



D-18704

T
629.895
ALBe



Escuela Superior Politécnica del Litoral

FACULTAD DE INGENIERIA EN MECANICA Y CIENCIAS DE
LA PRODUCCION



“Rehabilitación y Actualización de un Equipo Neumático de Control Automático”

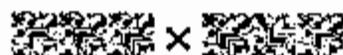
TESIS DE GRADO

Previa la Obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

ERNESTO OSWALDO ALBUJA SANCHEZ



Guayaquil - Ecuador

Año . 1998

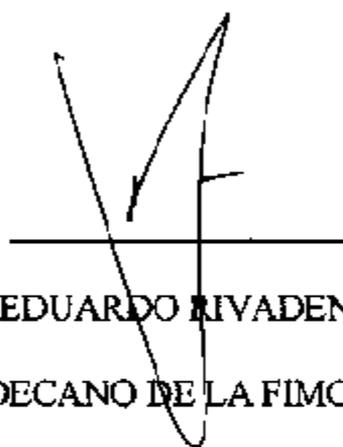
AGRADECIMIENTO

A todas las personas que
colaboraron de una u otra
manera en la realización de
este trabajo en especial al
ING. EDUARDO ORCES
Director de Tesis.

DEDICATORIA

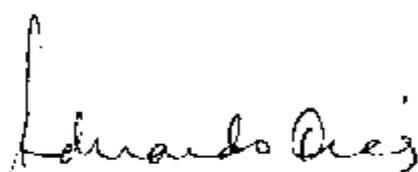
A LA MEMORIA
DE MI QUERIDA
MADRE

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



A stylized handwritten signature consisting of a large 'E' and 'R' intertwined, written over a horizontal line.

ING. EDUARDO RIVADENEIRA
DECANO DE LA FIMCP



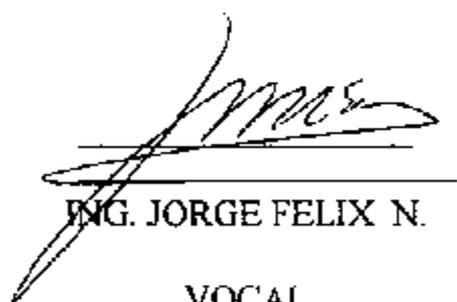
A handwritten signature that reads 'Eduardo Orces' in cursive, written over a horizontal line.

ING. EDUARDO ORCES P.
DIRECTOR DE TESIS



A complex, highly stylized handwritten signature with many loops, written over a horizontal line.

ING. FEDERICO CAMACHO B.
VOCAL



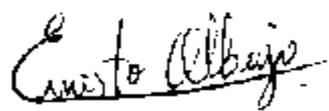
A handwritten signature that reads 'Jorge Felix' in cursive, written over a horizontal line.

ING. JORGE FELIX N.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



ERNESTO ALBUJA S.

RESUMEN

El presente proyecto consiste en la rehabilitación y actualización del equipo neumático de control automático de propiedad de la FIMCP, el cual estaba en desuso desde el traslado de la escuela a sus actuales instalaciones en que se perdieron varias piezas y el equipo fue almacenado en el laboratorio de sólidos hasta estos días.

Bajo la supervisión del Ing. Orce se realizó una limpieza y lubricación al equipo, se determinó su funcionamiento y se realizó un inventario de las piezas faltantes. Luego se procedió a la elaboración de dichas piezas. Ya con todas sus partes en buen funcionamiento se investigó que prácticas se podrían realizar. Se logró determinar las respuestas a diferentes entradas en sistemas de 1° y 2° orden, pudiéndose calcular la constante de tiempo del sistema así como su frecuencia natural. Estas prácticas se llevaron a cabo con la participación de los alumnos de la materia Sistemas de Control durante el II término 96-97, teniendo resultados exitosos. También se pudo demostrar como responde el equipo a una entrada escalón simulada en sistemas de 3° y 4° orden.

La primera parte de esta tesis empieza por una descripción del equipo y sus partes así como su funcionamiento. Se continúa con los principios teóricos utilizados en las prácticas de laboratorio, los cuales mencionan las deducciones de las funciones de transferencia de los diferentes sistemas, así como las respuestas a las diversas entradas. Todas las deducciones son basadas en las acciones que realizan las partes del equipo.

En el capítulo tercero se describen las piezas faltantes y como se construyeron las mismas, además se explica como se actualizó el potenciómetro del cual se obtienen las señales eléctricas de respuesta del sistema para que sean graficadas en un osciloscopio o en la computadora a través de un convertidor analógico-digital, por lo cual se fabricó una tarjeta electrónica de adquisición de datos, así como se elaboró un programa para su implementación.

Y en el último capítulo se muestran las guías de laboratorio tal cual como fueron facilitadas a los estudiantes para que realizaran las prácticas antes mencionadas.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS.....	XII
SIMBOLOGÍA.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVIII
I. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN.....	20
1.1 Componentes del equipo.....	20
1.2. Descripción y funcionamiento de los componentes del equipo.....	20
1.2.1. El cilindro pistón.....	22
1.2.2. El bloque de control.....	22
1.2.3. La unidad de retardo.....	25
1.2.4. El registrador.....	25
1.2.5. El sistema de velocidad variable.....	26

II. PRINCIPIOS TEÓRICOS.....	28
2.1. Sistemas descritos por ecuaciones diferenciales de 1° orden.....	28
2.1.1. Acción del eslabón de retroalimentación.....	29
2.1.2. Acción de las toberas, obturador y cilindro-pistón.....	30
2.1.3. Función de transferencia de lazo cerrado.....	33
2.1.4. Respuesta a una entrada escalón.....	35
2.1.5. Respuesta a una entrada rampa.....	37
2.1.6. Respuesta a una entrada sinusoidal.....	39
2.2. Sistemas descritos por ecuaciones diferenciales de 2° orden.....	41
2.2.1. Acción de la unidad de retardo.....	41
2.2.2. Función de transferencia de lazo cerrado.....	43
2.2.3. Respuesta a una entrada escalón.....	45
2.2.3.1. Caso sobreamortiguado.....	47
2.2.3.2. Caso críticamente amortiguado.....	47
2.2.3.3. Caso subamortiguado.....	48
2.2.4. Respuesta a una entrada rampa.....	51
2.2.5. Respuesta a una entrada sinusoidal.....	52
2.3. Sistemas de orden superior.....	54
2.3.1. Respuesta a una entrada escalón.....	57

III. REHABILITACIÓN Y ACTUALIZACIÓN DEL EQUIPO.....	60
3.1. Estado en que se encontraba el equipo.....	60
3.1.1. Inventario de las piezas faltantes.....	61
3.2. Construcción de piezas.....	62
3.2.1. Eslabón de lazo abierto con topes ajustables.....	62
3.2.2. Eslabón de error para lazo cerrado.....	64
3.2.3. Excéntrica y seguidor.....	64
3.2.4. Polea y peso.....	66
3.3. Habilidad de un potenciómetro para salida a un osciloscopio o a una computadora.....	67
3.3.1. Construcción de una tarjeta electrónica de adquisición de datos por computadora.....	69
IV. GUÍAS DE LABORATORIO.....	76
4.1. Práctica N° 1 “Sistemas de 1° orden”.....	76
4.1.1. Objetivo.....	76
4.1.2. Parte teórica.....	77
4.1.3. Parte experimental.....	77
4.1.3.1. Velocidad del papel.....	77

4.1.3.2. Lazo abierto.....	78
4.1.3.3. Lazo cerrado.....	82
4.1.3.3.1. Respuesta a un escalón.....	83
4.1.3.3.2. Respuesta a una rampa.....	84
4.1.4. Análisis de resultados.....	86
4.2. Práctica N° 2 “Sistemas de 2° orden”.....	87
4.2.1. Objetivo.....	87
4.2.2. Parte teórica.....	88
4.2.3. Parte experimental.....	88
4.2.3.1. Respuesta a una entrada escalón.....	88
4.2.3.2. Respuesta a una entrada sinusoidal.....	90
4.2.4. Análisis de resultados.....	93
4.3. Práctica N° 3 “Sistemas de orden superior”.	94
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	 97
APÉNDICES.....	99
BIBLIOGRAFÍA.....	118

ABREVIATURAS

ADC	Convertidor Analógico Digital
CAE	Ingeniería Asistida por Computadora
cm	centímetros
cos	coseno
cosh	coseno hiperbólico
desplaz.	desplazamiento
e, exp	base del logaritmo natural
Ec.	ecuación
Fig.	figura
FIM	Facultad de Ingeniería Mecánica
FILC	función de transferencia de lazo cerrado
in	pulgadas
lb	libras
m	metros
mm	milímetros
psi	libras por pulgada cuadrada
R-C	resistencia y capacitor
SC	Solución complementaria
sen	seno
senh	seno hiperbólico
SP	Solución particular
tan	tangente
V	Voltaje

SIMBOLOGÍA

$ \theta_i $	=	Amplitud de la entrada sinusoidal
$ \theta_o $	=	Amplitud de la respuesta sinusoidal
ϕ	=	Ángulo de desfase
A	=	Área del pistón
ζ	=	Constante de amortiguamiento
f	=	Constante de fricción viscosa del restrictor
K, K ₁ , K ₂	=	Constantes
N, k ₃ , a ₁	=	Constantes
b, c, e	=	Constantes
k ₁ , k ₂ , k ₄	=	Constantes de flujo y presión
A ₁ , A ₂ , ψ	=	Constantes de integración
T, T ₁	=	Constantes de tiempo
λ	=	Decremento logarítmico
z	=	Desplazamiento del centro del eslabón de retroalimentación
θ_i	=	Desplazamiento del eslabón de entrada
Y, y	=	Desplazamiento del obturador a la altura de las toberas
x	=	Desplazamiento del obturador en su extremo libre
θ_o	=	Desplazamiento del pistón
Y _o	=	Dist. entre el obturador y toberas en posición de equilibrio
G	=	Factor de atenuación del obturador
Q, q	=	Flujo de entrada al pistón
Q _i , q _i	=	Flujo de entrada al bloque de control
Q _o , q _o	=	Flujo de salida en las toberas
k	=	Flujo por unidad de desplazamiento
ω_o	=	Frecuencia amortiguada
ω	=	Frecuencia de la entrada sinusoidal
ω_r	=	Frecuencia de resonancia

h_i	=	Magnitud del escalón
M	=	Masa equivalente de la carga del pistón
B	=	Modulo volumetrico del aire
D	=	Operador diferencial d/dt
P_s	=	Presión de suministro
P, p	=	Presión en el cilindro
P_c, p_c	=	Presión entre la entrada del bloque de control y las toberas
m_1, m_2, α	=	Raices de la ecuación auxiliar
i	=	Raiz de números complejos
S_1	=	Rigidez del resorte
S_2	=	Rigidez efectiva de la unidad de retardo
Ω	=	Velocidad de la entrada producido por la leva
V	=	Volumen de aire. Velocidad del papel

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pag.
Figura 1.	Diagrama esquemático del equipo.....	21
Figura 2.	Diagrama neumático.....	23
Figura 3.	Unidad de retardo colocada para simular sistemas de 2° y 4° orden	27
Figura 4.	a) Eslabón de retroalimentación describiendo un desplazamiento en la salida producto de un desplazamiento en la entrada. b) Diagrama de bloque de la acción del eslabón de retroalimentación	29
Figura 5.	a) Deflexión del obturador. b) Diagrama de bloque de la acción del obturador.....	30
Figura 6.	DB de la acción combinada de la válvula y el pistón.....	32
Figura 7.	DB de la FTLC de 1° orden.....	34
Figura 8A.	Entrada escalón.....	36
Figura 8B.	Respuesta de 1° orden a una entrada escalón.....	36
Figura 9A.	Entrada rampa.....	38
Figura 9B.	Respuesta de 1° orden a una entrada rampa.....	38
Figura 10.	Respuesta a una entrada sinusoidal.....	41
Figura 11.	Diagrama de fuerzas en la unidad de retardo.....	42
Figura 12.	DB del retardo de 1° orden.....	43
Figura 13.	DB de la FTLC de 2° orden.....	45
Figura 14.	Respuesta de 2° orden a una entrada escalón, con diferentes amortiguamientos.....	46
Figura 15.	Variación del primer sobrepaso con respecto a la constante de amortiguamiento.....	50
Figura 16.	Respuesta de 2° orden a una entrada rampa.....	53
Figura 17.	Diagrama de respuesta a la frecuencia (Amplitud).....	53
Figura 18.	Diagrama de respuesta a la frecuencia (Fase).....	53
Figura 19.	Diagrama de bloque de la acción de las pequeñas perturbaciones con el restrictor completamente abierto.....	56

Figura 20.	Diagrama de bloque de la FTLC de 3° orden con el restrictor casi cerrado.....	57
Figura 21A.	Decaimiento del error cuando $\zeta\omega_n \gg \alpha $	59
Figura 21B.	Respuesta de 3° orden a un escalón cuando $\zeta\omega_n \gg \alpha $	59
Figura 22A.	Decaimiento del error cuando $\zeta\omega_n \ll \alpha $	59
Figura 22B.	Respuesta de 3° orden a un escalón cuando $\zeta\omega_n \ll \alpha $	59
Figura 22C.	Respuesta inestable de 3° orden a un escalón cuando $\zeta < 0$	59
Figura 23.	Eslabón de error de lazo abierto con topes ajustables.....	63
Figura 24.	Excéntrica y seguidor.....	67
Figura 25.	Diseño de la polea.....	68
Figura 26.	Reostato lineal de papel de carbón.....	70
Figura 27.	Circuito que transforma el voltaje de la señal de entrada al rango de 0 a 5 V.....	73
Figura 28.	Circuito completo de la tarjeta de adquisición de datos.....	75
Figura 29.	Colocación del eslabón de error para la prueba de lazo abierto.....	79
Figura 30.	Trazo triangular producto de mover el eslabón entre sus topes.....	80
Figura 31.	Desplazamientos del obturador.....	81
Figura 32.	Colocación del eslabón de lazo cerrado para 1° orden.....	82
Figura 33.	Eslabón de entrada con la leva colocada para simular una entrada rampa.....	85
Figura 34.	Eslabón de entrada con la excéntrica colocada para simular una entrada sinusoidal.....	92
Figura A1.	Circuito que convierte el rango de voltaje de (-5.35 a 1.49) V en (0 a 5) V	
Figura A2.	Circuito que convierte el rango de (3.12 a -3.7) V en (0 a 5) V	

- Figura C1. Gráfico para el cálculo de la velocidad del papel
- Figura C2. Gráfico de la prueba de lazo abierto
- Figura C3. Gráfico de la respuesta a una entrada escalón de 1° orden
- Figura C4. Lincalización de la curva de respuesta
- Figura D1. Gráfico de la respuesta a un escalón en 2° orden
- Figura D2. Gráfico de la respuesta a una entrada sinusoidal a diferentes frecuencias
- Figura D3. Diagrama de Respuesta a la Frecuencia (Semilog)
- Figura D4. Diagrama de Respuesta a la Frecuencia
- Figura E1. Gráfico de 3° orden a un entrada escalón, obtenido por medio de la tarjeta electrónica
- Figura E2. Gráfico de 3° orden a un entrada escalón, simulada en Matlab a partir de la función de transferencia encontrada

INTRODUCCIÓN

Con el fin de mejorar los laboratorios de la facultad, el Consejo Directivo resolvió aceptar como tesis de grado la rehabilitación de equipos de laboratorio. Siendo sistemas de control una materia fundamental teórica-práctica que actualmente no contaba con ningún laboratorio de ayuda, se decidió restaurar y actualizar el equipo servoneumático de control automático, permitiendo así a los estudiantes visualizar mejor la teoría.

Este equipo nos permite observar claramente los principios en que se basan los sistemas de control por retroalimentación. Está diseñado tal que en su forma básica se comporta como un sistema regido por una ecuación diferencial de primer orden, y posteriormente añadiéndole elementos, el orden del sistema se incrementa hasta ecuaciones de cuarto orden.

El sistema actúa como un mecanismo copiador, el eslabón de entrada sensa la señal y la trasmite al controlador (por medio del eslabón de error), este responde con una señal neumática que va al cilindro-pistón y

este a su vez responde con una señal mecánica igual a lo sentido. De aquí que se pueden observar los diferentes comportamientos al estabilizarse la respuesta del sistema. Variando no solo el orden del sistema sino también parámetros como ganancia, amortiguamiento, frecuencia, etc.

Para mayor apreciación de las repuestas del equipo se construyó una tarjeta electrónica de adquisición de datos, que convierte las señales de voltajes (analógicas) que entrega el potenciómetro del equipo y las convierte en señales digitales que son manipuladas por un programa que facilita su visualización y almacena los datos para un posterior análisis.

I. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

1.1. Componentes del equipo.

El equipo comprende tres unidades básicas: la unidad de control, el registrador y el sistema de velocidad variable. A la unidad de control a su vez la conforman: el cilindro pistón, el bloque de control, y la unidad de retardo cuando se simula sistemas de segundo orden.

1.2. Descripción y funcionamiento de los componentes del equipo.

En esta sección se describen las partes principales del equipo, ya arriba mencionadas, su utilización funcionamiento y las piezas que las componen.

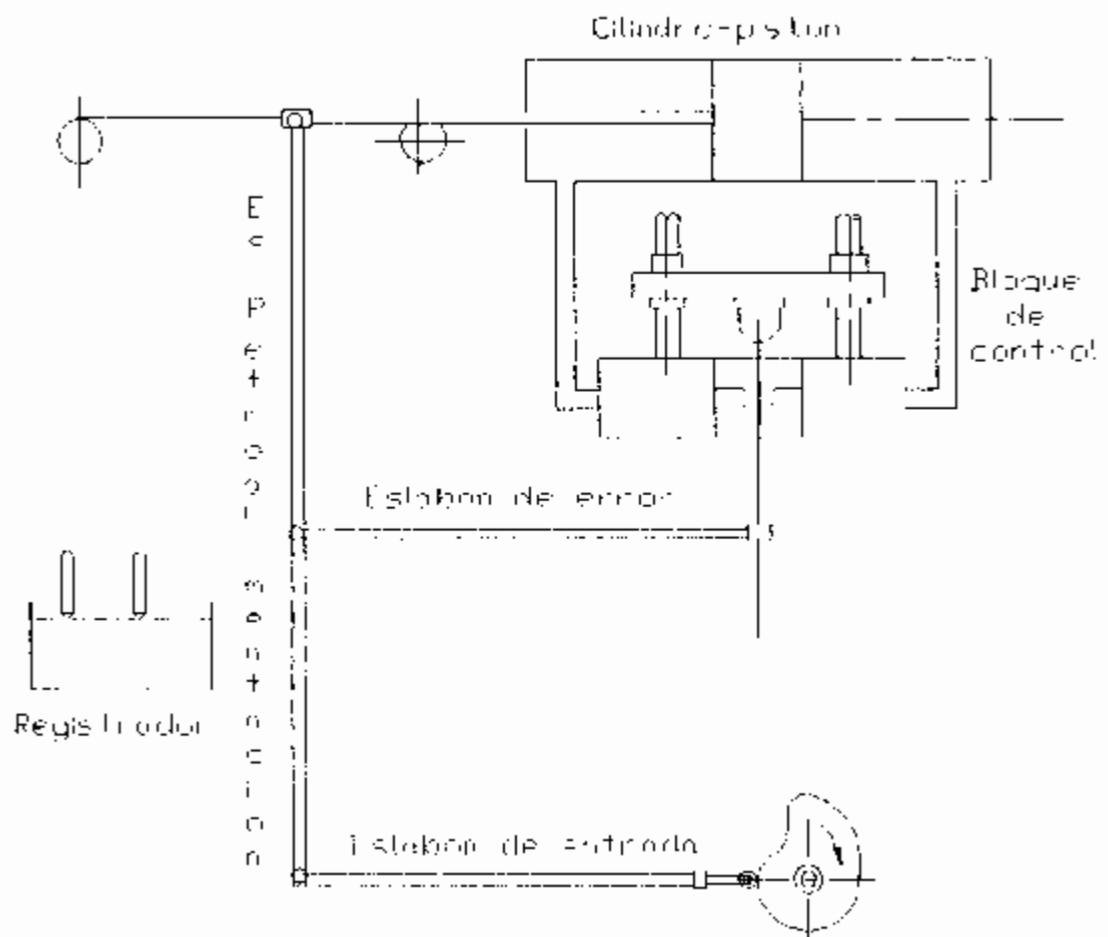


Fig. 1. Diagrama esquemático del equipo

1.2.1. El cilindro-pistón.

El cilindro-pistón es de tipo neumático se encuentra montado en la parte superior derecha del panel. En sus extremos esta conectado con la salida del bloque de control por medio de tuberías plásticas de 1/8 in, el cual le proporciona una presión de 10 psi. en ambos extremos del cilindro, que al producirse en ellos un diferencial de presión accionan la salida o entrada del pistón. El movimiento que describe el pistón vendría a ser la respuesta del sistema.

