

023,8043  
Us84 Tesis.  
658

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN  
REGULADOR ELECTRO-HIDRAULICO  
DE VELOCIDAD PARA UNA MINI  
TURBINA PELTON CON APLICACION  
AL LABORATORIO

DANILO USBECK W.

PATRICIO FLOR A.

Ingeniería Eléctrica

MAURICIO GONZALEZ O.

Ingeniería Mecánica

TESIS PREVIA A LA OBTENCION  
DEL TITULO DE INGENIERO EN LA ESPECIALIZACION  
DE INGENIERIA ELECTRONICA E INGENIERIA MECANICA  
DE LA ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Marzo - 1986.



CERTIFICAMOS QUE BAJO NUESTRA DIRECCION  
LA PRESENTE TESIS FUE REALIZADA EN SU  
TOTALIDAD POR LOS SEÑORES PATRICIO FLOR  
DANILO USBECK Y MAURICIO GONZALEZ.



---

ING. LUIS BARAJAS.


COORDINADOR POR INGENIERIA  
ELECTRICA



---

ING. CESAR VITERI.

COORDINADOR POR INGENIERIA  
MECANICA



ING. ROBERTO BAHAMONDE.  
COLABORADOR

## DEDICATORIA:

- A todos aquellos que creyeron que podía realizarse un trabajo conjunto por primera vez y nos apoyaron.
- A quienes tengan el interés suficiente para leer, entender y aprovechar este trabajo.
- A nuestras familias, que con increíble paciencia nos apoyaron y supieron esperar la culminación del trabajo, y hoy sentirán la satisfacción que nosotros también sentimos.

PATRICIO FLOR A.

MAURICIO GONZALEZ O.

DANILO USBECK W.

## AGRADECIMIENTO:

- A los ingenieros: Cesar Viteri y Luis Barajas, por su tiempo dedicado a la dirección; y al Sr. Ing. Roberto Bahamonde por su colaboración.
  
- A nuestro amigo y compañero Sr. Juan Velasco por su valiosísima ayuda, y colaboración.
  
- Por la generosa y desinteresada ayuda, para la realización de la presente tesis también agradecemos a:
  - Sra. Susana Usbeck.
  
  - Ing. Fernando Flores C.
  
  - Ing. Xavier Salvador.
  
  - Sr. Alvaro Villamar.
  
- Y a todas aquellas personas que directa o indirectamente han colaborado para la realización de la presente tesis.
  
- Un agradecimiento muy especial a las Instituciones: INECEL, por la ayuda económica brindada, y al Instituto Nacional de Energía (INE), sin cuya ayuda económica no habría sido posible la culminación del trabajo.



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN  
REGULADOR ELECTRO-HIDRAULICO  
DE VELOCIDAD PARA UNA MINI  
TURBINA PELTON CON APLICACION  
AL LABORATORIO

TESIS DE GRADO

PATRICIO FLOR A.

MAURICIO GONZALEZ O.

DANILO USBECK W.

Quito, Marzo de 1986.

# INDICE

## INTRODUCCION

### PRIMERA PARTE.

#### CAPITULO I

##### LAZO DEL CONTROL DEL SISTEMA

I.A.-	Descripción General.....	001
I.B.-	Requerimientos Básicos.....	005

#### CAPITULO II

##### DETERMINACION DEL MODELO MATEMATICO DE LA TURBINA

II.A.-	Introducción.....	007
II.B.-	Determinación de las Ecuaciones Fundamentales del Sistema Hidráulico.....	011
II.B.1.-	Ecuaciones del Sistema Hidráulico.....	011
II.B.1.1.-	Desarrollo de las Ecuaciones Hidráulicas Alrededor del Punto de Funcionamiento Nominal.....	014
II.B.2.-	Funciones de Transferencia para Centrales de Pequeña Potencia.....	024
II.B.2.1.-	No existe Tunel de Aducción ni Tanque de Equilibrio.....	024
II.B.2.2.-	Aproximaciones sobre el rango de Control...	026
II.B.2.3.-	Deducción de la Función de Transferencia de la Turbina.....	027
II.B.4.-	Determinación de las Constantes de la Turbina Pelton de Laboratorio.....	030
II.C.-	Cálculo de $T_m$ y $T_w$ .....	051
II.C.1.-	Análisis del Sistema Turbina Inercia Generador.....	051
II.C.2.-	Deducción de la Función de Transferencia de la Inercia (I) del Sistema Turbina-Inercia.....	054
II.C.2.1.-	Estimación Experimental de $T_m$ en la Turbina de Laboratorio.....	060
II.C.3.-	Deducción del Tiempo de Arranque del Agua ( $T_w$ ).....	064
II.C.3.1.-	Cálculo de $T_w$ en la Tubería de Laboratorio.....	066

### CAPITULO III

#### ESTUDIO DE LAS ECUACIONES DE LA TURBINA Y EVALUCION DE RESULTADOS

III.A.-	Introducción.....	068
III.B.-	Simulación de la Respuesta a una Entrada Escalón Unitario en la Posición del Inyector de la Turbina.....	069
III.B.1.-	Ecuación General.....	071
III.B.2.-	Ecuación con Primera Aproximación.....	077
III.B.3.-	Ecuación Ideal.....	083
III.B.4.-	Ecuación de la Turbina de Laboratorio.....	085
III.C.-	Tendencia General de la Respuesta de la Turbina.....	090
III.D.-	Efecto de los Parámetros $T_m$ y $T_w$ .....	091
III.D.1.-	Efecto de $T_m$ Sobre la Respuesta de la Turbina.....	091
III.D.2.-	Efecto de $T_w$ Sobre la Respuesta de la Turbina.....	092
III.E.-	Efecto de $a_{23}$ Sobre la Respuesta de la Turbina.....	094
III.F.-	Utilización de la Ecuación de la Turbina Para el Desarrollo del Lazo de Control.....	095
III.G.-	Conclusiones.....	097

### CAPITULO IV

#### ANALISIS DEL SISTEMA OLEOMECANICO REALIMENTADO

IV.A.-	Justificación y requerimientos.....	098
IV.B.-	Descripción funcional.....	099
IV.C.-	Ecuación de Transferencia del Circuito Hidráulico.....	100
IV.C.1.-	Válvula de Distribución .....	100
IV.C.2.-	Cilindro y Pistón.....	102
IV.C.3.-	Varilla de Realimentación.....	102
IV.D.-	Cálculo de las Constantes del Sistema.....	106
IV.D.1.-	Determinación Experimental de $C_3$ .....	107
IV.D.2.-	Selección de $K_R$ y $\tau_g$ .....	109
IV.E.-	Conclusiones.....	111

## CAPITULO V

### ANALISIS DEL SERVOMOTOR AUXILIAR DE POSICION

V.A. -	Introducción.....	112
V.A.1. -	Motor de Magneto Permanente.....	112
V.B. -	Obtención de la Función de Transferencia del Servomotor Eléctrico de Posición.....	113
V.B.1. -	Análisis del Sistema de Transmisión de Giro a Desplazamiento.....	116
V.B.1.1. -	Descripción del Sistema Tuerca Tornillo....	116
V.B.1.2. -	Función de Transferencia del Sistema Tuerca Tornillo.....	117
V.C. -	Análisis de la Inercia Efectiva Actuante...	120
V.D. -	Características Requeridas por el Motor CC.....	125
V.D.1. -	Fuerza máxima Aplicada Sobre el Tornillo...	125
V.D.2. -	Torque Mínimo Necesario para Iniciar el Movimiento.....	126
V.D.3. -	Constantes del Servomotor Eléctrico.....	127

## CAPITULO VI

### SENSOR DE VELOCIDADES

VI.A. -	Descripción y Justificación.....	129
VI.A.1. -	Introducción.....	129
VI.A.2. -	Transductor Analógico de Velocidades.....	129
VI.A.3. -	Transductor a Pulsos Eléctricos.....	131
VI.B. -	Convertidor Frecuencia/Voltaje.....	133
VI.B.1. -	Descripción General.....	133
VI.B.2. -	Teoría de Operación.....	134
VI.B.3. -	Selección de R1 y C1.....	136
VI.B.4. -	Voltaje de Rizado y Frecuencia Máxima de Operación.....	137
VI.C. -	Desarrollo y Configuración de Componentes..	138
VI.C.1. -	Datos.....	139
VI.C.2. -	Cálculos.....	140
VI.C.2.1. -	Circuito de Voltaje de Polarización.....	140
VI.C.2.2. -	Sistema Fotosensor.....	142
VI.C.2.3. -	Sistema de Interrupción del Haz de Luz....	147
VI.C.3. -	Características de Funcionamiento.....	149

## CAPITULO VII

### EL CONTROL ELECTRONICO

VII.A.-	Introducción.....	151
VII.B.-	Modalidades de Control.....	153
VII.B.1.-	Tipos de Control.....	155
VII.C.-	Amplificadores Operacionales.....	169
VII.C.1.-	El Amplificador Operacional Básico.....	169
VII.C.2.-	Características de los Amplificadores Operacionales.....	170
VII.C.3.-	Especificaciones de Rendimiento del OP. AMP uA741.....	172
VII.C.4.-	Amplificadores con Realimentación.....	173
VII.D.-	Controladores Electrónicos Analógicos.....	177
VII.E.-	Justificación Desarrollo y Configuración de la Modalidad de Control.....	183
VII.E.1.-	Justificación.....	183
VII.E.2.-	Desarrollo.....	185
VII.E.2.2.-	Diagrama de Bloques y Descripción General.....	188
VII.E.3.-	Configuración.....	193
VII.E.3.1.-	Velocidad de Referencia.....	193
VII.E.3.2.-	Velocidad de la Turbina.....	194
VII.E.3.3.-	Señal de Error.....	194
VII.E.3.4.-	Señal de Sigma.....	195
VII.E.3.5.-	Modalidad Proporcional.....	197
VII.E.3.6.-	Modalidad Integral.....	198
VII.E.3.7.-	Modalidad Derivativa.....	201
VII.E.3.8.-	Circuito de Inicialización.....	203
VII.E.3.9.-	Señal de Control Manual.....	204
VII.E.3.10.-	Señal de Control Automático.....	205
VII.E.3.11.-	Amplificador de Potencia.....	206
VII.E.3.12.-	Servomotor.....	208
VII.E.3.13.-	Señal de Posición.....	209
VII.E.3.14.-	Circuito de Seguridad.....	209

## CAPITULO VIII

### LAZO GENERAL DE CONTROL

VIII.A.-	Introducción.....	212
VIII.B.-	Simplificación del Lazo de Control.....	213
VIII.B.1.-	Caída de Velocidad Transiente Sigma.....	213
VIII.B.1.1.-	Punto de Toma de la Señal Sigma.....	217
VIII.B.1.2.-	Entrada de la Señal Sigma.....	218
VIII.B.2.-	Lazo General de Control Con Realimentación Sigma Exterior.....	218
VIII.B.3.-	Lazo General de Control Con Realimentación Sigma Interior.....	227
VIII.B.4.-	Funciones de Transferencia $n/m_p$ .....	233
VIII.B.4.1.-	Funciones de Transferencia $n/m_p$ con la Ecuación Ideal de la Turbina.....	233
VIII.B.4.2.-	Funciones de Transferencia $n/m_p$ con la Ecuación de la Turbina de Laboratorio.....	234
VIII.C.-	Efecto de la Ubicación de la Entrada Sigma.....	235
VIII.C.1.-	Determinación del Valor de Sigma (p.u.)....	236
VIII.C.1.1.-	Estimación del Valor de Polarización del Potenciómetro de Sigma para la modalidad Sigma Exterior.....	236
VIII.C.1.2.-	Cálculo del Voltaje de Polarización de Sigma para la Modalidad Sigma Interior.....	238
VIII.C.1.3.-	Valor de Sigma en Por Unidad (p.u.).....	240
VIII.C.2.-	Efecto de la Realimentación Sigma.....	241
VIII.C.2.1.-	Estabilidad del Lazo de Control con Sigma Interior.....	242
VIII.C.2.2.-	Estabilidad del Lazo de Control con Sigma Exterior.....	244
VIII.C.2.3.-	Estabilidad del Lazo de Control con Sigma Cero.....	246
VIII.D.-	Selección de los valores de Control y de la Modalidad Sigma.....	248
VIII.E.-	Conclusiones.....	261

## SEGUNDA PARTE

### CONSTRUCCION

#### CAPITULO IX

##### DISEÑO, CONSTRUCCION Y MONTAJE DE ELEMENTOS MECANICOS

IX.A.-	Introducción.....	262
IX.B.-	Varilla de Realimentación del Sistema Oleomecánico.....	263
IX.C.-	Sistema Tornillo-Tuerca.....	264
IX.D.-	Bastidor del Motor Eléctrico.....	266
IX.E.-	Bastidor del Sistema Sensor de Velocidad...	266
IX.F.-	Construcciones Auxiliares.....	267

#### CAPITULO X

##### DISEÑO, CONSTRUCCION Y MONTAJE DE CIRCUITOS ELECTRICOS

X.A.-	Controlador.....	269
X.B.-	Caída de Velocidad Transiente Sigma.....	275
X.C.-	Sensor de Velocidad.....	276
X.D.-	Tablero de Control.....	278
X.D.1.-	Fuente de Poder.....	278
X.D.2.-	Circuito del Display.....	281
X.D.3.-	Realimentación de Posición.....	284
X.D.4.-	Sistema de Seguridad.....	284
X.D.5.-	Circuito de Formación del Valor de los Parámetros de Control Kp, Ki, y Kd para Macro y Micro Conexión.....	285
X.D.6.-	Distribución de Placas y Elementos Externos.....	287

TERCERA PARTE.

EVALUACION

CAPITULO XI

PRUEBAS Y COMPARACION CON LA SIMULACION

XI.A.-	Introducción.....	292
XI.A.1.-	Pruebas de Respuesta en Tiempo del Lazo de Control.....	292
XI.B.-	Calibración.....	295
XI.C.-	Pruebas.....	295
XI.C.1.-	Presentación de Resultados Obtenidos en las Pruebas y su Simulación Correspondiente....	296

CAPITULO XII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

XII.A.-	Conclusiones.....	321
XII.B.-	Recomendaciones.....	325



## APENDICES Y ANEXOS

### APENDICE A

#### PROGRAMA RESPUESTA DE UN SISTEMA LINEAL

A. 1.-	Método en Computador Digital.....	327
A. 2.-	Programa para Obtener la Respuesta a Escalón de Funciones de Transferencia de Sistemas Lineales: (FLMENU).....	328
A. 3.-	Descripción de las Teclas.....	330
A. 4.-	Concentración de Puntos.....	333
A. 5.-	Trazador de Curvas.....	335
A. 6.-	Ejemplo Demostrativo.....	339
A. 7.-	Lista de Variables.....	348
A. 8.-	Diagrama de Flujo para la Transformación Inversa de LAPLACE.....	349
A. 8.1.-	Diagrama de Flujo Subrutina MATRIZC.....	354
A. 8.2.-	Diagrama de Flujo Subrutina MULTSINT.....	354
A. 8.3.-	Diagrama de Flujo Subrutina DIVSINT.....	355
A. 9.-	Listado del Programa.....	357

### APENDICE B

B. 1.-	Obtención del Operador F1.....	397
B. 2.-	Obtención del Operador F3.....	398
B. 3.-	Obtención del Operador G.....	398
B. 4.-	Obtención del Operador F1 Modificado.....	399
B. 5.-	Obtención del Operador G por Medio de la Primera Aproximación.....	400
B. 6.-	Obtención de F1 Modificado por la Teoría de Columna Rígida.....	400
B. 7.-	Obtención de la Función de Transferencia $n1/z1$ (en por unidad).....	400
B. 8.-	Obtención de la Función de Transferencia Total (sin aproximaciones).....	401
B. 9.-	Ecuaciones Hidráulicas Básicas.....	403
B. 10.-	Deducción de la Ecuación Modificada para el Golpe de Ariete.....	408
B. 11.-	Ecuaciones de Flujo para Tubos Uniformes con Fricción Despreciable.....	411
B. 12.-	Descripción del Golpe de Ariete.....	412
B. 13.-	Determinación de la Velocidad del Golpe de Ariete.....	416
B. 14.-	Desarrollo de las Ecuaciones de F1 Modificado para Macro Centrales.....	419

## APENDICE C

### CONSTANTES DEL SERVO MOTOR ELECTRICO REALIMENTADO

C. 1.-	Determinación de Km.....	421
C. 2.-	Determinación de $\beta$ .....	422
C. 3.-	Determinación de J.....	423
C. 4.-	Determinación de K.....	424
C. 5.-	Cálculo de $r_1$ y $r_0$ .....	425

## APENDICE D

### CALIBRACION Y OPERACION

D. 1.-	Inicialización.....	426
D. 2.-	Verificación de Conexiones.....	426
D. 3.-	Activación del Sistema.....	426
D. 4.-	Ajuste y Calibración.....	427
D. 5.-	Modos de Operación.....	428
D. 6.-	Desactivación del Sistema.....	428
D. 7.-	Reposición del Sistema de Seguridad.....	428
D. 8.-	Ajuste de Offset.....	429

## APENDICE E

Fotografías del Sistema.....	430
------------------------------	-----

<u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	439
---------------------------	-----

## ANEXO 1

Hojas de Datos de Elementos Utilizados

## ANEXO 2

Planos del Regulador Electro-Hidráulico

## INTRODUCCION

La generación de energía eléctrica ha sido considerada comúnmente como símbolo de progreso. Donde existe energía es posible el desarrollo, más aún si es eléctrica, pues es fácil aprovecharla, y en el lugar de consumo no produce residuos ni desperdicios.

Desde hace años existen dos formas básicas de generación eléctrica: la primera es la generación térmica y la segunda es la hidráulica. La ventaja de la segunda es principalmente la de ser más barata que la primera, puesto que utiliza fuentes prácticamente inagotables como son las corrientes de los ríos para producir la energía necesaria.

La idea es aprovechar la energía mecánica que se produce en el salto (caída) de un flujo de agua (caudal), la cual es transformada, por medio de turbinas y generadores, en energía eléctrica.

Utilizando ambas formas de generación, el mantener la frecuencia generada, que en Ecuador es normalizada a 60 Hz, es un problema de Control Automático, puesto que la misma depende directamente de la velocidad del sistema turbina-generador, y su rango de fluctuación debe ser controlado con precisión.

El presente trabajo concluirá en la construcción de un Regulador Eléctro-Hidráulico de Velocidad para una Mini Turbina Pelton con aplicación al Laboratorio. Y su óptimo funcionamiento dependerá del desarrollo de la teoría del lazo de control de velocidad, con la respectiva comprobación práctica.

La teoría y el prototipo construido son entonces aplicables no solo a turbinas de laboratorio, sino que podrán ser utilizados en la regulación de la velocidad de pequeñas turbinas de Mini ó Micro Centrales de Generación Eléctrica; siempre que cumplan con los requerimientos que se especifican para el desarrollo y construcción de dicho lazo.

Este trabajo constituye uno de los proyectos realizados por la Escuela Politécnica Nacional, en lo referente al desarrollo de teorías para la construcción de Mini Centrales de Generación Eléctrica. Puesto que existen pueblos en los que la generación local es la alternativa, dado el alto costo que implicaría llegar a ellos con el Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.), algunos de los trabajos han sido auspiciados por instituciones como son el Instituto Nacional de Energía (INE), y el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL).

# CAPITULO I

## LAZO DE CONTROL DEL SISTEMA

La realización del trabajo necesitó de la utilización de elementos que van a constituir el lazo de control, y que deben ser dispuestos de tal manera que formen un sistema capaz de realizar las acciones necesarias para mantener la velocidad de la turbina alrededor de un punto de referencia.

El estudio y desarrollo del sistema se lo hará en base a los análisis matemáticos que describan cada subsistema en particular.

### I.A.- DESCRIPCION GENERAL.

La disposición funcional de cada subsistema en el lazo de control es:

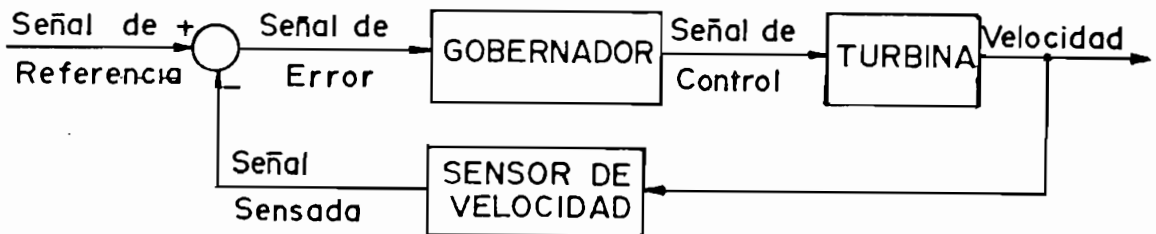


Figura 1.1

## TURBINA.-

Máquina hidráulica encargada de transformar la energía del fluido hidráulico (agua), en movimiento. Su velocidad debe ser constante, razón por la cual éste constituye el subsistema sobre el cual se ejercerán las acciones de control.

La construcción del regulador se realizará sobre la turbina Pelton del laboratorio, la cual se muestra en la figura # 1.2, en la que se indican los siguientes elementos:

- 1.- Bomba Centrífuga
- 2.- Válvula de control de caudal ( $\theta_B$ )
- 3.- Inyector
- 4.- Manómetro
- 5.- Dinamómetros
- 6.- Rodete Pelton
- 7.- Tacómetro
- 8.- Inercia del rodete
- 9.- Vertedero triangular
- 10.- Indicador de nivel de regleta

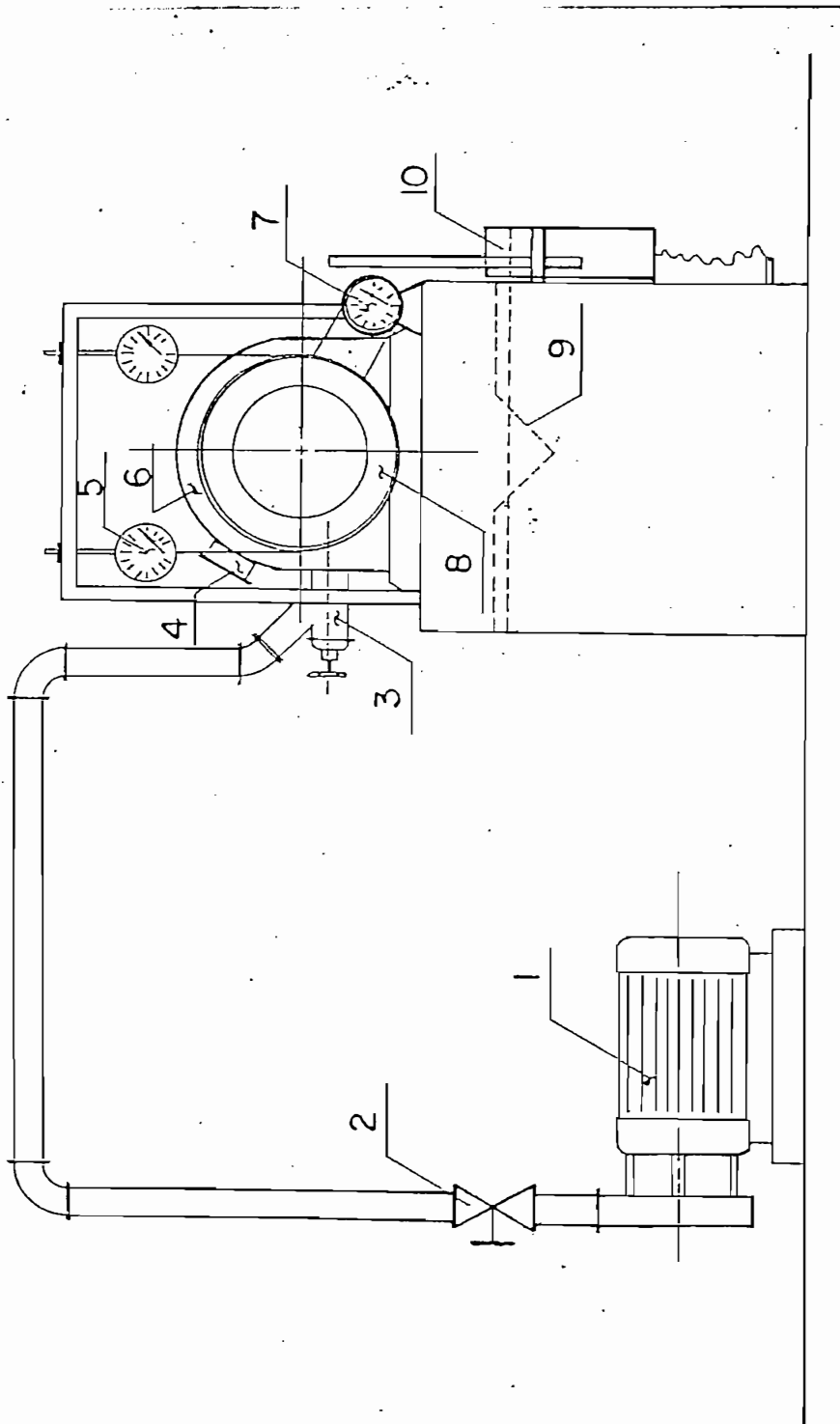


FIGURA 1.2

#### SENSOR DE VELOCIDADES.-

Instrumento de medición capaz de transformar la velocidad que se produce en la turbina en una señal de medida (voltaje) proporcional a dicha velocidad. Esta muestra de velocidad será la controlada por el regulador.

#### CONTROLADOR DEL LAZO.-

Este dispositivo es el cerebro del lazo, y es aquel que emite la señal de control (voltaje de control). Actúan sobre él dos entradas que son:

- 1.- El voltaje proporcional producido por la velocidad de la turbina, éste no es más que la señal de salida del sensor de velocidades.
- 2.- Un voltaje proporcional a la velocidad de referencia, a la cual siempre deberá girar la turbina.

El controlador resta las dos señales de entrada, y la desviación producida es procesada mediante la modalidad del controlador (proporcional, integral, derivativa o la combinación de ellas), para dar la señal definitiva de control que actúa sobre los elementos posicionadores del inyector.

#### SISTEMA POSICIONADOR AUXILIAR.-

Dispositivo que constituye el enlace entre el sistema mecánico principal de posición, y el



controlador electrónico. Su señal de entrada es el voltaje producido por el controlador del lazo (voltaje de control). Esta señal es amplificada y transformada en movimiento mecánico (el dispositivo está constituido por un servo motor eléctrico de posición).

#### SISTEMA POSICIONADOR PRINCIPAL.-

Dispositivo mecánico de posición del inyector constituido por:

Bomba de suministro de aceite

Una válvula distribuidora

Un cilindro de desplazamiento

Un tanque de almacenamiento del fluido de trabajo (aceite).

Constituye el último mecanismo posicionador, su entrada es la señal de salida del posicionador auxiliar, y su señal de salida es el desplazamiento del eje del cilindro, éste es solidario al inyector de la turbina. De esta manera se obtiene la óptima posición del inyector para mantener constante la velocidad de la turbina.

#### I.B.- REQUERIMIENTOS BASICOS.

Las condiciones de carga y descarga que se ejecutan sobre las turbinas, debido a una demanda o rechazo de carga

sobre el generador, hacen que el lazo de control deba ser cuidadosamente calibrado, sobre todo para mini o micro generación, pues las cargas o descargas son bruscas y grandes (50% de la capacidad de torque de la turbina generalmente). Esto se debe a que las potencias disponibles en los mini generadores tampoco son grandes (se miden en Kw apenas), pero la demanda puede ser alta en algún momento, por esta razón se puede llegar a sobrecargar a la turbina, y ésta al frenarse puede dejar de girar a la velocidad necesaria para no exceder los límites de frecuencia ( $60 \text{ Hz} \pm 4\%$ ).

La finalidad del regulador es no permitir que los límites de frecuencia (62 o 58 Hz) sean sobrepasados.

Pensando en esta posibilidad, se ha desarrollado un prototipo de regulador que pueda satisfacer estos requerimientos con precisión. Ha sido necesaria la implementación de cierta clase de controles de ganancia, así como de realimentaciones entre los elementos que componen el sistema, para poder calibrar de forma más fácil y sencilla el sistema regulado. Así se consigue que el regulador se adapte a las condiciones que generalmente se presentan en las mini turbinas de generación. Esto ha hecho que el trabajo concluya en la construcción de un banco de regulación, que podría ser implementado en cualquier mini turbina, no solo de laboratorio, sino de generación, siempre que cumpla con las especificaciones de los puntos de funcionamiento, para los cuales han sido desarrollados el lazo de control y el prototipo.

## CAPITULO II

### DETERMINACION DEL MODELO MATEMATICO DE LA TURBINA

#### II.A.- INTRODUCCION

Para el diseño de un regulador de velocidades y su posterior implementación se requiere definir el sistema sobre el cual se efectuará el control. Entonces se define como sistema hidráulico al conjunto de elementos formado por: tubería de presión o "penstock", tunel de aducción, reservorio, chimenea de equilibrio, turbina, y tubo de descarga. Al conjunto formado por las tuberías y chimenea de equilibrio se le denominará circuito hidráulico. El elemento controlado va a ser la turbina la cual es dependiente del circuito hidráulico. )

En la figura # 2.1) se presesenta la disposición de cada uno de estos elementos, los cuales pueden ser descritos por medio de una adecuada modelación matemática. En efecto la determinación de este modelo, a llevado a la obtención de tres ecuaciones comúnmente usadas en simulación y sistemas de control. Mediante estas ecuaciones se puede visualizar el funcionamiento del sistema hidráulico.)

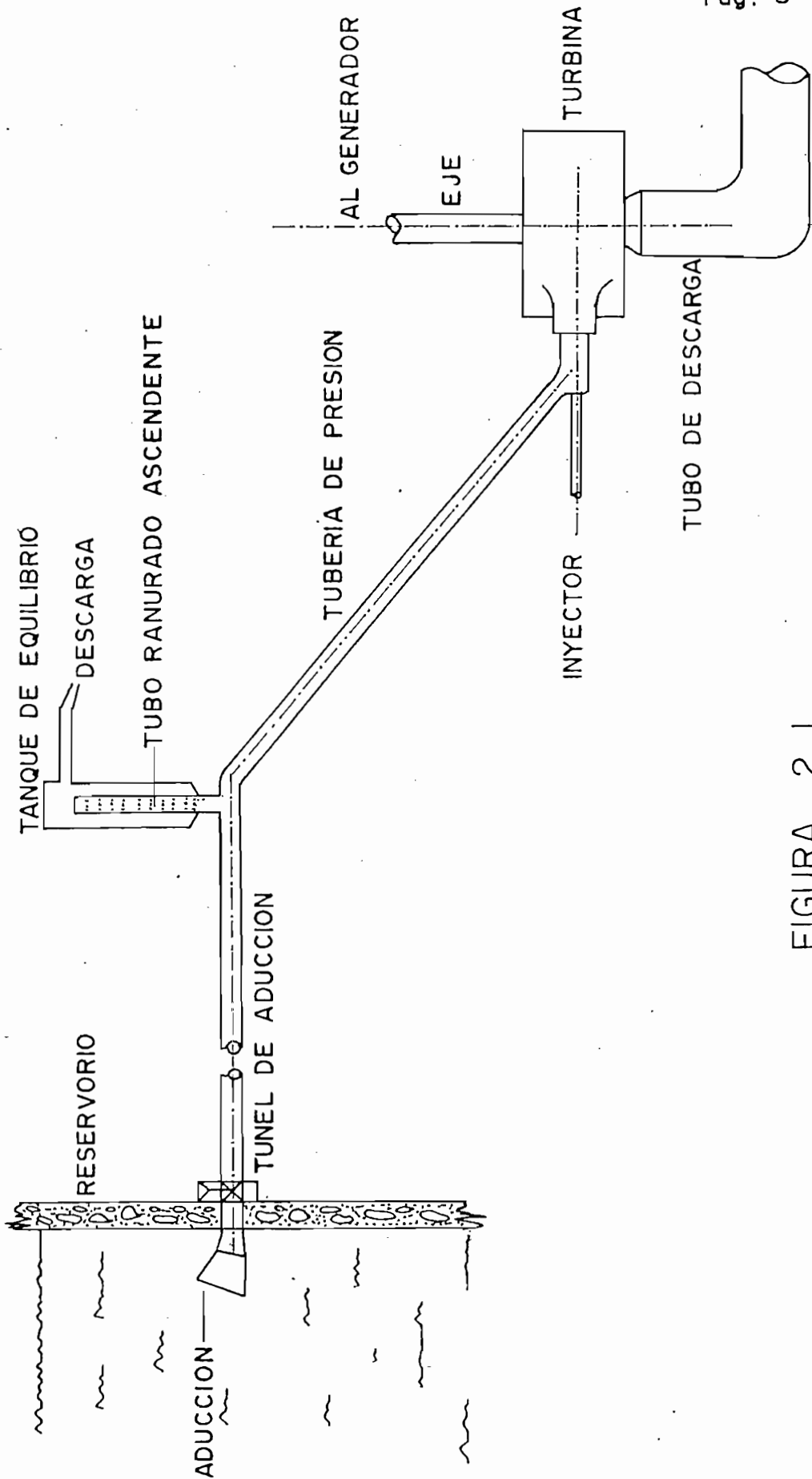


FIGURA . 2.1

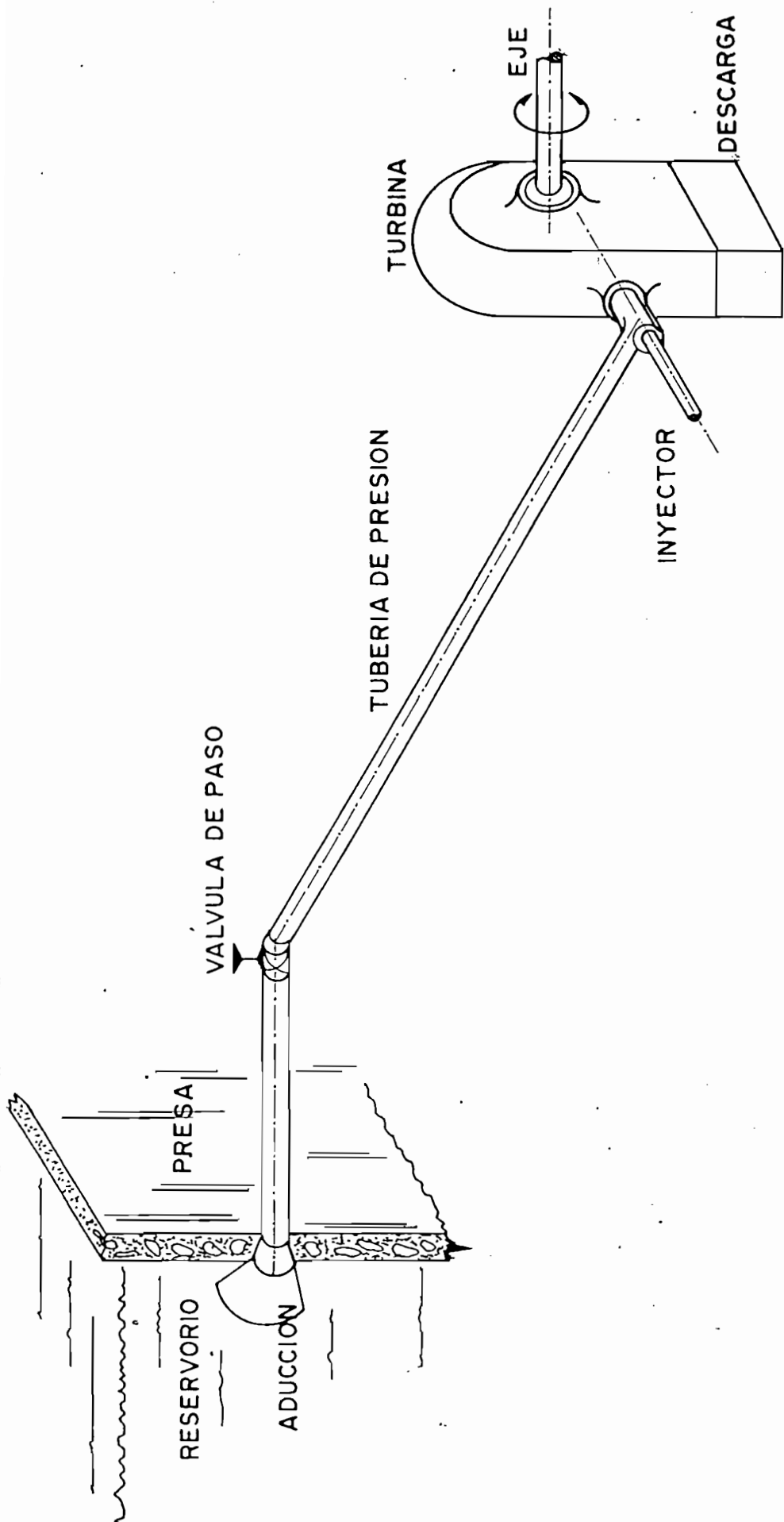


FIGURA. 2.2

En el presente capítulo, con el fin de llegar a desarrollar el modelo matemático del sistema hidráulico, se ha partido de un sistema general, el cual puede considerarse típico de centrales hidro-eléctricas para macro generación. Pero en vista de que el objeto del presente estudio, es la modelación de un sistema para mini o micro generación, se han tomado en cuenta las condiciones que persisten bajo requerimientos de generación pequeños, que se traducen en el recorte del equipo del sistema hidráulico, que se conforma de reservorio, tubería de presión, y turbina, los cuales serán analizados a continuación.

En la figura # 2.2 se presenta el sistema hidráulico recortado, el cual llega a ser el típico de centrales de mini o micro generación.

También el capítulo contemplará la deducción de las fórmulas universales para utilizar en el cálculo del tiempo de arranque del agua ( $T_w$ ), y tiempo de arranque mecánico de la turbina ( $T_m$ ).

II.B.- DETERMINACION DE LAS ECUACIONES FUNDAMENTALES DEL SISTEMA HIDRAULICO

II.B.1.- ECUACIONES DEL SISTEMA HIDRAULICO.

Para el desarrollo del modelo matemático se partirá de un sistema hidráulico general donde se han incluido las variables más importantes de él, las cuales se muestran en la figura # 2.3.

Las variables incluidas en la figura # 2.3, y que se definen a continuación, representan desviaciones alrededor del estado estable, tomado como base, en por unidad (p.u.).

- $h_w =$  Variación de la cabeza en el reservorio (p.u)
- $h_r =$  Variación de la cabeza del tubo ascendente del tanque de equilibrio (p.u.).
- $h_t =$  Variación en la cabeza del tanque de equilibrio (p.u.).
- $h_1 =$  Variación de la cabeza de la turbina al final de la tubería de presión, antes del inyector (p.u.).
- $q_c =$  Variación de flujo del túnel de aducción junto a la entrada del tanque de equilibrio (p.u.).
- $q_r =$  Variación de flujo del tubo ascendente ranurado del tanque de equilibrio (p.u.).
- $q_t =$  Variación de flujo del tanque de equilibrio (p.u.).
- $q_{p1} =$  Variación de flujo a la entrada de la tubería de presión, al final del tanque (p.u.).

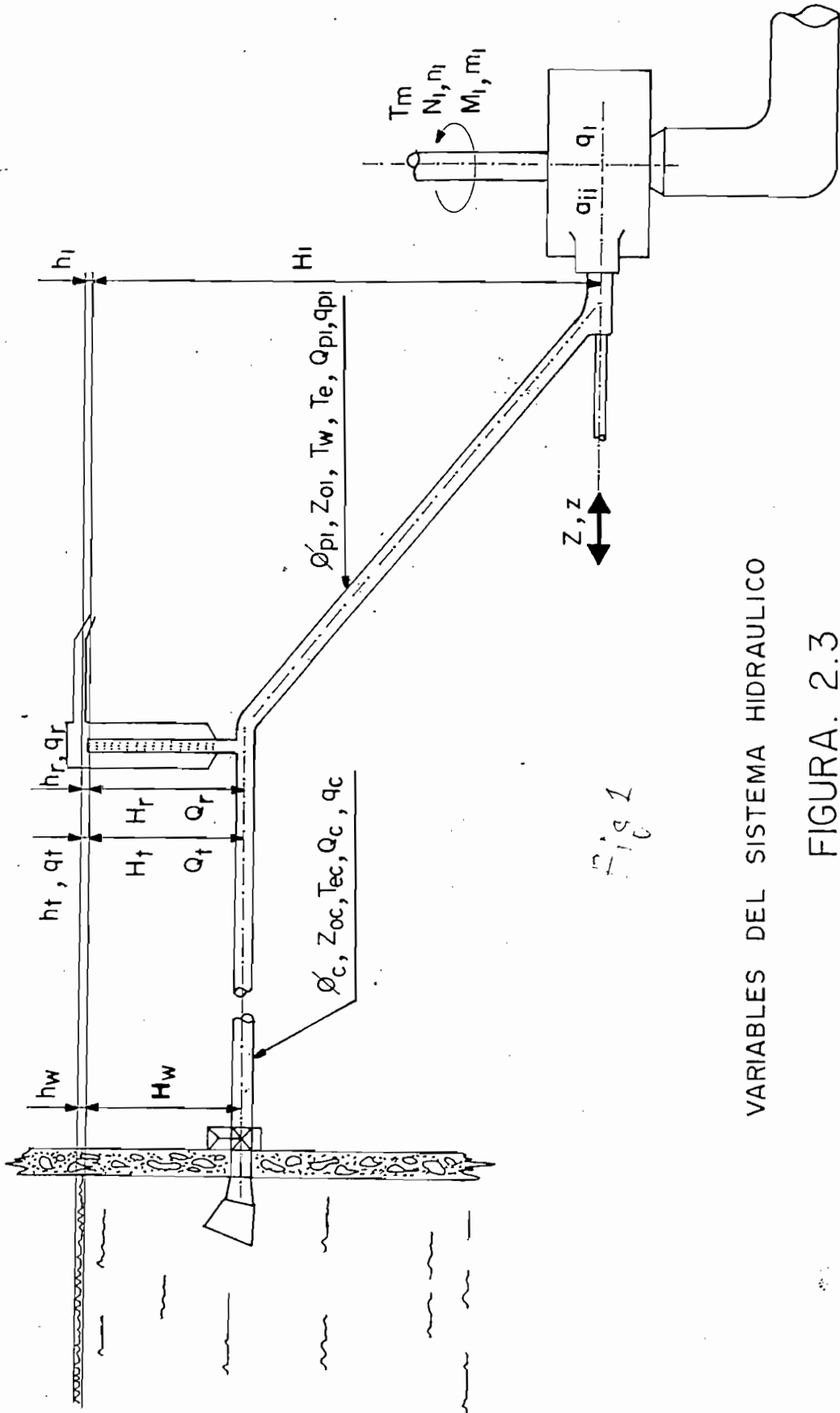


Fig 2

VARIABLES DEL SISTEMA HIDRAULICO

FIGURA. 2.3



$q_1 =$	Variación de flujo de la turbina (p.u.).
$m_1 =$	Variación del torque generado por la turbina (p.u.).
$n_1 =$	Variación en la velocidad de la turbina (p.u.).
$z_1 =$	Variación en la posición de la aguja inyectora (p.u.).
$\xi_c =$	Coefficiente de fricción para el túnel de aducción [rugosidad $\epsilon$ /diámetro $D_c$ ].
$\xi_{p1} =$	Coefficiente de fricción para la tubería de presión [rugosidad $\epsilon$ /diámetro $D_p$ ].
$Q_0 =$	Flujo base nominal en estado estable. ( $q$ en p.u. es la relación de flujo en cualquier punto dividida por $Q_0$ ).
$H_0 =$	Cabeza base nominal en estado estable. ( $h$ en p.u. es la cabeza en cualquier punto dividida por $H_0$ ).
$Z_0 =$	Impedancia genérica definida en el apéndice B.9.
$Z_{oc} =$	Impedancia del túnel.
$Z_{o1} =$	Impedancia de la tubería de presión.
$T_{ec} =$	Tiempo de elasticidad del túnel (apéndice B.12).
$T_t =$	Tiempo del tanque de equilibrio-tubo ascendente.
$T_m =$	Tiempo de arranque de la turbina.
$T_w =$	Tiempo de arranque del agua.
$T_e =$	Tiempo de elasticidad de la tubería de presión.
$a_{11} =$	Coefficiente derivativo parcial, de la relación entre el flujo de la turbina en p.u., con respecto a la cabeza de la turbina en p.u.
$a_{12} =$	Coefficiente derivativo parcial, de la relación entre el flujo de la turbina en p.u., con respecto a la velocidad de la turbina en p.u.

- $a_{13}$  = Coeficiente derivativo parcial, de la relación de flujo de la turbina en p.u., con respecto a la posición de la aguja inyectora en p.u.
- $a_{21}$  = Coeficiente derivativo parcial, torque de la turbina en p.u., con respecto a la cabeza de la turbina en p.u.
- $a_{22}$  = Coeficiente derivativo parcial, torque de la turbina en p.u., con respecto a la velocidad de la turbina en p.u.
- $a_{23}$  = Coeficiente derivativo parcial, torque de la turbina en p.u., con respecto a la posición de la aguja inyectora en p.u.
- $G$  =  $\frac{n_1}{z_1}$  función de transferencia relativa a  $n_1$  y  $z_1$ .
- $Z_c$  =  $\frac{Z_{oc}Q_o}{H_o}$  impedancia normalizada del túnel (en p.u.)
- $Z_{p1}$  =  $\frac{Z_{o1}Q_o}{H_o}$  impedancia normalizada del penstock (en p.u.)
- $D$  = Operador diferencial en el tiempo  $d/dt$ .

NOTA: Los coeficientes derivativos parciales  $a_{ij}$ , son evaluados alrededor del estado estable, lo más cerca del punto de operación nominal del sistema.

## II.B.1.1.- DESARROLLO DE LAS ECUACIONES HIDRAULICAS ALREDEDOR DEL PUNTO DE FUNCIONAMIENTO NOMINAL

El desarrollo de las ecuaciones se hace en base a las siguientes consideraciones:

- 1.- La figura # 2.4 muestra la disposición de elementos y

variables involucradas en el arreglo: reservorio, túnel de aducción, y tanque de equilibrio. Se ha considerado el tanque de equilibrio, el cual tiene instalado en forma concéntrica un tubo ranurado, conectado directamente con el túnel de aducción, debido a que es uno de los sistemas más usados en la actualidad para absorber, entre otras cosas, las fluctuaciones del golpe de ariete en la tubería de presión.

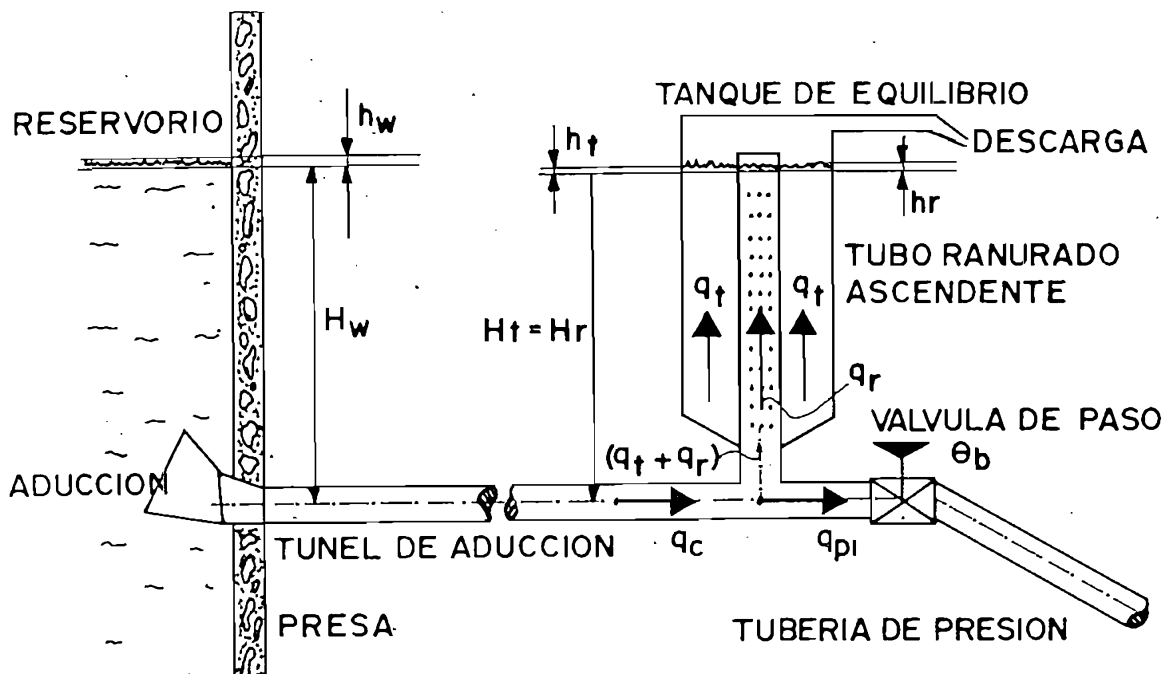


Figura # 2.4

2.- Considerando que, si los inyectores de las turbinas hidráulicas se hacen recorrer alternativamente, y a frecuencias lo suficientemente bajas, los niveles en el tubo ascendente no van a cambiar, para propósitos prácticos  $h_r = 0$ . Cuando el recorrido es a frecuencias altas, los niveles en el tanque de equilibrio  $h_t$ , y tubo de ascenso  $h_r$ , serán muy parecidos. (24).

3.- Además debido al efecto de vasos comunicantes, los niveles en el tanque de equilibrio y tubo de ascenso en estado estable son idénticos. Se puede apreciar que para todos los casos, los niveles de  $h_r$  y  $h_t$  serán iguales, como se indica en la figura # 2.4.

Entonces:

$$h_t = h_r \quad ( 2.4 )$$

4.- Si el reservorio es lo suficientemente grande, tal que pequeñas variaciones de consumo de caudal producidas en la turbina no alterarán el nivel original, como es el caso típico de cualquier hidro-central eléctrica. Entonces se tiene:

$$h_w = 0 \quad ( 2.5 )$$

5.- Una consideración importante es aquella relacionada con la resistencia hidráulica ( $\Sigma p_1 q_1$ ), que debería ser incluida en los casos de análisis por simulación, relativos al control; pero si estos términos son pequeños y encubiertos por efectos más apreciables, pueden ser despreciados. Estos casos están comúnmente presentes en centrales hidroeléctricas de caudal alto y tuberías grandes, donde la rugosidad de ésta es despreciable en relación a su diámetro ( $\epsilon/D = 0$ ). (24).

## DEDUCCION DE LAS ECUACIONES:

## TUNEL DE ADUCCION.-

Bajo las consideraciones antes anotadas, la ecuación 44 definida en el apéndice B.11, aplicada al túnel de aducción da:

$$h_t = \operatorname{sech}(T_{ec}D)h_w - Z_c(\tanh T_{ec}D)q_c - \xi_c q_c \quad (2.6)$$

Donde  $T_{ec}$  es el tiempo de elasticidad y  $\xi_c$  es el coeficiente de fricción del túnel.

## TANQUE DE EQUILIBRIO.-

Como se puede ver en la figura # 2.4, la relación de flujo a la entrada del tanque de equilibrio, no es más que una suma de caudales descrita por la ecuación (2.7): (15) (24)

$$q_c = (q_t + q_r) + q_{p1} \quad (2.7)$$

El flujo neto dentro del tubo ascendente del tanque de equilibrio, y el nivel del agua en el mismo, está descrito por la ecuación (2.8), la cual corresponde a un llenado de tanque simple donde  $(q_t + q_r)$  forman el caudal total que entra en dicho tanque; y donde  $T_t$  es una constante:

$$q_t + q_r = T_t D h_t \quad (2.8)$$

## TUBERIA DE PRESION.-

Las ecuaciones (44 y 42) definidas en el apéndice B.11 también pueden ser aplicadas a la tubería de presión, donde se tiene:

$$h_1 = (\operatorname{sech} T_e D) h_t - Z_{p1} (\tanh T_e D) q_1 - \bar{\xi}_{p1} q_1$$

$$q_{p1} = (\cosh T_e D) q_1 + (1/Z_{p1}) (\sinh T_e D) h_1 \quad (2.9)$$

Donde  $T_e$  es el tiempo de elasticidad, y  $\bar{\xi}_{p1}$  el coeficiente de fricción, para la tubería de presión.

## Ecuaciones de la turbina.-

Una turbina puede ser descrita por la linealización de dos ecuaciones estáticas, las cuales involucran las variables de esfuerzo y de flujo que a ella concurren (caudal y cabeza), las ecuaciones son:

$$q_1 = a_{11} h_1 + a_{12} n_1 + a_{13} z_1 \quad (2.10a)$$

$$m_1 = a_{21} h_1 + a_{22} n_1 + a_{23} z_1 \quad (2.10b)$$

Aquí, las constantes  $a_{ij}$  pueden ser obtenidas de las curvas características de la turbina, las cuales corresponden al funcionamiento en estado estable, para el punto nominal de generación. La velocidad que se toma también es la nominal, en puntos cercanos a la máxima potencia. (26) (32)

De la física fundamental, se tiene que dinámicamente el torque es función de la aceleración angular y de la inercia, de tal forma que se puede definir sobre la turbina:

$$T_m D n_1 = m_1 \quad (2.11)$$

Donde  $T_m$  es el tiempo de arranque de la turbina, (este factor  $T_m$  es el que da la característica de cada tipo de turbina, como se explicará en el capítulo III, en donde inclusive se dan rangos típicos de este parámetro). De esta forma queda definida la ecuación dinámica de la turbina por la ecuación (2.11)

#### FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.-

Para llegar a la función de transferencia de la turbina ( $m_1/z_1$ ) es necesario definir ciertas relaciones como son:  $F_1$ ,  $F_3$  y  $G$ , las cuales se determinan a continuación.

La relación ( $F_1$ ) demuestra como varía la cabeza  $h_t$  del tanque de equilibrio con relación al flujo  $q_{p1}$  de la tubería de presión.

La ecuación (2.12) describe al operador  $F_1$  como:

$$F_1 = \frac{-h_t}{q_{p1}} \quad (2.12)$$

En el apéndice B.1 se han combinado las ecuaciones (2.5) a (2.8) para obtener la ecuación que describe al operador  $F_1$  que esta dado por:

$$F_1 = \frac{\xi_c + Z_c (\tanh T_{ec} D)}{1 + T_t \xi_c D + Z_c T_t (\tanh T_{ec} D) D} \quad (2.13)$$

De la expresión anterior, se desprende que la relación entre la cabeza del tanque de equilibrio  $h_t$  y la relación de flujo de la tubería de presión  $q_{p1}$ , dependen solamente de las características del túnel, de aquellas del tanque de equilibrio-tubo ascendente, y se ve que no depende de las partes posteriores al tanque de equilibrio. El sistema hidráulico anterior a la tubería de presión esta así, completamente definido por la ecuación (2.13).

En igual forma, es necesaria una ecuación ( $F_3$ ) que describa las variaciones de caudal ( $q_1$ ) y cabeza ( $h_1$ ), que se producen en la turbina, y que dependen del circuito hidráulico anterior a ella. La ecuación relativa a las variaciones de caudal de la turbina  $q_1$  y la altura  $h_1$  esta dada por la siguiente expresión:

$$F_3 = -q_1/h_1 \quad (2.14)$$

En el apéndice B.2, se explica la obtención de la ecuación de  $F_3$ , la cual esta dada por la combinación de las ecua-



ciones (2.9) y (2.12).  $F_3$  corresponde a la ecuación (2.15) que se expone a continuación:

$$F_3 = \frac{1 + \frac{F_1}{Z_{p1}} (\tanh T_e D)}{Z_{p1} + F_1 + Z_{p1} (\tanh T_e D)} \quad (2.15)$$

Es importante señalar aquí, que la rata de flujo de la turbina,  $q_1$ , y la cabeza,  $h_1$ , dependen en su orden de la tubería de presión, tanque de equilibrio y su tubo ascendente ranurado, y además del túnel de aducción. Es aquí donde queda demostrada la participación de cada uno de los componentes del sistema hidráulico, y la interdependencia de éstos con la turbina.

La acción principal de control en una turbina Pelton se ejecuta sobre el inyector, al final de la tubería de presión, y la acción complementaria es ejecutada sobre el deflector, pero es importante notar que en la turbina de laboratorio por carecer del deflector, la acción de control se realizará sobre el inyector. Por tanto la función de transferencia debe tener por entrada el recorrido del inyector  $z$ , y como salida el torque útil que entrega la turbina  $m$ , quedando la función de transferencia de la turbina de la forma  $m/z$ . De las ecuaciones (2.10) que describen a la turbina, se puede deducir que al operar éstas se llega a una función de transferencia de tipo:

$$m_1 = S_1 \cdot z_1 + S_2 \cdot n_1$$

( 2.16 ) 14

Examinando esta expresión se puede ver que en la señal del torque influyen dos componentes, la primera respecto a la posición del inyector ( $S_1 \cdot z_1$ ), y la segunda respecto a la velocidad ( $S_2 \cdot n_1$ ).

$S_1$  y  $S_2$  son relaciones dependientes de  $T_w$ , y de las constantes  $a_{ij}$ , como se describe más adelante en la sección II.B.3. Al dividir la función anterior para  $z_1$  se tienen las relaciones  $m_1/z_1$  (función de transferencia de la turbina), y  $n_1/z_1$ , que se denominará como función G.

En el apéndice B.7 se han realizado los sucesivos reemplazos para obtener la función de transferencia de la turbina ( $m_1/z_1$ ) definida por la ecuación (2.19), primeramente por reemplazo de la ecuación (2.14) en la ecuación (2.10a), obteniéndose la expresión (2.16), que se indica a continuación:

$$h_1 = \frac{-(a_{12}n_1 + a_{13}z_1)(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} \quad \begin{matrix} 2.1 \\ (2.16) \end{matrix}$$

Se substituye luego (2.16) en la ecuación (2.10b) obteniéndose la ecuación (2.17) que establece:

$$m = \frac{a_{23} + (a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21})\frac{1}{F_3}}{1 + a_{11}(1/F_3)} z_1 + \frac{a_{22} + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})\frac{1}{F_3}}{1 + a_{11}(1/F_3)} n_1 \quad (2.17)$$

Si se aplica a (2.17) el operador  $F_t$  dado por (2.18), se tiene finalmente la ecuación de transferencia de la turbina dada por la expresión (2.19) de la siguiente manera:

$$F_t = n_1/z_1 \quad (2.18)$$

$$F_t = \frac{a_{23} + (a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21})\frac{1}{F_3}}{1 + a_{11}(1/F_3)} + \frac{a_{22} + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})\frac{1}{F_3}}{1 + a_{11}(1/F_3)} G$$

$$(2.19)$$

Donde el operador  $G$  describe la sensibilidad, de la velocidad de la turbina  $n_1$  respecto a un cambio en la posición del inyector  $z_1$ . También depende de ciertas constantes  $a_{ij}$  y del valor de  $F_3$ . Este operador está dado por:

$$G = n_1/z_1 \quad (2.20)$$

Mediante análisis realizado en el apéndice B.3, se obtiene la ecuación del operador  $G$ , que está dado por:

$$G = \frac{a_{23}F_3 + a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13}}{T_m(F_3 + a_{11})D - a_{22}(F_3 + a_{11}) + a_{12}a_{21}} \quad (2.21)$$

FIN.

II.B.2.- FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA CENTRALES DE PEQUEÑA POTENCIA

II.B.2.1.- NO EXISTE TUNEL DE ADUCCION NI TANQUE DE EQUILIBRIO. (Mini - Micro Generación)

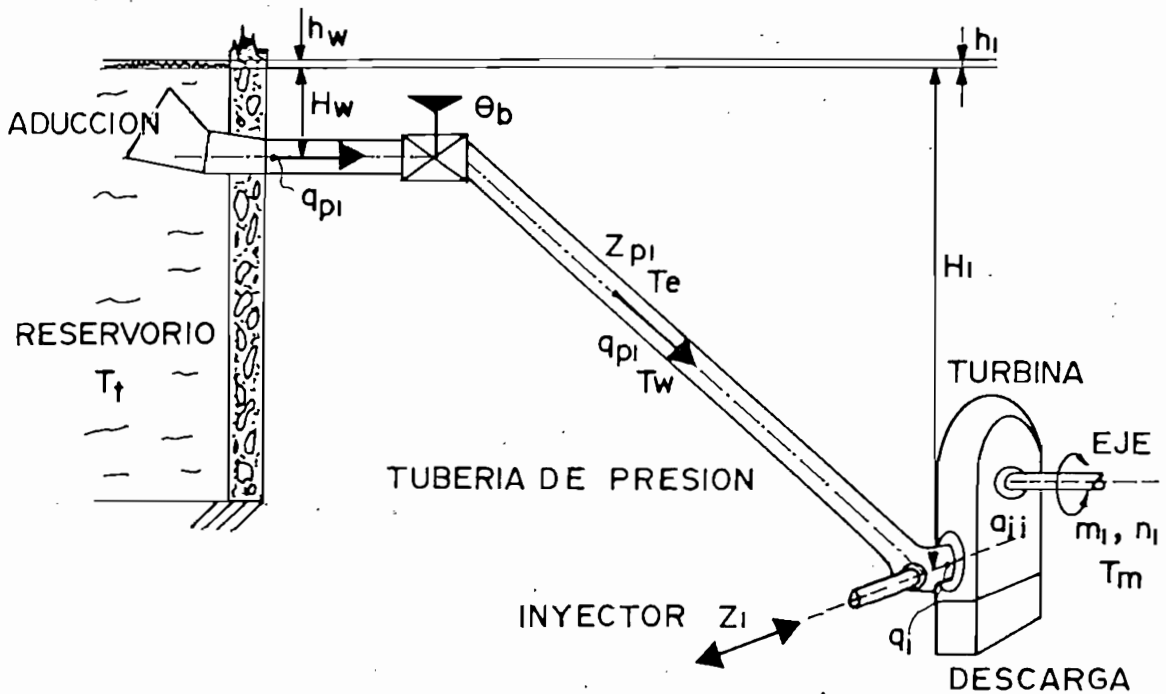


Figura # 2.5

En la sección anterior II.B.1, se han determinado en forma general las ecuaciones que gobiernan un sistema de generación eléctrica, a partir de las cuales se puede hacer un análisis para mini o micro generación bajo algunas consideraciones que se exponen a continuación:

1.- Se considera que en los casos típicos de micro generación, en las centrales de pequeña potencia, el túnel de

aducción y chimenea de equilibrio no existen, o bien el tramo correspondiente del túnel es insignificante en sus dimensiones con respecto a la tubería de presión. (24)

2.- Es necesario hacer ciertas aproximaciones, válidas también para análisis de estabilidad, control, o comprobación de respuesta de frecuencia para grandes centrales de generación. Estos análisis y aproximaciones para macro generación se encuentran explicados en forma general en el apéndice B.14. (24)

Para centrales de generación pequeñas, el operador  $F_3$  se obtiene al aplicar la ecuación (44) del apéndice B.11 a la tubería de presión, por lo cual se establece:

$$h_1 = (\operatorname{sech} T_e D) h_w - Z_{p1} (\tanh T_e D) q_1 - \Xi_{p1} q_1 \quad ( 2.22 )$$

Por las consideraciones (4 y 5) de la sección II.B.1.1,  $h_w$  y  $\Xi_{p1} q_1$  son cero. Entonces se tiene:

$$h_1 = -Z_{p1} (\tanh T_e D) q_1 \quad ( 2.23 )$$

El operador  $F_3$  estará definido de la siguiente manera:

$$F_3 = 1/Z_{p1} (\tanh T_e D) \quad ( 2.24 )$$



Con la finalidad de llegar a un modelo simple que defina el circuito hidráulico como una columna rígida, se debe tomar en cuenta el siguiente punto.

#### II.B.2.2.- APROXIMACION SOBRE EL RANGO DE CONTROL

Si se expande en series de potencias el término  $\tanh(T_e D)$  como se indica en el apéndice B.6, se tiene:

$$\tanh T_e D = T_e D - \frac{(T_e D)^3}{3} + \frac{2(T_e D)^5}{15} - \frac{7(T_e D)^7}{315} + \dots$$

Para los tiempos  $T_e$  de las mini y micro centrales, con tuberías relativamente cortas donde ( $0 \leq T_e < 1$  s.), y si los rangos de control para generación están delimitados solamente por desviaciones alrededor del estado estable, y no comprenden control sobre las condiciones iniciales ni finales, los términos  $(\tanh T_e D)^3$  y superiores pueden ser despreciados. Por esta razón esta modificación sobre la ecuación (2.24) es aceptable. La función F3 modificada es:

$$F3 = 1/Z_{p1} T_e D \quad (2.25)$$

Si el circuito hidráulico descrito por la ecuación (2.25) se considera inelástico, es decir que los términos

relativos a los efectos de compresibilidad de la columna de agua en la tubería de presión descritos en el apéndice B.12, además de la impedancia y tiempo de elasticidad ( $Z_{p1}$  y  $T_e$ ), son pequeños, entonces se requiere de tiempos también pequeños de cierre del inyector para activar el fenómeno del golpe de ariete. Como no es esta la naturaleza del control, y los movimientos del inyector son lentos, se considera que el golpe de ariete no se activa. Entonces es necesario reemplazar en el operador  $F_3$  el término  $T_w$  (inercia de la columna de agua al recorrer la tubería de presión), por  $Z_{p1}T_e$ .

