triangle OAB$  así:

$$l_2^2 = l_1^2 + l_1^2 - 2l_1 * l_1 \cos \theta$$

$$l_2^2 = 2l_1^2 (1 - \cos \theta)$$

$$l_2 = l_1 \sqrt{2(1 - \cos \theta)} \quad (2.8)$$

Donde:  $l_1$   $\equiv$  Distancia entre centro de rotación y centro de la viga.

El valor de  $l_1$  es conocido del sistema y tiene un valor de:  $l_1 = 7$  cm; con lo cual tenemos todos los datos necesarios para hallar el valor de  $l$ ; reemplazando obtenemos:

$$l = 5.937 \text{ cm}$$

De esta forma se ha logrado determinar en forma exacta el sitio en el cual se deben colocar tanto al actuador como el sensor angular. Lográndose determinar el sistema real con todos los elementos que lo conforman y su disposición.

En cuanto al sensor de posición se puede indicar que se halla en la parte inferior de la bola, en los lados superiores del canal que guía la bola en la viga. Este sensor de posición se ha construido en forma de un potenciómetro lineal, en el cual la parte variable y su cursor se halla conformado por la bola y el cable de cobre mientras la parte resistiva esta dada por alambre de constantan que tiene mayor resistividad, y por ende se



trata de un sensor lineal, cuyo valor resistivo es proporcional a la posición lineal de la bola en la viga.

#### 2.2.2.- VARIABLE A CONTROLARSE:

Como ya se ha indicado en el capítulo anterior, así como en la parte 2.1.a la variable a controlarse es la posición de la bola en la viga, pero debido a la construcción del sistema se tiene acceso al ángulo que forma la viga con la horizontal, que al ser utilizada ésta información da lugar a mayor estabilidad en el sistema, y puede ser considerado como otra variable de control.

Debido a la inestabilidad propia del sistema se debe realizar un control activo para obtener los resultados deseados sobre estas variables, y es necesario equipo adicional, que será explicado más adelante.

#### 2.3.- UNIDAD DE INSTRUMENTACION: Detección y transmisión.

Al usar un elemento externo para la implementación del control activo, que en este caso se trata del computador análogo, es necesario tener el equipo que permita convertir la señal física de posición lineal como angular en una señal eléctrica para su tratamiento adecuado, de tal forma que sea compatible con los niveles de trabajo de dicho computador y lograr el control deseado, como tener la posibilidad de obtener representaciones gráficas de su respuesta.

### 2.3.1.- DETECTORES DE LAS VARIABLES A CONTROLARE:

Para el caso de su detección tenemos en primer lugar el sensor de posición que es un potenciómetro, cuyo cursor es la misma bola de acero; alambre de constantan para la parte resistiva y alambre de cobre para el conductor de la señal que nos entregará el cursor, el valor resistivo del sensor es:  $r = 27.7 \Omega$ . Mientras el sensor angular de igual forma es un potenciómetro lineal de tal forma que la circuitería necesaria se simplifica, en este caso se tiene un potenciómetro de valor de  $100K\Omega$  y colocado de tal forma que el movimiento angular sea lineal.

La influencia que se tiene en el sistema es el coeficiente de rozamiento que se da tanto en el contacto de bola con el sensor, así como el rozamiento que se presenta en el potenciómetro sensor angular, lo cual tiene su ventaja en el sentido de no permitir cambios muy bruscos en el sistema que podrían sacar la bola de la viga. Pero la desventaja estará en las características de rapidez de respuesta del sistema. En cuanto al sensor angular se ha dado un límite de variación que es  $\pm 10^\circ$ , con lo cual se considera suficiente para lograr un movimiento de la bola por la pendiente que esto significa, y además para obtener la linealidad en el sistema en su modelación matemática que nos facilita el trabajo analítico.

2.3.2.- DISEÑO DE LA INTERFASE ENTRE EL SISTEMA Y EL COMPUTADOR:

En primer lugar es necesario presentar un diagrama de bloques del sistema a implementarse, y tener bien claro cada uno de sus componentes, así como la justificación de su existencia. Esto se tiene en la figura 2.5, en ella se observa la planta que está constituida por la viga y bola, luego tenemos los sensores angular y de posición, sus circuitos de acondicionamiento de la señal que constituyen la interface del sistema con el computador, en seguida tenemos el comparador en el cual se tiene además la entrada de la señal de referencia, sigue el compensador que será implementado en el computador análogo, de donde se obtiene la señal que comanda el actuador.

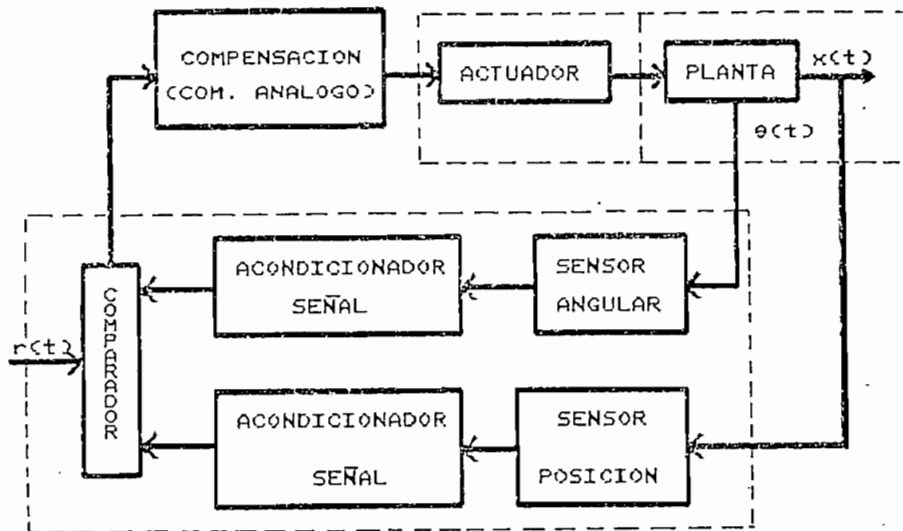
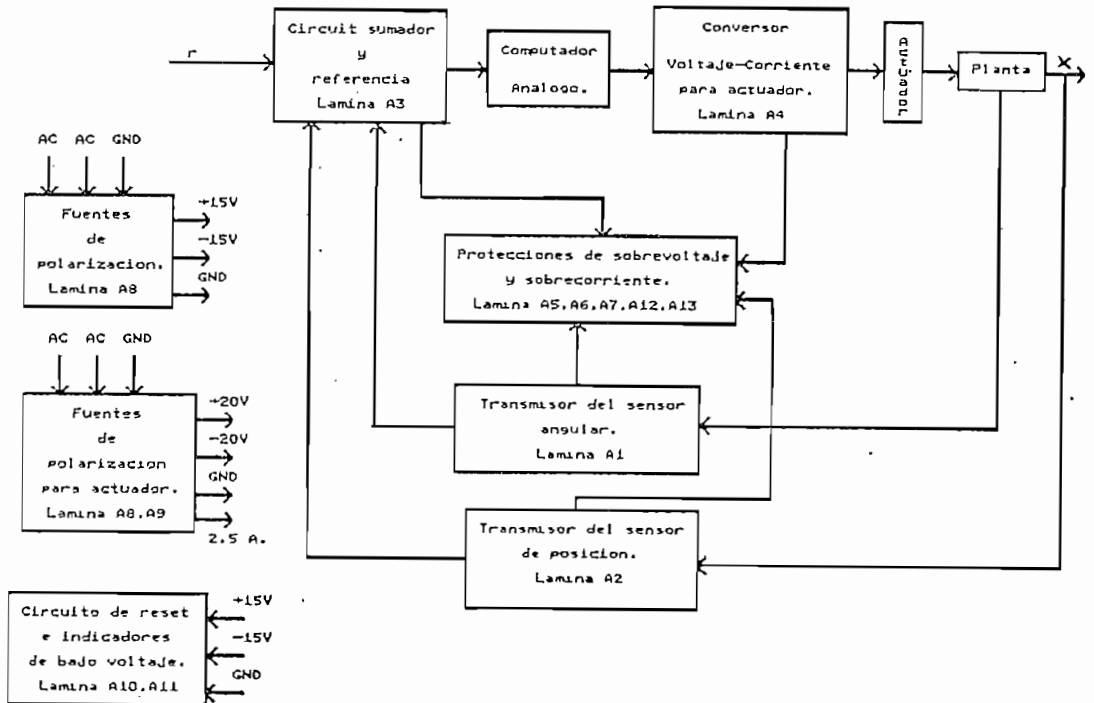


Fig. 2.5.- Diagrama de bloques del sistema total.

En forma general se puede indicar que los niveles de voltaje que acepta el computador análogo mini AC de la casa EAI es de  $\pm 10V$ , que corresponde a  $\pm 1$  UM (Unidad de Máquina), y en su interior se trabaja con amplificadores operacionales lo cual garantiza una impedancia de entrada alta y una impedancia de salida baja.

Para una mejor comprensión de lo que se va a presentar a continuación, así como del funcionamiento general del equipo. Se presenta el siguiente diagrama de bloques, en el cual se tienen todos los componentes y su distribución en las láminas presentadas al final del capítulo :



2.3.2.i.- DISEÑO DE LA INTERFASE DEL SENSOR ANGULAR Y EL COMPUTADOR.

Con lo antes presentado es claro su necesidad, ya que de esta forma es posible obtener la respuesta de la variación angular de la viga. De hecho también se observa la necesidad de realizar el acondicionador de la señal para obtener los niveles de voltaje en las unidades de máquina entre  $\pm 1\text{UM}$ . Mientras que el bloque de sensor angular, como ya se dijo anteriormente se trata de un potenciómetro lineal, por su facilidad para conseguirlo y al tratarse de un prototipo considero un buen inicio, ya que en su lugar se podría utilizar un LVDT ( Linear Voltage Differential Transformer ) por las ventajas que este representa en linealidad y desgaste, pero en cuanto a costo es bastante elevado al no ser posible conseguirlo en el país. La otra alternativa es el uso del sensor capacitivo, pero en este caso se encarece por la circuitería adicional para su funcionamiento y su acondicionador de señal.

Al ser un prototipo inicial se usa el potenciómetro lineal, quedando la posibilidad de mejorarlo tanto constructivamente como en la utilización de mejores elementos en la parte de instrumentación como en la parte de potencia.

Los datos que se dispone para el diseño del circuito de acondicionamiento de la señal o transmisor son:

$$R = 100 \text{ K}\Omega \quad \equiv \text{Resistencia del sensor.}$$

$V_{cc} = \pm 15V$                      $\equiv$  Fuentes de polarización  
 $V_{out} = \pm 10V$                     $\equiv$  Voltaje de salida.  
 $Z_{in} \geq 10M\Omega$                     $\equiv$  Impedancia de entrada.

La linealidad del sensor angular se indica en la figura 2.6 :

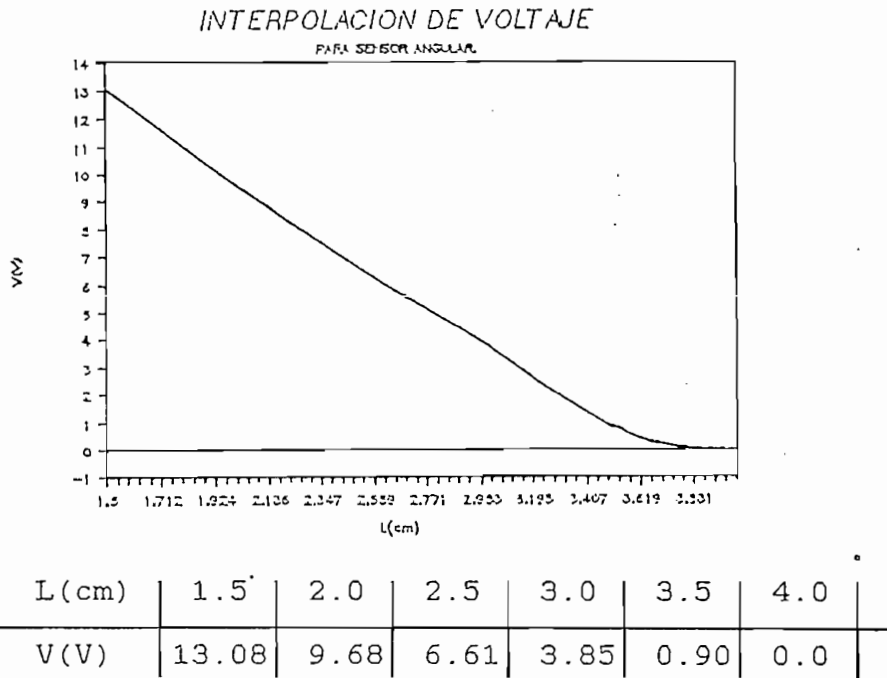


Fig. 2.6: Interpolación para sensor angular.

Interpolando datos obtenidos prácticamente, se demuestra que la linealidad del sensor es buena y poder continuar con el diseño de la interfase bajo esta consideración.

En la figura 2.7 se tiene un diagrama de bloques general del circuito a diseñarse, en el cual se tiene en primer lugar el sensor, luego tenemos un circuito de acople de impedancias, y por último el amplificador para tener en la salida los niveles de voltajes adecuados.

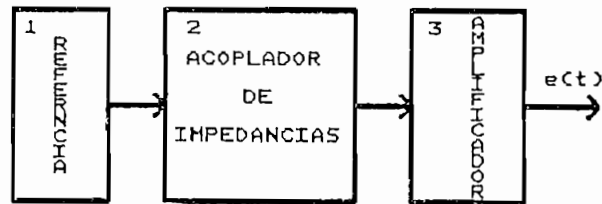


Fig. 2.7 Diagrama de bloques del transmisor angular.

Además se incluye un circuito de protección para el caso de sobrecarga, el cual prende la señalización correspondiente y desconecta todas las entradas y las coloca en cero, su diseño se dará en el punto 2.5.1. El circuito implementado se halla en la lámina A1 en forma detallada.

El sensor de posición angular está descompuesto de la siguiente manera: en primer lugar las resistencias limitadoras, en serie con el sensor angular, las cuales se colocan para obtener niveles de voltaje adecuados, y se ha tomado para esta entrada el valor de  $\pm 1V$ , en base de lo cual se ha obtenido los valores de dichas resistencias, en seguida tenemos la protección para el caso de sobrevoltajes en la entrada del circuito, que será limitado por medio de los diodos.

Para lograr una mejor impedancia de entrada se ha colocado el seguidor de voltaje realizado con amplificadores operacionales y por último tenemos la amplificación necesaria para lograr obtener los  $\pm 10V$  en la salida

con lo cual la relación será unitaria, ya que en unidades de máquina se obtendrá  $\pm 1$  UM. La salida del circuito quedará a disposición del usuario que podrá conectarlo a donde desee, razón por la cual se debe proteger para el caso de un cortocircuito por mala conexión, más aún entendiéndolo que se trata de un equipo didáctico, pero debido al uso del operacional LM324 esto no es necesario, ya que este integrado resiste un cortocircuito a tierra en forma indefinida como puede observarse en sus características dadas en el manual adecuado.

Se ha colocado potenciómetros en serie con el sensor angular como en la realimentación del amplificador con la finalidad de calibrar todos los valores de entrada, como la salida del circuito, ya que con su uso podría cambiar tanto las características de ciertos elementos, como desgaste en el sensor, con esto se garantiza la posibilidad de calibrar el equipo para un trabajo normal.

### 2.3.2.ii.- DISEÑO DE LA INTERFASE DEL SENSOR DE POSICION Y EL COMPUTADOR.

Otra parte de la interfase con el computador es el sensor de posición y su circuito de acondicionamiento de señal a los niveles de trabajo de éste. En igual forma se trata de un circuito similar al sensor angular, consta de las mismas tres partes, es decir el sensor, el acople de impedancias y el amplificador, con iguales características que en el caso del transmisor angular, su diagrama en forma detallada lo tenemos en la lámina A2.



La diferencia primordial se halla en primer lugar en los valores de resistencias en serie con el sensor para obtener los  $\pm 1V$  de entrada al sistema, y además la colocación del condensador  $C1$ , cuya función es la de proporcionar el voltaje de salida en forma continua, pues este se carga al valor de voltaje de entrada y en caso de las momentaneas desconexiones del cursor (bola) del sensor de posición, este queda cargado en ese valor y trataría de descargarse por medio de la entrada al operacional que de hecho representa una alta impedancia, es decir lo que se ha hecho es un Sample - Hold.

De igual forma a este circuito se acopla un sistema de protección para el caso de sobrecarga, que además de actuar en el interruptor de entrada enciende las señalizaciones correspondientes. En este caso también su salida ( $V_p$ ) queda a disposición del usuario para que realice la interconexión correspondiente.

El sensor de posición es un potenciómetro lineal, conformado por una parte resistiva que es el alambre de constantan, de la longitud de la viga o mejor dicho, de la distancia que puede recorrer la bola junto con otro alambre de cobre colocado de igual forma en la viga. Es por ello que la bola debe ser conductora y se usa una bola de acero para esta finalidad, sus datos:

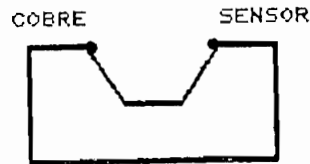
Resistencia total =  $27.7 \Omega$ .

Longitud activa = 1 m.

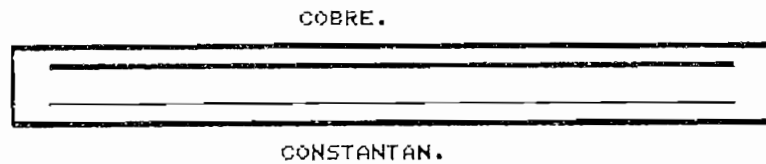
Material  $\equiv$  Constantan.

Y en forma similar se ha colocado resistencias en serie con la finalidad de limitar los valores de voltaje y

corriente del sensor, se tiene el potenciómetro para calibrar la salida de tal forma que sea simétrica en el lado positivo y negativo. Su disposición física en la



a.- Vista frontal.



b.- Vista superior.

Fig. 2.8. Localización del sensor de posición.

viga se puede mirar en la figura 2.8, en la cual se observa que es posible usar bolas de diferente radio, siempre y cuando no sean menores al ancho del canal hecho en la barra; y se comprende más aún el significado del radio de rodamiento ( $r$ ) mencionado en el CAPITULO I.

2.3.2.iii.- DISEÑO DEL COMPARADOR DE SEÑALES DE LOS SENSORES CON EL VALOR DE REFERENCIA.

Por último en la unidad de detención y transmisión tenemos el circuito sumador, que nos entrega la señal de error del sistema; el mismo que será procesado adecuadamente para lograr la compensación requerida. Este procesamiento puede ser hecho de cualquier forma, y en nuestro caso usamos el computador análogo para hacerlo.