1.2.2. El bloque de control.

En el bloque de control se encuentran ensambladas dos válvulas tipo tobera-obturador, el obturador es compartido para ambas, se encuentra montado entre las dos toberas. Por el bloque de control entra el aire comprimido al sistema con una presión de 20 psi, este se divide hacia las dos válvulas. Las cámaras de las válvulas están conectadas a cada lado del pistón, como se

muestra en el diagrama neumático en la Fig. 2. Las válvulas están montadas opuestas entre si de tal manera que un movimiento del obturador de su posición central tienda a aumentar la presión en un lado del pistón y a disminuirla en el otro.

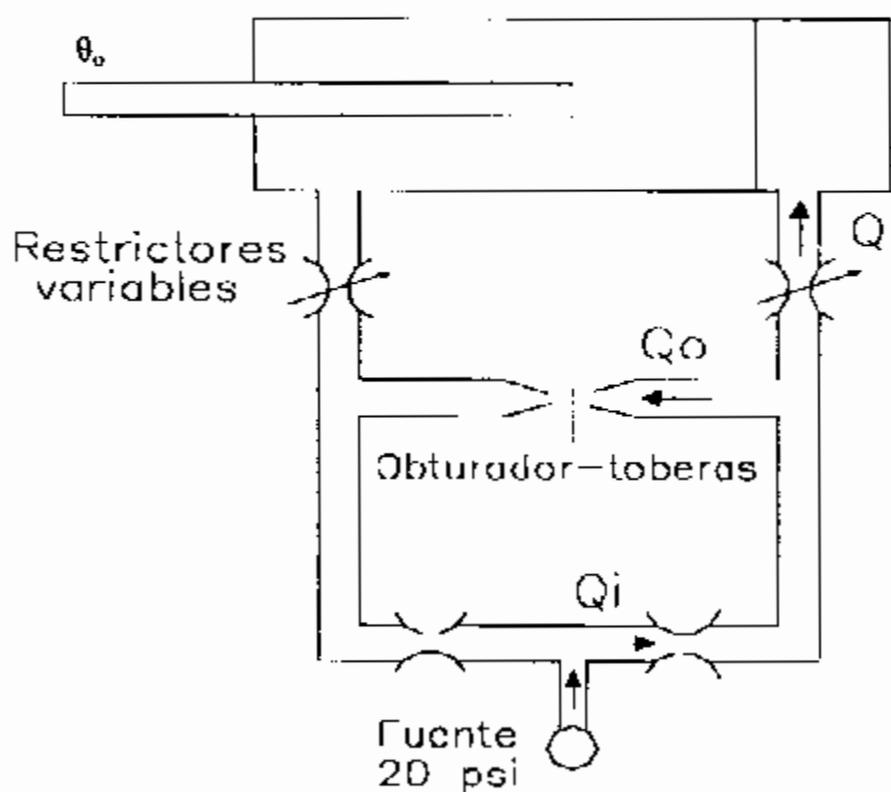


Fig. 2. Diagrama neumático

Cuando el sistema se ajusta para simular ecuaciones de primer y segundo orden casi no se requiere un cambio de presión para mover el pistón y la válvula opera como un dispositivo controlador de flujo. Con una carga inercial en el sistema (ecuaciones de tercero y cuarto orden), la presión se desarrolla a través del pistón y la válvula opera más como un controlador de presión.

El obturador está en voladizo, en su extremo libre se conecta el eslabón de error. El extremo empotrado es móvil verticalmente, de tal forma que la relación

Deflexión en las toberas
Movimiento en extremo libre

pueda ser alterada. Permite ajustar la ganancia del sistema en un amplio rango.

1.2.3. La unidad de retardo.

La unidad de retardo se la utiliza cuando posicionamos el sistema para simular ecuaciones de segundo y cuarto orden. Esta unidad comprende de dos partes, el eslabón con resorte y un amortiguador. El eslabón con resorte reemplaza al eslabón sólido de error como se muestra en la Fig. 3. El amortiguador consiste de un depósito lleno con aceite que fluye a través de un restrictor de flujo variable y un fuelle. El cual se conecta al obturador retardando así su movimiento. Girando el restrictor en sentido de las manecillas del reloj aumenta la constante de tiempo del sistema.

1.2.4. El registrador.

Esta unidad permite llevar un registro tanto de las señales de entrada como de las señales de salida o de respuesta del sistema.

Consta de un motor sincrónico que por medio de poleas accionan los rodillos que impulsan el papel, las poleas permiten variar la

velocidad del papel. Las plumas de tinta negra para la entrada y roja para la salida describen el movimiento del eslabón de entrada y del embolo del pistón respectivamente, utilizando para ello un sistema de poleas y cables localizado detrás del tablero.

1.2.5. El sistema de velocidad variable.

Este sistema nos sirve para cambiar la velocidad angular de la leva, cuando simulamos una entrada rampa o de la excéntrica, cuando simulamos una entrada sinusoidal, permitiéndonos así variar la velocidad lineal del eslabón de entrada.

Consta de un motor de inducción de una fase. El eje puede ser regulado de dos maneras, una con variaciones determinadas y otra con variaciones graduales. Utilizando para la primera un juego de tres poleas, que le permiten modificar la velocidad de 9:1. Para variaciones graduales utiliza un disco con rueda flotante.

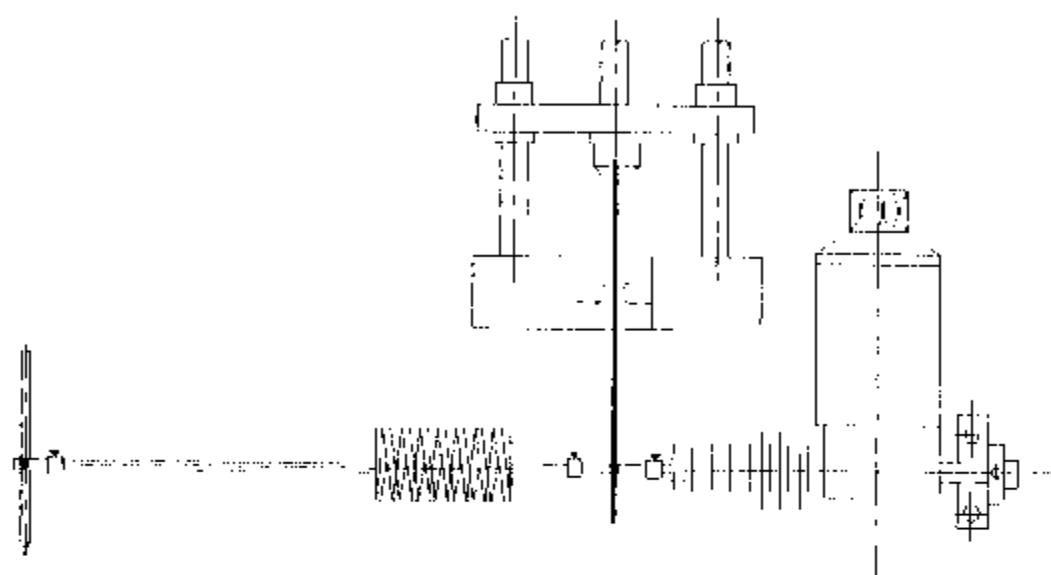


Fig. 3. Unidad de retardo colocada para simular sistemas de 2° y 4° orden.

II. PRINCIPIOS TEÓRICOS

2.1. Sistemas descritos por ecuaciones diferenciales de primer orden.

El equipo se comporta como un sistema de 1° orden en su forma mas simple. Físicamente este sistema puede ser representado por un circuito R-C, un sistema térmico, etc.

En esta sección se deducen las funciones de transferencia del sistema así como las ecuaciones de respuesta a las entradas: escalón, rampa y sinusoidal. Valiéndose de las funciones que cada elemento cumple en la obtención de la respuesta del sistema. Se muestran también los diagramas de bloque.

2.1.1. Acción del eslabón de retroalimentación

Cualquier desplazamiento del eslabón de entrada θ_i produce un movimiento opuesto en el pistón θ_o (desplazamiento de salida).

Fig. 4 (a). Por lo tanto el desplazamiento del centro del eslabón de retroalimentación es:

$$z = \theta_i/2 - \theta_o/2 = \frac{1}{2}(\theta_i - \theta_o) = \frac{1}{2}\theta$$

Donde θ es el desplazamiento del error entre la entrada y la salida. El diagrama de bloque se muestra en la Fig. 4 (b).

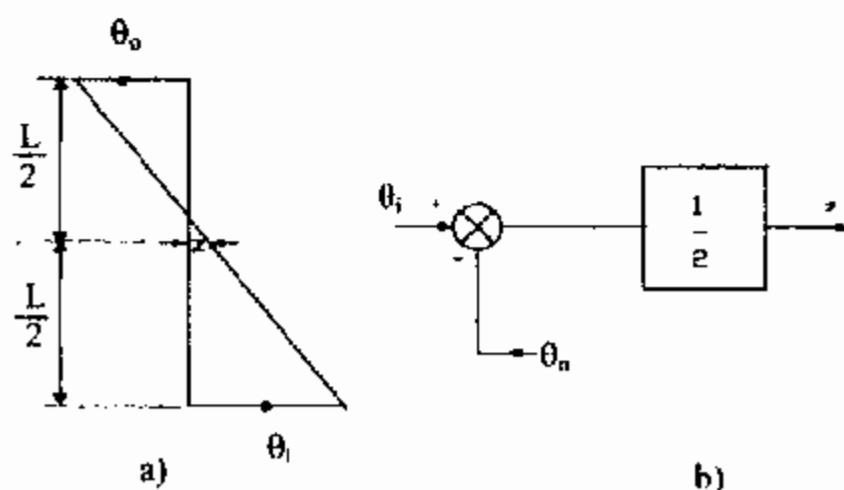


Fig.4. a) Eslabón de retroalimentación describiendo un desplazamiento en la salida producto de un desplazamiento en la entrada. b) Diagrama de bloque de la acción del eslabón de retroalimentación.

2.1.2. Acción de la válvula tobera-obturador y el pistón neumático.

La deflexión en el obturador introduce una atenuación entre el movimiento actuador (x) y el desplazamiento a la altura de las toberas (y). Fig. 5 (a). El factor de atenuación G , constante para la ganancia seleccionada. Esta dado por:

$G = x/y$, el diagrama de bloque se muestra en la Fig. 5 (b).

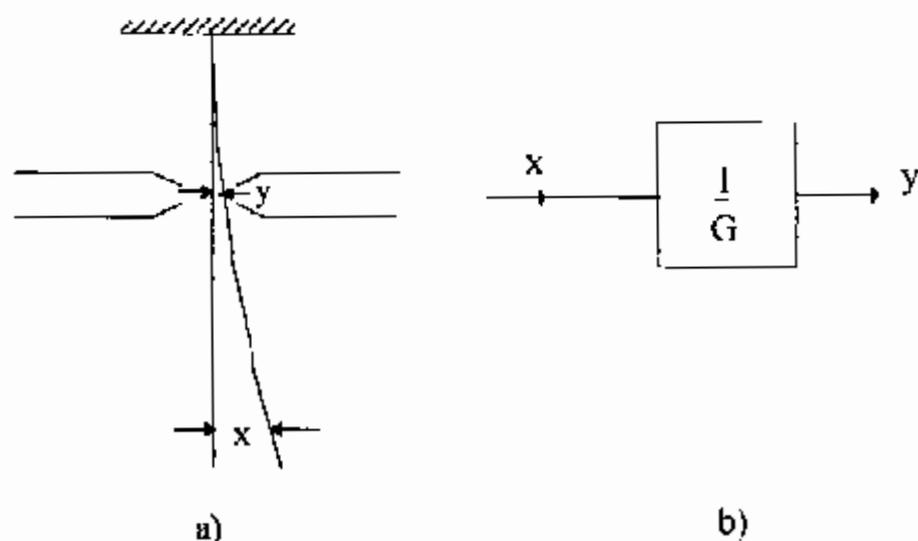


Fig. 5. a) Deflexión del obturador. b) Diagrama de bloque de la acción del obturador.

Para el sistema descrito por ecuaciones diferenciales de primero y segundo orden, no presentan inercia ni cargas resistivas en el pistón, y además la presión en cada lado es igual y se mantiene constante. El flujo Q_i a través de los orificios de entrada es por lo tanto constante. El flujo a través de las toberas Q_o es lineal con el desplazamiento del obturador en la posición de equilibrio, $Q_o = Q_i - ky$ donde k es una constante, no hay flujo hacia el pistón cuando $y = 0$. También $Q_i = Q_o + Q$, donde Q es el flujo que empieza a ir al pistón, Fig. 2, por lo que:

$$Q = ky \quad \text{ó} \quad AD\theta_o = ky \quad \theta_o = (k/AD)y - K/D y$$

Donde:

K es una constante.

A es el área del pistón.

D es el operador diferencial, d/dt .

La acción combinada de la válvula y el pistón es parecida a la de un integrador, esto es el desplazamiento del pistón es proporcional al tiempo-integral de la posición del obturador.

El diagrama de bloque se muestra en la Fig. 6. De esta manera la función de transferencia que relaciona la salida del pistón con el desplazamiento del obturador es:

$$\theta_o/x = k/GD$$

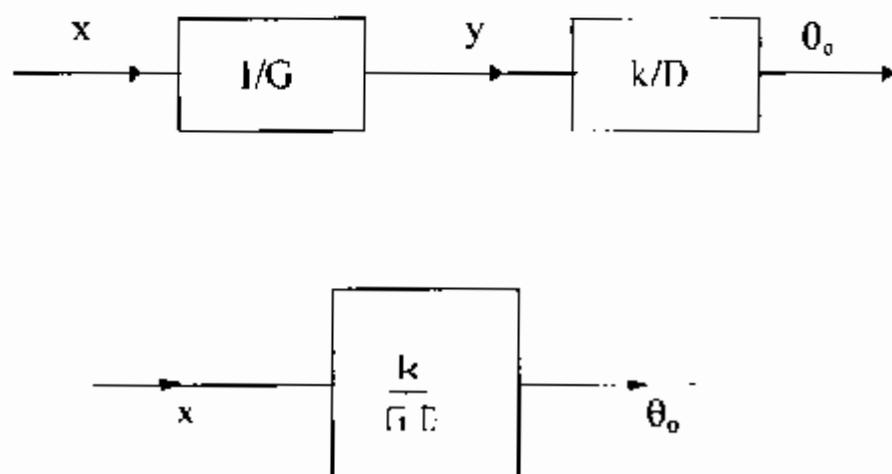


Fig. 6. Diagrama de bloque de la acción combinada de la válvula y el pistón.

2.1.3. Función de transferencia de lazo cerrado.

El lazo se cierra conectando el centro del eslabón de retroalimentación directamente al obturador por medio de una varilla rígida, de tal manera que $z = x$.

Y como $z = \frac{1}{2} (\theta_i - \theta_o)$, reemplazando en la ecuación anterior tenemos:

$$\theta_o = k/2GD (\theta_i - \theta_o)$$

$$\theta_o/\theta_i = 1 / (1+2GD/k)$$

Donde $2G/k = T$ es la constante de tiempo. Típicamente $T = 0.5$

$$\theta_o/\theta_i = 1 / (1 + T)$$

Esta función de transferencia de lazo cerrado es una de primer orden y nos da respuestas para cualquier tipo de entrada.

Entonces la solución para cualquier entrada $\theta_{i(t)}$ es dada por:

$$(1 + DT) \theta_o = \theta_{i(t)} \quad \text{Ec.1.}$$

El diagrama de bloque se muestra en la Fig. 7.

Para la solución complementaria (SC), la respuesta transiente es,

$$\theta_o + T D\theta_o = 0$$

$\theta_o = A_1 e^{-t/T}$ donde A_1 es una constante.

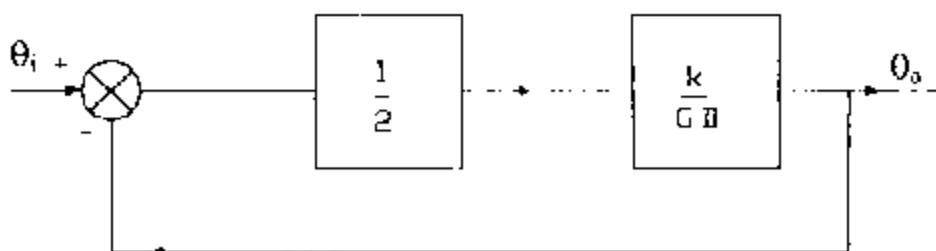


Fig. 7. Diagrama de bloque de la función de transferencia de lazo cerrado de 1º orden.

2.1.4. Respuesta a una entrada escalón

Veremos como responde el sistema a una perturbación escalón. Fig. 5A.

Se asume que la entrada se mueve instantáneamente.

La solución particular, (SP) es $\theta_o = \theta_i = H_i$, puesto que esta satisface la ecuación 1. La solución completa es:

$$\theta_o = H_i + \Lambda_i e^{-t/T}$$

Usando las condiciones iniciales $\theta_o = 0$ cuando $t = 0$ tenemos:

$$\theta_o = H_i (1 - e^{-t/T}) \quad \text{Ec. 2. Fig. 5b}$$

Cuando T es conocida la respuesta del sistema esta completamente definida.

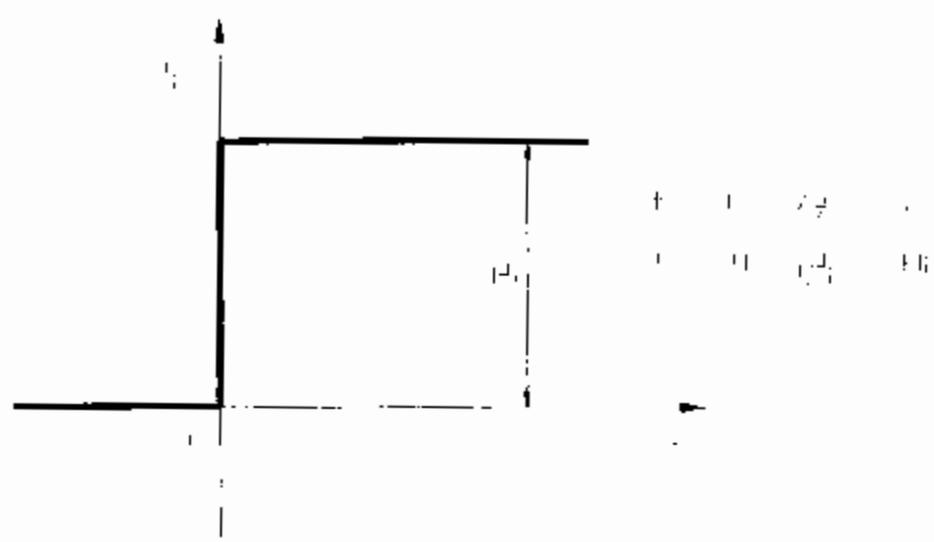


Fig. 8A. Entrada escalón

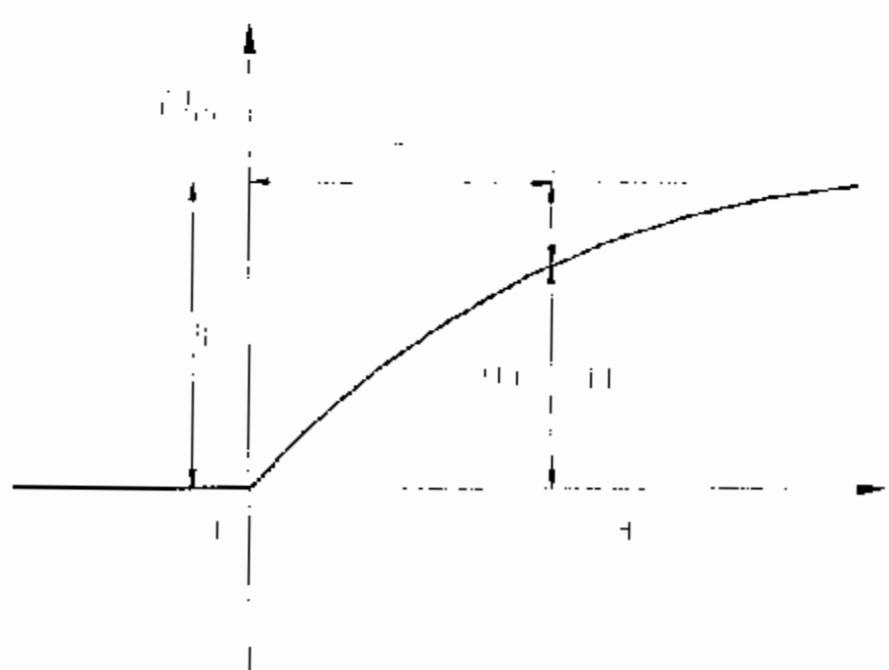


Fig. 8B. Respuesta de 1º orden a una entrada escalón.