$Z_{p1} \cdot T_e$  se reemplaza por  $T_w$  en la ecuación (2.25) obteniéndose:

$$F_3 = 1/T_w \quad ( 2.26 )$$

### II.B.3.- DEDUCCION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Para mini o micro centrales (Fig. 2.5), las ecuaciones (2.19) y (2.21) de la sección (II.B.2.1), describen en forma total el comportamiento del sistema hidráulico.

Reemplazado la ecuación de  $F_3$  (2.26) de la sección II.B.2.2 en las anteriores ecuaciones, se obtiene la función

de transferencia total que describe el sistema hidráulico de una mini central, la cual esta dada por:

$$F_t = \frac{a_{23} + (a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21})T_w D}{1 + a_{11}T_w D} + \frac{a_{22} + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})T_w D}{1 + a_{11}T_w D} G \quad (2.27)$$

Donde la función G bajo las condiciones anteriores, se ha obtenido en el apéndice II.E, el cual establece la siguiente relación:

$$G = \frac{a_{23} + T_w(a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13})D}{(T_m D - a_{22})(1 + T_w a_{11}D) + T_w a_{12}a_{21}D} \quad (2.28)$$

Notación: Si por facilidad de identificación se remplazan los siguientes parámetros, se tiene:

$$\begin{aligned} A_0 &= (a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}) \\ A_1 &= (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) \\ A_2 &= Z_{p1}T_e \approx T_w \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$F_t = \frac{a_{23} + A_0 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} + \frac{a_{22} + A_1 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} G \quad (2.30)$$

$$G = \frac{a_{23} + A_2 A_0 D}{(T_m D - a_{22})(1 + A_2 a_{11} D) + A_2 a_{12} a_{21} D} \quad (2.31)$$

Se ha demostrado además que existen valores típicos, así como también ideales para los  $a_{ij}$ . Estos valores



$a_{ij}$  deberán calcularse de las curvas características de la turbina con funcionamiento en estado estable, y lo más cerca posible del punto de máxima potencia (Fig. # 2.6).

Los valores  $a_{ij}$  están dados por:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \partial q / \partial h = \Delta q_1 / \Delta h_1 \\
 a_{12} &= \partial q / \partial n = \Delta q_1 / \Delta n_1 \\
 a_{13} &= \partial q / \partial z = \Delta q_1 / \Delta z_1 \\
 a_{21} &= \partial m / \partial h = \Delta m_1 / \Delta h_1 \\
 a_{22} &= \partial m / \partial n = \Delta m_1 / \Delta n_1 \\
 a_{23} &= \partial m / \partial z = \Delta m_1 / \Delta z_1
 \end{aligned} \tag{32}$$

La teoría de (32) ha demostrado que los valores de  $a_{23}$  son de fundamental importancia en la función de transferencia de la turbina.

Para  $a_{23}$  se demuestra que se requiere el valor real calculado del prototipo. Esto será considerado para la posterior simulación de la turbina en la sección III.B (32) (24)

En el siguiente cuadro se muestran los valores tanto típicos como ideales, de las constantes  $a_{ij}$ .

VALORES TÍPICOS  
(para plena carga)

$$\begin{array}{ll}
 a_{11} = 0.58 & a_{21} = 1.4 \\
 a_{12} = -0.15 & a_{22} = -0.9 \\
 a_{13} = 1.1 & a_{23} = 1.5
 \end{array}$$

Y para una turbina ideal sin pérdidas se tiene:

VALORES IDEALES  
PARA LA TURBINA

$$\begin{array}{ll} a_{11} = 0.5 & a_{21} = 1.5 \\ a_{12} = 0.0 & a_{22} = -1.0 \\ a_{13} = 1.0 & a_{23} = 1.0 \quad (26) (24) \end{array}$$

II.B.4.- DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DE LA  
TURBINA PELTON DEL LABORATORIO

La determinación de las constantes de la turbina, requieren principalmente de la selección del punto de funcionamiento nominal de la misma, en estado estable.

El punto de funcionamiento nominal de la turbina se lo establecerá basandose en la curva estática de operación, que se describe a continuación:

POTENCIA DE SALIDA (BHP) vs. VELOCIDAD  
ANGULAR DE LA TURBINA (RPM).

La figura # 2.6 presenta la potencia de salida producida por la turbina en BHP vs. la velocidad angular de la turbina  $N$ , en RPM. Estas curvas han sido graficadas para diferentes caudales, los que se han conseguido mediante la manipulación de la válvula de paso de caudal de la bomba eléctrica ( $\theta_b$ ). Todas las curvas se han obtenido mante-

ALTURA DE CABEZA

$H_0 = 70$  pies

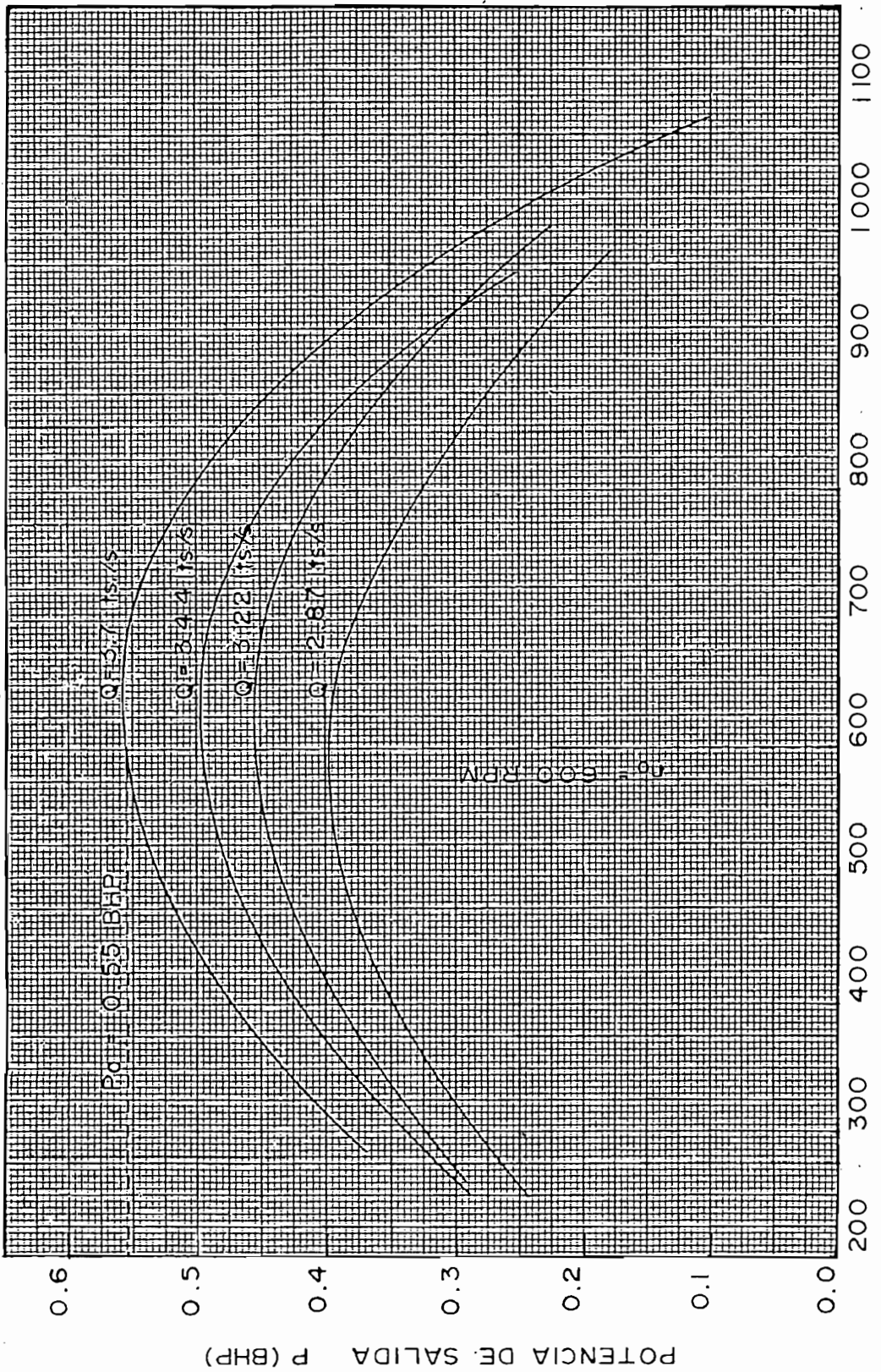


FIG. 2.6 VELOCIDAD ANGULAR DE LA TURBINA n (RPM)

niendo una cabeza constante de 70 pies, [para esta altura se produce un consumo de 18 amperios en la línea de alimentación de la bomba, cuya corriente máxima es de 21 amperios (15 HP)]. No es recomendable el sobrepasar esta altura ya que se puede causar daños en el motor o en la línea de alimentación de éste, (Fig. # 2.18).

El gráfico # 2.6 sirve para localizar el punto de potencia máxima disponible, con el máximo caudal que la bomba puede entregar para la altura de 70 pies, y a una velocidad de régimen compatible con la frecuencia de generación, a éste se le denomina punto nominal de operación.

Si se observa en la figura # 2.6, la potencia máxima siempre ocurre para una velocidad muy cercana a 600 RPM, aún cuando el caudal a variado desde 2.87 lt/s, hasta 3.7 lt/s. Por esta razón se considerará inicialmente ésta como la velocidad nominal del sistema. Se tomó además la velocidad de 600 RPM, porque la misma es compatible con la velocidad sincrónica de generación, condición necesaria para obtener el ciclaje correspondiente a los 60 Hz. Esto se lo puede comprobar utilizando la ecuación (2.33) que relaciona: la velocidad sincrónica de generación, el número de pares de polos del generador, y la frecuencia de generación.

$$N = 60f/p$$

( 2.32 )

Donde:  $N$  = velocidad de régimen de la turbina  
(RPM).  
 $f$  = frecuencia de generación (en el Ecuador = 60 Hz).  
 $p$  = número de pares de polos.

Despejando  $P$  de la ecuación (2.32) se tiene:

$$p = 60f/N \quad (2.33)$$

Reemplazando la frecuencia de generación de 60 Hz, y la velocidad de régimen de la turbina de 600 RPM, se tendrá:

$$p = 6 \text{ pares de polos.}$$

Como se ha obtenido un número entero de pares de polos, es factible el usar la velocidad de 600 RPM, como sincrónica de generación. En efecto es posible la selección o diseño de un generador con ese número de pares de polos, por tanto ésta velocidad se la considerará como la nominal para el diseño del regulador.

La posición nominal del inyector se la tomará alrededor del 70% del desplazamiento total del mismo, por cuanto en esta forma se tiene posibilidad de un buen rango de recorrido para control, asegurando así la correcta regulación de la turbina. El 70% de la carrera total del inyector es de

1.75 cm, la que corresponde a la posición  $Z_0$  del sistema.

La potencia entregada por la turbina se la calcula en base a la fórmula:

$$P[\text{BHP}] = 2\pi \cdot r \cdot F_n \cdot N / (550 \times 60)$$

Donde:

$F_n = F_1 - F_2$  Es la diferencia medida en los dinamómetros del freno de Prony.

$r$  = radio del tambor de la turbina 0.5 pies.

$N$  = velocidad angular de la turbina (RPM).

$M = (F_1 - F_2)r$  torque aplicado al freno de Prony

Una consideración fundamental tiene que ver con la magnitud del torque de perturbación que sufre la turbina. Para macro generación es un 5% del torque nominal, mientras que para mini, y micro generación la perturbación por lo general será de hasta un 25% del torque nominal. Este criterio se ha tomado en cuenta para determinar los valores de las diferentes constantes estáticas  $a_{ij}$ .

En la figura # 2.11, la cual corresponde al gráfico Torque vs. Velocidad angular de la turbina, manteniendo constantes el caudal, la altura de cabeza y la posición del inyector, se puede determinar la desviación de torque máxima y la desviación de velocidad correspondiente a esta varia-

ción de torque del 25% medidos como  $\pm 12.5\%$  alrededor del torque nominal de 4.9 lb-pie. La variación esta dada por:

$$m\% = 100(m_2 - m_1) / m_0$$

$$m\% = 100(5.5 - 4.29) / 4.9$$

$$m\% = 25\%$$

Para dichos torques, en la gráfica # 2.11, también se tienen las siguientes velocidades:

$$M_0 = 4.9 \text{ lb-pie} \quad \rightarrow \quad N_0 = 600 \text{ RPM}$$

$$M_1 = 4.29 \text{ lb-pie} \quad \rightarrow \quad N_1 = 525 \text{ RPM}$$

$$M_2 = 5.5 \text{ lb-pie} \quad \rightarrow \quad N_2 = 675 \text{ RPM}$$

En resumen, el punto de régimen de la turbina estará dado por:

$$n_0 = 600 \text{ RPM}$$

$$z_0 = 1.75 \text{ cm}$$

$$Q_0 = 3.7 \text{ ltr/s}$$

$$P_0 = 0.55 \text{ BHP}$$

$$H_0 = 70 \text{ pies}$$

$$M_0 = 4.29 \text{ lbs-pie}$$

Alrededor de estos valores se calcularán las constantes estáticas de la turbina  $a_{ij}$ , considerando que el sistema estará sometido a fluctuaciones del 25% del torque nominal. Estas constantes serán calculadas en por unidad

Para el cálculo de las constantes  $a_{ij}$ , es necesario determinar experimentalmente las curvas estáticas de funcionamiento del caudal  $Q$  y de torque  $M$  respecto de: altura de cabeza  $H$ , velocidad  $N$ , y de la posición del inyector  $Z$ .

El procedimiento para determinar cada una de las 6 curvas es practicamente el mismo. Las curvas se basan en la combinación de los tres parámetros  $H$ ,  $N$ , y  $Z$ . Es necesario tener constantes dos de ellos en el punto nominal para cada curva y el tercero se grafica en función del parámetro  $Q$  o  $M$ , por lo tanto las modificaciones sobre cada uno de los parámetros se opera del siguiente modo:

$Q \Rightarrow$  Se modifica mediante el cierre o apertura de la válvula de paso de caudal a la salida de la bomba eléctrica. El valor  $Q$  cuando es constante deberá fijarse en el punto nominal de 3.7 lt/s. Se mide en la altura de la regleta del vaso del vertedero con ayuda de la curva de calibración # 2.13.

$M \Rightarrow$  Se modifica mediante la carga o descarga del freno Prony. El valor nominal es de 4.9 lb-pie. Se mide en los dinamómetros del freno Prony.

$H \Rightarrow$  Se modifica (en el laboratorio) mediante el aumento de caudal  $Q$ , y también mediante el cierre del inyector de la turbina. Se mide en el manómetro a la entrada de la turbina.



N => Se modifica mediante la carga o descarga del freno Prony, y principalmente por el cambio en la posición del inyector. Se mide por medio de una lámpara estroboscópica, y su valor nominal es de 600 RPM.

Z => Se modifica por medio de la acción de cierre del inyector por medio del sistema oleomecánico. Su valor nominal es de 1.75 cm. Se mide por medio de la regleta colocada sobre el eje del cilindro del sistema oleomecánico.

#### CALCULO DE $a_{11}$ .

La constante  $a_{11}$  es la variación de caudal en función de la altura de cabeza de la turbina,  $(dq_1/dh_1)$ . Para esta variación caudal/altura se mantienen constantes la posición del inyector  $Z_0$  (1,75 cm), y la velocidad de régimen  $N_0$  (600 RPM).

Para el cálculo de esta constante  $a_{11}$ , es necesario determinar experimentalmente la curva de variación del caudal  $Q$  vs. altura  $H$ . Esta curva se presenta en la figura # 2.7, en donde se ha graficado el caudal como función de la altura de cabeza, manteniendo constantes tanto la velocidad de 600 RPM., y la posición del inyector  $Z_0$  (medido desde totalmente abierto). El rango medido comprende una variación de alturas desde 40 hasta 100 pies.

VELOCIDAD ANGULAR DE LA TURBINA

$n_0 = 600 \text{ RPM}$

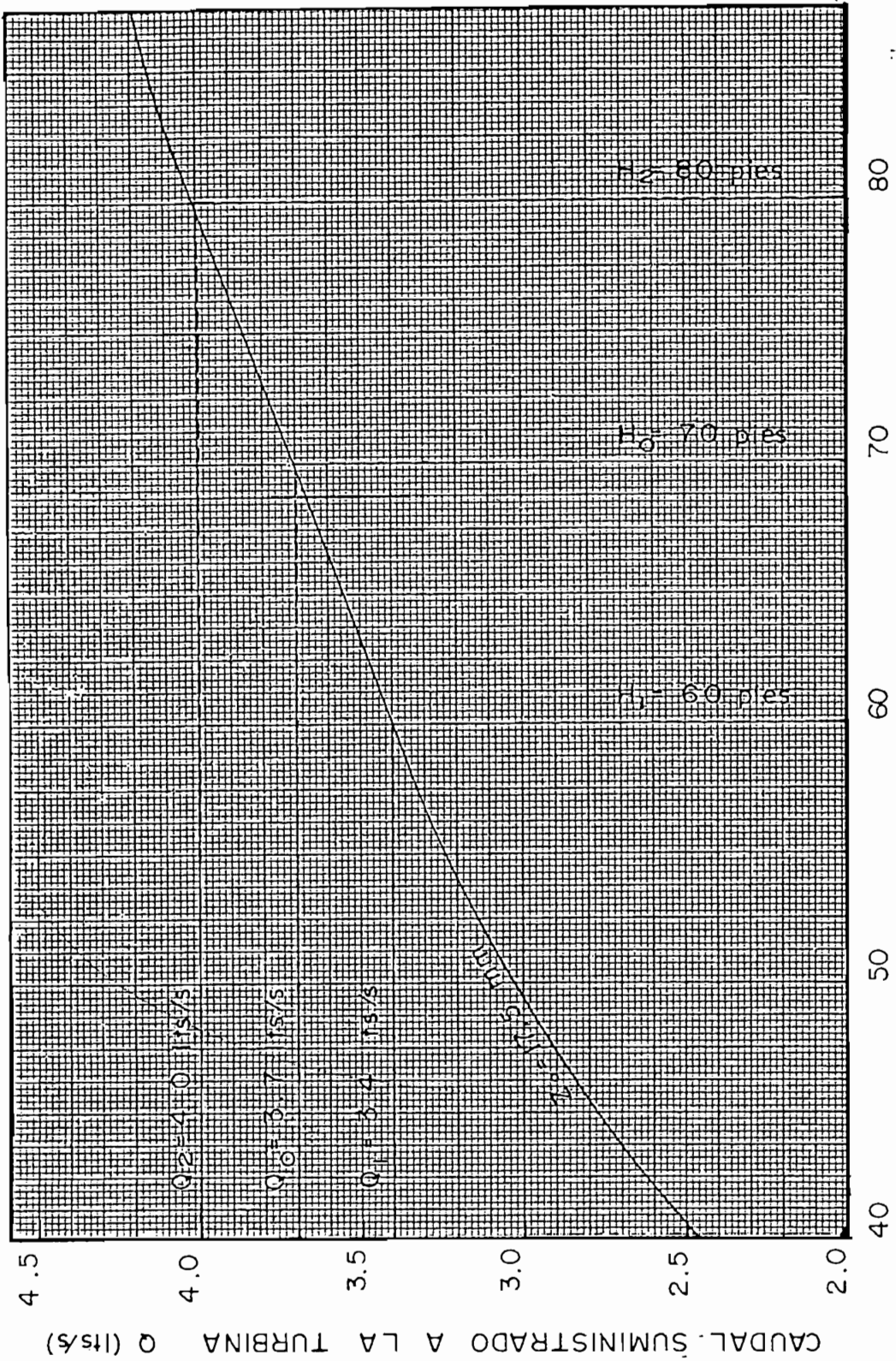


FIG. 2.7 ALTURA DE CABEZA H (pies)

El cálculo de la constante  $a_{11}$  en p.u., se realiza de la siguiente manera en base a la figura # 2.7:

$$a_{11} = (dQ/Q_0) / (dH/H_0); N_0, Z_0 \text{ const.}$$

$$a_{11} = (\Delta Q/Q_0) / (\Delta H/H_0); N_0, Z_0 \text{ const.}$$

$$a_{11} = \frac{(Q_2 - Q_1) / Q_0}{(H_2 - H_1) / H_0} = \frac{(4 - 3.44) / 3.7}{(80 - 60) / 70}$$

$$a_{11} = 0.57$$

#### CALCULO DE $a_{12}$ .

La constante  $a_{12}$  es la variación del caudal suministrado a la turbina en función de la velocidad angular de la misma ( $dq_1/dn_1$ ). Para esta variación se mantienen constantes, la posición del inyector  $Z_0$  (1.75 cm), y la altura de cabeza  $H_0$  (70 pies).

Para el cálculo de  $a_{12}$  es necesaria la determinación experimental de la curva de variación del caudal  $Q$  suministrado a la turbina vs. la velocidad angular  $N$ . Esta curva se presenta en la figura # 2.8, en donde se ha graficado el caudal como función de la velocidad angular de la turbina, manteniendo constantes tanto la posición del inyector  $Z_0$  (1.75 cm), así como también la altura de cabeza

ALTURA DE CABEZA

$H_0 = 70$  pies

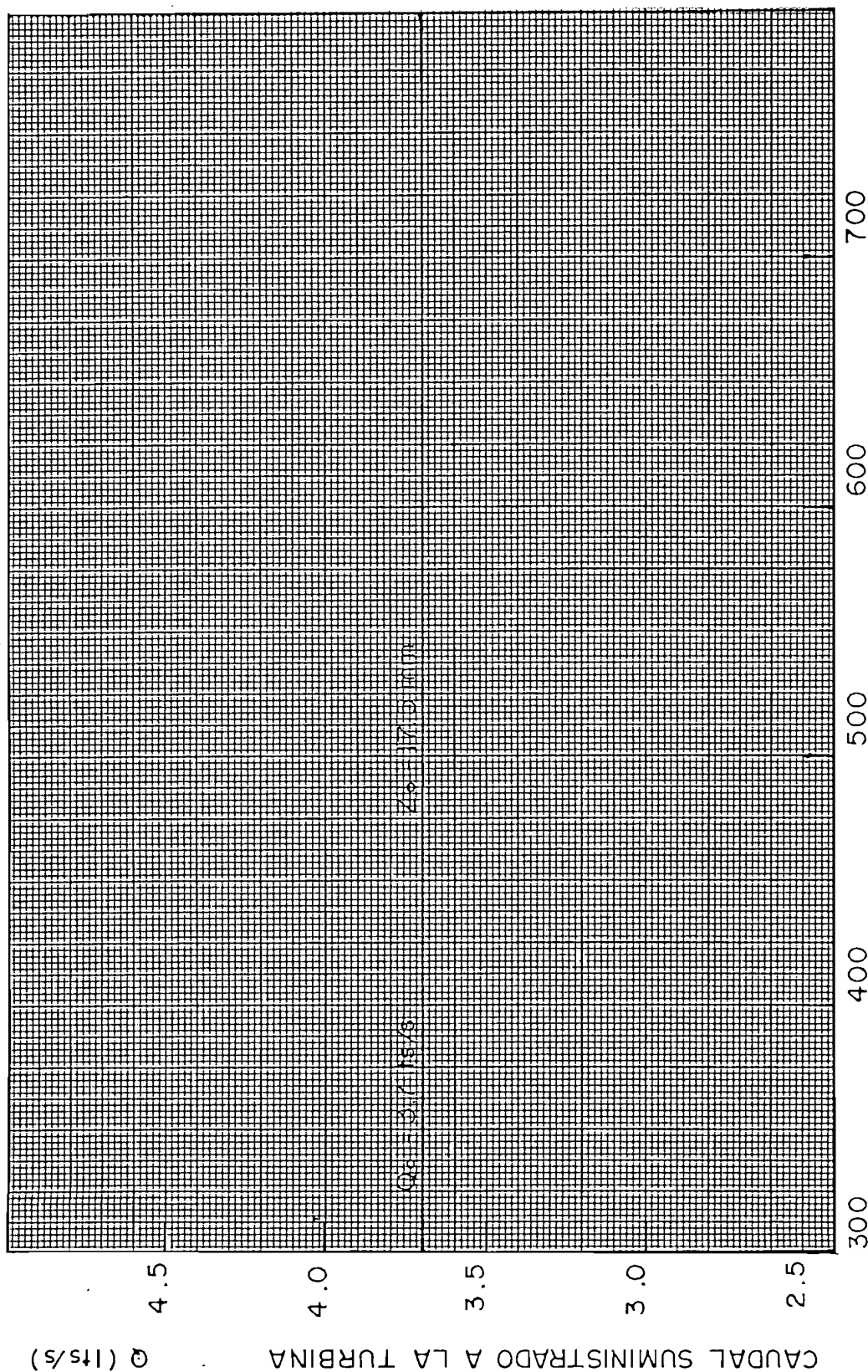


FIG. 2.8 VELOCIDAD ANGULAR DE LA TURBINA n (RPM)

CAUDAL SUMINISTRADO A LA TURBINA Q (lts/s)

$H_0$  (70 pies). Esta curva se ha obtenido fijando primeramente la turbina en el punto de funcionamiento nominal:

$$N_0 = 600 \text{ RPM.}$$

$$Q_0 = 3.7 \text{ ltr/s.}$$

$$H_0 = 70 \text{ pies.}$$

$$M_0 = 4.9 \text{ lbs-pie.}$$

$$Z_0 = 1.75 \text{ cm.}$$

Los resultados muestran que para una turbina Pelton, la variación de la velocidad producida por la carga, no va a tener efecto en el cambio del caudal suministrado a ella, pues éste solo puede ser modificado por las válvulas de paso de la tubería de presión, y por el inyector.

El cálculo de la constante  $a_{12}$  en p.u., se realiza de la siguiente manera en base a la figura # 2.8:

$$a_{12} = (\partial Q / Q_0) / (\partial n / n_0); Z_0, N_0 \text{ const.}$$

$$a_{12} = (\Delta Q / Q_0) / (\Delta n / n_0); Z_0, N_0 \text{ const.}$$

$$a_{12} = \frac{(Q_2 - Q_1) / Q_0}{(n_2 - n_1) / n_0} = \frac{(3.7 - 3.7) / 3.7}{(675 - 525) / 600}$$

$$a_{12} = 0.0$$

El rango de velocidades de 675 a 525 RPM, corresponde al cambio que se opera en la turbina cuando se le somete a una carga del 25% del torque nominal total, según lo muestra la figura # 2.11.

#### CALCULO DE $a_{13}$ .

La constante  $a_{13}$  es la variación del caudal suministrado a la turbina en función de la posición del inyector ( $dq_1/dz_1$ ). Para esta variación se mantiene constante la velocidad angular  $N_0$  (600 RPM). La altura de cabeza  $H_0$ , se mantiene constante en los casos reales, pero en el laboratorio no se cumple por las razones que se indican durante el desarrollo.

Para el cálculo de  $a_{13}$ , es necesaria la determinación experimental de la curva de variación del caudal  $Q$  suministrado a la turbina vs. la posición del inyector  $Z$ . Esta curva se presenta en la figura # 2.9 en donde se han graficado el caudal como función de la posición del inyector, manteniendo constante la velocidad  $N_0$  (600 RPM), por medio del freno Prony, y tratando de mantener constante la altura de cabeza  $H_0$  (70 pies). Esta condición es muy difícil de obtener en el laboratorio, puesto que cuando se cierra el inyector se cambia el punto de funcionamiento dado por la curva estática  $Q-H$  de la bomba, así ésta trata de vencer la resistencia ejercida por el cierre del inyector elevando la

ALTURA DE CABEZA  
H = 30 - 125 pies

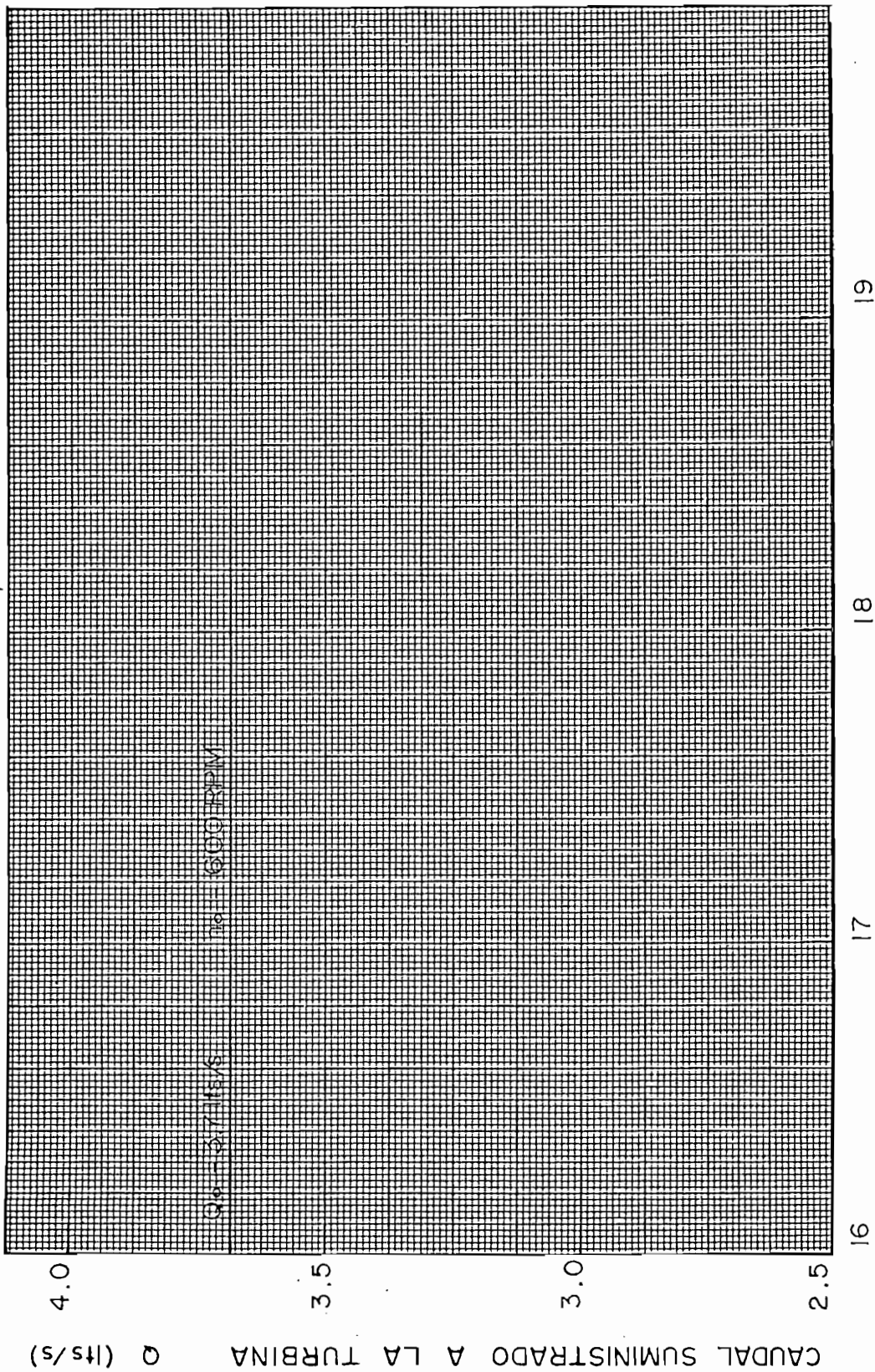


FIG. 2.9

presión o altura de cabeza en forma considerable. Este efecto en el caso real no se da, puesto que la máxima altura de cabeza a que llegará el sistema es la altura del reservorio. Por lo tanto para el rango de recorrido del inyector desde 16 hasta 20 mm, el cambio de presiones correspondiente es de 30 hasta 125 pies.

El cambio de caudal viene dado por la variación en la posición de la válvula ( $\theta_b$ ) de la bomba en el sistema de laboratorio, por lo tanto el sistema tiene independencia entre el recorrido del inyector y el caudal que entrega la bomba.

El cálculo de  $a_{13}$  en p.u. se realiza de la siguiente manera, de acuerdo a la figura # 2.9:

$$a_{13} = (\partial Q/Q_0) / (\partial Z/Z_0) ; Z_0, N_0 \text{ const.}$$

$$a_{13} = (\Delta Q/Q_0) / (\Delta Z/Z_0) ; Z_0, N_0 \text{ const.}$$

$$a_{13} = \frac{(Q_2 - Q_1) / Q_0}{(Z_2 - Z_1) / Z_0} = \frac{(3.7 - 3.7) / 3.7}{(1.65 - 1.85) / 1.75}$$

$$a_{13} = 0.0$$



CALCULO DE  $a_{21}$ .

La constante  $a_{21}$  es la variación del torque aplicado en el freno Prony vs. la altura de cabeza disponible ( $dm_1/dh_1$ ). Para esta variación se mantienen constantes, la posición del inyector  $Z_0$  (1.75 cm), y la velocidad angular  $N_0$  (600 RPM).

Para el cálculo de  $a_{21}$  es necesaria la determinación experimental de la curva de variación del torque aplicado en el freno de Prony ( $M$ ) vs. la altura de cabeza ( $H$ ) medida a la entrada de la turbina. Esta curva se presenta en la figura # 2.10, en donde se ha graficado el torque como función de la altura de cabeza, manteniendo constantes tanto la velocidad angular ( $N_0$ ), y la posición del inyector ( $Z_0$ ).

El cálculo de la constante  $a_{21}$  en por unidad, se realiza de la siguiente manera, en base a la figura # 2.10:

$$a_{21} = (dM/M_0) / (dH/H_0); Z_0, N_0$$

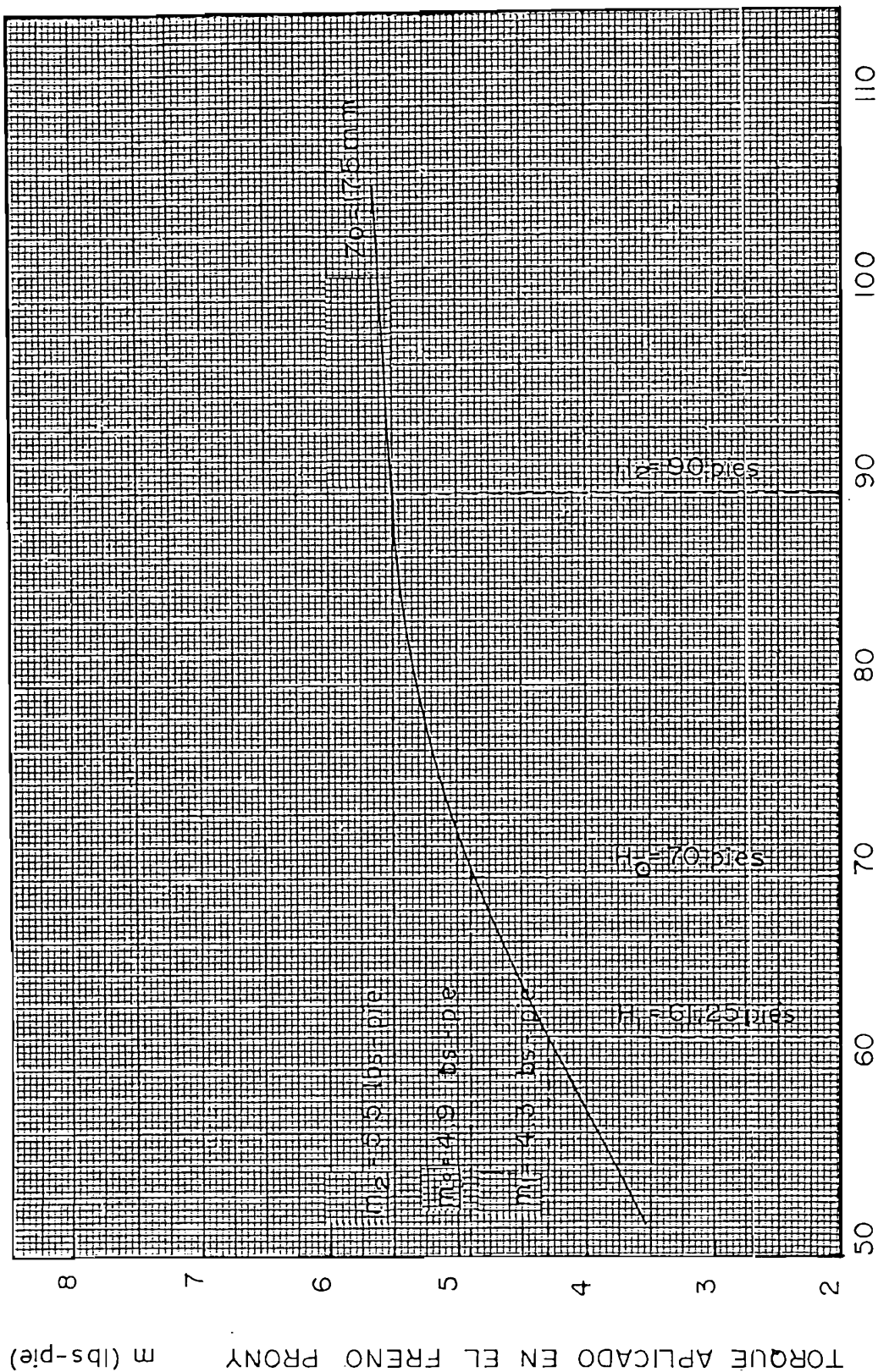
$$a_{21} = (\Delta M/M_0) / (\Delta H/H_0); Z_0, N_0$$

$$a_{21} = \frac{(M_2 - M_1) / M_0}{(H_2 - H_1) / H_0} = \frac{(5.5 - 4.29) / 4.9}{(75 - 64) / 67}$$

$$a_{21} = 1.51$$

VELOCIDAD ANGULAR DE LA TURBINA

$n_0 = 600 \text{ RPM}$



ALTURA DE CABEZA H (pies)

FIG. 2.10

CALCULO DE  $a_{22}$ 

La constante  $a_{22}$  es la variación del torque aplicado al freno Prony versus la velocidad angular de la turbina ( $dm_1/dn_1$ ). Para esta variación se mantienen constantes, la posición del inyector  $Z_0$  (1.75 cm), y la altura de cabeza  $H_0$  (70 pies).

Para el cálculo de  $a_{22}$ , es necesaria la determinación experimental de la curva de variación del torque aplicado en el freno de Prony (M) vs. la velocidad angular de la turbina (N). Esta curva se presenta en la figura # 2.11, en donde se muestra la variación del torque como función de la velocidad de la turbina, manteniendo constantes tanto la posición del inyector  $Z_0$  (1.75 cm), así como la altura de cabeza  $H_0$  (70 pies).

Por medio de la fórmula para el torque descrita en la sección II.B.4, se grafican las variaciones de torque y velocidad.

El cálculo de la constante  $a_{22}$  en p.u., se realiza de la siguiente manera en base a la figura # 2.11:

$$a_{22} = (dm/M_0) / (dn/N_0) ; Z_0, H_0$$

$$a_{22} = (\Delta M/M_0) / (\Delta N/N_0) ; Z_0, H_0$$

ALTURA DE CABEZA

$H_0 = 70$  pies

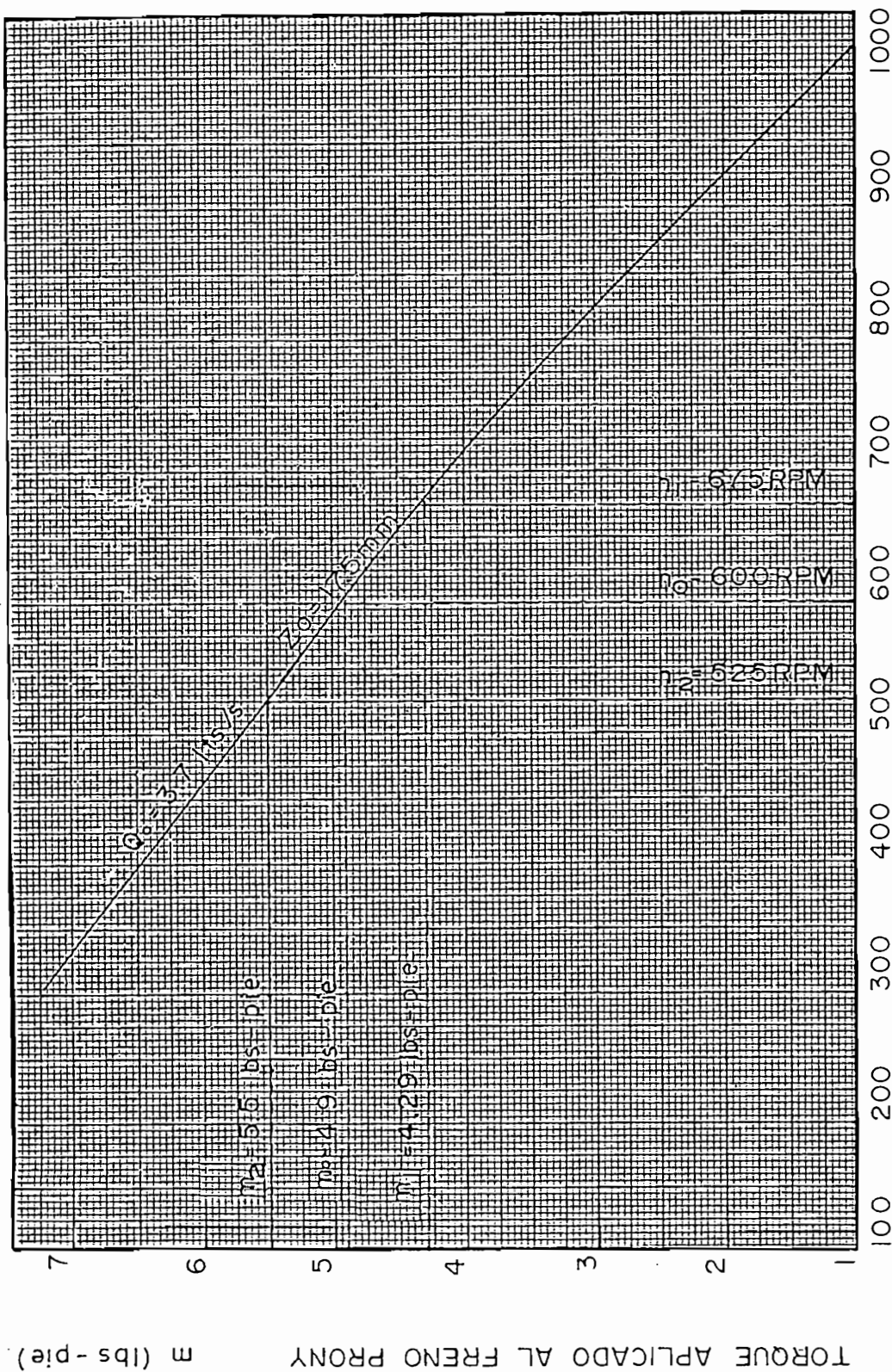


FIG. 2.11 VELOCIDAD ANGULAR DE LA TURBINA n (RPM)

$$a_{22} = \frac{(M_2 - M_1) / M_0}{(N_2 - N_1) / N_0} = \frac{(5.5 - 4.29) / 4.9}{(525 - 675) / 600}$$

$$a_{22} = - 1.06$$

### CALCULO DE $a_{23}$ .

La constante  $a_{23}$  es la variación del torque aplicado en el freno Prony en función de la posición del inyector ( $dm_1/dz_1$ ). Para esta condición se mantienen constantes la velocidad  $N_0$  (600 RPM) y la altura de cabeza (en teoría)  $H_0$  (70 pies), esta última condición como se explicó en el cálculo de la constante  $a_{13}$ , en el laboratorio no se cumple puesto que cuando se hace recorrer el inyector, la altura neta medida a la entrada de la turbina va a fluctuar.

El cálculo de la constante  $a_{23}$  en p.u., se muestra a continuación, en base a la figura # 2.12.

$$a_{23} = (dM/M_0) / (dZ/Z_0); N_0, H_0$$

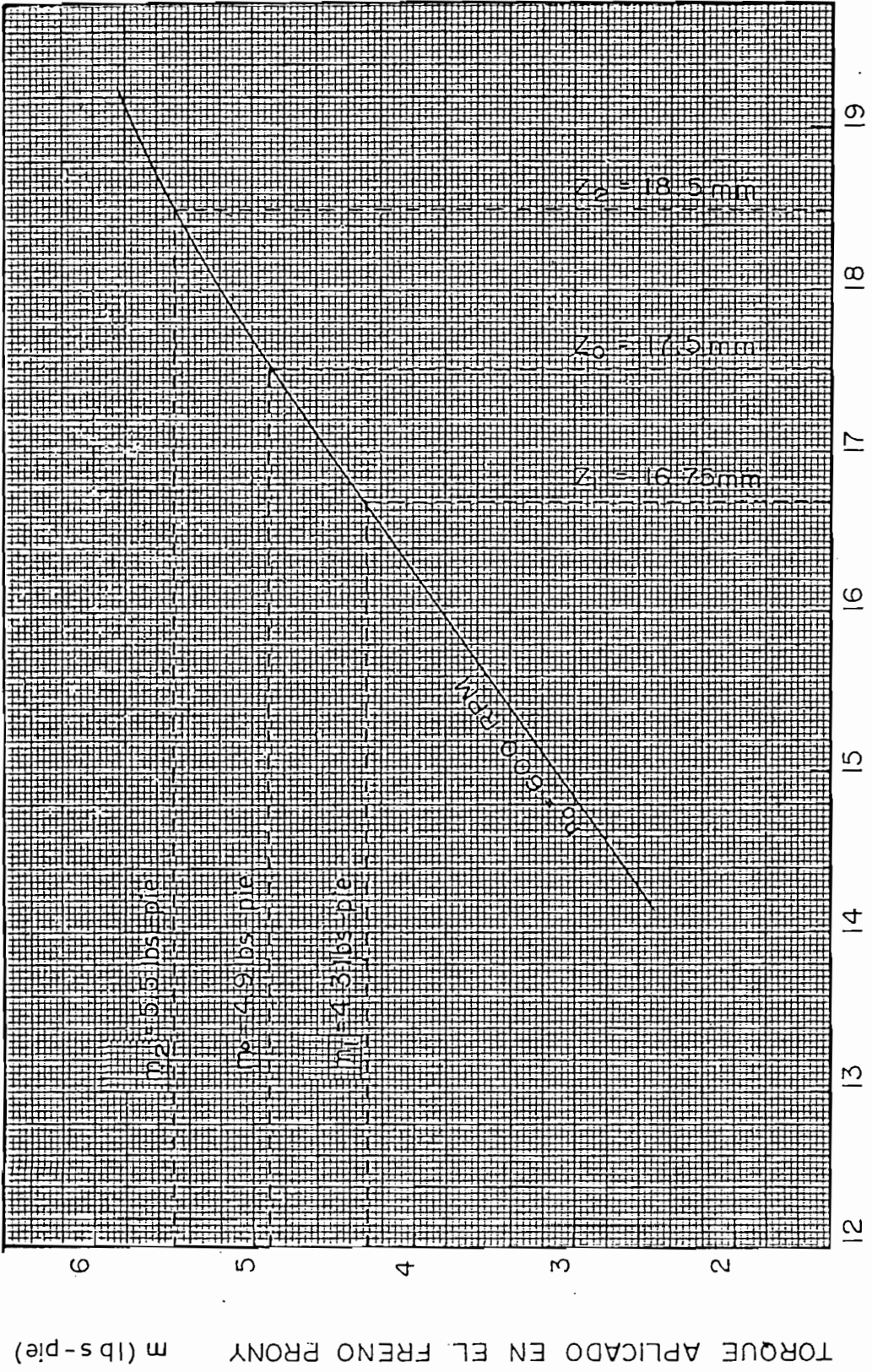
$$a_{23} = (M/M_0) / (Z/Z_0); N_0, H_0$$

$$a_{23} = \frac{(M_2 - M_1) / M_0}{(Z_2 - Z_1) / Z_0} = \frac{(5.5 - 4.29) / 4.9}{(18.5 - 16.75) / 17.5}$$

$$a_{23} = 2.5$$

ALTURA DE CABEZA

H = 30-125 pies



TORQUE APLICADO EN EL FRENO PRONY m (lb s-pie)

FIG. 2.12 POSICION DEL INYECTOR Z (mm)

CURVA DE CALIBRACION DEL VERTEDERO.-

La curva de calibración del vertedero se ha obtenido con el fin de medir rápidamente el caudal consumido por la turbina, en función de la altura de la regleta del vaso de calibración. Para el procedimiento de obtención de la curva ver referencia (03). La curva de calibración se presenta en la figura # 2.13.

II.C.- CALCULO DE  $T_m$  Y  $T_w$

II.C.1.- ANALISIS DEL SISTEMA TURBINA INERCIA  
GENERADOR.

Las ecuaciones (2.30) y (2.31) de transferencia para una turbina, dependen de parámetros como:  $a_{23}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{12}$  y  $a_{13}$ , (que son constantes típicas del funcionamiento de la turbina), y de constantes exteriores a ella como son:  $T_m$  y  $T_w$ , tiempos de arranque mecánico relativo a la inercia de la turbina - tubería y de arranque del agua del sistema hidráulico, respectivamente.

La ecuación resultante  $F_t$  es una relación en por unidad del torque mecánico de salida de la turbina respecto



CURVA DE CALIBRACION DEL VERTEDERO

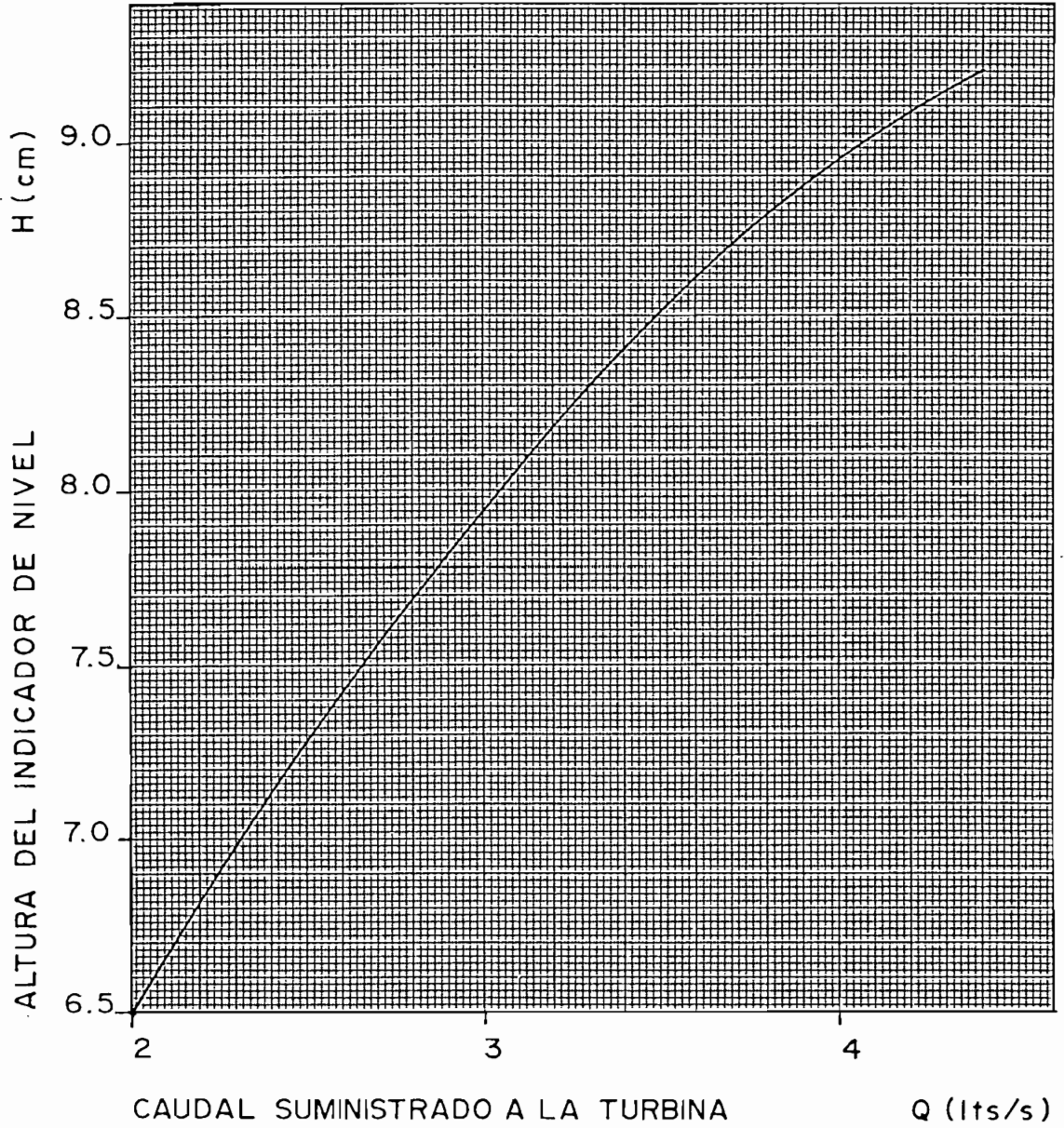
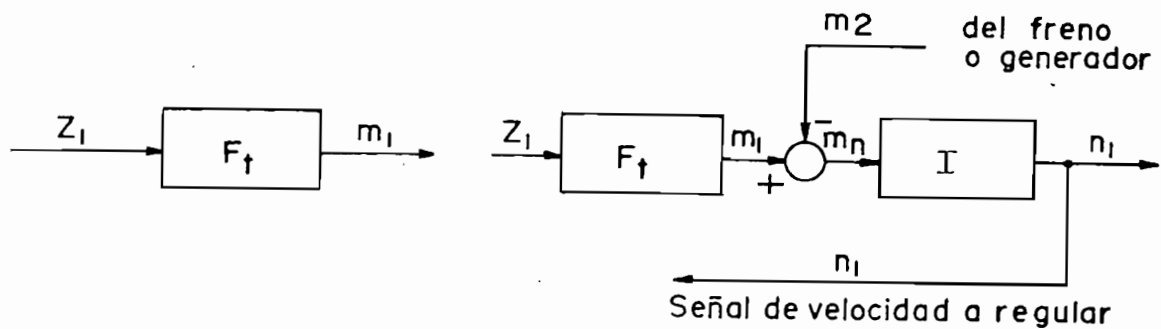


FIG. 2.13



del recorrido del inyector. La figura # 2.14 muestra la disposición de bloques del sistema turbina inercia. En ella se aprecia la función de transferencia deducida anteriormente, y una función  $I$  referente a la inercia que transforma el torque en velocidad, para que una muestra de éste a su vez sea la señal de entrada al gobernador.

El diagrama de bloques relativo a esta función de transferencia se muestra a continuación en la figura # 2.14



$$\text{Se tiene } F_t = m_1 / z_1$$

(A)

$$\text{Se debe tener: } F_t = n_1 / z_1$$

$$I = n_1 / m_1$$

( B )

Figura # 2.14

También es necesario anotar que cuando la turbina está conectada a un generador y éste recibe una demanda de carga, "frena a la turbina". Este tipo de frenado se denomina torque de carga  $m_2$ , y se opone al torque de la turbina  $m_1$ .

El torque de carga  $m_2$  es restado del torque de la turbina  $m_1$ , dando como resultado un torque neto ( $m_n$ ) con el que se mueven el grupo turbina - generador, y que por medio de la función de transferencia I del diagrama (B) de la figura # 2.14, es convertido en la señal de velocidad a regular ( $n_1$ ). Se concluye que el diagrama de bloques de la figura # 2.14 es el que detalla en forma más explícita el funcionamiento del sistema tubería turbina inercia, y deberá ser utilizado en el diseño del lazo de control (05) (08)

#### II.C.2.- DEDUCCION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA INERCIA (I) DEL SISTEMA TURBINA - INERCIA

La ecuación que domina el movimiento circular de un cuerpo, en general depende de su masa y radio de giro, (momento de inercia), el torque de este cuerpo (cuando gira) es una función de su inercia y aceleración angular:

Además el grupo turbina inercia al entregar potencia mecánica proporciona otra ecuación de torque igualmente válida, pero en función de la potencia y velocidad angular:

Por lo tanto se puede decir que el torque de la turbina es:

$$M = KP/W = I(dW/dt) \quad ( 2.34 )$$

Donde:

$K$  = Constante de compatibilidad dimensional (550 lbs-pie/s.HP. ó 83.34 Kg-m/s.HP))

$P$  = Potencia entregada por la turbina HP.

$W$  = Velocidad angular de la turbina (Rad/s).

$I$  = Momento de inercia del grupo turbina-inercia-generator (lbs-pie<sup>2</sup> o Nt-m<sup>2</sup>).

Por facilidad de cálculo, el momento de inercia del grupo turbina-inercia-generator puede ser considerado como un arreglo simplificado de masas cilíndricas como el mostrado en la figura # 2.15:

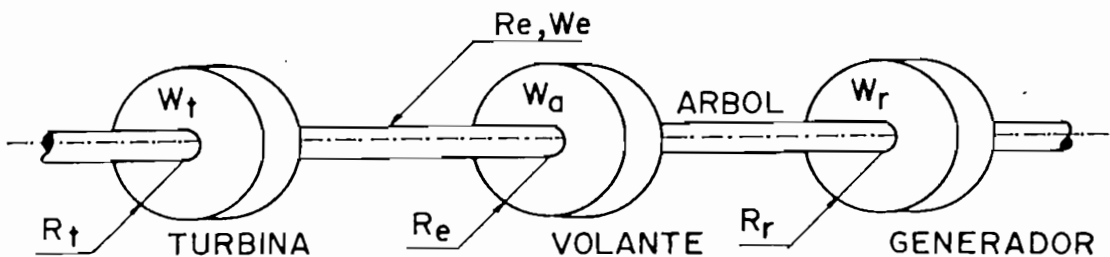


Figura # 2.15

De alguna manera simple, y con apoyo de la física y algunas consideraciones, es posible el cálculo del momento de inercia de todo el grupo, que incluye además el árbol de la turbina y una masa o volante adicional para aumentar la estabilidad del sistema controlado.

Por lo tanto la ecuación (2.34) queda como:

$$M = kP/W = (I/g) (dW/dt) \quad ( 2.35 )$$

Donde se aumentó la gravedad para tener compatibilidad de unidades. En (2.35) se definen:

$dW/dt$  = aceleración angular del sistema ( $\text{rad/s}^2$ ).

$$dW/dt = d/dt (2\pi N/60) = 2\pi/60 (dN/dt)$$

$N$  = velocidad angular del sistema (RPM)

La ecuación (2.35) puede ser escrita como:

$$Pk = (I/g)W (dW/dt) \quad ( 2.36 )$$

$$Pk = \frac{I}{g} \frac{2\pi N}{60} \frac{d(2\pi N/60)}{dt} \quad ( 2.37 )$$

Donde se llamará:

$$k_1 = (I/g) (2\pi/60)^2$$

Por lo que la ecuación de  $Pk$  (2.37) quedará como:

$$Pk/N = k_1 (dN/dt) \quad ( 2.38 )$$

Para poder tener la ecuación (2.38), en por unidad se

multiplicará por:

$$(N_0/P_0) (1/k)$$

Donde:

$P_0$  = potencia nominal de la turbina (HP)

$N_0$  = velocidad nominal del grupo (RPM).

Además multiplicando por  $(1/N_0)$  y reagrupando se tendrá:

$$\frac{P/P_0}{N/N_0} = k_1 \frac{N_0^2}{P_0 k} \frac{d(N/N_0)}{dt} \quad ( 2.39 )$$

Donde:

$P/P_0 = p_0$  = potencia en por unidad.

$N/N_0 = n_0$  = velocidad nominal en por unidad.

Se llamará  $T_m$  a la siguiente expresión:

$$T_m = k_1 (N_0^2/P_0 k)$$

$$T_m = ((2\pi/60)^2/k) (I/g) (N_0^2/P_0)$$

Reemplazando valores se tiene:

$$T_m = \frac{I N_0^2 10^{-6}}{1.615 P_0} \quad (s) \quad (27) (31) \quad ( 2.40 )$$

La ecuación (2.39) puede ser escrita como:

$$P_{pu}/n_{pu} = m_{\eta} = T_m (dn_{pu}/dt) \quad (2.39^*)$$

Con  $m_{\eta}$  = torque de aceleración neto en p.u y  $n_{p.u}$  igual a  $n_1$  velocidad de la turbina en por unidad.

Utilizando (2.39\*), se encuentra la función de transferencia de I, dada por la ecuación (2.42).

$$m_{\eta} = T_m D n_1 \quad (2.41)$$

Despejando se llega a tener la ecuación de transferencia de la inercia (I).

$$I = \frac{n_1}{m_{\eta}} = \frac{1}{T_m D} \quad (2.42)$$

La figura # 2.16 muestra el diagrama de bloques correspondiente a la función de transferencia I.

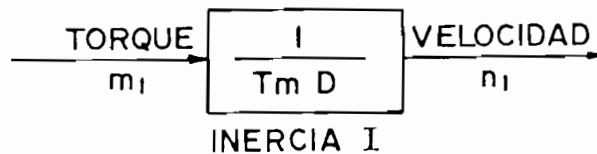


Figura # 2.16

Para poder interpretar físicamente  $T_m$ , se deberá calcular en base a (2.39\*), el tiempo necesario para acelerar el grupo turbina inercia desde parado a la velocidad nominal ( $n_0=1$ ), cuando se aplica al grupo un torque nominal constante ( $m_{\gamma}=1$ ).

Los límites de integración de la ecuación (2.39\*) son:

-Para el tiempo  $dt$  desde 0 hasta T.

-Para la velocidad  $dn_1$  desde 0 a  $n_0$ .

$$1 = T_m \left( dn_1/dt \right)$$

$$\int_0^T dt = \int_0^{n_0} T_m dn_1$$

$$T = T_m n_0; \quad \text{y para } n_0=1 \text{ (nominal):}$$

Se deduce que  $T=T_m$ , cuando el sistema alcanza la velocidad nominal ( $n_0=1$ ) la aplicar al grupo un torque nominal ( $m_{\gamma}=1$ ).

La experiencia muestra que existen rangos típicos recomendados para  $T_m$ , así como también teóricos, esto se debe a que el grupo turbina generador debe tener tiempos de inercia grandes para dar tiempo a que el regulador se adapte a una nueva condición de carga, sin causar efectos de golpe de ariete, pero este tiempo de inercia no deberá ser muy grande

puesto que causaría un retardo en la respuesta del sistema, volviendo la regulación demasiado "perezosa".

#### RANGOS TIPICOS Y TEORICOS DE $T_m$

Rangos típicos (seg.)	Rangos teóricos (seg.)
-----------------------	------------------------

7 a 9	6 a 12
-------	--------

recomendados: 8 segundos (26)

#### II.C.2.1.- ESTIMACION EXPERIMENTAL DE $T_m$ EN LA TURBINA DE LABORATORIO.

A continuación se describe un método teórico experimental para determinar  $T_m$ , en base a ciertos criterios de la dinámica del cuerpo rígido.

- 1.- Se ubica una masa  $m$  mediante una cuerda enrollada al eje de la turbina hasta una altura determinada "e" según lo muestra la figura # 2.17 (a).
- 2.- Se suelta la masa, y se cronometra el tiempo que se demora en recorrer la distancia "e", partiendo desde el reposo.
- 3.- Se tomarán varios tiempos para cada masa  $m$  que se utilice.

De esta manera se obtienen los datos necesarios para determinar la inercia de la turbina.



Los diagramas de cuerpo libre de la masa  $m$  y del grupo turbina - inercia, se presentan en la figura (2.17b) y sobre los mismos se aplican las ecuaciones de la mecánica.

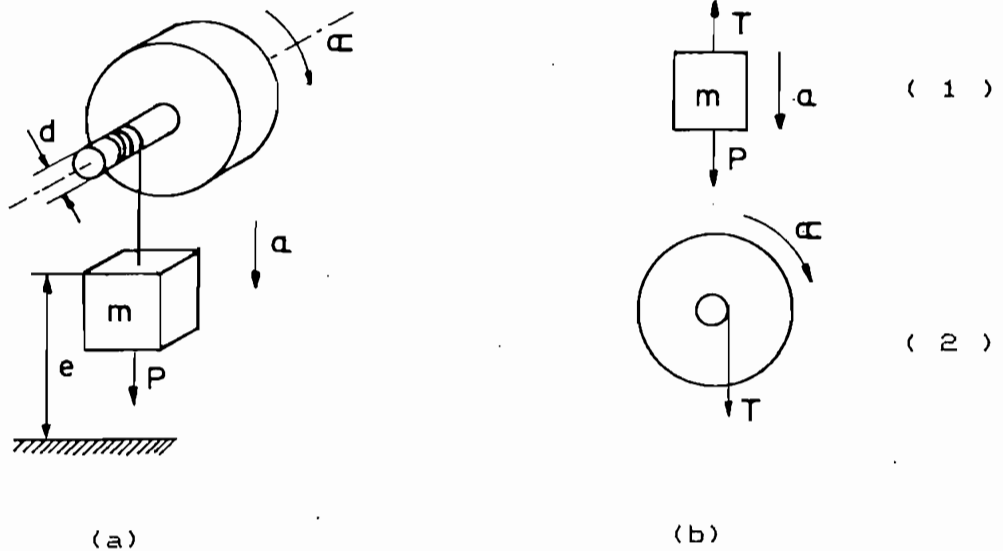


Figura # 2.17

## CUADRO DE VALORES DE LA FIGURA # 2.17

$$d = 3.63 \text{ cm} = 0.119 \text{ pies}$$

$$e = 0.945 \text{ m} = 3.1 \text{ pies}$$

$$t = 11.2 \text{ s} \text{ (promedio)}$$

$$m = 3.864 \text{ kg} = 8.5 \text{ lbs}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2 = 32.2 \text{ pies/s}^2$$

Aplicando las leyes de la mecánica de tiene:

$$\begin{aligned}
 e &= v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 & v_0 &= 0 \\
 e &= \frac{1}{2} a t^2 \\
 a &= \frac{2e}{t^2} & & ( 2.43 )
 \end{aligned}$$

Aqui se ha considerado que la masa  $m$  tiene aceleración constante  $a$ .