Ya en lo referente a la circuitería, no es muy complejo únicamente se trata de un sumador no inversor, ya que las señales de los sensores ya poseen el cambio de signo para lograr la realimentación negativa. Su circuito en forma general lo tenemos en la fig. 2.9 ,en la cual

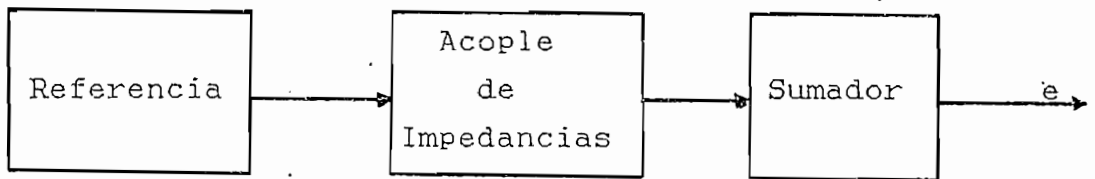


Fig. 2.9 Circuito del comparador.

se puede separar tres bloques constitutivos que son el circuito de referencia, luego tenemos un bloque de acople de impedancias y por último se tiene el circuito sumador propiamente dicho. Su diagrama en forma detallada con los elementos utilizados se tiene en la lámina A3.

En cuanto al primer bloque se puede indicar que se

trata de un potenciómetro lineal de una vuelta, en serie con resistencias de limitación, el cual entrega  $\pm 1V$  en cada uno de los extremos. A su salida se tiene un interruptor que se halla a disposición del usuario, este se coloca con la finalidad de lograr obtener una entrada paso al sistema. Luego tenemos los switches análogos para conectar esta entrada a cero en caso de existir falla por sobrecorriente o sobre voltaje en cualquier parte del sistema.

Se colocan los diodos de protección a las entradas que están a la disposición del usuario para evitar daños mayores por una mala conexión a estas entradas; el segundo bloque de acople de impedancia únicamente se trata de amplificadores operacionales conectados como seguidores de voltaje con esto se garantiza una alta impedancia de entrada.

Al final tenemos el bloque de amplificación con la finalidad de lograr los niveles de voltaje adecuados para un normal funcionamiento, ya que su salida irá conectada al computador análogo directamente. Su ganancia es variable para lograr calibraciones en el equipo; se tiene de esta forma dos entradas de ganancia unitaria y una entrada de ganancia 10; esto debido al uso de los switches análogos que acepta como máximo una entrada de un pico de 5 V., por su polarización, y se obtiene valores de  $\pm 1 V.$  del circuito de referencia.

Este circuito podría ser implementado en el mismo computador análogo, ya que las salidas de los sensores se hallan a disposición del usuario, y se podría colocar una

señal de referencia para su funcionamiento. Pero con la finalidad de cumplir con el primer gráfico de bloques presentado en la introducción de éste capítulo y además para dejar la mayor cantidad de elementos del computador para realizar el compensador, y ser utilizado unicamente bajo este concepto.

En igual forma que los circuitos anteriores se utiliza la característica del amplificador operacional LM324 que garantiza un cortocircuito a tierra de su salida, en el caso de una mala conexión por parte del operador del sistema.

#### 2.4.- ACTUADOR.

Debido al trabajo necesario para lograr estabilizar el sistema se requiere un actuador con una capacidad lineal en su desplazamiento y además tener la posibilidad de un accionar bastante fino.

Las opciones que se tiene para su implementación son varias, así tenemos el caso de acoplarle un servomotor en cuyo eje se hallará conectada la viga, y tendríamos que controlar el desplazamiento angular de dicho motor pero debido a un gran requerimiento de torque y pequeños desplazamientos angulares se da la inclinación para el uso de una bobina móvil como actuador en este caso se presenta que su rango de linealidad es pequeño, además se podría conseguir ya construido pero no en el mercado local, lo cual lo encarecen.

Por último se realizó un estudio para lograr utilizar un L.V.D.T. (Linear Voltage Differential Trans-

former), que han sido conceptualizados para su uso como sensor de posición, ya que tienen la gran ventaja de su linealidad y no desgaste. La información que se dispone sobre el L.V.D.T. se refiere a su trabajo como sensor, e incluso las compañías comerciales disponen de varios tipos, de diferentes características, así como elementos adicionales para su funcionamiento.

Conociendo sus características, especialmente en lo referente a su linealidad se ha construido el actuador bajo el concepto del L.V.D.T. , obteniendose buenos resultados para nuestro caso.

#### 2.4.1.- ESTUDIOS PRELIMINARES:

En la figura. 2.10 se halla la distribución circuital del L.V.D.T., y su disposición física, en la

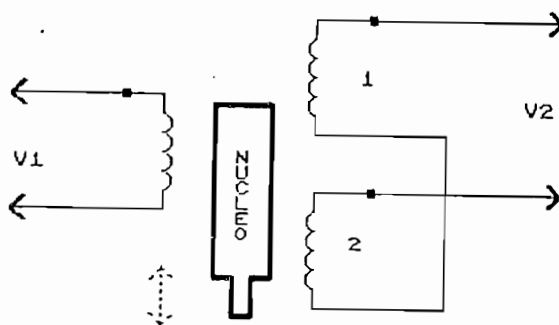


Fig. 2.10. Circuito del L.V.D.T.

cual se posee dos devanados secundarios arrollados sobre el mismo soporte sobre el cual está el devanado primario,

este soporte es hueco y contiene un núcleo magnético que es libre para deslizarse dentro del soporte. Y su funcionamiento está dado por el enlace magnético que significa el núcleo. Y según su localización cambia la característica de funcionamiento, así tenemos en primer lugar que los devanados secundarios son iguales, de tal forma que el flujo de enlace sea el mismo cuando el núcleo se halla perfectamente centrado y debido a su conexión el voltaje  $V_2$  será cero. Mientras que si el núcleo se mueve hacia abajo, el enlace magnético será mayor en el devanado del secundario 1 por cuanto hay más núcleo dentro de dicho devanado, mientras que si el núcleo sube el voltaje crece en el otro devanado por la misma razón indicada.

Cuando se lo construye se hace de tal forma que la diferencia de voltajes en el secundario sea proporcional al desplazamiento del núcleo. Bajo este mismo concepto de funcionamiento se construyó el actuador, pero debido a que es un elemento que manejará una gran potencia, es un dispositivo más voluminoso que en el caso de un sensor. Además en este caso se tiene un valor de corriente fija en la bobina central y se controla la posición por medio de la corriente entregada a las bobinas diferenciales, con ésto se logra una mejor linealidad en su trabajo, son los cambios respecto al ser utilizado como sensor.

En nuestro caso trabajamos con corriente D.C. con la cual controlamos el campo magnético generado por los devanados y la fuerza que es capaz de generar este campo magnético. La linealidad se sigue manteniendo además de lograr tener movimientos muy finos del núcleo con pequeñas variaciones en la corriente de entrada. Para una mejor comprensión se puede observar la Figura. 2.11 en la cual

se presenta la interpolación de los datos obtenidos en

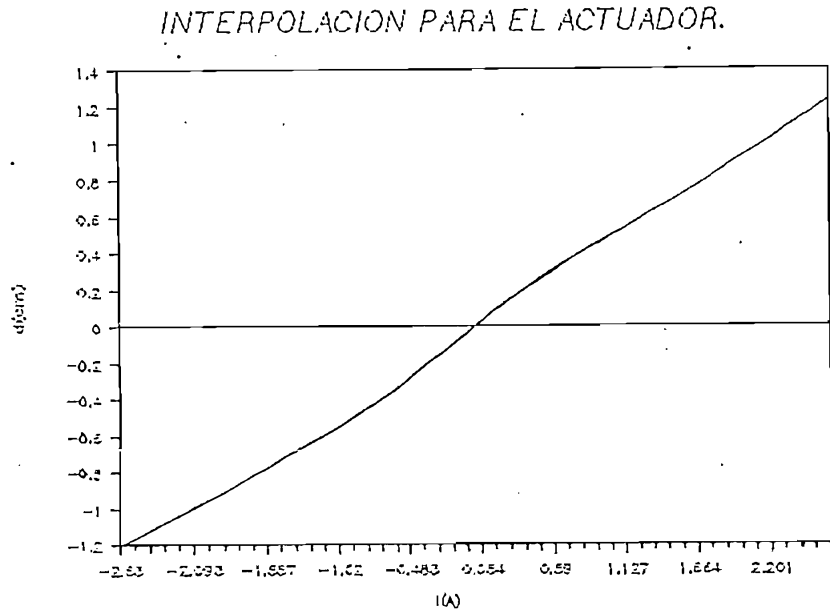


Fig. 2.11 Características del actuador.

forma práctica, en donde se ve claramente su linealidad. En cuanto a su potencia únicamente dependerá de la corriente que sea capaz de manejar cada una de sus bobinas.

Se puede realizar un mayor estudio del comportamiento del L.V.D.T. basado en las ecuaciones de Maxwell, relacionadas con el campo magnético y su influencia según la disposición indicada. Pero realmente no viene al caso, y más bien se debe observar los resultados prácticos obtenidos en su funcionamiento. Así tenemos que la disposición física y constructiva de este elemento se



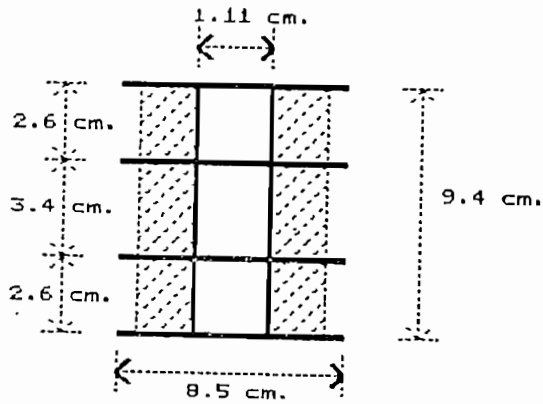


Fig. 2.12 Disposición de las bobinas del L.V.D.T.

halla en la figura 2.12, en la que podemos observar las dimensiones que lo conforman. En cuanto se refiere al núcleo tenemos que está constituido de hierro dulce que es un material magnético y sirve para concatenar las líneas de fuerza del campo generado por la circulación de la corriente en las bobinas, su disposición física se halla

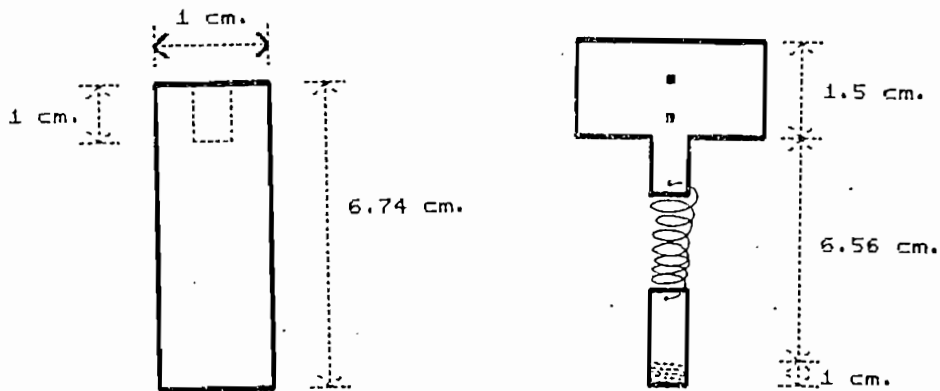


Fig. 2.13 Núcleo y acoplamiento.

en la figura 2.13. Para lograr su acople con la viga se construyó un sistema en bronce, que no es magnético y poder controlar la posición del núcleo, dicho acoplamiento puede observarse en la figura 2.13, en donde se tiene las medidas físicas, y además es importante indicar la presencia del resorte a más de las partes fijas, que es necesario colocar para que este sea el que se deforme con el movimiento de la viga. Ya la disposición total del actuador se la tiene en la figura 2.14, donde además de su forma física se tiene la disposición circuital y color

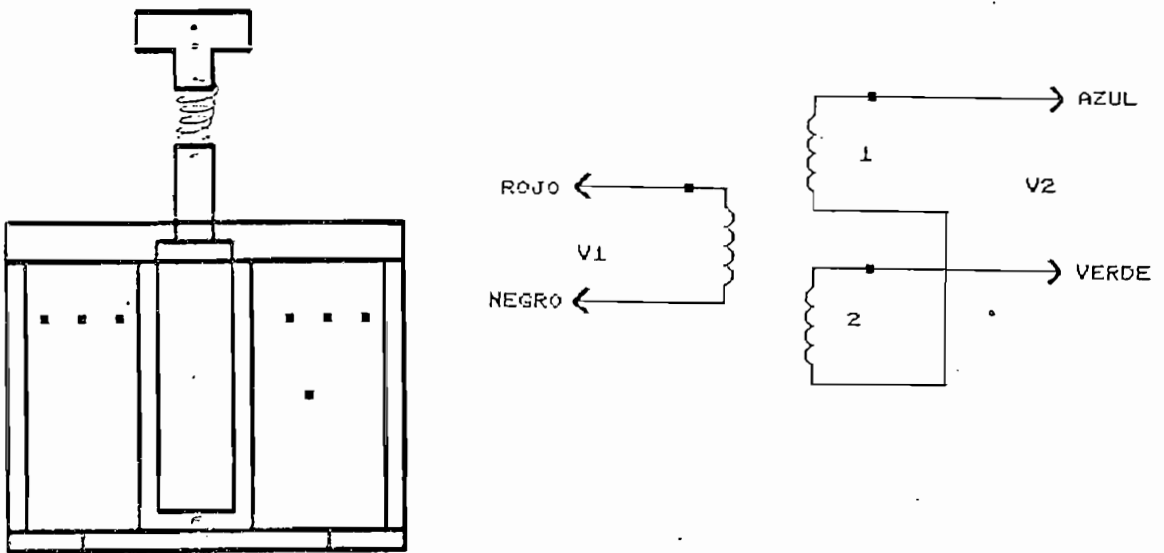


Fig. 2.14 Actuador.

de los terminales para su futura conexión en el equipo. Como puede observarse se ha colocado un resorte en la parte inferior del núcleo con la finalidad de ayudar en el momento que debe estar centrado y soportar el peso de la viga.

Es claro también que debido a la potencia necesaria para lograr mover la viga, este elemento entregará calor, y para lograr disipar en una parte se ha practicado agujeros en la caja que lo contiene y facilitar la circulación de aire en su interior. Con esto se ha cubierto la parte constructiva del actuador utilizado, justificando cada parte que lo conforman, en cuanto a su funcionamiento lo podemos analizar de los resultados totales obtenidos, al lograr los objetivos propuestos.

#### 2.4.2.- CIRCUITO PARA CONTROLAR EL ACTUADOR.

Como se indicó en el punto anterior, el control de la posición del núcleo del actuador se lo hace según el valor de corriente que circula en la bobina secundaria, para lo cual necesitaremos un circuito que nos permita convertir la señal de voltaje que nos entrega el computador análogo en corriente, y en una forma proporcional. Dicho circuito en forma de bloques se halla en la figura 2.15 en la cual se tiene tres bloques constitutivos, en primer lugar se tiene el sistema de acople de impedancias

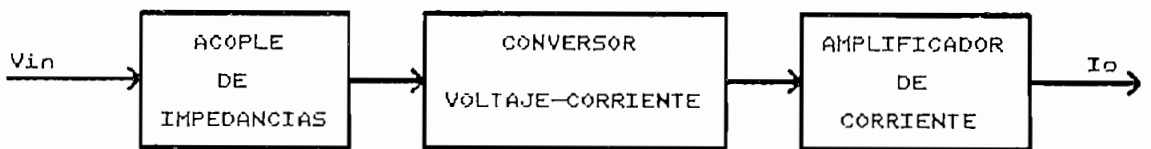


Fig. 2.15 Conversor Voltaje-Corriente.

para garantizar una impedancia de entrada alta y evitar exigir mucha corriente del computador análogo, luego tenemos el circuito conversor propiamente dicho y por último tenemos la amplificación de corriente al necesitar valores elevados para lograr mover el actuador. Su circuito detallado lo tenemos en la lámina A4.

En cuanto a su explicación es muy fácil ya que se utiliza un circuito muy sencillo y de fácil comprensión, el bloque de acople de impedancia se trata de un seguidor de voltaje de igual forma que en los casos anteriores realizado con un operacional, se tiene también el circuito de protección de la entrada conformado por la resistencia y los diodos para evitar daños por una mala interconexión. El conversor de voltaje a corriente se halla compuesto por un circuito cambiador de nivel que controla el voltaje de la base de un transistor que se halla como una fuente de corriente. La función de transferencia que se logra con este circuito la tenemos en la figura 2.16.

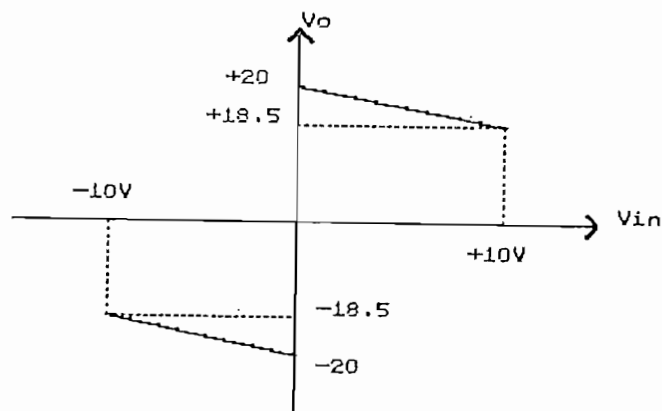


Fig. 2.16 Función de transferencia del conversor.

Que se trata del voltaje de salida tomada en el emisor del transistor que se halla como fuente de corriente, ya que simplemente, controlamos el voltaje en su base y con ello en su emisor, y la corriente únicamente está dada por la ley de Ohm y la caída de voltaje que está dada por la diferencia entre la fuente en un extremo de la resistencia y este valor de voltaje de salida. El circuito amplificador de corriente lo logramos por medio de la colocación de transistores en darlington, siendo el transistor externo capaz de manejar la corriente requerida por el actuador.

La ecuación que manejará el cambiador de nivel se trata únicamente de una función lineal de la siguiente forma:

$$V_o = K \cdot V_{IN} + 20$$

que se trata de un sumador, por esta razón la disposición circuital presentada, además de los valores de resistencias colocadas. En lo referente al sistema que se comporta como fuente de corriente, su circuito simplificado se tiene en la figura 2.17 en la cual se debe garan-

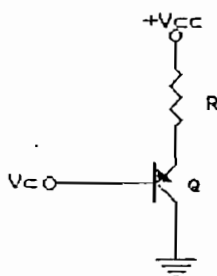


Fig. 2.17 Fuente de corriente.

tizar en primer lugar que el transistor se halla trabajando en la región lineal, para lo cual el voltaje colector-emisor debe confirmar esta situación. En nuestro caso únicamente debemos tener presente el voltaje que necesita la carga para la máxima corriente. Una vez garantizada esta situación, es muy simple comprender que según el voltaje en la base del transistor, que es el voltaje de control ( $V_c$ ), se tendrá el valor de corriente en el colector del mismo, ya que tenemos en el emisor el voltaje ( $V_1$ ) que estará dado por:

$$V_1 = V_c - V_{BE} \approx V_c - 0.6$$

y debido a que la resistencia conectada a la fuente ( $V_{cc}$ ) es constante y según la ley de Ohm, tenemos que :

$$V_{cc} - V_1 = I \cdot R$$

$$I = \frac{V_{cc} - V_1}{R} \quad (2.9)$$

Y como indicamos el transistor se halla en la región lineal se cumple que:

$$I_E = I_C$$

Donde:  $I_E \equiv$  Corriente de emisor.  
 $I_C \equiv$  Corriente de colector.

para lo cual tenemos que si en lugar de conectar a tierra el colector del transistor lo hacemos a la carga, esta recibirá dicha corriente, que a la vez es proporcional al

voltaje de control, ya que en la ecuación 2.9 lo único que varía es el voltaje  $V_1$ , mientras los otros elementos son constantes, y si la variación de  $V_c$  es lineal de igual forma será para la corriente, que estará dada por la ecuación:

$$I = K - V_1 * K_1 \quad (2.10)$$

Donde:  $K = (V_{cc}/R) \equiv \text{Constante.}$   
 $K_1 = (1/R) \equiv \text{Constante.}$

Que claramente se trata de la ecuación de una línea, y con ello se ha logrado la conversión voltaje-corriente en una forma proporcional ya que con cada variación de voltaje dará lugar a una variación de corriente según la ecuación 2.10. La circuitería adicional únicamente se trata de la amplificación de corriente y debido a la necesidad que circule en ambos sentidos se ha aumentado la parte inferior del circuito que garantiza circulación en el sentido negativo bajo el mismo concepto presentado anteriormente, además cabe indicar que la realimentación del operacional conectado como sumador lo tomamos desde la salida total con la finalidad de ganar las ventajas de estabilidad de lazo cerrado, e incluir en él a los elementos activos como son los transistores. Y además colocar el potenciómetro en este camino para tener la posibilidad de calibrar la salida según nuestras necesidades.