2.1.5. Respuesta a una entrada rampa

La rampa se forma cuando el eslabón de entrada sigue a una leva que le produce un movimiento a velocidad constante (Ω) Fig. 9A. Por lo que el desplazamiento de la entrada sería; la velocidad por el tiempo, $\theta_i = \Omega t$ Entonces la ecuación 1 quedaría: $\theta_o + T D\theta_o = \Omega t$ la cual la satisface.

$\theta_o = \Omega (t - T)$ sería la solución particular.

La solución completa es:

$$\theta_o = \Omega (t - T) + A_1 e^{-t/T}$$

Si $\theta_o = 0$ a $t=0$, y $A_1 = \Omega T$

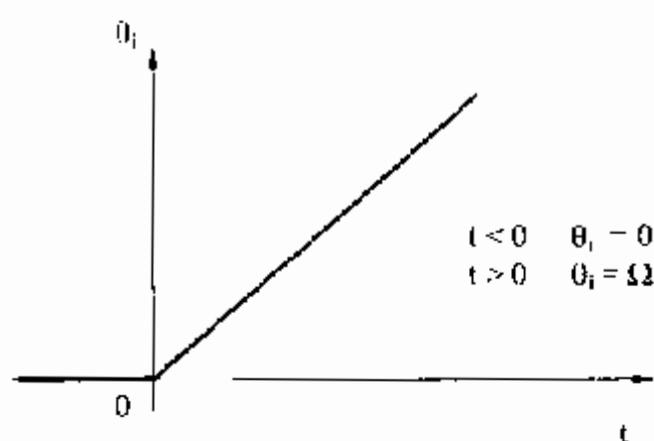


Fig. 9A. Entrada rampa.

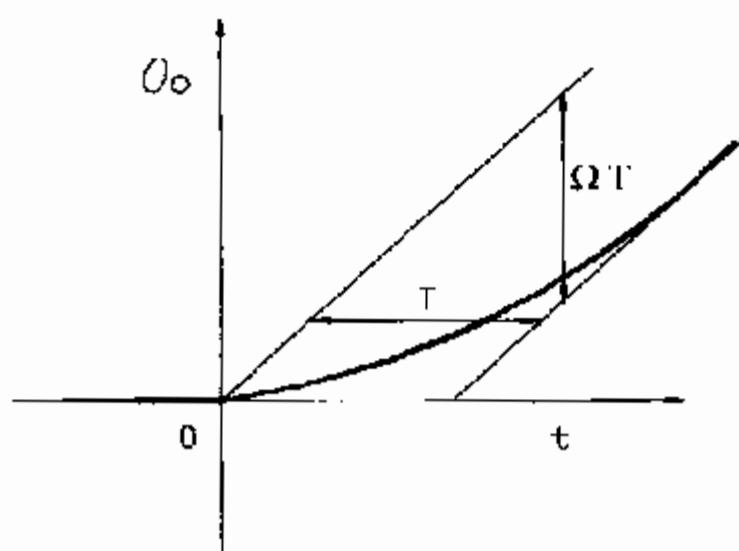


Fig. 9B. Respuesta de 1° orden a una entrada rampa.

$$\theta_o = \Omega [t - T(1 - e^{-t/T})] \quad \text{Ec. 3. Fig. 9B.}$$

La solución particular indica que cuando la parte complementaria o transiente esta decayendo, la salida se retrasa de la entrada. Esto es conocido como desalineamiento de velocidad. El desalineamiento a cualquier instante es ΩT ; alternativamente, la salida se retrasa atrás de la entrada por un tiempo T , independiente de Ω .

2.1.6. Respuesta a una entrada sinusoidal.

Con una entrada sinusoidal $\theta_i = |\theta_i| \text{ Sen } \omega t$, la Ec.1 quedaría $\theta_o + TD\theta_o = |\theta_i| \text{ Sen } \omega t$

La S.C. decae eventualmente, dejando a la solución particular como una respuesta de estado estable. Esta se hará sinusoidal a la frecuencia de entrada (ω),

$$\theta_o = |\theta_o| \text{ Sen } (\omega t - \phi) \quad \text{Fig. 10.}$$

Sustituyendo en la ecuación diferencial tenemos:

$$|\theta_o| \text{ Sen } (\omega t - \phi) + T \omega |\theta_o| \text{ Cos } (\omega t - \phi) = |\theta_i| \text{ Sen } \omega t$$

por lo que $|\theta_o/\theta_i| = 1 / (1 + \omega^2 T^2)^{1/2}$ Ec. 4.

Y $\text{Tan } \phi = \omega T$ Ec. 5.

La salida es siempre atenuada, tendiendo a cero a altas frecuencias; siempre se retarda de la entrada, ϕ es 45° en $\omega = 1/T$ tendiendo a 90° a altas frecuencias.

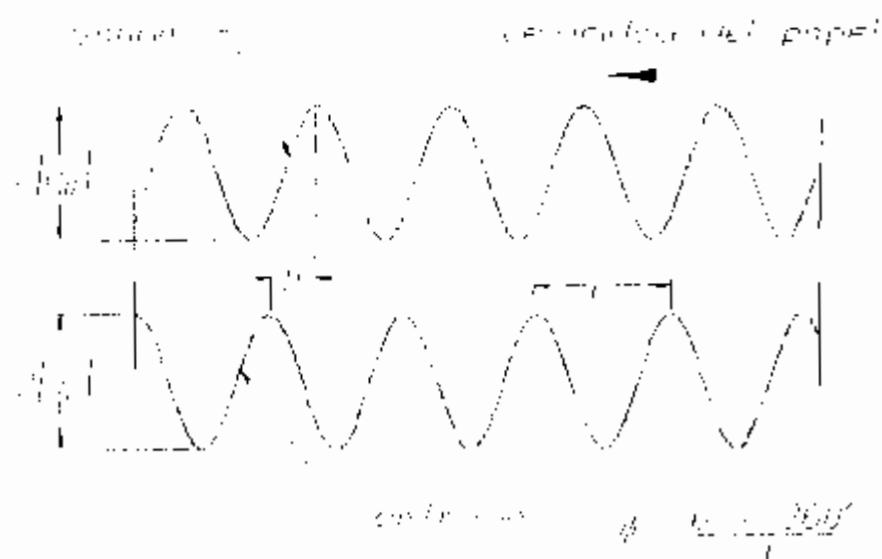


Fig. 10. Respuesta a una entrada sinusoidal.

2.2. Sistemas descritos por ecuaciones diferenciales de segundo orden.

Se simula como segundo orden introduciendo al sistema un retardo de primer orden por medio de un eslabón resorte y un amortiguador, ambos conectados entre el eslabón de retroalimentación y el obturador.

2.2.1. Acción de la unidad de retardo.

El retardo de primer orden entre el eslabón de retroalimentación y el obturador, es debido al resorte de rigidez S_1 , la fuerza resistiva Dx (velocidad del obturador) producto de bombear el aceite a través del restrictor, y la rigidez S_2 . Esta última se debe a la rigidez mecánica de el fuelle y el obturador junto con la rigidez efectiva causada por el cabezal cambiante en el reservorio sobre el restrictor. El arreglo se muestra en la Fig. 11.

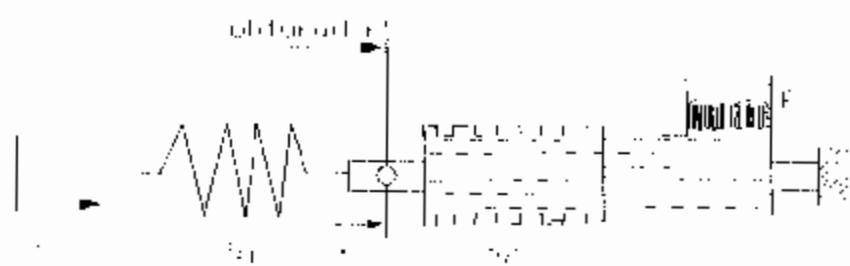


Fig. 11. Diagrama de fuerzas en la unidad de retardo.

Haciendo un balance de fuerzas en el obturador :

$$S_1 (z-x) = S_2 x + f D x$$

$$x/z = S_1 / (S_1 + S_2) (1 + T_1 D)$$

donde $T_1 = f / (S_1 + S_2)$

Por lo que actúa como un retardo de primer orden con constante de tiempo T_1 , la unidad también atenúa la señal de error por un factor:

$$N = S_1 / (S_1 + S_2) \quad \text{Fig. 12}$$

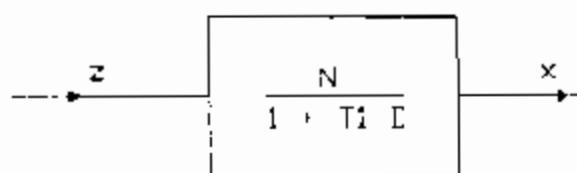


Fig. 12. Diagrama de bloque del retardo de 1° orden.

2.2.2. Función de transferencia de lazo cerrado.

Aunque ahora hay una fuerza en el miembro de salida por el resorte S_1 , la constante del sistema ha sido escogida tal que, una pequeña diferencia de presión es requerida en el pistón para acomodarlo y el sistema tobera-obturador-pistón se comportará como un integrador.

La Fig. 13 muestra el diagrama de bloque para este sistema.

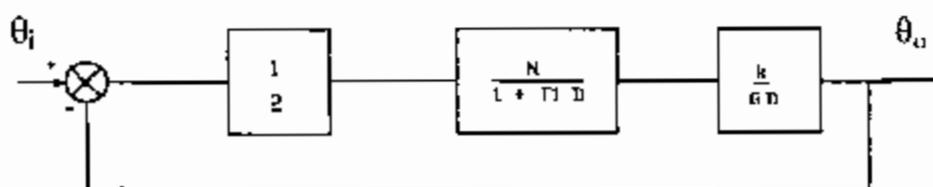


Fig. 13. DB de la función de transferencia de lazo cerrado de 2° orden.

La función de transferencia de lazo abierto es:

$$NK/2G + 1/(1+T_1D) = K_1/D(1+T_1D) \text{ donde } K_1 = NK/2G$$

La función de transferencia de lazo cerrado es:

$$\theta_o/\theta_i = (K_1/T_1) / (D^2 + D/T_1 + K_1/T_1)$$

$$\theta_o/\theta_i = \omega^2 / (D^2 + 2\zeta \omega_n D + \omega_n^2)$$

donde: $\omega_n = (K_1/T_1)^{1/2}$ es la frecuencia natural

y $\zeta = 1/2(K_1T_1)$ es la constante de amortiguamiento.

La respuesta a cualquier entrada $\theta_{i(t)}$ esta dada por

$$\theta_{i(t)} \omega_n^2 = (D^2 + 2\zeta \omega_n D + \omega_n^2) \theta_o \quad \text{Ec. 6.}$$

Igualando a cero para encontrar la solución particular

$$(D^2 + 2\zeta \omega_n D + \omega_n^2) \theta_o = 0$$

La cual es $\theta_o = A_1 e^{m_1 t} + A_2 e^{m_2 t}$

Donde m_1 y m_2 son las raíces de

$$(m^2 + 2\zeta \omega_n m + \omega_n^2) = 0 \quad \text{y} \quad A_1 \text{ y } A_2 \text{ son constantes.}$$

$$m_1, m_2 = -\zeta \omega_n \pm \omega_n (\zeta^2 - 1)^{1/2}$$

Por lo que la solución complementaria es

$$\theta_o = e^{-\zeta \omega_n t} [A_1 e^{+\omega_n t (\zeta^2 - 1)^{1/2}} + A_2 e^{-\omega_n t (\zeta^2 - 1)^{1/2}}]$$

2.2.3. Respuesta a una entrada escalón

La S.P. es $\theta_o = H_i$, ya que satisface la Ec. 6, la solución complementaria es:

$$\theta_o = H_i + e^{-\zeta \omega_n t} [A_1 e^{+\omega_n t (\zeta^2 - 1)^{1/2}} - A_2 e^{-\omega_n t (\zeta^2 - 1)^{1/2}}]$$

La naturaleza de la solución depende del signo de $(\zeta^2 - 1)$, los varios tipos de solución son ploteados en la Fig. 14.

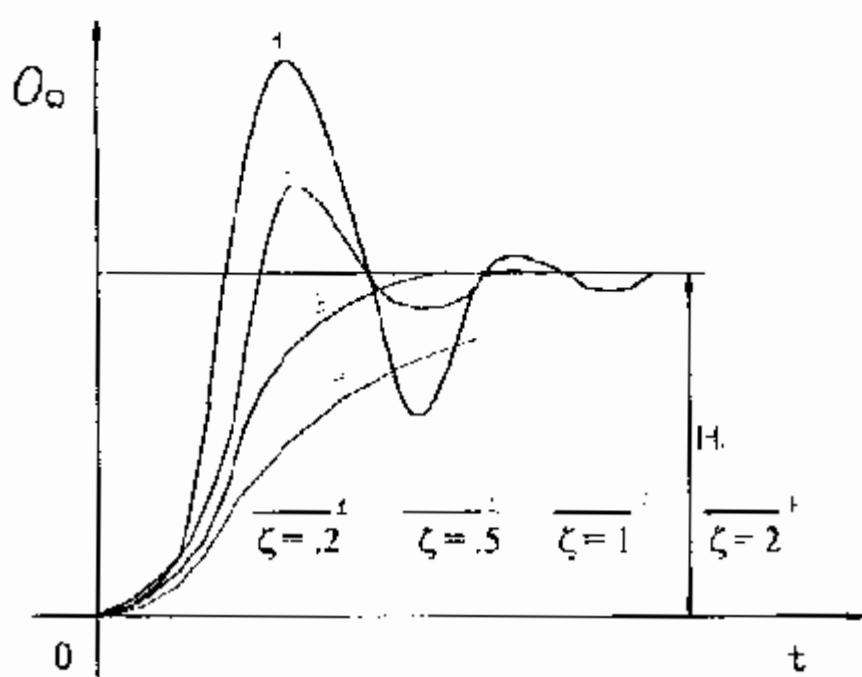


Fig. 14. Respuesta de 2° orden a una entrada escalón, con diferentes amortiguamientos.

2.2.3.1. Caso sobreamortiguado.

Se produce cuando $\zeta^2 > 1$. La solución es :

$$\theta_o = H_t \{ 1 - e^{-\zeta \omega_n t} [\cosh (\zeta^2 - 1)^{1/2} \omega_n t + \zeta / (\zeta^2 - 1)^{1/2} \sinh (\zeta^2 - 1)^{1/2} \omega_n t] \}$$

Cuando las condiciones iniciales han sido insertadas.

La respuesta es no-oscilatoria.

2.2.3.2. Caso críticamente amortiguado.

Este se da cuando $\zeta = 1$. La respuesta tampoco es oscilatoria. Las raíces m_1 y m_2 son iguales y la solución es:

$$\theta_o = H_t [1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)]$$

2.2.3.3. Caso subamortiguado.

Se da cuando $\zeta^2 < 1$.

$$(\zeta^2 - 1)^{1/2} = i (1 - \zeta^2)^{1/2} \text{ donde } (1 - \zeta^2) > 0 \text{ y } i^2 = -1$$

La solución completa se vuelve:

$$\theta_o = H_i \{ 1 - e^{-\zeta \omega_n t} [\cos (\zeta^2 - 1)^{1/2} \omega_n t + \zeta (1 - \zeta^2)^{1/2} \text{sen } (\zeta^2 - 1)^{1/2} \omega_n t] \} \quad \text{Ec. 7.}$$

La respuesta es una oscilación que disminuye hasta la solución de estado estable $\theta_o = H_i$. Se la aprecia en las curvas con $\zeta = 0.2$ y 0.5 en la Fig. 14.

La envolvente es: $\theta_o = H_i [1 \pm e^{-\zeta \omega_n t} / (1 - \zeta^2)^{1/2}]$ y la frecuencia de la oscilación amortiguada es:

$$\omega_o = \omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2}$$

Diferenciando la Ec. 7 con respecto al tiempo tenemos:

$$d\theta_o/dt = H_i [\omega_n / (1 - \zeta^2)^{1/2}] e^{-\zeta\omega_n t} \text{sen} (1 - \zeta^2)^{1/2} \omega_n t$$

Donde θ_o es un máximo o un mínimo cuando:

$$(1 - \zeta^2)^{1/2} \omega_n t = 0, \pi, 2\pi, \dots$$

El intervalo entre sucesivos máximos y mínimos es:

$$\Delta t = \pi / \omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2}$$

La razón entre dos sucesivos máximos a partir del estado estable H_i es:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{n+1}}{\theta_n} &= \frac{e^{-\zeta\omega_n (t_n + \Delta t)} \cos [\omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2} (t_n + \Delta t)]}{e^{-\zeta\omega_n t_n} \cos [(1 - \zeta^2)^{1/2} \omega_n t_n]} \\ &= e^{-\zeta\omega_n \Delta t} \\ &= \exp [-\pi \zeta / (1 - \zeta^2)^{1/2}] \end{aligned}$$

Si $\lambda = \ln |\theta_n / \theta_{n+1}|$

$\lambda = \pi \zeta / (1 - \zeta^2)^{1/2}$, sería el decremento logarítmico de la oscilación.

En particular, el primer sobrepaso sobre el valor de estado estable es: $H_i \exp\{-\pi \zeta / (1 - \zeta^2)^{1/2}\}$.

La variación del primer sobrepaso con respecto a ζ se muestra en la Fig. 15.

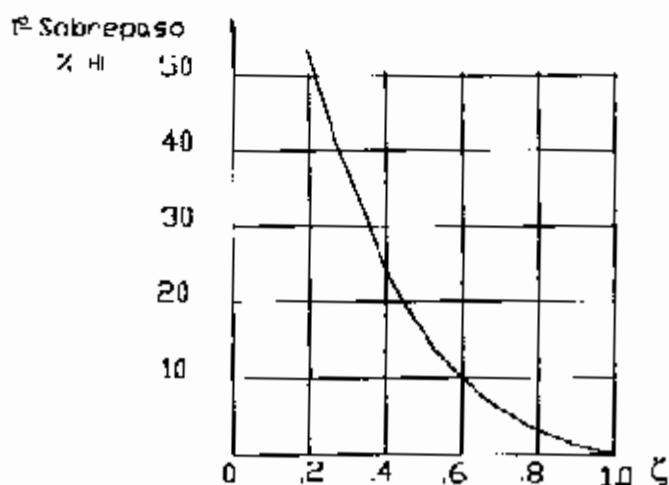


Fig. 15. Variación del primer sobrepaso con respecto a la constante de amortiguamiento.

2.2.4. Respuesta a una entrada rampa.

La Ec. sería:

$$(D^2 + 2\zeta \omega_n D + \omega_n^2) \theta_o = \omega_n^2 \Omega t$$

La cual es satisfecha por $\theta_o = \Omega (t - 2\zeta / \omega_n)$ EC. 8.

Esta es la solución particular. La solución completa es:

$$\theta_o = \Omega(t - 2\zeta / \omega_n) + e^{-\zeta \omega_n t} \left[\frac{2\zeta \Omega / \omega_n}{(1 - \zeta^2)^{1/2}} \cos \left\{ (1 - \zeta^2)^{1/2} \omega_n t + [(2\zeta^2 - 1) / 2\zeta(1 - \zeta^2)^{1/2}] \right\} \right] \sin \left\{ (1 - \zeta^2)^{1/2} \omega_n t \right\} \quad \text{Ec. 9.}$$

El desalineamiento de velocidad es por lo tanto $2\zeta\Omega/\omega_n$ cuando el transiente está decayendo; la salida se retrasa con respecto a la entrada por un tiempo $2\zeta/\omega_n$, independiente de Ω . Fig. 16.