En el cuerpo 1, Fig # 2.17 (b):

$$\begin{aligned}
 \Sigma F_y &= ma \\
 T - P &= ma \\
 T &= m(a + g) & & ( 2.44 )
 \end{aligned}$$

En el cuerpo 2, Fig # 2.17 (b) en donde se considera despreciable el rozamiento:

$$\begin{aligned}
 M &= Td/2 \\
 M &= I\alpha & \alpha &= \text{acel. angular} \\
 I\alpha &= Td/2 \\
 T &= 2I\alpha/d & & ( 2.45 )
 \end{aligned}$$

Igualando (2.44) y (2.45):

$$2I\alpha/d = m(a + g)$$

Pero  $a = \alpha d/2$  entonces  $\alpha = 2a/d$

$$(2I/d)(2a/d) = m(a + g)$$

$$I = (md^2/4)(1 + g/a)$$

Reemplazando (2.43) se tiene:

$$I = (md^2/4)(1 + gt^2/2e) \quad ( 2.46 )$$

Además reemplazando los valores del cuadro de la figura # 2.17 en la ecuación (2.46) se tiene:

$$I = 20.14250 \text{ lbs-pie}^2$$

$$I = 8.83 \text{ Nm/s}^2$$

#### CALCULO DE $T_m$ DEL GRUPO TURBINA-INERCIA EN EL LABORATORIO

Una vez calculadas la inercia, la potencia nominal y seleccionada la velocidad nominal de funcionamiento se reemplazan en la ecuación (2.40) teniéndose:

$$T_m = \frac{I N_o^2 10^{-6}}{1.615 P_o} \text{ (s)} \quad ( 2.40 )$$

$$I = 20.1425 \text{ lb-pie}^2$$

$$N_o = 600 \text{ RPM}$$

$$P_o = 0.56 \text{ HP}$$

$$T_m = 8.016 \text{ s}$$

### II-C.3.- DEDUCCION DEL TIEMPO DE ARRANQUE DEL AGUA (TW).

El tiempo de arranque del agua, o constante de tiempo  $T_w$ , es el tiempo que necesita el agua para recorrer el circuito hidráulico de longitud  $L$ , con altura  $H$ , y velocidad  $U$  (promedio). Este tiempo se toma entre los puntos de aducción y la tubería de descarga en caso de que exista.

Para obtener la ecuación de  $T_w$  que se utiliza en la ecuación (2.26), es necesario desarrollar el término  $Z_{p1}T_e$  y hacer los reemplazos que se indican a continuación. Se deberán definir primeramente los siguientes parámetros en la tubería de presión:

$T_e = L_i/a$  tiempo de elasticidad para cada tramo de longitud  $L_i$  (s)

$a =$  Velocidad de la onda de sobre presión  
(apéndice. II.M)

$L_i =$  Longitud de cada tramo de tubería de presión  
(pies o metros)

$U_i =$  Velocidad promedio del agua para cada tramo de longitud  $L_i$  (pies/s ó m/s)

$H_0 =$  La altura de cabeza total (pies ó metros)

$g =$  Aceleración de la gravedad (pies/s<sup>2</sup> ó m/s<sup>2</sup>)

$A_i =$  Area de la tubería correspondiente a cada tramo  $L_i$  (pies<sup>2</sup> o metros<sup>2</sup>)

$U_i = Q_0/A_i$  Velocidad promedio del agua para las secciones  $A_i$  en donde recorre con velocidad  $U_i$

$Z_0 = a/gA_i$  (de las definiciones anteriores)

$Z_{p1} = Z_0 Q_0/H_0$  impedancia normalizada de la tubería de presión (sección II.B.1)

Entonces se tiene:

$$Z_{p1} T_e = (L_i/a) (Z_0 Q_0/H_0)$$

Reemplazando  $Z_0$  se tiene:

$$Z_{p1} T_e = (L_i/a) (Q_0/H_0) (a/gA_i)$$

La teoría define a  $T_w$  en la siguiente expresión:

$$T_w = L_i Q_0 / g H_0 A_i \quad \text{para cada sección } L_i \text{ con área } A_i.$$

$T_w$  total será la suma de los diferentes tramos  $L_i$ .

$$T_w = \Sigma L_i U_i / g H_0 \quad (\text{Para cada tramo})$$

En general:

$$T_w = \Sigma L_i U_i / g H_0 \quad (\text{Ecuación fundamental de } T_w) \quad (2.47) \quad (26)$$

De esta forma queda demostrado que el reemplazo de  $T_w$  en la ecuación (2.25) para obtener la ecuación (2.26) de  $F_3$ , es justificada y es por esta razón que se utiliza en las ecuaciones de transferencia de la turbina.

### II C.3.1.- CALCULO DE $T_w$ EN LA TUBERIA DE LABORATORIO

El cálculo se basará en la aplicación de la ecuación (2.47) para las condiciones existentes en el laboratorio.

La ecuación (2.47) tiene su aplicación para tuberías en general, las mismas que se componen de varios tramos con diferentes secciones en cada uno de ellos. Pero en la tubería de laboratorio, en vista de las reducidas dimensiones del equipo, (figura # 2.18), se debe modificar la ecuación (2.47), para adaptarse a un solo tramo de sección constante, y velocidad promedio también constante.

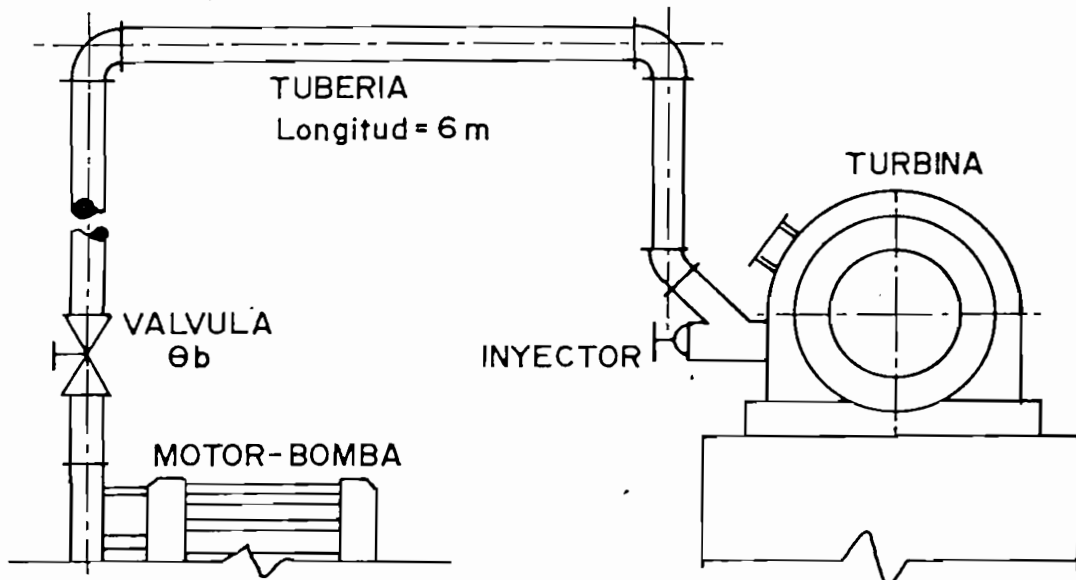


Figura # 2.18

$$T_w = \frac{LQ}{AgH} \quad ( 2.48 )$$

Donde:

L = 6 m longitud total de la tubería

d = 0.064 m = 2½ pulg. diámetro interior

Q = 3.7 ltrs/s caudal consumido por la turbina

g = 9.8 m/s<sup>2</sup>

A =  $\pi d^2 / 4 = 0.00322 \text{ m}^2$

H = 21.34 m = 70 pies altura de cabeza nominal

Para el caso de laboratorio debido al punto seleccionado, que establece un caudal  $Q_Q = 3.7 \text{ lt/s}$ , y las dimensiones de la tubería que se exponen en la figura # 2.18, el tiempo de arranque del agua calculado mediante la ecuación (2.48) es:

$$T_w = 0.04 \text{ s}$$

## CAPITULO III

### ESTUDIO DE LAS ECUACIONES DE LA TURBINA

#### Y EVALUACION DE RESULTADOS

##### III.A.- INTRODUCCION

En este capítulo se realizará una simulación de la respuesta en el tiempo de una turbina a partir de su función de transferencia ( $m/z$ ), la cual fue desarrollada en el capítulo II. Para la realización de esta simulación, se desarrolló un programa para una computadora digital, el cual se describe detalladamente en el apéndice A. Con esta simulación digital se estudiará el comportamiento de la respuesta torque posición ( $m/z$ ) de una turbina, cuando la misma sufre perturbaciones alrededor de su punto de funcionamiento nominal. Para este estudio se tomará una señal de entrada escalón unitario de la posición del inyector. Además el estudio irá dirigido a determinar qué variaciones introducen en la respuesta de la turbina, los cambios de los valores: tiempo de arranque mecánico ( $T_m$ ), tiempo de arranque del agua ( $T_w$ ) y los grupos  $a_{ij}$ .



III.B.- SIMULACION DIGITAL DE LA RESPUESTA A UNA ENTRADA ESCALON UNITARIO EN LA POSICION DEL INYECTOR DE LA TURBINA

La simulación se realizará a partir de las ecuaciones generales de la turbina (2.30), y (2.31):

$$F_t = \frac{a_{23} + A_0 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} + \frac{a_{22} + A_1 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} G \quad (2.30)$$

$$G = \frac{a_{23} + A_2 A_0 D}{(T_m D - a_{22})(1 + A_2 a_{11} D) + A_2 a_{12} a_{21} D} \quad (2.31)$$

Donde las constantes  $A_i$  y  $a_{ii}$  estan relacionadas por:

$$A_0 = a_{11} a_{23} - a_{13} a_{21}$$

$$A_1 = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$$

$$A_2 = Z_{p1} T_e \bar{\omega} T_w$$

Reemplazando la ecuación (2.31), en (2.30), y desarrollando se llega a la ecuación (3.1):

$$F_t = \frac{a_{23} + A_0 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} + \frac{A_1 A_2 T_w^2 D^2 + (A_3 + A_1) a_{22} T_w D + a_{22} a_{23}}{a_{11} T_m T_w^2 D^3 + D^2 [a_{11} T_m T_w + a_{11} (a_{12} a_{21} - a_{11} a_{22}) T_w^2] + D [T_m + (a_{12} a_{21} - 2 a_{11} a_{22}) T_w] - a_{22}} \quad (3.1)$$

Mediante la ecuación (3.1), será simulada digitalmente la respuesta de la turbina en el tiempo. Esta simulación se ha realizado para los siguientes grupos de constantes  $a_{ij}$  de la turbina: valores típicos, ideales, calculados, aproximados, y sus correspondientes  $A_i$ , que se muestran en la tabla # 3.1.

TABLA 3.1

CONST.	TIPICAS	IDEALES	CALCULADAS	APROXIMADAS
$a_{11}$	0.58	0.5	0.57	0.50
$a_{12}$	-0.15	0.0	0.00	0.00
$a_{13}$	1.10	1.0	0.00	1.00
$a_{21}$	1.40	1.5	1.51	1.50
$a_{22}$	-1.00	-1.0	-1.06	-1.00
$a_{23}$	1.50	1.0	2.50	2.50
$A_0$	-0.67	-1.0	1.43	-0.25
$A_1$	-0.37	-0.5	1.60	-0.50

Los valores típicos son los que en forma más usual tienen la mayoría de los sistemas que trabajan a plena carga. Los valores ideales son los que teóricamente deberían tener las constantes de la turbina cuando los rozamientos son despreciables. Los valores calculados son las constantes determinadas específicamente para la turbina de laboratorio. Los valores aproximados son aquellos para los cuales se considerarán todas las constantes como ideales excepto  $a_{23}$ , la misma que se toma con su verdadero valor. Esta última condición se la puede usar siempre y cuando no sea posible determinar el resto de las constantes del sistema.

A partir de la ecuación general de la turbina (3.1), se obtiene: la ecuación con primera aproximación, la ecuación ideal y la ecuación de la turbina de laboratorio (sección III.B.1); para las cuales se obtiene la respuesta en el tiempo de la turbina ( $m/z$ ) considerando cada uno de los grupos de valores de la tabla # 3.1 (de  $a_{ij}$ , y de  $A_i$ ), variando  $T_m$  (2-4-8-10) dentro del rango teórico (sec. II.C.2), y  $T_w$  (0.04-0.5-1-2). Estos últimos son valores típicos de circuitos hidráulicos cortos.

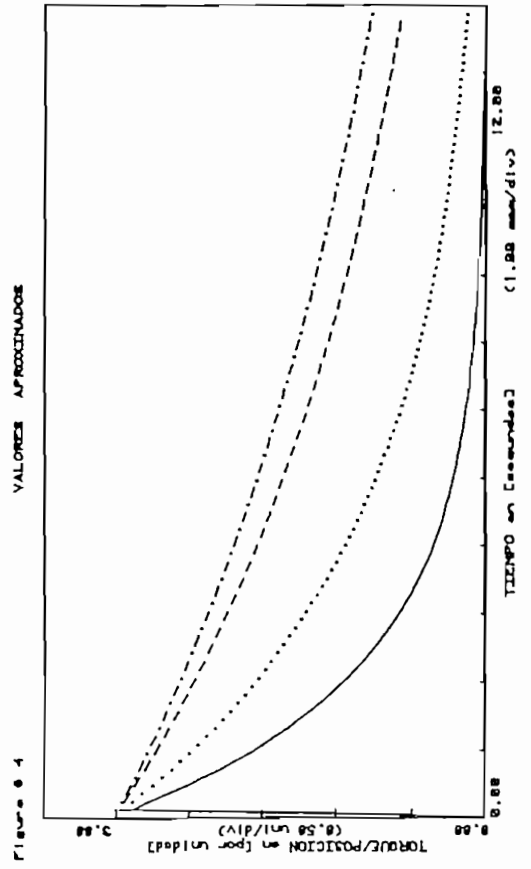
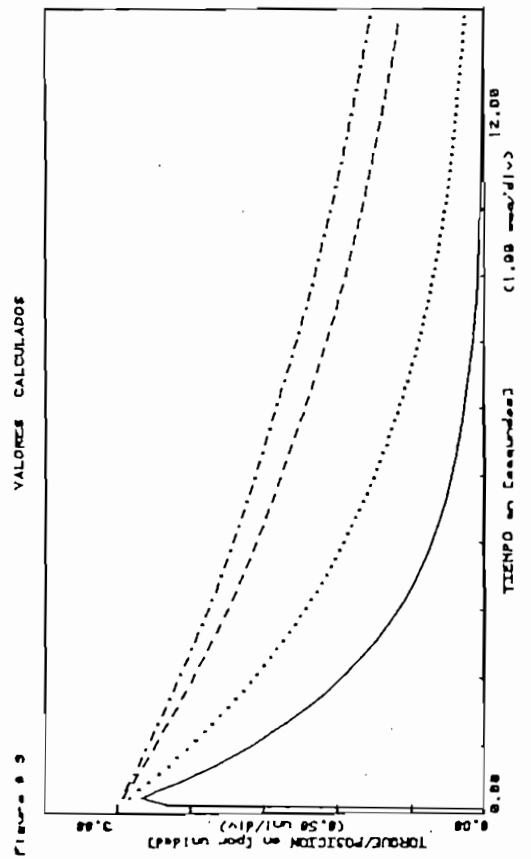
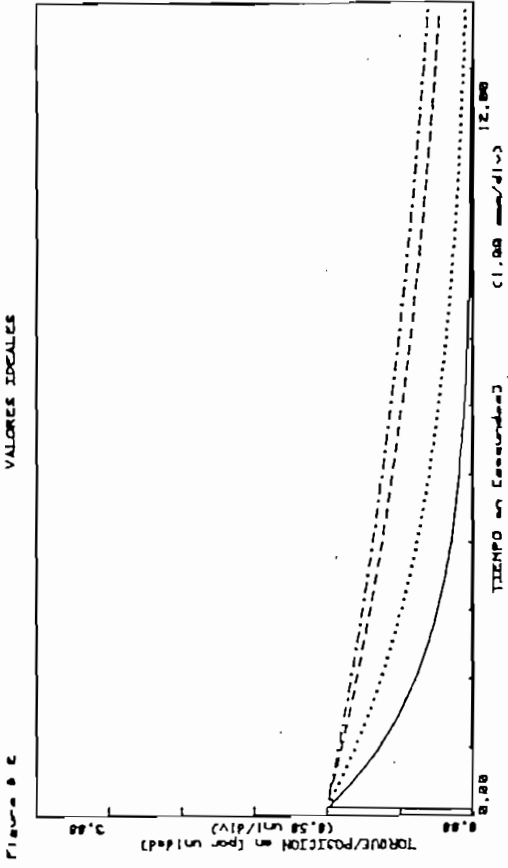
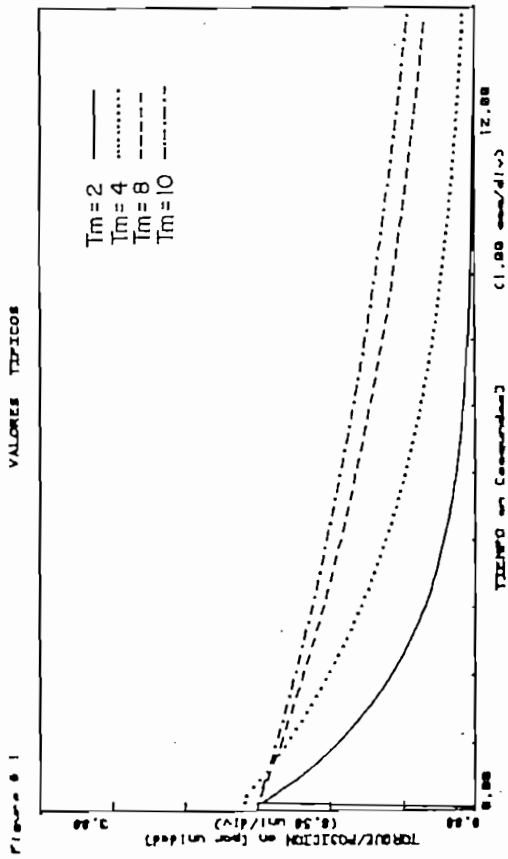
PRESENTACION GENERAL DE LAS CURVAS DE RESPUESTA  
DE LA TURBINA EN EL TIEMPO)

III.B.1.- ECUACION GENERAL:

Una vez que se ha deducido la ecuación general de la turbina (3.1), se procede a la simulación de la respuesta cuyos resultados se presentan en las figuras # 1 a la # 16, en las cuales se ha graficado: el torque/posición vs. el tiempo. Estas curvas se obtienen para cada grupo de valores  $a_{ij}$  (tabla # 3.1), manteniendo constante el valor de  $T_w$ , para la variación indicada de  $T_m$ .

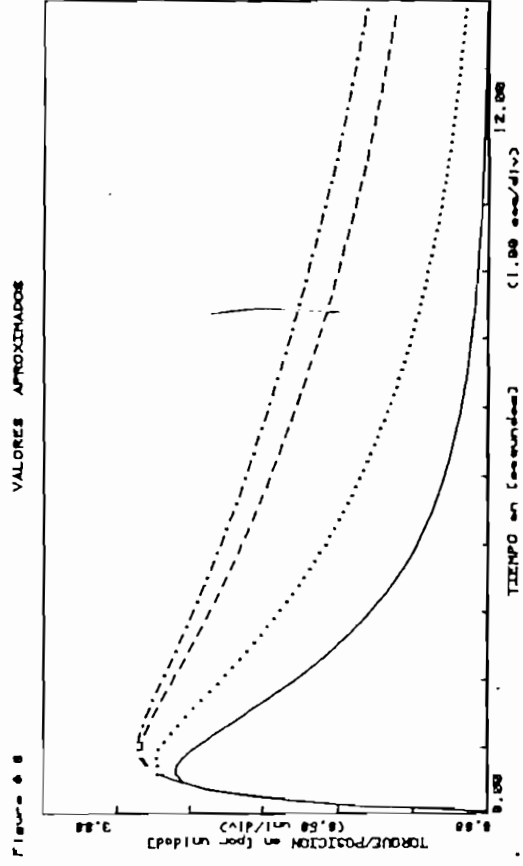
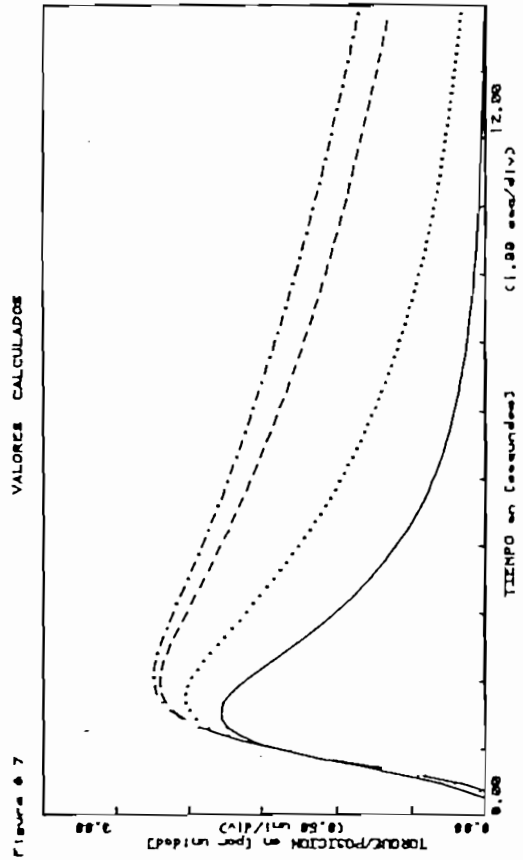
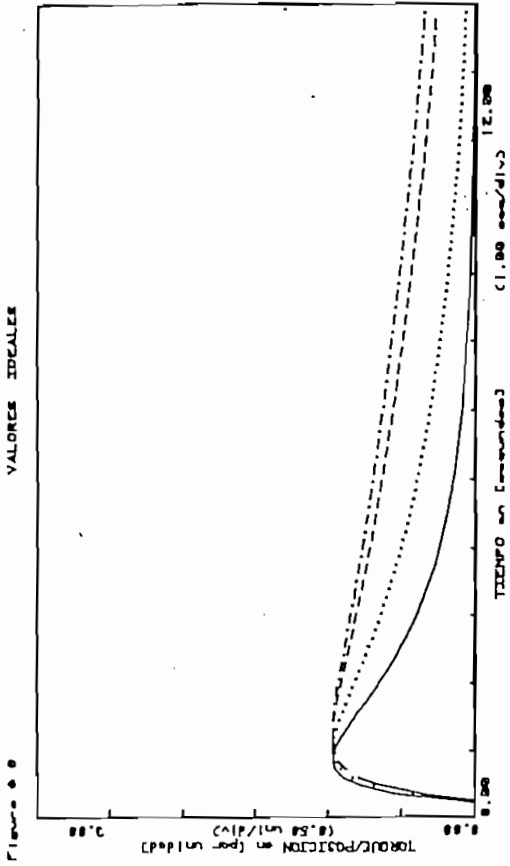
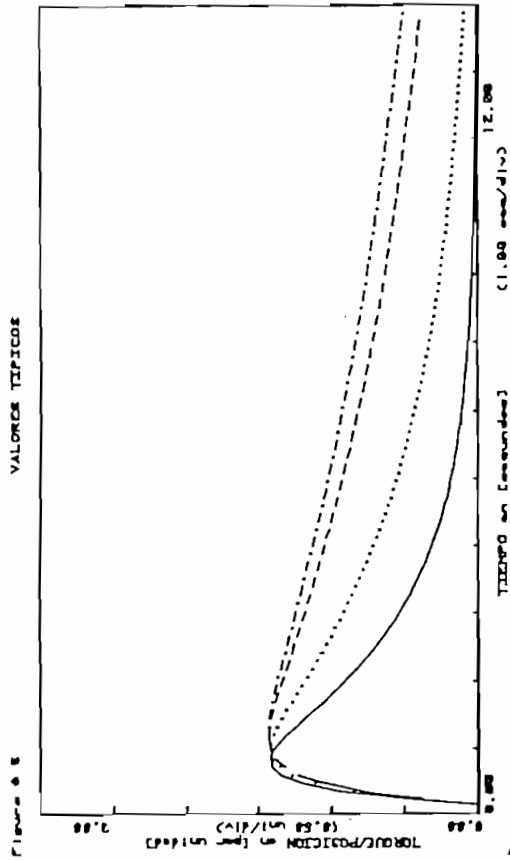
RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Ecuacion General  $(T_w=0.04 \text{ y } T_m=2-4-8-10)$



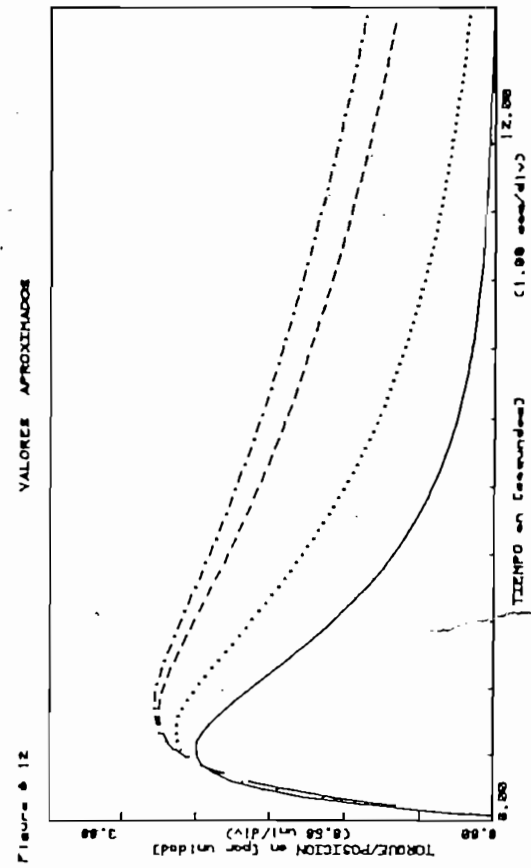
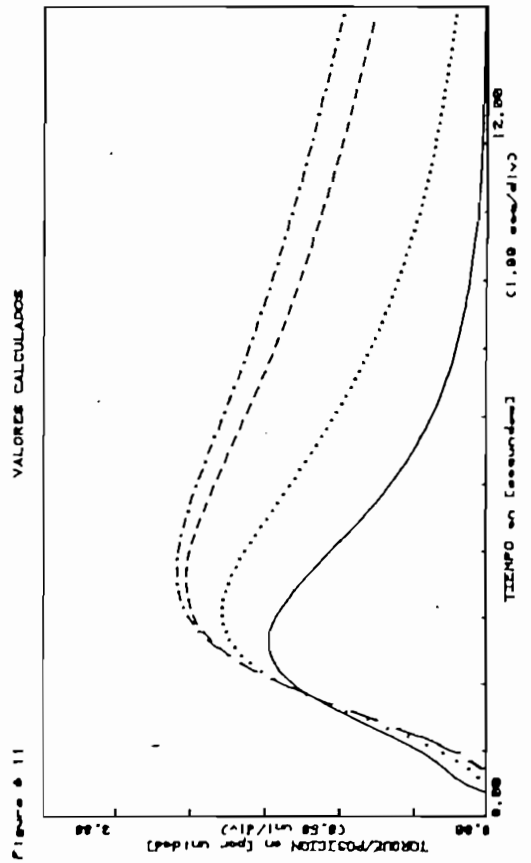
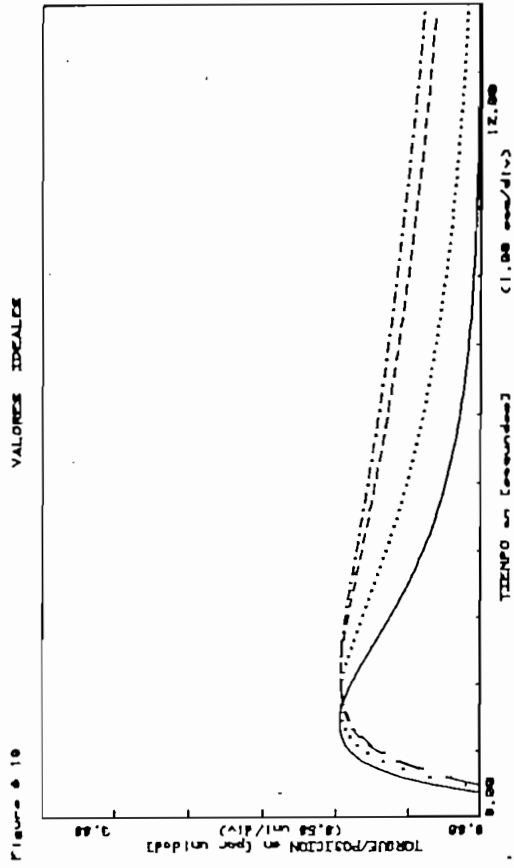
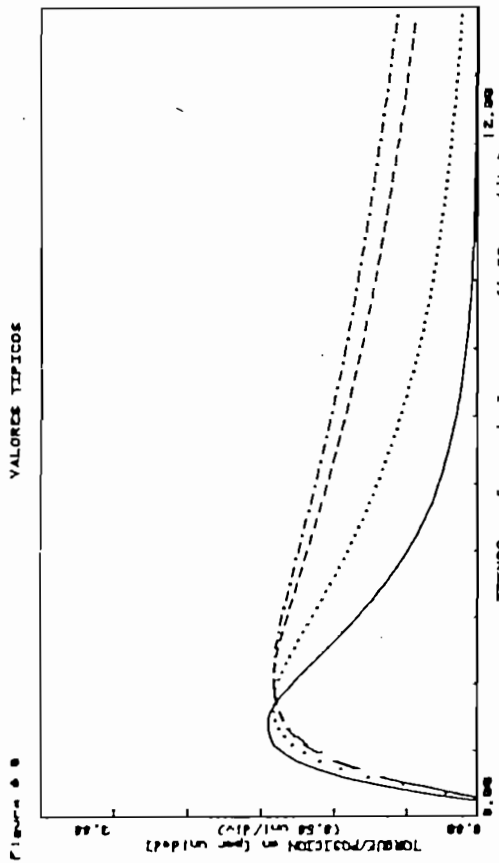
RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Ecuacion General ( $T_w=0.5$  y  $T_m=2-4-8-10$ )



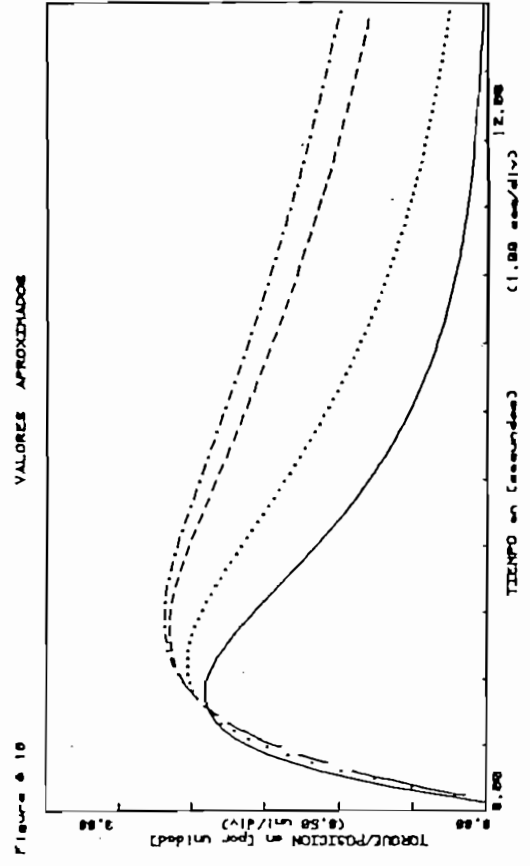
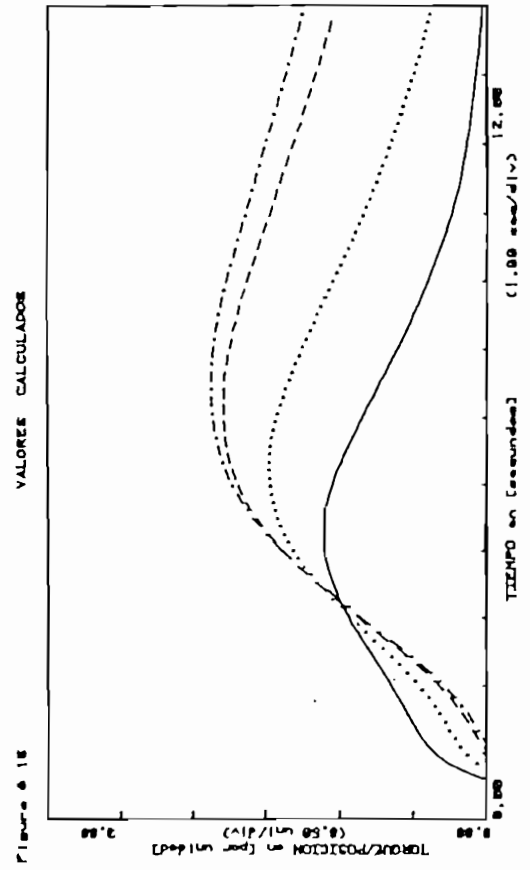
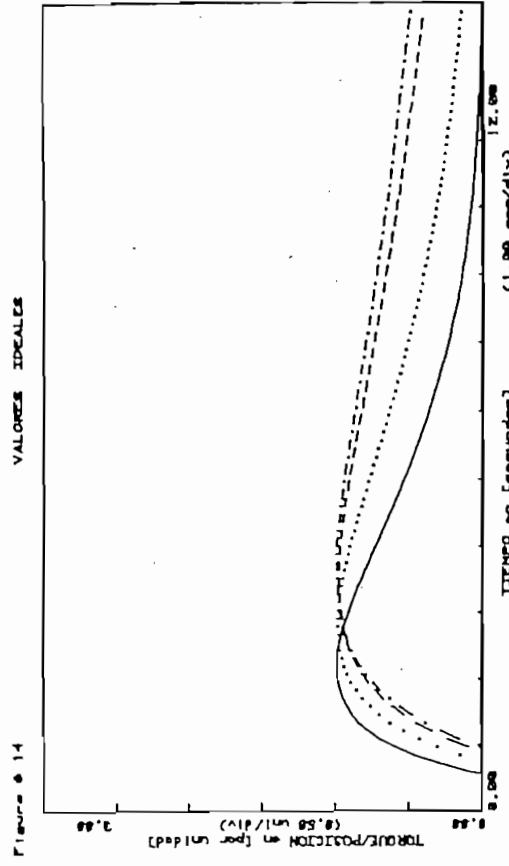
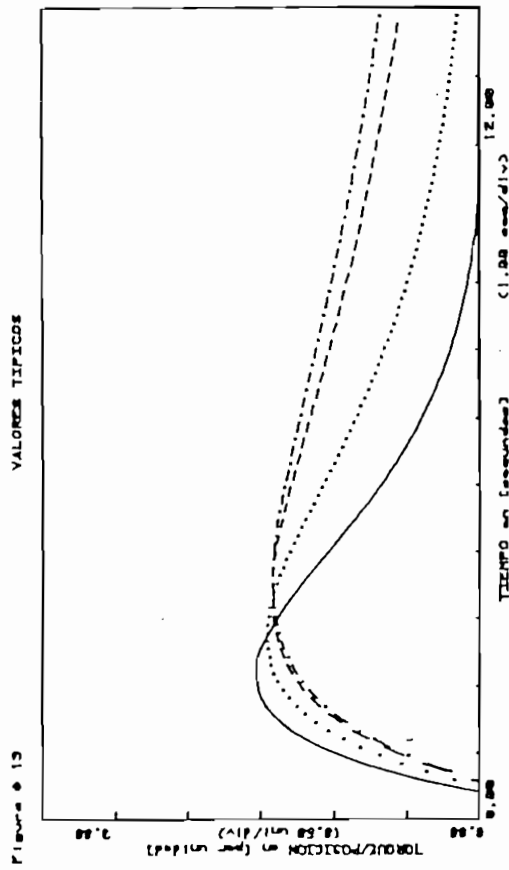
# RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Ecuacion general ( $T_w=1$  y  $T_m=2-4-8-10$ )



# RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Ecuacion General ( $T_w=2$  y  $T_m=2-4-8-10$ )



De las curvas presentadas se observa:

- a.- El máximo valor de torque alcanzado por la turbina depende del valor de  $a_{23}$  dado por la tabla # 3.1.
- b.- Cuanto mayor es el valor de  $T_m$ , la turbina necesita un tiempo mayor para llegar a un torque neto de cero.
- c.- El incrementar el valor de  $T_w$ , aumenta el tiempo requerido para alcanzar el torque máximo, y consecuentemente el tiempo de respuesta total.
- d.- A pesar de que  $a_{23}$  se mantiene constante, al aumentar  $T_w$ , el torque máximo alcanzado por la turbina tiende a disminuir.



### III.B.2.- ECUACION CON PRIMERA APROXIMACION:

En la ecuación (3.1) serán despreciados los términos:  $A_1 A_3 T_w^2 D^2$  y  $a_{11}^2 T_m T_w^2 D^3$ , con lo cual se obtiene la ecuación (3.2):

$$F_{t_p} = \frac{a_{23} + A_0 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} + \frac{(A_3 + A_1) a_{22} T_w D + a_{22} a_{23}}{D^2 [2 a_{11} T_m T_w + a_{11} (a_{12} a_{21} - a_{11} a_{22}) T_w^2] + D [T_m + (a_{12} a_{21} - 2 a_{11} a_{22}) T_w] - a_{22}} \quad (3.2)$$

Los términos despreciados se ha comprobado que no producen en la mayoría de los casos una variación sustancial en la forma de la respuesta de la turbina.

Las curvas resultantes de la simulación, usando la ecuación (3.2) se presentan en las figuras # 17 a la # 32, en las cuales se ha graficado, el torque/posición vs. el tiempo. Estas curvas se obtienen para cada grupo de valores  $a_{ij}$  (tabla # 3.1), manteniendo constante el valor de  $T_w$ , para la variación indicada de  $T_m$ .

De las curvas presentadas se observa:

- a.- El máximo valor de torque alcanzado por la turbina depende del valor de  $a_{23}$  dado por la tabla # 3.1.

# RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Primera Aproximación ( $T_w=0.04$  y  $T_m=2-4-8-10$ )

Figura 6 17

VALORES TIPICOS

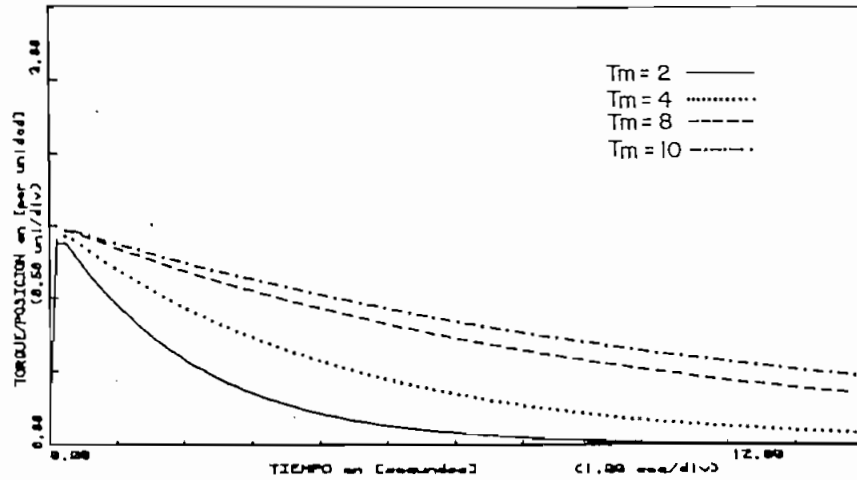


Figura 6 18

VALORES IDEALES

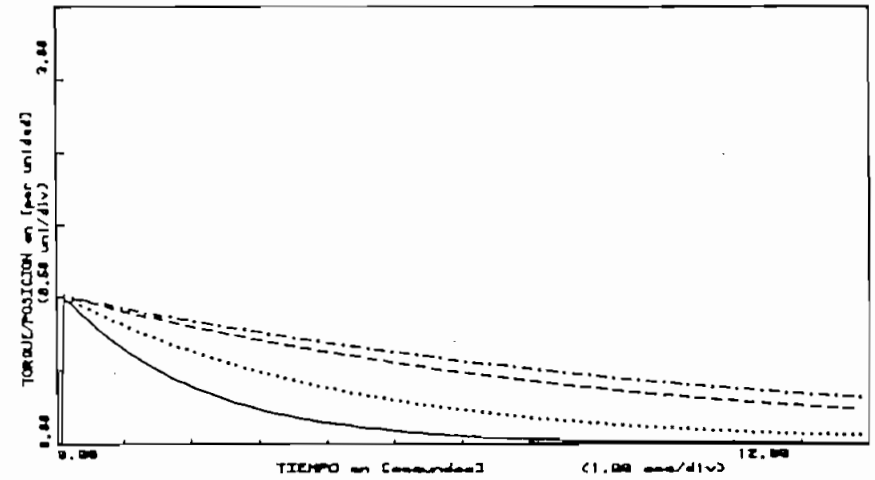


Figura 6 19

VALORES CALCULADOS

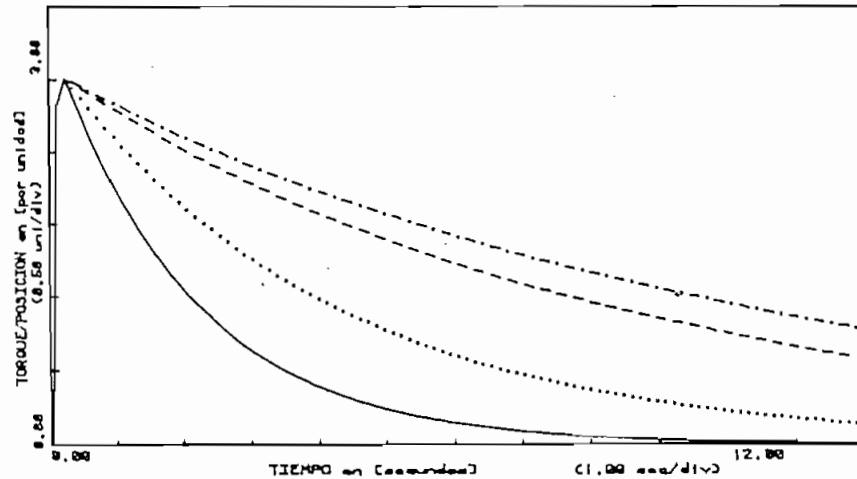
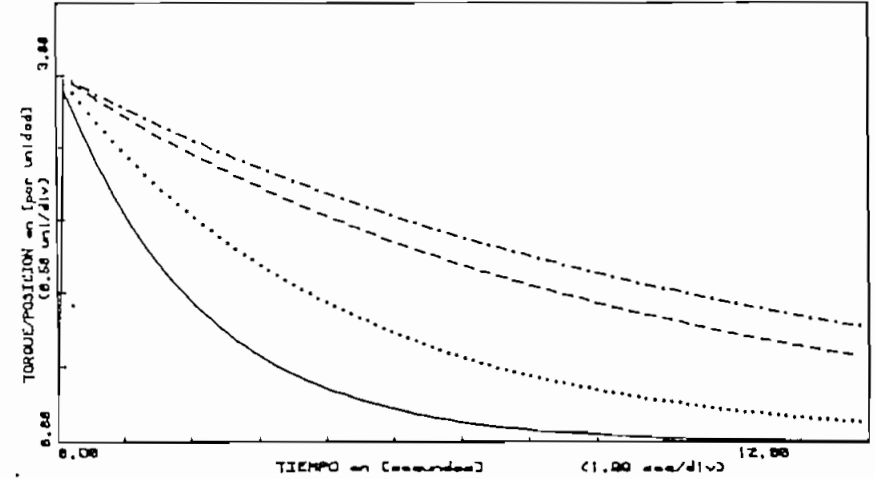


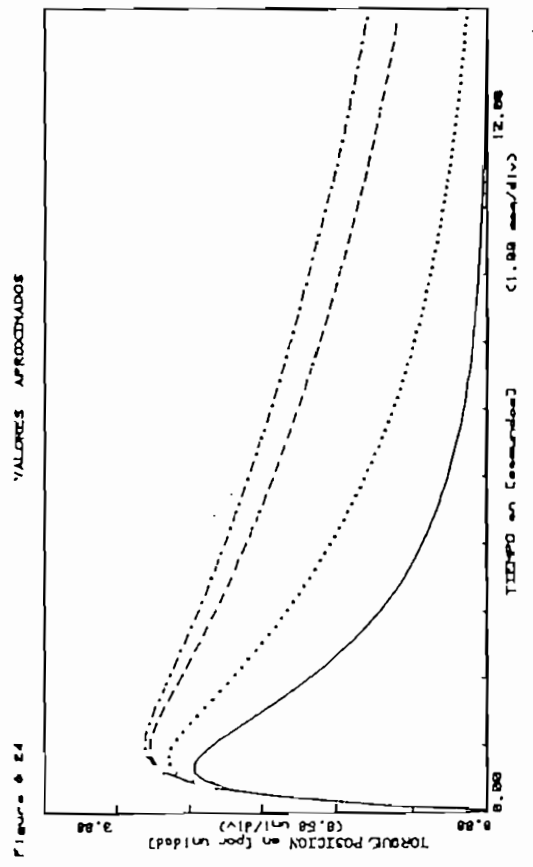
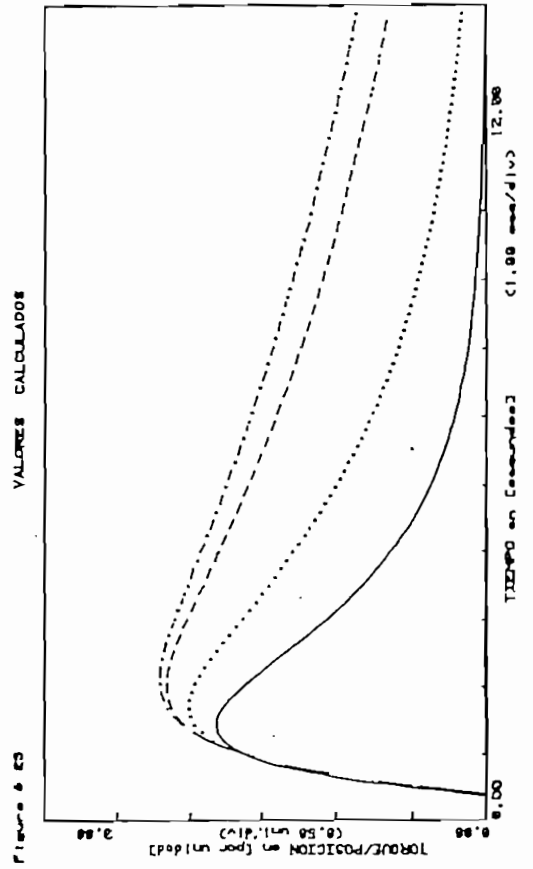
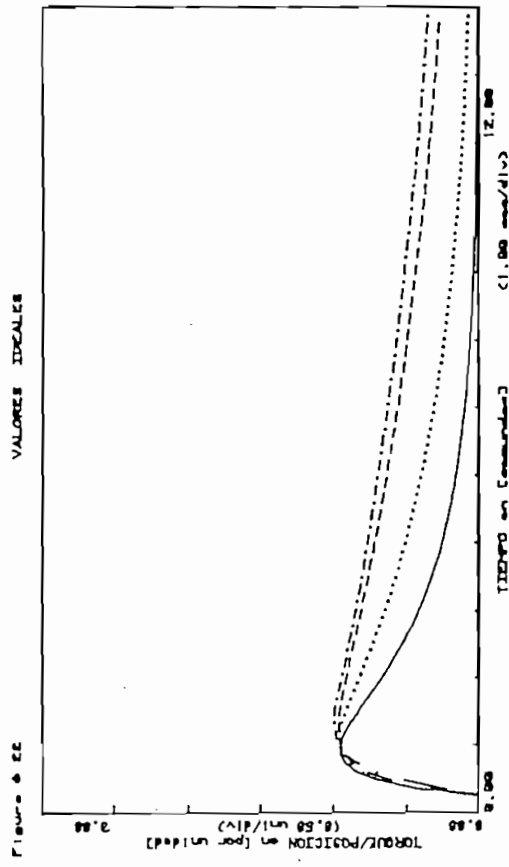
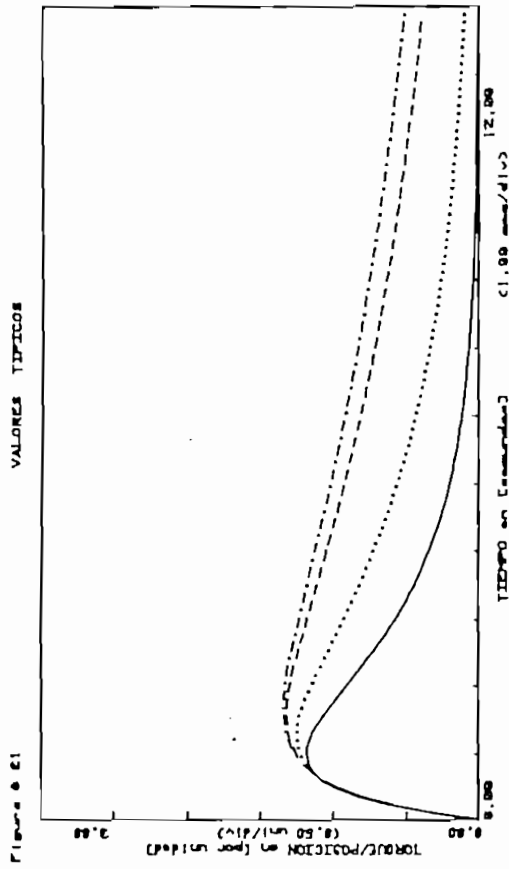
Figura 6 20

VALORES APROXIMADOS



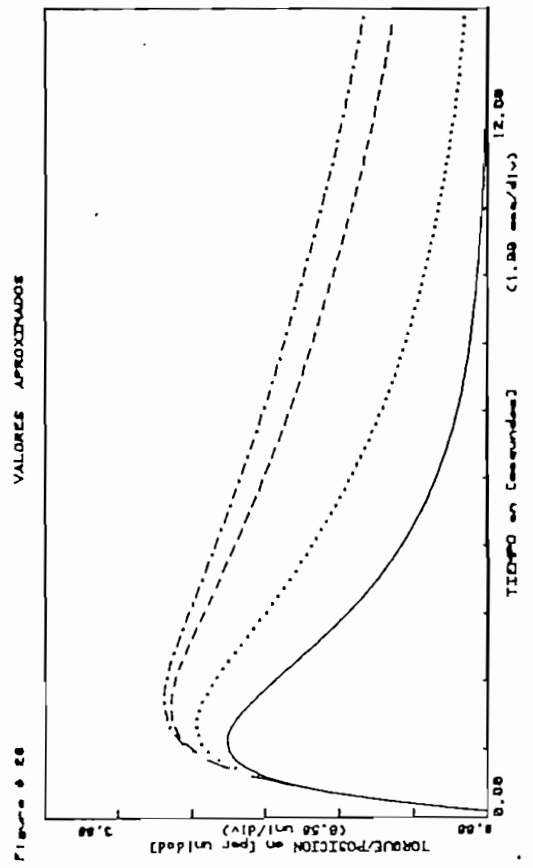
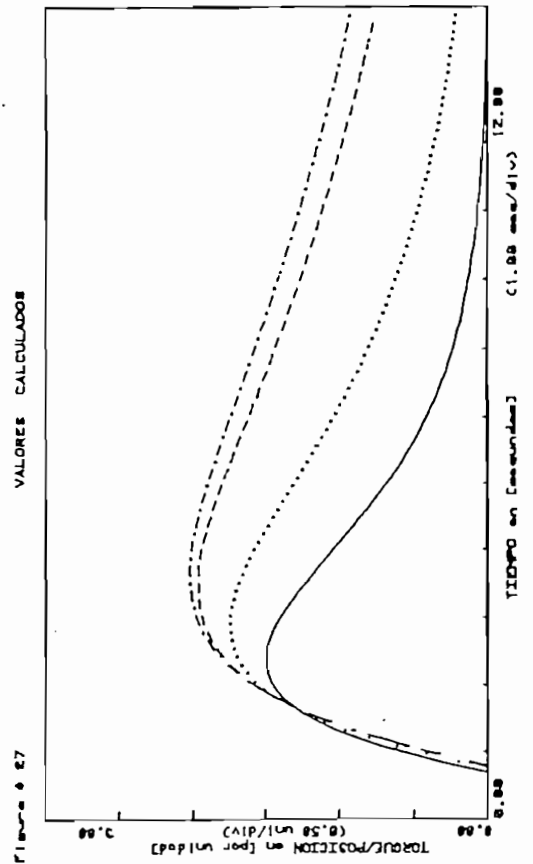
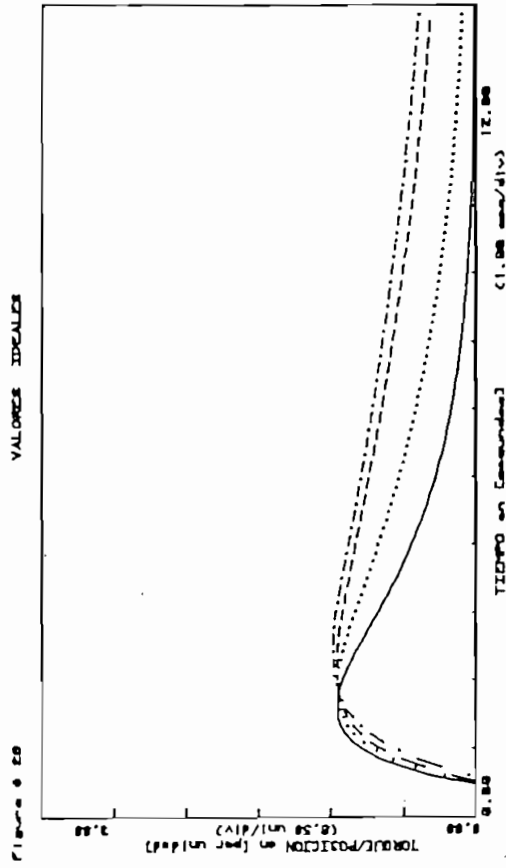
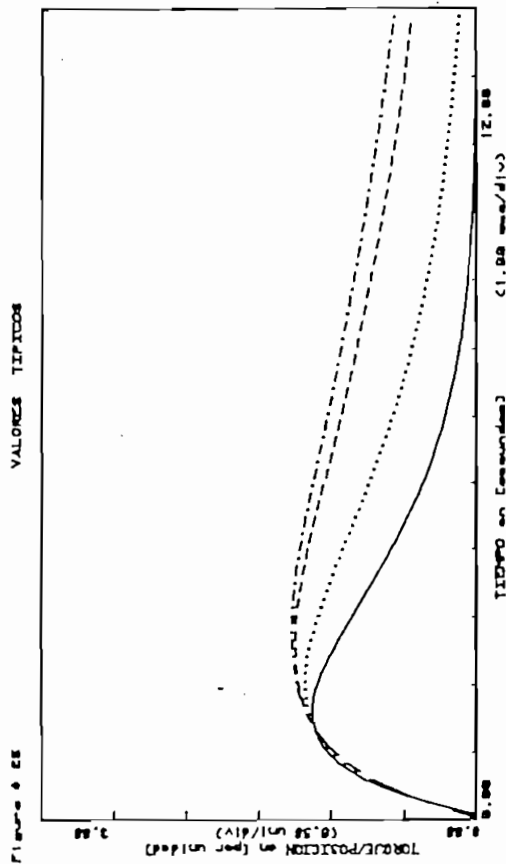
# RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Primera Aproximacion ( $T_w=0.5$  y  $T_m=2-4-8-10$ )



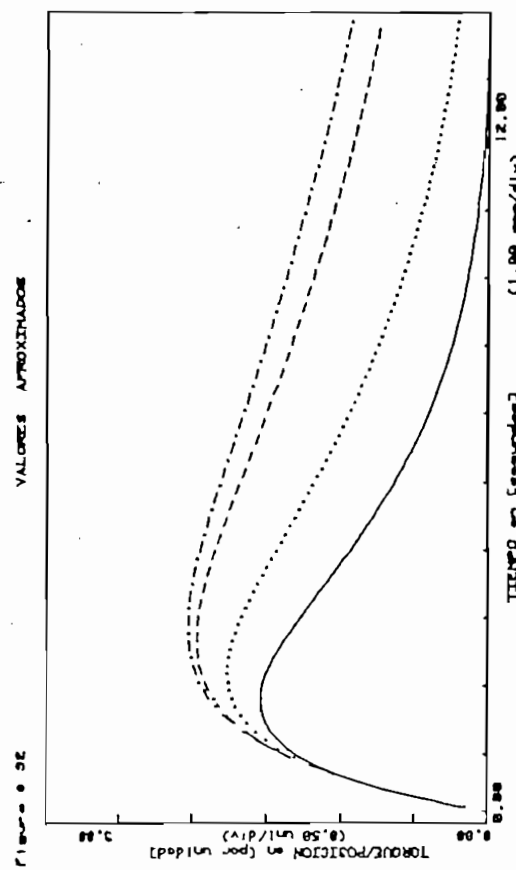
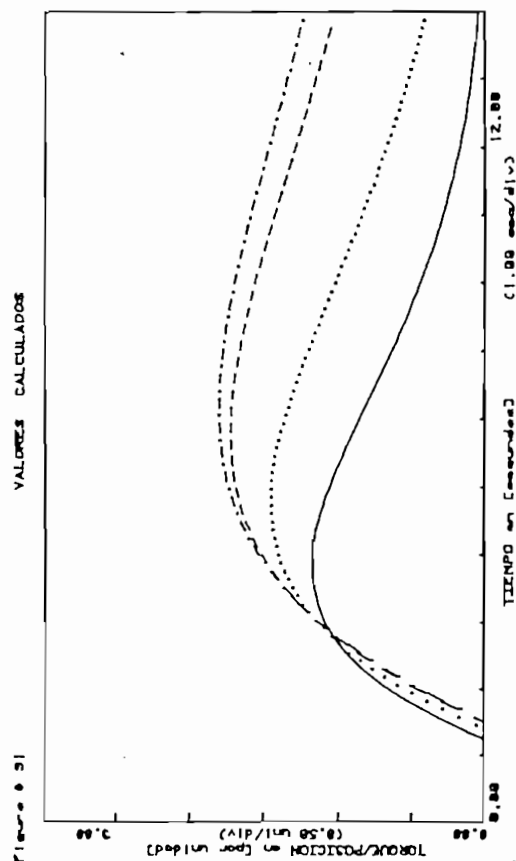
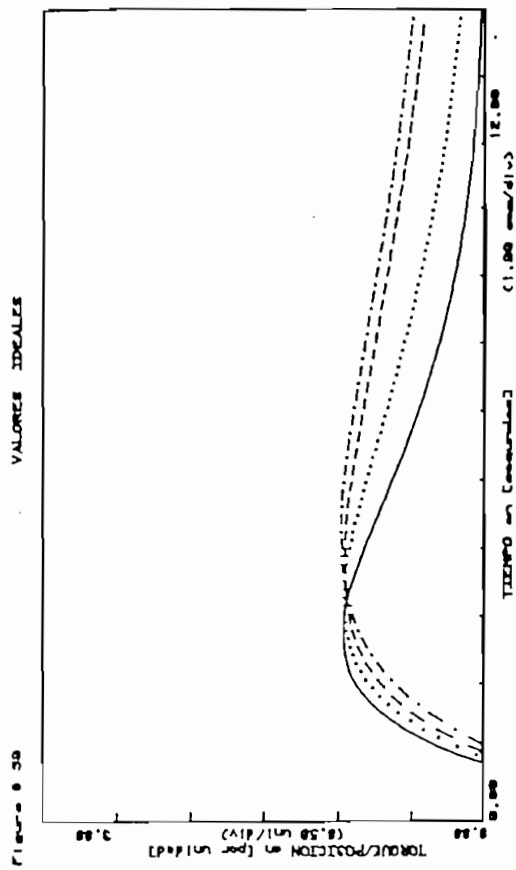
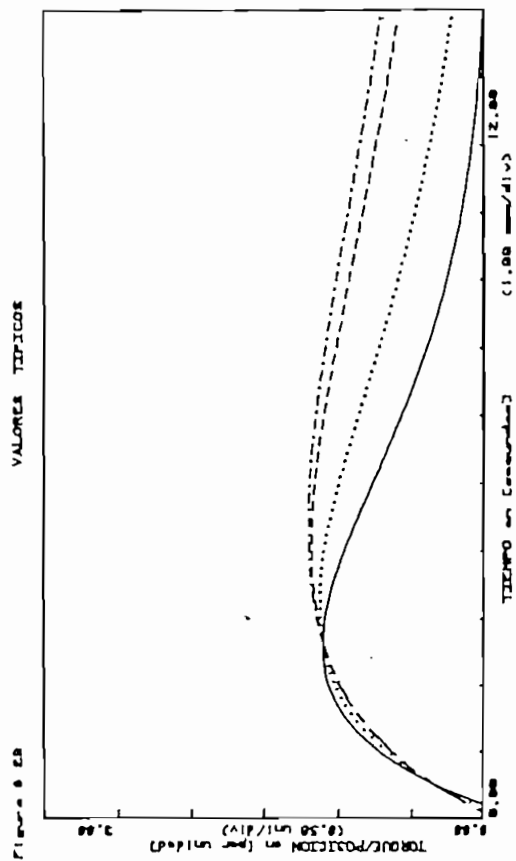
# RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Primera Aproximacion ( $T_w=1$  y  $T_m=2-4-8-10$ )



# RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Primera Aproximacion ( $T_w=2$  y  $T_m=2-4-8-10$ )



- b.- Cuanto mayor es el valor de  $T_m$ , la turbina necesita un tiempo mayor para llegar a un torque de cero.
- c.- El incremento del valor de  $T_w$ , aumenta el tiempo requerido para alcanzar el torque máximo y consecuentemente el tiempo de respuesta total.
- d.- A pesar de que  $a_{23}$  se mantiene constante, al aumentar  $T_w$ , el torque máximo alcanzado por la turbina tiende a disminuir.
- e.- De la comparación de las curvas # 1 a la # 16, con las curvas # 17 a la # 32, se observa que no existe desviación sustancial en la respuesta de la turbina, si se usa la ecuación general (3.1) o la primera aproximación (3.2), por lo cual es preferible usar ésta.