Se ha colocado además los diodos entre emisor y colector de los transistores de salida para proteger por la carga inductiva para el sistema presentado. Y como en los casos anteriores aquí también se coloca un circuito de

protección, pero en este caso de sobrecorriente, que de igual forma desactiva las entradas colocándolas en cero, además de encender la indicación correspondiente.

## 2.5.- IMPLEMENTACION PRACTICA DE LOS DISEÑOS Y SUS LIMITACIONES.

Por último debemos hacer referencia a la implementación de los circuitos presentados anteriormente, y es importante indicar que al tratarse de un equipo didáctico se debe tomar precauciones para su funcionamiento y garantizar un normal funcionamiento a pesar de posibles fallas en su interconexión. Por esta razón es necesario la colocación de protecciones adicionales que en otro caso no serían necesarias.

Dichas protecciones siguen la misma línea que en el computador análogo ya que se posee indicadores luminosos en el sitio de la falla. Con lo cual se da la limitación en el trabajo del equipo.

En general los circuitos presentados anteriormente son muy simples y de uso común por lo cual no tiene mayor problema su implementación, el único que es un tanto diferente es el circuito conversor voltaje-corriente, que necesita estar bien calibrado para lograr los objetivos deseados y un normal funcionamiento, ya que sus circuitos por separado son también muy simples. En cuanto a sus limitaciones ya se ha indicado en cada caso, quedando únicamente por explicar los circuitos de protección mencionados así como las fuentes de polarización.



### 2.5.1.- CIRCUITO DE PROTECCION DE SOBREVOLTAJE.

El circuito de protección de sobrevoltaje es similar para los circuitos del sensor angular, sensor de posición y el circuito comparador y de referencia, con éste garantizamos que el voltaje que entra al computador análogo no sea mayor al que éste soporta. Su diagrama de bloques se halla en la figura 2.18 en la cual tenemos



Fig. 2.18 Diagrama de bloques de la protección de sobre-voltaje.

cuatro bloques, el primero que compara con el voltaje de trabajo preestablecido, luego tenemos el bloque de señalización que enciende la indicación cada vez que se presente el sobrevoltaje, el bloque temporizador da la posibilidad que el sistema no se desconecte instantáneamente cada vez que ocurra una falla, sino que necesita que la falla subsista por un tiempo determinado antes de hacer la desconexión, por último tenemos el circuito combinacio-

nal que entrega la señal que será procesada para hacer la desconexión total y colocar las entradas a cero. Su implementación práctica y detallada se halla en las láminas A5, A12 y A13.

Observando una de ellas podemos indicar que se usa dos zener para colocar el voltaje de referencia para la comparación, y hacemos uso de los amplificadores operacionales en el campo no lineal y según el valor del voltaje de comparación nos da un nivel ( $\pm 14$  V.), en su salida se coloca la resistencia y el diodo para lograr obtener niveles lógicos que puedan manejar compuertas de la familia CMOS. Con la compuerta NOR logramos en primer lugar tener la señal que unifica la indicación de falla en cualquier de los dos sentidos, positivo o negativo, y con ella también se enciende la señalización apenas exista el sobrevoltaje y genera el pulso que da inicio al retardo, que se lo obtiene por medio de un LM555 trabajando como un monoestable. Con la otra compuerta NOR se logra dar un pulso que será tratado para activar la señal de control de los interruptores análogos, este pulso se obtiene si luego del retardo generado aún persiste la falla, caso contrario no ocurrirá nada y el equipo puede seguir trabajando en forma normal.

Como las entradas se colocan a cero, es necesario que la indicación luminosa permanezca encendida en el sitio que ocurrió. pero no se logrará esto si únicamente se tiene la compuerta manejando la base del transistor, es por ello que se coloca el SCR que es encendido cuando se da el pulso que activará la señal de control de los interruptores análogos. Los otros diodos son únicamente para lograr apagar los SCR luego de corregida la falla y

reinicia el funcionamiento del equipo en las condiciones iniciales adecuadas para un trabajo normal (RESET), mientras el otro diodo (L.T.) nos sirve para chequear los indicadores luminosos al inicio del trabajo del equipo, y garantizar que en caso de existir falla siempre existirá la indicación luminosa correspondiente en el sitio que ocurrió. También es posible observar la existencia de la señal R1 hacia el reset del LM555, ésta al igual que las señales indicadas anteriormente (RESET y L.T.) vienen de otro circuito de protección que será explicado más adelante, es un circuito que desactiva el equipo por bajas en la fuente de polarización.

#### 2.5.2.- CIRCUITO DE PROTECCION DE SOBRECORRIENTE.

De igual forma tenemos el circuito de protección de sobrecorriente para el caso del actuador y con el garantizamos que la corriente que va al actuador no supere sus límites y pueda dañarlo, su diagrama de bloques se

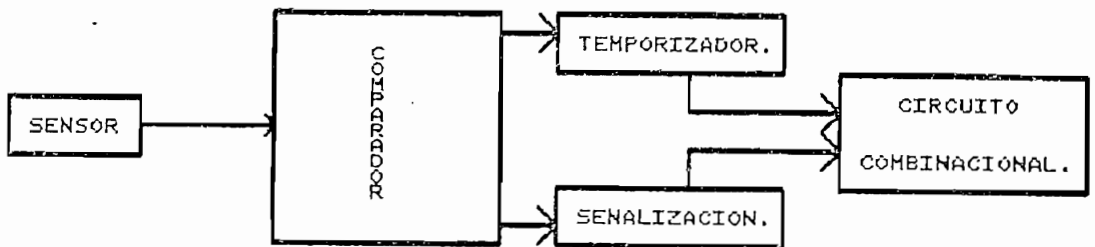


Fig. 2.19 Diagrama de bloques de la protección de sobrecorriente.

halla en la figura 2.19 en la que podemos observar que es similar a la anterior únicamente se ha aumentado el bloque sensor, mientras los otros se mantienen bajo el mismo criterio. Su circuito en detalle lo tenemos en la lámina A6.

En dicha lámina se puede observar que el sensor de corriente se trata de una resistencia de potencia capaz de soportar la corriente que circula por el actuador, y se ha colocado en un puente de diodos con la finalidad de sensar corriente en cualquier sentido, positiva o negativa, ya que de esta forma la corriente por la resistencia de potencia será unidireccional y según su valor nos entregará siempre un voltaje positivo al comparador. En cuanto al comparador se lo hace con histerisis y de igual forma construido con operacional, esta histerisis se da para evitar la señalización por pequeñas variaciones en la carga debido a las pérdidas que se incrementan por el calor generado en el actuador. Y de igual forma nos entrega una señal que será manejada por elementos digitales, cuya lógica y disposición es la misma que para el circuito anterior, con la mismas señales de entrada y nos entrega una que será tratada junto con las otras para lograr obtener la señal de control de los interruptores análogos y desactivar el sistema hasta que se de la señal de reiniciación nuevamente. También su señal luminosa se queda encendida por medio de un SCR y es necesario la presencia de la señal de reiniciación (RESET) y de chequeo de lámparas (L.T.).

### 2.5.3.- CIRCUITO FINAL DE PROTECCION.

Una vez obtenidas las señales que indican permanencia de falla, por un tiempo de 3 s., llamadas  $CLK_n$ , se realiza un circuito combinacional que entrega el pulso que actúa en el reloj de un flip-flop tipo D en cuya entrada tenemos un uno lógico, este dispositivo se coloca con la finalidad de mantener la señal de control hasta que se produzca la reiniciación total del sistema, y lograr las condiciones iniciales únicamente por medio de señales digitales, esto si actuamos sobre el CLEAR del flip-flop. Esta señal en conjunto con las dadas por el circuito de reinicio y sensor de bajo-voltaje dan lugar a la señal de control de los interruptores análogos de tal forma que uno se abre y el otro se cierra para colocar dichas entradas a cero luego de un circuito combinacional adecuado.

Este circuito se presenta en la lámina A7, donde también se puede observar la señal R1 que da lugar a que el sistema permanezca con sus entradas en cero, hasta que los niveles de voltaje de polarización sean los correctos. Estas señales vienen del circuito sensor de bajo-voltaje, que al entrar al circuito combinacional necesario nos entrega al final las señales  $Con$  y  $Con$  negada que en definitiva son las señales de control pero es importante notar que su salida es reducida a 5V. por medio de los zener de salida, ya que este es el nivel de voltaje que acepta la entrada de control de los interruptores análogos.

#### 2.5.4.- FUENTES DE POLARIZACION.

Para lograr un normal funcionamiento es necesario la implementación de las fuentes de polarización, tanto de los circuitos transmisores, la parte de potencia como el circuito que alimenta la bobina central del actuador.

##### 2.5.4.i.- FUENTES DE POLARIZACION DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS.

Esta fuente debe tener la capacidad de entregarnos  $\pm 15V$  con la cual podemos polarizar todos los amplificadores operacionales como los circuitos digitales de la tecnología CMOS. En cuanto a la fuente positiva y en el caso que todas las señalizaciones están activas, deberá tener la capacidad de entregar 1 amperio.

Su diseño es muy simple al tratarse de niveles de voltaje muy conocidos y utilizados ; por lo cual únicamente utilizamos los reguladores de voltaje que son capaces de entregar estos valores y la corriente necesaria. Estos elementos se tratan de los reguladores de voltaje LM7815T y LM7915T, su disposición circuital se halla en la lámina A8. En esta se puede observar que se ha colocado un circuito de señalización luminosa de encendido del equipo la misma que permanece encendida mientras exista voltaje de alimentación al equipo.

Los cálculos realizados para determinar tanto el

voltaje del secundario del transformador, corriente por los diodos del puente rectificador y elementos adicionales fueron realizados según el manual Regulated Voltage de la National Semiconductor, obteniéndose resultados adecuados para el funcionamiento de nuestro equipo.

#### 2.5.4.ii.- FUENTE DE CORRIENTE PARA LA BOBINA CENTRAL.

Como se indicó anteriormente se trabaja con la corriente para el actuador, y debemos trabajar con una corriente constante en la bobina central para obtener los mismos resultados con la variación de corriente en las otras bobinas diferenciales. Su circuito se halla en la lámina A8 en la parte inferior.

Al observar dicha lámina es fácil comprender que el circuito se basa en el mismo principio explicado anteriormente, el de fuente de corriente, pero en ese caso simplemente se tendrá un voltaje constante en la base del transistor lo cual da lugar a una corriente constante en la carga. Se ha colocado el potenciómetro en el divisor de voltaje para calibrar el valor de corriente que circulará por la bobina central del actuador.

Es importante notar que se utiliza un transformador para la fuente de polarización de los circuitos integrados y otro para la parte de potencia con la finalidad de aislar y evitar quedarnos sin el circuito de protección por falla en la parte de potencia que por manejar corrientes mayores puede presentar variaciones de voltaje en

sobrepicos de corriente.

Esta fuente de corriente está en la capacidad de entregar una corriente de 2.5 A. y un voltaje de 18 V. a la carga; pero como ya se indicó anteriormente estos valores se calibran de acuerdo a nuestras necesidades. Por la carga que maneja no justifica sea una fuente regulada y es suficiente con el rizado obtenido a la salida de los condensadores de filtrado luego del puente rectificador.

Al tratarse de una carga inductiva también se ha colocado el diodo de protección entre el emisor y colector del transistor de salida y lograr disipar la energía almacenada en la bobina en el momento de ser desactivada.

#### 2.5.5.- FUENTES DE POLARIZACION PARA EL ACTUADOR.

Tanto para la polarización del circuito que maneja la corriente para el actuador como la fuente que entrega dicha corriente se lo presenta en la lámina A9. Y se trata de una fuente regulada para garantizar un funcionamiento adecuado del circuito de conversión voltaje-corriente que requiere una buena precisión.

Como puede verse fácilmente tiene la misma configuración que la fuente de polarización para los circuitos integrados como se observa en el diagrama de bloques.

La diferencia está en el tipo de regulador de



voltaje utilizado, en el presente caso se utiliza el regulador LM723N, que tiene la característica de voltaje variable. Y junto a este únicamente colocamos el amplificador de corriente. No se ha limitado la corriente en esta parte por cuanto se tiene el circuito de protección de sobrecorriente.

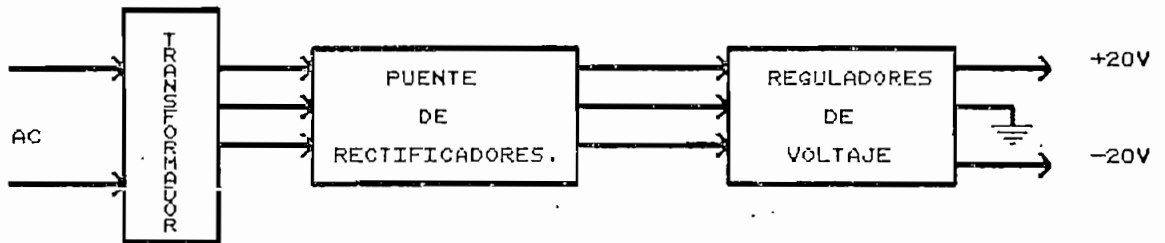


Fig. 2.20. Diagrama de bloques de la fuente de polarización.

Las configuraciones presentadas de igual forma son muy conocidas por lo cual no cabe mayor explicación de su funcionamiento. También se ha colocado un potenciómetro con la finalidad de lograr calibrar los voltajes de salida y lograr la precisión necesaria. De este circuito también se obtiene la polarización para los operacionales cambiadores de nivel en el circuito conversor voltaje-corriente.

Su nivel de voltaje superior es  $\pm 22$  V. y una capacidad de corriente de  $\pm 2.5$  A. que son suficientes para

el trabajo a realizarse por el actuador y poder mover la posición angular de la viga. Su señal de entrada se la obtiene del mismo transformador utilizado para la polarización de la bobina central rectificadora por el puente de diodos y filtrada con los condensadores de entrada grandes. Realmente el circuito presentado se trata de uno muy conocido por lo cual no es necesario mayor explicación de su funcionamiento.

#### 2.5.6.- CIRCUITO DE PROTECCION DE BAJO-VOLTAJE Y REINICIO DEL SISTEMA.

Como ya se mencionó en los circuitos de protección anteriores se ha diseñado el circuito que permite un normal funcionamiento siempre y cuando los niveles de voltaje de las fuentes de polarización sean los adecuados, además de entregar las señales digitales para reiniciar (RESET) el funcionamiento del equipo, en las condiciones iniciales necesarias para empezar a trabajar con el mismo. Su diagrama de bloques lo tenemos en la figura 2.21 en la cual se observa que tiene cierta semejanza con los anteriores circuitos de protección.

Observando la lámina A10 tenemos que el bloque de comparadores se halla conformado por amplificadores operacionales conectados de tal forma que son circuitos con histéresis, con la finalidad de desactivar el sistema únicamente en caso de existir un bajón de voltaje apreciable. Y se ha colocado una ventana de 0.46 V. y el centro de la misma en 13.7 V. que son valores dentro de los

cuales los circuitos pueden trabajar en forma normal.

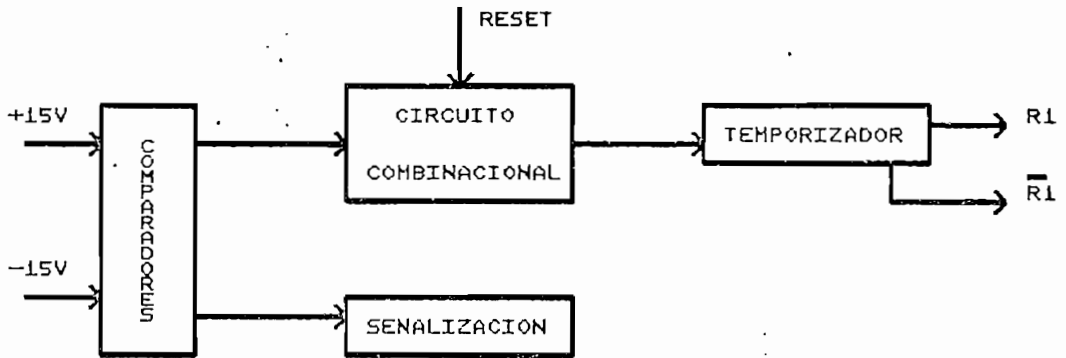


Fig. 2.21. Diagrama de bloques del P.O.R.

Mientras que para sensar el voltaje se ha hecho divisores de voltaje de tal forma que el circuito funcione a pesar de bajar la polarización, y es por ello que todos los elementos utilizados en este circuito se han polarizado con  $\pm 12$  V.

La señalización al igual que los casos anteriores es instantánea y también posee la posibilidad de chequear su señal luminosa, pero no se ha colocado el SCR para dejarlo encendido ya que no tiene sentido, pues esta permanecerá encendida mientras el voltaje no sea el adecuado y se apagará cuando este en un funcionamiento normal.

El circuito temporizador de igual forma es un

LM555 funcionando como un monoestable y de este se obtiene las señales R1 y R1 negado que actúan para desactivar las señales de control de los interruptores análogos.

En cuanto al circuito combinacional permite reiniciar el sistema, para lo cual también hace uso del temporizador con la finalidad de restablecer un normal funcionamiento luego de un instante de pulsar el RESET del equipo y darnos las condiciones iniciales adecuadas para un normal funcionamiento. La señal viene de la lámina A11, en la misma que se presenta la circuitería adicional para lograr la señal RESET que apaga al SCR y da lugar a un reinicio del sistema, se tiene además el circuito de chequeo de las señales luminosas, ambos circuitos consistentes únicamente en pulsantes que conectan a tierra, en el un caso para facilitar la circulación de corriente que encenderán los LEDs de señalización, mientras con el otro logramos apagar los SCRs y reiniciar el funcionamiento con todas las señales apagadas, para garantizar el apagado de los SCRs se ha colocado otro diodo en serie con cada uno de ellos.