2.2.5. Respuesta a una entrada sinusoidal.

La ecuación 6 quedaría:

$$\omega_n^2 |\theta_i| \text{ Sen } \omega t = (D^2 + 2\zeta \omega_n D + \omega_n^2) \theta_o$$

La solución complementaria eventualmente decae, dejando una respuesta en estado estable a una frecuencia ω .

$$\theta_o = |\theta_o| \text{ Sen } (\omega t - \phi)$$

Sustituyendo en la ecuación diferencial tenemos:

$$-\omega^2 |\theta_o| \text{ Sen } (\omega t - \phi) + 2\zeta \omega_n \omega |\theta_o| \text{ Cos } (\omega t - \phi) - \omega_n^2 |\theta_o|$$

$$\text{Sen } (\omega t - \phi) = \omega_n^2 |\theta_i| \text{ Sen } \omega t$$

por lo cual:

$$|\theta_o/\theta_i| = 1 / \{ [1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2 (\omega/\omega_n)^2 \}^{1/2} \quad \text{Fig. 17}$$

$$\text{y} \quad \tan \phi = 2\zeta(\omega_n/\omega) / [1 - (\omega/\omega_n)^2] \quad \text{Fig. 18}$$

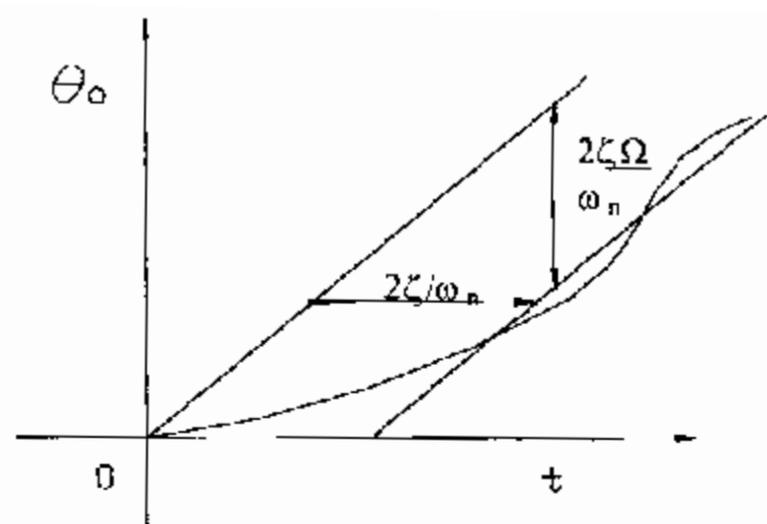


Fig. 16. Respuesta de 2º orden a una entrada rampa.

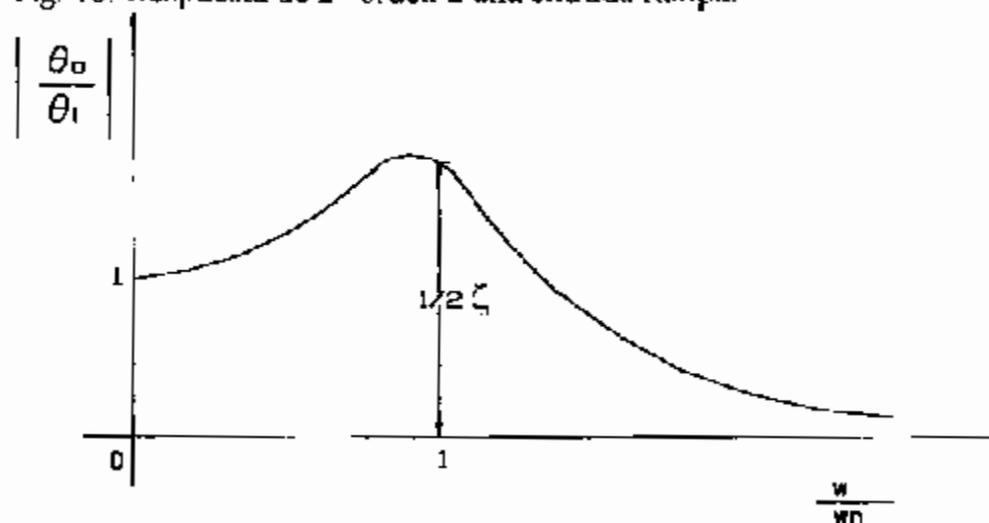


Fig. 17. Diagrama de respuesta a la frecuencia (amplitud)

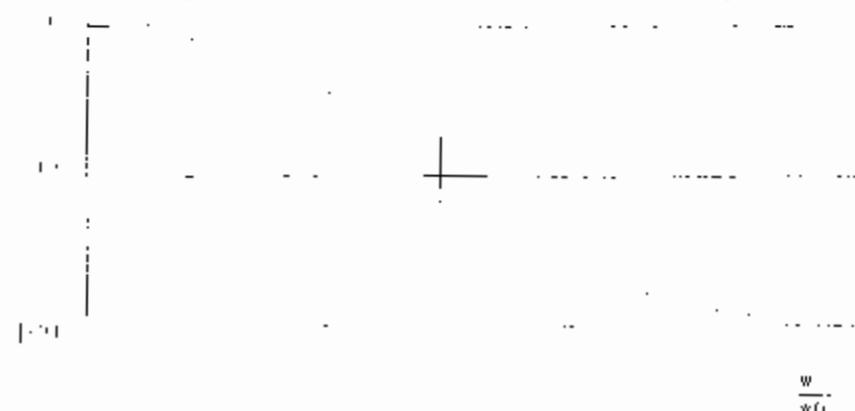


Fig. 18. Diagrama de respuesta a la frecuencia (fase).

La razón de amplitud $|Q_o/\theta_i|$ es unitaria a bajas frecuencias, incrementándose a un máximo de $1/[2\zeta(1-2\zeta^2)^{1/2}]$ cuando $\omega/\omega_n = (1-2\zeta^2)^{1/2}$ y tiende a cero a altas frecuencias. El retardo de fase ϕ es 0° a bajas frecuencias y tiende a 180° a altas frecuencias; es 90° a $\omega = \omega_n$, a esta frecuencia la razón de amplitud es $= 1/2\zeta$.

2.3. Sistemas de orden superior.

Este se lleva a cabo añadiéndole inercia al sistema, para que actúe la compresibilidad del aire, introduciendo así un término de segundo orden adicional.

La teoría se desarrolla como si el sistema fuera hidráulico. Esto es permitido siempre y cuando se realicen pequeñas perturbaciones y solamente pequeños cambios de presión ocurran. Se asume que los no se obstruyen y el cambio de densidad a través del orificio es lo suficientemente pequeño como para ser despreciado

Esto simplifica las ecuaciones y evita que sea considerado como gas dinámico. Entonces usando la técnica de las pequeñas perturbaciones tenemos:

$$Q_i = k_1 (P_s - P)^{1/2}$$

$$Q_o = k_2 (Y_o - Y)^{1/2} (P_c)^{1/2}$$

V – Volumen de aire

B – Modulo volumétrico del aire

Considerando un pequeño cambio “y” de Y que da como resultado un cambio de presión P_c dada por p_c . Siendo p el cambio de presión resultante en el cilindro.

$$q = q_i - q_o$$

$$q_i = (dQ_i / dP_c) p_c \quad \wedge \quad q_o = (dQ_o / dY) y + (dQ_o / dP_c) p_c$$

q (Flujo debido al movimiento del pistón) + (Flujo debido a la compresibilidad).

$$q = A D \dot{\theta}_o + V/B dp/dt$$

tambi3n $q = k_2 \times$ (caída de presión a través del restrictor) donde k_2 depende de la graduación del restrictor. $\therefore q = k_2 (p_e - p)$

Si la carga es substancialmente masa entonces:

$dp/dt = M/A D^3 \theta_o$. La solución da:

$$\theta_o/s = (dQ_o / dY) / \{ (V/B) (M/A) (1-k_3)D^3 + [M/A (dQ_o / dP_e - dQ_i / dP_e)] D^2 + A(1 - k_3)D \}$$

$$k_3 = 1/k_2 (dQ_o / dP - dQ_i / dP)$$

Con el restrictor completamente abierto ($k_2 \rightarrow \infty$) y si reemplazamos $\omega_n = (BA^2 / VM)^{1/2}$ el diagrama de bloque quedaría como se muestra en la Fig. 19.

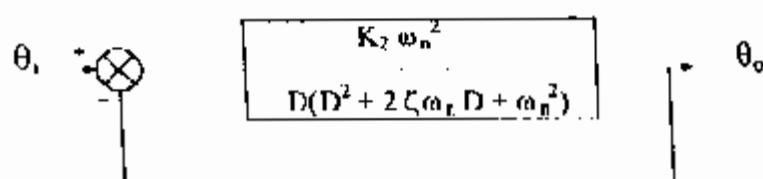


Fig. 19. Diagrama de bloque de la acción de las pequeñas perturbaciones con el restrictor completamente abierto.

$$bD^3\theta + cD^2\theta + cD\theta + a\theta = 0$$

factorizando

$$\therefore (D - \alpha) (D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2) = 0$$

$$\theta = A_1 e^{\alpha t} + A_2 e^{-\zeta\omega_n t} \sin [\omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2} t + \psi] \quad \text{si } \zeta < 1$$

α tiene que ser negativo.

Si $\zeta\omega_n \gg |\alpha|$ el error decaerá como en la Fig. 21A, y la respuesta al escalón se muestra en la Fig. 21B.

O si $\zeta\omega_n \ll |\alpha|$ el error decaerá como en la Fig. 22A, y la respuesta al escalón es mostrada en la Fig. 22B.

Estas son las características de la respuesta escalón.

Si la ganancia es lo suficientemente alta como para producir inestabilidad, se producirá una oscilación divergente, $\zeta < 0$.

Esta respuesta se muestra en la Fig. 22C.

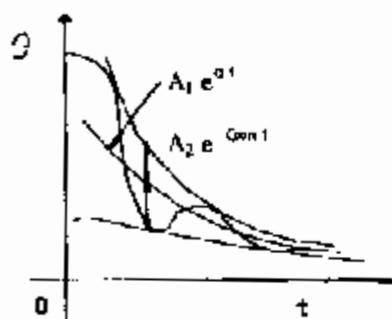


Fig. 21A. Decaimiento del error cuando $\zeta\omega_n \gg |\alpha|$

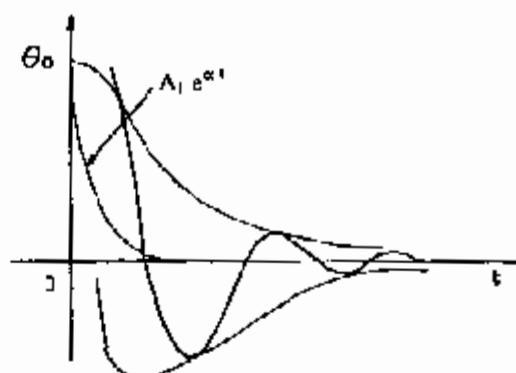


Fig. 22A. Decaimiento del error cuando $\zeta\omega_n \ll |\alpha|$

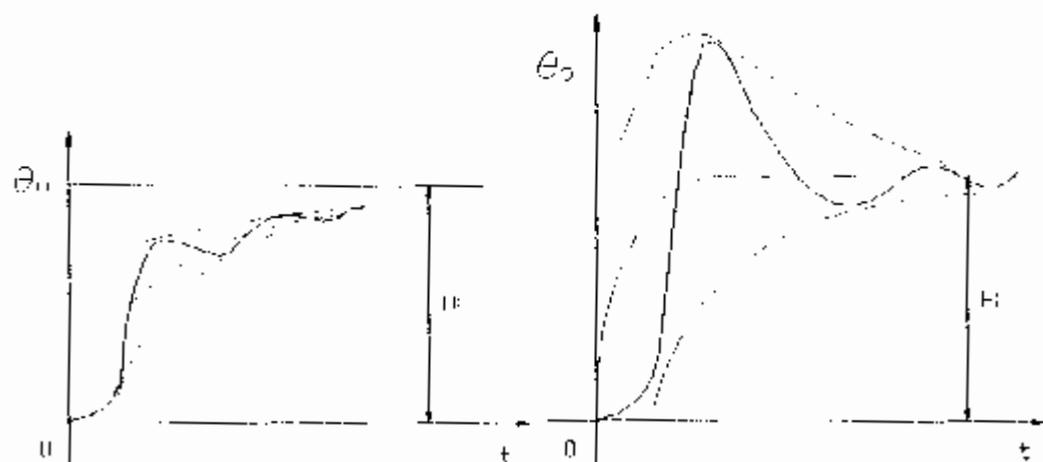


Fig. 21B. Respuesta de 3^o orden a un escalón cuando $\zeta\omega_n \gg |\alpha|$

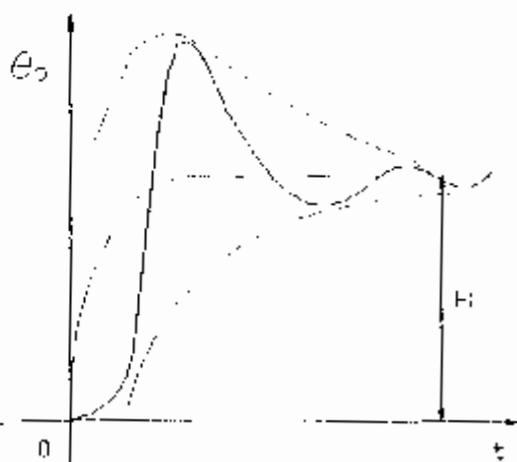


Fig. 22B. Respuesta de 3^o orden a un escalón cuando $\zeta\omega_n \ll |\alpha|$

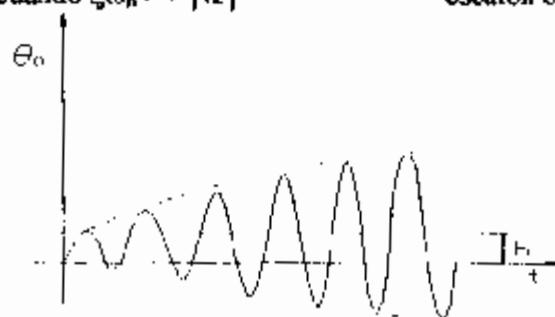


Fig. 22C. Respuesta inestable de 3^o orden a un escalón cuando $\zeta\omega_n < 0$ (ganancia alta)

III. REHABILITACIÓN Y ACTUALIZACIÓN DEL EQUIPO

3.1. Estado en que se encontraba el equipo.

Este equipo no había sido utilizado desde hace varios años, y como no se le había dado un mantenimiento adecuado, se habían perdido varias de sus piezas, además el equipo se encontraba lleno de polvo con algunos cables sueltos, y sin conexión para aire comprimido.

Entonces lo primero que se hizo fue una limpieza total del mismo, se chequeó el sistema eléctrico y se revisaron minuciosamente el motor del registrador y el motor de la entrada del sistema antes de encenderlos, encontrándose estos en buen estado. Se ajustaron todos sus tornillos y se lubricaron todas sus partes móviles.

3.1.1. Inventario de las piezas faltantes

Estas iban siendo determinados según se les iban necesitando para el funcionamiento del equipo ya que no existía un registro de sus componentes. Estas son:

- 1 eslabón para lazo abierto con dos toques graduales
- 1 eslabón de error para lazo cerrado
- 1 excéntrica
- 1 seguidor para la excéntrica
- 1 polea
- 1 peso de 40 libras
- 1 perno tapón para el cilindro
- 1 conector macho para manguera de 1/8 in.
- 1 conector hembra para manguera de 1/8 in.
- 2 m de manguera de 1/8 in.
- 1 válvula de paso.

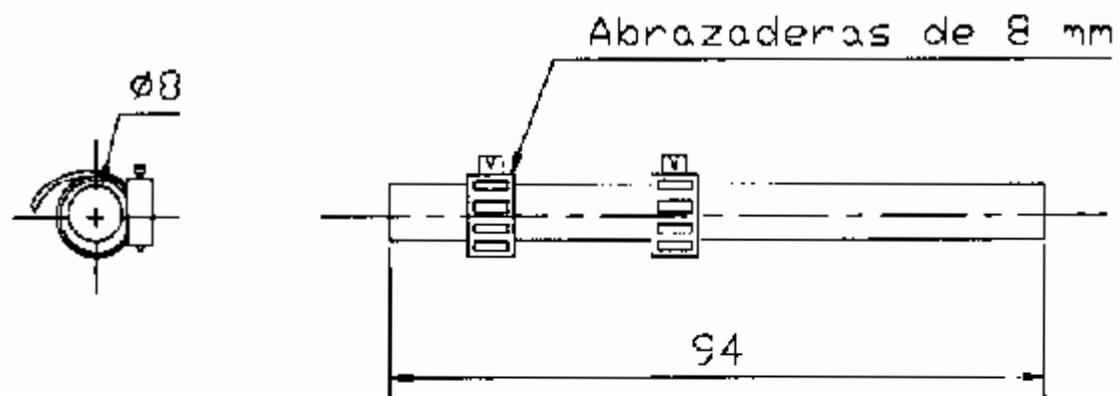
3.2. Construcción de piezas.

De las piezas mencionadas, unas se compraron, otras se mandaron a fabricar en talleres artesanales de la ciudad y otras se construyeron en los laboratorios de la facultad.

3.2.1. Eslabón de la lazo abierto con topes ajustables.

Este es una varilla rígida de aluminio de 8 mm de diámetro y 94 mm de longitud, Fig. 23, que fue maquinada en el torno de control numérico del laboratorio de CAE.

Como topes ajustables se le adaptó un par de la abrazaderas ajustables de manguera de 8 mm de tal forma que se destornillan, se cambian de posición y luego se las vuelve a apretar.



	FECHA	NOMBRE	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DEBUJO	JUL97	EALBUJA		
REVISÓ	JUL97	E.Orces		
APROBÓ	JUL97	E.Orces		
ESCALA			Fig. 23. Eslabón con topes ajustables	
1:1				

3.2.2. Eslabón de error para lazo cerrado

La función de este eslabón es la de transmitir el movimiento del centro del eslabón de retroalimentación al bloque de control, según la distancia entre ambos se determinó que éste debería ser una barra rígida de aluminio de 50 cm de largo y de 8 mm de diámetro.

Tratamos de torneamos una varilla de aluminio de 15 mm de diámetro, pero debido a su gran longitud y la ductilidad del material, esta se flectaba al introducirle la cuchilla, impidiendo así su maquinabilidad. Finalmente se decidió utilizar una varilla hueca de aluminio con las mismas dimensiones, sin que este cambio tenga influencia en sus funciones.

3.2.3. Excéntrica y seguidor.

Como ya sabemos la excéntrica con su respectivo seguidor nos sirven para darle al sistema una entrada sinusoidal, por lo que

de ella depende la amplitud del seno, así que utilizando el método del tanteo, se realizaron varios prototipos en los que se iba cambiando su excentricidad hasta determinar la más apropiada, ya que a veces la amplitud nos salía demasiado grande que al graficarse no entraba en el registrador.

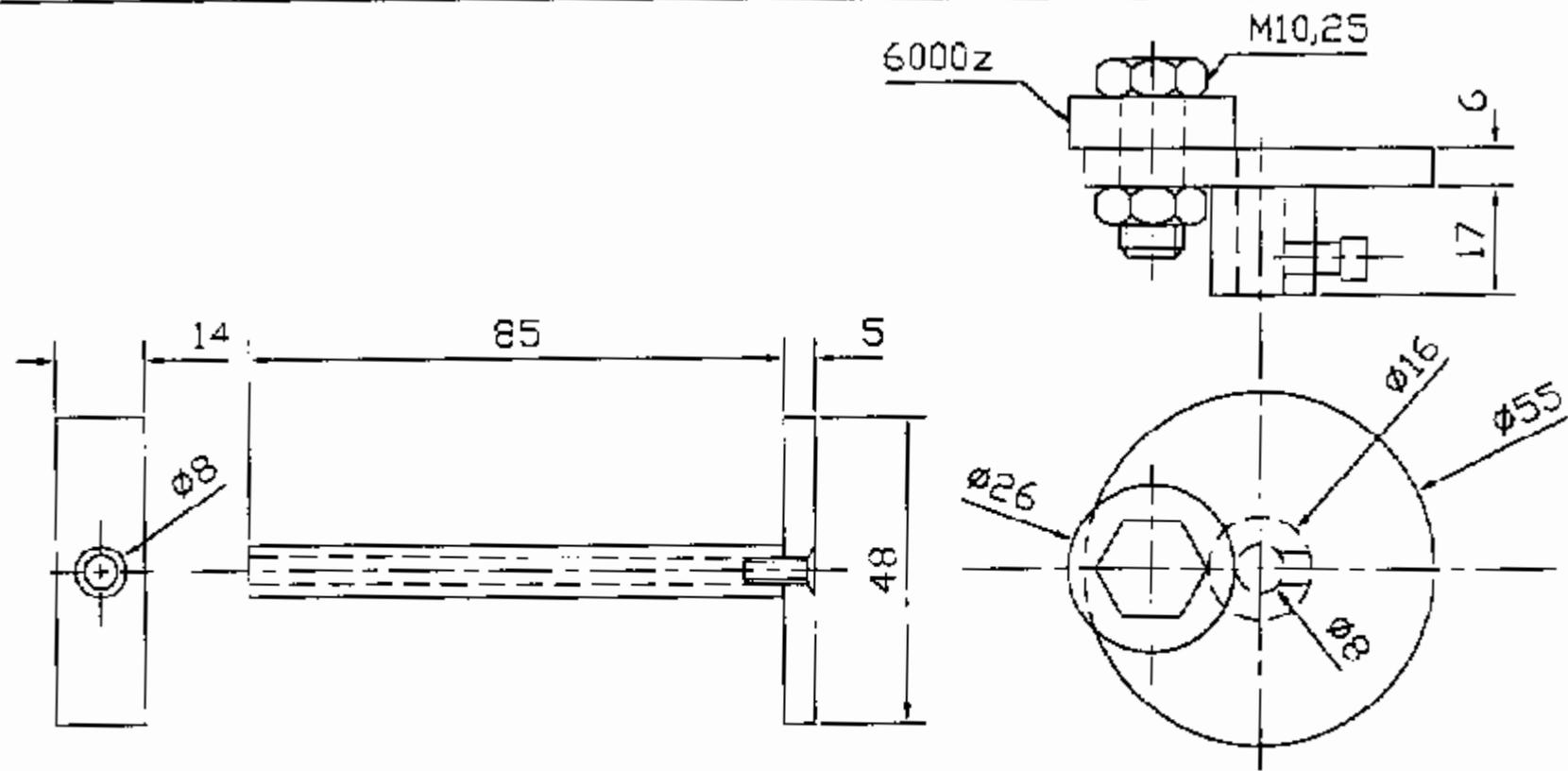
Finalmente se mandó a construir una excéntrica con una circunferencia base de 25 mm de diámetro y otra circunferencia desplazada del eje de rotación, como esta última es donde hace contacto el seguidor se colocó un rodamiento para disminuir la fricción. Fig. 24.