## III.B.3.- ECUACION IDEAL:

En la ecuación (2.30) se desprecia el término  $G$  ( $n/z$ ), relativo a la variación de la velocidad de la turbina respecto a un cambio de la posición del inyector, dado por la ecuación (2.31), obteniéndose así la ecuación (3.3).

$$F_t = \frac{a_{23} + A_0 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} \quad (3.3)$$

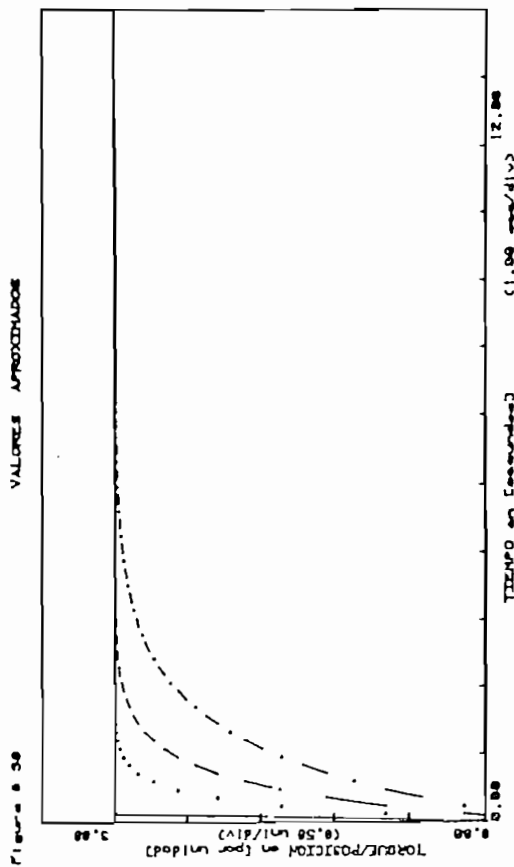
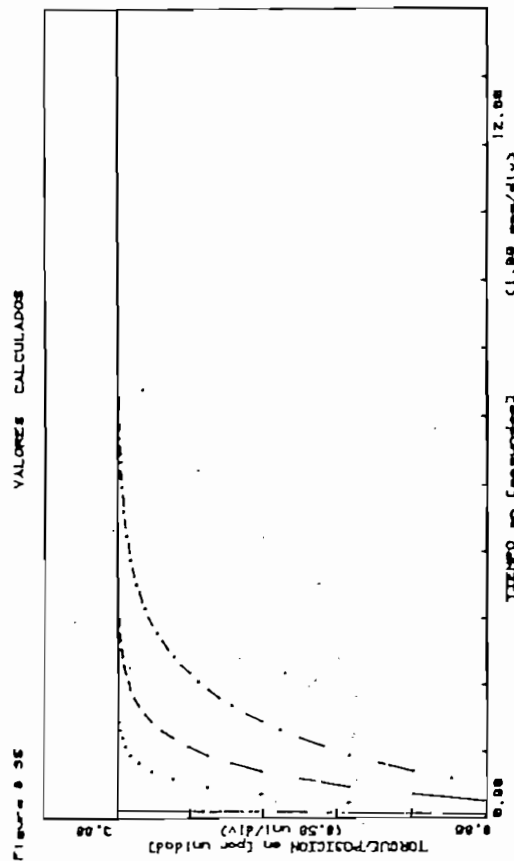
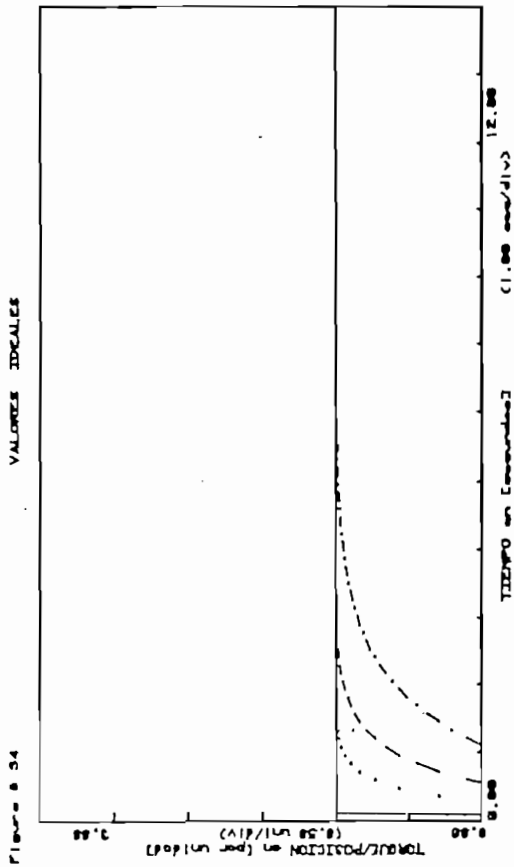
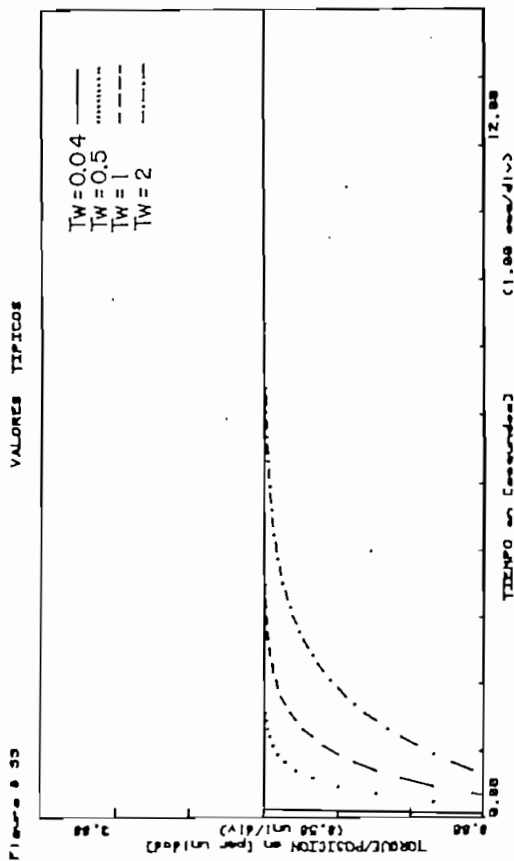
El término  $G$  puede ser despreciado cuando los cambios de velocidad de la turbina, ante una variación de la posición del inyector son muy pequeños. Este caso se presenta generalmente en sistemas de generación interconectados.

(24) (26) (35)

En base a esta ecuación (3.3), y de los valores de:  $a_{ij}$  (tabla # 3.1), y de  $T_m$ , se obtiene la respuesta en el tiempo ( $m/z$ ) torque/posición del inyector de la turbina. Las curvas resultantes de la simulación de la ecuación (3.3) se presentan en las figuras # 33 a la # 36, en las cuales se ha graficado, el torque/posición vs. el tiempo. Estas curvas se obtienen para la variación indicada de  $T_m$ , y los valores de la tabla # 3.1, ante una perturbación escalón unitario en la posición del inyector.

# RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Ecuación Ideal ( $T_w=0.04-0.5-1-2$ )





De las curvas presentadas se observa:

- a.- En la respuesta no influye  $T_m$ .
- b.- El máximo valor de torque que alcanza la turbina depende de  $a_{23}$ .
- c.- El incrementar el valor de  $T_w$ , aumenta el tiempo requerido para alcanzar el torque máximo consecuentemente incrementa el tiempo de respuesta total, y se introducen retardos en la respuesta de la turbina.

#### III.B.4.- ECUACION DE LA TURBINA DE LABORATORIO:

Un caso muy particular, es aquel para el cual el tiempo de arranque del agua es cero, o cercano a cero, caso presente en la turbina del laboratorio, en ella dadas las condiciones de funcionamiento y de la geometría de su tubería se obtiene un  $T_w$  de 0.04 segundos, que para efectos prácticos se puede considerar como cero.

En las ecuaciones (2.30), y (2.31) si se considera  $T_w=0$ , se obtienen las ecuaciones (3.4), y (3.5) que se indican a continuación:

$$F_t = a_{23} + a_{22}G \quad ( 3.4 )$$

$$G = a_{23}/(T_m D - a_{22}) \quad ( 3.5 )$$

Reemplazando el valor de  $G$ , en la ecuación (3.4), se obtiene la ecuación (3.6):

$$F_t = a_{23}T_m D / (T_m D - a_{22}) \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6), es la función de transferencia torque/posición del inyector ( $m/z$ ), para el caso particular del laboratorio, en el cual  $T_w=0$ .

En base a la ecuación (3.6), los valores calculados de la tabla # 3.1, y para variaciones de  $T_m$  de 2-4-8-10 segundos, se obtiene la respuesta en el tiempo de  $m/z$ . La curva resultante de la simulación de la respuesta de la ecuación (3.6), se presenta en la figura # 37, en la cual se han graficado para los valores anteriores y la ecuación de laboratorio, el torque/posición vs. tiempo, para cada  $T_m$ .

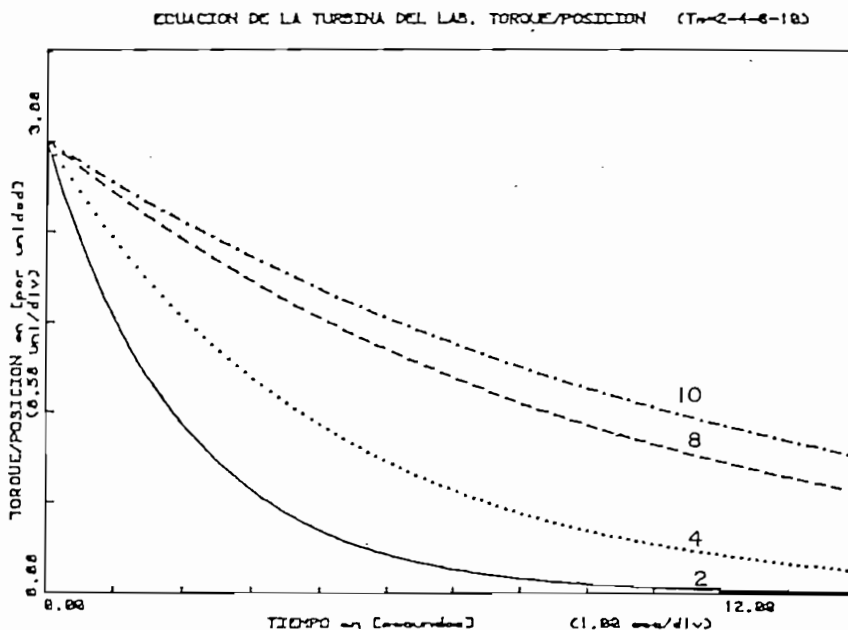
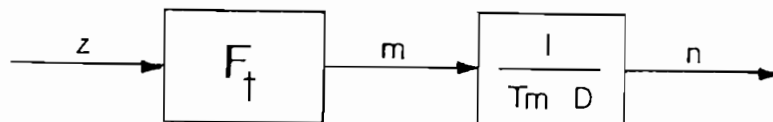


Figura # 37

De la curva # 37 se observa:

- a.- Cuanto mayor es el valor de  $T_m$ , la turbina necesita un tiempo mayor para llegar a un torque neto de cero.
- b.- Si se comparan las curvas de la ecuación general y la ecuación de primera aproximación, para los valores calculados, cuando  $T_w = 0.04$  segundos (figuras # 3 y 19), con la curva # 37 correspondiente a la ecuación (3.6) cuando se considera  $T_w=0$ , se aprecia que son exactamente iguales en forma, y puntos homólogos de las mismas tienen el mismo valor, lo cual justifica la aproximación del tiempo de arranque del agua a cero ( $T_w=0$ ) para la turbina del laboratorio.

A continuación a partir de la ecuación (3.6)  $m/z$ , se determinará la función de transferencia de la turbina de laboratorio  $n/z$  (velocidad/posición del inyector), para comparar el resultado obtenido cuando se midió experimentalmente la función  $m/z$  de ésta (03). Se plantea a continuación el diagrama de bloques equivalente del sistema turbina-inercia.



Donde:

$$F_t = a_{23}T_m D / (T_m D - a_{22}) \quad ( 3.6 )$$

Reduciendo el diagrama de bloques se obtiene la función de transferencia (3.7).

$$\frac{n}{z} = \frac{a_{23}/a_{22}}{\frac{T_m D + 1}{a_{22}}} \quad ( 3.7 )$$

Si se denomina:

$$C_6 = a_{23}/a_{22}$$

$$\tau_t = T_m/a_{22}$$

Se tiene la ecuación (3.8).

$$\frac{n}{z} = \frac{C_6}{\tau_t D + 1} \quad ( 3.8 )$$

La relación resultante (3.8), es exactamente igual a la ecuación que se midió para la turbina de laboratorio, lo cual ratifica una vez más que la asunción de  $T_w=0$  es correcta. (03)

A continuación se simulará la respuesta de la turbina de laboratorio en el tiempo, en base a la ecuación (3.8) y los valores calculados de la tabla # 3.1, para  $T_m=2-4-8-10$  segundos. La curva resultante se presenta en la figura # 38, donde se ha graficado la velocidad de la turbina/posición del inyector ( $n/z$ ) vs. el tiempo, para cada  $T_m$  dado, y para una perturbación tipo escalón unitario en la posición del inyector.

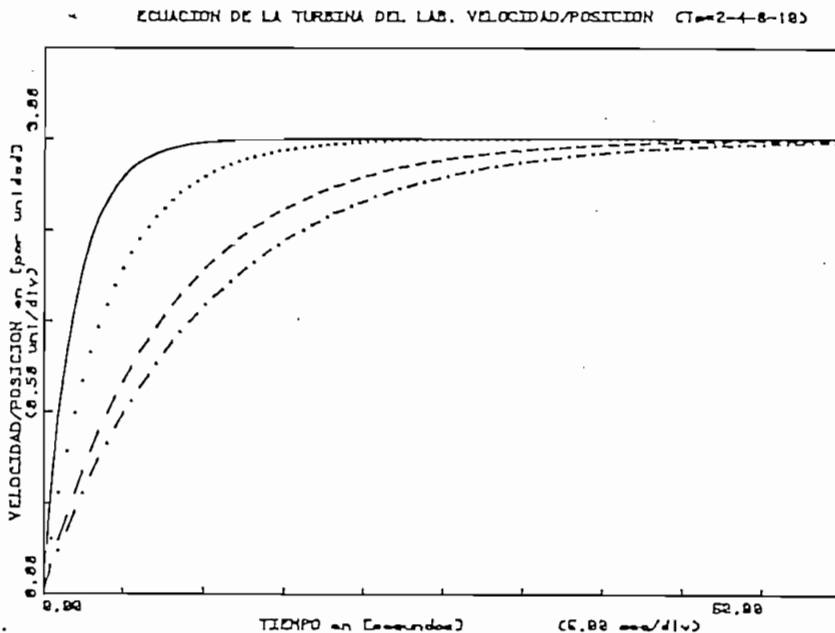


Figura # 38

De la curva dada en la figura # 38 se puede apreciar que a mayor  $T_m$  (mayor inercia), el tiempo necesario para que la turbina alcance la velocidad nominal es también mayor, lo cual determina que el tiempo de arranque mecánico es un factor muy importante para conocer la respuesta real de la turbina, ante una perturbación.

### III.C.- TENDENCIA GENERAL DE LA RESPUESTA DE LA TURBINA

En todas las gráficas presentadas a excepción de la ecuación ideal, se puede apreciar que hay dos fases claramente marcadas.

En la primera, el torque disponible se va incrementando paulatinamente hasta alcanzar su valor máximo en tiempos relativamente cortos, respecto al tiempo total graficado. La mayor o menor velocidad con la que se alcanza el torque máximo depende fundamentalmente del tiempo  $T_w$ , y así conforme se incrementa este tiempo también se incrementa el tiempo necesario para alcanzar el torque máximo, y cuando  $T_w=0$  o semejante a cero, el torque máximo es alcanzado inmediatamente como en la turbina del laboratorio. Se cumple así la primera fase de la respuesta.

En la segunda fase, el torque máximo comienza a disminuir desde el máximo hasta llegar a un valor de cero. La mayor o menor velocidad con la que llegue a cero dependerá de  $T_m$ , el tiempo de arranque mecánico del sistema (Inercia).

Entonces se puede decir que en la respuesta de una turbina existen dos fases claramente marcadas, las cuales son dominadas por los parámetros:  $T_w$  para la primera fase y  $T_m$  para la segunda fase.

III.D.- EFECTO DE LOS PARAMETROS  $T_m$  y  $T_w$ III.D.1.- EFECTO DE  $T_m$  SOBRE LA RESPUESTA DE LA TURBINA

Tal como se indicó en el Capítulo II,  $T_m$  es el tiempo necesario para que el sistema total alcance la velocidad de régimen. Para pequeños  $T_m$  el sistema se vuelve muy sensible a las perturbaciones, y reaccionará muy rápidamente, con el inconveniente de que la turbina puede alcanzar altos valores de velocidad (sobretiros), lo que produce variaciones bruscas de la frecuencia de generación.

Por otra parte a grandes  $T_m$  el sistema se vuelve menos sensible a las perturbaciones, y por lo tanto reaccionará lentamente como respuesta a las mismas, lo que también resulta inconveniente, ya que hace de la turbina-inercia un sistema lento.

De lo expuesto anteriormente, y de la referencia (26) se concluye que es necesario para el diseño de las turbinas mantener el valor de  $T_m$  dentro del rango recomendado (6 a 12 seg.), para no tener sistemas ni lentos ni sensibles.

III.D.2.- EFECTO DE  $T_w$  SOBRE LA RESPUESTA DE LA TURBINA

A continuación se presentan los gráficos # 39 al 42 en los cuales se observa la respuesta en el tiempo, cuando se simula la ecuación ideal y la ecuación general para un  $T_m = 10$  s, y para cada valor dado a  $T_w$  (0.04-0.5-1-2 s).

En las curvas se aprecia que conforme se incrementa el valor de  $T_w$ , desde cero a 2 segundos, se puede apreciar que se va introduciendo un tiempo de retardo en la respuesta de la turbina. También el incremento de  $T_w$  reduce el máximo torque alcanzado cuando las constantes  $a_{ij}$  toman los valores calculados y aproximados a pesar de que  $a_{23}$  no se ha modificado. Por lo tanto un incremento de  $T_w$  puede ser benéfico para disminuir los sobretiros de la turbina, pero a la vez puede introducir retardos en la respuesta del sistema.

En estas curvas también se puede apreciar que, cuando  $T_w$  alcanza un valor alrededor de 2 segundos, la curva dada por la ecuación general se aproxima en su fase inicial a la curva obtenida para la simulación de la ecuación ideal.

Dada esta similitud de respuestas en la fase inicial, se puede usar la ecuación ideal de la turbina (3.4) para simular la respuesta del lazo, ya que en el transcurso de los primeros segundos de reacción de la turbina se ejecutará la acción de control.



RESPUESTA A ESCALON UNITARIO DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA

Ecuaciones General e Ideal. ( $T_m=10$  y  $T_w=0.04-0.5-1.0-2.0$ )

Figura 6 VALORES TEÓRICOS

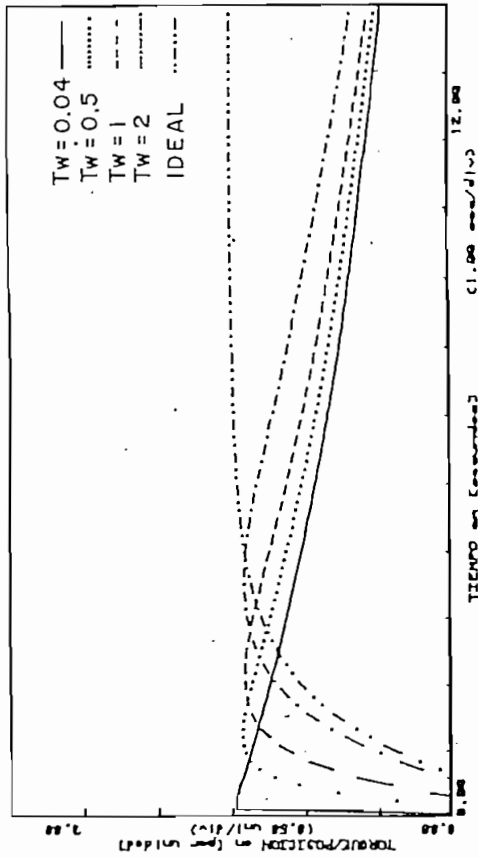


Figura 6 VALORES IDEALES

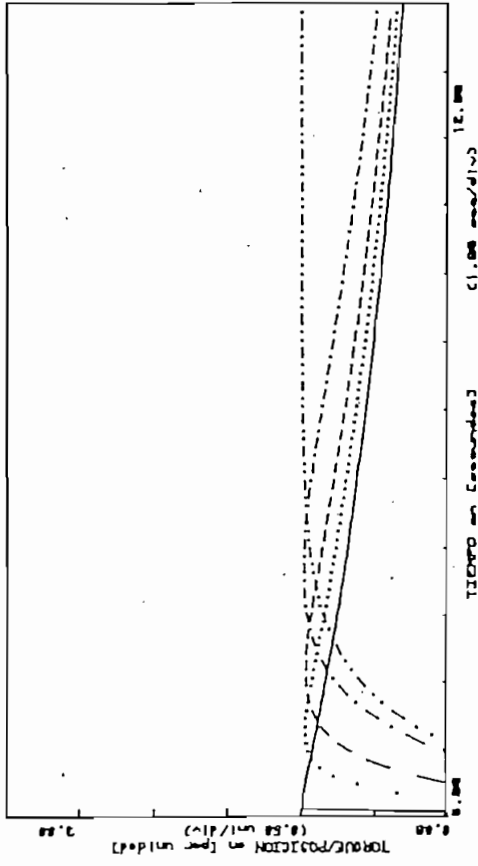


Figura 6 VALORES CALCULADOS

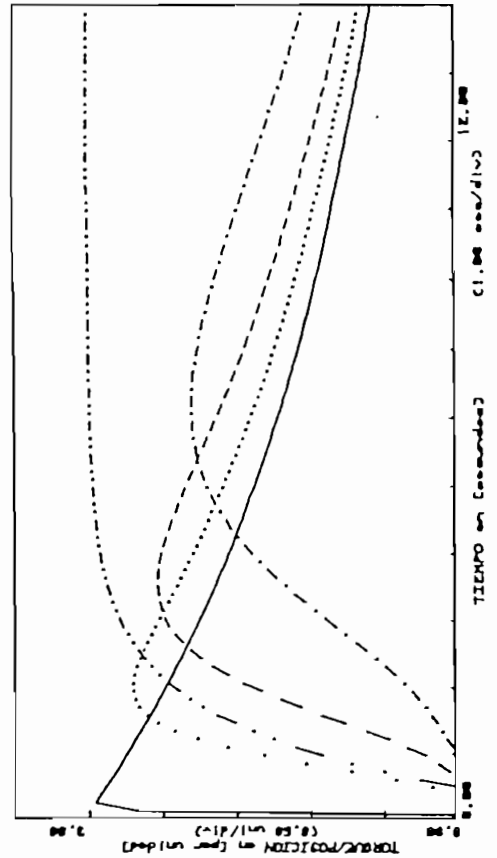
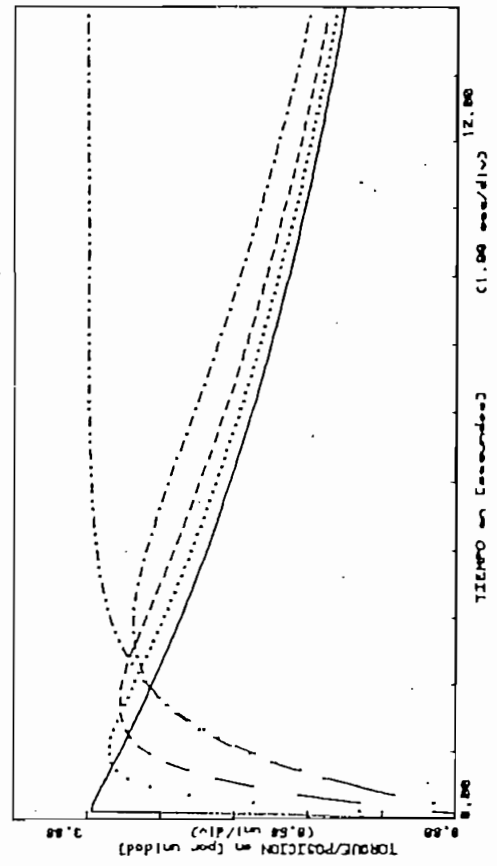


Figura 6 VALORES APROXIMADOS



III.E. - EFECTO DE  $a_{23}$  SOBRE LA RESPUESTA DE LA TURBINA

La constante  $a_{23}$  es la variación del torque entregado por la turbina, ante una variación en la posición de la aguja del inyector, por tanto representa la sensibilidad de la turbina a un cambio de posición de la aguja del inyector.

Lo ideal es que ante 1 unidad de variación en la posición de la aguja del inyector, se produzca una variación en el torque de la turbina de 1 unidad, lo que expresado en p.u significa un  $a_{23}=1$  (valor ideal tabla # 3.1). Tener valores mayores que 1 para la constante  $a_{23}$ , representa una mayor sensibilidad o mayor ganancia en el torque de la turbina ante un cambio en la posición del inyector. El caso típico es de  $a_{23} = 1.5$ , lo cual significa que a la variación de una unidad en la posición del inyector se tendrá una variación de 1,5 unidades en el torque de la turbina. Valor que es el usual en algunas turbinas reales en la cual  $T_m$  es alto y  $T_w$  sea mayor que 2.

En el caso particular de la turbina del laboratorio, se tiene que el valor de la constante  $a_{23}$  es de 2.5, significa que la turbina es muy sensible a los cambios de posición del inyector, y así a una unidad de cambio de la posición del inyector se tienen 2.5 unidades de variación en el torque de la turbina. Condición que se debe en gran parte

al valor pequeño de  $T_w$  del sistema de laboratorio, dado por la corta tubería de presión, y la bomba encargada de suministrar la altura de cabeza de agua.

Tal como se observa al comparar las diferentes gráficas de valores calculados, y valores aproximados, correspondientes a la ecuación general y a la ecuación con primera aproximación, se verifica que la respuesta real (todos los  $a_{ij}$  calculados), y la respuesta aproximada (todos los  $a_{ij}$  son los ideales excepto  $a_{23}$ ), son muy semejantes, dejando así remarcado lo fundamental del valor de  $a_{23}$ .

### III.F.- UTILIZACION DE LA ECUACION DE LA TURBINA PARA EL DESARROLLO DEL LAZO DE CONTROL

Tal como se comentó en los puntos anteriores la utilización de la ecuación de la turbina, depende del correcto valor de las constantes estáticas ( $a_{ij}$ ) de  $T_m$  y  $T_w$  que la describen. Más para el diseño y simulación de un lazo de control no es de interés el tener una función de transferencia demasiado grande, y es preferible, para poder analizar la respuesta del sistema total, una ecuación sencilla, pero cuya respuesta sea similar a la respuesta del sistema real dado por la ecuación general, con los valores de  $a_{ij}$  dados en la tabla # 3.1 y por los valores de  $T_m$  y  $T_w$  recomendados, dados en la tabla # 3.2, dada a continuación:

TABLA # 3.2

CONSTANTE	SEGUNDOS
$T_m$	6 - 12
$T_w$	2 - 6

Como se ha visto para estos valores, de  $T_m$  y  $T_w$  la respuesta con la primera aproximación, de la ecuación ideal y de la ecuación general serán parecidos en los primeros segundos de operación de la turbina, en los cuales se ejecutarán las acciones correctivas de control. Más siempre que sea posible se deberá realizar una simulación usando ambas ecuaciones para la combinación  $T_m$  y  $T_w$  que se tenga y así tener una idea de que tan iguales serán las respuestas.

Para la turbina de laboratorio se presenta un caso muy particular debido a que  $T_m=8$  s, y  $T_w=0.04$  s, si bien  $T_m$  se encuentra dentro de los rangos recomendados,  $T_w$  esta totalmente fuera de ese rango, ya que  $T_w$  tiende a cero, lo que equivale a tener una cortísima tubería de presión, que además repercute sobre el valor de la constante  $a_{23}$ , la cual tiene un valor de 2.5, es decir es una turbina muy sensible y de alta velocidad de respuesta. Esta es una condición particular del sistema de laboratorio, debido a que la altura de caída de agua se suministra mediante una bomba. Por lo tanto es necesario aplicar la ecuación general para  $T_w = 0$ , o la ecuación que se midió en el laboratorio directamente (ver referencia 03), la comparación de ambas respuestas se comentó en la sección III.B.4.

### III.G.- CONCLUSIONES

1.- El valor de la constante estática  $a_{23}$  es de fundamental importancia en la respuesta de la turbina. El valor  $a_{23}$  indicará que tan sensible es la respuesta de la turbina ante variaciones de la posición del inyector.

2.- Debe tenerse mucho cuidado sobre todo en mini y micro generación, de los valores que tome  $T_m$ , y mantener los mismos dentro del rango de 6 a 12 segundos, para que la turbina no sea ni muy sensible ni muy lenta a las perturbaciones y a las acciones de control.

3.- Debe tenerse en cuenta que el valor de  $T_w$ , esta dentro del rango dado en la tabla # 3.2.

4.- La ecuación deducida para la turbina del laboratorio, solo puede ser usada para los casos en los cuales  $T_w = 0$ , caso que no se presenta en la realidad, ni aún en micro generación. El caso fue tratado en la sección III.B.4, y es el que se usará debido a que sobre éste sistema se realiza la construcción del regulador.

5.- La finalidad del presente trabajo no es la de un profundo estudio del efecto de la variación de los diferentes  $a_{ij}$ , sobre la respuesta de la turbina, pero sería algo muy importante de realizar sobre todo para ejecutar correctos diseños de circuitos hidráulicos.

## CAPITULO IV

### ANALISIS DEL SISTEMA OLEOMECANICO REALIMENTADO

#### IV.A.- JUSTIFICACION Y REQUERIMIENTOS

El uso de los sistemas oleomecánicos de posición, se debe a que los inyectores de las turbinas hidráulicas, a la vez que presentan alta resistencia a la acción de control, requieren de precisión en su movimiento. Los sistemas oleomecánicos proporcionan fuerza suficiente, reducidas dimensiones respecto a sistemas de potencia equivalente (por ejemplo un motor eléctrico), y buena capacidad de control sobre ellos.

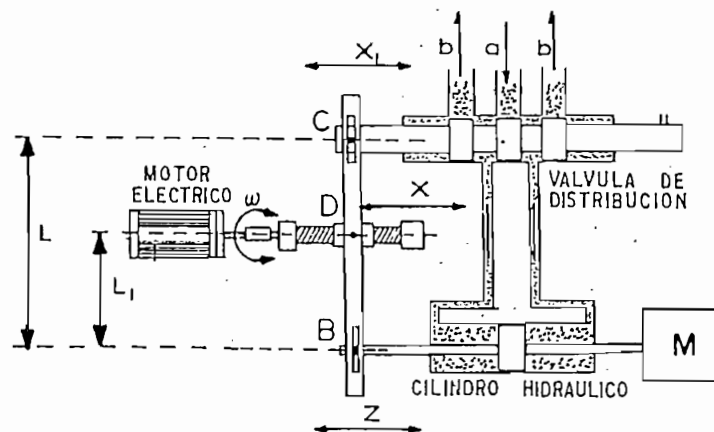


Figura # 4.1

La figura # 4.1 representa un esquema del servomecanismo hidráulico de posición, por medio del cual una masa M, se desplaza en respuesta a un cambio de posición del punto D de la palanca CB.

El sistema consta de: una servo-válvula (cuatro vías), un actuador (cilindro-pistón), y una varrilla de realimentación.

#### IV.B. - DESCRIPCION FUNCIONAL.

Cuando el punto D cambia de posición (se desplaza horizontalmente una distancia  $x$  fija), la palanca gira instantáneamente con respecto al punto B, y el punto C se desplaza haciendo que el carrete de la servo-válvula se mueva hacia la derecha. Esto permite que el aceite fluya hacia la cámara izquierda del actuador. Al producir una diferencia de presión entre las dos cámaras, el émbolo del actuador se mueve, resultando un desplazamiento de la masa. El punto B se desplaza y la palanca CB, gira con respecto a D. De esta forma, C se desplaza hacia la izquierda, volviendo el carrete de la servo-válvula a la posición original (centrada). Como resultado global a un cambio de posición del punto D (causa), se produce un desplazamiento en la masa M (efecto).

## IV.C.- ECUACION DE TRANSFERENCIA DEL CIRCUITO HIDRAULICO.

En un sistema oleomecánico predominan tres efectos, el primero relativo al paso de aceite através de la válvula distribuidora (ecuación # 4.1), el segundo relativo al llenado del cilindro (ecuación # 4.7) que lleva consigo el desplazamiento del pistón y de la masa, y el tercero relativo a la varilla de realimentación que une a los dos anteriores sistemas (ecuación # 4.9).

Las ecuaciones del sistema oleomecánico a utilizarse se las determina a continuación:

## IV.C.1.- VALVULA DE DISTRIBUCION.-

$$q = C_d A_o V_a \quad ( 4.1 )$$

donde:

$q$  = Flujo de aceite

$C_d$  = coeficiente de descarga

$A_o$  = Area del orificio

$V_a$  = Velocidad teórica en la vena contracta del chorro.

En la válvula de distribución, el área  $A_o$  es el



producto de la anchura del orificio por el desplazamiento de la válvula:

$$A_0 = W \cdot x_1 \quad (4.2)$$

La velocidad teórica del aceite es:

$$V_a = \sqrt{(2P/\Gamma)} \quad (4.3)$$

donde:

P = Caída de presión a través del orificio.

$\Gamma$  = Densidad del fluido.

Sustituyendo estas ecuaciones en (4.1):

$$q = C_d W x_1 \sqrt{(2P/\Gamma)} \quad (4.4)$$

Los valores de  $C_d$  varían entre 0.6 y 0.8. Y considerando la caída de presión prácticamente constante, se puede establecer: (10) (15)

$$q = K_1 x_1 \quad (4.5)$$

En la cual la constante de la válvula es:

$$K_1 = C_d W \sqrt{(2P/\Gamma)} \quad (4.6)$$

## IV.C.2.- PISTON Y CILINDRO.-

El movimiento del pistón está expresado matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$q = A_p V = A_p dz/dt \quad (4.7)$$

Donde:

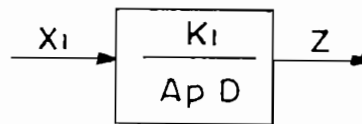
$A_p$  = Area del pistón.

$V$  = Velocidad de desplazamiento del pistón.

Combinando con las ecuaciones (4.5) y (4.6) se llega a:

$$Dz/x_1 = K_1/A_p \quad (4.8)$$

El diagrama de bloques asociado al conjunto pistón, cilindro y válvula, se presenta a continuación:



## IV.C.3.- VARILLA DE REALIMENTACION

La realimentación del sistema oleomecánico; se hace mediante una varilla, la cual se representa en una posición genérica en el gráfico # 4.2.

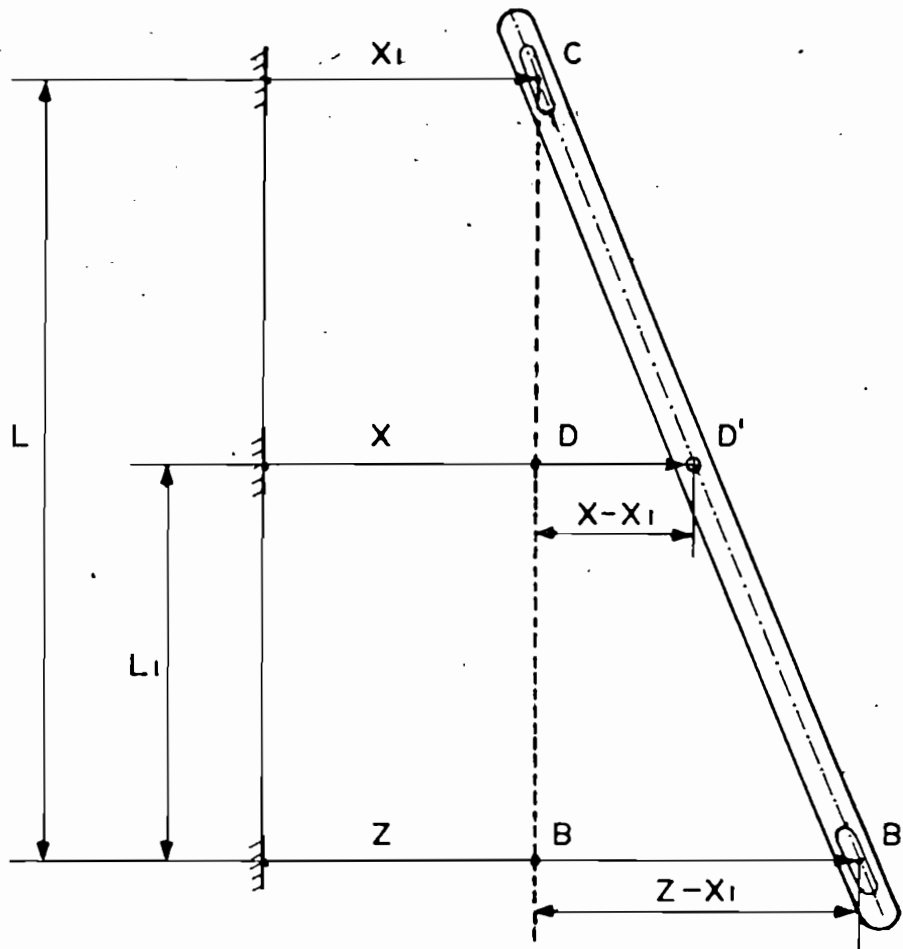


FIGURA # 4.2

Donde:

$x_1$  = Es el desplazamiento sufrido por el carrete de la válvula.

$x$  = Es el desplazamiento o señal de entrada.

$z$  = Es el desplazamiento del eje del cilindro.

$L_1$  = Es la longitud entre los puntos B y D de la varilla.

$L$  = Es la longitud entre los puntos B y C de la varilla.

La función de transferencia de este arreglo se la puede conseguir fácilmente haciendo uso de la teoría de triángulos semejantes: (09) (10) (15)

$$\Delta BCB' = \Delta D'DC$$

De donde:

$$(z - x_1)/L = (x - x_1)/(L - L_1)$$

Despejando  $x_1$  se tiene:

$$x_1 = \frac{L}{L_1}x - \left(\frac{L}{L_1} - 1\right)z \quad (4.9)$$

#### OBTENCION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA

Una vez determinadas las ecuaciones de los diferentes subsistemas, es posible obtener la función de transferencia del sistema oleo-mecánico de la siguiente manera:

Reemplazando el valor  $x_1$  de la ecuación (4.9) en (4.8) se tendrá:

$$DA_p z/K_1 = (1 - L/L_1)Z + (L/L_1)x \quad (4.10)$$

A partir de la ecuación (4.10) se llega a la ecuación total del sistema realimentado:

$$\frac{z}{x} = \frac{L / (L - L_1)}{(A_p/K_1) (L/(L - L_1))D + 1} \quad (4.11)$$

Por facilidad se define:

$$(A_p/K_1)(L/L - L_1) = \tau_g$$

$$L/(L - L_1) = K_R$$

$$A_p/K_1 = C_3$$

Reemplazando estas variables, se tiene la ecuación de transferencia:

$$\frac{z}{x} = \frac{K_R}{1 + D\tau_g} \quad ( 4.12 )$$

Expresado el sistema hidráulico mediante diagramas de bloques se tiene:

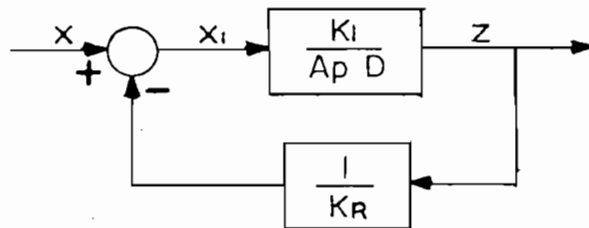


Figura # 4.3

IV D.- CALCULO DE LAS CONSTANTES DEL SISTEMA  
OLEO-MECANICO DEL LABORATORIO.

Los elementos que componen el sistema óleo-mecánico, que esta montado en la turbina del laboratorio, tienen las siguientes características, sobre las cuales se hacen las pruebas necesarias para determinar las constantes del sistema:

CILINDRO:

TIPO: Doble efecto - Doble eje.  
 CARRERA NOMINAL: 6 Centímetros (2.4").  
 PRESION MAXIMA: 2000 psi.  
 DIAMETRO DEL EJE: 2.86 Centímetros (1<sup>1</sup>/<sub>8</sub>").  
 DIAMETRO DE PISTON 8.9 Centímetros (3<sup>1</sup>/<sub>2</sub>").  
 AREA DE PRESION A<sub>p</sub> (Area de pistón - Area de eje)  
 = 55.7 cm<sup>2</sup> = 8.62 pulg<sup>2</sup>.

VALVULA DE DISTRIBUCION:

TIPO: 4 vías tres posiciones que originalmente era de centro cerrado, y se modificó a centro abierto.  
 MANGUERAS DE ALTA PRESION: 4 (FLEXIBLES)

BOMBA DE ACEITE:

TIPO: Engranajes externos.  
 CAPACIDAD: 1.5 G. P. M. (0.0946 Lts/seg)  
 PRESION MAXIMA DE OPERACION: 500 psi.  
 POTENCIA NOMINAL: 1 HP.  
 VELOCIDAD NOMINAL: 1750 R. P. M.

IV.D.1.- DETERMINACION EXPERIMENTAL DE C<sub>3</sub>.

Reemplazando en la ecuación (4.8) el valor de C<sub>3</sub> se tiene:

$$\frac{dz/dt}{x_1} = \frac{1}{C_3} \quad (4.13)$$

Donde:

$x_1$  = desplazamiento del carrete de la válvula.

$dz/dt$  = velocidad del pistón del cilindro.

Observando la ecuación (4.13), se aprecia que C<sub>3</sub> se puede determinar a partir de la relación velocidad del pistón vs. desplazamiento del carrete de válvulas.

La obtención experimental de la curva  $x_1$  (desplazamiento del carrete de la válvulas) vs.  $dz/dt$  (velocidad de desplazamiento del pistón) se presenta en la figura # 4.4, en la cual se ha graficado la velocidad del piston vs. desplazamiento del carrete, para diferentes posiciones de la válvula de alivio y división de caudales con que cuenta el sistema. La válvula de división de caudales tiene 10 posiciones para las cuales se han hecho las curvas respectivas.

La descripción del proceso para la obtención de dichas curvas se describe detalladamente en la referencia (03)

PARA DIFERENTES POSICIONES DE LA VALVULA DIVISORA DE CAUDAL DE CAUDAL

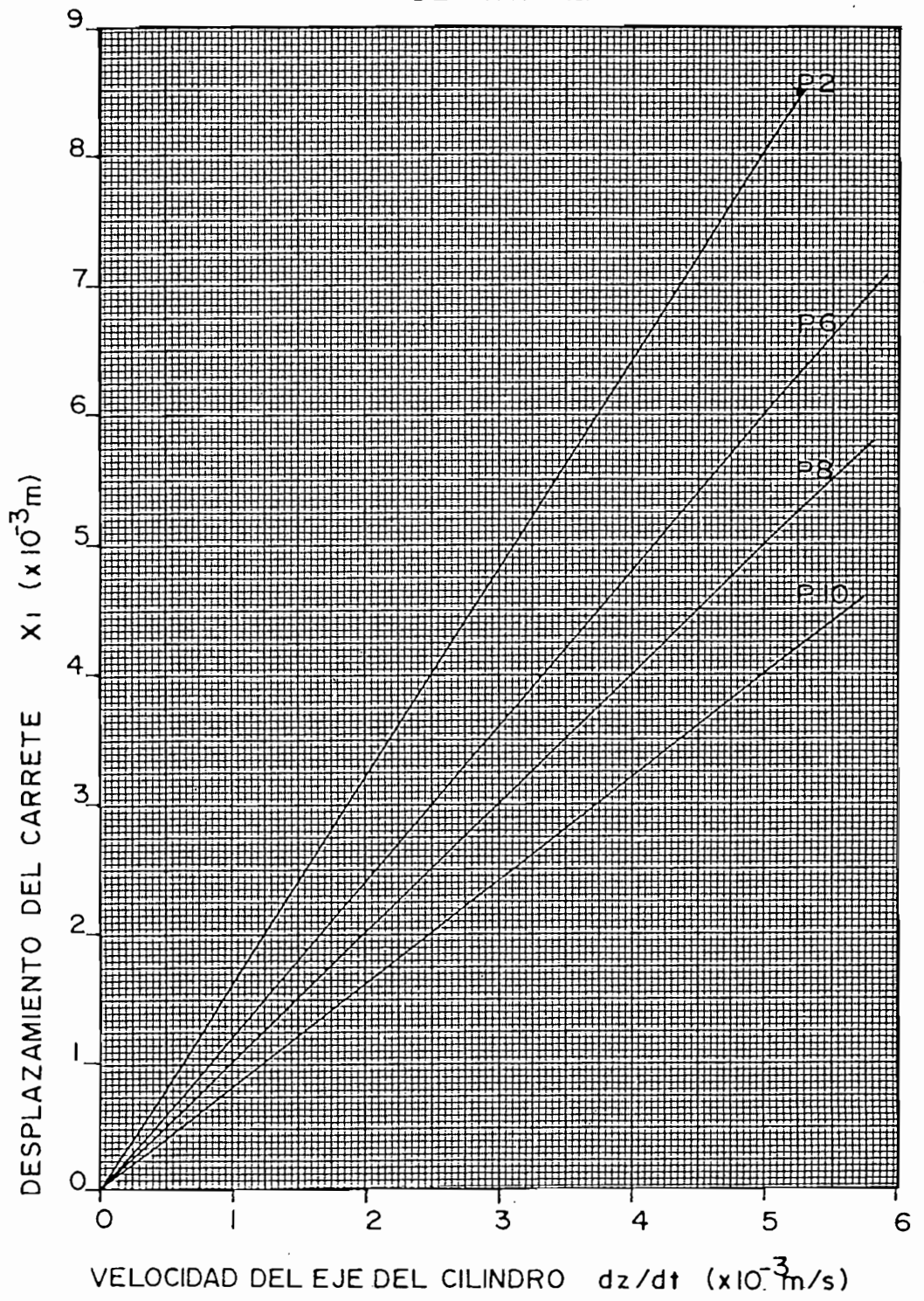


FIG. 4.4



Para un caudal dado por las posiciones de la válvula divisora, tal como se indica en la figura # 4.4, se han obtenido los siguientes valores de  $C_3$ :

CAUDAL	VALOR DE $C_3$
Posición 2	1.6 seg.
Posición 10	0.8 seg.

El valor de  $C_3 = 1.6$  seg, será utilizado a lo largo del trabajo, por considerarse como óptimo para el diseño.

#### IV.D.2.- SELECCION DE $K_R$ Y DETERMINACION DE $\tau_g$

La ubicación del punto D, del desplazamiento de la entrada x (fig. # 4.1) sobre la varilla del sistema oleomecánico, solo presentará problemas cuando (punto D) se halle muy próximo (prácticamente coincidiendo) con uno de los puntos C o B. Por esta razón se podrá posicionar el punto D sobre cualquier lugar de la varilla de realimentación comprendido entre los puntos C y B, teniendose para esta disposición, diversos valores de  $K_R$  y consecuentemente de  $\tau_g$ .

La relación que se adoptó para el gobernador, se la describe a continuación:

Longitud entre puntos C y B:  $L = 63$  cmts.

Longitud de la relación BD:  $L_1 = 31.5$  cmts.

Relación de longitudes:  $L/L_1 = 2$

Por tanto las relaciones  $K_R$  y  $\tau_g$  serán:

$$K_R = 2$$

$$\tau_g = K_R \cdot C_3 = 3.2 \text{ seg.}$$

Las relaciones anteriores serán utilizadas para la calibración y simulación posterior de todo el lazo de control.

## IV E.-

CONCLUSIONES

1.- En general los sistemas hidráulicos proporcionan gran comodidad de instalación y calibración.

2.- En la instalación montada en el laboratorio será adoptado un sistema básicamente igual al descrito, aunque debe anotarse que la fuerza necesaria para mover el inyector, es prácticamente nula debido a las dimensiones reducidas del circuito hidráulico.

3.- De los análisis realizados, se puede concluir que una amplia variación de  $C_3$ , y de  $K_R$ , y por consiguiente de  $\tau_g$ , tienen efectos beneficiosos en la calibración del sistema oleomecánico para una mejor estabilidad y respuesta de todo el lazo de control.

## CAPITULO V

### ANALISIS DEL SERVOMOTOR AUXILIAR DE POSICION

#### V.A.- INTRODUCCION

El motor DC es el encargado de transformar una señal de voltaje en una señal de posición, la cual a su vez será la entrada del sistema oleo-mecánico posicionador de la aguja inyectora de la turbina. Un esquema general de un motor C.D se muestra en la figura # 5.1.

En este capítulo se establecerá la función de transferencia del motor DC, la cual se basará en aproximaciones lineales sobre un motor real en donde se despreciarán los efectos secundarios, tales como la histéresis y la caída de potencial en las escobillas. En el presente trabajo se utilizará un motor DC de magneto permanente.

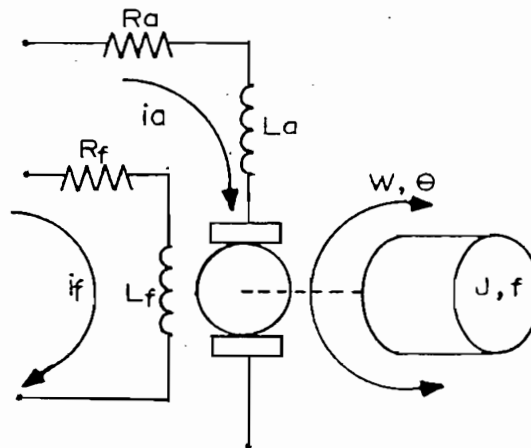
#### V.A.1.- MOTOR DE MAGNETO PERMANENTE.

En este tipo de motor, el campo magnético del estator se mantiene constante para todos los niveles de corriente de la armadura, por lo cual la curva velocidad-torque es total-

mente lineal. Otra ventaja es el hecho de que no necesita una fuente adicional para generar flujo magnético en el estator.

Para establecer la función de transferencia de este elemento se tomarán en cuenta las ecuaciones representativas de un motor de corriente continua controlado por armadura, en el cual se mantiene constante el flujo del entrehierro, al igual que en el motor de magneto permanente.

V.B. - OBTENCION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL  
SERVOMOTOR ELECTRICO DE POSICION



- Motor DC controlado por armadura

Figura # 5.1

- $T$  = Torque del motor  
 $i_a$  = Corriente de armadura  
 $V_a$  = Voltaje de armadura  
 $R_a$  = Resistencia de armadura  
 $L_a$  = Inductancia de armadura  
 $V_b$  = Voltaje de fuerza contra electro-motriz  
 $W$  = Velocidad angular del motor  
 $J$  = Inercia total  
 $f$  = Coeficiente de fricción de la carga  
 $\tau_a$  = Constante de tiempo de armadura  
 $K_m$  = Constante del motor

El torque desarrollado por el motor se relaciona linealmente con la corriente de armadura, mediante la ecuación (5.1).

$$T = K_m i_a \quad ( 5.1 )$$

La corriente de la armadura se relaciona con el voltaje de entrada aplicado a ella por medio de:

$$V_a = (R_a + L_a D) i_a + V_b \quad ( 5.2 )$$

Donde  $V_b$  es el voltaje de la fuerza contra electro-motriz que es proporcional a la velocidad del motor. Por esta razón se tiene:

$$V_b = K_b W \quad ( 5.3 )$$

La corriente de armadura es:

$$i_a = \frac{V_a - K_b \omega}{R_a + L_a D} \quad (5.4)$$

El torque de carga para una inercia de rotación como la mostrada en la figura # 5.1 se puede escribir como:

$$T_l = J D^2 \theta + f D \theta \quad (5.5)$$

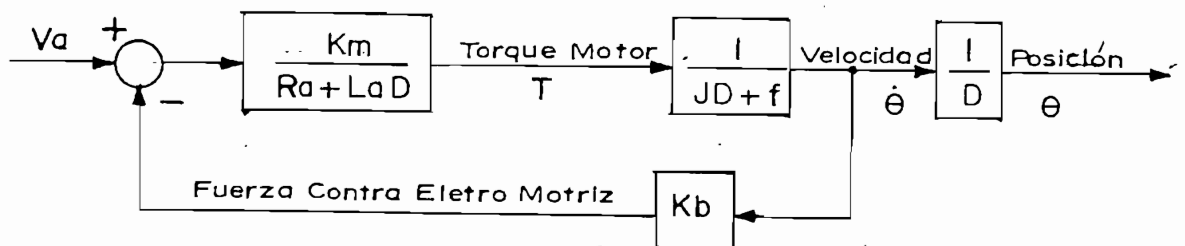
Utilizando las ecuaciones (5.1), (5.4), y (5.5), se puede llegar a establecer la siguiente relación:

$$J D^2 \theta + f D \theta = K_m \frac{V_a - K_b D \dot{\theta}}{R_a + L_a D} \quad (5.6)$$

De donde se puede llegar a la siguiente ecuación de transferencia:

$$\frac{\theta}{V_a} = \frac{K_m}{D[(R_a + L_a D)(J D + f) + K_m K_b]} \quad (5.7)$$

Su diagrama de bloques es:



Sin embargo para la mayoría de motores de DC es despreciable la constante de tiempo de armadura:

$$\tau_a = L_a/R_a$$

Y por tanto se tiene:

$$\frac{\theta}{V_a} = \frac{\frac{K_m}{R_a f + K_m K_b}}{D(\tau_1 D + 1)} \quad (5.8)$$

Donde la constante de tiempo equivalente del motor es:

$$\tau_1 = (R_a J) / (R_a f + K_b K_m) \quad (5.9)$$

Es de interés observar que  $K_m$  es igual a  $K_b$ . Esta igualdad puede comprobarse considerando la operación en estado estacionario del motor y el balance de potencia cuando se desprecia la resistencia del rotor. (10) (37)

#### V. B. 1. - ANALISIS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE GIRO A DESPAZAMIENTO

##### V. B. 1. 1. - DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA TUERCA TORNILLO

En vista de que es necesario transformar el giro del motor (salida de la señal de control), a un desplazamiento



que sea la señal de entrada al sistema oleomecánico de posición, se ha utilizado un tornillo-tuerca para dicha transformación de movimientos. En la figura # 5.2 se puede apreciar esquemáticamente el sistema:

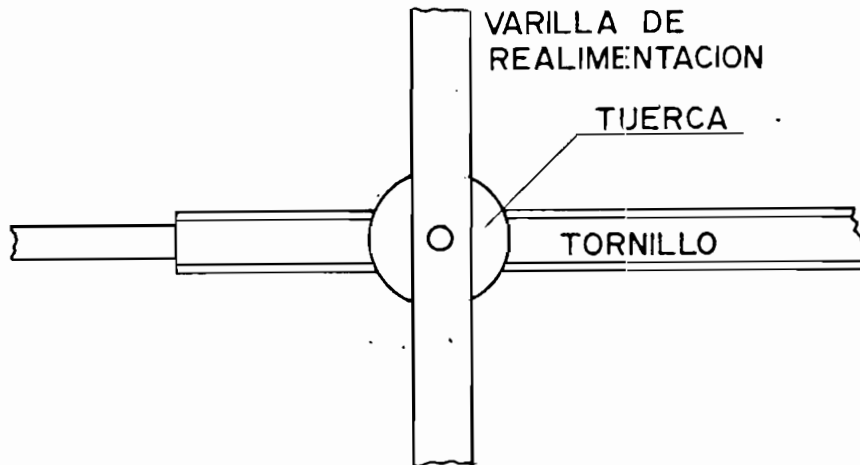


Figura # 5.2

#### V. B. 1.2. - FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA TUERCA TORNILLO

En vista de que el sistema tuerca-tornillo tiene como entrada el giro del motor  $\theta$ , y como salida la señal  $X$  de desplazamiento de la varilla de realimentación (fig. # 5.4), la función de transferencia  $K_T$ , es una constante dada por la siguiente relación:

$$K_T = \frac{X}{\theta} \quad [\text{mm/vueltas}] \quad ( 5.10 )$$

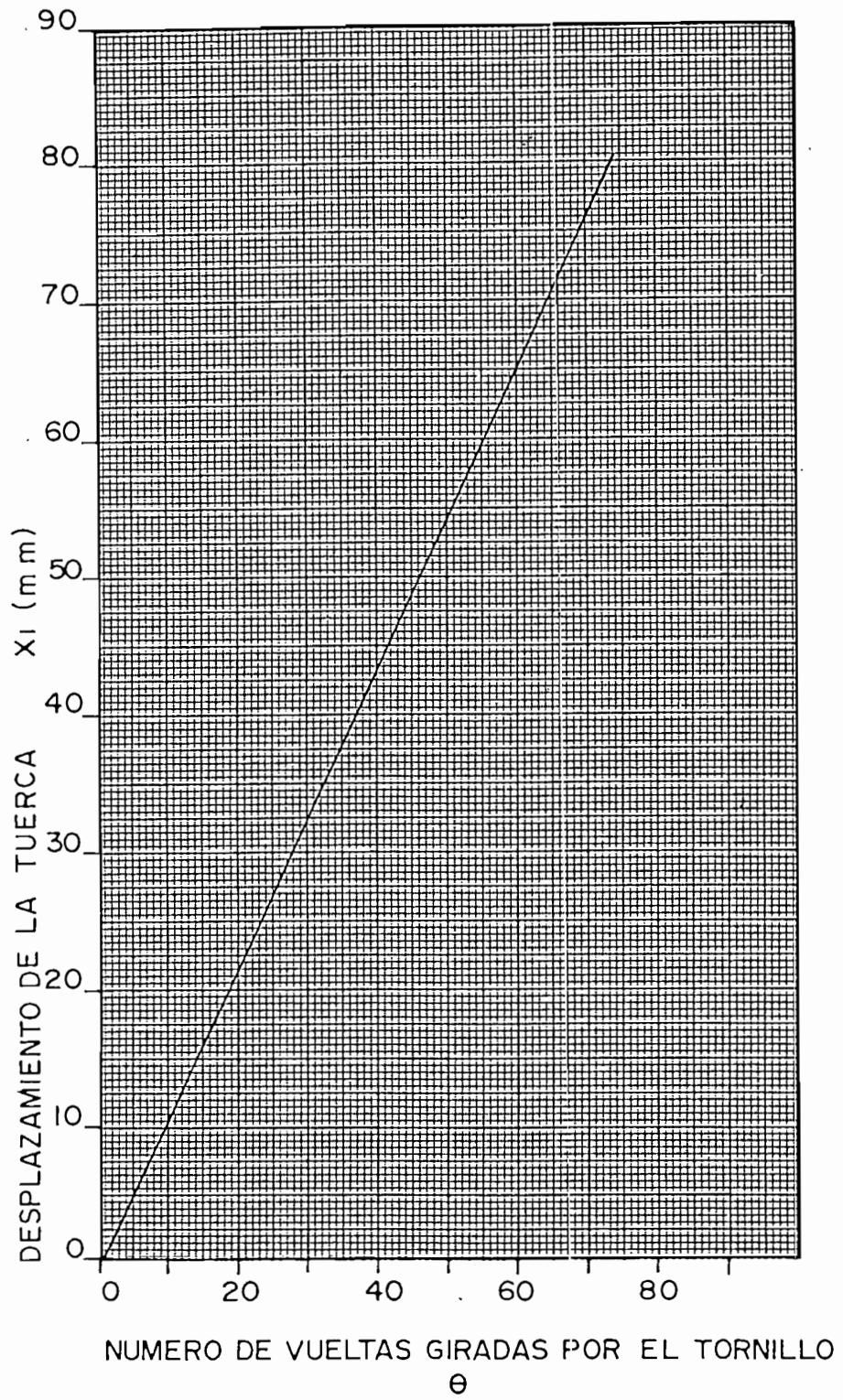


FIG. 5.3

A continuación se expresa el valor de  $K_T$  en por unidad, en base a la curva de la figura # 5.3. Se calcula primero la pendiente de esta curva, como sigue:

$$\frac{x}{\theta} = \frac{35.9 - 31.6}{36 - 32} = 1.07 \quad \text{Para todo el tornillo.}$$

Por tanto:

$$K_T = \frac{x}{\theta} = 1.07 \quad [\text{mm/vueltas}]$$

Las bases tomadas son:

$$\theta_0 = 36 \quad [\text{vueltas}]$$

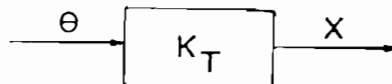
$$x_0 = 38.6 \quad [\text{milímetros}]$$

Para tener en por unidad, se divide  $K_t$  para las bases:

$$\frac{\frac{x}{x_0}}{\frac{\theta}{\theta_0}} = 1.07 \frac{\theta_0}{x_0}$$

$$K_T = \frac{x}{\theta} = 1.07 \frac{36}{38.6}$$

$K_T = 1$  en por unidad, y su diagrama de bloques correspondiente es:



V.C. - ANALISIS DE LA INERCIA EFECTIVA ACTUANTE

Para determinar la inercia efectiva actuante del sistema, se consideran las siguientes energías (figura # 5.4):

(07)

$E_{cr}$  = Energía cinética del rotor.

$E_{cv}$  = Energía cinética de la varilla.

$E_{cvv}$  = Energía cinética del carrete de la válvula.

$E_c$  = Energía cinética total.

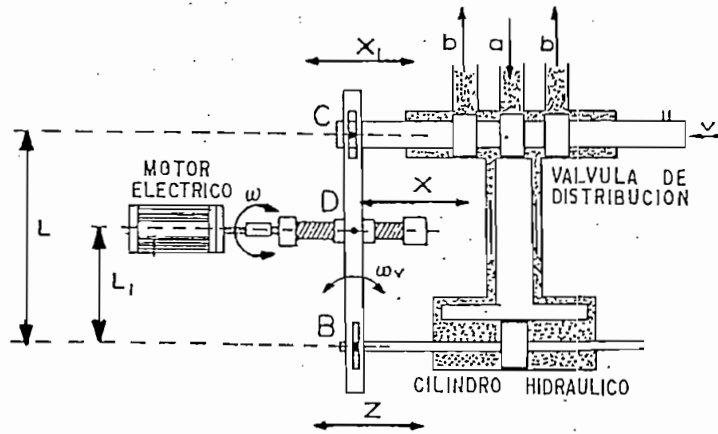


Figura 5.4

Realizando una sumatoria de energías y reemplazando los valores de cada una de ellas se tiene:

$$E_c = E_{cr} + E_{cv} + E_{cvv} \quad (5.11)$$

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (5.12)$$

$$E_{cr} = \frac{1}{2} J_r \omega^2 \quad (5.13)$$

$$E_{cv} = \frac{1}{2} J_v \omega_v^2 \quad (5.14)$$

$$E_{cvv} = \frac{1}{2} m_v v_v^2 \quad (5.15)$$

Donde:

- $J$  = Inercia total  
 $J_r$  = Inercia del rotor  
 $J_v$  = Inercia de la varilla  
 $m_{vv}$  = Masa del carrete de la válvula  
 $W$  = Velocidad angular del rotor (tornillo)  
 $W_v$  = Velocidad angular de la varilla  
 $v$  = Velocidad lineal del carrete de la válvula.

Reempazando las ecuaciones (5.12 a 5.15) en (5.11) se tiene:

$$\frac{1}{2}JW^2 = \frac{1}{2}(J_rW^2 + J_vW_v^2 + m_{vv}v^2) \quad (5.16)$$

Para determinar las relaciones de las velocidades correspondientes, se realizarán las siguientes consideraciones:

1.- El punto B, en el inicio de la acción de control permanecerá estático.

2.- En virtud de los pequeños desplazamientos de la varilla las longitudes BD y BC se las puede aproximar a  $L_1$  y  $L$  respectivamente.

Bajo estas consideraciones las relaciones de transmisión se presentan en las siguientes ecuaciones:

$$K_t = X / \theta \quad (5.17)$$

$$K_t \cdot W = (dX/dt) = K_t(d\theta/dt) \quad X = K_t \cdot W \quad (5.18)$$

$$W_v = X/L_1 = Kt.W/L_1 \quad ( 5.19 )$$

$$v = dx_1/dt \rightarrow dx_1/dt = W_v L \quad ( 5.20 )$$

$$dx_1/dt = Kt.W.L/L_1$$

$$v = Kt.W(L/L_1) \quad ( 5.21 )$$

Reemplazando y simplificando las ecuaciones (5.19) y (5.21) en (5.16) se tiene:

$$J = J_r + J_v(Kt/L_1)^2 + m_{vv}[Kt(L/L_1)]^2 \quad ( 5.22 )$$

Donde:

$$J_r = \frac{1}{2}m_r R_r^2 \quad ( 5.23 )$$

$$J_v = \frac{1}{3}m_v L^2 \quad ( 5.24 )$$

Reemplazando las ecuaciones (5.23) y (5.24) en (5.22) quedará:

$$J = \frac{1}{2} m_r R_r^2 + \frac{1}{3} m_v K t^2 \frac{L^2}{L_1^2} + m_{vv} K t^2 \frac{L^2}{L_1^2} \quad ( 5.31 )$$

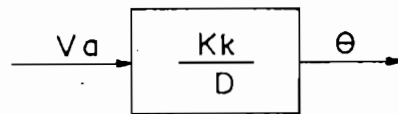
Del cálculo de la inercia total, y de la constante de tiempo del motor que se presentan en el apéndice C, se deduce que por ser muy pequeña la constante de tiempo del motor se la puede aproximar a cero.

$$\tau_1 = 0$$

Con lo que la ecuación de transferencia del motor (5.8) quedará como:

$$\frac{\theta}{V_a} = \frac{\frac{K_m}{R_a f + K_m K_b}}{D} \quad (5.26)$$

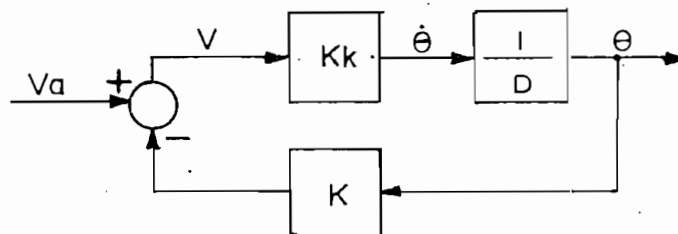
El diagrama de bloques correspondiente será:



Donde:

$$Kk = K_m / (R_a f + K_m K_b) \quad (5.27)$$

Pero esta forma de la función de transferencia es de un integrador puro, adicional al del controlador electrónico, que inestabiliza el lazo de control. Para eliminar el carácter integrador del servo-eléctrico se añade una retroalimentación de posición, tal como se indica en el siguiente diagrama de bloques: (10) (37)



Reduciendo el diagrama de bloques anterior se tendrá la siguiente función de transferencia:

$$\frac{\theta}{V_a} = \frac{1/K}{\tau_0 D + 1} \quad ( 5.28 )$$

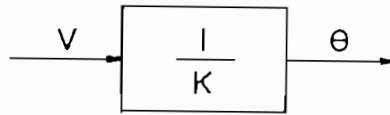
Donde:

$$\tau_0 = 1/(K \cdot K_k)$$

En el apéndice C se demuestra que  $\tau_0$ , es despreciable, por lo que la ecuación (5.28) queda como:

$$\theta/V_a = 1/K \quad ( 5.29 )$$

Y su diagrama de bloques correspondiente será:



No es recomendable la utilización de motores de torque pequeño, ya que la sobre dimensión de éste es lo que hace posible el despreciar los efectos generados por la inercia del sistema, las fricciones de las juntas y de los elementos de transmisión utilizados. (11) (09)



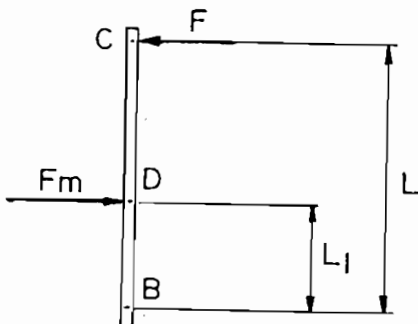
V.D.- CARACTERISTICAS REQUERIDAS POR EL MOTOR DC

## V.D.1.- FUERZA MAXIMA APLICADA SOBRE EL TORNILLO

El torque requerido para mover el sistema, debe vencer la fuerza necesaria para desplazar:

- 1.- Un potenciómetro solidario al carrete de la válvula, el cual genera la señal de realimentación de caída de velocidad transiente sigma (ver sección VIII.B).
- 2.- El potenciómetro de realimentación de posición del servomotor eléctrico.
- 3.- El sistema tuerca-tornillo y la varilla de realimentación.