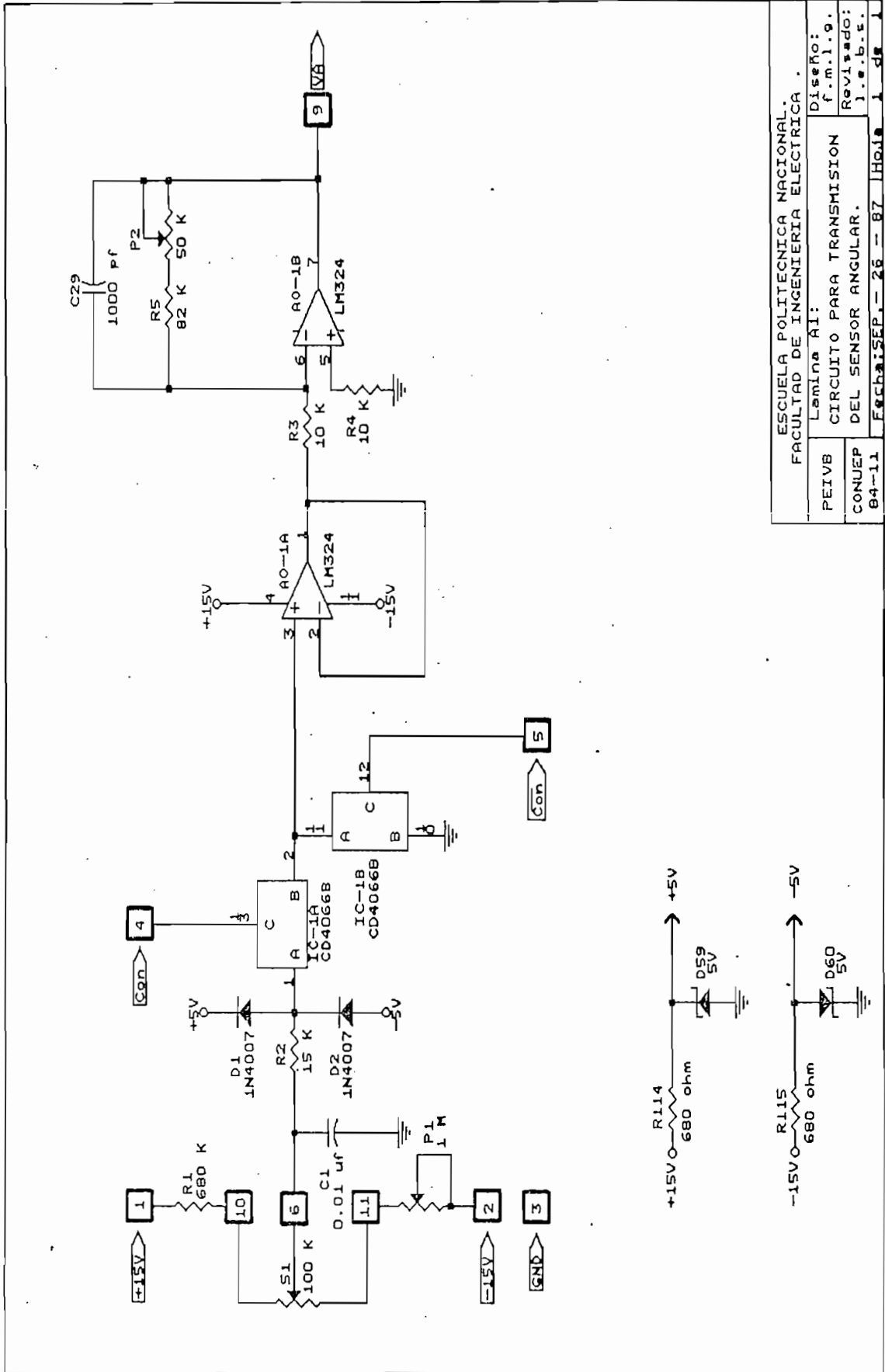
Con esto se ha explicado cada uno de los diseños electrónicos utilizados para un normal funcionamiento del equipo. Su implementación es muy sencilla ya que se tratan de circuitos de uso común, y sus limitaciones están dadas más bien por las características propias de los elementos utilizados en su implementación.

Además se debe respetar los niveles de voltaje de entrada, los cuales deben ser de  $\pm 10$  V., de igual forma que en el computador análogo. Se debe también estar atento al encendido de cualquier señal luminosa con la finalidad

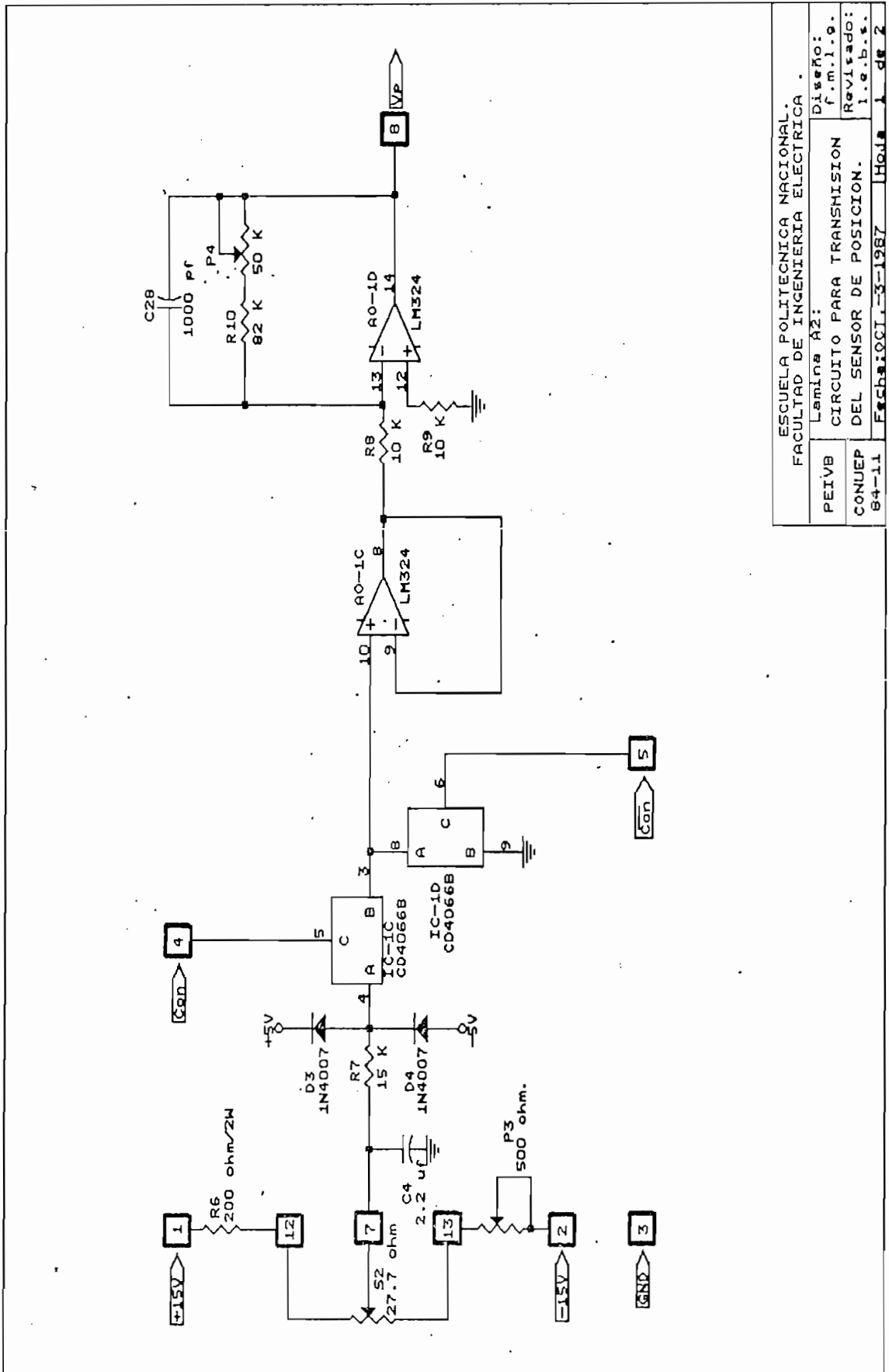
de corregir posibles fallas por interconexión del equipo, y en caso de existir se debe primero corregirlas para luego reiniciar el funcionamiento del equipo.

En cuanto al actuador ya que existe una corriente constante circulando por la bobina central, se debe tratar que el equipo no permanezca encendido por un largo tiempo, que podría causar exceso de calentamiento que dañe al actuador.

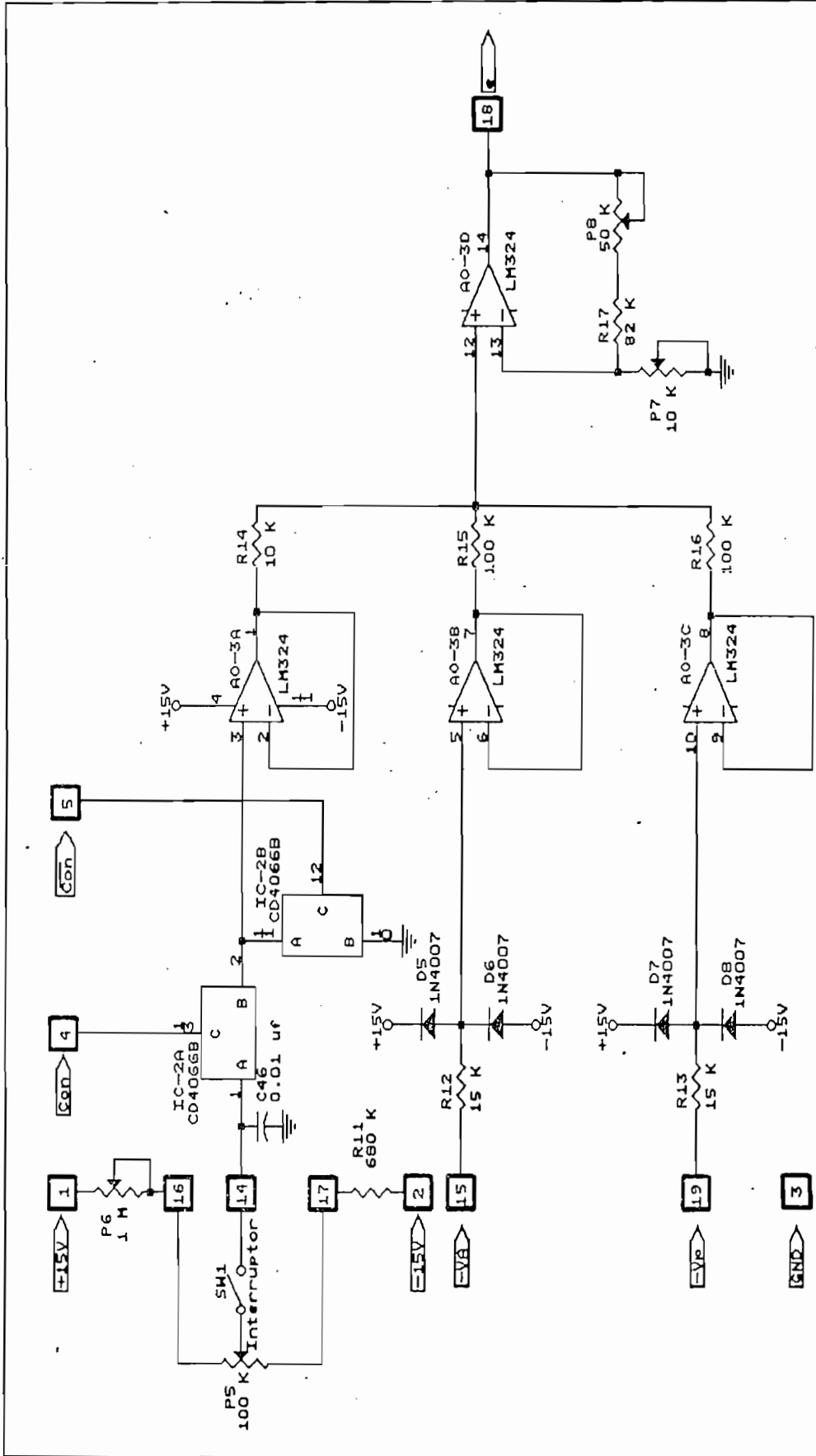
A continuación se presenta las láminas a que se hacen referencia en este capítulo:



ESCUOLA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA.		Diseño: f.m.i.g.	
PEIVB	Lamina AI:	Revisado: l.e.b.t.	
CONUEP	CIRCUITO PARA TRANSMISION DEL SENSOR ANGULAR.		
B4-11	Fecha: SEP.-26-87	Hoja	1 de 1

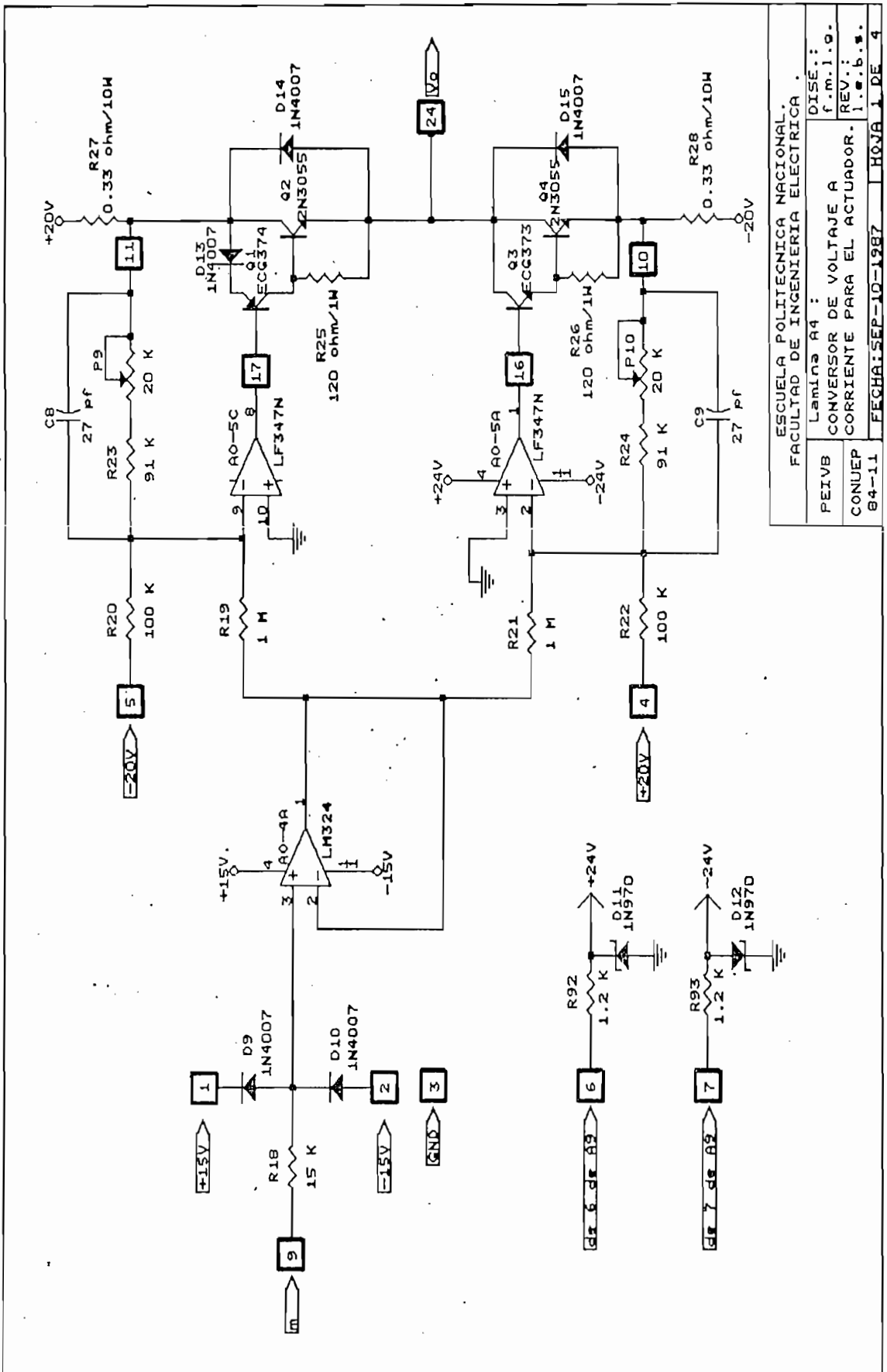


ESCUOLA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA		Diseño: f.m.l.9.	Hoja 1 de 2
PEIVB	Lamina A2:	Revisado: I.e.b.s.	
CONUEP 84-11	CIRCUITO PARA TRANSMISION DEL SENSOR DE POSICION.	Fecha: 01-13-1987	

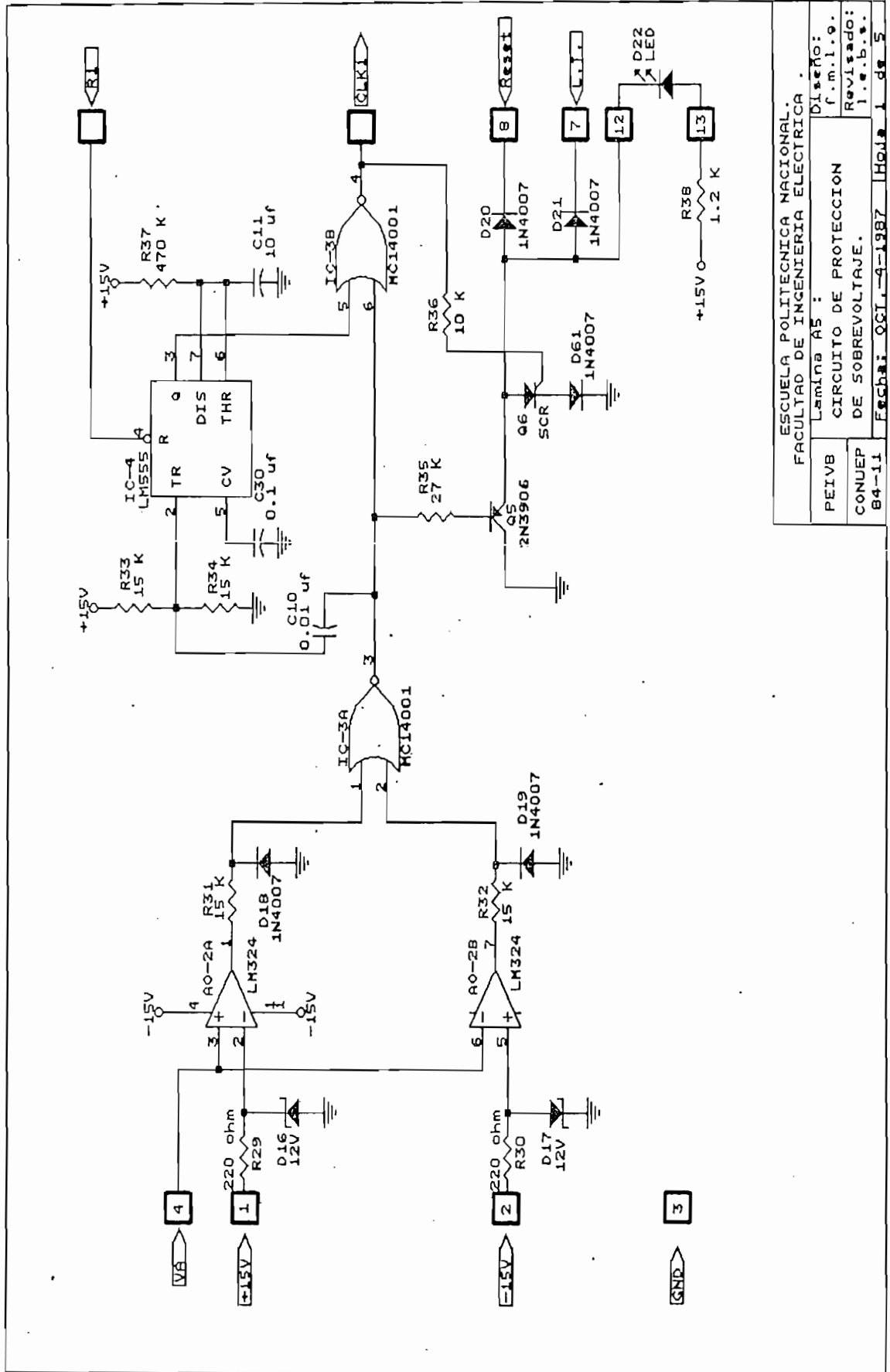


ESCUOLA POLITECNICA NACIONAL.	
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA.	
PEIVB	Diseño: f.m.l.g.
CONUEP	Revisado: l.e.b.s.
84-11	Fecha: OCT.-4-1987
	HOJA 1 DE 3