El seguidor se construyó con el material que sobró de la elaboración del eslabón de error para lazo cerrado, un pedazo de varilla hueca de aluminio de 10 cm. de largo en la que se introdujo un taco, para asegurar una plaquita en uno de sus extremos con un tornillo tripa de pato.

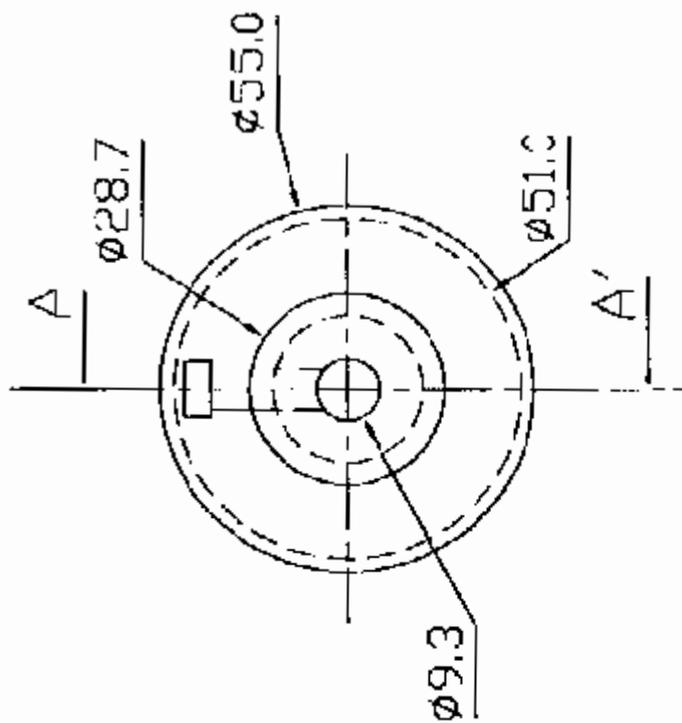
3.2.4. Polea y peso.

Se adaptó una polea que se obtuvo de una mesa de dibujo inservible, esta constaba de un rodamiento, que en nuestro caso no era de utilidad, ya que la polea debe moverse junto con el eje, así que se sacó el rodamiento y se mandó a embocinar la polea, para que esta quede fija al eje, asegurándola con un prisionero. Fig. 25.

El peso se determinó por prueba y error, empezando con un pequeño peso y viendo como respondía el sistema, con poca inercia el sistema no sufría ningún retardo y simulaba como 1º o 2º orden, entonces íbamos incrementando el peso hasta ver que el sistema responda como uno de orden superior. Esto se produce con un peso superior a las 40 lbs. Inclusive se puede notar que el aire se comprime para poder mover el pistón con el peso.



FECHA	NOMBRE	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	ESPOL
DISEÑO	Jul 97 E.M. RUIZ		
REVISÓ	Jul 97 E. Orce		
APROBÓ	Jul 97 E. Orce		
ESCALA	Fig. 24 Excéntrica y seguidor		
1:1			



Sección
A-A'

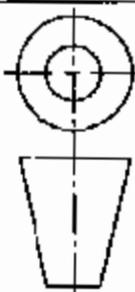
FECHA	NOMBRE
DIBUJO	JULI97
REVISOR	JULI97
APROBADO	JULI97

FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA

ESPOL

ESCALA
1:1

Fig. 25. Polea



Aluminio

3.3. Habilitación de dos potenciómetros para salida a un osciloscopio o a una computadora.

Como sabemos el equipo cuenta con un registrador mecánico, pero para tener una más precisa apreciación de las señales de entrada y salida del sistema se habilitaron los potenciómetros, uno que sensa el movimiento de entrada y otra que sensa el movimiento de salida o de respuesta del sistema. Permitiendo así visualizar estas señales en un osciloscopio o en una computadora, en la que se puede grabar los datos para un posterior análisis.

Consisten de una resistencia lineal fija, sobre la cual se desliza un contacto sujeto al eslabón de entrada o salida respectivamente. Fig. 26. La resistencia o el voltaje medido entre los terminales 1 y 2 es directamente proporcional al desplazamiento.

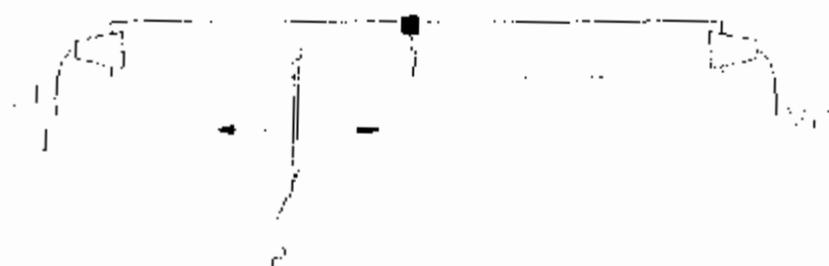


Fig. 26. Reostato lineal de papel de carbón.

Las resistencias variables son de un papel resistivo de carbón de $200 \Omega/\text{in}^2$, no disponibles en el mercado. Aquí radicó nuestro mayor problema, ya que una de ellas tenía rota la continuidad, se buscó una de repuesto en la mayoría de almacenes eléctricos y electrónicos sin que nadie conozca del asunto, e incluso se la mandó a buscar en el exterior sin encontrarla. Una de las soluciones era la de adaptarle otro reostato de la misma resistencia, pero los disponibles en el mercado no varían linealmente sino logarítmicamente.

Entonces no quedó otra que reparar la que teníamos, se intentó adherir carbón de lápiz en la fisura pero no resultó, al compactarle carbón de pila, se le dio continuidad pero la resistencia dejó de variar linealmente.

La solución se dio cuando mediamos la resistencia dándole continuidad al aplastar la fisura con la punta de una llave, entonces se nos ocurrió hacerle un puente en un extremo de la fisura, utilizando para ello una laminita de cobre de 1 mm de espesor, que se la dobló y colocó como grapa, dándole así continuidad y sin cambiar la linealidad de la resistencia.

Las señales de voltaje que entregan los potenciómetros varían entre:

	Desplaz. mínimo	Desplaz. máximo
Señal de entrada (V)	-5.35	1.49
Señal de salida (V)	3.12	-3.7

3.3.1. Construcción de una tarjeta electrónica de adquisición de datos por computadora.

Como los datos que tenemos arriba son señales analógicas no las podemos procesar en un computador sin antes convertirlas en señales digitales, utilizamos para ello el convertidor analógico-digital ADC0808, que cumple la función de recibir las señales de voltaje que entrega nuestro equipo y convertirlas en ceros o unos que ya pueden ser procesados en la computadora.

Este chip solo convierte señales de voltaje en el rango de 0 - 5 voltios pero como sabemos el rango de la señal de entrada varia entre -5.35 a 1.49 V, por lo que necesitamos transformarla proporcionalmente al rango de conversión, utilizamos para ello un circuito formado por 2 chips 741 con un juego de resistencia que fueron calculadas para tal propósito, Fig. 27. También se realizo la transformación del

rango para la señal de salida, los cálculos de las resistencias de ambos se muestran en el anexo A.

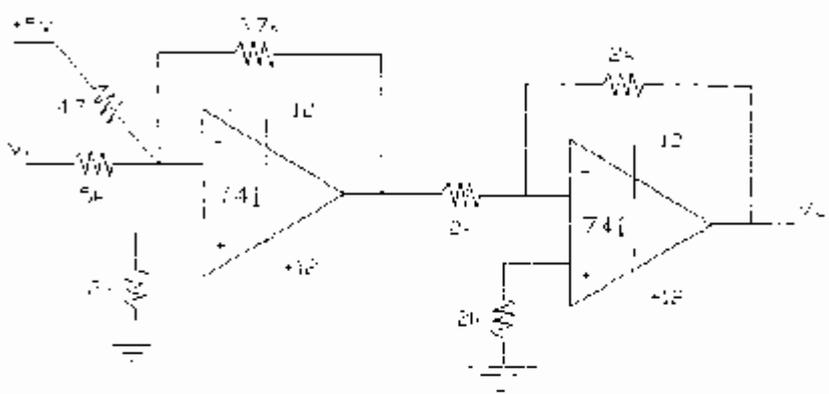


Fig. 27. Circuito que transforma el voltaje de la señal de entrada al rango de 0-5 V.

Cabe resaltar que con un solo chip convertimos tanto la señal de entrada como la de salida, ya que el ADC0808 tiene la capacidad de convertir hasta 8 señales a la vez.

El circuito completo se muestra en Fig. 28, este incluye los circuitos para transformar los rangos de voltaje, un circuito que produce una señal de reloj que el convertidor necesita

para impulsar su circuitería interna, y un amplificador de las señales de salida del convertidor.

Se programó el funcionamiento del convertidor en lenguaje qbasic, anexo B.

Este programa envía la señal de inicio al convertidor, luego lee los datos que se generan de la conversión y los grafica en función del tiempo. Así como también los graba en una matriz para su posterior análisis.

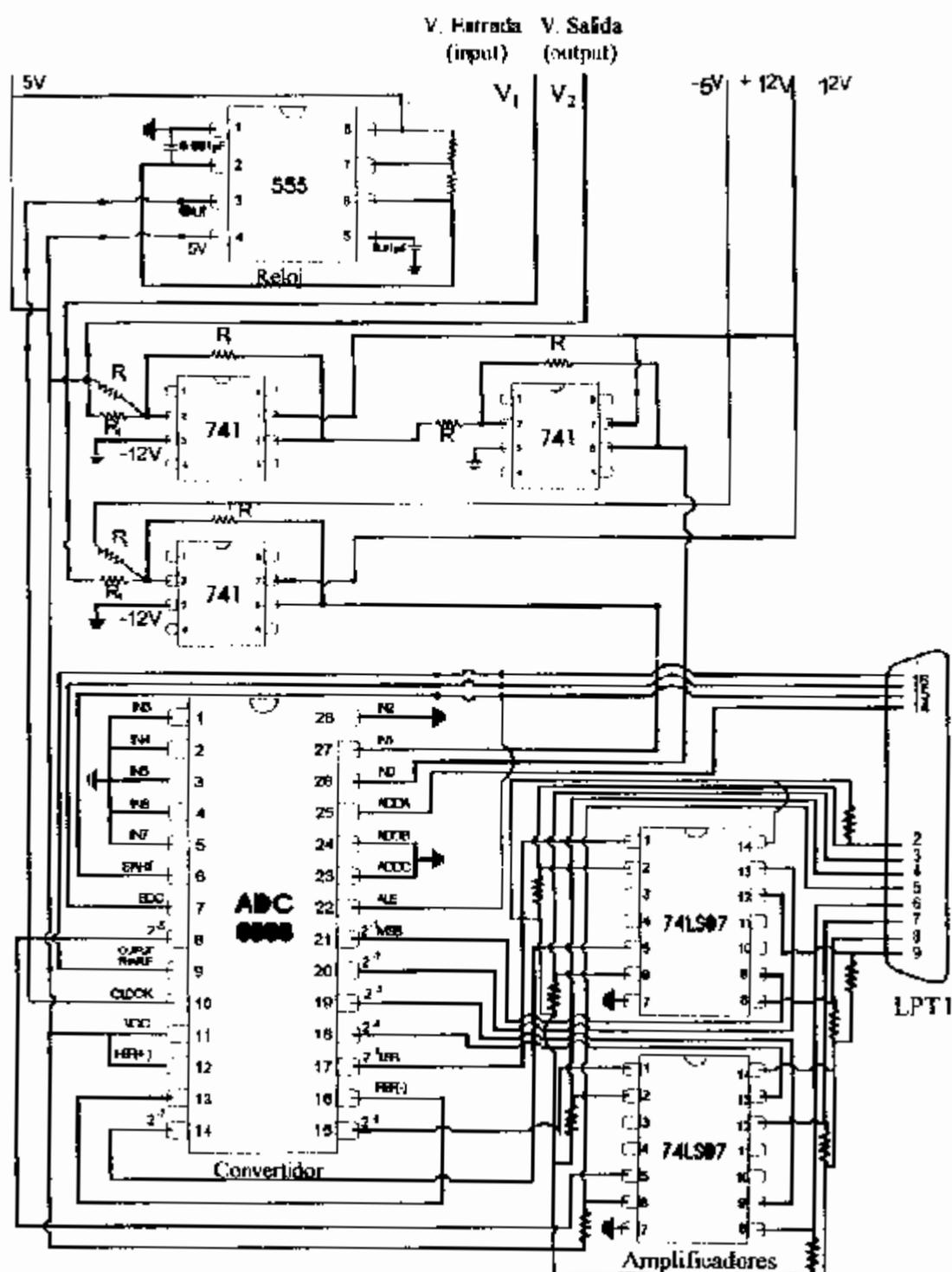


Fig. 28. Circuito de la tarjeta electrónica de adquisición de datos.

IV. GUIAS DE LABORATORIO

4.1. Práctica N° 1 “Sistemas de 1° orden”

En esta sección presentamos la guía de la práctica N° 1, esta tiene el formato de un reporte de ingeniería. Se muestra el objetivo, parte teórica, parte experimental y se propone un análisis de resultados. Los datos, cálculos y resultados obtenidos se muestran en el Apéndice C.

4.1.1. Objetivo

Familiarizar a los estudiantes con las respuestas de sistemas de primer orden en equipos de control neumático con retroalimentación, para distintas señales de entradas. Variando los parámetros de ganancia.

4.1.2. Parte teórica

La teoría en la que se basa este ensayo se menciona a lo largo de la sección 2.1, en la guía que se les facilitó a los estudiantes se les mandaba a investigar en la bibliografía utilizada en el curso de sistemas de control.

4.1.3. Parte experimental

Aquí se explican detalladamente los procedimientos de como realizar las pruebas, que van desde el seteo del equipo, hasta como evaluar los resultados.

4.1.3.1. Velocidad del papel (V)

Para medir la velocidad del papel energizamos el registrador, luego movemos repetidas veces el eslabón de entrada con la mano durante unos 5 a 10 segundos

medidos con un cronómetro. Medimos el espacio desplazado en ese tiempo y calculamos la velocidad.

Repetimos estas operación unas tres veces para sacar una velocidad promedio.

4.1.3.2. Lazo Abierto

El objetivo de esta prueba es determinar la constante integradora K/G del sistema tobera-obturador-pistón, que incluye la atenuación del cantiliver G .

Determinada la constante integradora podemos deducir el valor de la constante de tiempo del sistema.

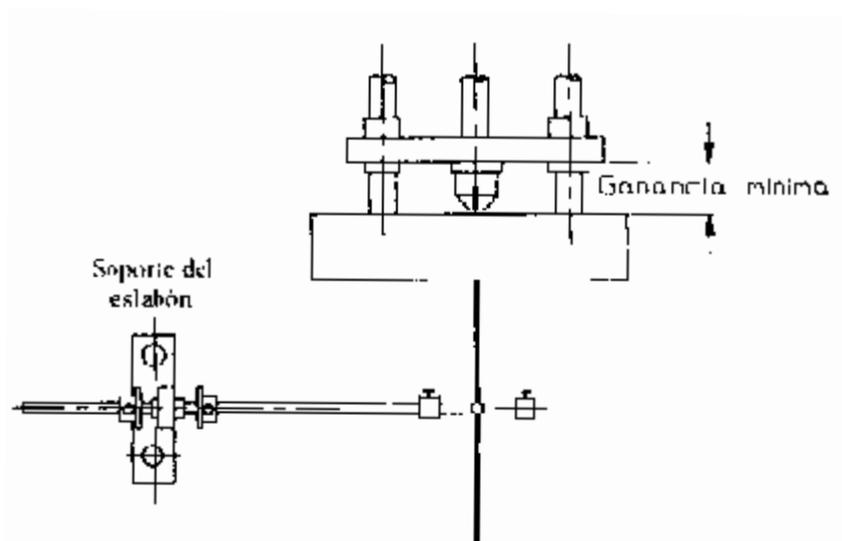


Fig. 29. Colocación del eslabón de error para la prueba de lazo abierto

Procedimiento:

1. Retire el eslabón de error para lazo cerrado.
2. Atomille soporte del eslabón de lazo abierto. Fig.29
3. Conecte el eslabón de lazo abierto al obturador.

4. Setear la válvula para ganancia baja.

5. Con el registrador encendido, mueva el eslabón de prueba entre los topes para obtener un trazo triangular en la pluma de salida. Fig.30

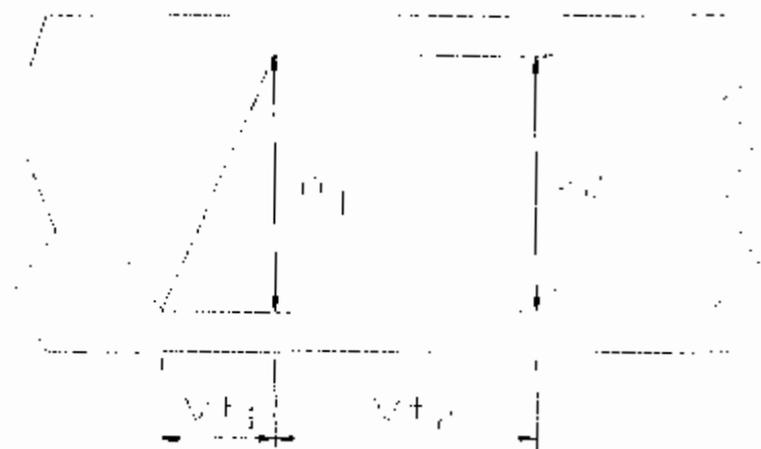


Fig.30. Trazo triangular producto de mover el eslabón entre sus topes.

6. De la gráfica, encuentre los valores de a_1 , a_2 , t_1 , t_2 y con un micrómetro mida el valor de x_1 y x_2 en la barra de prueba.

Si x_1 y x_2 son los desplazamientos del obturador a los lados de la posición de equilibrio, Fig. 31, entonces las correspondientes velocidades del pistón son a_1/t_1 y a_2/t_2 .

Por lo tanto $a_1/t_1 = K/G x_1$ y $a_2/t_2 = K/G x_2$

$$(a_1/t_1 + a_2/t_2) = K/G (x_1 + x_2)$$



Fig. 31. Desplazamientos del obturador

4.1.3.3. Lazo cerrado

Tiene como propósito verificar las respuestas predecidas para varios tipos de entrada. Las respuestas son graficadas en el registrador para su posterior análisis.

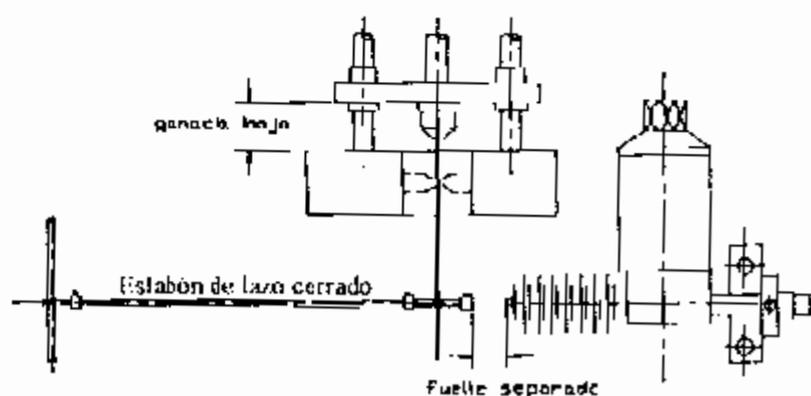


Fig. 32. Colocación del eslabón de lazo cerrado para 1º orden.