La fuerza  $F$  (figura # 5.5), necesaria para desplazar el conjunto se ha medido y es igual a 4.9 N.



Sin embargo, la fuerza actuante sobre la tuerca será la reflejada por el efecto de palancas tal como se indica a continuación:

Figura # 5.5

Realizando una sumatoria de momentos sobre el punto B, y despejando  $F_m$  se tendrá:

$$F_m = F ( L / L_1 ) \quad ( 5.30 )$$

Como se observa de la ecuación (5.30), la fuerza actuante sobre la tuerca dependerá de la posición que se dé al punto de realimentación sobre la varilla. Para efectos de cálculo y por seguridad se tomará  $(L_1 / L) = 0.1$ , punto de mínimo apalancamiento, por lo cual, la fuerza máxima de oposición que actúa sobre la tuerca es:

$$F_m = 4.9 / 0.1 \text{ N.}$$

$$F_m = 49 \text{ N.}$$

En realidad para el funcionamiento se ha previsto una relación de  $(L_1/L) = 0.5$  para los valores de  $L = 63$  ctms, y  $L_1 = 31.5$  cm.

#### V.D.2. - TORQUE MINIMO NECESARIO PARA INICIAR EL MOVIMIENTO

Para determinar el torque mínimo que debe entregar el motor e iniciar el movimiento, se usa la siguiente relación entre la carga aplicada sobre la tuerca y el torque ejercido por el motor. (12) -

$$T_F = \frac{F \cdot D_m}{2} \frac{\cos \xi \tan \delta + u}{\cos \xi + u \tan \delta} \quad (5.31)$$

Donde:

- $F$  = fuerza aplicada sobre la tuerca (49 N)  
 $D_m$  = Diámetro medio del tornillo ( $7.03 \times 10^{-3} m$ )  
 $T_F$  = Torque requerido para vencer  $F$   
 $u$  = Coeficiente de fricción (0.2). (12)  
 $\delta$  = Angulo de hélice ( $2.5^\circ$ )  
 $\xi$  = Angulo de rosca ( $30^\circ$ )

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación (5.31), se tiene que el torque necesario para iniciar el movimiento es  $T = 7.5 \times 10^{-2} N \cdot m$ .

#### V. D. 3. - CONSTANTES DEL SERVOMOTOR ELECTRICO.

Para la selección del motor a utilizarse se ha considerado:

- 1.- El motor por lo menos debe suministrar el doble del torque mínimo para iniciar el movimiento.
- 2.- La combinación de las constantes del servomotor deben dar tiempos de retardo ( $\tau_1$ , y  $\tau_0$ ) de éste, que sean despreciables (apéndice C) frente a los tiempos de retardo del sistema oleomecánico y de la turbina.

El motor seleccionado tiene las siguientes constantes:

$$K_m = 4.31 \text{ N-m/A.}$$

$$\beta = 5.35 \times 10^{-3} \text{ N-m-s/rad.}$$

$$i_a(\text{max}) = 7 \text{ A.}$$

$$V_a(\text{max}) = 9 \text{ V.}$$

$$R_a = 44 \ \Omega.$$

$$J = 9.52 \times 10^{-5} \text{ Kg-m}^2$$

$$T_{\text{max}} = 60 \times 10^{-2} \text{ N-m}$$

El motor seleccionado tiene un torque más alto al necesario, lo que asegura que el motor nunca trabajará sobrecargado, por tanto no existe peligro de calentamientos del mismo.

tes. Las mismas que pueden ser, a su vez, transformadas a señales continuas de amplitud proporcional a los requerimientos del aparato sensor de velocidad del gobernador, y apropiadas para regulación, como un transductor analógico que procese las transmisiones de velocidad.

Existen diversos métodos para obtener transductores analógicos de velocidad, entre ellos: Velocidad por diferenciación, por medición del tiempo sobre una longitud base, métodos doppler, etc. Existe otro método que es muy usado, especialmente en las aplicaciones de servomecanismos y dispositivos rotativos de construcción especial, conocido con el nombre de tacómetro, el cual proporciona una relación lineal entre la velocidad de rotación y la tensión de salida obtenida.

Su amplio uso se debe a sus buenas características, pero su alto costo obliga a usar métodos más económicos que posean características similares.

Las técnicas modernas de diseño electrónico desarrolladas en base a tecnología de circuitos integrados facilitan este objetivo que en unión a técnicas foto-eléctricas permiten desarrollar el siguiente diagrama de bloques para un fototacómetro.

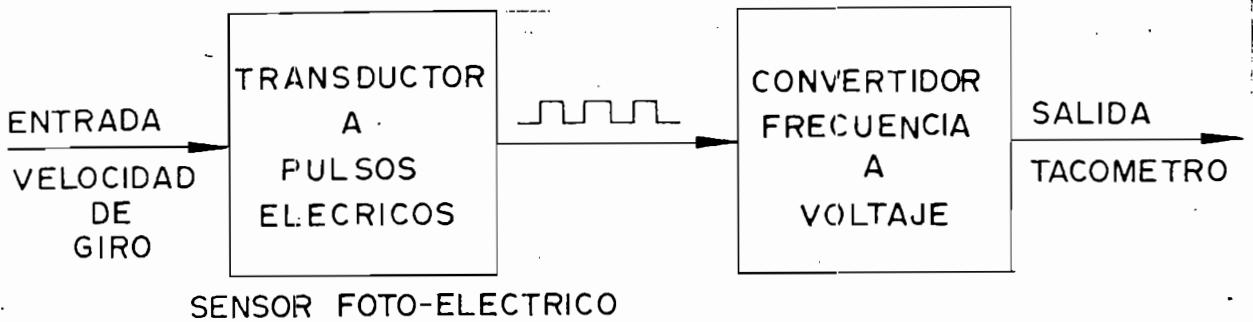


Figura # 6.1

Este sistema basa su funcionamiento en el convertidor de frecuencia a voltaje, principalmente, y su precisión y buenas características dependen de las cualidades de éste.

#### VI.A.3.- TRANSDUCTOR A PULSOS ELECTRICOS.

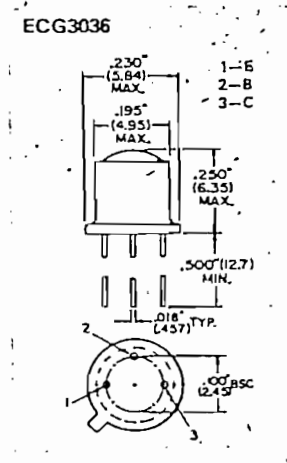
Existen diferentes métodos para detectar el paso de una marca frente a un sensor, en particular por vía mecánica (contacto), magnética (relé reed, magneto-resistencia a efecto Hall), capacitiva, inductiva, radiactiva o por vía fotoeléctrica. Esta última solución fue escogida en razón de su sencillez. (39)

Las marcas detectables por sensores fotoeléctricos pueden estar constituidas por alternancias de zonas claras y oscuras, reflejantes o absorbentes, o de zonas opacas y transparentes. En este trabajo, las marcas las constituyen N agujeros perforados en un disco opaco montado sobre el eje de la turbina cuya velocidad se quiere sensar. (39)

El detector es un conjunto fotoemisor - fotorreceptor conocido como "barrera óptica". El fotoemisor es un diodo emisor de luz (LED) visible roja. (39)

El fotorreceptor es un fototransistor sensible a la luz visible e infrarroja y sus características se encuentran en la figura # 6.2.

En principio es aconsejable utilizar conjuntos fotoemisor - fotorreceptor acoplados en un solo dispositivo y separados mediante un canal o ranura. Este dispositivo normalmente incluye como fotoemisor un diodo emisor de luz de Arseniuro de Galio (AsGa) trabajando en el infrarrojo, y el fotorreceptor es un fototransistor montado en configuración darlington. Sin embargo, el mismo viene con una separación normalizada entre los fotoelementos, lo cual limita el espesor del disco. Con el fin de evitar que el disco de agujeros pueda rozar los lados de la ranura, se implementó el foto-sensor con los elementos descritos en el párrafo anterior los cuales están separados.



Para evitar que la luz ambiental afecte al fotorreceptor, el fototransistor incluye un lente y una coraza que obliga a una fotorrecepción de luz directa orientada en una sola dirección: frente al emisor. Además el conjunto va cubierto con unas tapas que solo permiten el ingreso del disco y no dejan pasar la luz ambiental.

ECG Type	Description	Collector to Base Voltage BV <sub>CEO</sub> (V)	Max Collector Current I <sub>c</sub> (mA)	Max Dark Current I <sub>D</sub> at 25°C (nA)	Min Light Current I <sub>L</sub> (mA)	Max Power Dissipation at 25°C P <sub>t</sub> (mW)	Rise Time t <sub>r</sub> (μS)
ECG3036	NPN, Si-Darlington, Visible and IR	40	250	100 at V <sub>CE</sub> 10V	12	250	40 Typ

Figura # 6.2

## VI.B. - CONVERTIDOR FRECUENCIA/VOLTAJE

### VI.B.1. - DESCRIPCION GENERAL

La serie LM2907 es un convertidor monolítico de frecuencia a voltaje con un amplificador operacional/comparador de alta ganancia diseñado para operar un relé, lámparas u otras cargas cuando la frecuencia de entrada excede un valor seleccionado.



Para aplicaciones tacométricas usa una técnica de "variación de carga" (charge pump) con una configuración especial donde la frecuencia de entrada se convierte a un voltaje DC.

En el anexo 1 se encuentran las hojas de datos del convertidor LM2907N, proporcionados por el fabricante y su elección obedece a las ventajas que ofrece y porque su principal aplicación es como sensor de velocidad. Se dispone de un diagrama de conexión de una aplicación típica como tacómetro de mínimos componentes externos recomendado por el fabricante.

#### VI.B.2.- TEORIA DE OPERACION

Las series LM2907 de circuitos de tacómetro están diseñadas para aplicaciones de medición con una configuración externa mínima, y máxima versatilidad.

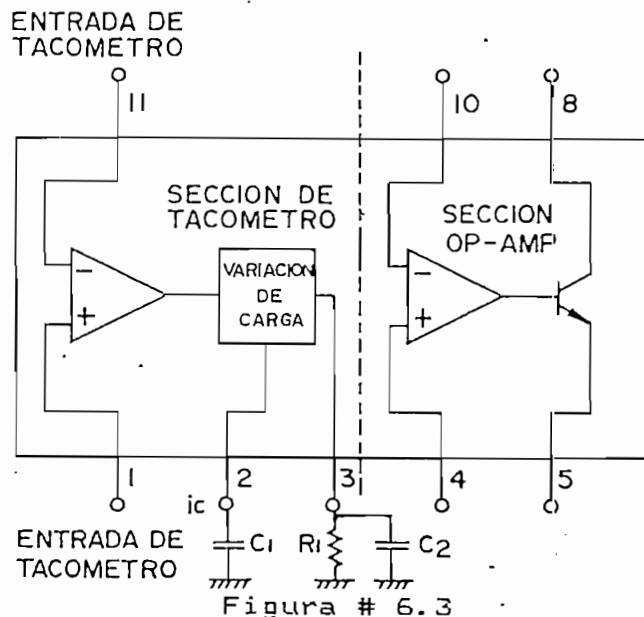


Figura # 6.3

La primera etapa de operación es un amplificador diferencial que controla un circuito flip flop con realimentación positiva.

El voltaje umbral de entrada es el voltaje de entrada diferencial al cual la salida de esta etapa cambia de estado.

A continuación de la etapa de entrada está el circuito de variación de carga (charge pump) donde la frecuencia de entrada se convierte a un voltaje DC, requiriéndose para ésto un capacitor que proporcione una constante de tiempo, una resistencia de salida y un capacitor para integrar o filtrar. Cuando la etapa de entrada cambia de estado (dado por un cruce por cero o del voltaje diferencial en la entrada) el capacitor de tiempo se carga o descarga linealmente entre dos niveles de voltaje cuya diferencia es  $V_{cc}/2$ .

Consecuentemente en un medio ciclo de la frecuencia de entrada o en un tiempo igual a  $1/2f_{in}$  el cambio de la carga en el capacitor de tiempo es igual a  $V_{cc}/2 \times C_1$ . El valor promedio de corriente obtenida dentro o fuera del capacitor es entonces:

$$\frac{dQ}{T} = i_c(AVG) = C_1 \frac{V_{cc}}{2} 2f_{in} = V_{cc} f_{in} C_1 \quad (\text{Ec. 6.1})$$

El circuito de salida refleja esta corriente en forma exacta dentro de la resistencia de carga  $R_1$ , conectada a tierra, tal que si los pulsos de corriente se integran con un capacitor de filtro, entonces,  $V_o = i_c R_1$ , y la ecuación de conversión total viene a ser:

$$V_o = V_{cc} f_{in} C_1 R_1 \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Es notorio que la relación entre la frecuencia y el voltaje de salida es completamente lineal y su sensibilidad dependerá del resto de parámetros.

### VI.B.3.- SELECCION DE $R_1$ Y $C_1$

Existen algunas limitaciones para seleccionar los valores de  $R_1$  y  $C_1$ , las cuales deben considerarse para un funcionamiento óptimo.

El capacitor de tiempo  $C_1$  debe ser mayor a 100 pF para operaciones exactas puesto que este capacitor provee también compensación interna para el circuito de variación de carga. Valores más pequeños pueden producir una corriente de error en  $R_1$ , especialmente a bajas temperaturas.

Para el valor de la resistencia  $R_1$  deben reunirse algunas consideraciones: 1) La corriente de salida en el pin 3 (Fig. # 6.3) está internamente arreglada, por lo que  $V_o/R_1$  debe ser menor o igual a este valor, 2) El máximo valor de  $R_1$  está limitado por la impedancia de salida del pin 3, la cual típicamente es mayor que  $10\text{ M}\Omega$ , y su valor no debe representar una fracción significativa de esta impedancia para evitar degradaciones de la salida.

#### VI.B.4.- VOLTAJE DE RIZADO Y FRECUENCIA MÁXIMA DE OPERACION

Los criterios de linealidad para la selección de los elementos externos deben conjugarse con el tiempo de respuesta máximo y el voltaje de rizado permitido o tolerable. Para ello, el fabricante (anexo 1), proporciona unas expresiones que describen el contenido de rizado en el pin 3 y la frecuencia máxima de entrada:

$$V_r = \frac{V_{cc}}{2} \frac{C_1}{C_2} \left( 1 - \frac{V_{cc} f_{in} C_1}{I_2} \right) \text{ pico-pico} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

$$f_{max} = \frac{I_2}{C_1 V_{cc}} \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Donde:

$V_{cc}$  → Voltaje de polarización del circuito integrado LM2907

$I_2$  → Corriente de salida del pin 2 que se refleja en el pin 3, por tanto:

$$I_2 = I_3 = \frac{V_{\text{máx salida}}}{R_1} = \frac{V_{cc} - V_{CE}}{R_1} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

#### VI.C.- DESARROLLO Y CONFIGURACION DE COMPONENTES

El tacómetro implementado para sensar la velocidad de giro de la turbina reúne los siguientes elementos, producto del análisis anterior y de las justificaciones necesarias que se agregan para su desarrollo definitivo, que conforman el diagrama de la figura # 6.4.

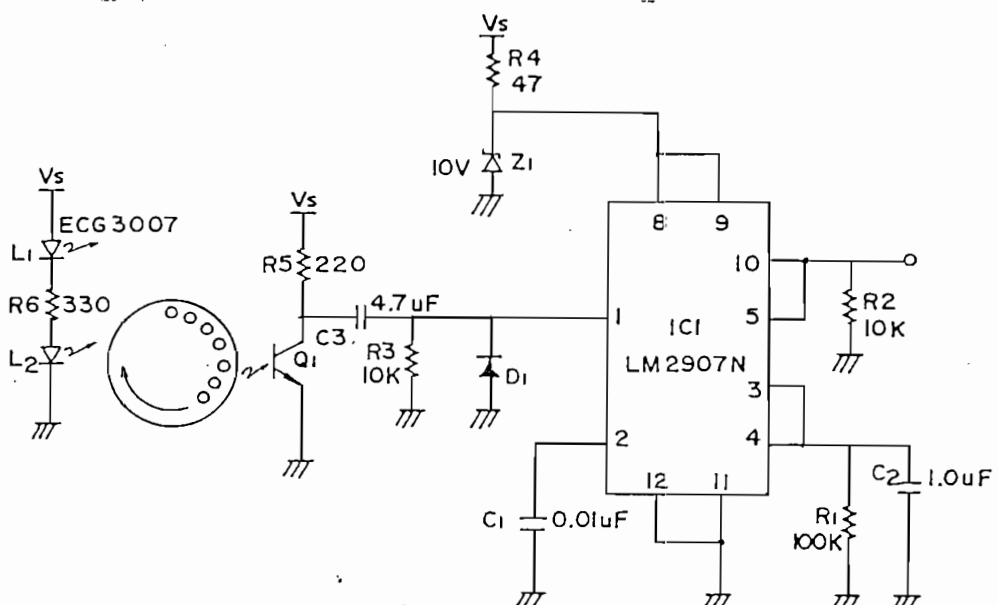


Figura # 6.4

VI.C.1.- DATOS:

$V_s = 12V$  → Tensión de alimentación, se la obtiene del circuito de fuente desarrollado en la sección X.D.1 para todo el tablero.

$V_{cc} = 10V$  → Tensión de polarización positiva seleccionada.

$R_1 = 100K$  ---

$R_2 = 10K$  → Valores recomendados por el fabricante

$C_1 = 0,01\mu F$  → para una aplicación de tacómetro.

$C_2 = 1,0\mu F$  ---

Caídas de voltaje y corriente máxima en polarización directa de los LEDs L1 y L2:

LED L1	LED L2
$V_F = 1,68V$	$V_F = 2,20V$
$I_F = 50mA$	$I_F = 35mA$

Fototransistor (Fig. # 6.2):

$I_D(Q1)_{\text{máx}} = 100nA$  @  $V_{CE} = 10V$  → Máxima corriente en  
obscuridad

$N_o = 600$  RPM → Velocidad nominal de giro del eje de la  
turbina

## VI.C.2.- CALCULOS:

Se procede a elegir los valores de los elementos que intervienen en este circuito (Fig. # 6.4), para obtener resultados óptimos de funcionamiento del mismo.

### VI.C.2.1.- CIRCUITO DE VOLTAJE DE POLARIZACION:

Puesto que el voltaje seleccionado de la fuente principal de alimentación con corriente continua (sección X.D.1), del tablero general de control es de 12V, para el voltaje de polarización, con regulación exclusiva para el IC1 (fig. # 6.4), se seleccionó el valor de  $V_{cc} = 10V$ . Margen suficiente para regular la tensión a través de un circuito con un diodo zener (fig. # 6.4) para el cual:

$$R4 = (V_s - V_z) / I_{R4} \quad ( 6.6 )$$

La corriente a través de la resistencia R4 es producto de la corriente de suministro al circuito integrado IC1 y de la corriente que debe circular por el zener a fin de que se mantenga regulada la tensión de 10V.

$$I_{R4} = I_{cc} + I_{z1} \quad ( 6.7 )$$

En la hoja de datos del IC1 (anexo 1) se encuentra una gráfica de la corriente total de suministro según el

voltaje de polarización aplicado. Para  $V_{CC} = 10V$  y a una temperatura ambiental de  $25^{\circ}C$ , la corriente es de  $3,5mA$  a la cual se agrega la corriente de carga debida a  $R_2$  (fig. # 6.4):

$$i_{R_2} = (V_{CC} - V_{CEmin})/R_2 \quad (6.8)$$

Aquí, el voltaje colector-emisor mínimo de operación del transistor interno del IC1, [según se desprende de la tabla de sus características eléctricas (anexo 1)], es igual a  $V_{CEmin} = 2V$ . Por tanto, de la ecuación 6.8 se encuentra que  $I_{R_2} = 0,8mA$

Consecuentemente:  $I_{CC} = (3,5 + 0,8)mA$ , aproximado a  $5mA$

En cuanto a la corriente de trabajo del zener, se selecciona un valor suficientemente alto para que absorba tanto transitorios de voltaje de la fuente (debidos a los continuos cambios de giro del servomotor, el cual absorbe corrientes altas comparativamente al consumo del resto del elementos y circuitos), así como variaciones posibles de corriente de consumo del IC1. Seleccionando  $I_{Z1} = 35ma$ , de la ecuaciones 6.7 y 6.6 se tendrá:

$$I_{R_4} = 40mA$$

y

$$R_4 = \frac{12V - 10V}{40mA} = 50\Omega$$



De los valores standard de resistencias se ajustó a un valor de:

$$R4 = 47\Omega \quad \frac{1}{2}W$$

#### VI.C.2.2. - SISTEMA FOTOSENSOR

Esta parte del circuito solo requiere de una polarización suficientemente regulada como la de 12V que provee la fuente del tablero.

A fin de obtener una buena intensidad luminosa para el LED L2, que proporciona el haz de luz dirigido hacia el fototransistor Q1, se selecciona una corriente alta a través de este LED dentro de las especificaciones de máxima corriente de trabajo del mismo:  $I_{LED} = I_{R6} = 25mA$ .

La resistencia que permite la circulación de esta corriente a través del LED L2 (emisor) y del LED L1 (testigo de encendido del LED L2) se la calcula con la relación:

$$R6 = \frac{V_s - (V_{F1} + V_{F2})}{I_{R6}} \quad (6.9)$$

$$R6 = \frac{12V - (1,68 + 2,20)V}{25mA} = 324,8\Omega$$

De acuerdo a valores standard se selecciona:

$$R6 = 330\Omega \quad \frac{1}{2}W$$

Debido a que la intensidad de luz proporcionada por el LED L2 no resultó suficientemente alta, se compensó esta insuficiencia con un valor alto de resistencia de colector; lo cual, permitió un menor voltaje colector-emisor de saturación y consecuentemente una mejor configuración de los pulsos generados.

En forma experimental se encontraron los siguientes resultados, y mediante cálculos y arreglos apropiados se configuró el circuito definitivo de generación de pulsos adecuados para la etapa de entrada de señal del IC1.

Valores de parámetros usados:

$V_s = 11,90V$	medido de la fuente usada.
$R5 = 220K$	asignado experimentalmente.
$R6 = 330\Omega$	calculado anteriormente (Ec. 6.9).

Resultados:

Se obtuvieron los siguientes valores promedio de voltaje de salida en el colector del fototransistor Q1 con incidencia del haz de luz del LED, y sin ésta, hacia su base:

HAZ DE LUZ	VOLTAJE DEL COLECTOR $V_c$
Incidiendo	$V_{CL} = 3,12V$
Bloqueado	$V_{co} = 11,40V$

Estos resultados permiten calcular parámetros del Q1 no proporcionados por el fabricante (fig. # 6.2) tales como su ganancia de corriente  $\beta$ ; y, consecuentemente, la relación entre las corrientes de colector de saturación inversa con el haz de luz incidiendo y bloqueado, bajo las condiciones experimentales de polarización indicadas. Estos parámetros proporcionarán una mejor visión del funcionamiento del fototransistor.

Así, asumiendo que el haz de luz no está incidiendo en la base de Q1 entonces la corriente de colector, para corriente de base nula, viene dada por la relación: (22)

$$I_c = (\beta + 1)I_{co} \quad (6.10)$$

$I_{co}$  es la corriente de colector de saturación inversa constituida por los portadores minoritarios que son generados térmicamente y por los electrones que cruzan de la base al colector, como los huecos del colector a la base bajo las circunstancias señaladas en el párrafo anterior. (22)

De los datos de la figura # 6.3 se obtiene:

$$I_{co} = I_{Dm\acute{a}x} = 0,1\mu A \text{ @ } 25^{\circ}C \text{ y } V_{CE} = 10V$$

$$\text{Adem\'as: } I_c = (V_s - V_{co})/R_5 \quad (6.11)$$

De las ecuaciones 6.11 y 6.10, despejando  $\beta$  se obtiene:

$$\beta = (V_s - V_{co})/I_{co}R_5 - 1 \quad (6.12)$$

$$\text{Por lo tanto: } \beta = 21,7$$

La componente de corriente de saturaci3n inversa debido a la luz ( $I_L$ ) da una corriente de colector total igual a: (22)

$$I_c = (\beta + 1)(I_{co} + I_L) \quad (6.13)$$

Del circuito fig. # 6.4, se tiene:

$$I_c = (V_s - V_{CL})/R_5 \quad (6.14)$$

De las ecuaciones 6.13 y 6.14 se obtiene:

$$I_L = \frac{V_s - V_L}{R_5(\beta + 1)} - I_{co} \quad (6.15)$$

$$\text{Por lo tanto: } I_L = 1,66\mu A$$

Consecuentemente:

$$\frac{I_L}{I_{co}} = \frac{1,56}{0,1} = 16,6$$

En conclusión, la corriente de saturación inversa debida a la luz incidente es aproximadamente 17 veces mayor a la corriente de saturación inversa debida únicamente a la polarización del fototransistor. Esta relación es un buen indicativo de la operación del fototransistor dentro de rangos tolerables; y, experimentalmente, conduce a no aumentar más el valor de la resistencia de colector R5 para no degradar más estos parámetros calculados. Obviamente el fototransistor se encuentra operando en la curva voltamperimétrica más baja por la intensidad luminosa empleada.

Puesto que el voltaje de colector en saturación del fototransistor, bajo las condiciones señaladas anteriormente, no baja de 3V se implementó el circuito conformado por los elementos: R3, C3, y D1. El condensador C3 opera como condensador de paso de señal alterna (pulsos), anulando toda componente continua. Este condensador junto con R3 forman un circuito de filtro pasa alto con la siguiente frecuencia de corte: (22)

$$f_c = 1/R3C3 \quad ( 6.16 )$$

El diodo D1 impide que señales negativas pasen al IC1.

## VI.C.2.3.- SISTEMA DE INTERRUPCION DEL HAZ DE LUZ

Para completar el sistema fotosensor se requiere colocar entre el emisor y el receptor un sistema de interrupción del haz de luz conformando zonas opacas y transparentes, alternadamente, las mismas que cortarán el haz de luz definiendo pulsos luminosos hacia el fotorreceptor; y, en consecuencia pulsos eléctricos de frecuencia proporcional a la velocidad de giro.

Para esto, se empleó un disco negro opaco de material plástico, en el que se realizaron varios agujeros concéntricos en una circunferencia cercana a su periferia y equidistantes uno de otro. El número de agujeros depende del rango de velocidades a medirse y de las frecuencias máxima y mínima de trabajo del circuito integrado IC1.

Así, de las ecuaciones 6.5 y 6.4 se obtiene la frecuencia máxima de operación del IC1:

$$I_2 = (10V - 2V)/100K\Omega = 80\mu A$$

$$f_{\text{máx}} = 80 \cdot 10^{-6} A / (0,01 \cdot 10^{-6} C \cdot 10V) = 800Hz$$

La frecuencia mínima está determinada por la frecuencia de corte del filtro-pasa alto acoplado al circuito; en sí, el IC1 responde desde frecuencias nulas. Por tanto, de la ecuación 6.16 se tiene la frecuencia mínima de paso de señal al IC1:

$$f_{\min} = 1/(10K\Omega \cdot 4,7\mu C) = 21,3\text{Hz}$$

De la ecuación 6.2 se encuentra la siguiente relación:

$$V_o = 0,01 f_{IN} \quad ( 6.17 )$$

Donde la frecuencia de entrada  $f_{IN}$  dependerá de la velocidad de giro del disco y del número de agujeros practicados en el mismo, así:

$$f_{IN} = N_a \cdot N_D / 60 \quad ( 6.18 )$$

donde:

$N_a$  = número de agujeros en el disco.

$N_D$  = velocidad de giro del disco en RPM

Consecuentemente:

$$N_a = 60 \cdot f_{IN} / N_D \quad ( 6.19 )$$

Como criterio de selección del número de agujeros necesarios en el disco, se optó por la mitad del número necesario para conseguir la frecuencia máxima de operación a la velocidad nominal de giro del disco. Este criterio permite un buen rango de trabajo tacométrico para las pequeñas fluctuaciones de velocidad que en regulación debe mantener el controlador.

Por tanto:

$$N_a = 30 \cdot f_{\text{máx}} / N_0 \quad ( 6.20 )$$

donde:  $N_0$  es la velocidad nominal de giro del disco, y es igual a 600 RPM

Reemplazando estos valores en la ecuación 6.20 se obtiene el número de agujeros necesarios:

$$N_a = 40 \text{ agujeros}$$

### VI.C.3.- CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO

El circuito de fototacómetro responde en forma lineal, según la ecuación 6.17, dentro de los rangos calculados y especificados. Sin embargo, existe otro parámetro que es necesario analizar, éste determinará la calidad de respuesta de este tacómetro: el voltaje de rizado.



Para ésto, será suficiente el cálculo a velocidad nominal de giro del disco. Por lo tanto, de las ecuaciones 6.18 y 6.3 se tendrá:

$$f_{IN} = 40 \times 600 / 60 = 400 \text{ Hz}$$

$$V_r = (10V/2) (0,01\mu C / 1,0\mu C) (1 - 10V \cdot 400 \text{ Hz} \cdot 0,01\mu C / 80\mu A) = 25 \text{ mV}$$

El valor del voltaje de rizado representa fluctuaciones pico a pico que se producen en la señal de salida de este tacómetro. Para conocer cuanto afecta este parámetro se calculará el porcentaje de error o variación producido frente a la señal nominal; así:

$$e\% = 100(V_e - V_n) / V_n \quad (6.21)$$

El valor de  $V_e$  representa el valor nominal incrementado con el valor máximo del pico de rizado, es decir  $V_r/2$  y el valor de  $V_n$  o valor nominal representa el voltaje de salida del tacómetro a velocidad de giro nominal. Por tanto, de las ecuaciones 6.17, con  $f_{IN} = 400 \text{ Hz}$ , y 6.21 se tendrá:

$$e\% = 100V_r/2V_n = 25 \text{ mV} / 8V = 0,3125\%$$

Este porcentaje representa fluctuaciones aproximadas del 0,3% de variación, valor que se lo puede considerar bajo en comparación a efectos más significativos.

## CAPITULO VII

### EL CONTROLADOR ELECTRONICO

#### VII.A.- INTRODUCCION

La mayoría de los controles automáticos industriales usan como fuentes de potencia la electricidad o un fluido a presión que puede ser aceite o aire. Según el tipo de fuente de energía, usada en su funcionamiento, éstos pueden clasificarse en controles neumáticos, hidráulicos y/o electrónicos. La elección del tipo de control dependerá de la naturaleza de la planta y de sus condiciones de funcionamiento, inclusive consideraciones de seguridad, costo, disponibilidad, precisión, peso y tamaño. (23)

La facilidad de transmisión y de manipulación de las señales electrónicas, confiere a los controladores electrónicos ventajas significativas; y en casos de control por retroalimentación, la rapidez de transmisión de estas señales con su relativa precisión favorecen a que el sistema no tenga como eslabones críticos a los medidores o actuadores electrónicos.

Un control automático compara el valor de salida de una planta con el valor deseado prefijado, determina la desviación y produce una señal de control (función del controlador) que reduce la desviación a cero. (23)

El controlador es un instrumento de propósito especial que compara la variable controlada con un valor deseado y ejerce automáticamente una acción de control de acuerdo con la desviación, acción necesaria para mantener el valor de la variable controlada tan cercano al valor deseado como sea posible. Esta acción puede producirse, de acuerdo con la modalidad que se disponga, de múltiples formas, siendo unas más estables que otras. (41)

En los controles automáticos industriales existen tipos de acción básica de control que son comunes; sin embargo se reunirá, conjunta y brevemente descritos, aquellos que no lo son para lograr una mejor comprensión y disposición en la selección de la misma.

Además se incluye una descripción de los amplificadores operacionales y sus aplicaciones para fines configurativos de este controlador. Y, por último, se desarrolló y estructura un diagrama de bloques del controlador acompañando el circuito correspondiente a cada bloque.

VII.B.- MODALIDADES DE CONTROL

El lazo de control típico (Figura # 7.1a) está formado por el proceso, el transmisor, el controlador y la válvula de control. Para comprender mejor la función se analizará en primer lugar el control manual de un proceso (Figura # 7.1b):

El operario aprecia con la mano la temperatura de salida del agua y acciona con la otra mano la válvula de vapor para mantener el agua a la temperatura deseada (punto de consigna). Si, con la temperatura de salida estable, aumenta el caudal del agua de entrada, forzosamente disminuirá la temperatura de salida; por supuesto que esto ocurrirá al cabo de cierto tiempo debido a la inercia del proceso. Cuando el operador nota con la mano izquierda la disminución de la temperatura, debe compararla con la temperatura que desea y calcular mentalmente cuantas vueltas debe dar a la válvula de vapor y en qué sentido, y a continuación debe realizar la corrección manual con la mano derecha.

Realizada la corrección, el operador debe esperar cierto tiempo para que los efectos de corrección de la válvula se manifiesten en la temperatura de salida, y solo entonces es capaz de juzgar si la primera corrección ha sido escasa o excesiva, y actuar en consecuencia efectuando una segunda corrección, y así sucesivamente.

Esta sucesión de acontecimientos trasladada al lazo de control de la figura # 7.1a permite establecer el siguiente paralelismo: (6)

Mano izquierda del operario = Transmisor  
 Cerebro del operario = Controlador  
 Mano derecha del operario = Servomotor del elemento final de control

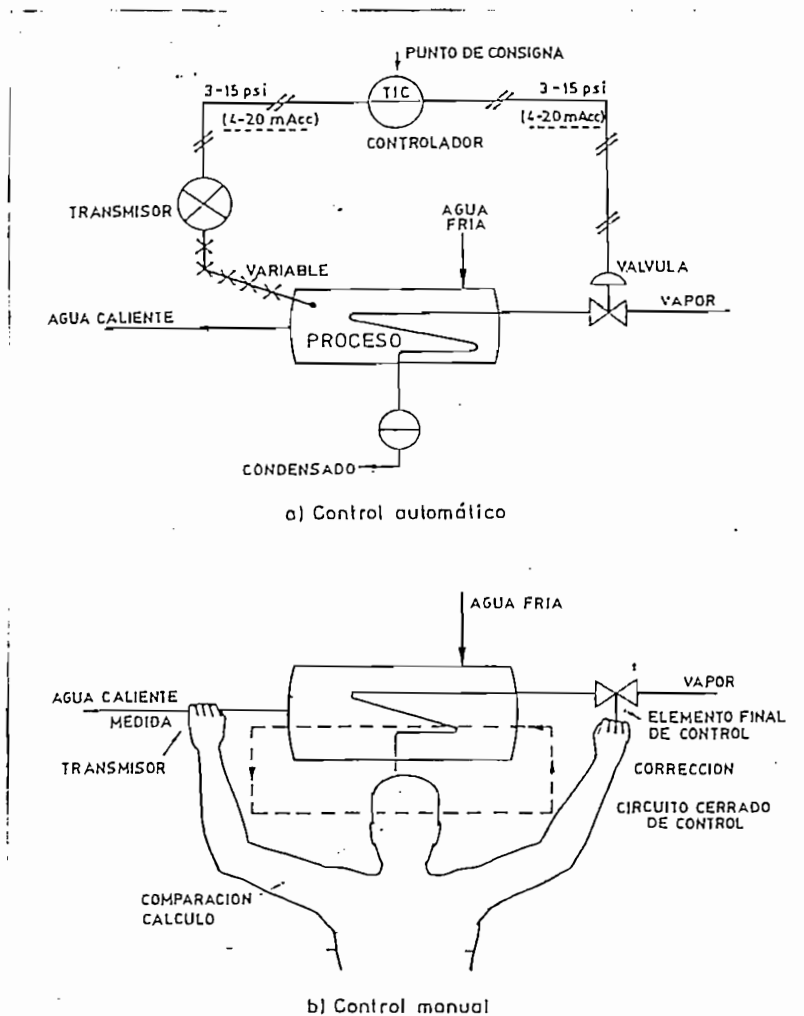


Figura # 7.1

## VII.B.1.- TIPOS DE CONTROL

En los sistemas industriales el controlador actúa de acuerdo con los sistemas y formas de control, a saber:

CONTROL TODO - NADA: (ON - OFF)

Es un sistema de control de dos posiciones, donde el elemento accionador tiene solamente dos posiciones fijas, que en muchos casos son simplemente "conectado y desconectado".

El control de dos posiciones, también llamado SI-NO (ON-OFF) es relativamente simple y económico, y es sin duda la forma de control más utilizada en sistemas tanto industriales como domésticos, ejemplo de ello son los dispositivos de calefacción, termostatos, etc. (41)

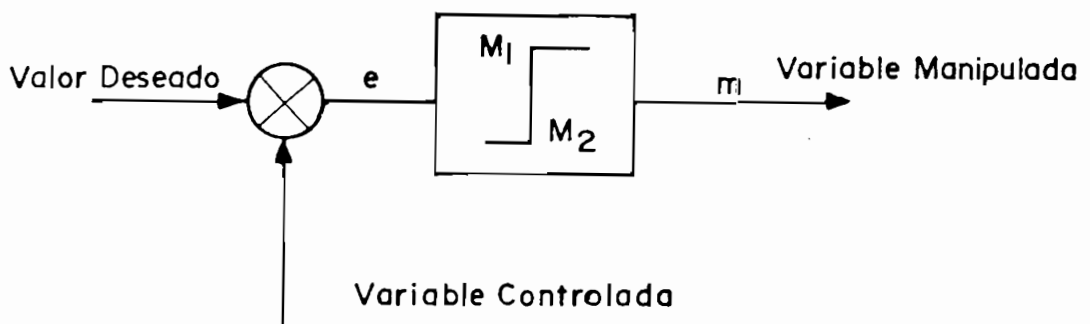


Figura # 7.2

El control de dos posiciones genera un tipo de acción de control en la que la variable manipulada cambia rápidamente de un valor máximo a un valor mínimo, dependiendo de que el valor de la variable controlada sea mayor o menor que el valor deseado (figura # 7.2). El valor mínimo de la variable manipulada es usualmente cero (OFF). (41)

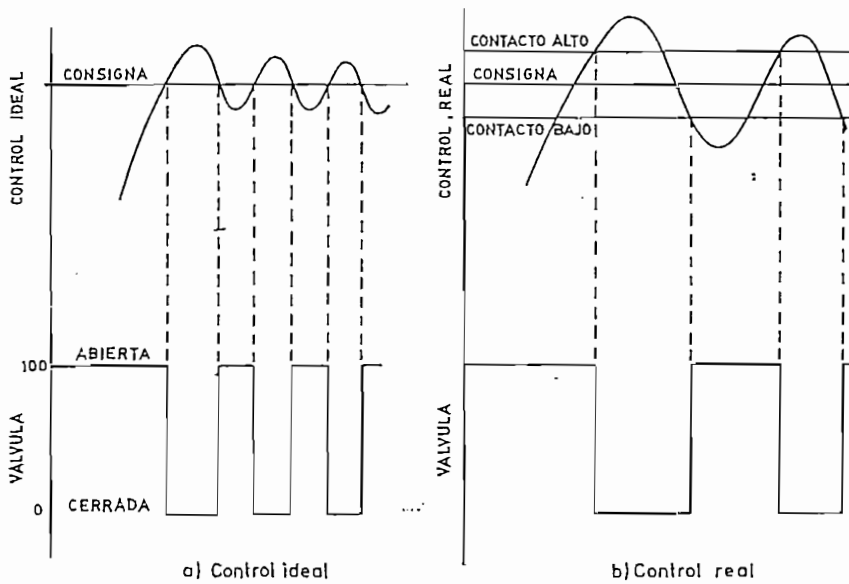


Figura # 7.3

En la práctica, este tipo de control se caracteriza por una banda diferencial o zona neutra (figura # 7.3b) en la cual el elemento final de control permanece en su última posición. (6)

CONTROL DE REALIMENTACION (Feed-back):

Sistema de control en el que se compara una variable medida (variable controlada) con un valor deseado (punto de consigna) y la señal de error obtenida actúa de tal modo que reduce la magnitud de este error. (6)

Los rasgos más importantes que la presencia de realimentación o retroalimentación imparte a un sistema son:

- Aumento de exactitud.
- Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.
- Reducida sensibilidad a las variaciones en las características del sistema. (9)

CONTROL EN ADELANTO (Feed-forward o Directo):

Sistema de control en el que se miden una o más variables de entrada al proceso, que pueden perturbar la variable controlada, y se toma una acción de corrección en la variable manipulada a través del elemento final de control. (6)



Este tipo de control puede combinarse con otros tipos de control, usualmente con el de realimentación, para reducir las desviaciones de la variable controlada. (6)

Es necesario, para control en adelanto, que el controlador pueda ejecutar cálculos de naturaleza compleja capaces de poder predecir la naturaleza de la corrección necesaria en función de la perturbación que siente. (41)

En una planta industrial el número de lazos "feed-forward" en comparación con el número de lazos "feed-back" es muy pequeño; sin embargo, es muy usual combinarlos. (41)

#### CONTROL EN CASCADA:

Sistema de control en el que la señal de salida de un controlador (primario) es el punto de consigna de otro controlador (secundario). (6)

#### CONTROL FLOTANTE:

Forma de control en la que el elemento final de un sistema de control se mueve a una velocidad única independiente de la desviación. (6)

CONTROL SELECTIVO:

Sistema de control en el que se selecciona automáticamente uno de varios controladores según el valor de sus variables de entrada, generalmente con el objeto de evitar daños en el proceso o en el producto. (6)

CONTROL PROPORCIONAL:

Forma de control básica en la que la señal de salida del controlador, variable manipulada, es algebraicamente proporcional al error de la señal de entrada que llega al controlador; existe una relación lineal continua, es decir, la válvula se mueve uniformemente por cada unidad de desviación. En otros términos, la curva que sigue la válvula de control es semejante a la curva correspondiente de la variable controlada. (41) (6)

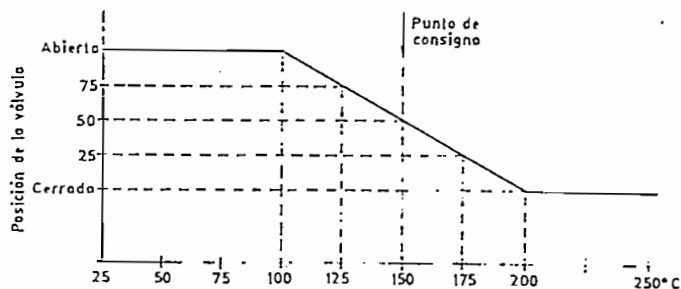


Fig. 5.5 Control proporcional.

En la figura # 7.4 puede verse la forma en que actúa un controlador proporcional cuyo punto de consigna es 150°C y su intervalo de actuación de 100 - 200°C.

La válvula está en sus posiciones extremas a 100°C o menos y a 200°C o más, y entre 100 y 200°C se desplaza proporcionalmente al valor de la variable controlada (por ejemplo a 125°C está abierta en un 75% y a 150°C un 50%). (6)

La acción de control proporcional es la más simple y la más comúnmente encontrada de todas las modalidades de control continuo. Cualquiera que sea el mecanismo en sí, y sea cual fuere la potencia que lo alimenta, el control proporcional es esencialmente un amplificador con ganancia ajustable.

Esta ganancia es el factor  $K_p$ , conocido como sensibilidad proporcional. Su magnitud indica el cambio en la variable manipulada por cambio en la señal de error; se emplea también el término de banda proporcional, que es la inversa de la ganancia:

$$\text{Banda proporcional (BP)} = \frac{100\%}{\text{Ganancia}}$$

.Y cuya definición es:

Banda Proporcional es el porcentaje de variación de la variable controlada, necesario para provocar una carrera completa del elemento final de control. En la práctica, bandas anchas corresponden a respuestas menos sensitivas, y bandas angostas a respuestas más sensitivas: (6) (41)

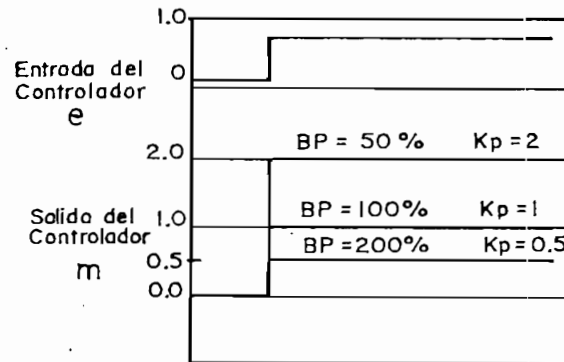


Figura # 7.5

El control proporcional confiere una buena estabilidad al proceso controlado así como una respuesta rápida.

Sin embargo, presenta una desventaja significativa: el OFFSET (o desviación permanente), el cual es una característica indeseable del control proporcional, en el que se produce una diferencia permanente a estado estacionario entre el valor deseado y el valor de la variable controlada

cuando cambian las condiciones de carga del proceso; es decir, el valor final estabilizado, de la variable del proceso, queda separado del punto de consigna. (41)

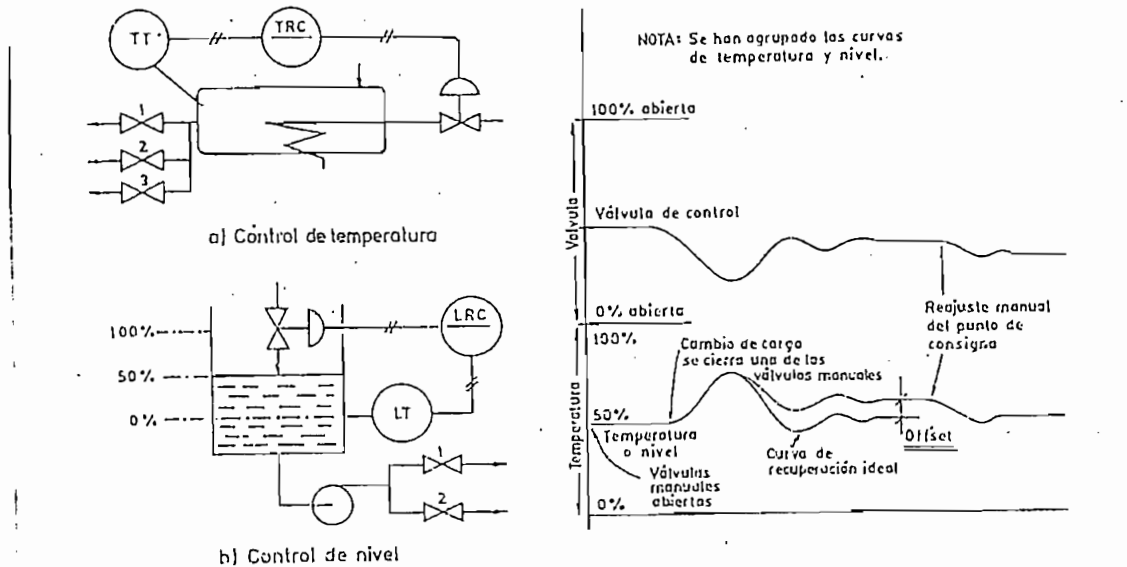


Figura # 7.6

En la figura # 7.6 se muestran dos ejemplos de offset en un intercambiador de calor y en un control de nivel. (6)

CONTROL PROPORCIONAL DE TIEMPO VARIABLE:

En este sistema de regulación la relación del tiempo de conexión al de desconexión del elemento final de control de dos posiciones es proporcional al valor de la variable

controlada, siendo constante la duración de un ciclo completo (conexión - desconexión). (6)

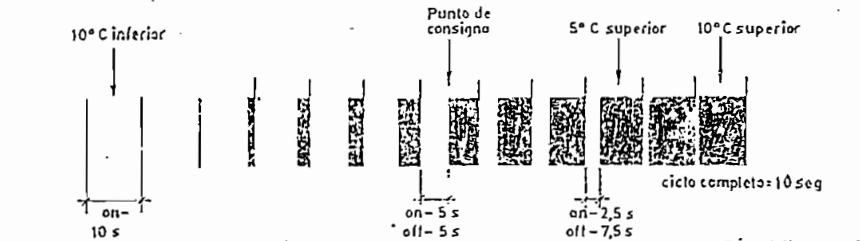


Figura # 7.7

### CONTROL INTEGRAL:

Forma de control en la que el elemento final se mueve de acuerdo con una función integral, en el tiempo, de la variable controlada. Se la conoce también como acción de control de reajuste automático; y es realmente una integración de la señal de error, cambiando el valor de la variable manipulada a una rata proporcional al error. (6) (41)

Así, si la desviación se duplica con respecto a un valor previo, el elemento final de control (por ejemplo el vástago de la válvula) se mueve al doble de velocidad; y,

finalmente, cuando la variable controlada se encuentra con desviación nula, el elemento final de control se mantiene estacionario. (41)

Cuando se trabaja con reajuste automático, o acción integral, no puede existir desviación permanente. Es decir, el error es igual a cero cuando se restablece el estado estacionario.

#### CONTROL DERIVATIVO:

Forma de control en la que existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control. (6)

Es inconcebible el poder disponer de una acción de control que se base solo en la rata de cambio de la señal de error. Puesto que, siendo así, se confrontaría una situación en la que el error no cambiaría en su valor por una rata de cambio igual a cero, y en la que la acción correctiva es, consecuentemente, nula. Por esta razón, la acción diferencial se encuentra en combinación con la acción proporcional. (41)

CONTROL PROPORCIONAL - INTEGRAL:

La modalidad integral se combina, en los controladores, con la modalidad proporcional, denominándose a esta combinación Proporcional - Integral. La cual es favorable porque reúne las ventajas de ambos tipos de modalidades de control; persistiendo la acción de control, a través del tiempo, mientras el error sea diferente de cero y eliminando la existencia de desviación permanente. (41)

La acción integral se define por el llamado "Tiempo de acción integral" que es el intervalo de tiempo en que, ante una señal de entrada en escalón, la parte de la señal de salida debida a la acción integral iguala a la parte debida a la acción proporcional. (6)

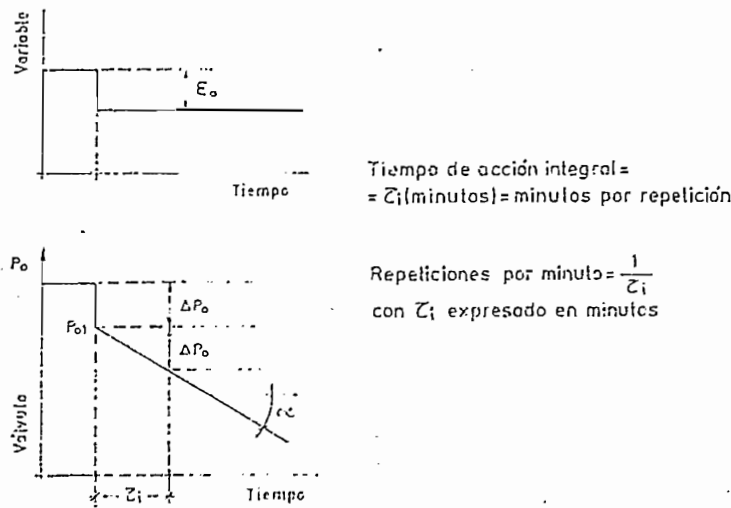


Figura # 7.8

La modalidad de control PID es una modalidad de control sofisticada que combina las tres modalidades ya mencionadas en una sola unidad física y que permite un control sin offset conjuntamente con acción adelantada. (41)



En la figura # 7.8 puede verse gráficamente la obtención de  $\tau_i$ .

El tiempo de acción integral  $\tau_i$  en minutos equivale a "minutos por repetición de la acción proporcional". También se acostumbra expresar la acción integral en "repeticiones por minuto", que es el número de veces por minuto que se repite la acción proporcional y es el recíproco matemático de minutos por repetición. (6)

El ajuste de un controlador PI es, naturalmente, más difícil que el ajuste de un controlador proporcional puro; y que, como se verá más adelante, depende de su configuración.

#### CONTROL PROPORCIONAL - DERIVATIVO:

En la regulación derivativa el movimiento o acción del actuador es proporcional a la velocidad de cambio de la variable manipulada, es decir a la pendiente de esta variable, a su derivada. En la figura # 7.9 se indica esta reacción y la componente proporcional correspondiente.

Para definir la acción derivativa se considera el "tiempo de acción derivada  $\tau_d$ " como el intervalo en que la parte de variación de la salida debida a la acción proporcional equivale a la parte de variación debida a la acción

derivativa cuando se aplica al controlador PD una entrada en rampa.

Este tiempo se acostumbra expresarlo en "minutos de anticipo", que representan el tiempo en minutos que la acción derivativa se anticipa al efecto de la acción proporcional en el elemento final de control (figura # 7.9). (6)

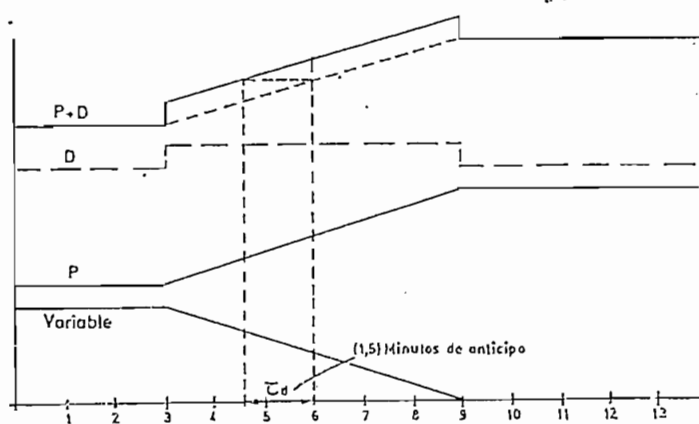


Figura # 7.9

#### CONTROL PROPORCIONAL - INTEGRAL - DERIVATIVO:

La modalidad de control PID es una modalidad de control sofisticada que combina las tres modalidades ya mencionadas en una sola unidad física y que permite un control sin offset conjuntamente con acción adelantada. (41)

Las características resumidas de las acciones de control descritas son: (6)

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con relación al punto de consigna.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.
3. La acción derivativa anticipa la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio o pendiente de la variable controlada.

Los controladores disponen de un accesorio que permite, a voluntad del operador, actuar manual o automáticamente sobre la válvula de control del proceso. El cambio debe efectuarse de tal modo que la señal enviada a la válvula antes y después no sufra variaciones, para evitar un cambio brusco de posición que podría repercutir desfavorablemente en el control del proceso.

## VII.C.- AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El amplificador operacional puede considerarse como un amplificador universal debido a su versatilidad y a la facilidad con que se lo puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones. Este ha existido por muchos años y en un principio se lo construyó en base a tubos de vacío; luego se lo implementó con transistores; y hoy, con la aparición de los circuitos integrados, surgieron amplificadores operacionales de tamaños pequeños, con características excelentes y a bajo costo. En general, los amplificadores operacionales contienen una docena de transistores y diodos y una gran cantidad de resistencias. (16) (41)

En los circuitos electrónicos actuales, utilizados para obtener los diferentes tipos de control, se hace un amplio uso del amplificador operacional; el cual es usualmente un amplificador de corriente continua con una ganancia de tensión en lazo abierto normalmente superior a 50.000 y constituye el "corazón" de los controladores electrónicos.

### VII.C.1.- EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL BASICO

La mayoría de los amplificadores operacionales son amplificadores diferenciales con tres terminales: un terminal de entrada denominado "No Inversor" (+) que hace que la

señal de salida cambie en la misma dirección, otro terminal de entrada denominado "Inversor" (-) que hace que la salida cambie en el sentido inverso, y un tercer terminal el de salida. Estos terminales pueden apreciarse en la figura # 7.10 donde se presenta el esquema de un amplificador operacional. (6)

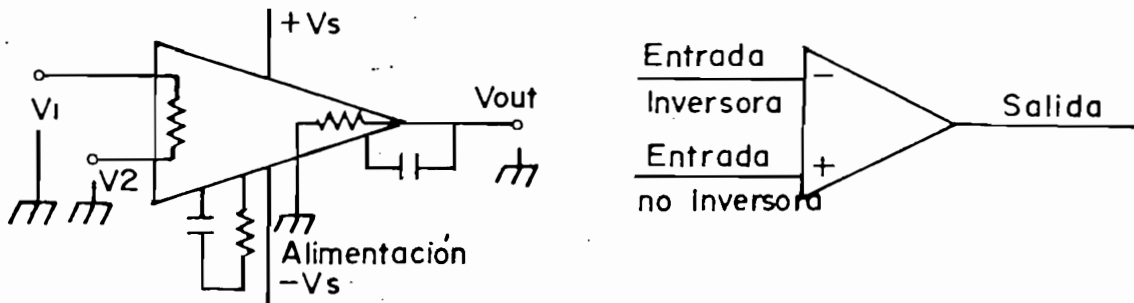


Figura # 7.10

#### VII.C.2.- CARACTERISTICAS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El amplificador operacional, abreviado Op. Amp., se considera como un dispositivo analógico lineal que se utiliza tanto en aplicaciones lineales como en no lineales.

Para evaluar y apreciar mejor las características de un Op. Amp. práctico, se presentan a continuación algunas características de un amplificador operacional ideal. El ideal, que es una creación teórica, posee características atribuidas de modo ideal; siendo las más importantes: (16)

- 1.- Alta resistencia de entrada (corriente de entrada casi nula).
- 2.- Baja capacitancia de entrada.
- 3.- Gran ganancia de lazo abierto (sin realimentación).
- 4.- Baja resistencia de salida.
- 5.- Tiempo rápido de activación y baja sobremodulación (ancho de banda amplio).
- 6.- Índice elevado de barrido rápido. El índice de barrido rápido es el índice máximo de cambio de voltaje de salida en su región lineal por unidad de tiempo. Es una indicación de la rapidez con la que se puede cambiar la salida de un amplificador.
- 7.- Valores bajos de voltaje y corriente de compensación de entrada. Estos se definen como el voltaje diferencial y la diferencia de corriente que se necesitan en los terminales de entrada para obtener una salida de cero.
- 8.- Índice elevado de rechazo en modo común (CMRR). (La salida debe ser función exclusiva de la diferencia de voltajes de entrada).

## VII.C.3.- ESPECIFICACIONES DE RENDIMIENTO DEL OP. AMP uA741

El controlador electrónico que se diseña, hará uso del amplificador operacional uA741 (Fairchild Corp.) y semejantes, razón por la que se incluye una descripción general de este tipo de amplificador operacional: (16)

- 1.- No se requiere compensación de frecuencia.
- 2.- Protección contra cortocircuitos.
- 3.- Capacidad nula de voltaje de apagado.
- 4.- Gamas grandes de voltaje en modo diferencial y en modo común.
- 5.- Bajo consumo de energía.
- 6.- Sin cierre superior (No Latch Up) cuando el rango de modo común se excede.

El uA741 es un amplificador operacional monolítico de alto rendimiento, construido sobre una sola ficha de silicio mediante el proceso epitaxial planar de la Fairchild. La gama elevada de voltajes en modalidad común y la falta de "enclavamiento superior" hacen que el uA741 sea ideal en aplicaciones como seguidor de voltajes. La ganancia alta y la amplia gama de voltajes operacionales proporcionan un superior desempeño en el amplificador integrador y sumador y en las aplicaciones con realimentación. El uA741 tiene protección contra cortocircuitos y no requiere componentes externos para la compensación de frecuencia.

## VALORES NOMINALES MAXIMOS ABSOLUTOS:

Voltaje de alimentación	$\pm 22$ V
Disipación interna de potencia	500 mW
Voltaje diferencial de entrada	$\pm 30$ V
Voltaje de entrada	$\pm 15$ V
Gama de temperatura de almacenamiento	-65 a +150°C
Gama de temperatura operacionales	-55 a +125°C
Temperatura en terminales (soldadura, 60s)	300°C
Duración de salida en cortocircuito	Indefinida

Bajo los valores nominales máximos absolutos se encuentran límites de parámetros que no se pueden sobrepasar para que el funcionamiento sea seguro. Para el uA741C, que se destina a las aplicaciones comerciales, los voltajes máximos de alimentación son de  $\pm 18$  V. La disipación de potencia máxima que se permite varía con el tipo de embalaje y montaje.

## VII.C.4.- AMPLIFICADORES CON REALIMENTACION

Los amplificadores operacionales se conectan en diversos circuitos de realimentación para dar un amplificador con una ganancia controlada. Los amplificadores básicos con realimentación se pueden clasificar como: inversores, no inversores y seguidores de voltajes.



AMPLIFICADOR INVERSOR:

El amplificador inversor es un Op. Amp. con realimentación que da una ganancia controlada y una señal de salida invertida con respecto a la entrada. (16)

El circuito de la figura # 7.11 es un amplificador inversor, con una ganancia  $R_2/R_1$ . Si  $R_2 < R_1$  el dispositivo es también un atenuador.

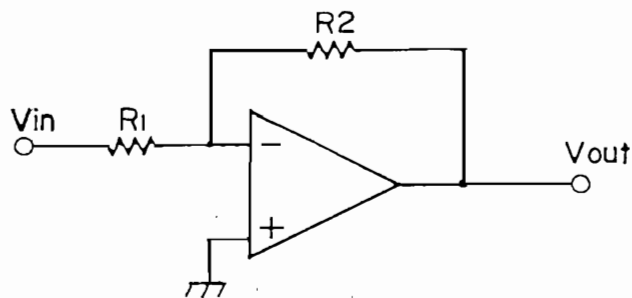


Figura # 7.11

$$V_{out} = -(R_2/R_1) \cdot V_{in} \quad ( 7.1 )$$

AMPLIFICADOR NO INVERSOR:

Con frecuencia se requiere de un amplificador cuya salida sea igual y en fase con la entrada; y que además, la resistencia de entrada sea infinita y la de salida cero para

que en efecto tanto la fuente de alimentación como la carga se hallen aisladas. Un seguidor de emisor aproxima estas especificaciones, pero pueden obtenerse características más ideales usando un amplificador operacional que tenga un terminal de no inversión para las señales y un terminal de inversión para el voltaje de realimentación, como se muestra en la figura # 7.12. (22)

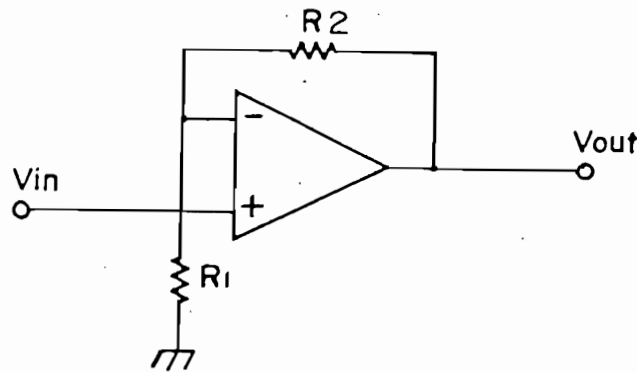


Figura # 7.12

$$V_{out} = (1 + R_2/R_1)V_{in} \quad (7.2)$$

#### SEGUIDOR DE VOLTAJE:

En la figura # 7.13 se aprecia un circuito basado en un amplificador operacional que tiene ganancia unitaria y una muy alta impedancia de entrada. El voltaje de salida sigue a la señal de entrada en un rango definido por los límites de saturación, la corriente de salida está limitada a la corriente de cortocircuito del Op. Amp. y la impedancia de salida es típicamente menor a  $100\Omega$ . (41)

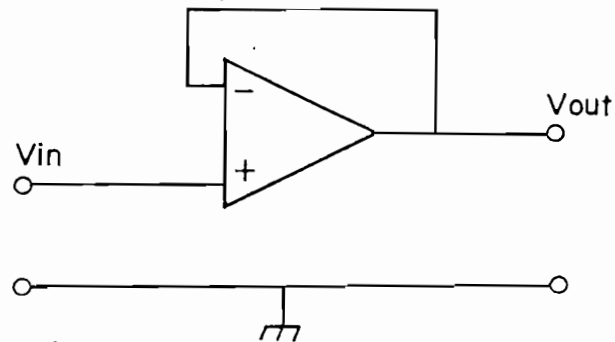


Figura # 7.13

$$V_{out} = V_{in} \quad ( 7.3 )$$

Esencialmente, el seguidor de voltaje de ganancia unitaria, es un transformador de impedancia que convierte un voltaje a alta impedancia en voltaje a baja impedancia. (41)

AMPLIFICADOR SUMADOR:

El amplificador sumador (Fig. # 7.14) da un voltaje de salida que es proporcional a la suma de los voltajes de entrada. Se trata, básicamente, de una modificación del circuito amplificador inversor que suma dos o más voltajes aplicados. (16) (41)

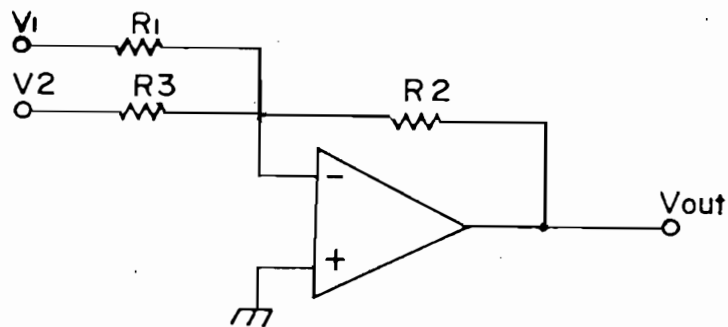


Figura # 7.14

$$V_{out} = -[(R_2/R_1)V_1 + (R_2/R_3)V_2] \quad (7.4)$$

$$V_{out} = -(R_2/R_1)(V_1 + V_2) \quad \text{si } R_1 = R_3 \quad (7.5)$$

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL:

El amplificador diferencial (Fig # 7.20), o de diferencia da un voltaje de salida que es proporcional a la diferencia, entre las señales de entrada inversoras y no inversoras. (16)

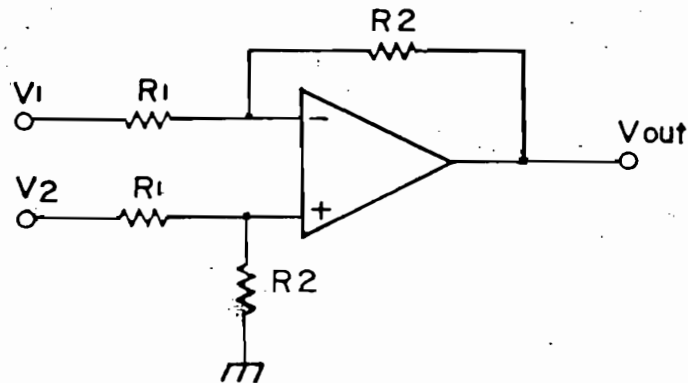


Figura # 7.15

$$V_{out} = (R_2/R_1)(V_2 - V_1) \quad (7.6)$$

Frecuentemente, en la instrumentación asociada con el control de procesos, se requiere amplificación diferencial de voltaje. . (41)

El amplificador diferencial puede obtenerse, además, con el circuito del amplificador sumador al invertirse una de las señales de entrada de este último. Para lo cual cumple la ecuación 7.6 si  $V_1$  es la señal invertida.