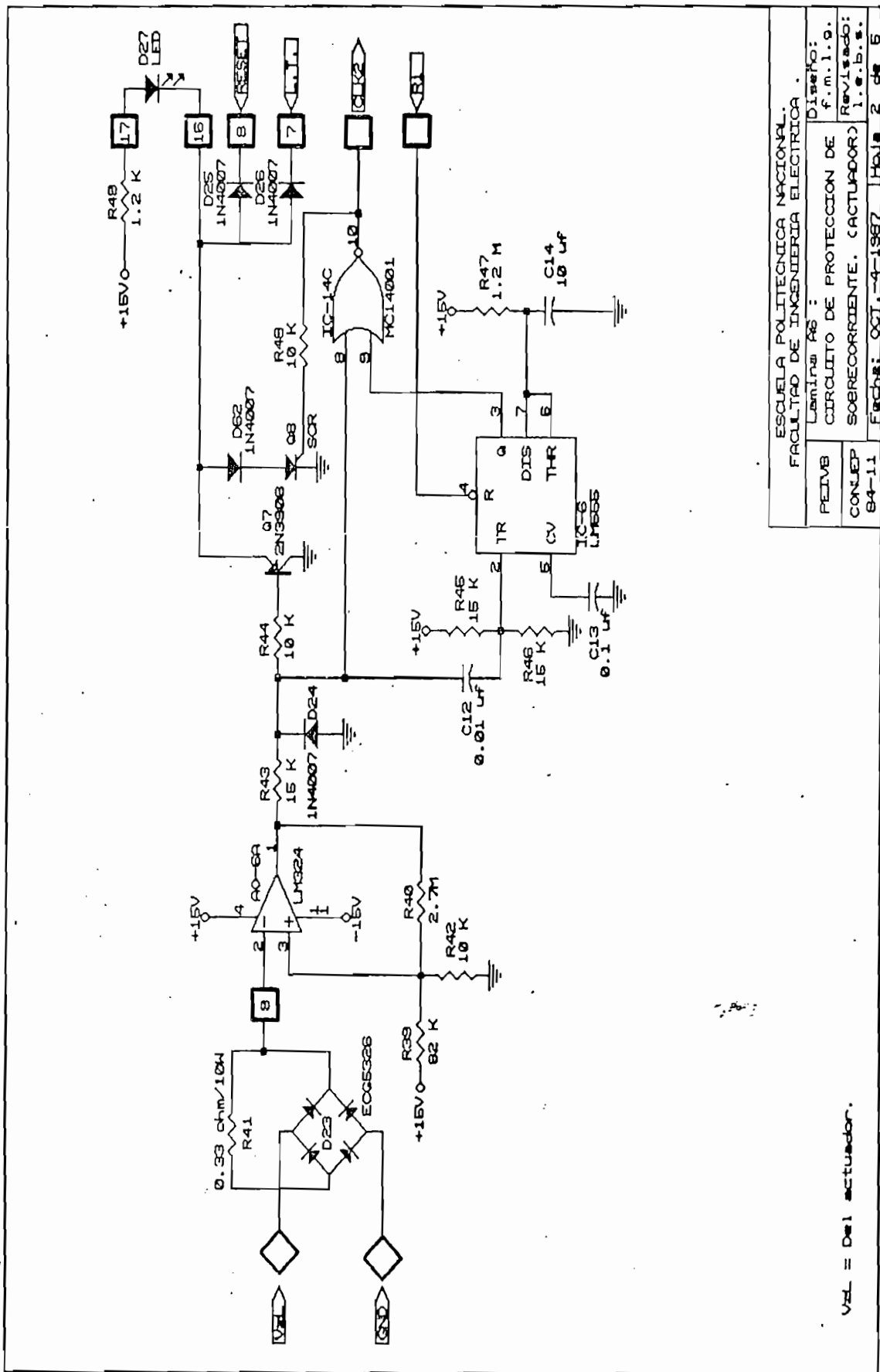




ESCUOLA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .	
PEIVB	Lamina A4 :
CONUEP	CONVERSOR DE VOLTAJE A CORRIENTE PARA EL ACTUADOR.
84-11	DISE.: f.m.l.g. REV.: j.g.b.s.
FECHA: SEP-10-1987 HOJA 1 DE 4	



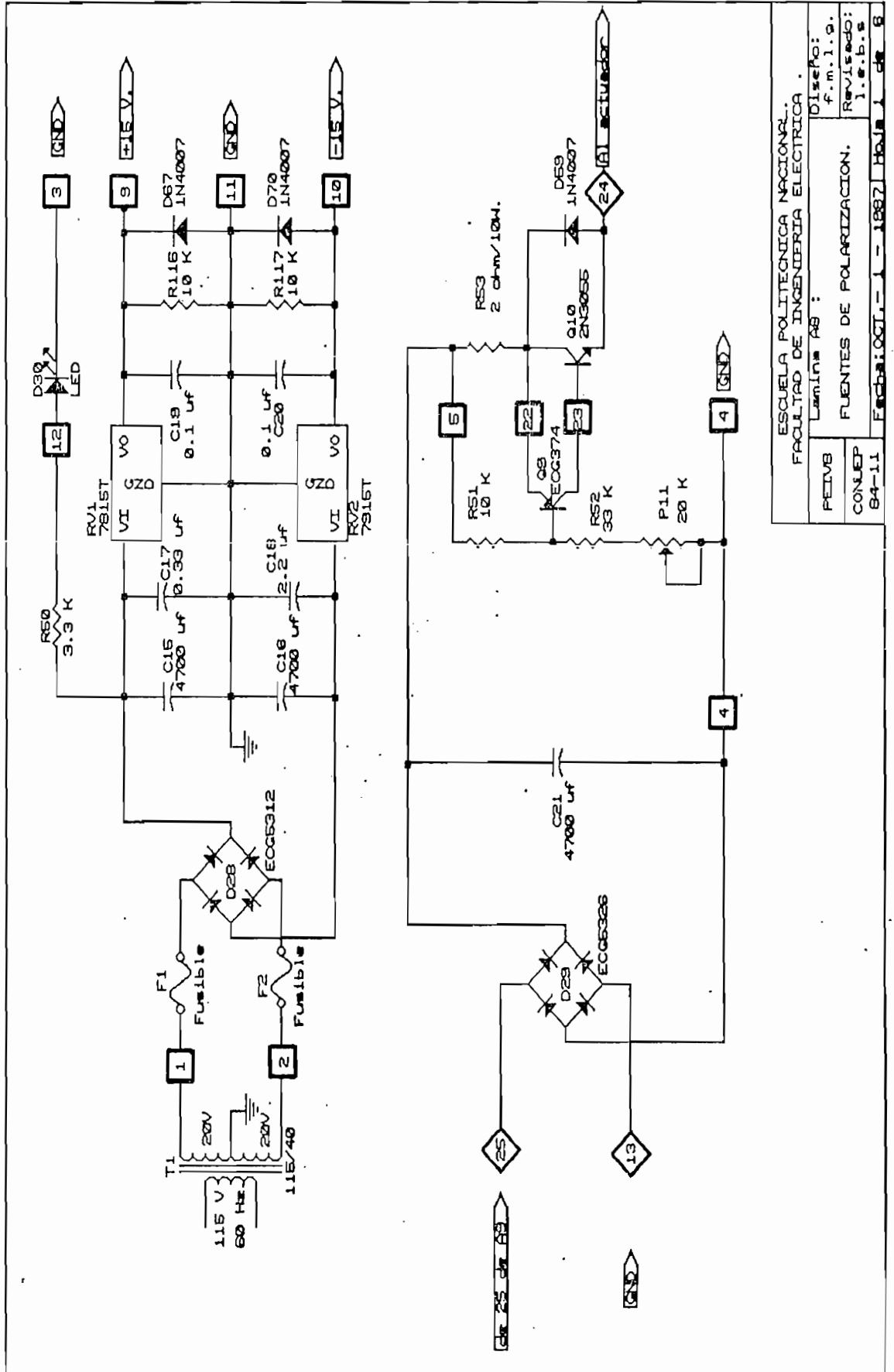
ESCUOLA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .		Lamina A5 :	
PEIVB	CIRCUITO DE PROTECCION DE SOBREVOLTAJE.	Diseño:	f.m.l.g.
CONUEP 84-11		Revisado:	l.e.b.s.
		Fecha:	02-1-1987 Hoja 1 de 5



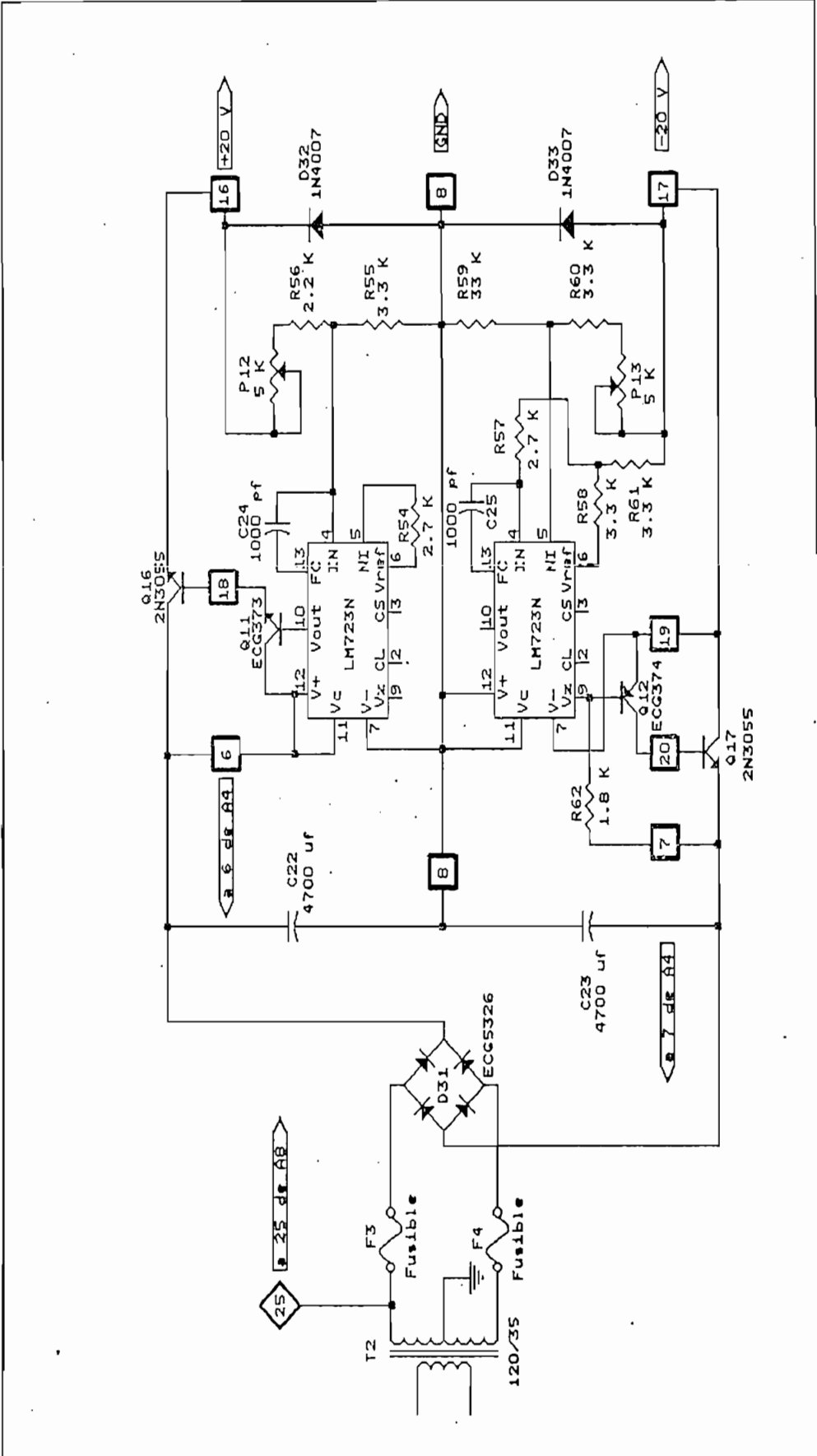
ESUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA.		Diseno:	
PEIMB	Laminas A5:	f.m.l.o.	
CONLEP	CIRCUITO DE PROTECCION DE SOBRECORRIENTE. (ACTUADOR)		Revisado:
B4-11	Fecha: 007-9-1987	Hoja 2	de 5

VZL = Del actuador.





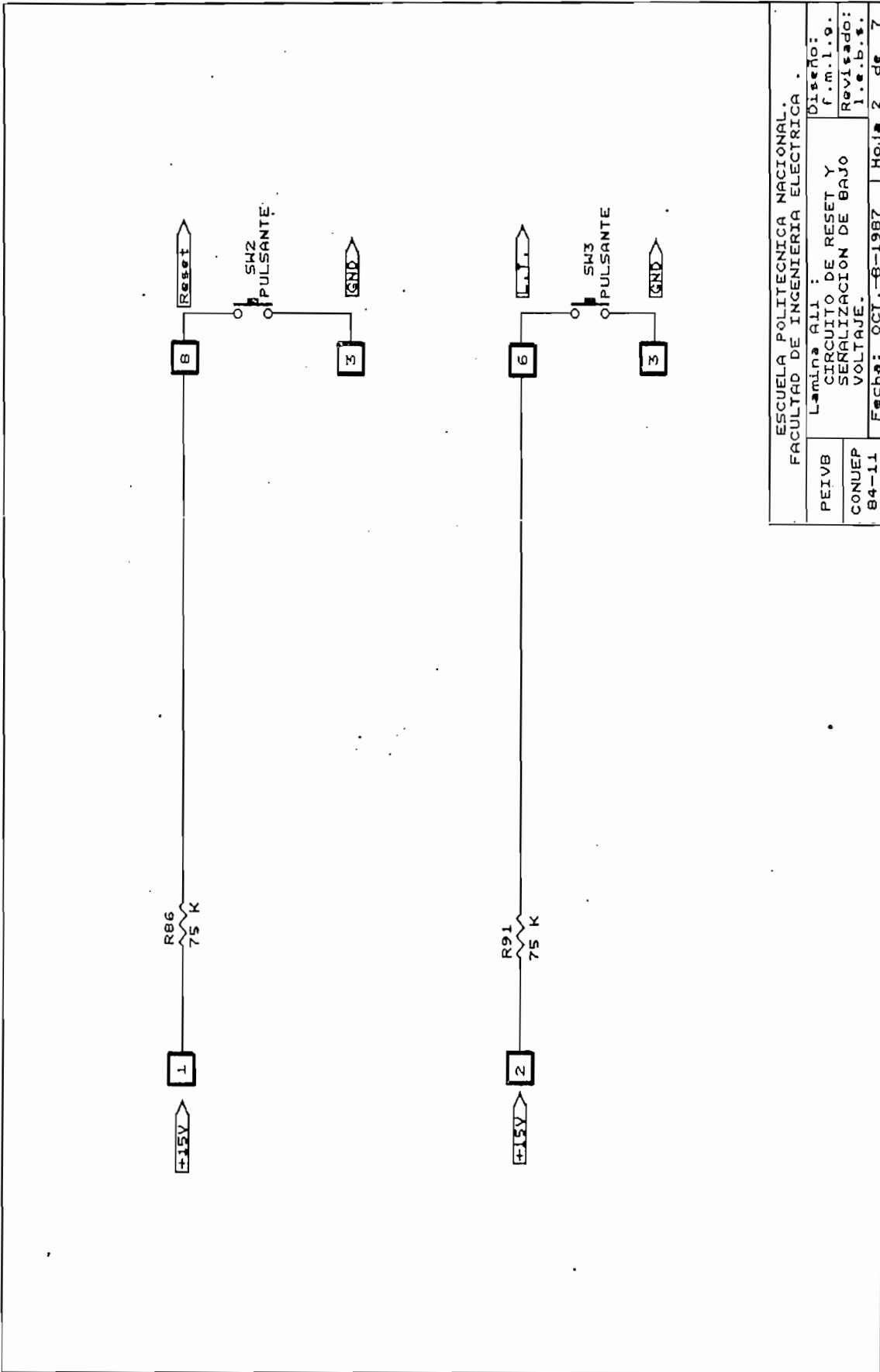
ESUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA		Diseño: f.m.l.g.	
Lamina 88:		Revisado: l.e.b.s	
FEI/8	CONUEP 84-11	Fecha: OCT. - 1 - 1987	Hoja 1 de 6



ESCUOLA POLITECNICA NACIONAL.	
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .	
PEIVB	Lamina A9 :
CONUEP	Fuentes de Polarizacion
84-11	PARA EL ACTUADOR.
Fecha: 06Y-3-1987	Revisado: I.e.b.s.
	Hoja 2 de 6

Diseño: f.m.l.g.  
 Revisado: I.e.b.s.





ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .	
PEIVB	Lamina All :
CONUEP	CIRCUITO DE RESET Y
84-11	SERIALIZACION DE BAJO
	VOLTAJE.
	Fecha: OCT. 8-1987
	Hoja 2 de 7







CAPITULO III

APLICACIONES DEL EQUIPO

INTERCONECTADO AL

COMPUTADOR ANALOGO

### CAPITULO III

#### APLICACIONES DEL EQUIPO INTERCONECTADO AL COMPUTADOR ANALOGO.

##### INTRODUCCION.

Una vez construido el equipo diseñado en el capítulo anterior, en el presente se hará uso del mismo para la finalidad que fue hecho, esto es como un equipo didáctico para el área de Control y Sistemas. Se procederá a dejar ejemplos demostrativos de la versatilidad del mismo, queda sin embargo abierta la posibilidad de implementar otras opciones de control. Para esto se utiliza el computador análogo de la casa EAI como elemento de control activo para lograr la estabilidad del sistema. Además los circuitos implementados han sido realizados de acuerdo a los niveles de voltaje con los cuales trabaja este computador.

Se tiene un sistema inherentemente inestable y sobre el cual se puede trabajar para lograr su estabilidad, o realizar análisis en el campo de Control Automático de sistemas, siendo posible usar el Control Clásico, Control Moderno, Control no lineal, Control Discreto y la Identificación de parámetros. Con lo cual se puede profundizar debidamente en la enseñanza de la teoría de Control.