4.1.3.3.1. Respuesta a un escalón

Procedimiento:

1. Retire el eslabón de lazo abierto con su respectivo soporte
2. Coloque el eslabón de error para lazo cerrado. Fig.32.
3. Conecte la barra de lazo cerrado al obturador.
4. Con el registrador encendido, mueva el eslabón de entrada (Fig.33/1) rápidamente entre los topes ajustables (Fig. 33/2 y /3) para obtener un escalón, que es graficado con la pluma roja.

5. De la curva exponencial de salida, (pluma negra) podemos calcular el valor de la constante de tiempo del sistema y compararla con la obtenida por medio de la constante integradora en lazo abierto.

4.1.3.3.2. Respuesta a una rampa

Procedimiento:

1. Coloque la leva en el eje, asegúrela apretando el prisionero. Fig.33/4
2. Coloque el seguidor de la leva (Fig.33/5) en el estabón de entrada. Asegúrelo apretando el tornillo de sujeción.

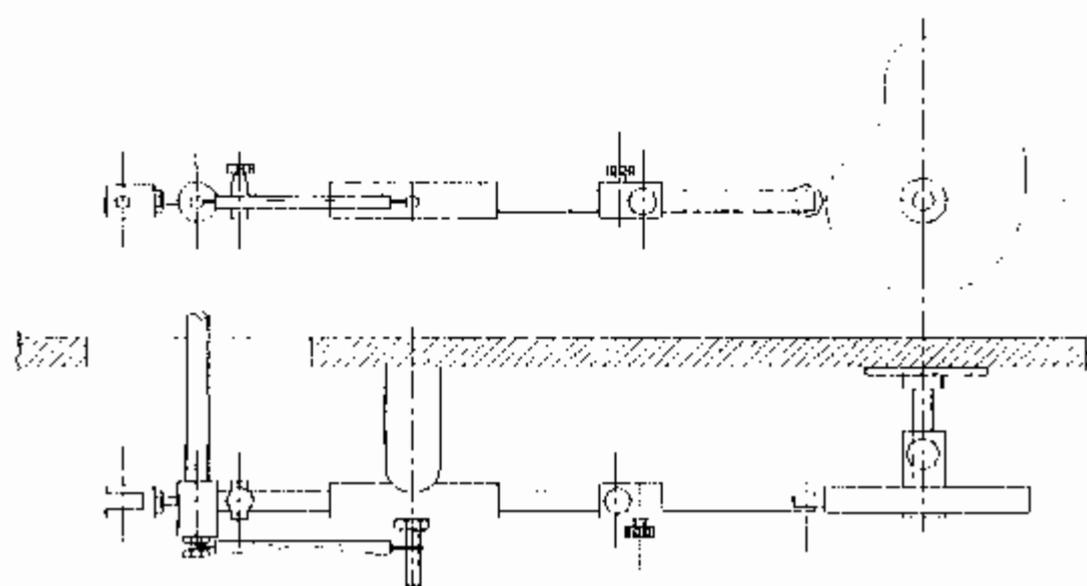


Fig. 33. Eslabón de entrada con la leva colocada para simular una entrada rampa.

3. Encienda el registrador y el motor que mueve la leva.
4. Setear la velocidad de la leva lo mas baja posible.
5. En la gráfica de salida podemos ver claramente el desalineamiento de velocidad

4.1.4. Análisis de resultados

Del gráfico de respuesta a un escalón, tomar los puntos de la curva exponencial para linealizarla en una gráfica semilog y de la pendiente de la recta obtener la constante de tiempo.

Comparar la constante de tiempo obtenida teóricamente con la obtenida de los gráficos de respuesta del sistema y analizar su error.

4.2. Practica N° 2 “Sistemas de 2° orden”

En esta sección presentamos la guía de la práctica N° 2, al igual que la práctica anterior, se muestra el objetivo, parte teórica, parte experimental y se propone un análisis de resultados. Los datos, cálculos y resultados obtenidos se muestran en el Apéndice D.

Los resultados de las prácticas se han colocado en los apéndices ya que en los capítulos presentamos las guías que se les deben facilitar a los estudiantes para que hagan sus reportes.

4.2.1. Objetivo

Familiarizar a los estudiantes con las respuestas de sistemas de segundo orden en equipos de control neumático con retroalimentación, para distintas señales de entradas. En las que se medirán varios parámetros del sistema, como: ω_n , ζ y T .

Así como se elaboraran diagramas de respuesta a la frecuencia.

4.2.2. Parte teórica

La teoría en la que se basa este ensayo se menciona en la sección 2.2, y en sus subcapítulos, o los estudiantes pueden investigar teoría relacionada con sistemas de 2° orden.

4.2.3. Parte experimental

Veremos como se realiza paso a paso la prueba escalón y la prueba sinusoidal en sistemas de 2° orden.

4.2.3.1. Respuesta a una entrada escalón

El escalón es producido moviendo el eslabón de entrada entre los toques removibles, teniendo cuidado de no saturar las válvulas. De la magnitud de los sobrepasos podemos calcular la constante de amortiguamiento del sistema, ζ , (Fig. 14), y de la

4.2.2. Parte teórica

La teoría en la que se basa este ensayo se menciona en la sección 2.2, y en sus subcapítulos, o los estudiantes pueden investigar teoría relacionada con sistemas de 2º orden.

4.2.3. Parte experimental

Veremos como se realiza paso a paso la prueba escalón y la prueba sinusoidal en sistemas de 2º orden.

4.2.3.1. Respuesta a una entrada escalón

El escalón es producido moviendo el eslabón de entrada entre los topes removibles, teniendo cuidado de no saturar las válvulas. De la magnitud de los sobrepasos podemos calcular la constante de amortiguamiento del sistema, ζ , (Fig. 14), y de la

frecuencia de las oscilaciones amortiguadas podemos estimar la frecuencia natural, ya que:

$$\omega_a = \omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2}$$

Varias respuestas pueden ser obtenidas variando la ganancia y cambiando el valor de la constante de tiempo de la unidad retardadora. El primer sobrepaso debería ser limitado entre 25 - 30 % de la entrada para obtener mejores resultados.

Procedimiento:

1. Coloque el eslabón de error con resorte. Conéctelo al obturador.
2. En el otro extremo conecte el fuelle de la unidad retardadora.

3. Aumente la ganancia del sistema tobera-obturador.

4. Con el registrador encendido, mueva el eslabón de entrada (Fig.33/1) rápidamente entre los topes ajustables (Fig. 33/2 y /3) para obtener un escalón, que es graficado con la pluma roja.

5. De la curva de salida, medimos la magnitud de el sobrepaso en porcentaje y con la fig. 15 encontramos el valor de la constante de amortiguamiento. Y con la frecuencia de las oscilaciones estimar ω_n .

4.2.3.2. Respuesta a una entrada sinusoidal.

Procedimiento:

1. Coloque la excéntrica (Fig.34/1) en el eje de entrada asegúrela con el tornillo sujetador.

2. Coloque el seguidor de la excéntrica (Fig. 34/2) en el eslabón de entrada. Asegúrelo apretando el tornillo Fig. 34/3
3. El eslabón con resorte y el fuelle también deben ser conectados.
4. Encienda el registrador y el motor del eje de entrada.
5. La frecuencia debe de ser incrementada hasta que la amplitud de la salida sea atenuada a un valor muy pequeño. Esto se da aumentando la velocidad de la entrada.
6. De las gráficas de salida podemos medir la amplitud y la fase. Como se muestra en la Fig. 10. Con estos datos podemos elaborar los diagramas de respuesta a la frecuencia. La frecuencia para una fase de 90° nos da ω_n y la amplitud a esta frecuencia nos permite estimar ζ .

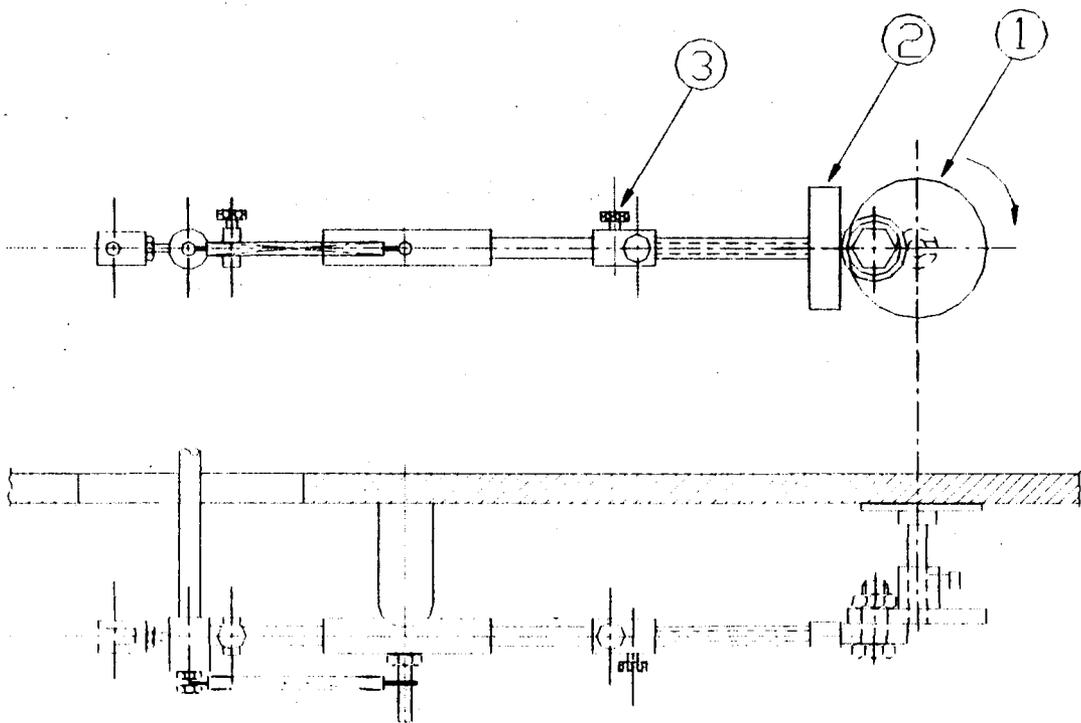


Fig. 34. Eslabón de entrada con la excéntrica colocada para simular una entrada sinusoidal.

4.2.4. Análisis de resultados

Con una entrada escalón encontrar la frecuencia natural del sistema, así como su constante de amortiguamiento. Y compáralas con las encontradas en la respuesta sinusoidal. Para encontrar la ω_n de la gráfica sinusoidal nos valemos de la frecuencia de resonancia (ω_r) y de la constante de amortiguamiento encontrada por medio de la aproximación:

$$\theta_o/\theta_i = 1/2\zeta$$

Elaborar el gráfico de respuesta a la frecuencia (Razón de Amplitud “vs” ω) en escala milimetrada y en semilog.

Encontrar la ecuación del sistema.

4.3. Práctica N° 3 “Sistemas de orden superior”

En esta práctica no se desarrollo una guía como en las anteriores ya que esta solo consiste en una demostración de la respuesta de sistemas de orden superior, que las compararemos con la simulación de la función de transferencia en un programa de control como el CODAS o MATLAB.

Procedimiento:

Coloque el peso en la polea, asegurándola para que no se deslice.

Gradúe la ganancia en un valor bajo y los restrictores abiertos a 1 ½ vueltas, entonces la respuesta a una entrada escalón será como la de la Fig. 21B.

Aumentando la ganancia y reduciendo el efecto de los restrictores se producirá la respuesta de la Fig. 22B.

Posteriores aumentos de ganancia volverán al sistema inestable y se producirán oscilaciones divergentes.

Estas oscilaciones se producirán hasta que el ciclo limite se estabilice debido a la saturación en las toberas. Fig. 22C.

Este efecto se demuestra mejor utilizando un pequeño escalón, de alrededor de 1/8 in de alto.

La frecuencia de las oscilaciones puede ser cambiada variando la masa efectiva (M), ya que $\omega_n = (BA^2 / VM)^{1/2}$.

Todo esto lo podemos visualizar mejor utilizando la tarjeta de adquisición de datos:

Conectar a la tarjeta la señal de entrada "input", la señal de salida "output" y además la señal de tierra.

Entrar al QBASIC y correr el programa Graficad.bas con F5, escoger la selección " 2 " que gráfica y graba los datos a la vez. Realizar la prueba como se explicó anteriormente. Para parar el programa use F4.

Entonces tendremos las señales graficadas en la pantalla de la computadora, las podemos imprimir utilizando la tecla "print screen".

Los datos que han sido leídos quedan grabados automáticamente.

Para obtener la función de transferencia llamar al programa Levi1 que al introducirle los datos obtenidos nos dará la función de transferencia en función de la frecuencia dominante ($i\omega$), esta la metemos en el programa Fourier1 y nos da la función transformada.

Ahora podemos simular esta función de transferencia en el Cudas y comparar la gráfica con la obtenida por la tarjeta.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- Cumpliendo con los objetivos del proyecto se diseñó y construyó las piezas necesarias para restaurar completamente el equipo servoneumático de control automático. Se diseñó y construyó todas las piezas faltantes aplicando la columna de diseño.

2.- Se elaboraron tres prácticas de laboratorio, las cuales fueron probadas con los estudiantes, teniendo buenos resultados, en ellas los estudiantes pueden visualizar claramente como responden los sistemas regidos por ecuaciones diferenciales de 1º, 2º, 3º, y 4º orden, logrando cuantificar parámetros como constantes de tiempo, de amortiguamiento, frecuencia natural, etc. que les asiste para un mejor entendimiento de la materia Sistemas de Control.

3.- Para modernizar la tecnología del equipo se construyó una tarjeta electrónica de adquisición de datos la cual computariza el sistema de

graficación dándonos una apreciación mas precisa de las respuestas de los diferentes sistemas y nos permite además grabar los datos registrados para posteriores análisis en la computadora.

4.- Con la realización de este trabajo se ha recuperado un equipo de tecnología anticuada y se lo ha convertido en un medio didáctico que facilita a los estudiantes el aprendizaje de los sistemas de control y contribuye al mejoramiento de los laboratorios de nuestra facultad.

RECOMENDACIONES

5.- Este equipo también podría ser utilizado por los estudiantes de Ingeniería Eléctrica ya que ellos también toman una materia de Control Automático y no cuentan con un equipo didáctico para sistemas mecánicos.

6.- Se podría investigar mas sobre como eliminar el ruido de las señales graficadas, a partir de eliminar los buffer que se están utilizando para amplificar la corriente que es leída por el puerto.

APÉNDICES

APÉNDICE A

CIRCUITOS QUE TRANSFORMAN LOS VOLTAJES QUE ENTREGAN LOS POTENCIOMETROS AL RANGO DE 0-5 V CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS DE LAS RESISTENCIAS.

Para la señal de entrada que varía en el rango de -5.35 a 1.49 V.

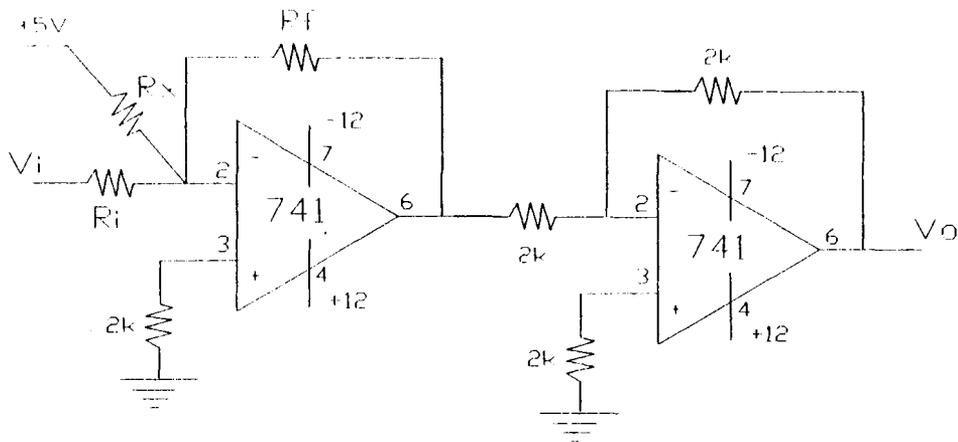


Fig. A1. Circuito que convierte el rango de voltaje de (-5.35 a 1.49) V en (0 a 5) V.

Entonces cuando entren -5.35 V queremos que salga 0 V .

Y cuando entren 1.49 V que salga 5 V .

$$(-5.35) A + 5V (R_f/R_x) = 0 \text{ V}$$

$$(1.49) A + 5V (R_f/R_x) = 5 \text{ V}$$

Donde A es la razón de conversión $A = (5 - 0) / (1.49 - (-5.35)) = 0.73$

$$A = R_f/R_i \quad \therefore R_f = AR_i$$

$$Y R_x = 5R_i/5.35$$

$$\text{Si } R_i = 5 \text{ k}\Omega \text{ a priori}$$

$$\text{Entonces } R_x = 4.7 \text{ k}\Omega$$

$$Y R_f = 3.7 \text{ k}\Omega$$

Para la señal de salida que varia en el rango de 3.12 a -3.7 V

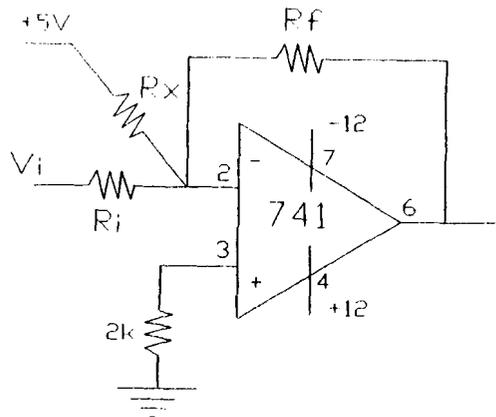


Fig. A2. Circuito que convierte el rango de voltaje de (3.12 a -3.7) V en (0 a 5) V.

Entonces cuando entren 3.12 V queremos que salga 0 V. Y cuando entren -3.7 V que salga 5 V.

$$(3.12) A - 5V (Rf/Rx) = 0 V$$

$$(3.7) A + 5V (Rf/Rx) = 5 V$$

Donde A es la razón de conversión $A = (5 - 0) / (3.12 - (-3.7)) = 0.73$

$$A = Rf/Ri \quad \therefore Rf = ARi$$

$$Y R_x = 5Ri/3.12$$

$$\text{Si } Ri = 5k \Omega \text{ apriori}$$

$$\text{Entonces } R_x = 8 k\Omega$$

$$Y Rf = 3.7 k\Omega$$

APÉNDICE B

PROGRAMA QUE MANEJA AL CONVERTIDOR Y PERMITE GRÁFICAR LOS DATOS LEÍDOS

```
REM programa principal
CLS
LOCATE 8, 8
PRINT "Gráficar en pantalla AMPLITUD vs TIEMPO      1"
LOCATE 10, 8
PRINT "Gráficar en pantalla y Gabar datos de AMPLITUD vs TIEMPO      2"
LOCATE 12, 8
PRINT "Gráficar DIAGRAMA DE FASE Y Relación DE AMPLITUD      3"
LOCATE 14, 8
PRINT "SALIR      4"
LOCATE 16, 8
INPUT "INGRESE Opción (1 a 4): ", opc
SELECT CASE opc
CASE 1
GOSUB gráfico
CASE 2
GOSUB Grabar
CASE 3
GOSUB fase
CASE 4
GOSUB sale
END SELECT
END
```

gráfico:

```
10 REM declare function d AS INTEGER
20 '$DYNAMIC
30 REDIM ts(640)
40 REDIM tm(640)
```

```
50 REDIM m(640) AS INTEGER
```

```
60 REDIM n(640) AS INTEGER
```

```
70 CLS
```

```
80 INPUT "Ingrese el factor de velocidad de barrido (1-10): "; vb
```

```

440 m(d) = CINT((500 / 256) * y1) - 15
442 ts(d) = TIMER - ts1#
444 LOCATE 27, 70
446 PRINT ts(d)
450 m(0) = m(1)
460 LINE ((d - 1), m(d - 1))-(d, m(d)), 1
470 REM conversión finalizada
480 REM Seleccionar canal de entrada analógica IN1 (PIN 14 -ADA)
490 OUT &H37A, 8
500 REM envió la señal de star al convertidor (pin 16 - star)
510 OUT &H37A, 236
520 FOR i = 1 TO 5: NEXT
530 OUT &H37A, 8
540 REM Verificar si ya terminó la conversión EOC al PIN 15
550 a = INP(&H379)
560 IF (a AND 8) = 8 THEN
570 y2 = INP(&H378)
580 ELSE GOTO 550
590 END IF
600 n(d) = CINT((500 / 256) * y2) + 15
610 n(0) = n(1)
620 LINE ((d - 1), n(d - 1))-(d, n(d)), 4
630 REM conversión finalizada
640 NEXT p
650 NEXT o
660 WEND
670 END