#### AMPLIFICADOR INTEGRADOR:

El integrador básicamente consiste de una resistencia de entrada y de un capacitor de realimentación, y es capaz de realizar la operación matemática de la integración.

En la figura # 7.16, se presenta un integrador utilizado para generar una salida de voltaje tipo rampa que sigue ascendiendo en una dirección negativa (debido a la inversión del amplificador) con el tiempo. En la práctica, la rampa tiene la limitación de alcance máximo del voltaje de saturación del amplificador operacional, el cual es aproximadamente igual a su voltaje de polarización.

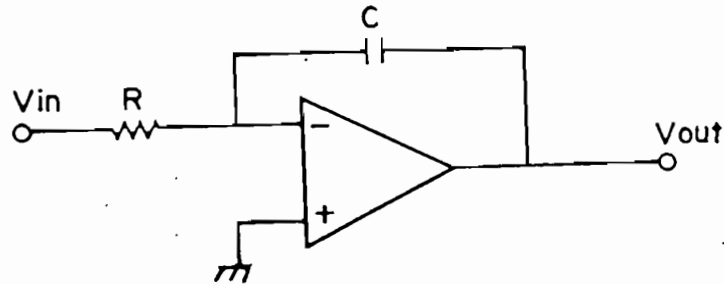


Figura # 7.16

$$V_{out} = -1/RC \int V_{in} dt + V_C \quad ( 7.7 )$$

#### AMPLIFICADOR DIFERENCIADOR:

El diferenciador es el complemento del integrador. Produce una salida que es proporcional al índice de cambio de la entrada; por ésto, una entrada de onda cuadrada aplicada al diferenciador de la figura # 7.17 dará como resultado una salida sólo durante las transiciones, la cual estará

igualmente limitada por el voltaje de saturación o al voltaje de alimentación.

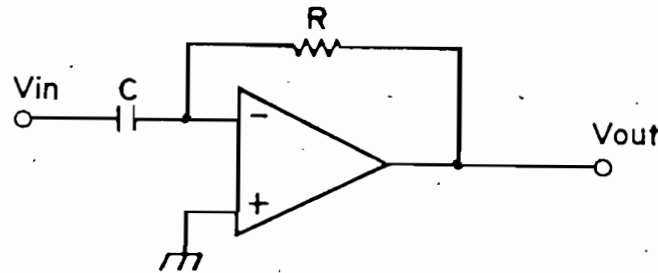


Figura # 7.17

$$V_{out} = RC(dV_{in}/dt) \quad ( 7.8 )$$

La construcción práctica del circuito diferenciador de la figura # 7.17, presenta ciertos problemas puesto que el circuito es propenso a las oscilaciones, las cuales son causadas por la red de realimentación que en las frecuencias más elevadas produce un retardo de fase de  $90^\circ$ . El retardo se suma al desplazamiento de fase del amplificador operacional que en el peor de los casos es casi  $-90^\circ$ ; el margen restante de fase es nulo por lo que el circuito es inestable.

La inestabilidad se puede dominar si se reduce el desplazamiento de fase de la red de realimentación en frecuencias altas conectando un resistor  $R_1$  en serie con el condensador de diferenciación como en la figura # 7.18. (34)

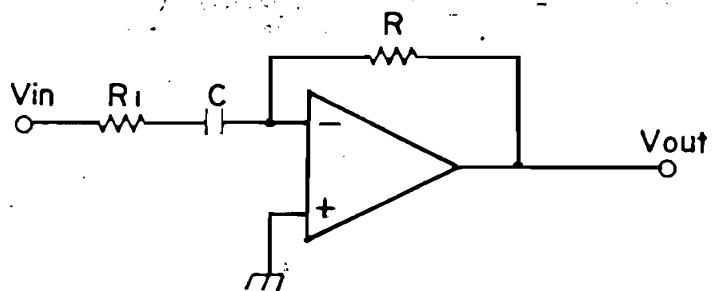


Figura # 7.18

$$2\pi R_1 C \ll 1$$

( 7.9 )



VII.E.- JUSTIFICACION, DESARROLLO Y CONFIGURACION DE LA  
MODALIDAD DE CONTROL

VII.E.1.- JUSTIFICACION

La finalidad del controlador es conferir a una cantidad física (variable controlada) un predeterminado valor y mantenerla en este valor. Para conseguirlo, el controlador debe contrarrestar de manera adecuada la influencia de las perturbaciones con el fin de que la señal de error sea nula o lo más pequeña posible.

El diseño de un controlador exige determinar la influencia de sus modalidades de control en el proceso a regularse; y puesto que el objetivo del presente trabajo es desarrollar un controlador que facilite esta tarea, se reunieron las tres modalidades principales (sección VII.B) que son la proporcional, la integral y la derivativa.

Las tres modalidades se implementarán mediante elementos electrónicos y se complementarán con circuitos que permitan seleccionar una combinación de estas modalidades a fin de determinar la mejor configuración con los parámetros más adecuados, y con el fin de regular apropiadamente la velocidad de una mini turbina de generación hidro-eléctrica.

Un controlador requiere de un circuito detector del error para acoplarlo a su entrada, y en base a esta señal y a sus parámetros de funcionamiento, adoptar una señal de salida acorde a sus características. Esta señal de salida requiere de un circuito actuador que acople esta señal, mediante un circuito amplificador de potencia, a un servomotor: elemento final del actuador que proporciona el movimiento correctivo de los elementos que gobiernan la velocidad de la turbina (sección V.A y V.E).

El funcionamiento de la turbina, y el de cualquier proceso, requiere de dos etapas para llegar a un funcionamiento automáticamente regulado, las cuales son: maniobra y regulación.

La etapa de maniobra involucra la preparación de todas las condiciones adecuadas para el arranque y obtención de una velocidad de giro de la turbina cercana a la nominal. La etapa de regulación tiende a mantener esta velocidad lo más cercana posible a la velocidad de referencia o nominal.

Estas dos etapas están configuradas por dos circuitos. Uno para control manual (etapa de maniobra), y Otro circuito para control automático (etapa de regulación); ambos comandados a través de un selector de cambio de modo de operación manual/automático.

Para reducir el efecto de los rangos críticos de alcance o carrera de los subsistemas del gobernador, se procede a colocar limitadores, circuitos estabilizadores y de alarma, que restrinjan el alcance de los mismos, y eviten que el sistema siga funcionando en saturación: activando una alarma y desconectando al controlador y a los elementos críticos que intervengan

Todos estos circuitos se desarrollarán en base a tecnología electrónica con amplificadores operacionales básicamente, según lo requerido para configurar un controlador electrónico analógico (sección VII.D), con las modalidades seleccionables mencionadas: Proporcional (Kp), Integral (Ki) y Derivativa (Kd).

#### VII.E.2.- DESARROLLO

#### VII.E.1.- PARAMETROS Y ESPECIFICACIONES

El diseño del controlador electrónico debe ajustarse a los requerimientos de regulación de la turbina, y utilizar los elementos que ésta posee para coordinar la acción reguladora, y sujetarse a las especificaciones que se indican a continuación:

1.- SELECTORES DE:

- Cambio de operación manual/automático.
- Conexión/desconexión de cada modalidad de control.
- Cambio del tipo de realimentación Sigma.

2.- AJUSTE Y CALIBRACION DE:

- Velocidad de referencia.
- Sensibilidad y resolución de las señales de error y control.
- Realimentación sigma y de posición del servomotor.
- Centrado de la válvula del sistema oleomecánico ( $\sigma$ ).
- Parámetros de cada modalidad.
- Offset, o desviación de salida de los amplificadores operacionales.

3.- PROTECCION Y LIMITACION DE:

- Carrera de la válvula del sistema oleomecánico.
- Carrera del inyector.
- Sobrecorrientes y cortocircuitos.

4.- RANGOS DE TRABAJO:

- Velocidad de generación seleccionable.
- Ganancia Proporcional seleccionable de 1 a 60

- Ganancia Integral seleccionable de 0.1 a 50
- Ganancia Derivativa seleccionable de 1 a 50
- Ganancia de Error seleccionable de 0.1 a 1.1
- Ganancia señal de control seleccionable de 0.1 a 1.1
- Ganancia de Sigma seleccionable de 1/3 a 5
- Ganancia de señal de posición del servomotor seleccionable de 0.1 a 1.1

#### 5.- FACILIDAD DE OPERACION:

- Macro y micro ajuste de los parámetros de las modalidades de control.
- Control manual con macro y micro avance.
- Activación de alarma audible, por saturación de la carrera del inyector de la turbina (limitadores activados), desconexión de la bomba del sistema oleomecánico, y desactivación del servomotor eléctrico.
- Tomas de salida de las señales de: error, velocidad de referencia, y velocidad de la turbina, para visualización en un osciloscopio.

#### 6.- FUENTE DE PODER:

- Entrada: 110 Voltios AC, 60 Hz (primario).
- Salida: 24 Voltios AC (secundario).
- Primera etapa:  $\pm 32$  Voltios rectificadas a través de un puente con filtro RC, para aplicaciones especiales

- Segunda etapa:  $\pm 12$  Voltios DC regulados, que alimenten el servomotor y circuitos secundarios acoplados.
- Tercera etapa:  $\pm 10$  Voltios DC, regulados por diodos Zener, para que absorban todo transitorio producido por el consumo de corriente del servomotor eléctrico.

#### VII.E.2.2.- DIAGRAMA DE BLOQUES Y DESCRIPCION GENERAL

El funcionamiento básico del sistema de control electrónico, de acuerdo a las especificaciones citadas, y en base a los requerimientos propios para el control según lo analizado anteriormente, se describe en el diagrama de bloques de la figura # 7.19.

Donde:

M/A = Selector de cambio de control manual/automático. Todos los bloques M/A, se hallan acoplados a una sola manilla de accionamiento u operación simultánea.

$\sigma(\text{int/ext})$  = Selector de cambio de realimentación de caída de velocidad transiente (conexión interna o externa respecto a las modalidades de control). En igual forma están acoplados todos los bloques de este tipo a una manilla.

$\Sigma$  = Circuito sumador de señales electrónicas.

----> = Señales eléctricas y/o electrónicas.

====> = Señales de desplazamiento mecánico producidas por señales eléctricas, y/o que mueven sensores eléctricos (potenciómetros, interruptores de fin de carrera).

El bloque correspondiente a la velocidad de referencia permite ajustar una señal de tensión proporcional a la velocidad nominal deseada de giro de la turbina; y, consecuentemente, de igual amplitud a la tensión obtenida por el fototacómetro (sensor de velocidad de giro de la turbina).

Estas dos señales son recogidas en un tercer bloque, el cual toma su diferencia y produce una señal de error proporcionalmente ajustable a esta diferencia; es decir, un ajuste de sensibilidad del error detectado.

Existe otra señal, generada por el desplazamiento de la válvula del sistema oleomecánico al mover un potenciómetro de variación lineal polarizado, positiva y negativamente, que produce una tensión nula en la mitad de su carrera: corresponde a la señal sigma, o realimentación de caída de velocidad transiente, que actúa como limitadora de carrera, marcando un rango ajustable de recorrido en la válvula mencionada.

La señal de realimentación sigma se aplica a la entrada o a la salida del grupo de bloques de las modalidades de control (sección VIII.B.1), según la posición de la manilla del selector sigma interior/externo.

Estas señales producen una reacción diferente en cada uno de los bloques de modalidades de control: señales de control proporcional, integral y derivativa que sumadas con las señales sigma y de posición del servomotor, en el bloque próximo a éstos (fig. # 7.19), proporcionarán una determinada señal de control automático (cuya ganancia es ajustable).

La señal de control manual se obtiene mediante dos potenciómetros acoplados a una manilla de operación (joystick). La señal de realimentación limitadora sigma y la de posición del servomotor se unen a esta señal, y por medio del selector M/A se aplican al servomotor eléctrico (actuador), previa amplificación de la potencia de esta señal de control o de la señal automática.

El tornillo posicionador de la varilla del sistema oleomecánico es movido por el servomotor, desplazamiento que es detectado por un potenciómetro lineal polarizado y acoplado a este tornillo. La señal de posición sensada es realimentada al servomotor a través de los circuitos de las señales de control automático y de control manual.



La modalidad integral está provista de un circuito de inicialización que descarga a su condensador cuando se opera en control manual, y que en el cambio a automático lo entrega con valor nulo de carga. Este circuito se implementó para evitar señales de control saturadas, o con un determinado valor inicial, aplicadas en el momento de cambio del modo de control M/A; permitiendo iniciar el control automático desde una señal nula de control integral.

Por último, y a fin de añadir seguridad y protección al inyector (que recibe la fuerza para su desplazamiento a través del sistema oleomecánico), se ha provisto de dos interruptores de fin de carrera que limitan su recorrido; y evitan que se sature en sus extremos: desconectando la bomba de presión de aceite y la señal de control al servomotor, y activando una alarma que anuncie la falla.

El circuito de seguridad está provisto de un interruptor que permite, a través de un procedimiento (apéndice E), reactivar el sistema y consecuentemente reiniciar el proceso de control de velocidad.

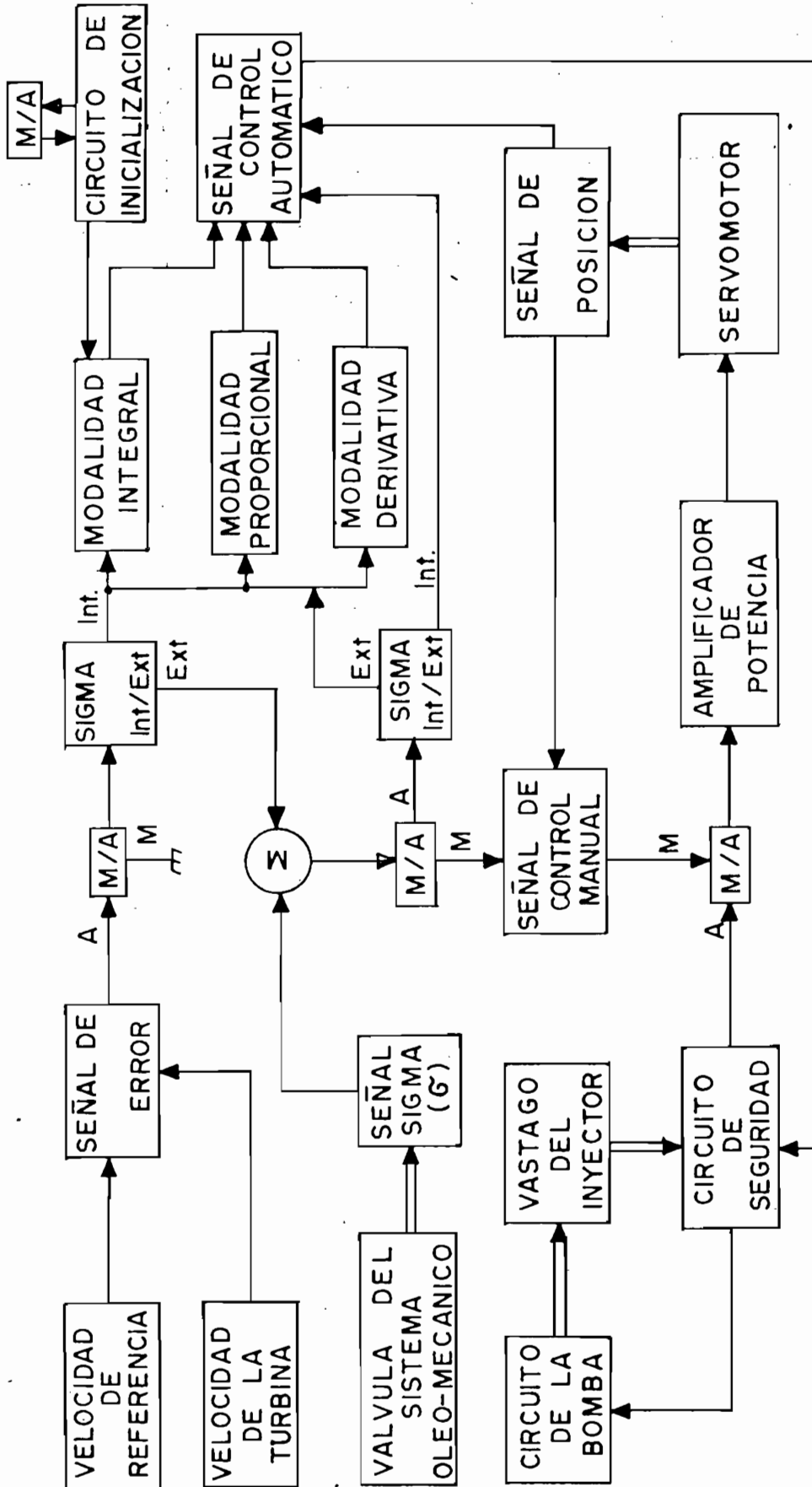


FIGURA 7.19

## VII.E.3.- CONFIGURACION

Los circuitos electrónicos que corresponden a los bloques de la figura # 7.19 se describen y configuran a continuación:

## VII.E.3.1.- VELOCIDAD DE REFERENCIA

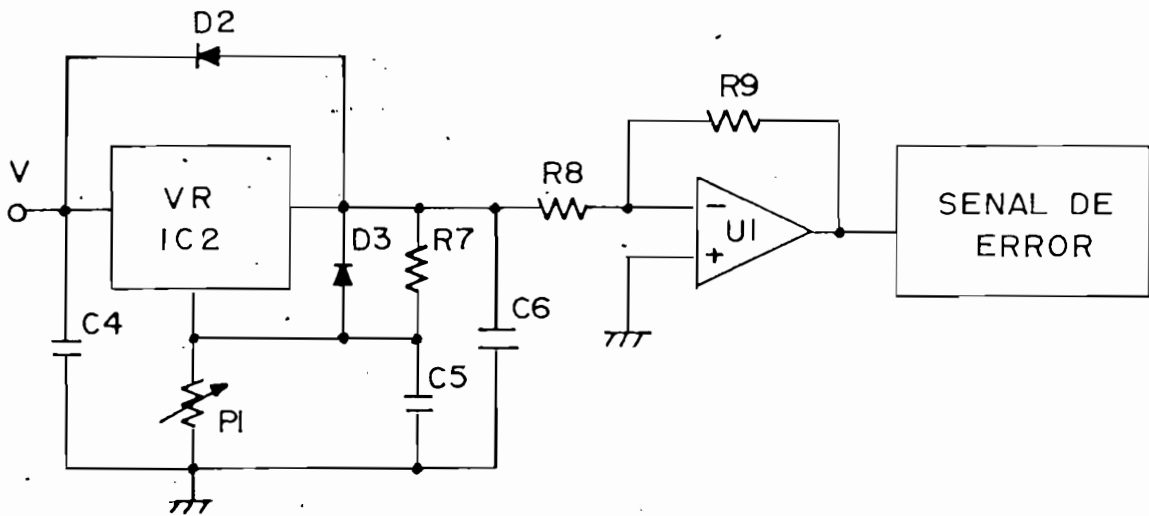


Figura # 7.20

Basa su funcionamiento en un circuito integrado regulador de voltaje (IC2 LM317T) que provee, a través del potenciómetro P1, un rango de voltaje desde 1.2V hasta 32V. Puesto que el voltaje de trabajo es de 10V (Vcc) este voltaje se le acopla a un reductor (de ganancia 1/3) utilizando la configuración de amplificador inversor con el Op. Amp. U1. Esta configuración del IC2 es recomendada por su fabricante e incluye elementos de protección (ver anexos).

VII.E.3.2.- VELOCIDAD DE LA TURBINA

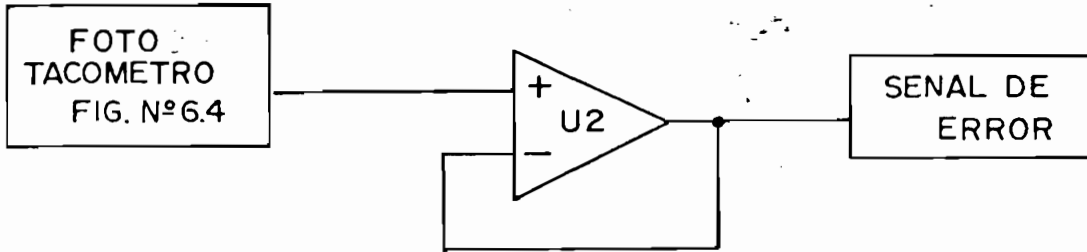


Figura # 7.21

El circuito del fototacómetro (Fig. # 6.4) proporciona la señal de voltaje correspondiente a la velocidad de la turbina, limitándose este bloque a un circuito seguidor de voltaje (fig. # 7.13) para fines de acoplamiento de impedancias.

VII.E.3.3.- SEÑAL DE ERROR

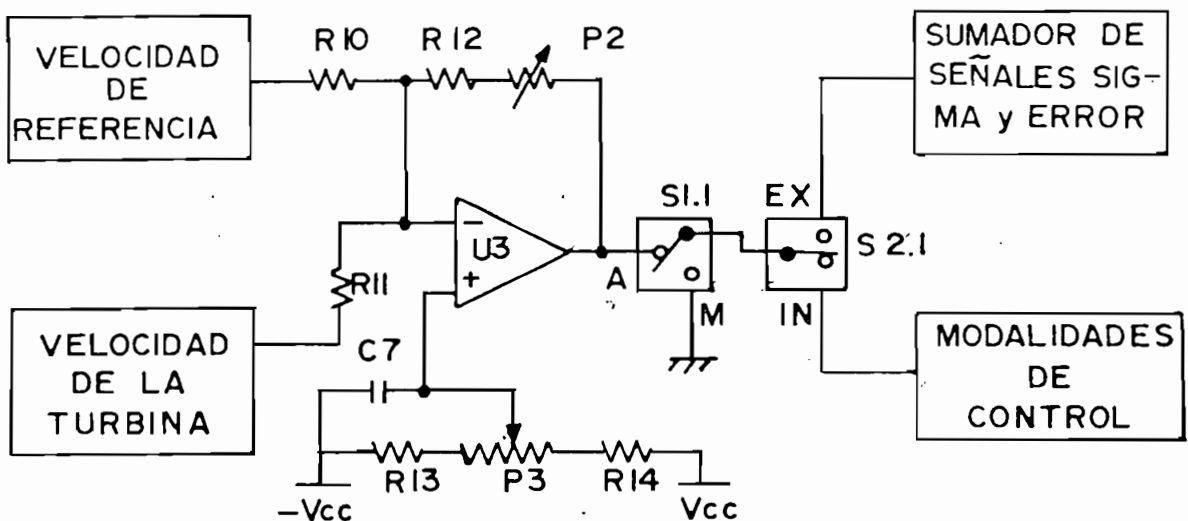


Figura # 7.22

El diagrama de la figura # 7.22 es, esencialmente, un circuito sumador de señales (fig. # 7.14), donde una de ellas ingresa con polaridad opuesta a la otra a fin de ser restadas y conseguir la señal de error. El potenciómetro P2 permite ajustar la ganancia de esta señal con el objeto de regular su sensibilidad. La señal de error se acopla a los selectores de control manual/automático y de cambio de sigma interior/exterior para dirigir la señal de error hacia los bloques que correspondan a un modo específico de operación.

#### VII.E.3.4. - SEÑAL DE SIGMA

Esta configuración (figura # 7.23) está determinada por tres etapas:

1) La obtención de la señal sigma con ajuste de centrado y calibración de ganancia de esta señal a través de los potenciómetros P3, P4 y P5 respectivamente.

2) El circuito sumador de esta señal con la de error cuya salida es dirigida, según el modo de operación M/A y  $\sigma$ (int/ext), hacia los circuitos correspondientes al modo de operación seleccionado

3) Etapa de inversión de señal para fines de acoplamiento adecuado de polarización, puesto que esta señal se aplica a la salida de las modalidades de control que poseen configuración inversora (figs. # 7.24, 7.25 y 7.26)

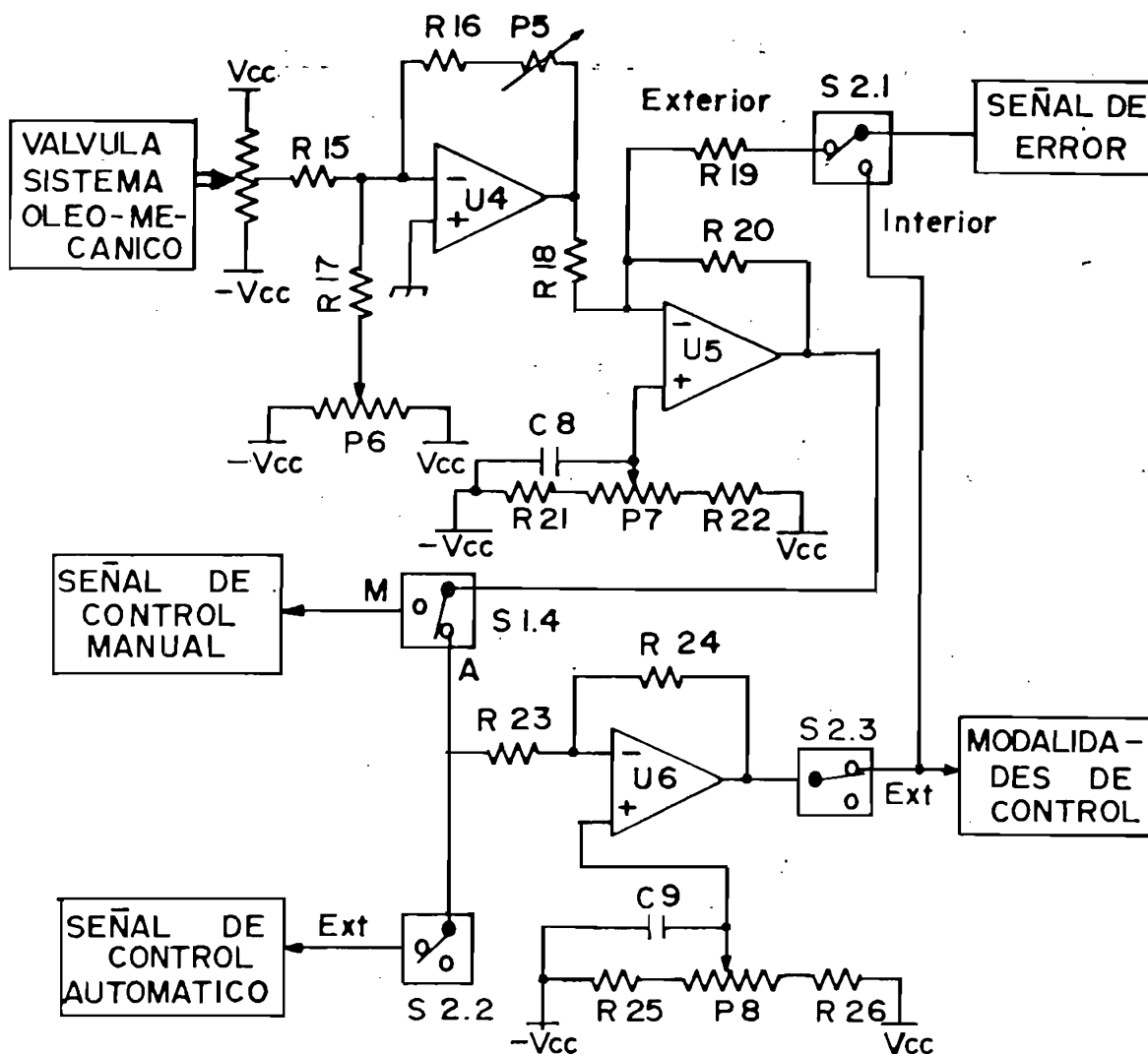


Figura # 7.23

El potenciómetro P5 permite ajustar la ganancia de la señal sigma para variar la limitación de la carrera de la válvula del servo-hidráulico y la sensibilidad de esta señal para sus dos modos de operación (int/ext).

## VII.E.3.5.- MODALIDAD PROPORCIONAL

El diagrama de la figura # 7.24 es un circuito amplificador inversor de señal (fig. # 7.11) con ajuste de ganancia  $K_p$  a través de los potenciómetros P9 y P10 que proporcionan macro y micro ajuste.

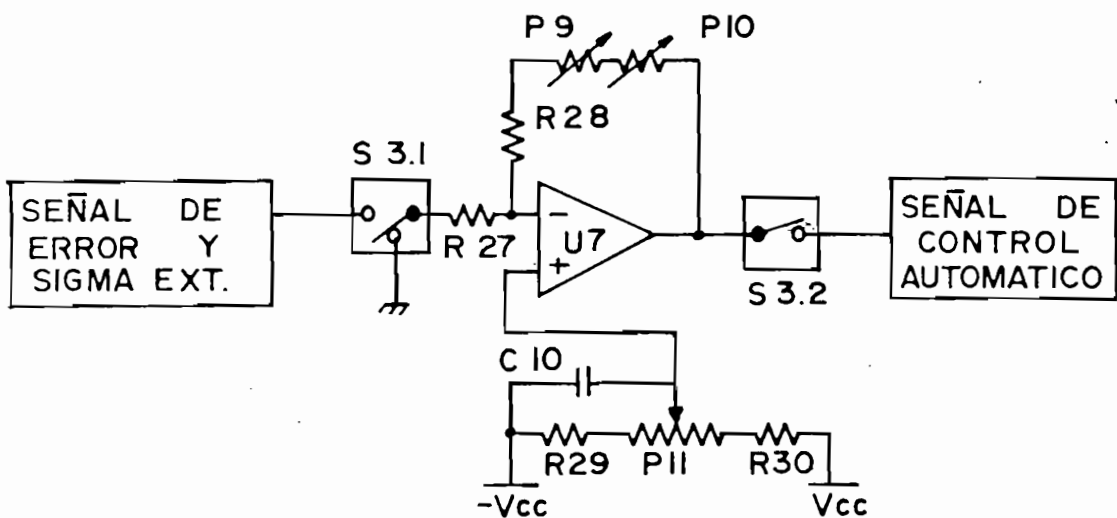


Figura # 7.24

El selector S3 permite conectar esta modalidad, y el potenciómetro P11 regula la calibración de offset.

De acuerdo a la ecuación (7.1) y a los datos obtenidos en la sección VIII.D, tendremos:

$$V_{out} = - [(P9 + P10 + R28)/R27] V_{in} \quad (7.10)$$

$$K_p = \text{rango de 1 a 60}$$

La resistencia R28 es igual a R27 para proporcionar ganancia mínima unitaria ( $K_p = 1$ ), y se selecciona un valor de  $1\text{ k}\Omega$  para proporcionar una mayor corriente de operación y consecuentemente mayor rapidez de respuesta de esta modalidad (el mismo criterio se aplicará a las otras modalidades)

Para conseguir un  $K_p(\text{máx})$  de 60 y una ganancia  $K_p$  con ajuste macro y micro, se selecciona:

$$P9 = 10\text{ k}\Omega$$

$$P10 = 50\text{ k}\Omega.$$

#### VII.E.3.6.- MODALIDAD INTEGRAL

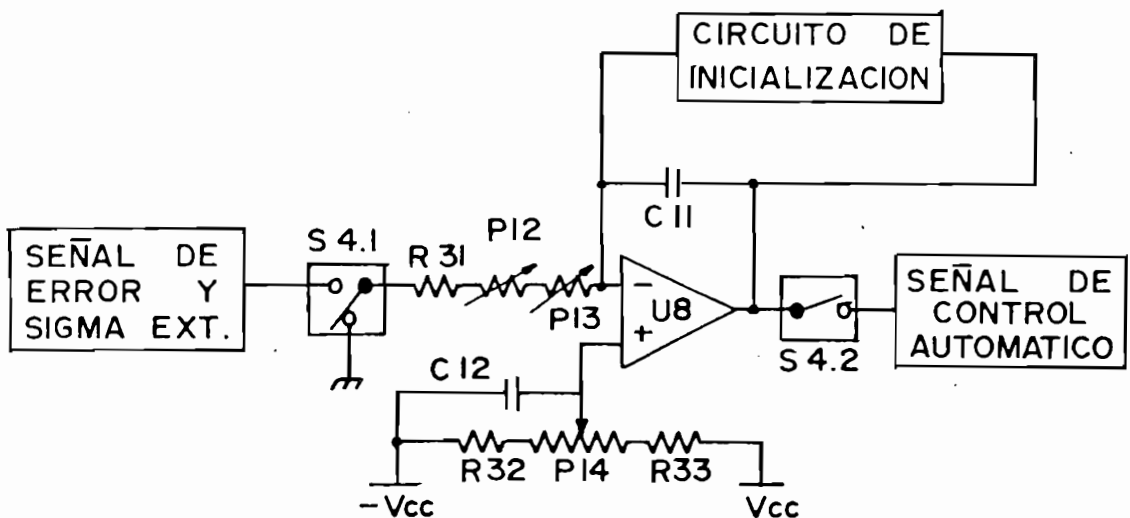


Figura # 7.25

El diagrama de la figura # 7.25 es una configuración de circuito integrador (ver fig. # 7.16) al cual se le ha



agregado un circuito descargador del condensador C11 para efectos de inicialización de su valor de carga.

Los potenciómetros P12 y P13 permiten ajustar la ganancia  $K_i$  con mayor o menor sensibilidad. El interruptor S4 conecta la señal de esta modalidad a la señal total de control automático, y el potenciómetro P14 ajusta la desviación de señal debido a offset.

De la ecuación 7.7 y de la sección VIII.D se deduce que:

$$K_i = 1/[ (P12 + P13 + R31) \cdot C11 ] \quad ( 7.11 )$$

$$= \text{rango de } 0,1 \text{ a } 50$$

El valor máximo de  $K_i$ , de acuerdo a la ecuación 7.11, está determinado únicamente por la resistencia R31 y C11.

El valor mínimo viene dado por R31 con los potenciómetros P12 y P13 ajustados a su máximo valor y C11.

En un circuito integrador el tipo de material empleado como dieléctrico, para el capacitor C11, es determinante en su buen funcionamiento, requiriéndose un capacitor que no presente pérdidas por corrientes de fuga que alterarían la señal de control resultante.

El voltaje DC de entrada offset atravesará la entrada del amplificador, y este voltaje será integrado apareciendo

en la salida como un voltaje de incremento lineal. Parte de la corriente de entrada de polarización también fluirá a través del capacitor de realimentación C11, cargándolo y produciendo un voltaje adicional que se incrementará linealmente en la salida. Estos dos voltajes de rampa continuarán su incremento hasta el punto de saturación del amplificador.

El efecto de la corriente de polarización puede ser minimizado incrementando el valor del capacitor C11, mientras simultáneamente se disminuye el valor de la resistencia a la entrada inversora para obtener el mismo valor (o rango) dado por la constante de tiempo  $(R_{31} + P_{12} + P_{13}) \times (C_{11})$ .

Se selecciona, para este fin, un capacitor con dieléctrico de poliestireno y de valor 10 $\mu$ F para conseguir que el valor de los potenciómetros ajusten en valores aceptables que de acuerdo a la ecuación 7.11:

$$R_{31} = 1 / (K_{i_{\text{máx}}} \cdot C_{11}) = 2K\Omega$$

$$P_{12} + P_{13} = 1 / (K_{i_{\text{mín}}} \cdot C_{11}) = 1M\Omega$$

Se usaron los siguientes valores para los potenciómetros:

$$P_{12} = 1M\Omega \quad \text{y} \quad P_{13} = 100K\Omega$$

## VII.E.3.7.- MODALIDAD DERIVATIVA

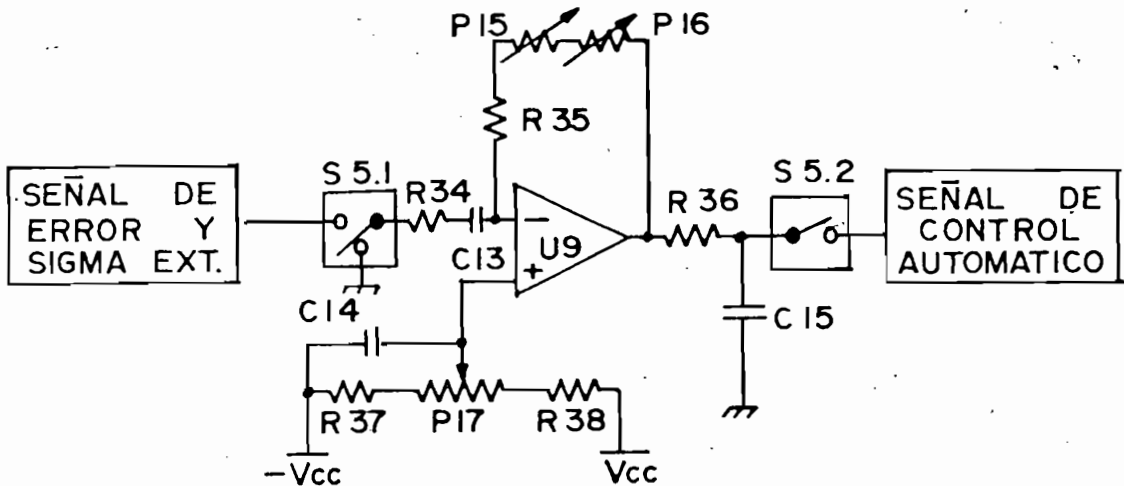


Figura # 7.26

El diagrama de la modalidad derivativa de la figura # 7.26 requiere dos etapas (fig. # 7.18): la configuración derivadora de señal y un circuito filtro que no deje pasar oscilaciones de alta frecuencia generadas por esta configuración (filtro pasa-bajo).

Los potenciómetros P15 y P16 proporcionan el ajuste, macro y micro, de ganancia  $K_d$ ; la resistencia R34 da estabilidad al circuito derivador si se considera la relación de la ecuación 7.9; el interruptor S5 permite conectar esta modalidad a la señal total de control automático y el potenciómetro P17 permite el ajuste de offset.

De acuerdo a la ecuación 7.8 se deduce:

$$\begin{aligned} K_d &= (P15 + P16 + R35) \cdot C13 & ( 7.11 ) \\ &= 1 \text{ a } 50 \end{aligned}$$

Se seleccionó un capacitor de dieléctrico de papel de valor alto (500uF) para que se ajuste a los valores de los potenciómetros que se calculan a continuación:

$$\begin{aligned} R35 &= K_{d_{\min}}/C13 = 1/500 \cdot 10^{-6} = 2K\Omega \\ P15 + P16 &= K_{d_{\max}}/C13 = 100K\Omega \end{aligned}$$

seleccionándose:

$$P15 = 100K\Omega \quad \text{y} \quad P16 = 10K\Omega$$

El filtro pasa-bajo conformado por la resistencia R36 y el condensador C15 (filtro pasivo) tiene como frecuencia de corte la siguiente: (B6)

$$f_c = 1 / (R36 \cdot C15) \quad ( 7.12 )$$

El tiempo de reacción del servomotor se encuentra alrededor del tiempo para una oscilación a 60Hz (sección V), por tanto, se usa este valor para la frecuencia de corte del filtro incluido.

Se selecciona además un valor para la resistencia R36 menor al valor de la resistencia de entrada al circuito sumador de las señales de control:

$$R36 = 1.5K\Omega$$

Por tanto:

$$C15 = 1/(f_c \cdot R36) = 10\mu F \text{ aproximadamente.}$$

Sobre la frecuencia seleccionada toda señal oscilatoria será filtrada y no tendrá efecto alguno. Puesto que la frecuencia generada, debido a la configuración derivadora (empleando Op. Amp.), es alta (encontrado experimentalmente por el orden de los kilo hertz), este valor de frecuencia de corte seleccionado no es crítico, y permitirá que la señal de control derivativo actúe dentro de rangos oscilatorios que admite el control de un sistema hidráulico.

#### VII.E.3.8.- CIRCUITO DE INICIALIZACION

El circuito de la figura # 7.27 mantiene descargado el condensador C11 mientras el selector S1 se encuentra en modo manual de operación. En modo automático, el selector S1 permite que este capacitor reciba-carga y que la modalidad integral opere como tal.

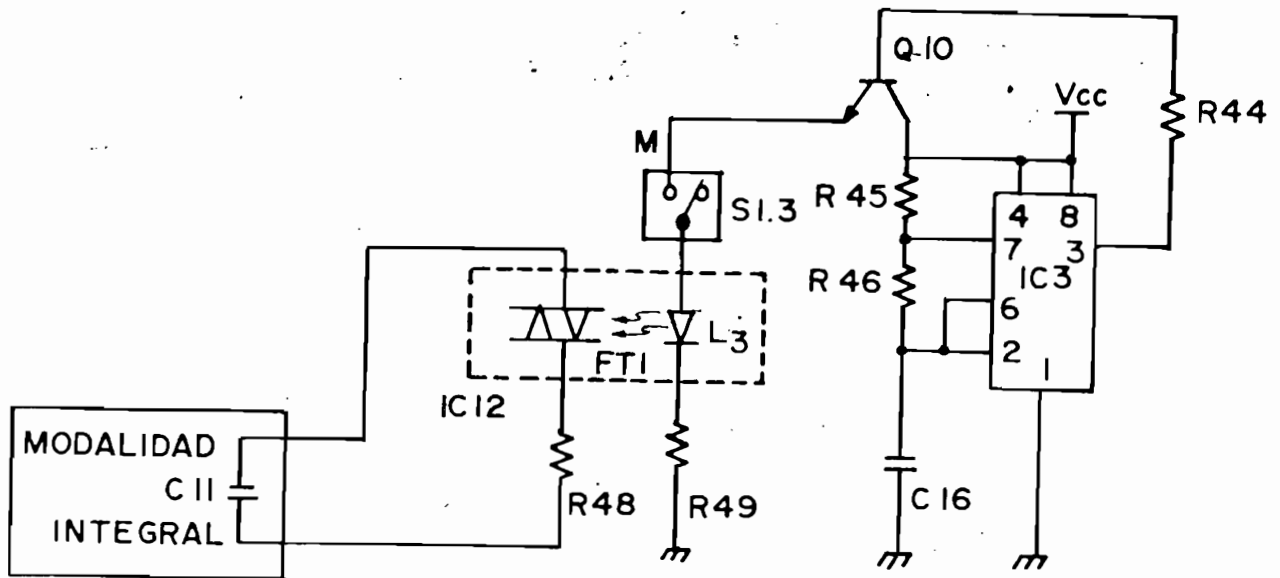


Figura # 7.27

La descarga se produce por medio de los pulsos del IC3 (timer 555) que pasarían al LED L3 (IC12), disparando el fototriac, FT1; este último cierra el circuito con la resistencia limitadora de corriente de descarga R48, y C11 es descargado en un tiempo  $(R48 \cdot C11)$

#### VII.E.3.9.- SEÑAL DE CONTROL MANUAL

La figura # 7.28 muestra la configuración para conseguir el control manual. Básicamente es una configuración de circuito sumador de señales (fig. # 7.14), que reúne las señales de Sigma y la de Posición del pivote de la varilla de realimentación (servomotor) con la señal del control

manual, con macro y micro ganancia, a través del joystick que comanda los potenciómetros P18 y P19.

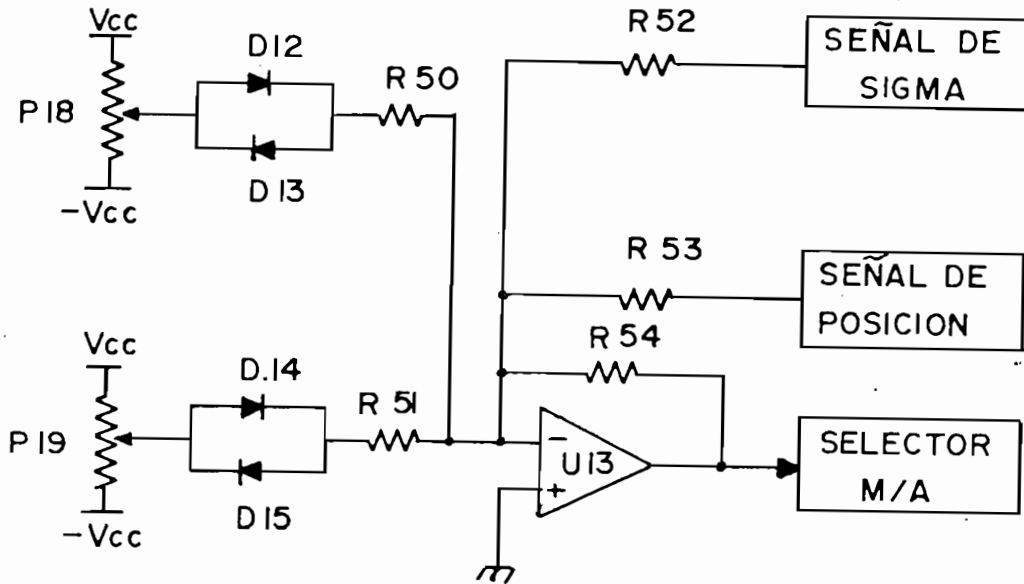


Figura # 7.28

Los diodos D12, D13, D14 y D15 proporcionan una pequeña zona muerta de accionamiento del control manual para un fácil centrado de la manilla del joystick.

#### VII.E.3.10.- SEÑAL DE CONTROL AUTOMATICO

La figura # 7.29 presenta la configuración de un circuito sumador que reúne las señales de las modalidades de control, que se encuentren activadas, con las señales Sigma interior y la de posición del servomotor.

El circuito incluye un ajuste de ganancia de la señal total de control automático a través del potenciómetro P20.

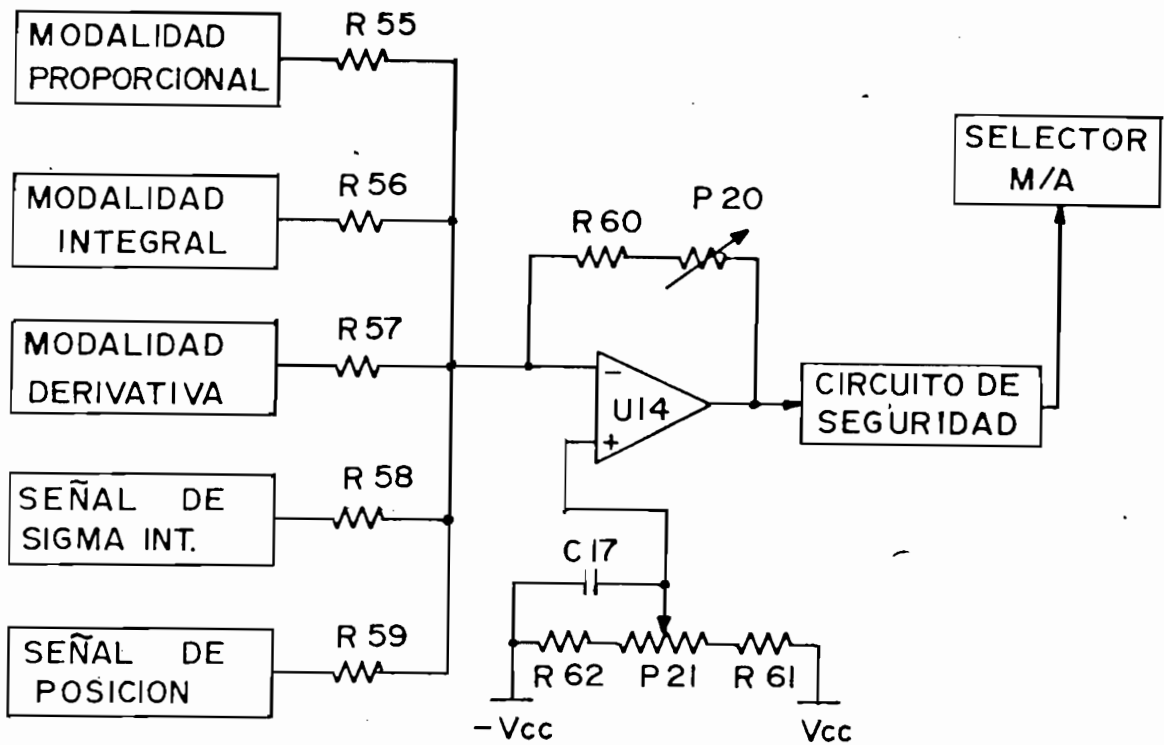


Figura # 7.29

El potenciómetro P21 permite ajustar las desviaciones de señal del Op. Amp. U14 debidas a offset.

#### VII.E.3.11.- AMPLIFICADOR DE POTENCIA

La amplificación de potencia de las señales proporcionadas por los controladores, a través de los amplificadores operacionales, se consigue con transistores de potencia



que puedan comandar la corriente de consumo del servomotor eléctrico. Con los transistores Q2, Q3, Q4 y Q5 en conexión de seguidores de emisor complementarios y empleando configuración en par darlington, se conformó el amplificador de potencia presentado en la figura # 7.30; que junto a un circuito seguidor de voltaje con U15, acoplado al circuito de transistores, se consigue que la señal de control se refleje exactamente a la salida, en su valor de tensión.

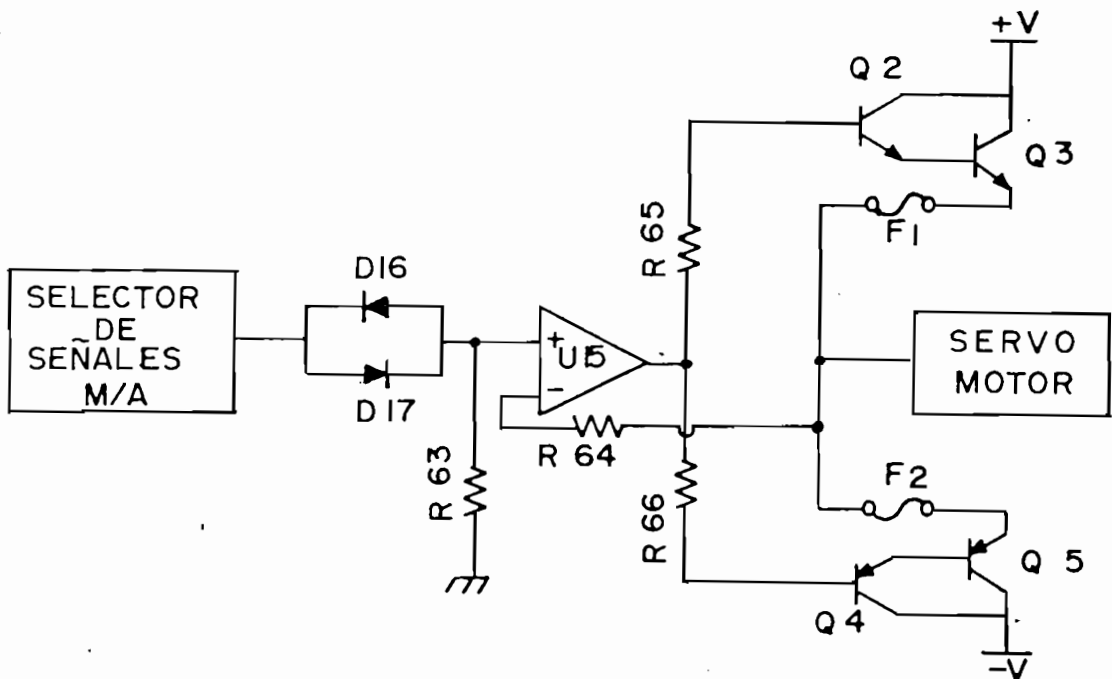


Figura # 7.30

Se incluye en el circuito fusibles de protección tanto para el voltaje positivo como el negativo. Así mismo, un sistema de zona muerta (formado por los diodos D16 y D17) se acopla a la entrada del seguidor de voltaje, eliminándose posibles incompatibilidades con tiempos de reacción del servomotor y del sistema hidráulico.

## VII.E.3.12. - SERVOMOTOR

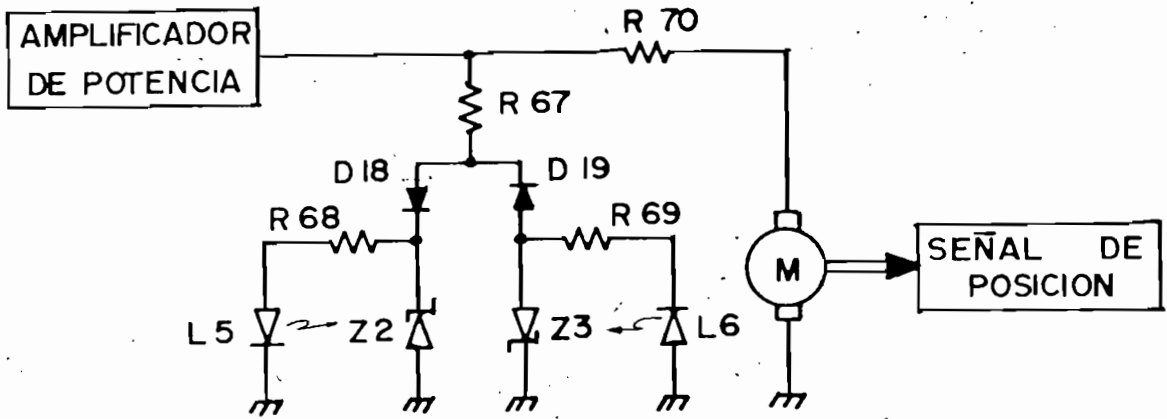


Figura # 7.31

Este circuito proporciona una visualización, a través de LEDs testigos del sentido de giro del servomotor; y agrega, entre el amplificador y el servomotor, una resistencia R70 de bajo valor ( $1\Omega$ ) que absorbe oscilaciones generadas cuando se interrumpe o invierte, en forma de escalón, la tensión aplicada al inducido del motor. Esto es debido a la fuerza contraelectromotriz desarrollada en los cortes de las líneas de flujo magnético, por el devanado del rotor que lleva la inercia del giro, y que es realimentada al circuito seguidor, generando en algunos casos inestabilidad (encontrado experimentalmente)

## VII.E.3.13.- SEÑAL DE POSICION

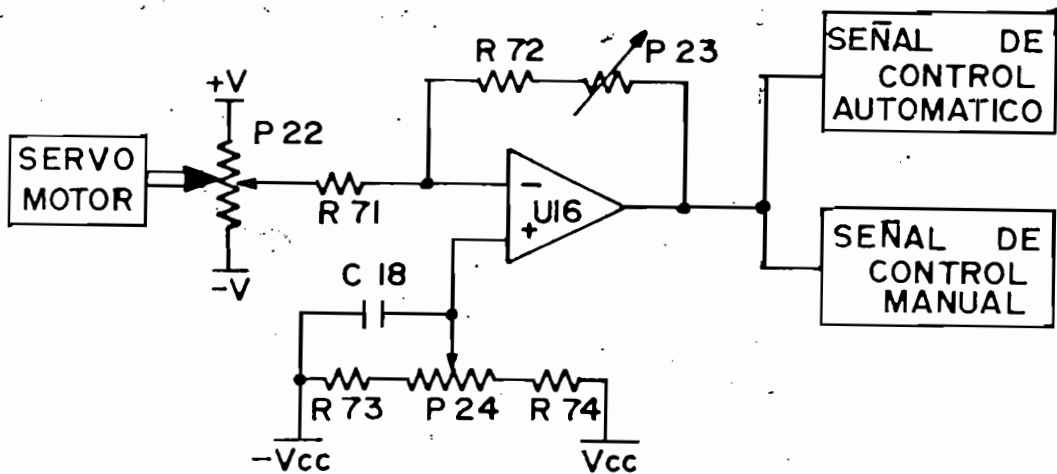


Figura # 7.32

Esta señal es tomada del potenciómetro P22 que está ubicado junto a la tuerca que une el tornillo (acoplado al eje del servomotor) con la varilla de realimentación que controla el servohidráulico. El potenciómetro P23, a través del amplificador inversor U16, permite ajustar la ganancia de esta señal de posición, la misma que es realimentada al servomotor a través de los circuitos que definen las señales de control manual y automático. El potenciómetro P24 ajusta el offset de U16.

## VII.E.3.14.- CIRCUITO DE SEGURIDAD

Los interruptores de fin de carrera S7 y S8 determinan el campo de acción del inyector, y son accionados por

los topes de fin de carrera ubicados en este vástago. Cualquiera de ellos acciona el relé de contactos conmutados Rc1 según la disposición presentada en el diagrama de control de la figura # 7.33.

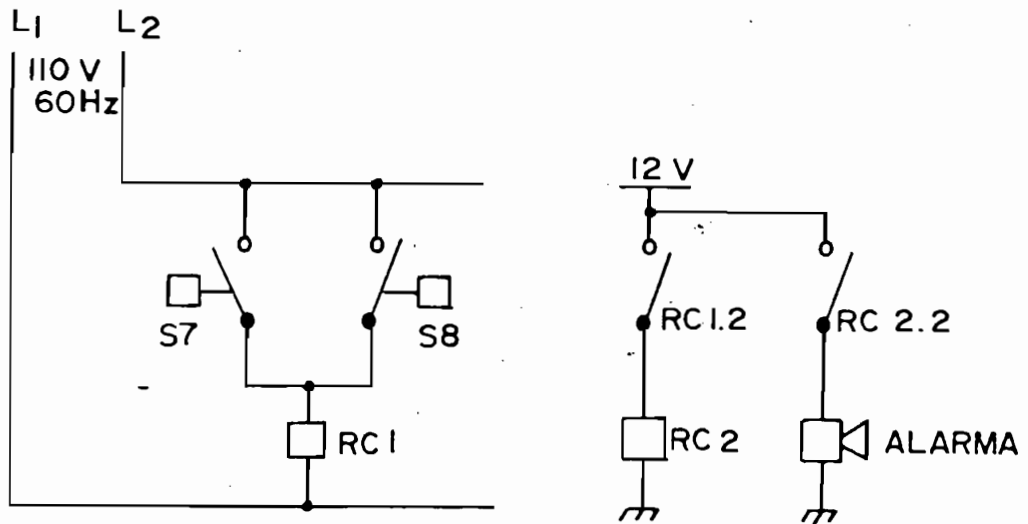


Figura # 7.33

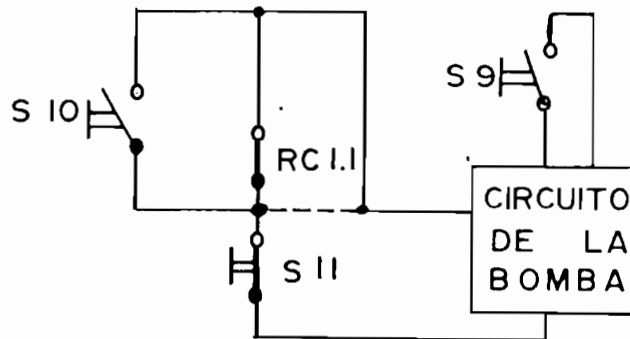


Figura # 7.34

La figura # 7.34 presenta el circuito de control adicional que se acopla al control propio de la bomba de presión de aceite conformado por el bloque que hace mención y

por los interruptores S9 y S11 de encendido y apagado de la bomba respectivamente. Un contacto normalmente cerrado del relé Rci.1 y un interruptor pulsador normalmente abierto se acoplan a este circuito para fines de desconexión (cuando actúan los fines de carrera) y de reposición (para retornar a operación normal dentro de los rangos de trabajo) del funcionamiento de la bomba, y del sistema total de control; puesto que, según el diagrama de la figura # 7.35, la señal de control automático deja de actuar debido al contacto conmutado Rci.2 del relé Rci.

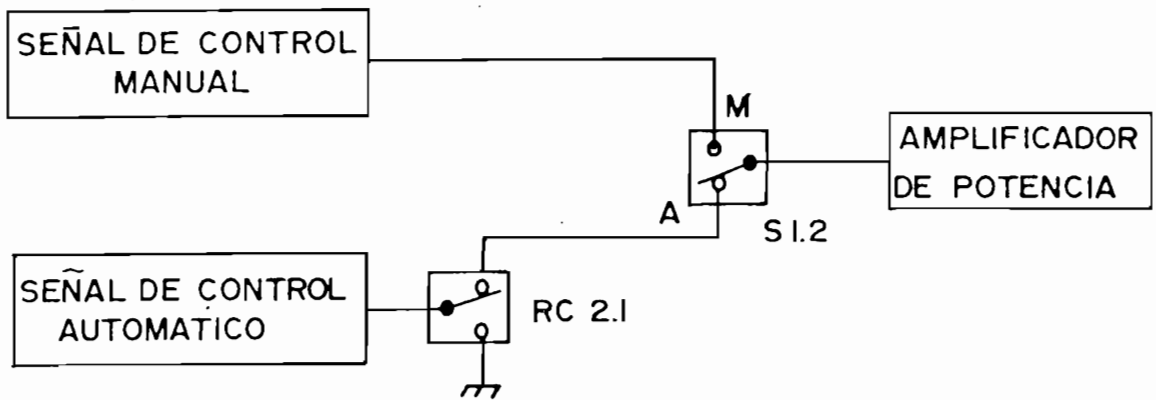


Figura # 7.35

El selector S1.2 conecta las señales de control según la opción, manual o automática, seleccionada para operación.

En la sección de ANEXOS se presenta el diagrama total del controlador electrónico, producto de cada una de las configuraciones expuestas en la presente sección.

## CAPITULO VIII

### LAZO GENERAL DE CONTROL

#### VIII.A.- INTRODUCCION

En este capítulo se presentará el lazo general de control, y su diagrama de bloques. La reducción del diagrama de bloques dará una función de transferencia. Esta equivalencia matemática del sistema será simulada en computador, con el propósito fundamental de observar como se ve afectada la respuesta en tiempo del sistema dependiendo de los valores que se den a los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  que son los que fundamentalmente influyen en la señal de control correspondiente, para regular la velocidad de generación. Además en este capítulo se indica el por qué de la necesidad de la realimentación sigma (caída de velocidad transiente), elemento que no se contempló inicialmente en el desarrollo del trabajo.

La simulación realizada arrojará al final los valores aproximados ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ), para los cuales el sistema presenta una buena respuesta ante una perturbación del 50% en el torque aplicado.

### VIII.B.- SIMPLIFICACION DEL LAZO GENERAL DE CONTROL

Prácticamente todos los elementos físicos involucrados dentro del lazo general de control se analizaron en los capítulos anteriores. En este numeral se realizará la reducción del diagrama general de bloques, a un bloque simple de entrada y salida. La entrada es la carga o descarga que sufre el sistema. En el caso particular de la turbina de laboratorio la entrada será dada en el freno Prony. La salida es la velocidad de régimen de la turbina.

El lazo total del sistema se indica en la figura # 8.1 como un diagrama simplificado que involucra a todos los elementos físicos requeridos para la ejecución del control y la interrelación existente entre los mismos. En la figura # 8.2 se puede apreciar parcialmente la configuración física de los elementos.

#### VIII.B.1.- CAIDA DE VELOCIDAD TRANSIENTE SIGMA ( $\sigma$ )

En el diagrama correspondiente al lazo general de control (figura # 8.1), se puede observar la caída de velocidad transiente sigma ( $\sigma$ ), la cual no ha sido contemplada anteriormente en ningún análisis debido a que su necesidad surge de consideraciones sobre las diferentes velocidades de respuesta de los subsistemas involucrados.