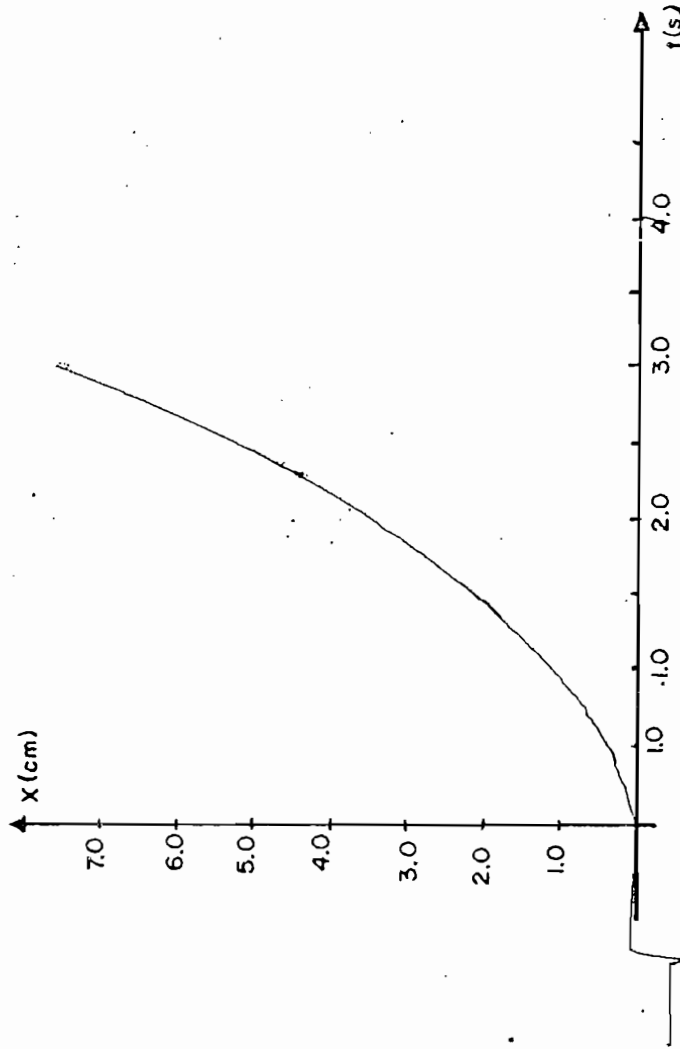
Para la interconexión del equipo se tiene un panel mímico de la planta construida de tal forma que se facilita su operación. Siendo posible llegar a varios puntos de la malla de control para obtener respuestas gráficas en los puntos que interesan y poder analizar estos resultados de una manera muy versátil y fácil.

### 3.1.- IMPLEMENTACION DE COMPENSADORES EN EL COMPUTADOR ANALOGO PARA CONTROL DE EQUIPO.

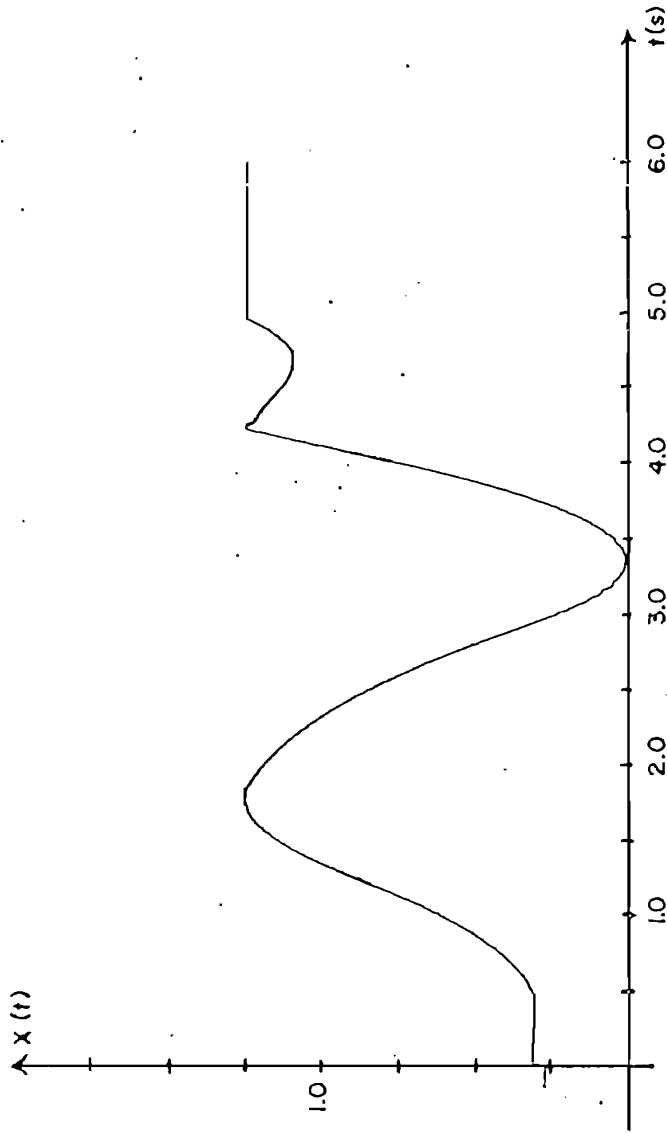
Como ya se indico en el primer capítulo únicamente se dejan ejemplos demostrativos de la adecuada utilización del equipo construido. Por esta razón se pasa a implementar los compensadores analizados y calculados en el primer capítulo.

En primer lugar; antes de empezar con los compensadores es conveniente obtener resultados de la planta original, en lazo abierto y con realimentación unitaria, que de igual forma se tiene la simulación. Aquí es importante indicar que no se logrará precisión respecto de la simulación ya que para lograrlo fue necesario linealizar al sistema; pero en forma general se puede observar su comportamiento y la similitud que nos permitirá confirmar la linealización realizada en el primer capítulo. Los resultados prácticos obtenidos con el equipo se hallan en las figura 3.1 y 3.2; para lazo abierto y lazo cerrado respectivamente, se los puede comparar con los obtenidos en el primer capítulo, con la simulación de la planta:

$$G(s) = \frac{2.128}{s^2}$$



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA.	
PEIVB	Diseno:
CONUEP	f.m.i.g.
84-11	Revisado: l.e.b.s.
Fig. 3.1: SALIDA EN LAZO ABIERTO.	
Fecha: 3-SEP.-1988	
Hoja 1 DE 1	



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA .	
PEIVB	Fig. 3.2:
CONUEP	Diseño: f.m.l.g.
84-11	Revisado: l.e.b.s.
Fecha: 3-SEP.-1988	
Hoja 1 DE 1	

Si nos fijamos en las figuras correspondientes del primer capítulo se observa su gran similitud y nos confirma lo anteriormente hecho para estabilizar el sistema. Siendo aceptable la diferencia existente si se tiene presente las restricciones hechas para llegar a la función de transferencia presentada.

A continuación se presentan ejemplos comparativos y demostrativos de la compensación del sistema con la planta real:

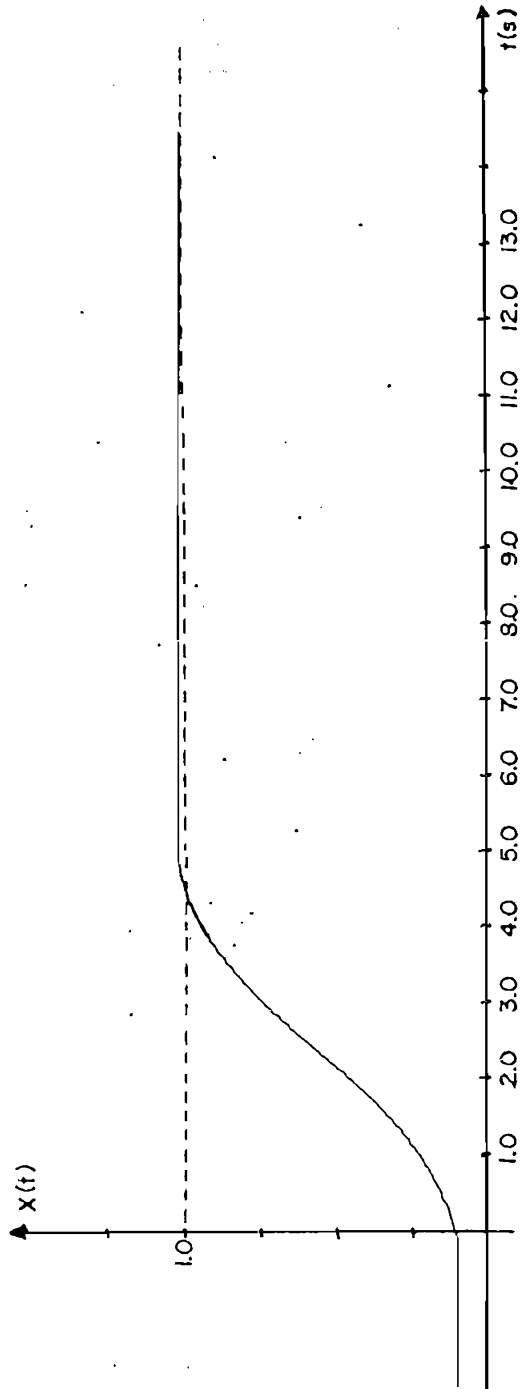
### 3.1.1.- COMPENSACION EN ADELANTO.

Siendo más conocido el control clásico se ha empezado con la implementación del compensador calculado en el primer capítulo y se han obtenidos resultados. Las conexiones necesarias para su funcionamiento se las hará en los puntos 4 y 5 del panel mímico, y lograr la señal de control necesaria para estabilizar la posición de la bola sobre la viga. El resultado práctico se lo tiene en la fig 3.3 y de igual forma se puede comparar con el obtenido en la simulación del primer capítulo. Siendo importante notar que se logró el control de la bola sobre la viga que es el objetivo primordial del equipo construido. Con esto también se prueba el funcionamiento del mismo y además los resultados teóricos ya obtenidos.

### 3.1.2.- COMPENSACION PROPORCIONAL-DERIVATIVA.

Para continuar con la secuencia del primer





ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .

PEIVB	Fig. 3.3:	Diseño:
CONUEP	COMPENSACION CON RED	f.m.l.g.
84-11	DE ADELANTO.	Revisado:
	Fecha: 10-oct-1988	l.e.b.s.
		Hoja 1 de 1

capítulo se pasa a obtener los resultados prácticos con la implementación del compensador diseñado anteriormente con las técnicas de las acciones de control, los resultados se hallan en la Fig. 3.4. Al revisarlos podemos indicar que de igual forma que el caso anterior cumple con el objetivo de estabilizar el sistema, y es similar al anterior, sin mayor diferencia con el compensador en adelanto así como con el obtenido por medio de la simulación.

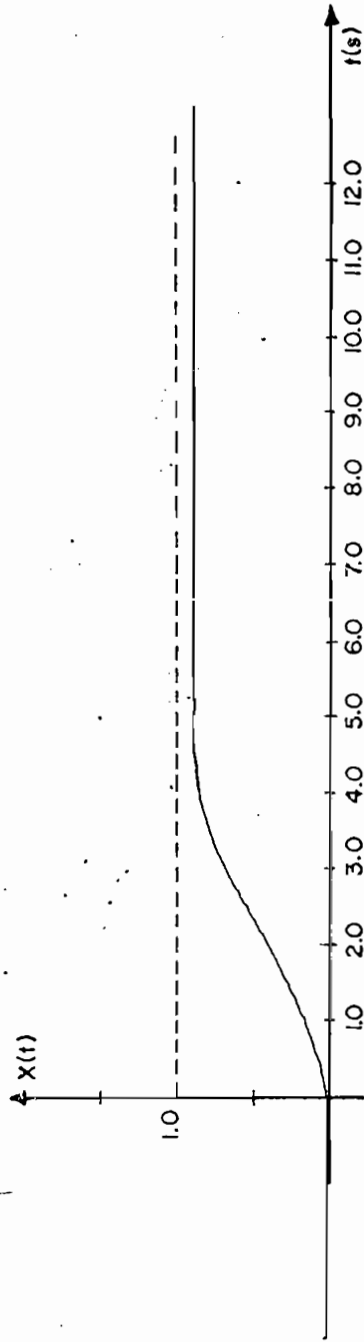
### 3.1.3.- COMPENSACION POR REALIMENTACION DE ESTADO.

En este caso es importante recalcar que se debe realimentar posición lineal y velocidad de la bola sobre la viga, pero de igual forma que lo descrito en el primer capítulo; esto es que la velocidad puede ser reemplazada por la realimentación de la posición angular de la viga, lo cual se confirma con los resultados prácticos obtenidos y que se presentan en la Fig. 3.5. Además es el control más robusto que se puede lograr; y es factible observar claramente con el funcionamiento del equipo, y que incluso da mejores resultados de estabilidad relativa.

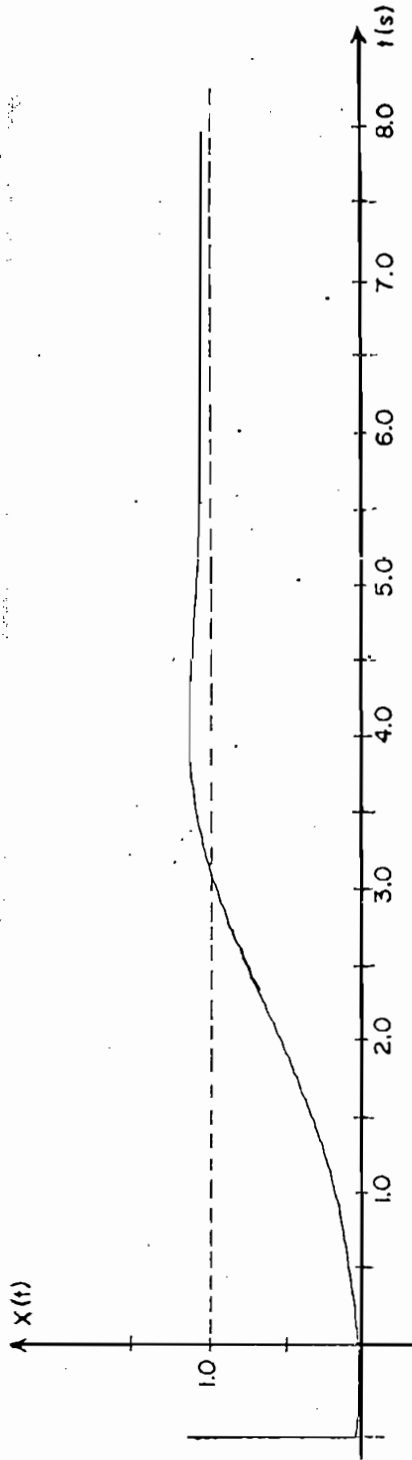
Se debe recalcar que para apegarnos a la teoría de Control Moderno en lo referente a la realimentación de estado se debería implementar el algoritmo adecuado para el observador que permita el control de la planta presentada y que requiere este tipo de compensación.

### 3.2.- PRUEBAS Y RESULTADOS.

En esto es importante tener presente que el equipo diseñado tiene la capacidad para controlar la posición de



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .		Diseño: f.m.l.g.
PEIVB	COMPENSACION PROPORCIONAL DERIVATIVA.	Revisado: l.e.b.g.
CONUEP 84-11	Fecha: 10-oct-1988	Hoja 1 de 1



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA		Diseño: f.m.l.g.	
PEIVB	COMPENSACION POR REALIMENTACION DE ESTADO.		
CONUEP 84-11	Fecha: 10-oct-1988	Hoja	1 de 1

la bola sobre la viga, y vuelvo a insistir es el principal objetivo de su construcción. A pesar de dar lugar a errores que se producen por defectos de carácter constructivo en el área mecánica que necesita mayor precisión y esto hará encarecer el prototipo. Esto da lugar a la presencia de no linealidades en el sistema real y a pequeñas diferencias con respecto a la simulación realizada de la modelación del sistema, en el cual se trabaja con un sistema totalmente lineal; por esto también la sugerencia de continuar con el estudio teórico en la parte no lineal y que no es parte de la presente tesis.

Las pruebas realizadas son las de la parte 3.1, en donde se han implementado los circuitos compensadores calculados teóricamente y presentados en el primer capítulo, y para lograrlo fue necesario conectar el equipo al computador análogo y al grafizador. Y con esto es evidente su normal funcionamiento según lo deseado. Para analizar los resultados es suficiente con observar los obtenidos, y no cabe profundizar aún más por cuanto lo primordial es su funcionamiento, y esto se da por cuanto la presente tesis se ha orientado a la parte constructiva del equipo propuesto.

Para un trabajo normal del equipo no se debe exigir mucha exactitud y tratar de lograr lo del estudio teórico, por cuanto tiene limitaciones de carácter constructivo, y al tratar de exigir mucho se podría causar daños. La justificación primordial para esto es que en todo Sistema de Control real se deberá sacrificar algo; esto es en rapidez o precisión, para lograr los objetivos deseados sin incrementar el costo para lograrlo.

También no considero importante pasar a analizar cada detalle del equipo y sus resultados. Es mejor observar el funcionamiento del equipo y fijarse en los resultados prácticos ya obtenidos. Así tenemos por ejemplo la gran similitud entre las Figuras 3.1, 3.2 y las Figuras 1.14 y 1.16.

El sistema se halla conformado por un panel mímico que facilita su comprensión y operación según la finalidad para la que fue construido. Pero tanto para su manejo como para conocer sus características se puede referir a los apéndices correspondientes, donde se halla esta información.

Los resultados se los puede obtener impresos por medio del grafizador o en un osciloscopio, que es conveniente tenga memoria para lograr retener la señal de salida y poder ser analizada, señal que no es de carácter repetitivo. El elemento de control usado para obtener los resultados anteriores es el computador análogo, pero esto no implica que sea la única manera de lograrlo, ya que se puede utilizar cualquier elemento que tenga las características adecuadas tanto en niveles de voltaje como en corriente.

Al observar la Fig. 3.1 se puede concluir su gran similitud con la obtenida en la Fig. 1.14; para lo cual únicamente necesitamos el equipo y el grafizador, con esto además se comprueba el normal funcionamiento del sensor de posición como el circuito acondicionador de su señal a los niveles de voltaje deseados. Para el caso del sumador se tiene la Fig. 3.2 en la cual se logra la respuesta del equipo realimentado, dando lugar a la

esperada según la simulación del primer capítulo. Los indicadores luminosos funcionan en la secuencia para la que fueron diseñados, esto es, se encienden cada vez que existe una señal instantánea mayor a los 12 V. en las entradas y se quedan encendidos cuando el error persiste más de 10 seg. También se puede probar el indicador de bajo voltaje si se usa un variac a la entrada del equipo, esta permanece encendida mientras el nivel de voltaje no sea el adecuado. Con esto se comprueba el funcionamiento de la lógica que fue implementada adicionalmente e incluido en el equipo por tratarse de un prototipo didáctico. La circuitería electrónica necesaria para el control de posición realmente es muy sencilla y se la comprueba fácilmente realizando una conexión directa de la salida de los sensores a las entradas del sumador; es decir una realimentación unitaria, esto da lugar a magníficos resultados; confirmándonos el funcionamiento deseado del equipo construido.