```

Grabar:

```

1010 REM declare function d AS INTEGER
1020 ' $DYNAMIC
1030 REDIM ts(640)
1040 REDIM tm(640)
1050 REDIM m(640) AS INTEGER
1060 REDIM n(640) AS INTEGER
1065 CLS
1070 INPUT "Escriba el nombre de la variable tiempo del valor seteado: "; tss$
1075 INPUT "Escriba el nombre de la variable amplitud del valor seteado: ";
ass$

```

```
1080 INPUT "Escriba el nombre de la variable amplitud del valor medido: ";  
amm$  
1090 OPEN tss$ FOR OUTPUT AS #1  
1100 OPEN ass$ FOR OUTPUT AS #2  
1105 OPEN amm$ FOR OUTPUT AS #3  
1110 INPUT "Ingrese el factor de velocidad de barrido (1-10): "; vb  
1115 vb = CINT((-1.555 * vb) + 16.555)  
1120 CLS :  
1130 SCREEN 12  
1140 WINDOW (630, 460)-(1, 1)  
1150 VIEW (1, 1)-(630, 460), , 7  
1170 REM encerrar bus de datos y control de puertos  
1180 OUT &H378, 0  
1190 OUT &H37A, 235  
1200 salir = 0  
1210 ON KEY(4) GOSUB PH  
1220 KEY(4) ON  
1230 WHILE salir = 0  
1240 ts1# = TIMER  
1280 FOR o = 1 TO 30  
1290 CLS  
1292 f = 12  
1294 FOR i = 1 TO 11  
1296 LOCATE (2.5 * i), 2  
1297 PRINT (f - 2 * i)  
1298 NEXT i  
1300 FOR p = vb TO (640 * vb)  
1310 d = FIX(p / vb)  
1340 REM habilitar el ADC0808 a output enable (pin 1 - enable)  
1360 OUT &H37A, 10  
1400 REM Seleccionar canal de entrada analógica IN0 (PIN 14 -ADDA)  
1500 OUT &H37A, 10  
1550 REM envió la señal de star al convertidor (pin 16 - star)  
1560 OUT &H37A, 230  
1580 FOR i = 1 TO 20: NEXT  
1590 OUT &H37A, 10  
1600 REM Verificar si ya terminó la conversión EOC al PIN 15  
1700 a = INP(&H379)  
1800 IF (a AND 8) = 8 THEN  
1810 ELSE GOTO 1700
```

```
1820 END IF
1830 y1 = INP(&H378)
1840 m(d) = CINT((950 / 256) * y1) - 180
1850 m(0) = m(1)
1860 ts(d) = TIMER - ts1#
1870 IF ((p / vb) = d) AND (ts(d) <> ts(d - 1)) THEN
1890 PRINT #1, ts(d)
1892 r = (-20.061 + (.1020408 * m(d)))
1895 PRINT #2, r
1897 ELSE GOTO 1900
1898 END IF
1900 LINE ((d - 1), m(d - 1))-(d, m(d)), 1
1910 REM conversión finalizada
1920 REM Seleccionar canal de entrada analógica IN1 (PIN 14 -ADA)
1930 OUT &H37A, 8
1940 REM envió la señal de star al convertidor (pin 16 - star)
1950 OUT &H37A, 236
1960 FOR i = 1 TO 20: NEXT
1970 OUT &H37A, 8
1980 REM Verificar si ya terminó la conversión EOC al PIN 15
1990 a = INP(&H379)
2000 IF (a AND 8) = 8 THEN
2010 y2 = INP(&H378)
2020 ELSE GOTO 1990
2030 END IF
2040 n(d) = CINT((950 / 256) * y2) - 180
2050 n(0) = n(1)
2060 IF (p / vb) = d AND (ts(d) <> ts(d - 1)) THEN
2065 s = CINT(-20.061 + (.1020408 * n(d)))
2070 PRINT #3, s
2075 ELSE GOTO 2080
2077 END IF
2080 LINE ((d - 1), n(d - 1))-(d, n(d)), 4
2090 REM conversión finalizada
2100 NEXT p
2110 NEXT o
2120 CLOSE #1
2130 CLOSE #2
2140 CLOSE #3
2150 WEND
```

2160 END

fase:

```
3010 REM declare function d AS INTEGER
3020 '$DYNAMIC
3030 REDIM ts(640)
3040 REDIM tm(640)
3050 REDIM m(640) AS INTEGER
3060 REDIM n(640) AS INTEGER
3062 REDIM mm(640) AS INTEGER
3065 REDIM nn(640) AS INTEGER
3070 CLS
3080 INPUT "Ingrese el factor de velocidad de barrido (1-10): "; vb
3090 vb = CINT((-1.555 * vb) + 16.555)
3100 CLS :
3110 SCREEN 12
3120 WINDOW (630, 460)-(1, 1)
3130 VIEW (1, 1)-(630, 460), , 7
3140 REM encerar bus de datos y control de puertos
3150 OUT &H378, 0
3160 OUT &H37A, 235
3170 salir = 0
3180 ON KEY(4) GOSUB PH
3190 KEY(4) ON
3200 WHILE salir = 0
3205 ts1# = TIMER
3210 FOR o = 1 TO 30
3220 CLS
3230 FOR i = 1 TO 4
3240 LINE (1, 57.5 * i)-(640, 57.5 * i)
3250 NEXT i
      FOR i = 4 TO 7
      LINE (160, 57.5 * i)-(480, 57.5 * i)
      NEXT i
3260 FOR i = 1 TO 5
3270 LINE ((80 + 80 * i), 230)-((80 + 80 * i), 480)
3280 NEXT i
3290 f = 15: b = 0
3300 FOR i = 1 TO 5
3310 LOCATE (b + 14 + i), 2
```

3320 B
3330
3340 B
3350 B
3360 d
3370 H
3380 C
3390 B
3400 B
3410 B
3420 B
3430 B
3440 B
3450 B
3460 B
3470 B
3480 B
3490 B
3500 B
3510 B
3515 B
3517 B
3518 B
3519 B
3520 B
3525 B
3530 B
3540 B
3560 B
3570 B
3580 B
3590 B
3600 B
3610 B
3620 B
3630 B
3640 B
3650 B
3660 B
3670 B

```
3675 n(d) = CINT((580 / 256) * y2) - 100
3680 n(0) = n(1): nn(0) = nn(1)
3685 LINE ((d - 1), n(d - 1))-(d, n(d)), 4
3690 LINE (mm(d - 1), nn(d - 1))-(mm(d), nn(d)), 4
3700 REM conversión finalizada
3710 NEXT p
3720 NEXT o
3730 WEND
3740 END
```

sale:

```
5000 PH:
5002 OUT &H37A, 232
5004 OUT &H379, 135
5006 OUT &H378, 0
5010 salir = 1
```

APÉNDICE C

DESARROLLO DE LA PRACTICA N° 1

Cálculos

- Calculamos la velocidad del papel tal como se indico en la sección 4.1.3.1, midiendo el desplazamiento del papel y el tiempo. Fig. C1.

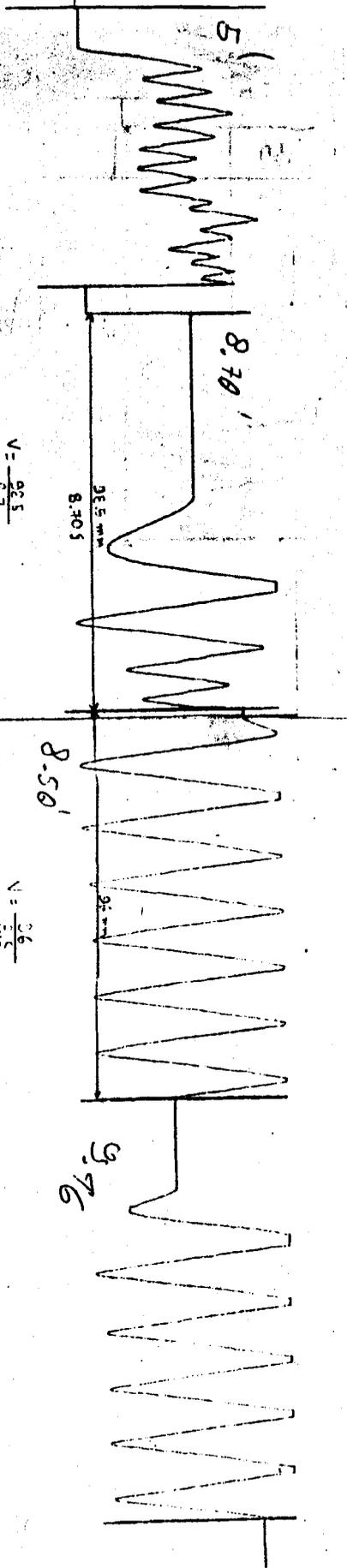
$$V = e/t$$

$$V = 11.3 \text{ mm/S}$$

- Realizamos la prueba de lazo abierto, (sección 4.1.3.2) como vemos en la Fig. C2.

Del gráfico $a_1 = 45 \text{ mm}$ $a_2 = 48 \text{ mm}$ y

$V_{t_1} = 14 \text{ mm}$ $V_{t_2} = 20.5 \text{ mm}$



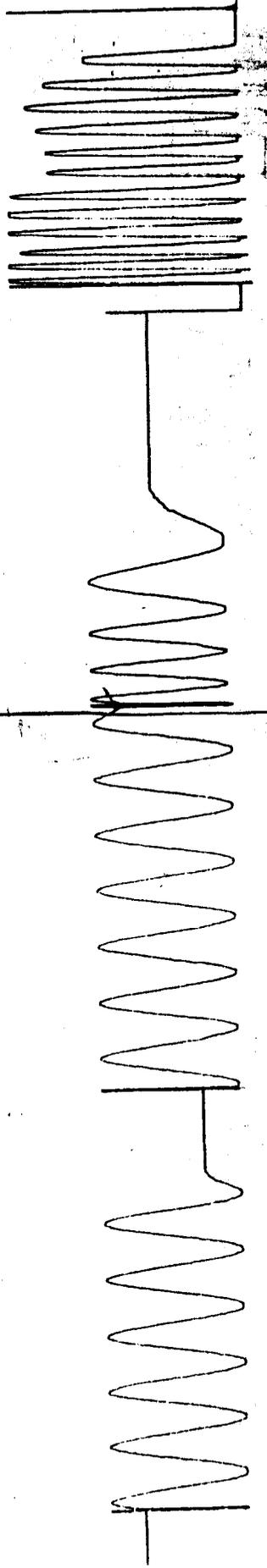
$$V = \frac{93.5}{5.7}$$

$$V = 11.32 \text{ mm/s}$$

$$V = \frac{26}{2.5}$$

$$V = 11.28 \text{ mm/s}$$

$$\therefore V = 11.3 \text{ mm/s}$$



$$vt_1 = 14$$
$$vt_2 = 20.5$$

$$t_1/v = 14/11.3 = 1.24$$
$$t_2/v = 20.5/11.3 = 1.81$$

$$d_1 = 45 \text{ mm}$$
$$d_2 = 48 \text{ mm}$$

$$\left(\frac{45}{1.24} + \frac{48}{1.81} \right)$$

K/6

6

6

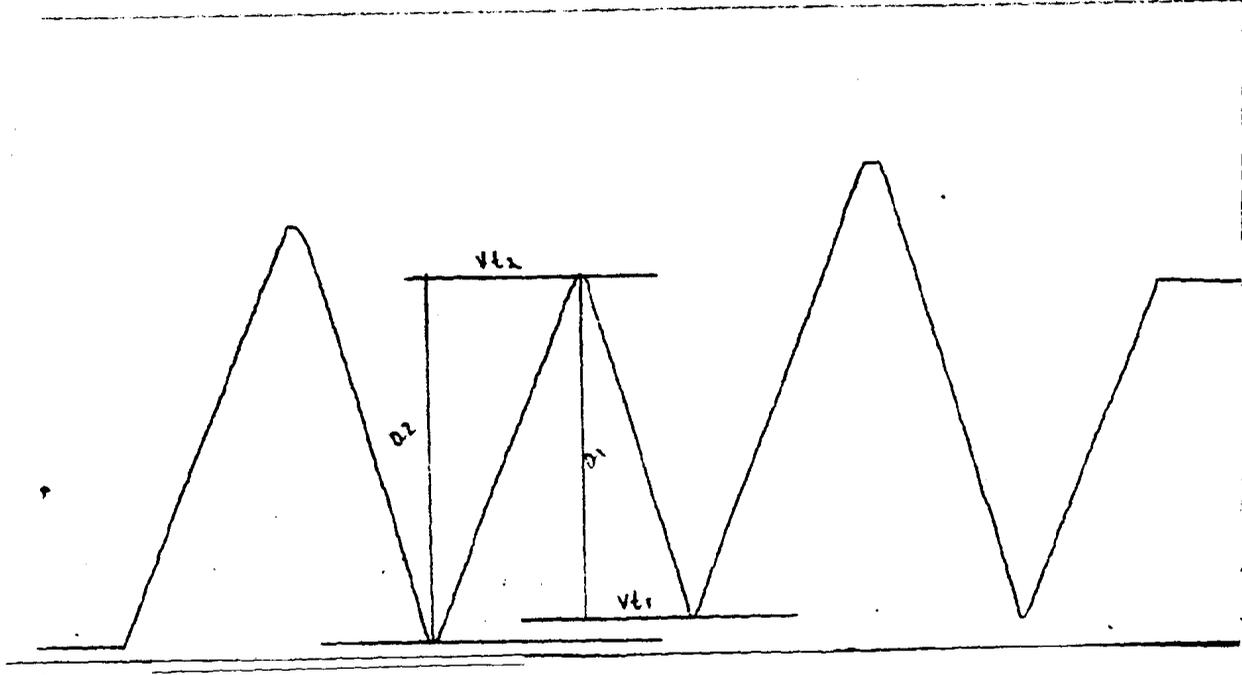


Fig. C2. Gráfico de la prueba de lazo abierto

Dividimos para la velocidad del papel y tenemos el tiempo

$$t_1 = 14/11.3 = 1.24 \text{ S}$$

$$t_2 = 20.5/11.3 = 1.81 \text{ S}$$

Medimos los desplazamientos del obturador en la barra de prueba

$$x_1 = x_2 = 5 \text{ mm}$$

Si $(a_1/t_1 + a_2/t_2) = K/G (x_1 + x_2)$

$$(4.5/1.24 + 48/1.81) = k/G (5 + 5)$$

$$k/G = 6.28$$

Y como la constante de tiempo es:

$$T = 2G/k$$

$$T = 0.32$$

- Realizamos la prueba de respuesta a una entrada escalón tal como se indica en la sección 4.1.3.3.1 y lo observamos en la Fig. C3.

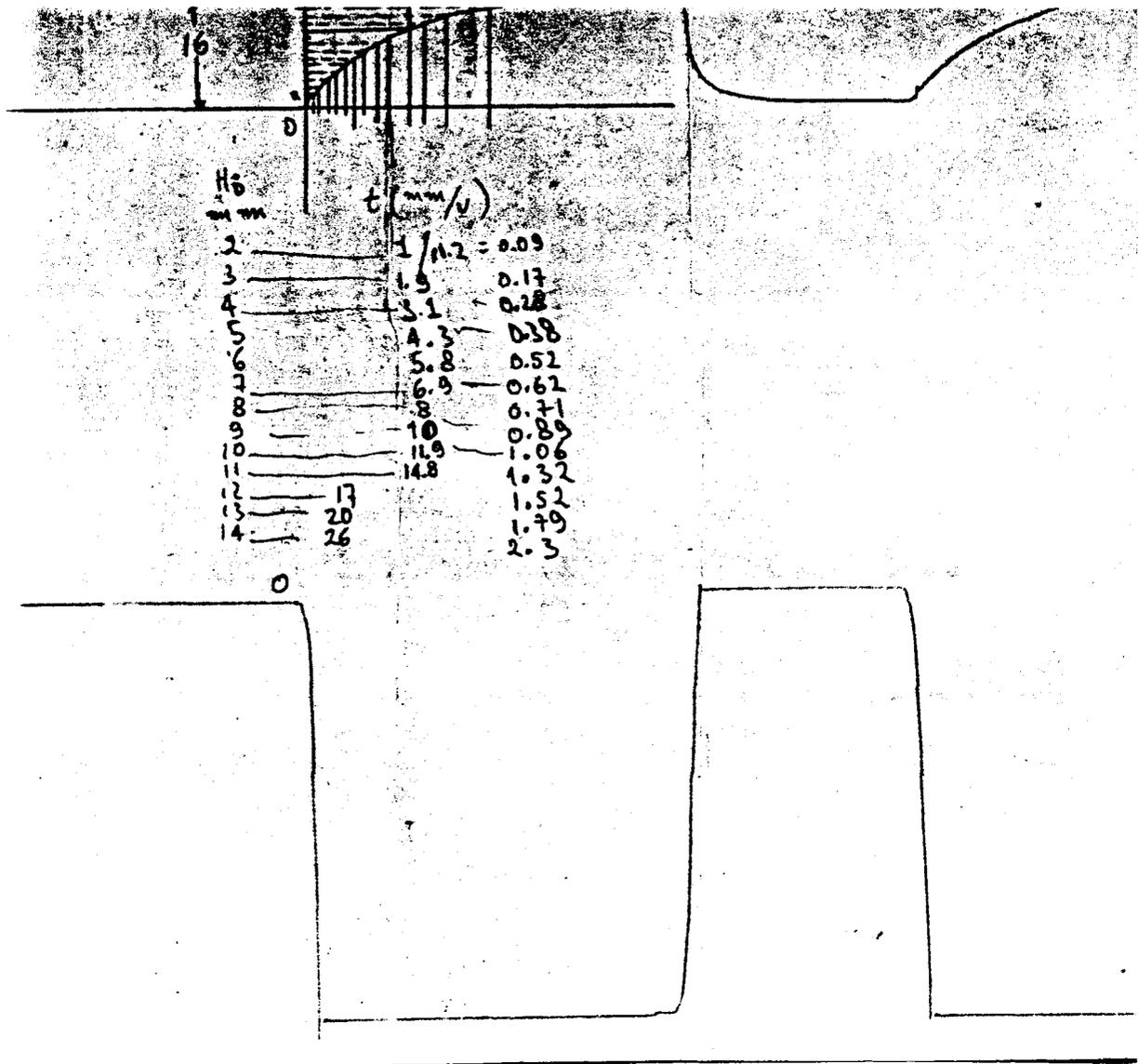


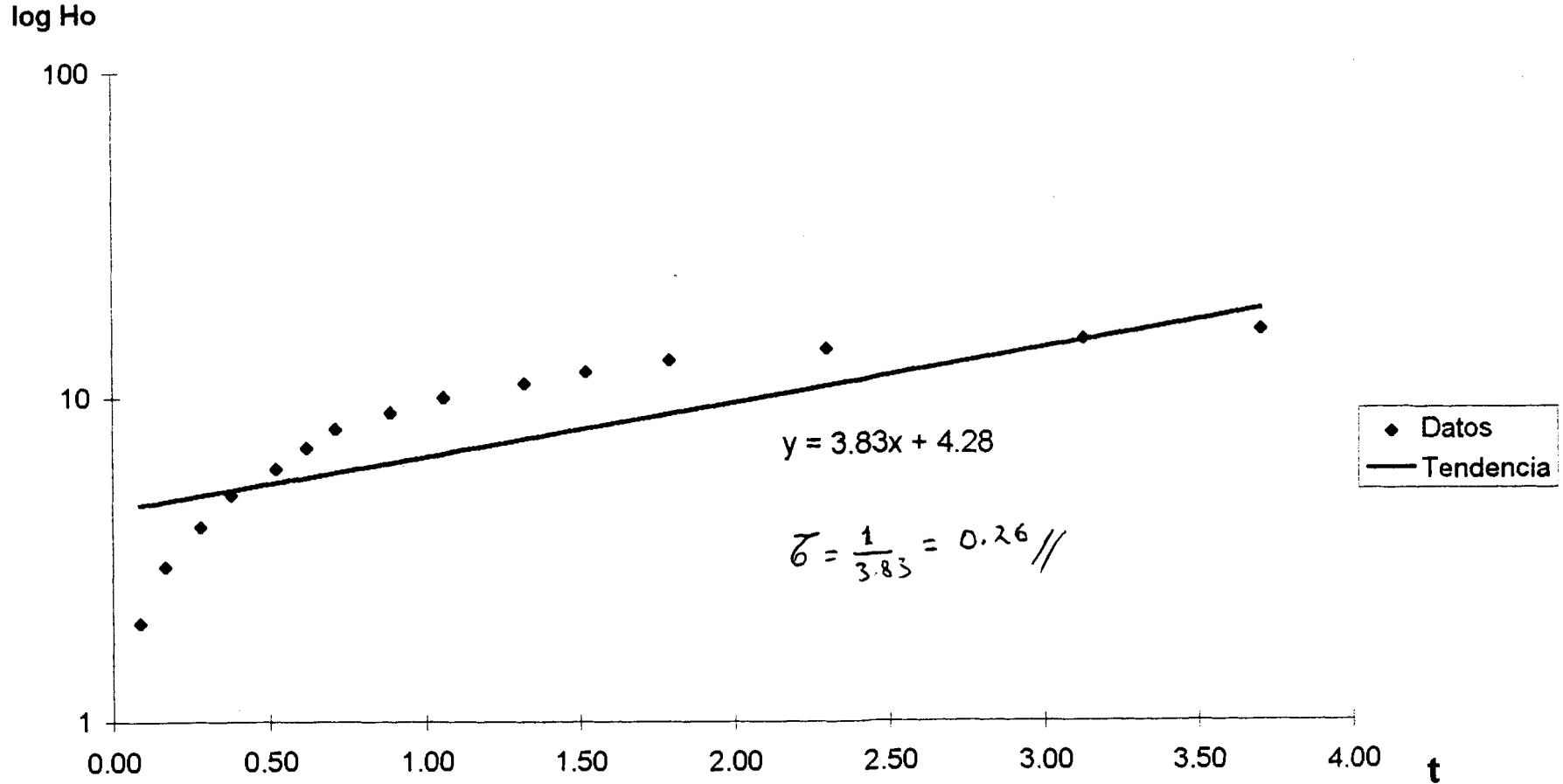
Fig. C3. Gráfico de respuesta a una entrada escalón de 1° orden

Del gráfico podemos estimar la constante de tiempo como se indico en la Fig. 8B, que nos indica que T es el tiempo que tarda el sistema en responder el 63 % de la entrada. Pero es mejor obtenerla de la pendiente de la curva linealizada. Para ello sacamos los datos siguientes:

Hi (mm)	tV (mm)	t (S)
2	1.0	0.09
3	1.9	0.17
4	3.1	0.28
5	4.3	0.38
6	5.8	0.52
7	6.9	0.62
8	8.0	0.71
9	10.0	0.89
10	11.9	1.06
11	14.8	1.32
12	17.0	1.52
13	20.0	1.79
14	26.0	2.30
15	35.0	3.13
16	41.5	3.70

Graficamos $\text{Log } H_o$ vs t y obtenemos la pendiente. el inverso de la pendiente nos da la constante de tiempo.