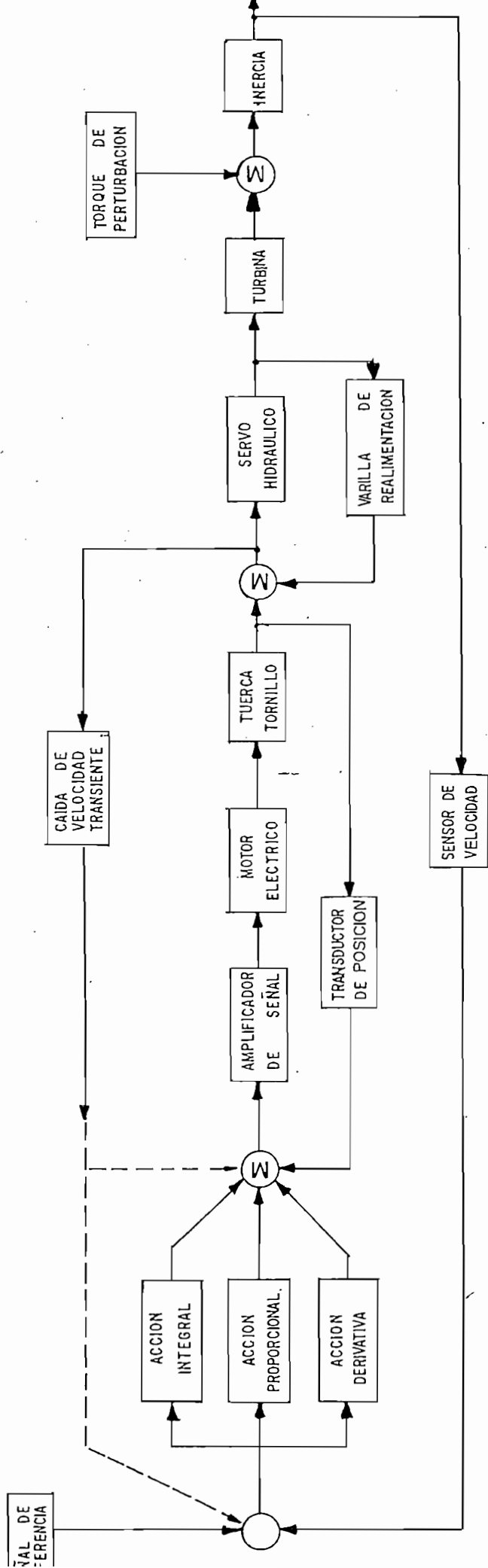


FIGURA 8.1



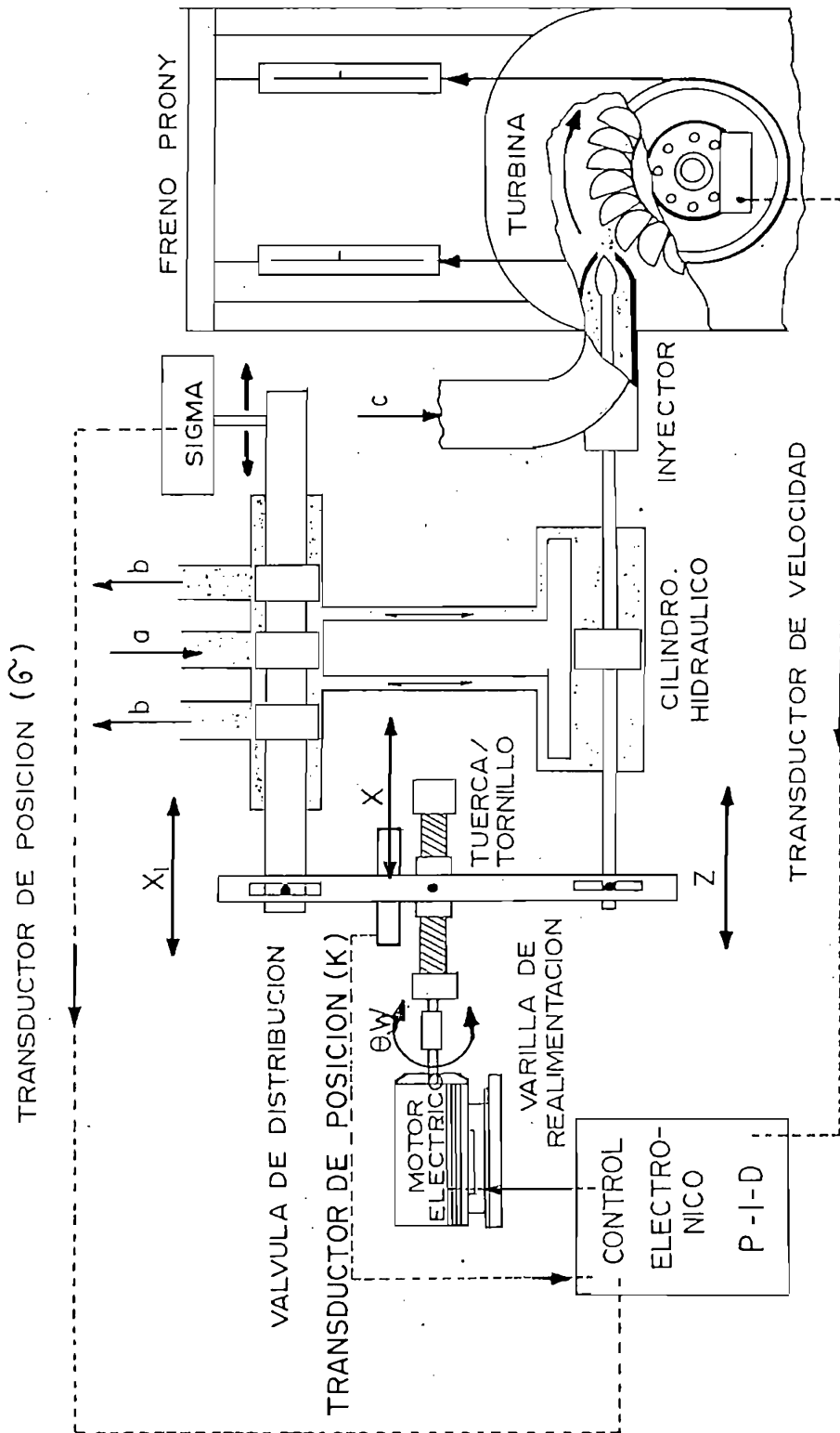


FIGURA 8.2

El control electrónico y el servo eléctrico auxiliar tienen velocidades de respuesta muy altas en relación a la velocidad de respuesta del sistema hidráulico, y especialmente de la turbina que responde muy lentamente, por lo que deben ser compensadas de alguna manera, las diferentes reacciones de los subsistemas. De otra manera si la respuesta del subsistema servo oleomecánico-turbina es lenta, y la señal de control es rápida, el gobernador "interpretará" esto como un error muy prolongado. Mediante la realimentación sigma el sistema de posición ubica el inyector con precisión en el nuevo punto de operación y espera que la turbina asimile la nueva condición de funcionamiento. Esta (velocidad de la turbina), a su vez se realimenta al gobernador que decide si es necesario seguir controlando.

De esta manera se evita la posibilidad de que los sistemas de posición se saturen, y además se obtiene el empalme en las velocidades de respuesta de los subsistemas.

Para generar la señal sigma existen varias posibilidades, tanto para seleccionar el punto de toma como el punto de entrada de la realimentación. El punto de toma de la señal sigma deberá estar sobre alguno de los elementos del sistema gobernador, en los cuales se detecte que la acción de control se esta llevando a cabo. Dichos elementos son: la posición de la tuerca ( $x$ ), la posición del carrete de la válvula ( $x_1$ ), y la posición del inyector ( $z$ ) (fig. # 8.3).

## VIII.B.1.1.- PUNTO DE TOMA DE LA SEÑAL SIGMA

El ubicar la toma de la señal sigma sobre la posición de la tuerca (x), o en el eje del cilindro de posición del inyector (z), tiene el inconveniente de que la compensación de la diferencia de velocidades de respuesta de los subsistemas, es permanente luego de ejecutada la acción de control; pues la tuerca o el eje del cilindro se "estacionan" en una nueva posición cuando cambia la carga a que se somete a la turbina. Por el contrario si la señal sigma es tomada del carrete de la válvula de distribución de aceite del sistema óleo-mecánico ( $x_1$ ), se garantiza que la señal correctora actuará solamente mientras dure la acción de control, a diferencia de la disposición anterior, pues por efecto de la varilla de realimentación del sistema oleomecánico, el carrete regresa siempre a la posición central (en estado estacionario), arrastrando consigo al transductor de la señal sigma, que regresa también a la posición cero referencial.

Con el fin de que la señal de realimentación (voltaje) sea proporcional al desplazamiento del carrete de la válvula de distribución, se utilizará un potenciómetro de variación lineal solidario a éste. Se añade también la posibilidad de calibración del punto cero mediante otro potenciómetro colocado sobre el tablero de control, con lo cual se obtiene un óptimo ajuste del cero físico de la válvula de

distribución y el cero eléctrico del potenciómetro de sigma (observar diagrama eléctrico sección X.B).

#### VIII.B.1.2.- ENTRADA DE LA SEÑAL SIGMA

La señal de realimentación sigma (voltaje) puede ser sumada antes o después del controlador electrónico (Fig # 8.1). Físicamente no existe impedimento alguno para ubicar a sigma antes del controlador, en cuyo caso se la llamará sigma exterior, o después del controlador, la misma que será sigma interior. Más adelante en base a la simulación se considerarán las dos posibilidades, para analizar que efecto tendrían sobre el desempeño del sistema de control, y también se analizará el caso en el cual sigma no existe ( $\sigma=0$ ).

#### VIII.B.2.- LAZO GENERAL DE CONTROL CON REALIMENTACION SIGMA EXTERIOR

Para obtener el lazo general de control se asocia a cada uno de los subsistemas indicados en la figura # 8.1 su representación matemática correspondiente, en base a esto se ha estructurado el siguiente diagrama de bloques tal como se indica en la figura # 8.3.

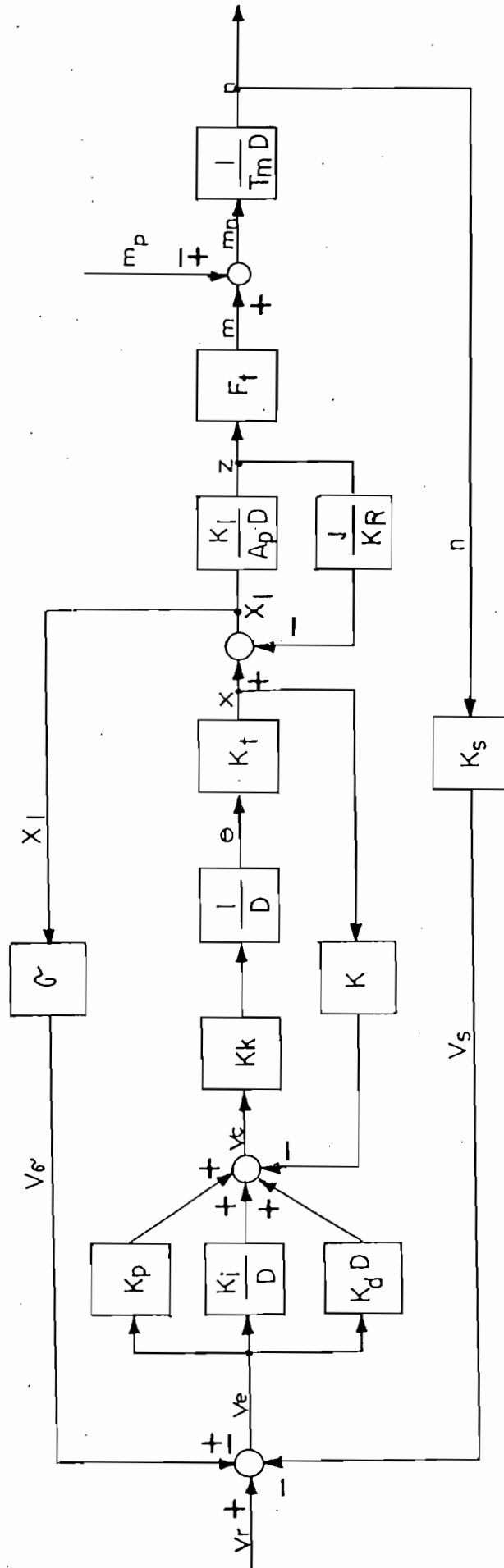


FIGURA 8.3

LAZO GENERAL DE CONTROL CON REALIMENTACION SIGMA EXTERIOR

El diagrama de bloques será simplificado hasta obtener una función de transferencia, en la cual la variable de entrada será el torque de perturbación al eje de la turbina y por salida tendrá la velocidad de la misma.

En la figura # 8.4 se aísla el sector de bloques correspondiente al gobernador, y se obtiene una ecuación de transferencia del tipo  $z/V_R$ , que es la ecuación de transferencia correspondiente al gobernador, y que está dado en el siguiente diagrama de bloques (fig. # 8.5).

En la figura # 8.5 se presenta un diagrama de bloques en el que se indican las funciones de transferencia asociadas con cada uno de los principales componentes del lazo de control, y donde  $F_t$  representa la función de transferencia de la turbina, la cual puede tomar cualquier forma dependiendo de cada caso (capítulo III).

En el lazo de la figura # 8.5, se puede observar que se tienen dos entradas al lazo total de control, las mismas que son: el voltaje de referencia  $V_R$ , y el torque de carga  $m_p$ . Por tanto sería posible obtener una función de transferencia  $n/V_R$  y otra  $n/m_p$ , las cuales tienen como señal de entrada el voltaje de referencia  $V_R$  y el torque de carga  $m_p$  respectivamente, y como señal de salida la velocidad de la turbina. Y si fuera del caso analizar la respuesta global del sistema se debería sumar la respuesta parcial de

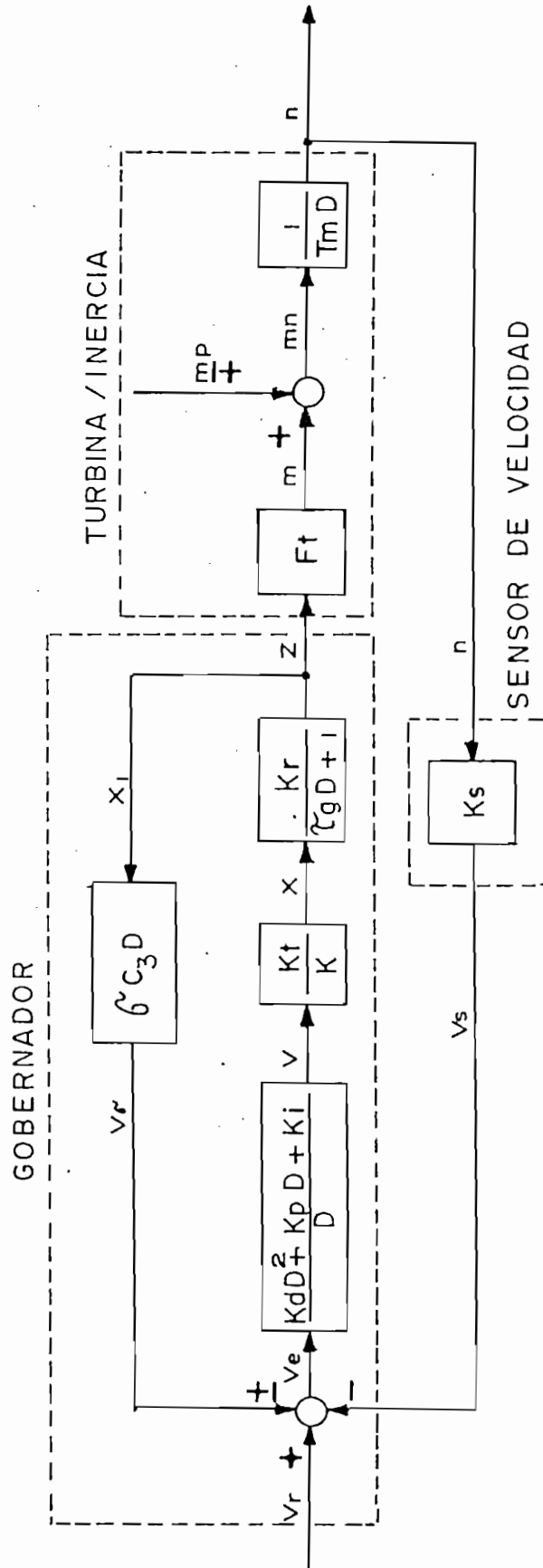


FIGURA 8.4

$$\bar{K} = K_f K_R / K$$

$$\bar{G} = G C_3 \bar{K}$$

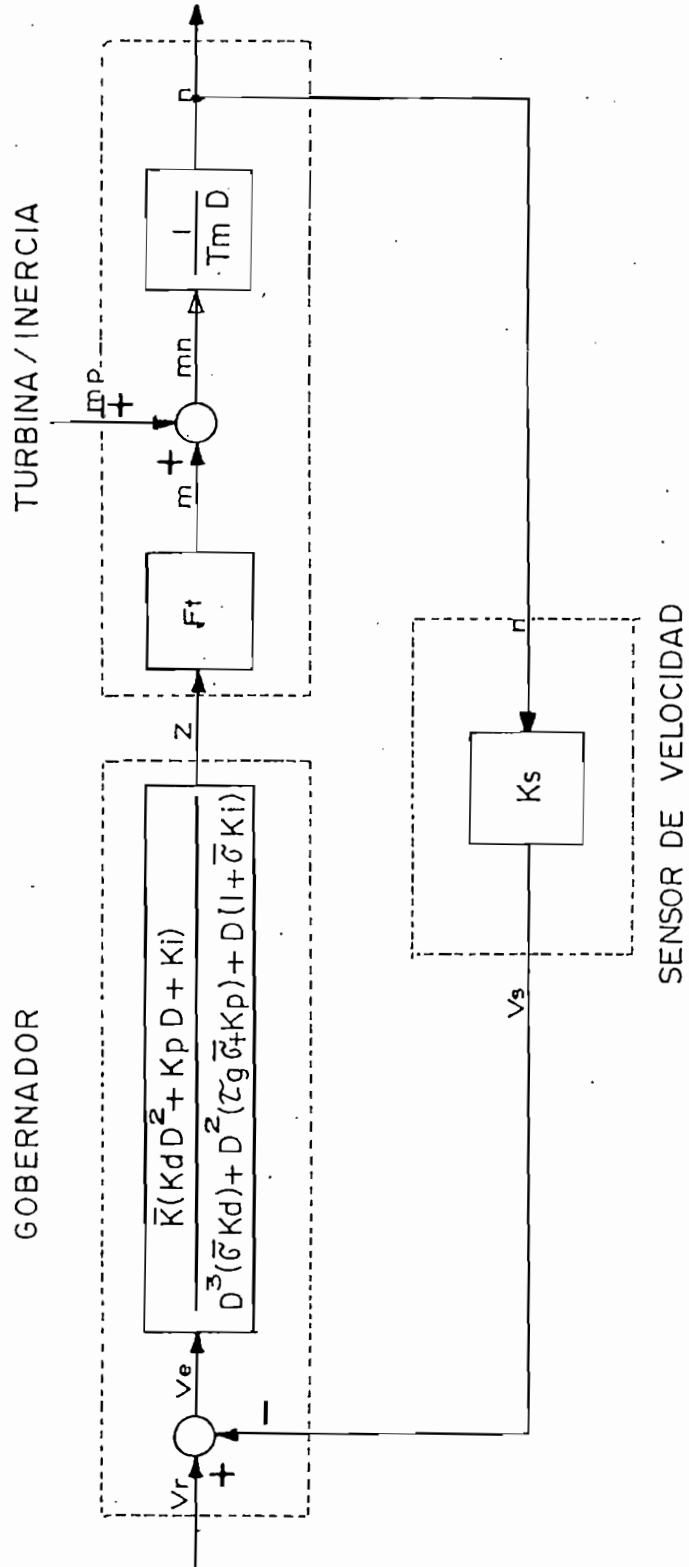


FIGURA 8.5



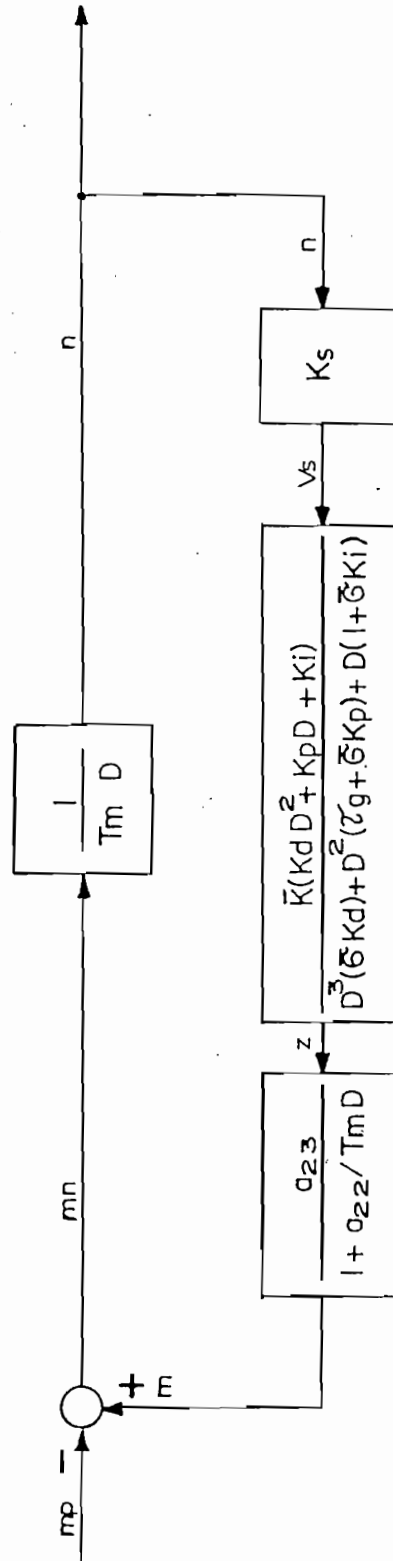


FIGURA 8.6

cada una de las entradas ( $n/V_R + n/m_p$ ). Pero el control a ejecutarse no va encaminado a absorber variaciones del voltaje de referencia. Debe absorber los cambios del torque de carga  $m_p$ .

Al variar el torque de carga  $m_p$  se pueden simular las diferentes demandas de energía del sistema de generación, que es lo que interesa controlar, por tanto la respuesta  $n/m_p$  (velocidad/torque) será la que se obtenga.

Para alcanzar esta respuesta  $n/m_p$ , se considerará la variación del voltaje de referencia como cero, esto es equivalente a tenerlo constante. De esta manera se tiene un sistema con una sola entrada  $m_p$  y una salida  $n$ .

Reordenando el diagrama de bloques para poder visualizar las reducciones pertinentes se tendrá el lazo indicado en la figura # 8.6, en la cual ya se ha incluido la función de transferencia de la turbina del laboratorio, que es la que se usará para las construcciones respectivas. En la figura # 8.6, la primera reducción de bloques, será para obtener una función  $m/n$  tal como sigue:

$$\frac{m}{n} = \frac{a_{23} \bar{K} K_s (K_d D^2 + K_p D + K_i)}{(1 + a_{22} / (T_m D)) [D^3 (\bar{G} K_d) + D^2 (\tau_g + \bar{G} K_p) + D(1 + \bar{G} K_i)]} \quad ( 8.1 )$$

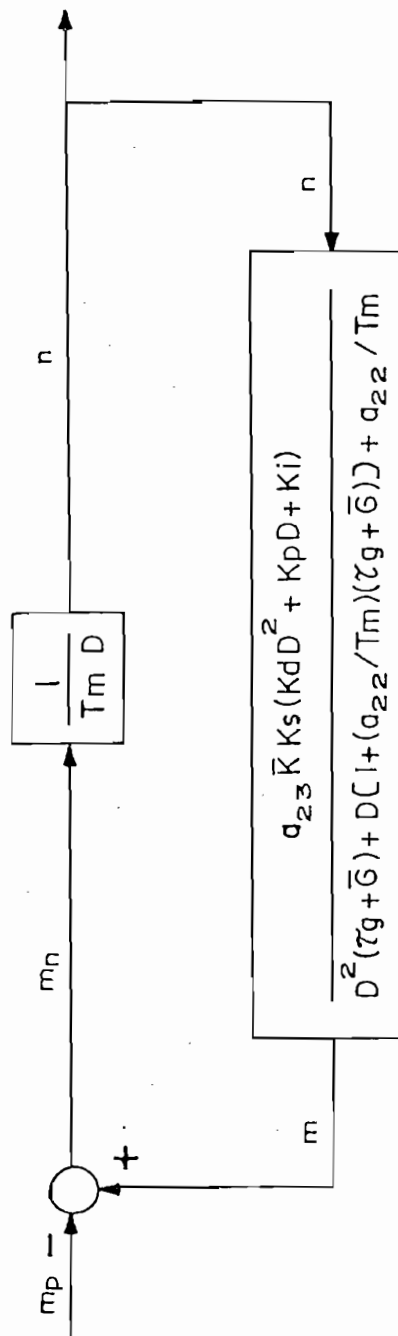


FIGURA 8.7

Y por tanto el diagrama de bloques se reducirá al indicado en la figura # 8.7. El mismo que conducirá a la obtención de la función de transferencia total del sistema  $n/m_p$  (velocidad de la turbina / torque de perturbación) tal como lo indica la siguiente ecuación:

$$\frac{n}{m_p} = \frac{D^3 \bar{c}_6 K_d a_{22} + D^2 [(\tau_g + K_p \bar{c}_1) a_{22} + \bar{c}_6 K_d / T_m] + D [(1 + \bar{c}_6 K_i) a_{22} + (\tau_g + \bar{c}_6 K_p) / T_m] + (1 + \bar{c}_6 K_i) / T_m}{D^4 (\bar{c}_1 \bar{c}_6 K_d) + D^3 [\tau_1 (\tau_g + \bar{c}_6 K_p) + \bar{c}_6 K_d] + D^2 [\tau_1 (1 + \bar{c}_6 K_i) + \tau_g + \bar{c}_6 K_p + \bar{c}_6 K_d] + D (1 + \bar{c}_6 K_i + \bar{c}_6 K_p) + \bar{c}_6 K_i}$$

( 8.2 )

Donde los siguientes valores están dados para el lazo de control de la turbina de laboratorio:

$$\bar{\sigma} = \sigma C_3 K = 0.27 \text{ s}$$

$$\bar{K} = K_t K_R / K = 1.25$$

$$\bar{c}_6 K_s = C_6 K K_s = 3.13$$

$$\tau_t = T_m / a_{22} = 8 \text{ s}$$

$$\tau_g = C_3 K_R = 0.27$$

$$C_6 = a_{23} / a_{22} = 3.13$$

La función de transferencia anterior será simulada digitalmente, para un torque de carga de tipo escalón de un valor de un 50% (0.5 en por unidad).

### VIII.B.3.- LAZO GENERAL DE CONTROL CON REALIMENTACION SIGMA INTERIOR

La segunda posibilidad de ubicar la realimentación sigma (caída de velocidad transiente) es después del controlador electrónico, tal como está esquematizado en el diagrama de bloques indicado en la figura # 8.8.

Reduciendo los bloques correspondientes a los elementos del gobernador, se llegará al lazo de control indicado en la figura # 8.9.

Si en la figura # 8.9 se aísla el sector de bloques correspondiente al gobernador, se llega a una ecuación del tipo  $z/Vr$ , que es la ecuación de transferencia correspondiente al gobernador, así se obtiene la reducción del lazo total de control, a un lazo equivalente tal como se observa en la figura # 8.10.

Al comparar la ecuación del gobernador para el lazo de control con realimentación sigma exterior (figura # 8.5), y la ecuación del gobernador con sigma interior (figura # 8.10), se observa claramente que la segunda función (con sigma interior) es mucho más sencilla y por tanto el usarla, si no existe ninguna restricción de estabilidad, es lo más conveniente.

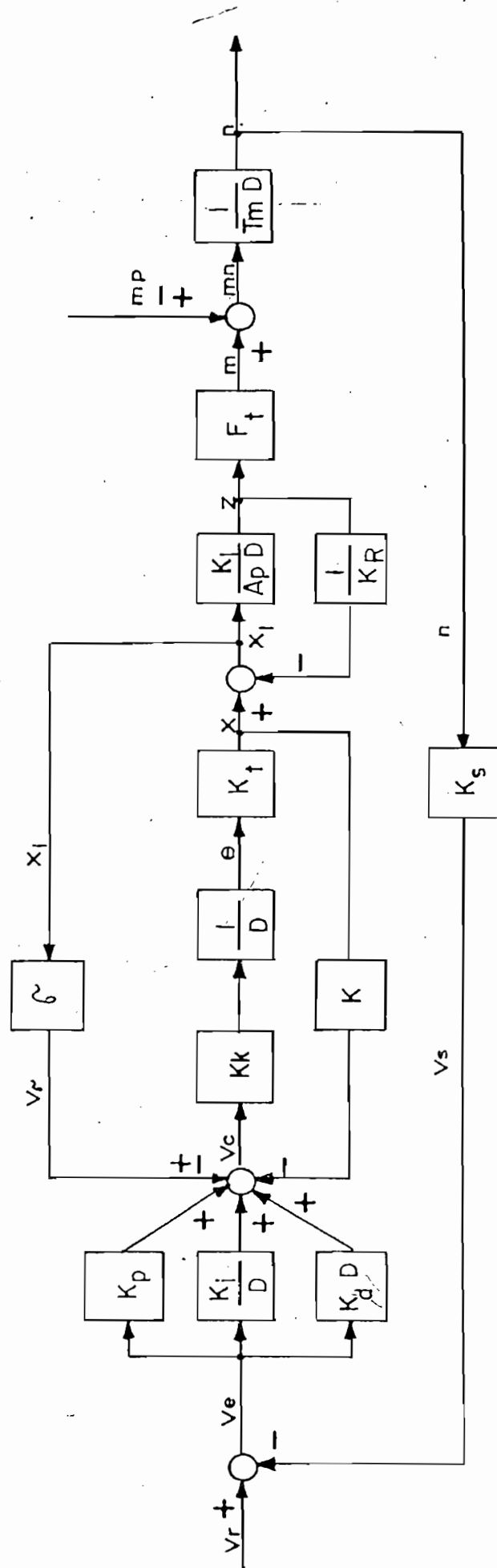


FIGURA 8.8

LAZO GENERAL DE CONTROL CON REALIMENTACION SIGMA INTERIOR

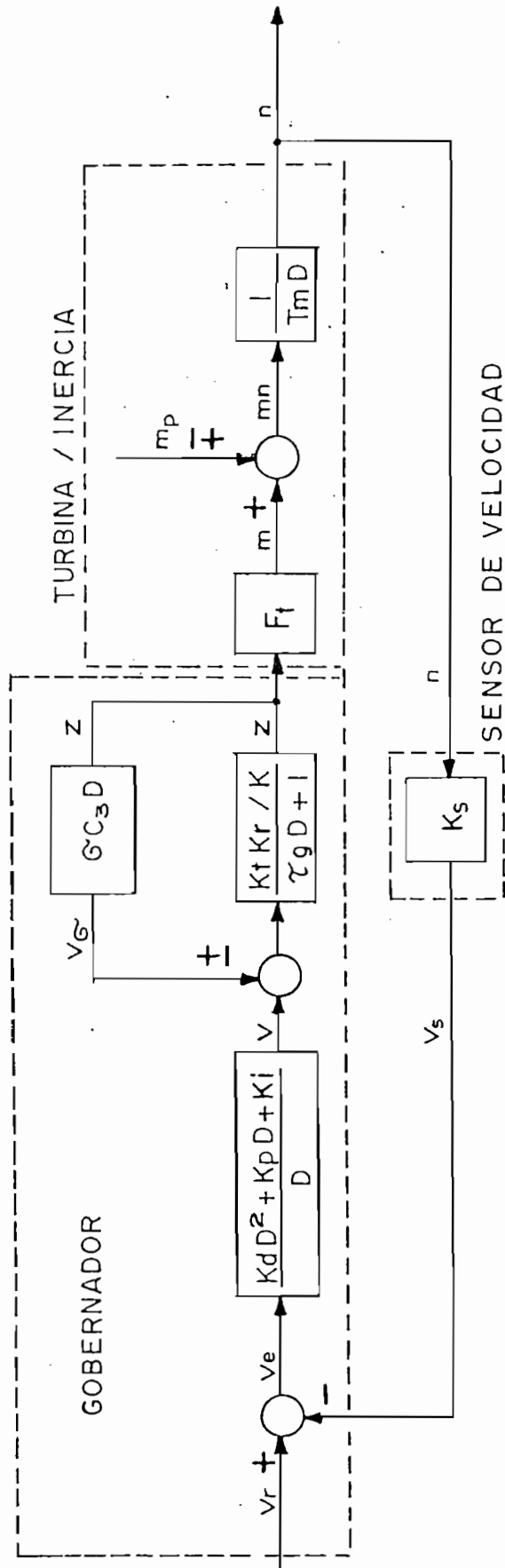


FIGURA 8.9

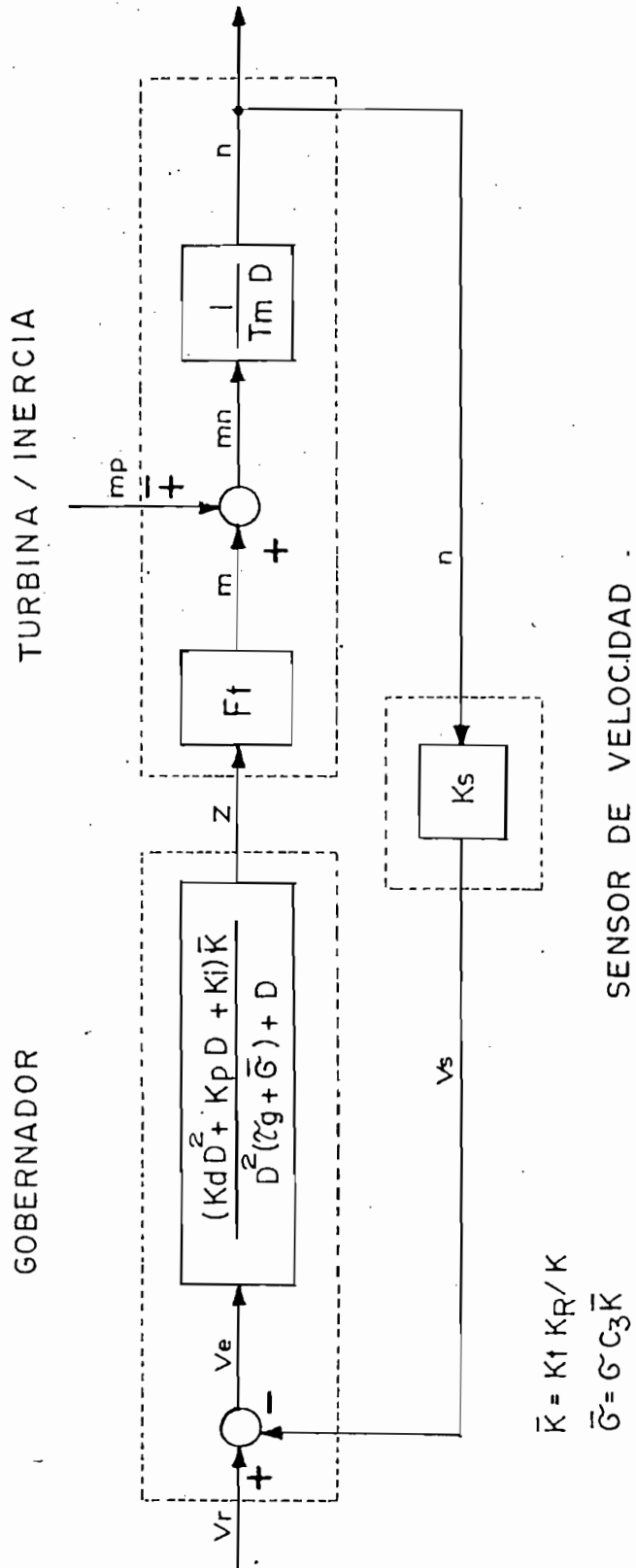


FIGURA 8.10



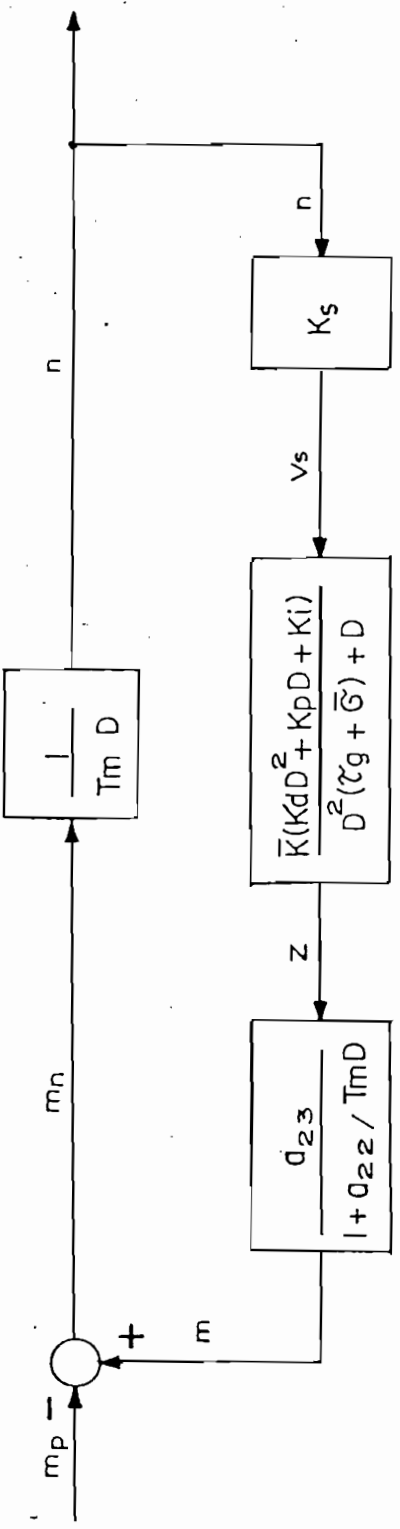


FIGURA 8.II

A partir del diagrama de la figura # 8.10 se obtiene el diagrama de la figura # 8.11 en el que se ha considerado la variación del voltaje de referencia como cero, y se introduce la función de transferencia de la turbina de laboratorio.

Realizando la reducción de bloques de la figura # 8.11, se llega a la función de transferencia de todo el sistema  $n/m_p$  (velocidad de la turbina / torque de carga) como se indica a continuación:

$$\frac{n}{m_p} \times \frac{D^2(\tau_g + \bar{\sigma})/a_{22} + D[(\tau_g + \bar{\sigma})/T_m + 1/a_{22}] + 1/T_m}{D^3 \tau_t (\tau_g + \bar{\sigma}) + D^2(\tau_t + \tau_g + \bar{\sigma} + \bar{C}_s K_d) + D(1 + \bar{C}_s K_p) + K_i \bar{C}_s}$$

( 8.4 )

Donde los siguientes valores están dados para el lazo de control de la turbina de laboratorio:

$$\bar{C}_{6s} = C_6 K_s K = 3.13$$

$$\bar{K} = K_T K_R / K = 1.25$$

$$C_6 = a_{23} / a_{22} = 2.5$$

$$\bar{\sigma} = \sigma C_3 K = 0.27$$

$$\tau_g = C_3 K_R = 0.27$$

$$\tau_t = T_m / a_{22} = 8 \text{ s}$$

$$C_3 = A_p / K_1 = 0.23$$

En base a la función de transferencia anterior (8.4), se simula la respuesta del sistema ante una perturbación escalón del 50% del torque de carga nominal (0.5 en p.u.).

#### VIII.B.4 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA $n/m_p$

A continuación se presentan en forma resumida las funciones  $n/m_p$  para las modalidades de: Sigma Exterior, Sigma Interior, y Sigma Cero, usando las ecuaciones de la turbina ideal y de laboratorio.

VIII.B.4.1. - Funciones de transferencia  $n/m_p$  con la ecuación ideal de la turbina.

##### SIGMA EXTERIOR

$$\frac{n}{m_p} \cdot \frac{D^4 a_{11} T_w \bar{G} K_d + D^3 [a_{11} T_w (\tau_g + \bar{G} K_p) + \bar{G} K_d] + D^2 [a_{11} T_w (1 + \bar{G} K_i) + (\tau_g + \bar{G} K_p)] + D (1 + \bar{G} K_i)}{D^5 \bar{T} \bar{G} K_d + D^4 [\bar{T} (\tau_g + \bar{G} K_p) + T_m \bar{G} K_d] + D^3 [\bar{T} (1 + \bar{G} K_i) + T_m (\tau_g + \bar{G} K_p) + T_0 K_s K_d] + D^2 [T_m (1 + \bar{G} K_i) + T_0 K_s K_p + \bar{a}_{23} K_s K_d] + D (T_0 K_s K_i + \bar{a}_{23} K_s K_p) + \bar{a}_{23} K_s K_i}$$

##### SIGMA INTERIOR

$$\frac{n}{m_p} \cdot \frac{D^3 a_{11} T_w (\tau_g + \bar{G}) + D^2 (a_{11} T_w + \tau_g + \bar{G}) + D}{D^4 \bar{T} (\tau_g + \bar{G}) + D^3 [T_m (\tau_g + \bar{G}) + \bar{T} + T_0 K_s K_d] + D^2 [T_m + K_s (T_0 K_p + \bar{a}_{23} K_d)] + D K_s (T_0 K_i + \bar{a}_{23} K_p) + \bar{a}_{23} K_i K_s}$$

## SIGMA CERO

$$\frac{n}{m_p} \cdot \frac{D^3 a_{11} T_w \tau_g + D^2 (a_{11} T_w + \tau_g) T + D}{D^4 \bar{T} \tau_g + D^3 [\bar{T} m \tau_g + \bar{T} T o K_s K_d] + D^2 [\bar{T} m + K_s (T o K_p + \bar{a}_{23} K_d)] + D K_s (T o K_i + \bar{a}_{23} K_p) + \bar{a}_{23} K_i K_s}$$

Donde:

$$\bar{K} = K_t K_R / K$$

$$C_3 = A_p / K_1$$

$$\tau_g = C_3 K_R$$

$$\bar{\sigma} = \sigma C_3 K$$

$$a_{23} K$$

$$T o = T_w K$$

$$\bar{T} = a_{11} T_w T_m$$

VIII.B.4.2. - Funciones de transferencia  $n/m_p$  con la ecuación de la turbina de laboratorio

## SIGMA EXTERIOR

$$\frac{n}{m_p} \cdot \frac{D^3 a_{11} T_w (\tau_g + \bar{\sigma}) + D^2 (a_{11} T_w + \tau_g + \bar{\sigma}) T + D}{D^4 \bar{T} (\tau_g + \bar{\sigma}) + D^3 [\bar{T} m (\tau_g + \bar{\sigma}) + \bar{T} T o K_s K_d] + D^2 [\bar{T} m + K_s (T o K_p + \bar{a}_{23} K_d)] + D K_s (T o K_i + \bar{a}_{23} K_p) + \bar{a}_{23} K_i K_s}$$

## SIGMA INTERIOR

$$\frac{n}{m_p} \cdot \frac{D^2 (\tau_g + \bar{\sigma}) / a_{22} + D [(\tau_g + \bar{\sigma}) / T_m + 1 / a_{22}] T + 1 / T_m}{D^3 \bar{\tau}_1 (\tau_g + \bar{\sigma}) + D^2 (\bar{\tau}_1 + \tau_g + \bar{\sigma} + \bar{c}_{e3} K_d) + D (1 + \bar{c}_{e3} K_p) + K_i \bar{c}_{e3}}$$

## SIGMA CERO

$$\frac{n}{m_p} = \frac{D^2 \tau_1 + D(1/a_{22} + \tau_g/T_m) + 1/T_m}{D^3 \tau_1 \tau_g + D^2(\tau_1 + \tau_g + \bar{C}_{6s} K_d) + D(1 + \bar{C}_{6s} K_p) + K_i \bar{C}_{6s}}$$

Donde:

$$\bar{C}_{6s} = C_6 K_5 K$$

$$\bar{K} = K_T K_R / K$$

$$C_6 = a_{23} / a_{22}$$

$$\bar{\sigma} = \sigma C_3 K$$

$$\tau_g = C_3 K_R$$

$$\tau_t = T_m / a_{22}$$

$$C_3 = A_p / K_1$$

### VIII.C. - EFFECTO DE LA UBICACION DE LA ENTRADA SIGMA ( $\sigma$ )

Como se comentó en párrafos anteriores la señal sigma puede ser ubicada en distintos puntos, cada uno de los cuales va a producir un efecto característico dependiente de ese punto en particular, a continuación se analiza el efecto de la ubicación de sigma, en la estabilidad del sistema.

VIII.C.1.- DETERMINACION DEL VALOR DE SIGMA  
(por unidad).

Para determinar el valor de sigma en por unidad se debe construir respectivamente, para sigma exterior y sigma interior las curvas del voltaje de sigma ( $V_{\sigma}$ ) vs. el desplazamiento del carrete de válvulas ( $X_1$ ).

VIII.C.1.1.- ESTIMACION DEL VALOR DE POLARIZACION DEL  
POTENCIOMETRO DE SIGMA PARA LA MODALIDAD  
SIGMA EXTERIOR.

Debido a consideraciones de diseño, el potenciómetro utilizado para la realimentación sigma tiene una carrera mayor ( $\pm 2$  cm), a la del carrete de la válvula que es de  $\pm 1.5$  cm, por lo que la polarización requerida para este potenciómetro será mayor al voltaje de realimentación sigma exterior ( $V_p > V_{\sigma ext}$ ).

Para estimar el voltaje de polarización del potenciómetro para la modalidad de sigma exterior, ante un cambio de la velocidad de la turbina, debido a una perturbación en el torque se procede de la siguiente manera:

- a.- Se determina la velocidad máxima o mínima de la turbina, dependiendo del escalón de torque a que se someta al sistema.

b.- Para cada una de las velocidades límites se determina el valor de voltaje de error ( $V_e$ ) correspondiente. El mismo que será igual al número de revoluciones en exceso o defecto a la velocidad nominal de la turbina multiplicado por  $K_s$  (constante del sensor):

$$V_{\max} = K_s \cdot (RPM_{\max} - RPM_0)$$

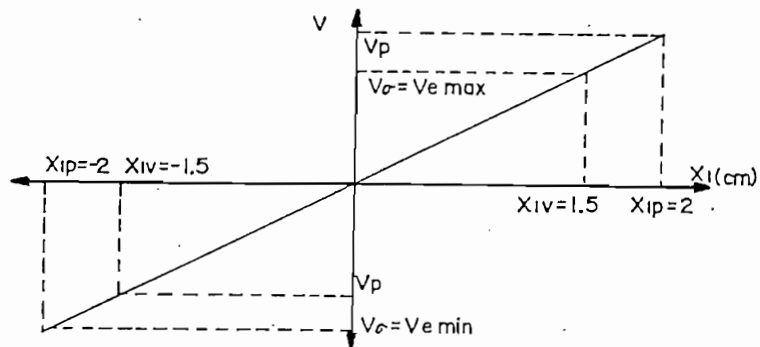
$$V_{\min} = K_s \cdot (RPM_{\min} - RPM_0)$$

El voltaje de error máximo o mínimo ( $V_{e\max}$  o  $V_{e\min}$ ), que se generará ante un torque de perturbación dado, debe ser igual al voltaje sigma ( $V_\sigma$ ), que entregue el potenciómetro luego de recorrida la carrera máxima del carrete de la válvula ( $X_{1v} = \pm 1.5$  cm, para no saturar la carrera de la misma), como se indica en la gráfica # 8.12. Además en la gráfica # 8.12 se puede determinar el voltaje de polarización ( $V_{1p}$ ), correspondiente a un desplazamiento  $X_1 = \pm 2$  cm, que es la carrera total del potenciómetro. Usando relación de triángulos se tiene, de la figura # 8.12:

$$V_\sigma / X_{1v} = V_p / X_{1p}$$

Reemplazando los valores de  $X_{1v}$ ,  $X_{1p}$ , utilizando la relación de  $V_\sigma$ , y reordenando la relación anterior se tiene la siguiente expresión, la cual permite estimar el voltaje de polarización ( $V_p$ ), para la modalidad de sigma exterior.

$$V_p = 1.33K_S (RPM_{\max \text{ o min}} - RPM_0)$$



SIGMA EXTERIOR

FIG. # 8.12

Donde:

$\pm V_p$  = Voltaje de polarización del potenciómetro.

$\pm V_\sigma$  = Voltaje efectivo de realimentación.

$\pm x_{ip}$  = Carrera máxima del potenciómetro.

$\pm x_{iv}$  = Carrera máxima útil del carrete de la  
válvula.

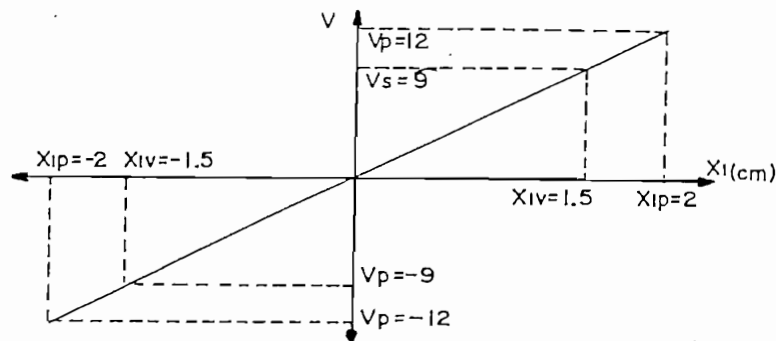
#### VIII.C.1.2.- CALCULO DEL VOLTAJE DE POLARIZACION DEL POTENCIOMETRO DE SIGMA PARA LA MODALIDAD SIGMA INTERIOR

En el caso de tener la modalidad de sigma interior, se consideran los siguientes factores para calcular el voltaje de polarización del potenciómetro de sigma interior:



- a.- Voltaje máximo de trabajo del servo motor (9 voltios).
- b.- Carrera máxima que se puede dar al carrete de válvula en uno u otro sentido sin llegar a saturar la misma.  
 $\pm X_{1\max} = 1.5 \text{ cm}$
- c.- Carrera máxima del potenciómetro ( $X_{1p} = \pm 2 \text{ cm}$ ).

Considerando que el voltaje máximo del servo motor ( $V_s$ ), debe ser igual al voltaje entregado por el potenciómetro ( $V_p$ ), cuando éste ha recorrido una distancia igual a la carrera máxima del carrete de válvulas, se puede construir el gráfico # 8.13.



SIGMA INTERIOR

FIG. # 8.13

Donde:

$\pm V_p$  = Voltaje de polarización del potenciómetro.

$\pm V_s$  = Voltaje máximo del servo motor.

$\pm x_{1p}$  = Carrera máxima del potenciómetro.

$\pm x_{1v}$  = Carrera máxima útil del carrete de la  
válvula.

En el gráfico # 8.13 se aprecia que el voltaje de polarización de sigma interior se lo puede determinar mediante la siguiente proporción.

$$V_s / X_{1v} = V_p / X_{1p}$$

Reordenando la relación anterior y reemplazando los valores correspondientes de  $V_s$ ,  $X_{1v}$ , y  $X_{1p}$ , se puede determinar el valor de  $V_p = 12$  voltios.

#### VIII.C.1.3.- VALOR DE SIGMA EN POR UNIDAD

Como se observa en los gráficos (8.12 y 8.13) las curvas resultantes son líneas rectas que pasa por el punto cero cuando  $V=0$  y  $X_1=0$ , lo que cumple con las condiciones necesarias requeridas por la caída de velocidad transiente, cuyo valor quedará determinado como sigue (sea para sigma exterior o sigma interior):

$$\Delta \sigma = \Delta V_{\sigma} / X_1$$

En por unidad (p.u.)  $\sigma$  será:

$$\sigma = \frac{\Delta V_{\sigma} / V_{\sigma}}{\Delta X_1 / X_{10}}$$

Debido a que la curva de respuesta de sigma (exterior o interior) es una línea recta el valor de sigma en por unidad será igual a uno ( $\sigma_{p.u.} = 1$ ).

#### VIII.C.2.-

#### EFEECTO DE LA REALIMENTACION SIGMA

Analizado desde el punto de vista de la estabilidad del lazo, qué efecto causaría el ubicar la entrada de la señal sigma ( $\sigma$ ) antes o después del controlador electrónico? y qué reacción causaría el no tener esta realimentación?. Este efecto se lo estudiará utilizando el criterio de estabilidad de RUTH-HURWITZ, el cual permite establecer en forma matemática si existe alguna restricción o no (de  $K_p$ ,  $K_i$ , y  $K_d$ ), y que condiciones deben cumplirse en cada caso para que el sistema sea estable. Para el análisis se tomarán las funciones de transferencia totales ( $n/m_p$ ) con la ecuación de la turbina del laboratorio, para sigma exterior, sigma interior y sigma cero.

VIII.C.2.1.- ESTABILIDAD DEL LAZO DE CONTROL  
CON SIGMA INTERIOR ( $\sigma_{int.}$ )

Aplicando el criterio de estabilidad de Ruth-Hurwitz a la ecuación característica de la función de transferencia 8.4, se tiene:

$$\begin{aligned} a_3(a_1a_2 - a_0a_3) &> 0 \\ a_1a_2 - a_0a_3 &> 0 \\ a_1 &> 0 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_0 &= \tau_T(\tau_g + \bar{\sigma}) \\ a_1 &= \tau_T + \tau_g + \bar{\sigma} + \bar{C}_{6s}Kd \\ a_2 &= 1 + \bar{C}_{6s}Kp \\ a_3 &= \bar{C}_{6s}Ki \end{aligned}$$

Como los términos  $a_3$  y  $a_1$  son siempre mayores que cero se debe verificar que:

$$a_1a_2 - a_0a_3 > 0$$

Reemplazando los valores de  $a_i$  y para que el sistema sea estable, se tendrá que cumplir:

$$(\tau_T + \tau_g + \bar{\sigma} + \bar{C}_{6s}Kd)(1 + \bar{C}_{6s}Kp) - \tau_T(\tau_g + \bar{\sigma})(Ki\bar{C}_{6s}) > 0 \quad (8.5)$$

Reemplazando las constantes del laboratorio ( $\tau_T=8$  s,  $\tau_g=0.27$  s, y  $\bar{C}_{6s}=3.13$ ) en la inecuación (8.5) se tendrá:

$$(8.54 + 3.13Kd)(1 + 3.13Kp) - 13.52Ki > 0 \quad (8.6)$$

Donde el máximo valor de  $K_i$  que satisface la inecuación (8.6) cuando  $K_p$  y  $K_d$  son cero es:  $K_i = 0.6$ .

De la desigualdad (8.5), se deduce que no existe restricción alguna (respecto a la estabilidad) para la realimentación sigma interior, siempre que la combinación de valores  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , satisfagan esta desigualdad. Se puede deducir además de la inecuación (8.5) que la estabilidad del sistema depende del punto de operación de la turbina, de los valores de todas las constantes de los subsistemas involucrados, y de los valores de la tríada  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ .

Reordenando la inecuación (8.5) se llega a la inecuación (8.7) en la que se puede apreciar:

a.- Para cualquier valor de  $K_p$  y  $K_d$  siempre existirá un valor máximo de  $K_i$  para el cual el sistema será estable, y está dado por:

$$\frac{(\tau_T + \tau_g + \bar{\sigma} + \bar{C}_{65}Kd)(1 + \bar{C}_{65}Kp)}{\tau_T(\tau_g + \bar{\sigma})\bar{C}_{65}} > K_{i_{max}} \quad (8.7)$$

Para un sistema óptimo y con rápida respuesta, no es aconsejable el acercarse a los valores de  $K_i$  máximo puesto que provoca respuestas oscilatorias, como lo

comprobará la simulación posteriormente presentada (ver figura # 8.19 ajuste de  $K_i$ ).

b.- Cuando  $K_i = 0$  no existe restricción alguna para los valores de  $K_p$  y  $K_d$  (respecto a la estabilidad del sistema) como se deduce de la relación (8.7).

c.- En resumen se tiene que para una realimentación sigma interior los valores de  $K_p$ ,  $K_i$ , y  $K_d$ , deben estar comprendidos entre los siguientes rangos:

$$0 \leq K_p < \infty$$

$$0 \leq K_d < \infty$$

$$0 \leq K_i < K_{i_{\max}} \text{ dado por (8.7).}$$

Cuando se opera con una realimentación sigma interior siempre podrá determinarse una triada  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , para la cual el sistema es estable.

#### VIII.C.2.2.- ESTABILIDAD DEL LAZO DE CONTROL CON SIGMA EXTERIOR ( $\sigma_{\text{ext.}}$ )

Aplicando el criterio de Ruth-Hurwitz a la ecuación (8.2) se tiene:

$$a_1 > 0$$

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$$

$$a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_0 a_3^2 > 0$$

$$a_4 (a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_0 a_3^2) > 0$$

Donde:

$$a_0 = \tau_T \bar{\sigma} K_d$$

$$a_1 = \tau_T (\tau_g + \bar{\sigma} K_p) + \bar{\sigma} K_d$$

$$a_2 = \tau_T (1 + \bar{\sigma} K_i) + \tau_g + \bar{\sigma} K_p + \overline{C_{65}} K_d$$

$$a_3 = 1 + \bar{\sigma} K_i + \overline{C_{65}} K_p$$

$$a_4 = \overline{C_{65}} K_i$$

Como  $a_1$  y  $a_4$  siempre serán mayores a cero se deberá verificar que:

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad (8.8)$$

$$a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_0 a_3^2 > 0 \quad (8.9)$$

Reemplazando los valores de las constantes del sistema de laboratorio ( $\tau_T=8s$ ,  $\tau_g=0.27$  s, y  $C_{65}=3.13$ ), en la ecuación (8.9), cuando  $K_p$  y  $K_d$  son cero se tiene:

$$(8.27 - 2.16K_i)(1 + 0.27K_i) - 6.76K_i > 0$$

Donde el máximo valor de  $K_i$  para el cual se satisface la inecuación anterior es  $K_i = 1.8$ .

Realizando un análisis semejante al que se desarrolló para el caso de una realimentación sigma interior se tendrá:

$$0 \leq K_p < \infty$$

$$0 \leq K_d < \infty$$

$$0 \leq K_i < K_{i_{\max}}$$

En idéntica forma que para el caso de una realimentación sigma interior, se puede determinar una triada  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , para el cual el sistema sea estable. Dicha triada debe cumplir con las inecuaciones (8.8 y 8.9).

#### VIII.C.2.3.- ESTABILIDAD DEL LAZO DE CONTROL CON SIGMA CERO ( $\sigma_{\text{CERO}}$ )

Considerando en las ecuaciones (8.2 y 8.4), que la constante sigma es cero, se tiene:

$$\frac{n}{m_p} = \frac{D^2 \zeta_f + D(1/\sigma_{22} + \zeta_g/T_m) + 1/T_m}{D^3 \zeta_f \zeta_g + D^2(\zeta_f + \zeta_g + \bar{C}_e, K_d) + D(1 + \bar{C}_e, K_p) + K_i \bar{C}_e}$$

( 8.10 )

Aplicando el criterio de estabilidad de Ruth-Hurwitz, a la ecuación característica de la función de transferencia (8.10) se debe cumplir (al igual que para el caso de realimentación sigma interior) la siguiente relación:



$$a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$$

Donde:

$$a_0 = \tau_T \tau_g$$

$$a_1 = \tau_T + \tau_g + \bar{C}_{6s} K_d$$

$$a_2 = 1 + \bar{C}_{6s} K_p$$

$$a_3 = \bar{C}_{6s} K_i$$

Reemplazando los valores  $a_i$  se tendrá para este tipo de lazo:

$$(\tau_T + \tau_g + \bar{C}_{6s} K_d)(1 + \bar{C}_{6s} K_p) - \tau_T \tau_g K_i \bar{C}_{6s} > 0 \quad (8.11)$$

Substituyendo los valores de las constantes del sistema del laboratorio ( $\tau_T=8s$ ,  $\tau_g=0.27s$ , y  $\bar{C}_{6s}=3.13$ ), se tendrá:

$$(8.27 + 3.13 K_d)(1 + 3.13 K_p) - 6.76 K_i > 0 \quad (8.12)$$

En la inecuación (8.12) cuando  $K_p$  y  $K_d$  son iguales a cero se puede determinar que el máximo  $K_i$  será de 1.22.

En la relación (8.12) se puede apreciar que siempre es posible obtener una triada  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , para la cual la respuesta del lazo de control sea estable, al igual que en las otras dos modalidades de sigma.

Cuando sigma es cero los rangos de las constantes (Kp, Ki, y Kd) serán:

$$0 \leq Kp < \infty$$

$$0 \leq Kd < \infty$$

$$0 \leq Ki < Ki_{max}$$

Donde  $Ki_{max}$  esta dado por la relación (8.11).

$$\frac{(\tau_T + \tau_g + \bar{C}_{6s}Kd)(1 + \bar{C}_{6s}Kp)}{\tau_T \tau_g \bar{C}_{6s}} > Ki_{max} \quad (8.11)$$

#### VIII.D. - SELECCION DE LOS VALORES DE CONTROL Y DE LA MODALIDAD SIGMA

En esta sección se presentan los resultados de la simulación de las funciones de transferencia  $n/m_p$ , para las tres modalidades de sigma (exterior, interior, y cero), tomando la ecuación de la turbina de laboratorio, y variando los parámetros Kp, Ki, Kd, ante una perturbación escalón del 50% en el torque de carga .