El principal problema que se debe resolver a futuro para mejorar el equipo presentado y lograr mayor precisión es el acople mecánico del actuador con la viga; ya que en lo referente a lo electrónico como es el caso del amplificador de potencia que lo maneja; funciona como fue diseñado y para su comprobación se puede intercalar un amperímetro entre la salida del amplificador y la bobina central del actuador, lográndose observar la variación de corriente según como ha sido diseñado, esto es como fuente de corriente controlada por voltaje. De esto se concluye que el elemento que da lugar a una no linealidad, ni a mayor precisión es el acople mecánico, lográndose perder la finura para manejar la posición de la bola sobre la viga.

De esta manera se han descrito todas las pruebas necesarias para comprobar el funcionamiento del equipo y el cumplimiento de la finalidad para la cual fue diseñado y construido . En general no tiene mayores complicaciones ya que la parte electrónica es muy sencilla, lo principal fue considerar que se trata de un equipo didáctico y añadir los elementos necesarios para no causar mayores complicaciones por una mala operación en su manejo.

### 3.3.- CONCLUSIONES.

De las pruebas realizadas, así como de todas las experiencias obtenidas durante el estudio, diseño y sobre todo la construcción del equipo se ha llegado ha varias conclusiones y algunas recomendaciones necesarias para lograr mejores resultados en la construcción de otro similar. Vuelvo a insistir que las conclusiones y recomendaciones son generales y no puntuales a este capítulo, así tenemos:

- En la presente tesis no se incluye los estudios preliminares para la concretación en el uso de cada uno de los bloques constitutivos del equipo total, ya que es importante los resultados finales. Concluyéndose que se trata de un prototipo de carácter didáctico y de su funcionamiento se sacarán nuevas ideas para mejorarlo; es decir es el inicio de un estudio que puede generar mayores resultados con las experiencias obtenidas.

Las siguientes conclusiones son las obtenidas durante el desarrollo del equipo diseñado, construido y



presentado actualmente:

- La mejor manera de obtener los parámetros de la modelación de la planta real es por medio de la Identificación paramétrica, con lo cual se tendrá presente todos los elementos participantes en ella; sin necesidad de preocuparse que la parte constructiva no cambie en ningún detalle. Para esto es suficiente tener presente la forma de la ecuación que representará la planta.
- Para llegar a mejores resultados por medio de la compensación con red en adelanto, y en general para cualquier compensador del Control Clásico es preferible utilizar el método del tanteo y obtener sus parámetros. Por ello la recomendación de realizar una simulación de la planta a compensar, en la cual se pueda determinar los parámetros para su compensación; siendo necesario luego realizar los ajustes correspondientes en la planta real; ajustes que no serán mayores ni podrán producir daños irreparables en los equipos o planta a controlar.
- Por la presentación del panel de trabajo, el equipo da la facilidad de ser usado como herramienta didáctica y también facilitará la comprensión de la teoría de control automático. Llegándose a resultados deseados con una planta real.
- Dada la necesidad que el equipo sea usado en el campo didáctico fue necesario añadir controles y una lógica para indicar posibles errores en su operación, ya que la circuitería necesaria para el funciona-

miento del equipo como control de posición es muy simple. Esto implica que es necesario en cualquier clase de equipo de control posea las señalizaciones adecuadas para que su operación sea fácil y sin errores, siendo siempre necesario pensar en circunstancias adicionales al objetivo final para solventarlas y protegerlo.

- El principal elemento del equipo presentado es el actuador que dio lugar a un estudio adicional para determinar la posibilidad de usar un LVDT como actuador en lugar de ser sensor, y además trabajar con corriente directa. Es el elemento que debe tener la mayor precisión y rapidez para lograr los resultados finales caso contrario no se podría lograr el control de posición. En el actuador total se incluirá la fuente de corriente controlada por voltaje, cuyo diseño dio los resultados esperados, ya que es capaz de manejar corriente positiva y negativa, este circuito podría ser usado en un caso similar que necesite una fuente de corriente. Se vuelve sin embargo a insistir en el mejoramiento de la parte mecánica.
  
- De igual forma se debería analizar el caso del sensor angular por cuanto hay otras posibilidades para lograrlo como es el caso del mismo LVDT como sensor; que dará mejores resultados y habrá que estudiar el tipo de acople necesario para su trabajo. Otra forma sería por medio de un sensor capacitivo; ambos tipos de sensores sugeridos son adecuados pero es conveniente considerar que se trata de un prototipo y su uso encarece al sistema total. Sin embargo queda

planteada la posibilidad de su uso para la construcción de otro equipo similar.

- Al referirse al caso de los sensores se debe señalar el caso del sensor de posición y la localización que puede tener; ya que la otra posibilidad es colocarlo en la parte superior de la bola lo cual cambia el modelo ya que se incluirá una fuerza de rozamiento. Pero esto podría mejorar la dinámica del sistema al no permitir que por causa de la inercia la bola pueda salir de la viga. Lo que se perderá es la posibilidad de cambiar de diámetro de la bola que influye en la dinámica del sistema y esto desmejora al equipo como elemento didáctico.
  
- Se recomienda continuar en otra tesis con el estudio de carácter teórico es decir la implementación de otros compensadores para el sistema y su aplicación con el equipo y planta real, para lograr justificar el diseño teórico; además de definir ciertos parámetros que se deben tener presente para este diseño.
  
- Las irregularidades en el sensor de posición y efectos colaterales dan lugar a que la señal que se obtiene de él no sea muy adecuada por lo cual es necesario al acople de un elemento alisador; para lo cual se hace uso de la teoría del Sample-Hold y lograr los mejores resultados. También se debería tratar de conseguir un conductor de otro material para evitar el óxido que puede acumularse en el caso del cobre desnudo; las posibilidades pueden ser aluminio o el mismo cobre pero estañado.

- La realización de dos fuentes para el equipo total da buenos resultados ya que se logra independizar el circuito de control del circuito de fuerza que puede dar lugar a interferencias que afectará el comando y señalización total.
- Para no llegar a dañar el equipo construido se debe recomendar que no existan cambios bruscos en la posición de la bola, esto es, se deberá colocar la bola lo más cerca posible del punto de estabilización. O la otra posibilidad es trabajar con el concepto de regulación en lugar del de Control. Esto espera garantizar el mejor funcionamiento del equipo; ya que de otra forma al exigir demasiado se presentan las limitaciones prácticas de la viga que incluso haría que la bola salga del canal.
- En todo equipo que tenga señalizaciones de cualquier índole se debería incluir la instrucción o posibilidad de un chequeo de todas las señalizaciones antes de empezar con el funcionamiento normal. Con esto se garantiza que se detectarán fallas o cambios existentes en el equipo para lo cual fueron colocadas y diseñadas.
- En el caso de instrumentación es preciso dejar la posibilidad de futuras calibraciones por desgaste ya sea de los sensores mismos o por cambios en los elementos del circuito transductor de la señal.
- La potencia necesaria del actuador dará lugar a un cambio de la señal utilizada; ya que en casos reales será necesario el uso de la neumática o hidráulica

para lograr grandes niveles de potencia. En nuestro caso no amerita esto, pero el cambio de tipo de bola; como sería el caso de una bola hueca requerirá de una menor potencia. Siendo importante recalcar que en un sistema de control real el objetivo final no es lograr obtener todos los parámetros óptimos ya que será necesario sacrificar sea en rapidez o precisión para no encarecer el sistema de control total, para esto también es importante analizar el punto económico además del técnico, para esto se deberá tener presente el uso para el cual es construido el sistema.

De esta manera se puede terminar la presentación del equipo construido y diseñado en la presente tesis y las experiencias obtenidas de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- 1.- Curtis, Jonhson, "PROCESS CONTROL INSTRUMENTATION TECHNOLOGY", John Wiley & Sons, USA, 1982.
- 2.- Ogata, Katsuhiko, "INGENIERIA DE CONTROL MODERNO", Prentice Hall, Buenos Aires, 1974.
- 3.- Dorf, Richard C., "SISTEMAS AUTOMATICOS DE CONTROL", Fondo Educativo Interamericano, USA, 1978.
- 4.- Shinnars, Stanley M., "MODERN CONTROL SYSTEM THEORY AND APPLICATION", Addison Wesley Publishing Company, Canada. 1972.
- 5.- Creus S., Antonio, "INSTRUMENTACION INDUSTRIAL", Publicaciones Marcombo, México, 1981.
- 6.- Wellstead P.E., Chrines V., Fletcher P.R., Moody R. and Robins A.J., "THE BALL AND BEAN CONTROL EXPERIMENT", Int. J. Elect. Enging Educ., Vol 15, Manchester U.P., 1978.
- 7.- Burbano, Patrico, "APUNTES DE CLASE", E.P.N., Quito, 1985.
- 8.- Kuo, Benjamin C., "SISTEMAS AUTOMATICOS DE

CONTROL", C.E.C.S.A., México, 1983.

- 9.- Wellestead P.E., "AN INTRODUCTION TO PHYSICAL SYSTEM MODELLING".
- 10.- Robinson-Halpern Company, "CATALOGO DE SENSORES LVDT".
- 11.- National Semiconductor Corporation, "LINEAR, CMOS AND APPLICATION DATABOOK", USA, 1982.
- 12.- Jacson J.D., "ELECTRODINAMICA CLASICA" , Alhambra, España, 1980.
- 13.- Horward W. Sams, "DATA FOR RADIO ENGINEERS" , ITT, USA, 1975.



APENDICE A

MANUAL DE USO DEL

EQUIPO

## APENDICE A.

### MANUAL DE USO DEL EQUIPO.

El equipo es de tipo didáctico que permite el control de posición de una bola de acero que corre libremente en una viga pivoteada en el centro.

Al tratarse de un equipo didáctico se ha permitido el acceso a varios puntos del lazo de control, de tal forma que sea posible realizar mediciones o interconexiones con otros equipos de las características adecuadas y lograr el control deseado.

Para su utilización se ha realizado un panel mímico sobre el cual se halla dibujado esquemáticamente cada una de las partes constitutivas del equipo así como algunos elementos de control o de mando. Para esto podemos hacer referencia a la fig. A1 en la cual se puede observar el panel completo que se encuentra al frente de la caja de control del equipo; en el mismo que se tiene el interruptor de encendido en el cual se enciende la luz de alimentación de AC al sistema y además debe encenderse el LED que nos indica existencia de energía de DC en el sistema para el control del actuador. Caso de no encenderse podrá haber problemas con los transformadores.

En este gráfico se puede mirar el potenciómetro que nos servirá para colocar la señal de referencia, es importante notar que la posición cero es el centro de la barra que es el punto donde se da el equilibrio natural, mientras que la posición superior o de +1 es el extremo derecho de la barra y para -1 se tiene el extremo izquierdo. Pero también es posible ingresar una señal externa por medio de los terminales numerados con 1, en los cuales dependiendo de las especificaciones deseadas se podría ingresar una señal paso, rampa, parábola o sinusoidal, con la única precaución que esta entrada es multiplicada por un factor de 10.

En serie con esta entrada tenemos un switch que nos servirá para lograr una entrada paso al sistema y observar su comportamiento debido a esta entrada generalizada. Se tiene luego el punto de suma y comparación del sistema de lazo cerrado, y la señalización de un posible sobrevoltaje en el circuito de comparación cuya salida se halla a disposición del usuario y podría interconectarse a cualquier equipo que reciba señales entre  $\pm 10$  V., en nuestro caso utilizamos el computador análogo Mini AC de la casa E.A.I. en el mismo que se implementan los circuitos de compensación activa. De este elemento se obtiene la señal que comandará el amplificador de potencia que en este caso se trata de un conversor voltaje-corriente, con el cual se maneja la posición de nuestro actuador, el L.V.D.T. de potencia. En este circuito se ha incorporado la señalización de sobrecorriente hacia el actuador, para proteger las fuentes y elementos que manejan dicha corriente.



Este actuador de acuerdo al valor de corriente que circula por él hará moverse hacia arriba o hacia abajo, de tal forma que se produce un movimiento de la bola, debido al cambio en el ángulo de la barra constitutiva del sistema físico.

Para detectar las variables a controlar es necesario la parte de sensores, así en primer lugar tenemos el lazo del sensor angular, el cual posee también un indicador de sobrevoltaje en este circuito cuya salida se halla a disposición del usuario del equipo en el punto 4, que de igual forma puede ser interconectado a cualquier otro equipo para su tratamiento o en forma directa al comparador para lograr el control. Este sistema nos entrega señales entre  $\pm 10$  V.

El otro lazo necesario para el control de posición es exactamente su sensor cuyo circuito es similar al caso del sensor angular y además también su salida se halla a disposición del usuario en el punto 5, señal que puede ser tratada o realimentada directamente al circuito sumador y comparador. Pues tanto para el sensor angular como el sensor de posición las señales que se tienen en sus circuitos acondicionadores son de carácter negativo, de tal forma de lograr una realimentación negativa en el sistema total.

Es necesario tener presente las señalizaciones existentes en el panel mímico que nos indicarán las diferentes fallas que se pueden presentar en el mismo, así tenemos la indicación de falla por saturación que se encenderá una vez que ha existido un sobrevoltaje por un determinado tiempo prudencial, que incluso hará deshabili-

tar las señales de entrada al sistema. La otra señalización existente es la de bajo voltaje en las fuentes de polarización, lo cual no dejará operar al sistema hasta que se tenga la tensión adecuada de polarización para un trabajo normal.

Se tiene además los pulsantes que permiten en primer lugar chequear que todos los LEDS estén en perfectas condiciones, de tal forma que si se da una falla estén en la capacidad de encenderse para indicar la falla existente, caso contrario será necesario su reemplazo. El otro pulsante nos permite reiniciar al sistemas en las condiciones normales, y es usado cuando se ha producido una falla en cualquier parte del sistema que deshabilita todas las entradas y las coloca a cero, con lo cual la bola deberá quedar en equilibrio en el centro de la barra.

Para una operación adecuada del equipo didáctico presentado los pasos a ser seguidos:

- 1.- En primer lugar debe haber seguridad que el sistema no tenga ninguna entrada a su comparador y luego encender el equipo por medio del switch de entrada y observar que realmente se enciende el indicador de señal de alterna así como la señal de continua, si esto ocurre se debe seguir adelante, caso contrario será necesario revisar el equipo por una persona adecuada para ello.
- 2.- Si no hubo problemas con el primer paso se deben pasar ha realizar los siguientes chequeos; en primer lugar lo referente a que todos los

indicadores luminosos se hallan en perfectas condiciones para lo cual utilizamos el pulsante de chequeo de lámparas en seguida realizamos un RESET en el sistema utilizando el otro pulsante de tal forma de garantizar la iniciación de trabajo del equipo en las condiciones adecuadas.

- 3.- Para continuar se deben realizar las conexiones e interconexiones adecuadas para lograr el funcionamiento deseado del sistema total, para esto se debe tener presente que es necesario el mismo nivel de referencia que el del equipo, y para asegurarlo se deben unir los puntos de tierra con la del elemento al cual va ha ser interconectado, y además que este en la capacidad de operar en un rango de  $\pm 10$  V. con el que está diseñado el equipo electrónico del sistema.
- 4.- Una vez que se tienen todas las características anteriores es necesario garantizar que el sistema no tenga mayores variaciones de sus variables controladas, de entrada y salida, ya que debido a su carácter no lineal se podrían presentar problemas en este campo, además es preciso que se tenga presente la modelación y las condiciones bajo las cuales se hizo para obtener el sistema lineal simplificado. Para lograrlo sería recomendable colocar la bola en la parte central de la barra.
- 5.- Por último se debe cerrar el switch de entrada al comparador para obtener la señal paso para el

sistema y observar su comportamiento. Si es necesario obtener resultados gráficos se podrán interconectar al punto de interés el osciloscopio que de preferencia debe ser de retención o con memoria, o al grafizador de tal forma que se obtenga los resultados en papel.

- 6.- Se podrán encender momentaneamente las lámparas indicadoras de falla, pero si no es por mucho tiempo realmente no habrá de que preocuparse, ya que si se prolongarse dará lugar al encendido de la falla por saturación y una desconexión de las señales de entrada y colocarlas a cero. Luego de lo cual será necesario en primer lugar revisar las conexiones realizadas y analizar los posibles efectos para que se produzca la falla, y a continuación se podrá reiniciar el funcionamiento del sistema por medio del pulsante de reset del sistema.

Es importante además de esto revisar la presencia del fusible general de entrada al equipo, así como cada uno de los fusibles internos en caso de no encenderse y funcionar adecuadamente el equipo.

Para la realización de las calibraciones necesarias debido al uso del equipo se debe recurrir a los diagramas circuitales en los cuales se hallan los potenciómetros y su relación con cada una de las señales del sistema. Pero se debe indicar que no serán necesarios cambios muy continuos para esto, y es posible que los únicos elementos a ser movidos serán los potenciómetros de ganancia en los acondicionadores de señal del sensor



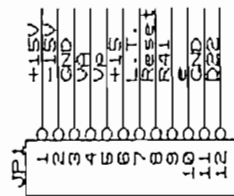
angular y del sensor de posición es decir  $P_2$  y  $P_4$ .

Para esta calibración se deben seguir los siguientes pasos:

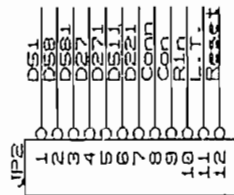
- 1.- Localizar los potenciómetros  $P_2$  y  $P_4$  que se hallan en la placa D, según la distribución presentada de los elementos en la caja de control.
- 2.- Luego con ayuda de un voltímetro se deberá chequear los voltajes de salida en los puntos 4 y 5 del panel mímico, de tal forma que en la posición central de la viga nos entregue un voltaje muy bajo, cercano a cero; luego movemos la viga de tal forma que la bola se coloque en el extremo derecho, e inclinada la viga nos deberán entregar  $-10$  V.; mientras al colocarlo en la otra posición extrema nos entregarán  $+10$  V.
- 3.- En caso de no lograrlo será necesario mover la posición de los potenciómetros que están en serie con los sensores de tal forma de centrar la señal que estos nos entregan, para esto debemos colocar a la viga y bola en el punto central y se deberá obtener un voltaje cercano a cero y luego llevar al extremo derecho y se deberá obtener como entrada un voltaje de  $+1$  V. y en la otra posición extrema se obtendrá un voltaje de  $-1$  V.

De esta forma el equipo queda nuevamente calibrado para un funcionamiento adecuado y preciso. Los otros

B.1.- CIRCUI TO DE PROYECCIONES.

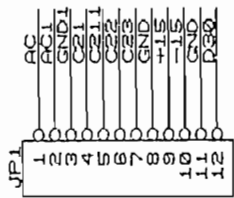


REGLETA SUPERIOR

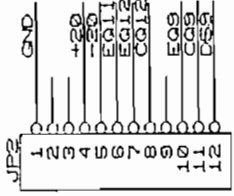


REGLETA INFERIOR

B.2.- FUENTES DE POLARIZACION.



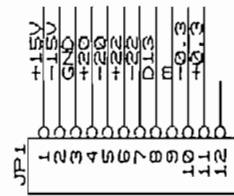
REGLETA SUPERIOR



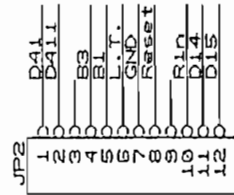
REGLETA INFERIOR

C.- CIRCUI TO CONVERSOR DE VOLTAJE-CORRIENTE

Y SEÑALIZACION DE BAJO VOLTAJE.