Linealización de la curva de respuesta



APÉNDICE D

DESARROLLO DE LA PRACTICA N° 2

- De la respuesta escalón, Fig.D1, calculamos el porcentaje de sobrepaso con el cual ingresamos a la fig. 15 y encontramos la constante de amortiguamiento.

Cálculos

$$\% \text{ sobrepaso} = 13/48 * 100 = 27\%$$

Entonces del gráfico 15 entrando con 27% nos da $\zeta = 0.36$

$$T = 30/11.2 = 2.7$$

$$\omega_a = 2\pi/T = 2.3$$

Con la cual obtenemos la frecuencia natural

$$\omega_a = \omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2}$$

$$\omega_n = (1 - 0.36^2)^{1/2} / 2.3 = 2.5$$

• Realizamos la prueba con una entrada sinusoidal, como se indica en la sección 4.2.3.2, Fig D2.

De donde obtenemos los siguientes datos:

$$2|\theta_i| = 34$$

$$V = 11.2 \text{ mm/S}$$

$$\omega = 2\pi \cdot 11.2 / TV$$

En el gráfico medimos los valores de TV y de $2|\theta_o|$ con los que calculamos ω y la razón de amplitudes.

TV	$2 \theta_o $	ω	$ \theta_o / \theta_i $
125	38	0.563	1.118
82	40	0.858	1.176
58	42	1.213	1.235
46	48	1.530	1.412
37	56.5	1.902	1.662
33	65	2.132	1.912
29	63	2.427	1.853
28	64	2.513	1.882
25	55	2.815	1.618
21	42	3.351	1.235
17	27.5	4.140	0.809
10	11	7.037	0.324
6.5	7	10.826	0.206
5	5	14.074	0.147
3	2.5	23.457	0.074

Del gráfico de respuesta a la frecuencia obtenemos la frecuencia de resonancia $\omega_r = 2.4$ y la razón de amplitud a dicha frecuencia $\theta_o / |\theta_i| = 1.88$ con la cual encontramos la constante de amortiguamiento

$$\theta_o / |\theta_i| = 1/2\zeta \quad \zeta = 0.265$$

y como $\omega_r = \omega_n(1-2\zeta^2)^{1/2}$ despejamos $\omega_n = \omega_r / (1-2\zeta^2)^{1/2}$

$$\omega_n = 2.4 / (1-2(0.265)^2)^{1/2} \quad \omega_n = 2.58$$

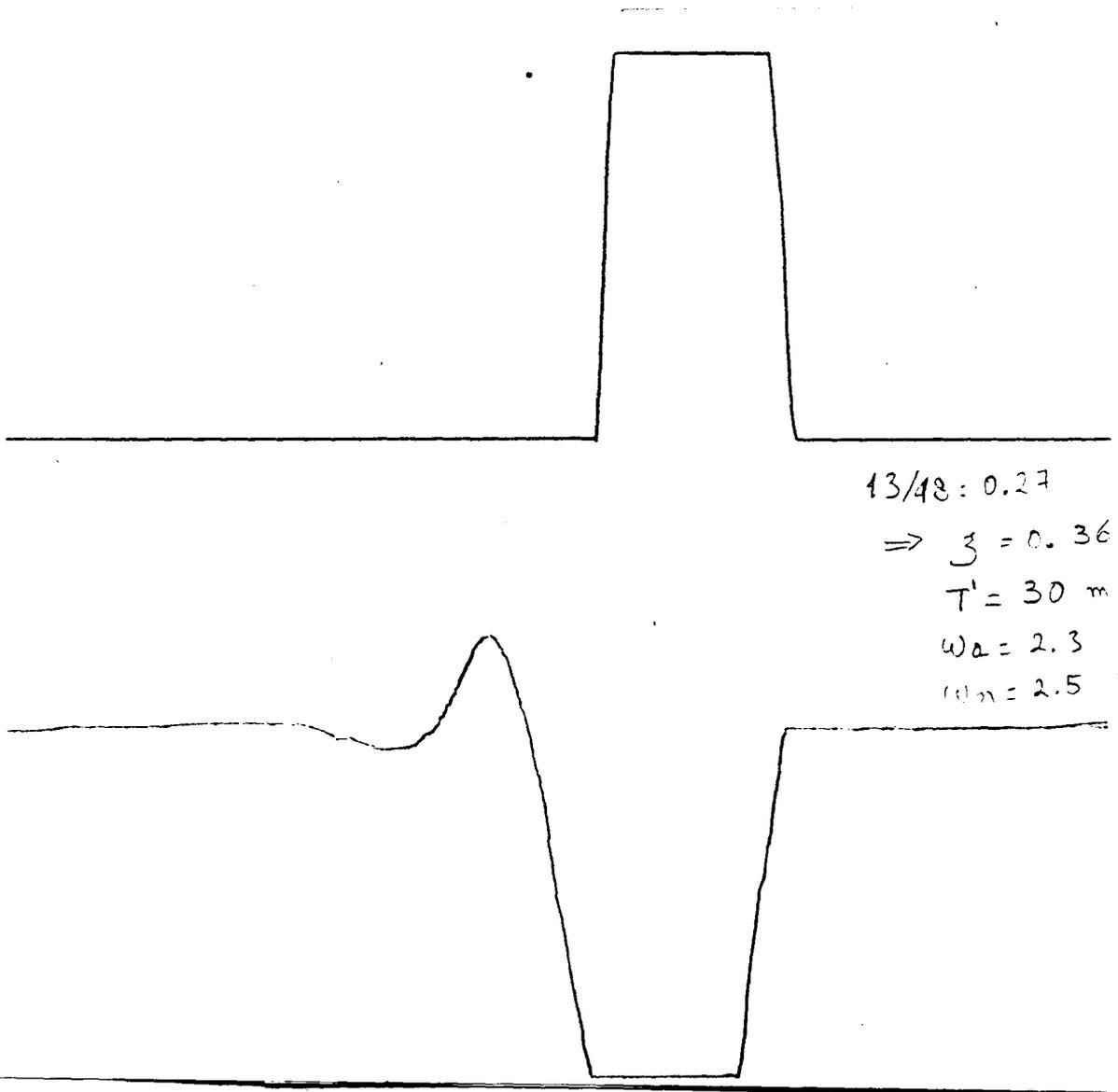
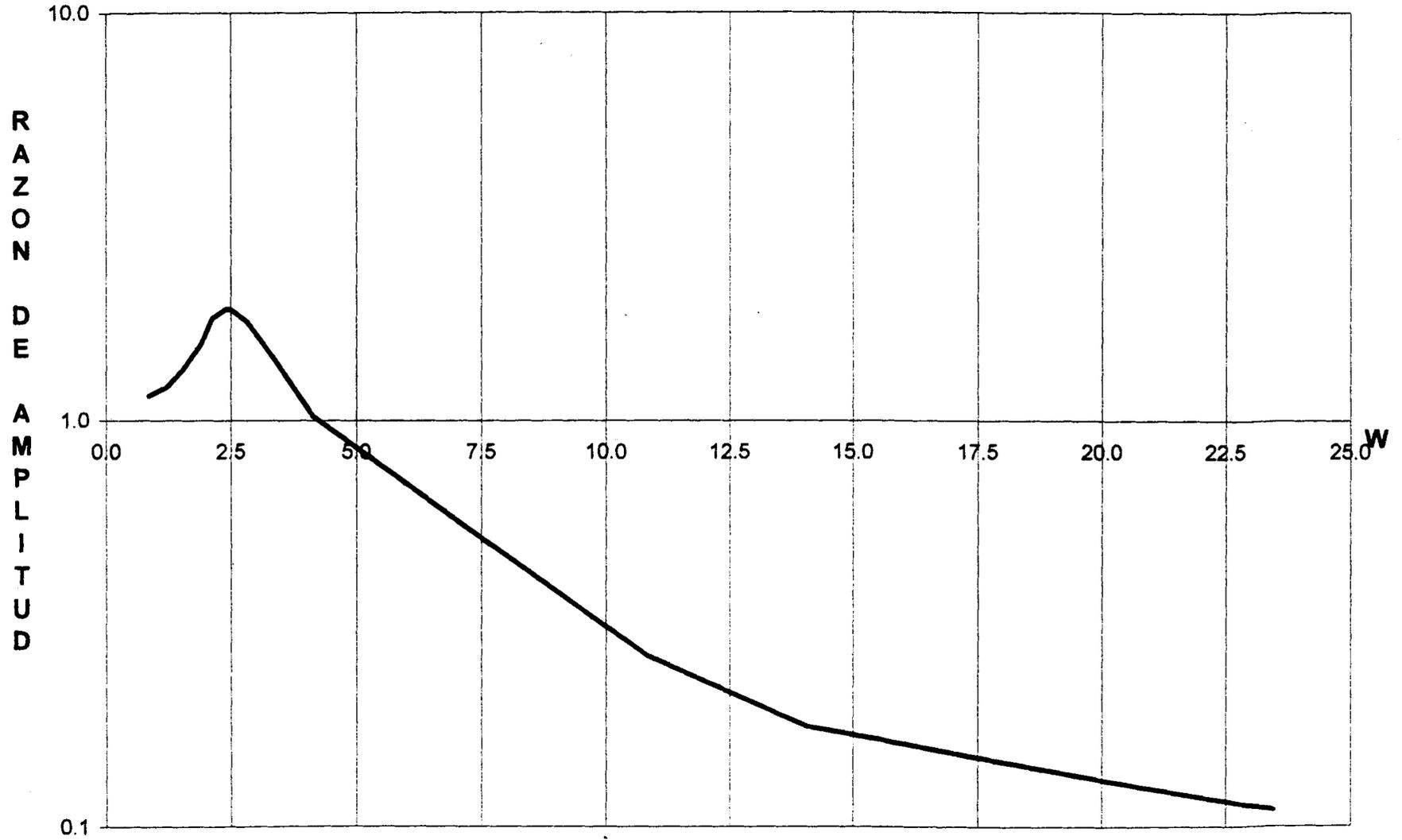


DIAGRAMA DE RESPUESTA A LA FRECUENCIA SEMILOG



1. Introduction

1.1. Overview

1.2. Scope

1.3. Objectives

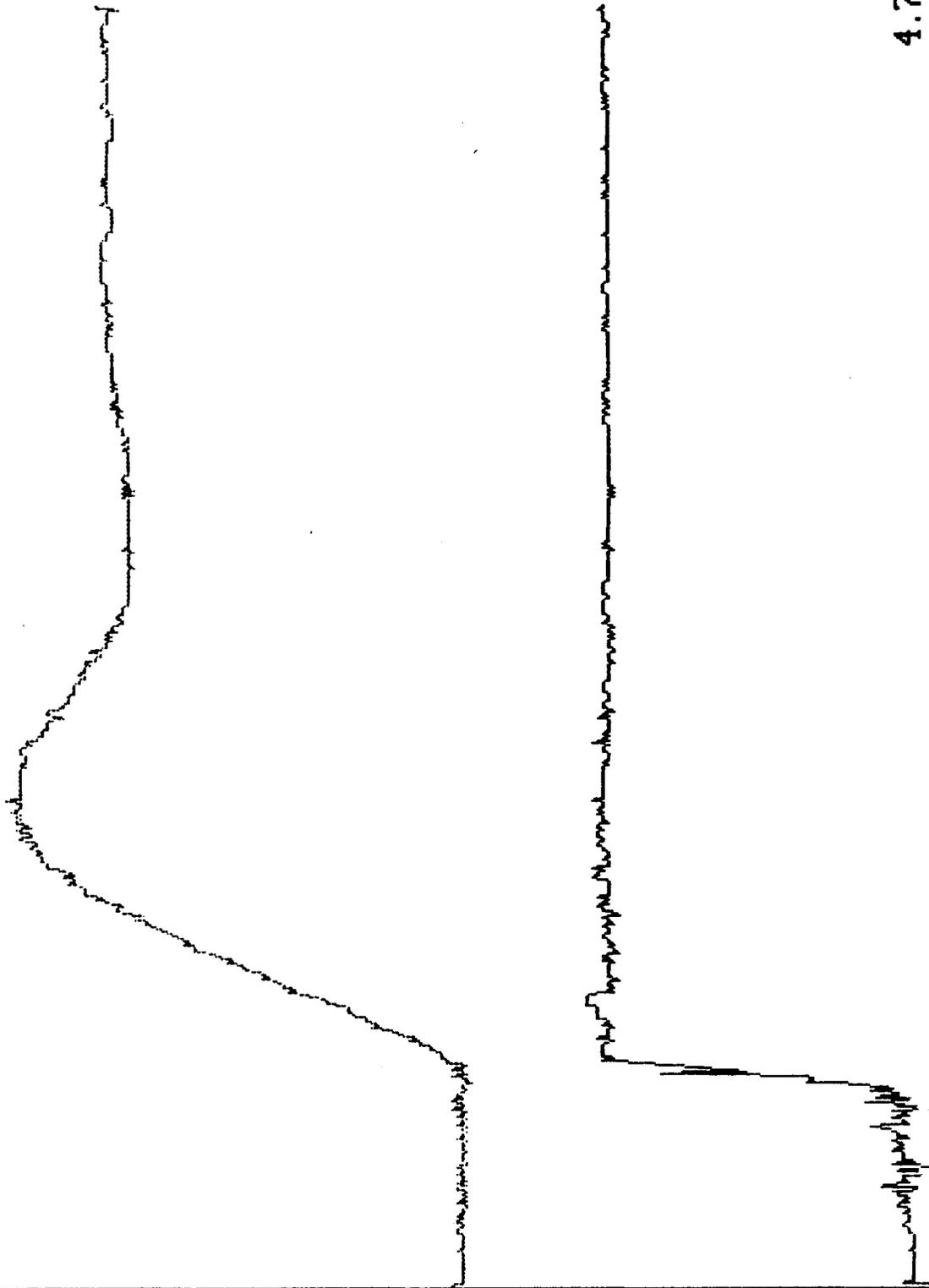
1.4.

1.5.

1.6.

1.7.

Fig. E1. Gráfico de 3° orden a una entrada escalón, obtenido por medio de la tarjeta electrónica.



Press any key to continue

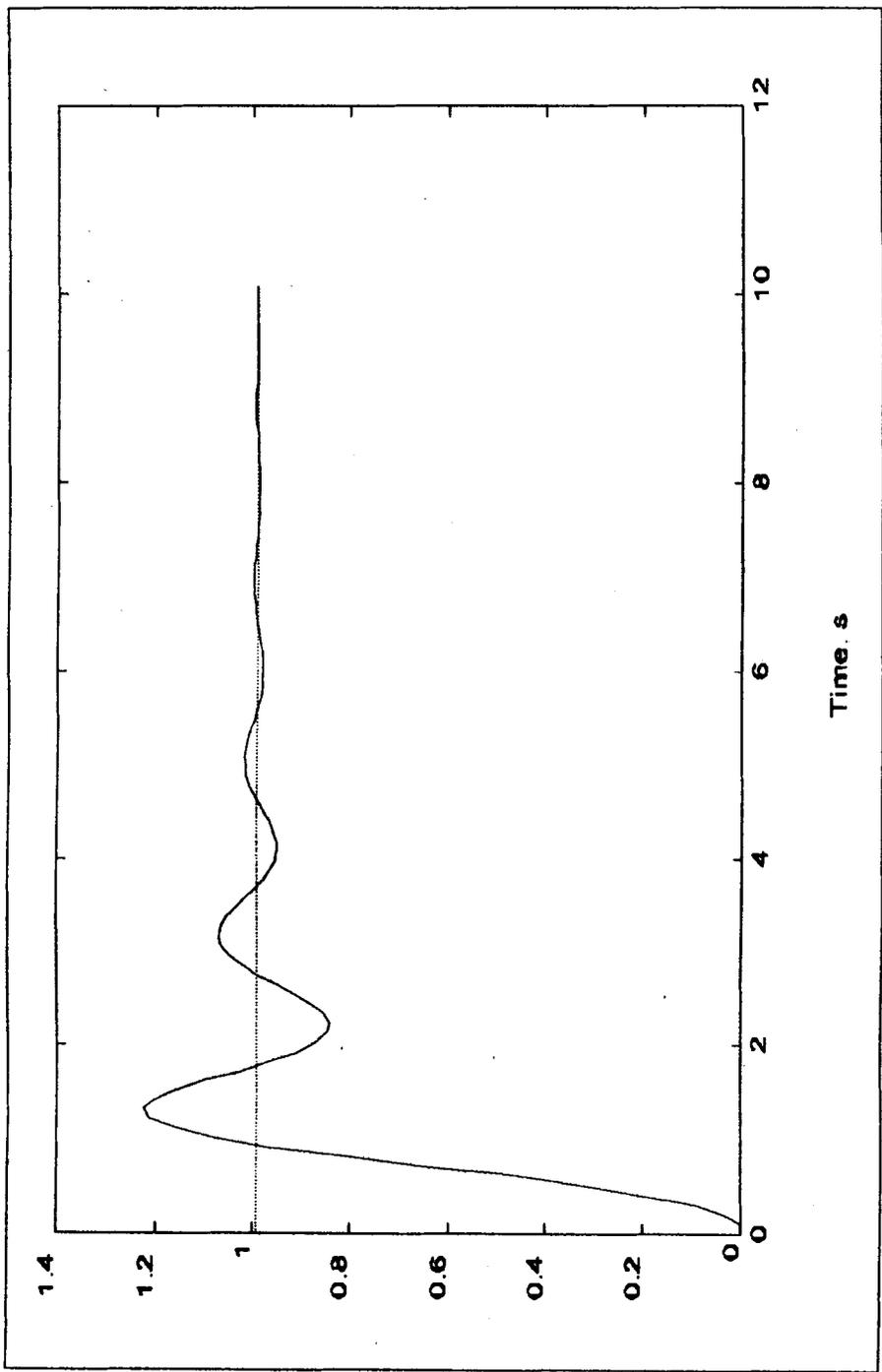


Fig. E2. Gráfico de 3° orden a una entrada escalón simulada en MATLAB a partir de la función de transferencia encontrada.

BIBLIOGRAFÍA

- 1. FEEDBACK INSTRUMENTS LIMITED, Control Teaching Mechanism Type PCM 140, Editorial FI Ltd, Crowborough, England, 1980.**
 - 2. SMITH CORRIPIO, Control Automático de Procesos, Editorial Limusa Noriega Editores, México, 1995.**
 - 3. OGATA KATSUHIKO, Ingeniería de Control Moderna, Editorial Prentice Hall, México, 1986**
 - 4. ROSALES RODMAN, Tesis de grado, Facultad Ingeniería Mecánica, 1988**
 - 5. LOAYZA FRANCIS, Tesis de grado, Facultad Ingeniería Mecánica, 1997**
-