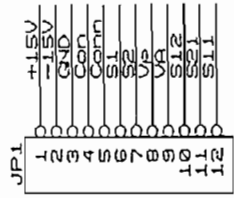


REGLETA SUPERIOR

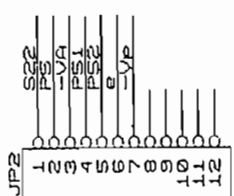


REGLETA INFERIOR

D.- CIRCUI TO ACONDICIONADOR DE SEÑALES.



REGLETA SUPERIOR



REGLETA INFERIOR

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA .

PE1VB CONJEP 84-11	Fig. A2: ENTRADAS Y SALIDAS DE LAS REGLETAS DEL LOS IMPRESOS.	Diseño: f.m.l.g. Revisado: l.g.b.s.
	Fecha: ABR.-25-1988	Hoja 1 de 8



potenciómetros al no poseer elementos de desgaste realmente mantendrán sus valores, así es el caso de los potenciómetros que regulan los niveles de voltaje de las fuentes reguladas de polarización y ganancia del sumador y comparador de señales no cambiarán en valores muy bruscos que puedan afectar al funcionamiento del equipo.

En lo referente al mantenimiento se deberá hacer uso de los esquemas circuitales de cada una de las partes implementadas y determinar su funcionamiento de acuerdo a lo explicado en el Capítulo II, y además de ellos tenemos la Fig. A2 que posee el esquema que indica cada una de las salidas y entradas a las regletas de cada una de las tarjetas electrónicas implementadas para el equipo. Y en la Fig. A3 se tiene la distribución de entrada y salidas de las regletas externas a las tarjetas electrónicas, de tal forma que sea posible una revisión rápida de las conexiones que deben tener cada una de ellas y también se ha colocado la simbología adecuada a cada uno de los cables que se interconectan a las regletas. Por último en la Fig. A4 se tiene la distribución física de cada uno de los elementos constitutivos de la caja de control; es una vista superior de la misma, con lo cual se puede ubicar fácilmente para la realización de mantenimiento y para la calibración.

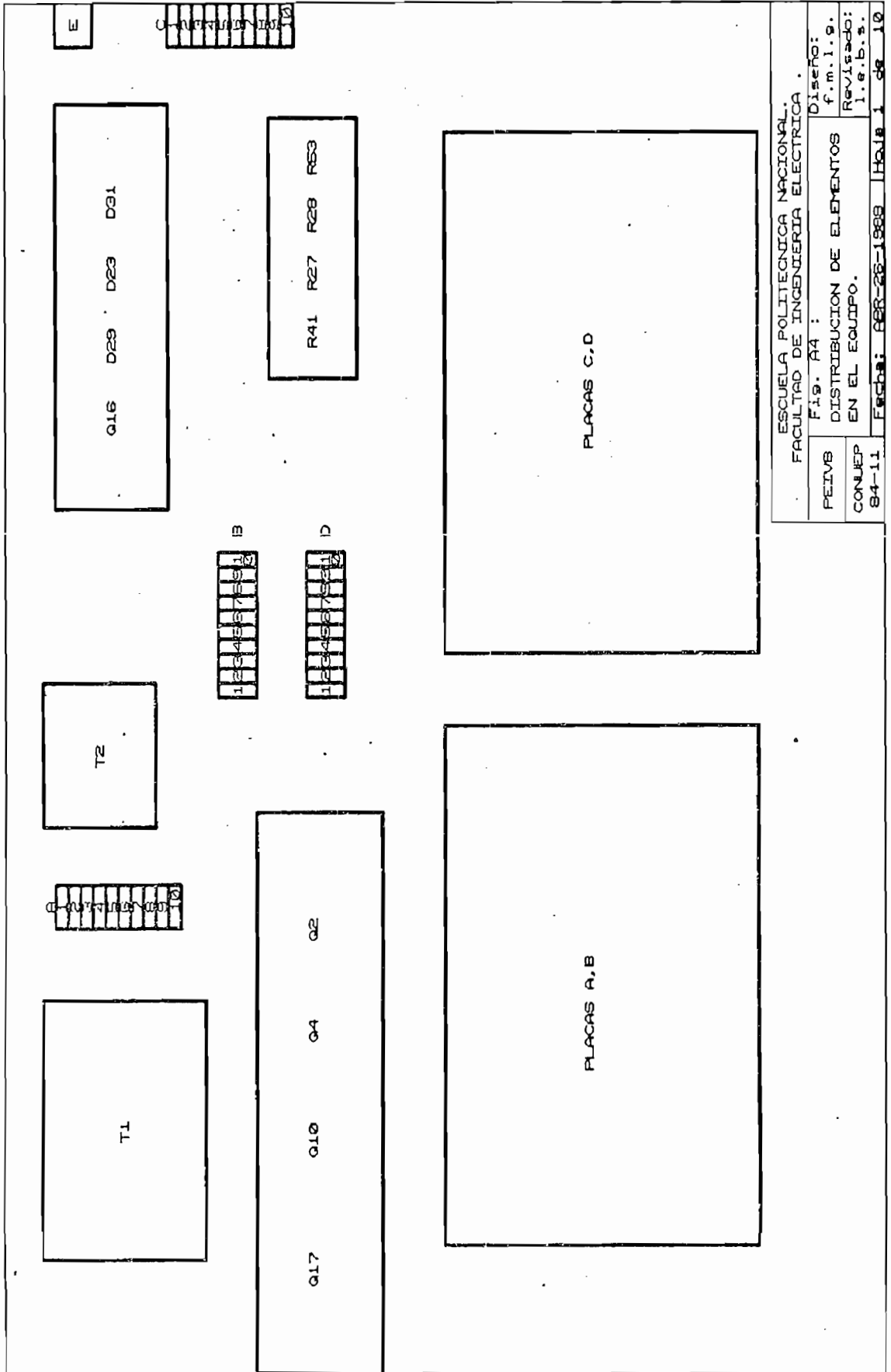
En realidad se ha distribuido el equipo electrónico en cuatro tarjetas, una de ellas contiene los elementos que entregan los niveles de voltaje de DC necesarios para el normal funcionamiento del equipo, es decir es la tarjeta de fuentes. En otra se hallan los acondicionadores de señal de los sensores, así como el sumador y señal de referencia, esto es la parte análoga

del sistema. La siguiente tarjeta contiene los elementos digitales para la señalización en el equipo así como para las protecciones implementadas en cada bloque del sistema. Por último existe una tarjeta que contiene el control de la parte de potencia que maneja las bobinas del actuador.

Además de las tarjetas es necesario elementos adicionales, como son los puentes rectificadores que se hallan montados en un disipador adecuado, de igual forma sucede con los transistores de potencia que manejan las corrientes que se entregan al actuador, es necesario también las resistencias de potencia que sirven para manejar y controlar el conversor voltaje-corriente y por último se puede apreciar la presencia de los transformadores, donde uno de ellos es utilizado para las fuentes de las tarjetas electrónicas en general y el otro es utilizado para el manejo de las corrientes del actuador que es alta; colocándose los dos transformadores para evitar interferencia entre la parte de control y la de potencia.

En cuanto a las protecciones como ya se indicó anteriormente permiten la desconexión de los elementos de control de tal forma de colocar las entradas a cero. Pero adicionalmente se han colocado fusibles en el interior del circuito, en las fuentes y en los transistores de potencia; pero además tiene un fusible de entrada, el cual se halla en la parte posterior de la caja de control en un portafusible al alcance del usuario.

Se recomienda una revisión periódica del equipo, y realizar una limpieza de la parte interior para tener un funcionamiento adecuada del equipo.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.  
 FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA .

FEVIB	Fig. A4 :	Diseño:
CONJEP	DISTRIBUCION DE ELEMENTOS EN EL EQUIPO.	f.m.i.e.
84-11		Revisado:
		l.e.b.s.
		Fecha: 28-28-1988
		Hoja 1 de 10

Para la revisión de las tarjetas se deben chequear las señales en cada una de ellas y de preferencia por medio de un osciloscopio, las señales que se deben observar se deberán analizar de acuerdo a los esquemas de cada uno de los circuitos implementados. Siempre será necesario verificar en primer lugar la existencia de las diferentes fuentes de polarización en cada una de las tarjetas. En muchas ocasiones será preferible la desconexión de la tarjeta para la verificación de su funcionamiento, y será necesario la simulación de ciertas señales de entrada de dicha tarjeta y observar su funcionamiento, lo cual es factible hacerlo. Únicamente es necesario tener presente los cables que se conectan a ella y para esto se hace referencia a la designación que se halla en cada uno de los cables.

Pero en general se puede decir que mayor mantenimiento será necesario dar a la parte de sensores que pueden desgastarse y esto influirá en la operación adecuada del equipo y su calibración.

Y es muy importante el conocimiento y entendimiento del funcionamiento de cada una de las partes constitutivas del equipo para su mantenimiento, y para esto es necesario referirse al Capítulo II, en el mismo que se halla la explicación en forma detallada de cada parte y su operación.

APENDICE B

CARACTERISTICAS ELECTRICAS  
DEL EQUIPO



## APENDICE B

### CARACTERISTICAS ELECTRICAS DEL EQUIPO.

El equipo se trata del sistema de acondicionamiento de señales para la realización de control de posición de una bola que corre libremente por una viga pivoteada en su centro, cuyo control debe ser activo para lograr estabilizar el sistema que es inherentemente inestable; y éste puede ser realizado en un computador analógico o en cualquier sistema que cumpla con las características de entrada y salida del sistema electrónico diseñado e implementado.

Las características más importantes de este equipo son:

ALIMENTACION:	Voltaje:	115 V/60 Hz	±10%
	Corriente:	3 Arms.	
IMPEDANCIA DE ENTRADA:	Comparador:	4:	34.3 KΩ
		5:	35.8 KΩ
	Convertor		
	voltaje-corriente:		32.4 KΩ
CORRIENTE DE SALIDA:			10 mA.
CORRIENTE DE ENTRADA:			10 mA.

VOLTAJES DE ENTRADA Y SALIDA EN EL PANEL MIMICO:	$\pm 10 V_{DC}$
MAXIMO VOLTAJE EN LAS ENTRADAS:	$\pm 12 V_{DC}$
LONGITUD DE LA VIGA:	1.2 m
LONGITUD ACTIVA DE MOVIMIENTO DE LA BOLA:	1.0 m
ANGULOS DE GIRO DE LA VIGA:	20° Max.
MAXIMA CORRIENTE A LAS BOBINAS DEL ACTUADOR:	3 A <sub>DC</sub>
RESISTENCIA DEL SENSOR DE POSICION:	27.7 $\Omega$
RESISTENCIA DEL SENSOR ANGULAR:	100 K $\Omega$ $\pm 5\%$
DIMENSIONES DE LA CAJA DE CONTROL:	
Largo:	50.5 cm.
Ancho:	40.0 cm.
Profundidad:	20.5 cm.

En lo referente a las características de cada uno de los elementos electrónicos y eléctricos utilizados en la realización de las placas del equipo se pueden consultar los manuales respectivos. Siendo además elementos muy usados y por ello conocidos, para tener una mejor idea de los utilizados se presenta a continuación un listado de los mismos:

Item	Cantidad	Referencia	Parte
1	5	AO-1, AO-2, AO-3, AO-4, AO-6	LM324
2	8	S1, P5, R15, R16, R20, R22, R67, R77	100 K $\Omega$
3	4	P1, P6, R19, R21	1 M $\Omega$
4	6	C1, C10, C12, C40, C43, C46	0.01 uf
5	23	R2, R7, R12, R13, R18, R31, R32, R33, R34, R43, R45, R46, R71, R73, R74, R96, R97, R98, R99, R106, R107, R108, R109	15 K $\Omega$
6	40	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D13, D14, D15, D18, D19, D20, D21, D24, D25, D26, D32, D33, D38, D39, D40, D47, D48, D49, D50, D54, D55, D56, D57, D59, D61, D62, D63, D64, D67, D70	1N4007
7	17	R3, R4, P7, R8, R9, R14, R36, R42, R44, R48, R51, R64, R79, R101, R111, R116, R117	10 K $\Omega$
8	6	R5, R10, R17, R39, R68, R75	82 K $\Omega$
9	3	P2, P4, P8	50 K $\Omega$
10	4	C29, C24, C25, C28	1000 pf
11	2	IC-1, IC-2	CD4066B
12	4	R114, R115, R118, R119	680 $\Omega$
13	6	D59, D36, D37, D42, D60, D65	5 V
14	2	R1, R11	680 K $\Omega$
15	1	S2	27.7 $\Omega$

Item	Cantidad	Referencia	Parte
16	1	P3	500 $\Omega$
17	1	R6	200 $\Omega/2W$
18	2	C4, C18	2.2 uf
19	1	SW1	Interruptor
20	6	R38, R49, R92, R93, R103, R113	1.2 K $\Omega$
21	5	Q5, Q7, Q14, Q18, Q20	2N3906
22	4	Q6, Q8, Q19, Q21	SCR
23	3	IC-3, IC-10, IC-14	MC14001
24	5	IC-4, IC-6, IC-12, IC-13, IC-15	LM555
25	6	R29, R30, R94, R95, R104, R105	220 $\Omega$
26	3	R35, R100, R110	27 K $\Omega$
27	3	R37, R102, R112	470 K $\Omega$
28	8	D17, D16, D34, D35, D45, D46, D52, D53	12 V
29	6	D22, D27, D30, D41, D51, D58	LED
30	5	C11, C14, C27, C42, C45	10 uf
31	7	C30, C13, C19, C20, C26, C41, C44	0.1 uf
32	3	D23, D29, D31	ECG5326
33	1	R40	2.7 M $\Omega$
34	1	R47	1.2 M $\Omega$

Item	Cantidad	Referencia	Parte
35	3	R41, R27, R28	0.33 $\Omega$ /10W
36	2	IC-9, IC-11	4081
37	1	IC-7	4071
38	1	IC-8	40175
39	3	R76, R62, R66	1.8 K $\Omega$
40	3	R80, R65, R83	1 K $\Omega$
41	3	R78, R63, R82	18 K $\Omega$
42	3	R84, R72, R81	36 K $\Omega$
43	3	R85, R86, R91	75 K $\Omega$
44	2	AO-7, AO-5	LF347N
45	2	R69, R70	120 $\Omega$
46	2	Q15, Q13	ECG123
47	2	SW2, SW3	PULSANTE
48	2	C8, C9	27 pf
49	3	P9, P10, P11	20 K $\Omega$
50	2	Q3, Q11	ECG373
51	5	Q4, Q2, Q10, Q16, Q17	2N3055
52	3	Q1, Q9, Q12	ECG374
53	2	R23, R24	91 K $\Omega$
54	2	R25, R26	120 $\Omega$ /1W
55	2	D11, D12	1N970
56	1	T1	115/40

Item	Cantidad	Referencia	Parte
57	1	RV1	7815T
58	1	RV2	7915T
59	1	D28	ECG5312
60	5	C15, C16, C21, C22, C23	4700 uf
61	1	C17	0.33 uf
62	4	F1, F2, F3, F4	Fusible
63	5	R50, R55, R58, R60, R61	3.3 K $\Omega$
64	2	R52, R59	33 K $\Omega$
65	1	R53	2 $\Omega$ /10W.
66	1	T2	120/35
67	2	R54, R57	2.7 K $\Omega$
68	1	R56	2.2 K $\Omega$
69	2	P12, P13	5 K $\Omega$

APENDICE C

LIMITACIONES Y PRECAUCIONES  
PARA SU FUNCIONAMIENTO

## APENDICE C.

### LIMITACIONES Y PRECAUCIONES PARA SU FUNCIONAMIENTO.

Al tratarse de un equipo didáctico únicamente se lo ha construido de tal forma que se pueda prevenir los diferentes errores que se cometan por parte del operador, que es donde la mayor cantidad de tiempo de diseño fue utilizado. Sin embargo es conveniente indicar limitaciones que ya no son posibles prevenir ni evitarlas.

Una de las primeras limitaciones que se presenta es el movimiento de la viga por medio del actuador, por lo cual no es conveniente exigir del equipo cambios bruscos en la localización de la bola, esto será por ejemplo la entrada paso para llevarla de un extremo a otro, que podría destruir la parte mecánica del equipo y no funcionar como debe hacerlo.

En lo que se refiere al actuador, este disipa bastante calor, la caja que lo encierra se ha hecho de tal forma de lograr la ventilación; sin embargo se recomienda no tener encendido el equipo por mucho tiempo ya que esto puede destruir el actuador, esto también puede traer como consecuencia un comportamiento no lineal del mismo. Se debe tener presente que en la bobina central siempre existe circulación de corriente y de allí la necesidad de apagar el equipo cuando no está trabajando.



En cuanto al recorrido de la bola se debe tener presente que existe limitaciones para lograr estabilizar exactamente en los extremos; esto es en los puntos  $\pm 1$ ; por cuanto existen topes mecánicos que no permiten pasar de estos puntos y al tratarse de un sistema de segundo orden este tendría un sobretiro que no podrá ser sensado por los topes existentes dando lugar a una no linealidad, con lo cual no se debe tratar de estabilizar en los extremos a menos que la salida sea de carácter sobreamortiguado o sin sobretiro, como precaución para su mejor funcionamiento.

De la misma forma que en el caso del recorrido de la bola se tiene la limitación física para el sensor angular que no puede ser indefinido, e incluso en este caso se debe tratar que no ocurran golpes fuertes que destruirán al sensor. Esto trae consigo la inclusión de una parte no lineal en el comportamiento del sistema que no es caso de estudio de la tesis presentada.

Se debe tener mucho cuidado con los niveles de voltaje que pueden ingresar al equipo que están en el orden de  $\pm 10$  V., al igual que las corrientes que se exigen del mismo. Existen protecciones para evitar cualquier daño que puede ocurrir al no tener presente estas limitaciones pero se deben evitar. Se tiene la protección de bajo voltaje de entrada y en caso de existir se debe apagar el equipo para evitar el calentamiento del actuador y no insistir en su funcionamiento, ya que la protección no dejará funcionar al circuito de control mientras no se den los niveles de voltaje adecuados.

Es necesario siempre tener la precaución de

chequear el buen estado de los indicadores luminosos antes de iniciar el trabajo con el equipo de tal forma que se tenga la seguridad que se encenderán en caso de existir una falla y podemos actuar adecuadamente, caso contrario se podría presentar la falla y no ser captada por el usuario del equipo y exigir su normal funcionamiento en condiciones no adecuadas para el mismo.

Otra precaución importante está relacionado con la dimensión de la bola que corre sobre la viga, que pueden ser de cualquier tamaño mientras haga contacto con el sensor de posición y su peso pueda ser manejado por el actuador implementado. Lo cual implica cambio de la función de transferencia de la planta en cuanto a su ganancia que requerirá otros parámetros para el compensador requerido. Siendo esto un ventaja del equipo, que presenta varias funciones de transferencia, con sólo cambiar de tamaño de la bola que corre sobre la viga, y poder presentar en forma didáctica las características de los sistemas de control de lazo cerrado.

Es importante indicar que las entradas del equipo que queden libres deben ser conectadas, ya que en caso de no hacerlo no implica una entrada de valor cero, al contrario esta situación da lugar al ingreso de ruido que muchas veces logra saturar a los elementos electrónicos utilizados en la realización de las etapas de amplificación y linealización de las señales sensadas. Así mismo se debe evitar la conexión a tierra o a otro nivel de voltaje de las salidas que dará lugar a la destrucción de parte del equipo, en este caso si es conveniente no realizar ninguna conexión de las salidas al no ser utilizadas.