El objeto de esta simulación es visualizar que efecto sobre la respuesta del sistema tendrá el variar las ganancias Kp, Ki, y Kd individualmente en las diferentes modalidades de sigma, determinar cual de éstas (exterior, interior

FIG. # 8.14 EFECTO AJUSTE Kp SIG. CERO (Kp=5-10-15-20-30-40-50 y Ki=0.2, Kd=0.2)

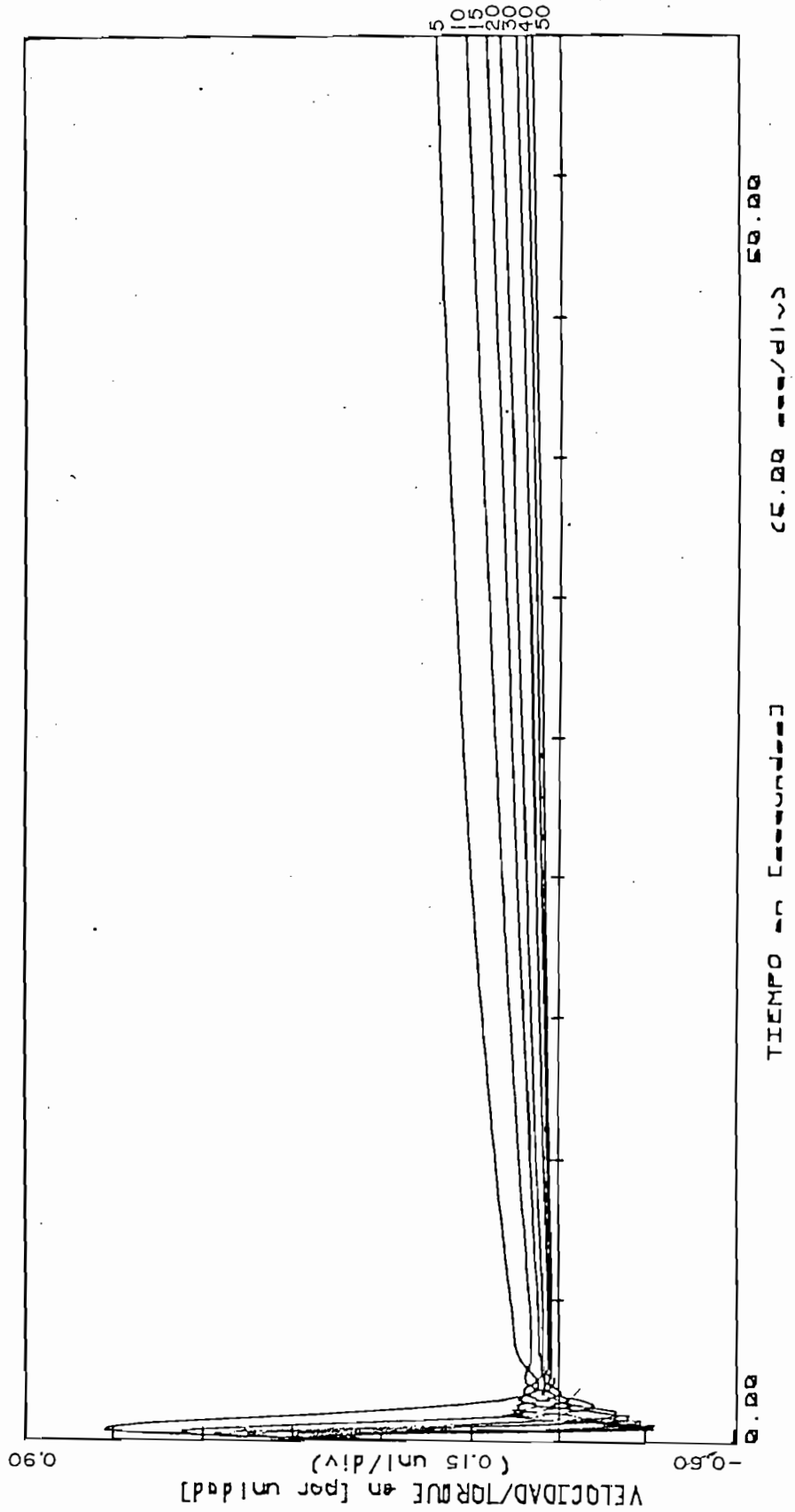
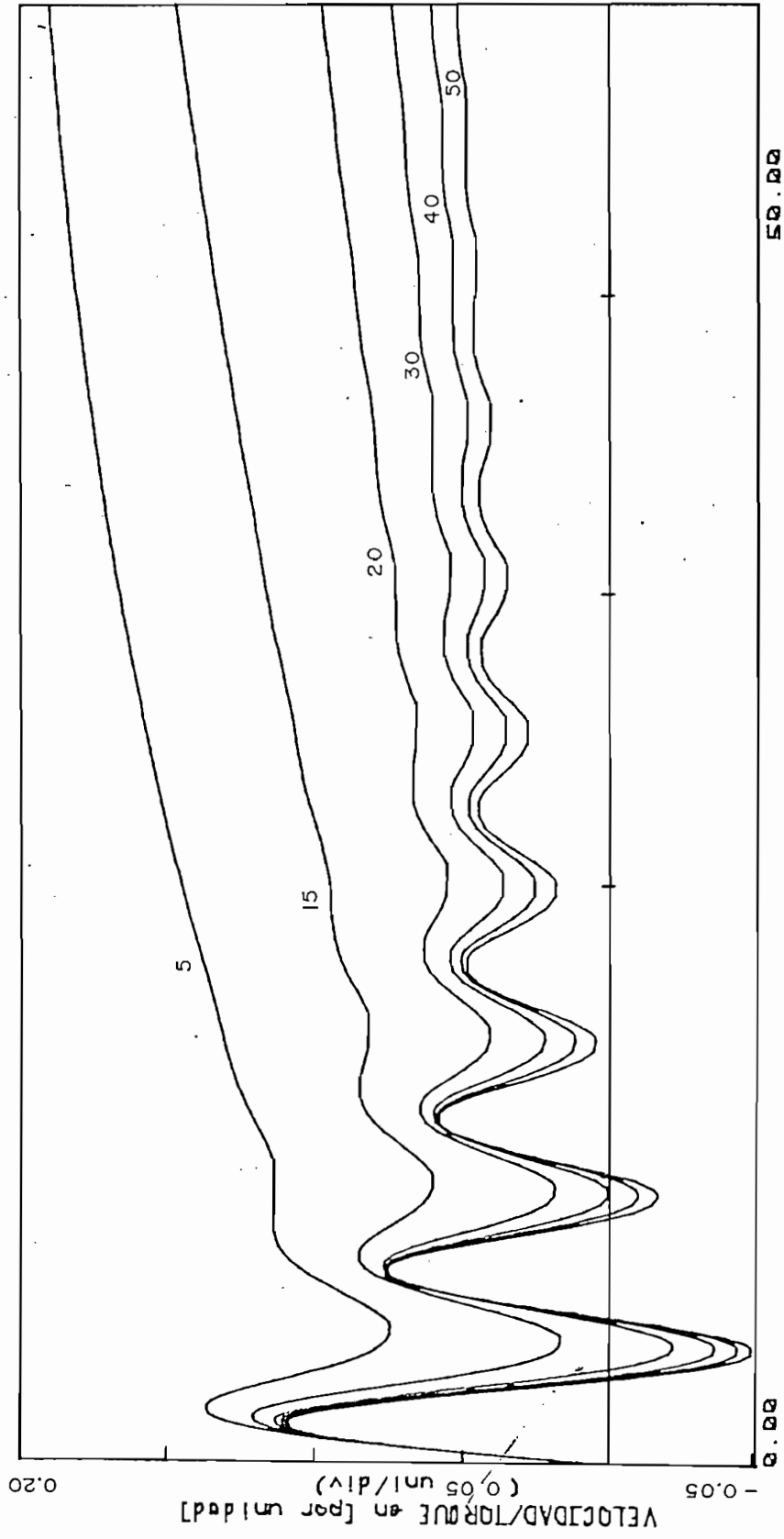
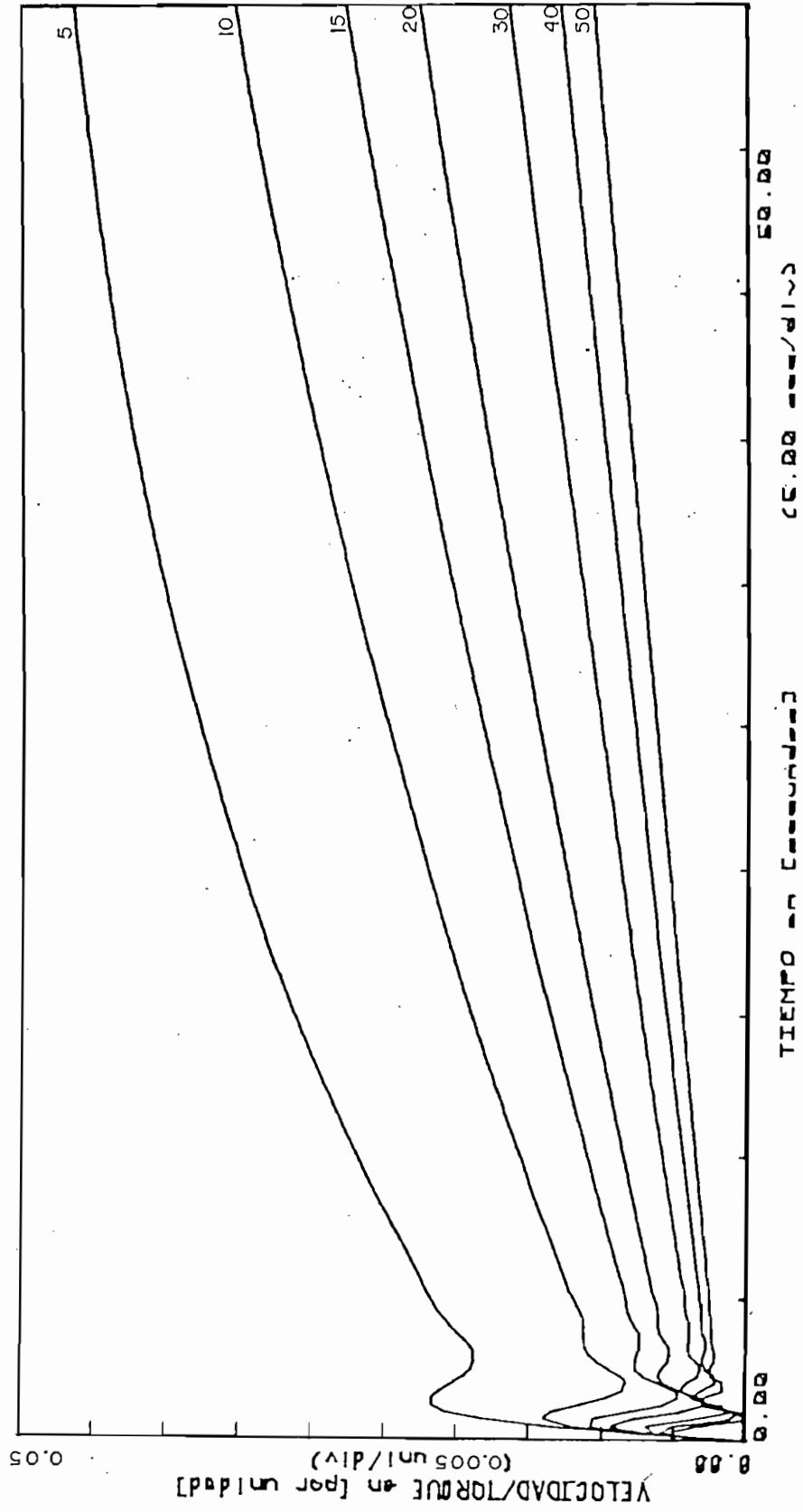


FIG. # 8.15 EFECTO AJUSTE KP SIG. EXT. (KP=5-15-20-30-40-50 Y KJ=0 ; KI=0.25)



TIEMPO en segundos (10.00 00.05)

Fig. # 8.16 EFECTO AJUSTE K<sub>P</sub> SIG. INT. CKP=5-10-15-20-30-40-50 Y KI=0.2, KI=0.3



( $K_p$ ) se disminuye el error en estado estacionario, pero no lo elimina. Dar valores de  $K_p$  mayores a 50, no es recomendable debido a que ya no existe una corrección apreciable del error en estado estacionario, y la respuesta del sistema comienza a volverse cada vez más oscilatoria. Por esta razón en la construcción del equipo, se dejará la posibilidad de variar la ganancia  $K_p$  de 0 a 60.

#### VARIACION DE LA GANANCIA $K_i$

En los gráficos # 8.17 (para sigma cero), # 8.18 (para sigma exterior), y # 8.19 (para sigma interior), se presenta como afecta a la respuesta del sistema ( $n/m_p$ ), la variación de la ganancia  $K_i$ . Con el aumento de ésta se tiende a corregir el error en estado estacionario del sistema; pero pasado cierto límite, dado por las inecuaciones (8.7) para sigma interior, (8.8) y (8.9) para sigma exterior y (8.11) para sigma cero, el sistema se vuelve totalmente oscilatorio y pasa a ser inestable para valores de  $K_i$  mayores al límite dado por la inecuación correspondiente para cada modalidad de sigma.

Si bien se observa, para la simulación, que el máximo  $K_i$  es de 0.9, cuando  $K_p=0$  y  $K_d=0$  (sección V.III.C.2), se ha tomado un valor máximo de  $K_i=40$  para la construcción del sistema de control debido a que si se observan las inecuaciones (8.7), (8.8), (8.9), y (8.11), el valor máximo de  $K_i$

FIG. # 8.17 EFECTO AJUSTE KI SIG. CERO (KI=0-0.1-0.4-0.6-0.9 Y KP=0 ; KJ=0)

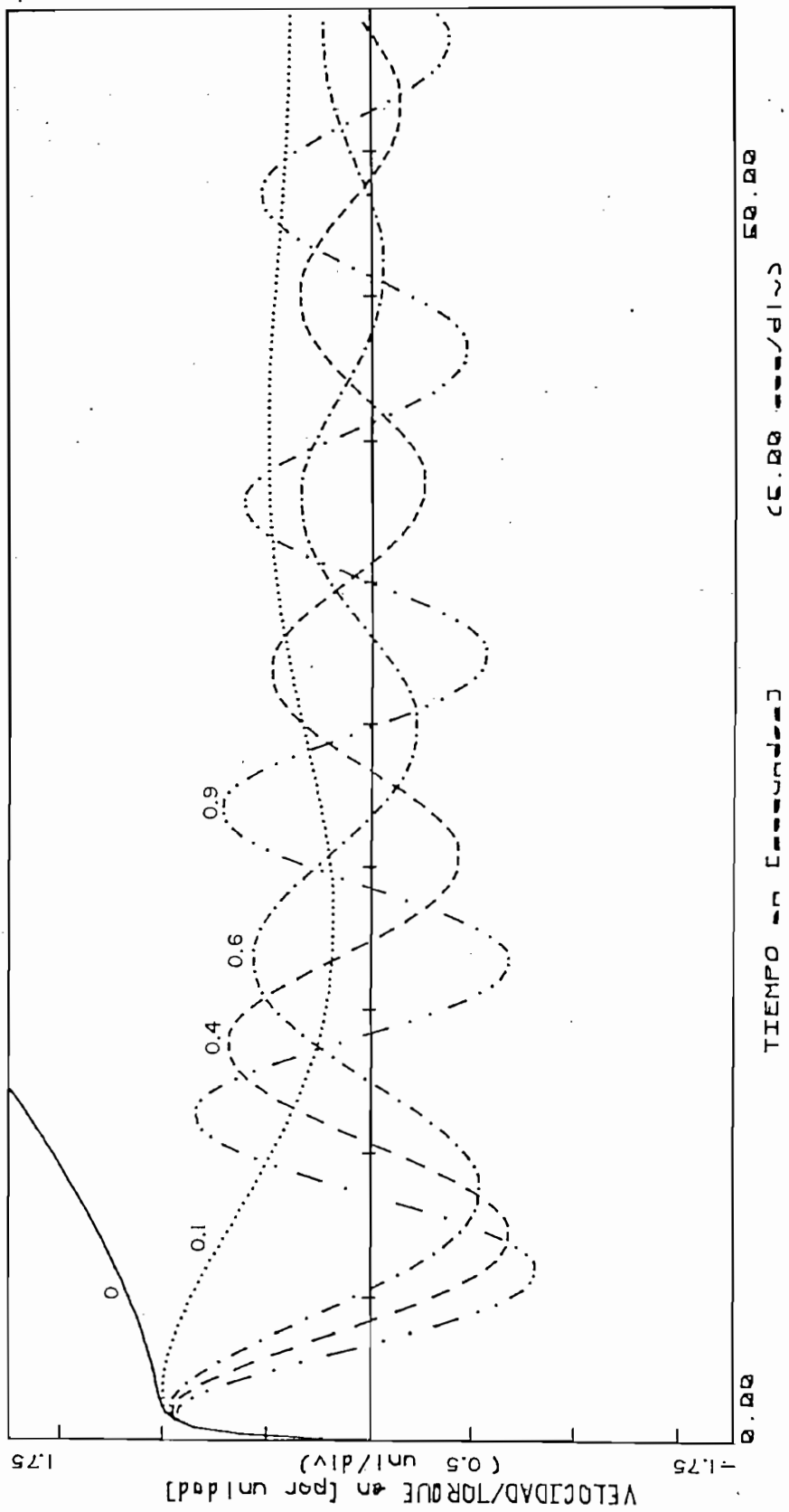
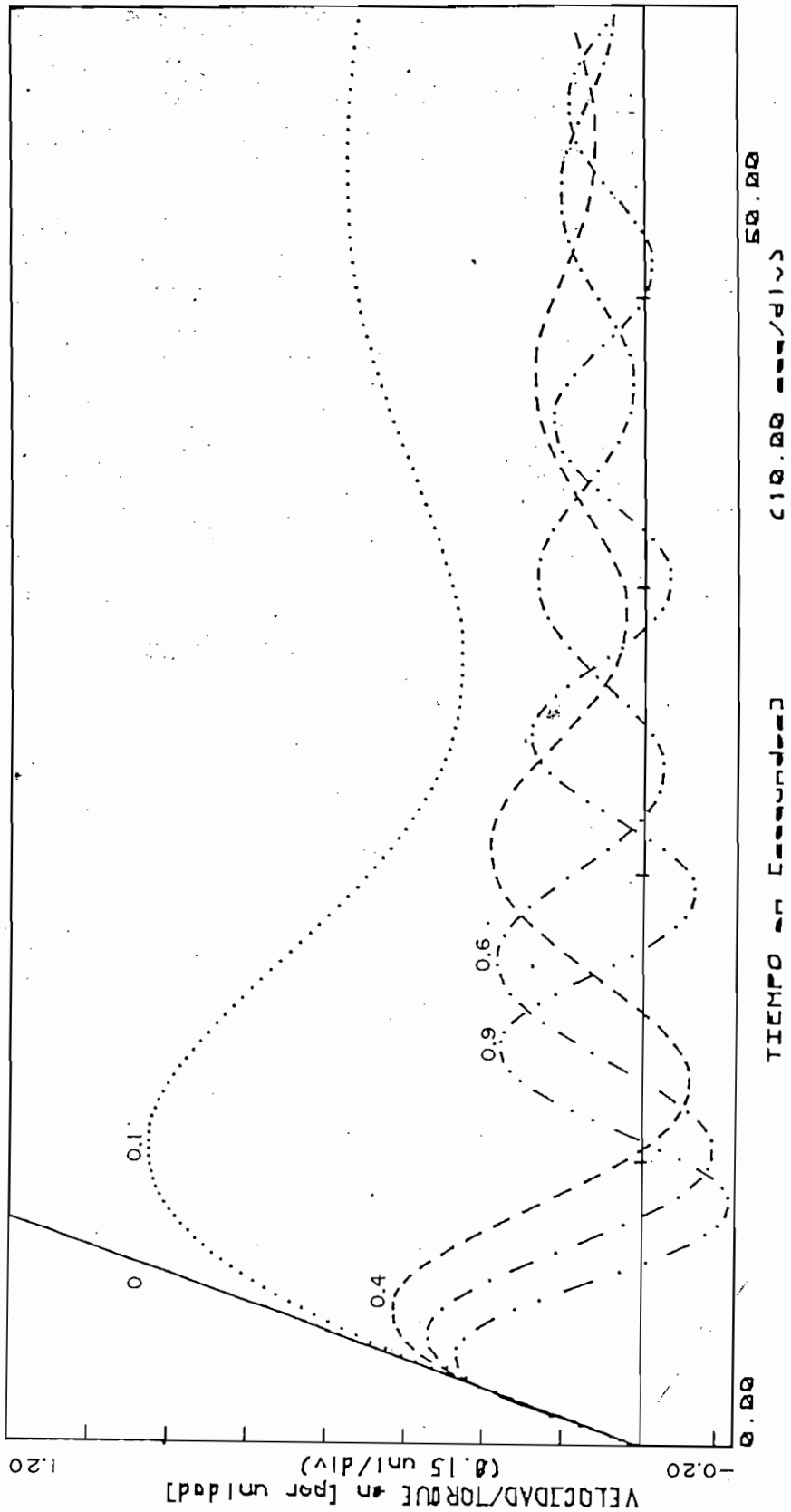


FIG. # 8.18 EFECTO AJUSTE KI SIG. EXT. (KI=0-0.1-0.4-0.6-0.9 y KI=0 y KI=0.9)

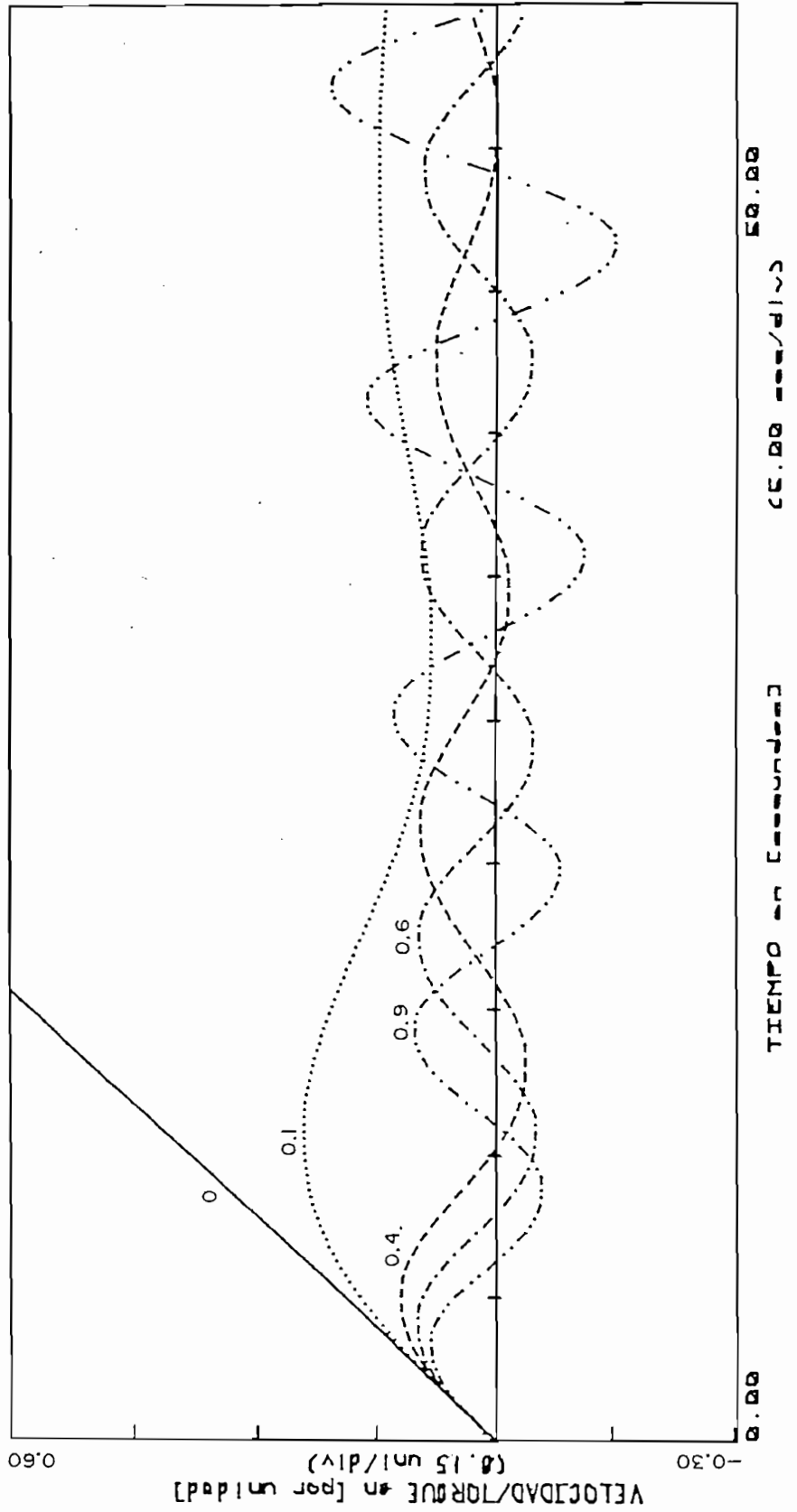


00.05  
CALIP/... 00 012  
TIEMPO en [segundos]

1.20  
-0.20  
VELOCIDAD/TORQUE en [por unidad] (0.15 uni/div)  
0.00



FIG. # 8.19 EFECTO AJUSTE KI SIG. INT. CKI-0-0.1-0.4-0.6-0.9 y KP=0 y KV=0.5



depende del valor que tomen  $K_p$  y  $K_d$ , por lo que se da la opción, en la construcción del equipo, de variar  $K_i$  desde 0 hasta 50.

#### VARIACION DE LA GANANCIA $K_d$

Los gráficos # 8.20 (para sigma cero), # 8.21 (para sigma exterior), y # 8.22 ( para sigma interior), presentan la incidencia de la ganancia  $K_d$  sobre la respuesta del sistema ( $n/m_p$ ) manteniendo constantes  $K_p = 5$  y  $K_i = 4$ . Al aumentar la ganancia  $K_d$  se observa, de la simulación, que el único efecto sobre la respuesta del sistema es la de disminuir los sobretiros del mismo y bajar el tiempo de estabilización, mejorando la respuesta del sistema. Si se incrementa demasiado el valor de  $K_d$ , se puede llegar a obtener sistemas con respuesta sobreamortiguada y después oscilatoria (Fig. # 8.22).

De las tres modalidades de sigma se concluye que para todos los valores similares de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ :

- a.- Con sigma exterior se tiene un sistema que presenta sobretiros al rededor del 20% de velocidad, y una respuesta muy oscilatoria (Fig, # 8.21).
- b.- Con sigma cero se tiene un sistema con sobretiros al rededor del 75% en la velocidad y un tiempo de estabilización de 10 segundos (Fig. # 8.20)

FIG. # 8.20 EFECTO AJUSTE KJ SIG. CERO CKJ-8-1-5-10-20-100 Y KPM5 ; KIM-13

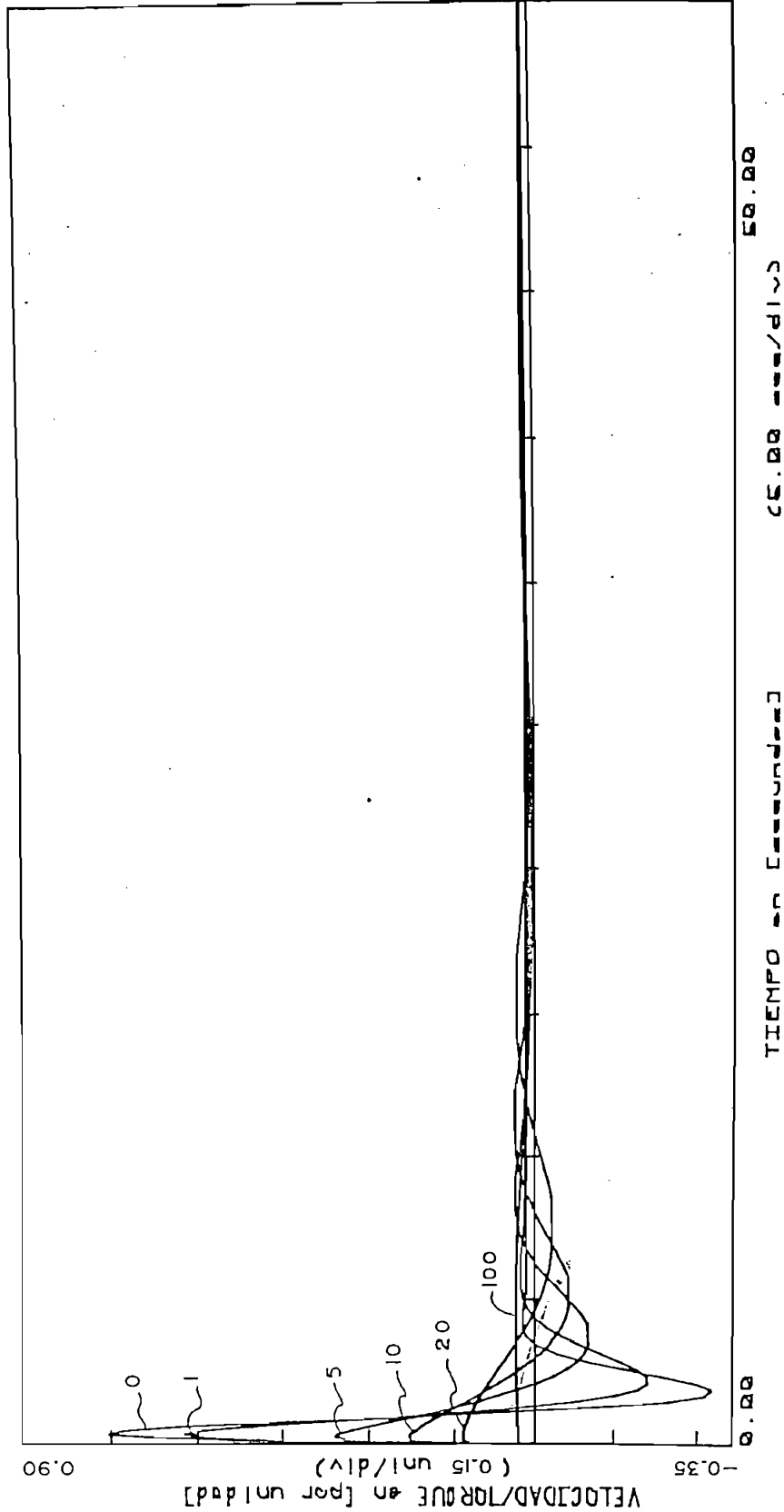


FIG. # 8.2] EFECTO AJUSTE KJ SIG. EXT. CKJ-0-1-5-10-20-100 Y KP-5 / KI-13

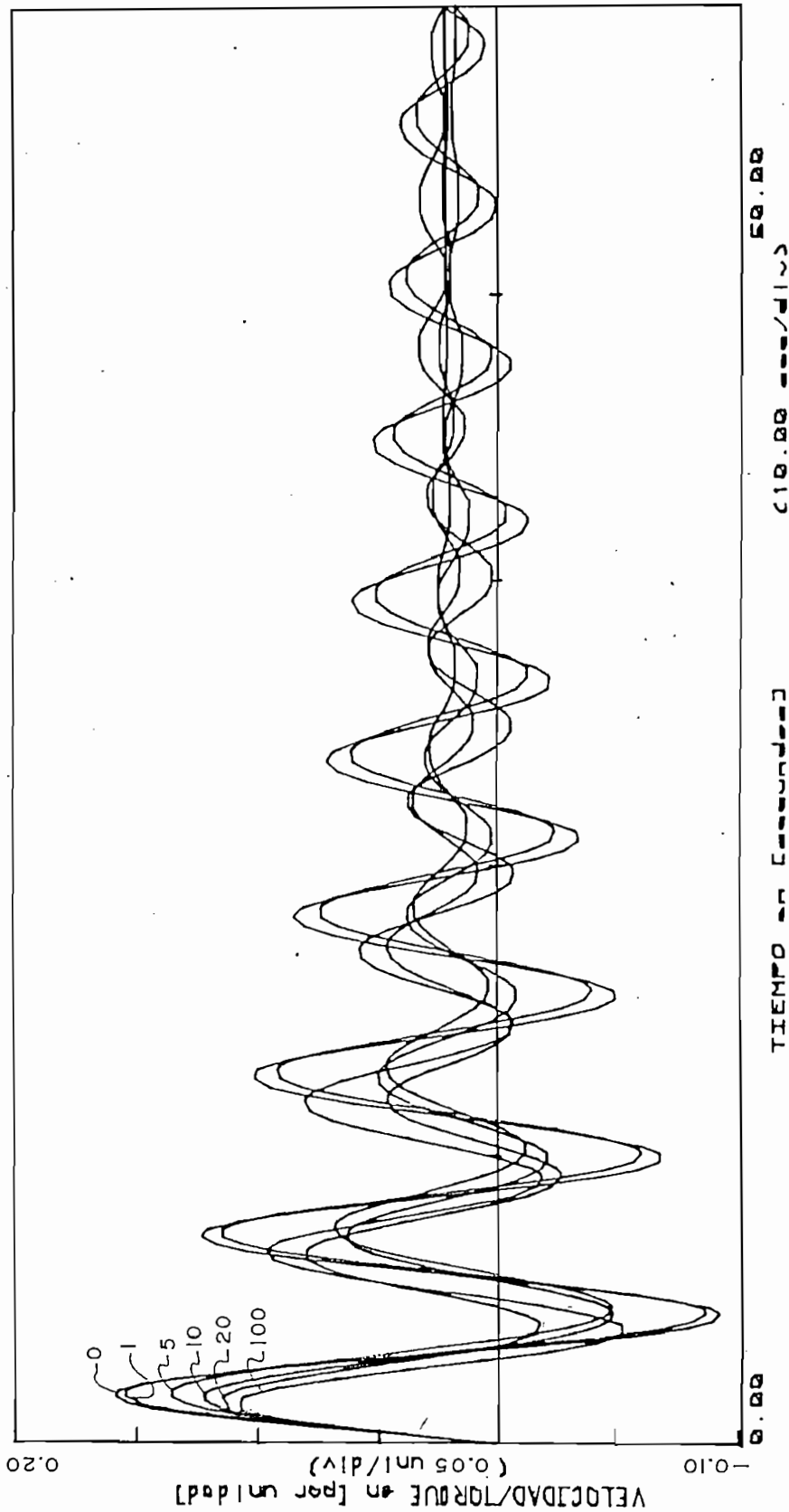
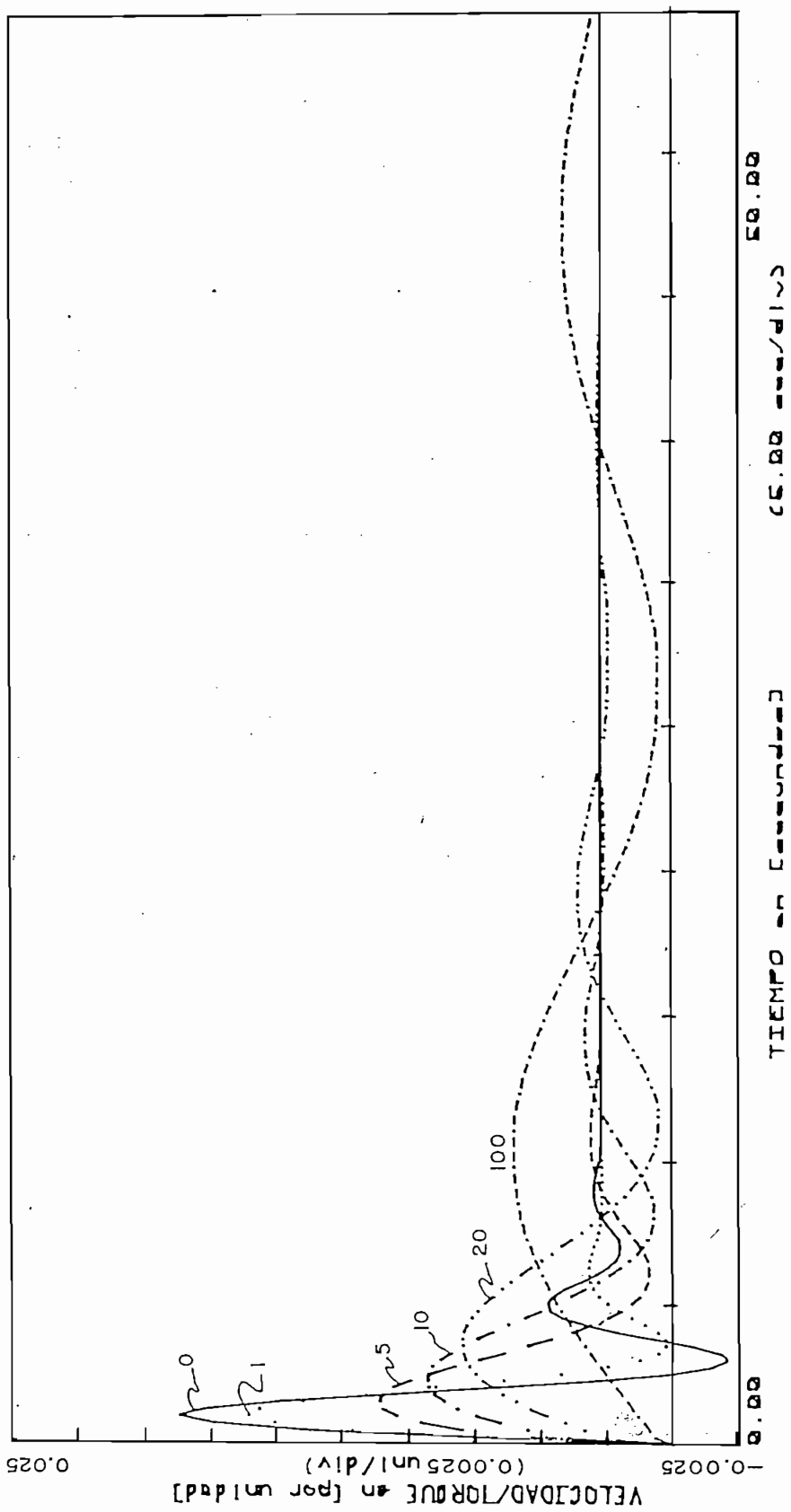


FIG. # 8.22 EFECTO AJUSTE K<sub>d</sub> SIG. INT. (K<sub>d</sub>=0-1-5-10-20-100)y K<sub>rs</sub>=5 ; K<sub>i</sub>=10



c.- Para  $\sigma$  interior se obtiene, de la simulación, un sistema que presenta sobretiros alrededor del 2.5% en la velocidad y un tiempo de estabilización de 5 segundos (Fig. # 8.22).

#### VIII.E.- CONCLUSIONES.

1.- La ganancia  $K_p$ , corrige pero no elimina el error en estado estacionario. En el equipo construido se puede variar  $K_p$  desde 0 hasta 60.

2.- La ganancia  $K_i$ , corrige y tiende a eliminar el error en estado estacionario, pero inestabiliza el sistema. En el equipo construido se puede variar  $K_i$  desde 0 hasta 50.

3.- La ganancia  $K_d$ , corta los sobretiros de la respuesta del sistema y mejora la velocidad de respuesta. En el equipo construido se puede variar  $K_d$  desde 1 hasta 50.

4.- Siempre se puede determinar una tríada  $K_p$ ,  $K_i$ , y  $K_d$ , para la cual se obtiene una buena respuesta del sistema.

5.- Las mejores características de respuesta se tiene, cuando se trabaja con realimentación transiente  $\sigma$  interior, y dado que el equipo es demostrativo se puede trabajar con cualquiera de las modalidades de  $\sigma$  dentro del lazo.

## CAPITULO IX

### DISEÑO, CONSTRUCCION Y MONTAJE DE ELEMENTOS MECANICOS

#### IX.A.- INTRODUCCION

Debido a las pequeñas fuerzas que deben transmitir los elementos mecánicos (máximo 2,5 Kg que soporta el vástago arrastrador de la tuerca), no es necesario realizar un profundo análisis de los esfuerzos soportados por los diferentes elementos. En la construcción primarán los requerimientos geométricos del sistema, como son:

- 1.- Deben quedar habilitados, el sistema de regulación oleomecánico anterior (O3), y el sistema electro-hidráulico actual.
  
- 2.- El conjunto debe tener la mayor cantidad de regulaciones posibles, por cuanto es un banco de pruebas. Como es el caso de la varilla de realimentación del sistema oleomecánico, donde se puede cambiar el punto de entrada del tornillo posicionador, para variar así el valor de la constante  $K_R$ .

IX.B.- VARILLA DE REALIMENTACION DEL SISTEMA  
OLEOMECANICO

La varilla es el elemento mecánico que sirve para realimentar el servo oleomecánico. Este elemento soporta una fuerza máxima de 2,5 Kg los cuales se aplican en el punto de pivote de la tuerca.

La varilla se ha construido en platina de acero de 5 mm de espesor y 11 mm de ancho, y su longitud de trabajo es de 630 mm, a lo largo de los cuales se han practicado perforaciones cada 100 mm para permitir la variación del punto de pivote y consecuentemente la relación de realimentación Kg.

Además tiene fresados sus extremos con el fin de permitir el deslizamiento de los pasadores del cilindro y del carrete de la válvula de distribución.

La tolerancia tanto de los canales fresados, como de los orificios practicados a lo largo de la varilla, debe ser mínima, con el objeto de tener el menor juego posible, ya que ello repercute generando tiempos muertos en el sistema de control.



IX.C.- TORNILLO TUERCA

El sistema tornillo tuerca, es el conjunto que transforma la señal de control de giro proporcionada por el servomotor eléctrico, en una señal de desplazamiento, la cual es la entrada al carrete de la válvula de distribución.

La tuerca tiene un vástago de 6 mm de diámetro, que es el elemento que constituye el pivote y arrastrador de la varilla de realimentación. El tornillo está montado sobre bocines de bronce, y está conectado al motor mediante una junta Oldham. Este mecanismo facilita la conexión de dos flechas paralelas que están ligeramente desalineadas de manera que se pueda transmitir una relación de velocidad constante desde la flecha motriz a la movida..

Tomando en cuenta que la carrera total del cilindro es de 80 mm, se ha montado un tornillo de longitud útil de 90 mm, en previsión de que alguna vez sea necesario usar todo el recorrido del pistón.

Otra consideración es la del paso del tornillo, el cual debe ser pequeño con el objeto de posicionar con mayor precisión el carrete de la válvula de distribución.

El tornillo escogido es:

- Paso: NF 24 W rosca fina.
- Diámetro nominal: 5/16"

La tuerca debe tener:

- El menor juego posible con el tornillo.
- El vástago de pivote y empuje de la varilla de realimentación.
- Un orificio, para alojar el pasador de arrastre del transductor de posición del servo motor eléctrico.

#### IX.D.- BASTIDOR DEL MOTOR ELECTRICO

Debido a la necesidad de ubicar el pivote sobre distintos puntos de la varilla, también es necesario un bastidor móvil, sobre el cual se encuentre montado el motor, el conjunto tornillo-tuerca, y el transductor de posición del servo eléctrico. Este bastidor por lo tanto se lo ha construido sobre rieles. Se debe anotar que el sistema construido es de fácil montaje y posicionamiento, lo cual facilita el mantenimiento y calibración del sistema.

#### IX.E.- BASTIDORES DEL SISTEMA SENSOR DE VELOCIDAD

El sistema sensor de velocidad se compone de dos elementos: un disco en el cual se han perforado 40 orificios equidistantes, y una mordaza la cual lleva el emisor y receptor del sistema Fotosensor.

El disco gira solidario al eje de la turbina por medio de la manzana de sujeción, mientras que el sensor y emisor necesitan de ciertas construcciones que permitan el correcto alineamiento de los mismos con los orificios del disco. Aquí han primado una vez más consideraciones de tipo geométrico ya que el sistema fotosensor no está sometido a ninguna fuerza de carga.

## CAPITULO X

### DISEÑO, CONSTRUCCION Y MONTAJE DE CIRCUITOS ELECTRICOS

Los diferentes elementos que conforman los circuitos eléctricos y electrónicos, de todos los sistemas implementados, se ubicaron en placas de circuito impreso que poseían prefabricados, en similar forma que en un proto board, los contactos de conexión y las perforaciones necesarias para colocar los elementos.

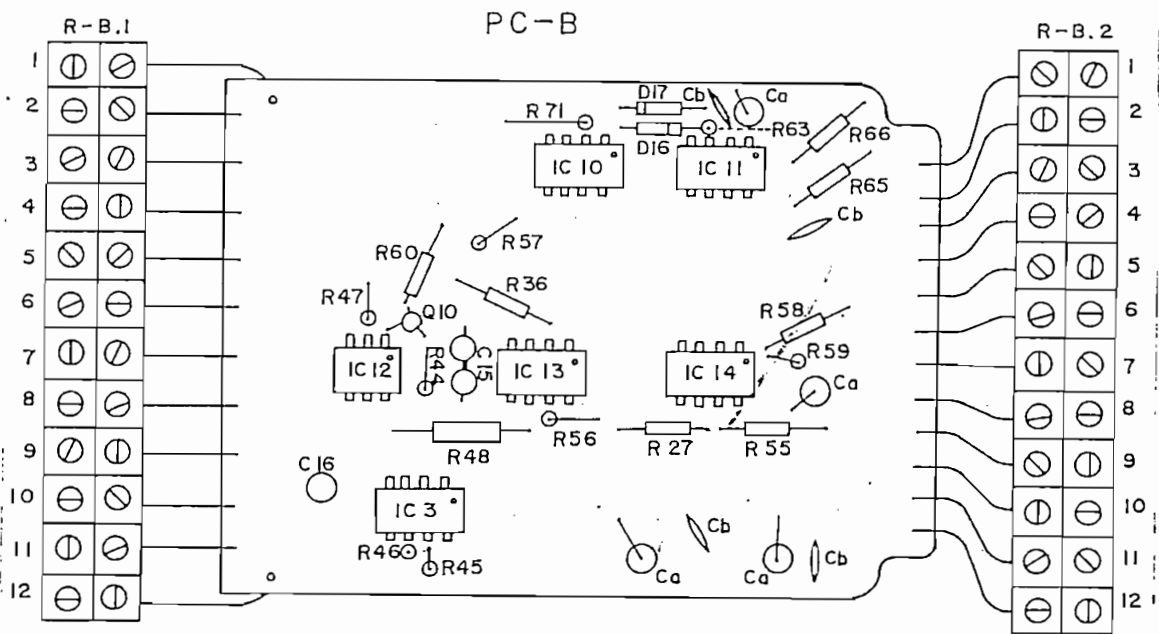
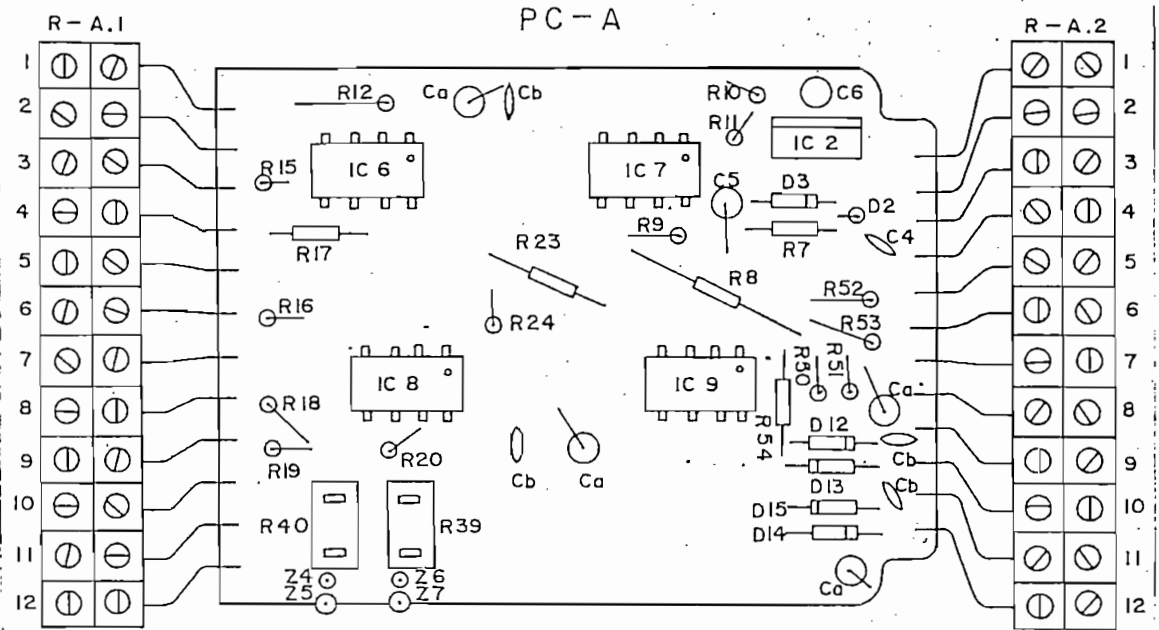
En esta sección se presentarán todos los diagramas de distribución de los elementos mencionados, así como también de los elementos de circuitos adicionales o secundarios que facilitan la operación o trabajo con el circuito principal: el controlador. El circuito de la fuente de poder será desarrollado e implementado en una placa de circuito impreso expresamente diseñada para éste.

## X.A. - CONTROLADOR

En anexos se presenta el diagrama total del controlador electrónico, desarrollado en la sección VII, el cual incluye los valores de los elementos utilizados para su funcionamiento; y que fueron distribuidos, según los siguientes diagramas, en dos placas de circuito impreso (Fig. # 10.1) y en conexiones externas en el tablero de control o en los elementos mecánicos.

Estas dos placas contienen la mayoría de los elementos que conforman el controlador, y cada una contiene parte o la totalidad de los circuitos de los siguientes bloques:

- |            |                               |
|------------|-------------------------------|
| PLACA PC-A | - Velocidad de Referencia     |
|            | - Velocidad de la Turbina     |
|            | - Señal de Error              |
|            | - Señal Sigma                 |
|            | - Señal de Control Manual     |
| <br>       |                               |
| PLACA PC-B | - Circuito de Inicialización  |
|            | - Modalidad Proporcional      |
|            | - Modalidad Integral          |
|            | - Modalidad Derivativa        |
|            | - Amplificador de Potencia    |
|            | - Señal de Posición           |
|            | - Señal de Control Automático |



Placas PC-A y PC-B del controlador

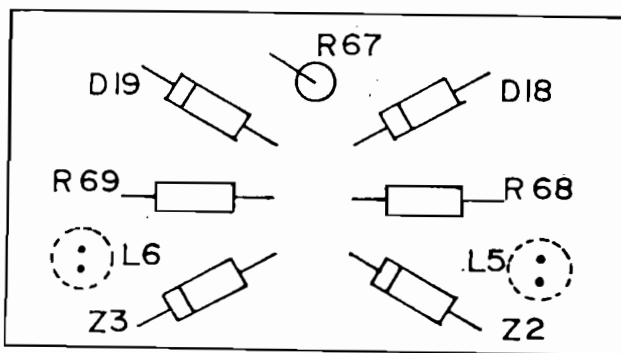
Figura # 10.1

Junto a estas placas se encuentran:

Un selector (SO) de contactos múltiples conmutados para cambio de operación normal a condiciones de calibración o ajuste de offset de los principales amplificadores operacionales (ubicado entre las placas PC-A y PC-B y conectado directamente a éstas. Fig # 1.17).

Una placa adicional, PC-C, con los elementos necesarios (resistencias, trimmers y capacitores) para formar los circuitos de ajuste de offset (Figuras # 10.3 y 10.17)

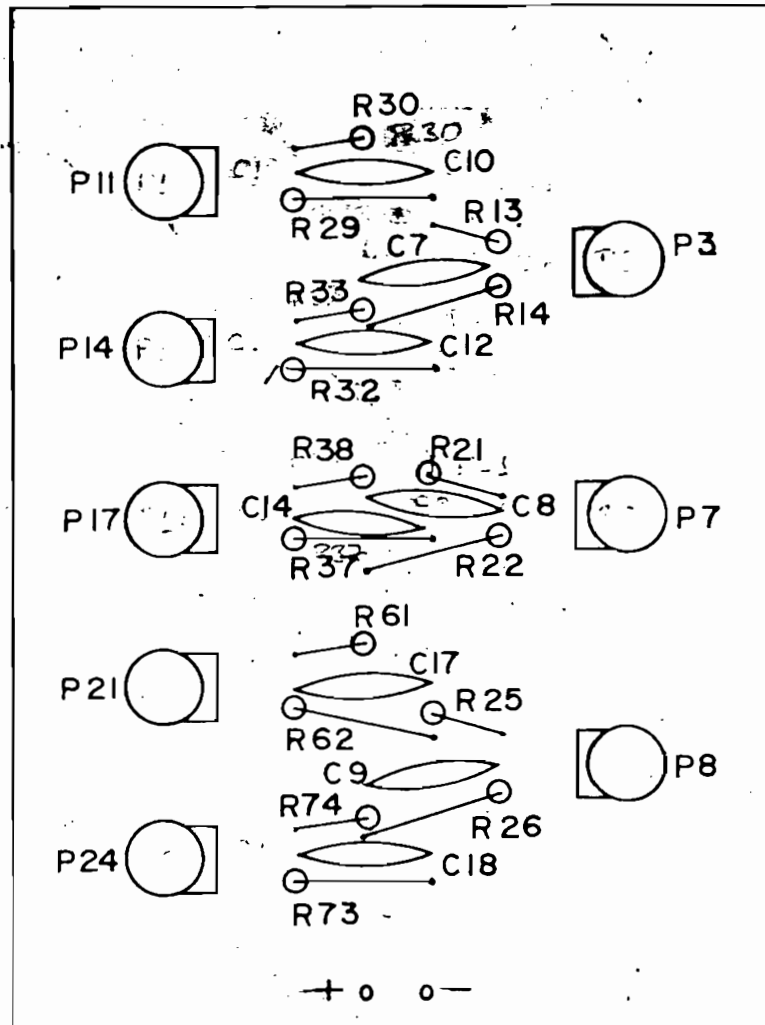
Un relé extra (Rc2), acoplado al relé Rc1 para aumento del número de contactos disponibles (distribuidos en la activación de la alarma y en la desconexión del controlador)



Placa PC-D

Figura # 10.2

Una placa pequeña adicional de los LED's que marcan el sentido de giro del servomotor, ubicada en la tapa frontal del tablero de control y cuya distribución física de elementos es la correspondiente a la figura # 10.2).



Placa de ajuste de offset PC-C

Figura # 10.3

Los potenciómetros de ajuste de las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  se ubicaron en la tapa frontal del tablero, al igual que los interruptores de habilitación de estas modalidades y todos los potenciómetros que participan en los ajustes de ganancia de las diferentes señales que intervienen en el control (sección X.D).



Los capacitores C11 y C13 de los circuitos integrador y derivador, respectivamente, han sido colocados (y sujetos con abrazaderas) junto a las paredes de la caja del tablero, (fig. # 10.17).

En la placa PC-A se encuentra el circuito de fuente de poder en tercera etapa ( $V_{cc} = \pm 10V$ ), para polarizar a los elementos que se hallan en las placas PC-A y PC-B, y está conformado con diodos zener según la figura # 10.4

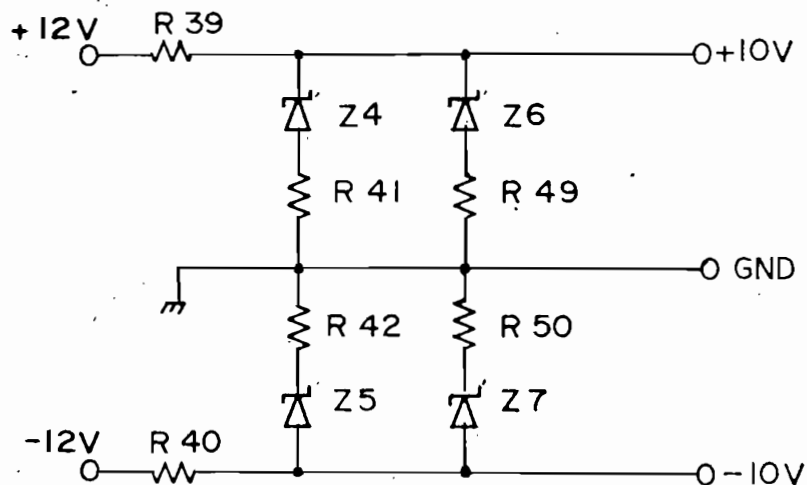


Figura # 10.4

La siguiente configuración circuital fue implementada en los amplificadores operacionales del controlador que requieren de un ajuste de offset. Estos elementos se hallan distribuidos en la placa PC-C de la figura # 10.3 y el procedimiento para el ajuste de estas desviaciones offset se presenta en el apéndice D.

En este circuito: el selector S0 coloca al amplificador en el modo de corrección de offset, el potenciómetro P proporciona la señal de corrección y el capacitor C evita posibles perturbaciones de esta señal por fluctuaciones de la fuente de polarización.

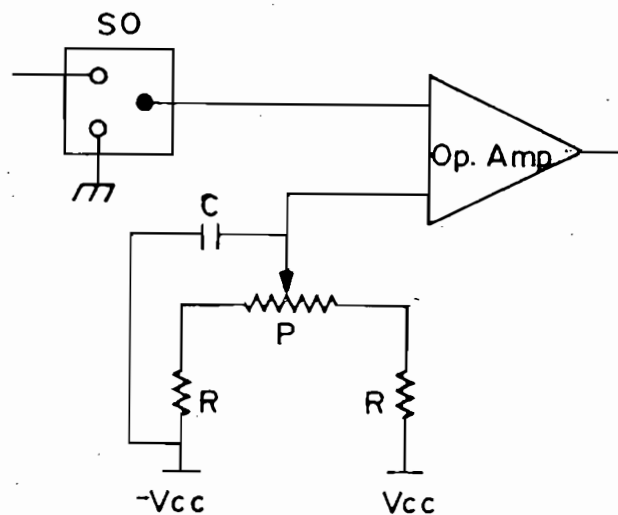


Figura # 10.5

El montaje de las placas se lo realiza a través de regletas de conexión que permiten una fácil y rápida interconexión con los elementos externos a éstas.

En el diagrama general del circuito presentado en anexos se encuentran especificadas todas las interconexiones realizadas, codificándolas con la posición en la regleta correspondiente a una determinada placa.

X.B.- CAIDA DE VELOCIDAD TRANSIENTE SIGMA ( $\sigma$ )

La señal de realimentación sigma (caída de velocidad transiente) es tomada a través del potenciómetro P4, que está ubicado junto a la válvula del sistema oleo-mecánico (Fig # 10.6), e ingresa al circuito del controlador (en la placa PC-A) donde se encuentran los elementos que la hacen compatible en sus dos modalidades: sigma interior y exterior.

En la tapa frontal del tablero de control (fig. # 10.15) se encuentran ubicados el selector S2 de cambio interior/exterior, el potenciómetro P5 que permite el ajuste de ganancia necesario para estos dos modos de trabajo de la señal sigma y el potenciómetro P6 para centrado o calibración de posición del carrete de la válvula.

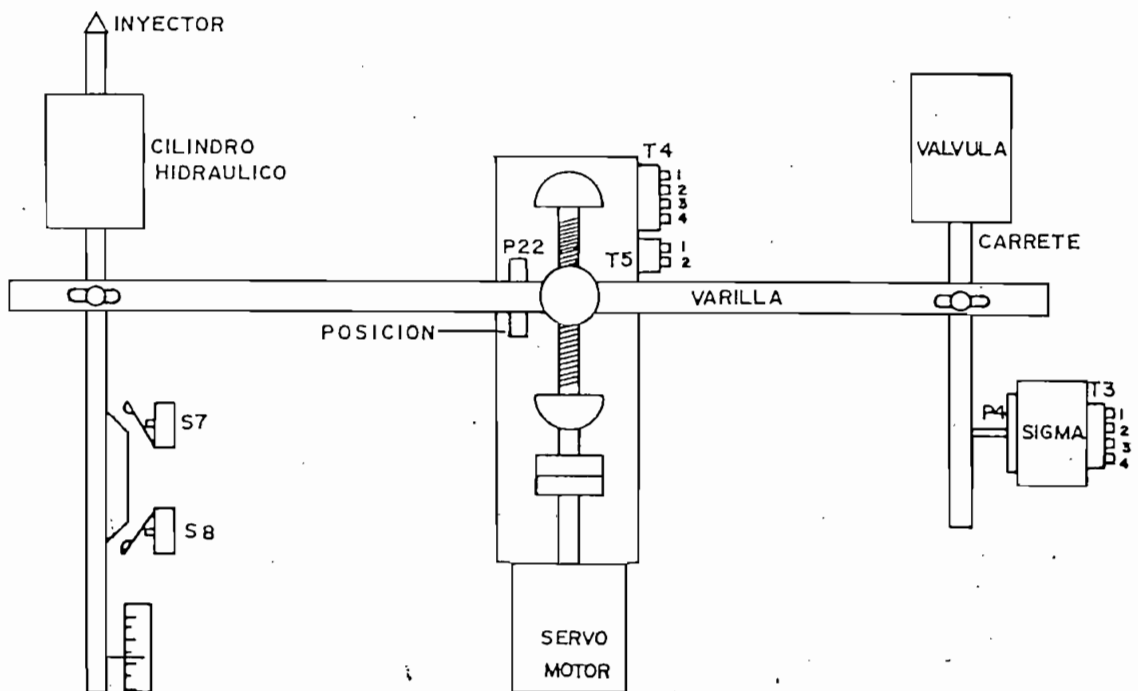


Figura # 10.6

## X.C.- SENSOR DE VELOCIDAD

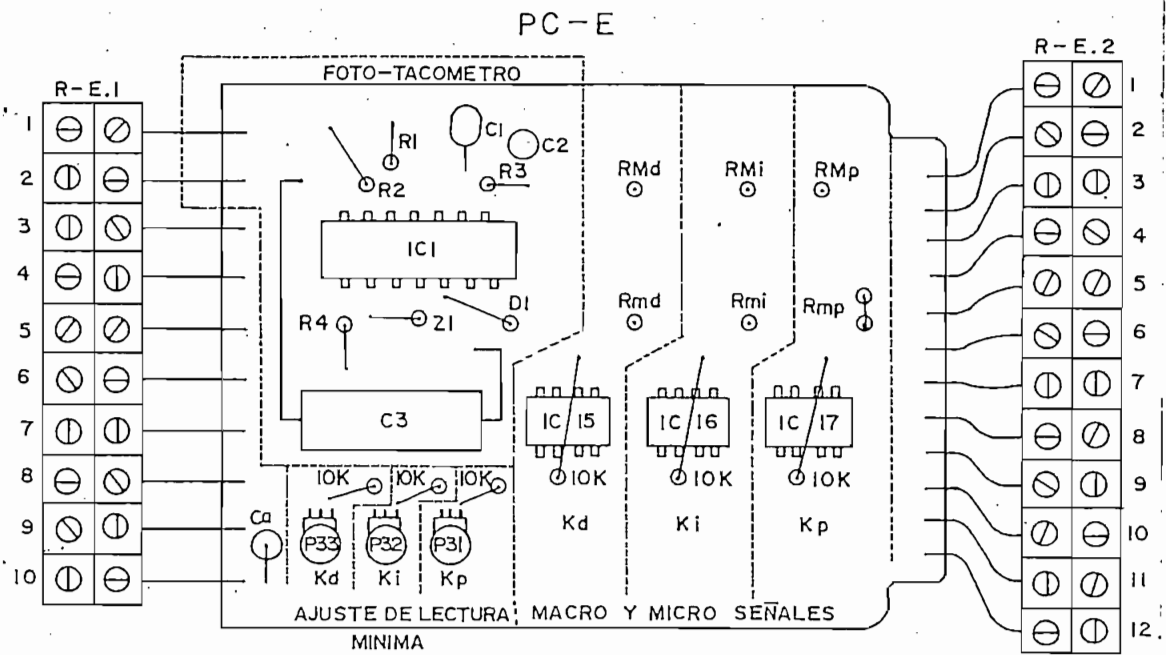
Los elementos que conforman el circuito del sensor de velocidad se encuentran distribuidos en dos sitios, dentro y fuera de la caja del tablero de control.

Los elementos que intervienen en el fotosensor se encuentran acoplados al eje de la turbina y están montados en soportes adecuados para una fácil instalación y una directa conexión a los circuitos del tablero de control.

El convertidor de frecuencia a voltaje y los elementos que lo complementan se encuentran distribuidos en la placa PC-E según la figura # 10.8; y, los elementos ubicados fuera del tablero de control se encuentran en el fotosensor y distribuidas según la figura # 10.7.



ELEMENTOS DEL FOTO SENSOR



Placa del Fototacómetro PC-E

Figura # 10.8

## X.D.- TABLERO DE CONTROL

En esta sección se presentan los diagramas y el montaje de la fuente de poder en sus tres etapas, así como también los circuitos secundarios implementados para facilitar el manejo y operación de las funciones de control de este tablero.

### X.D.1.- FUENTE DE PODER

En la figura # 10.9 se presenta el diagrama del circuito implementado para conseguir las dos primeras etapas de la fuente de poder.

La primera etapa de la fuente de poder (Fig. # 10.9) tiene un circuito rectificador en base a un puente de diodos para rectificación de onda completa al que se añade un filtro capacitivo para el alisado de esta señal.

Usualmente la tensión de salida de la primera etapa presenta una ondulación o rizado de algunos voltios y exige un capacitor alisador demasiado grande. Además está afectada por las variaciones de la red y de la carga. A fin de reducir estas variaciones se inserta en serie un seguidor emisor cuya base está conectada a una fuente de tensión de referencia que está fijada por un circuito integrado regulador de tensión de poca potencia.



Al seguidor emisor y al regulador de tensión, que conforman la segunda etapa, se agrega un circuito de protección de sobrecorrientes: formado por las resistencias R75 y R80 y por el grupo de diodos en serie que determinan la caída de tensión máxima (debida a la corriente límite de circulación a través de estas resistencias) entrando en conducción, superado este límite, y llevando a un valor casi nulo la tensión de salida correspondiente. Puesto que la circulación de corriente es relativamente alta (aproximadamente 7A) se configuró el seguidor emisor a través de un circuito de transistores en conexión de par darlington.

Todos estos elementos se encuentran distribuidos en la placa PC-6 (figura # 10.10) y en disipadores de calor, ocupando la parte interna de la sección posterior del tablero (figura # 10.18).

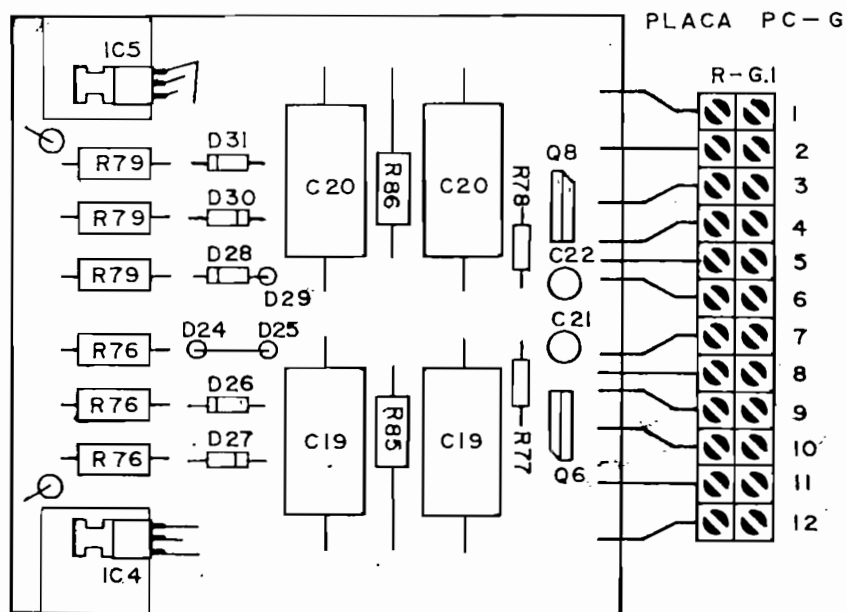


Figura # 10.10



## X.D.2.- CIRCUITO DEL DISPLAY

A fin de poder visualizar en una pantalla de caracteres numéricos los valores de los parámetros que intervienen en el control, se implementó mediante una configuración de voltímetro de un kit comercializado por INTERSIL, ICL7106 3½ Digit Single Chip A/D Converter (ver anexos), y que mediante el acoplamiento con el circuito de la figura # 10.11 pueden ser visualizadas en una pantalla tipo display de 3½ dígitos. Este circuito es alimentado independientemente a través de una batería de 9V.

Las señales que pueden mostrarse en esta pantalla se consiguen a través de los selectores ubicados en la parte inferior del tablero (figura # 10.17) y corresponden con la distribución presentada en la Tabla # 10.1.

Los amplificadores que se ubican entre los contactos de los selectores (antes del divisor de tensión) permiten, mediante sus ganancias, ajustar el valor correspondiente a la señal que se está midiendo.

Con los potenciómetros P25 a P30 se consigue ajustar estas ganancias de acuerdo al procedimiento presentado en el apéndice D. Estos potenciómetros, y los elementos que conforman este circuito, se hallan distribuidos según el esquema de la figura # 10.12 en la placa PC-F.

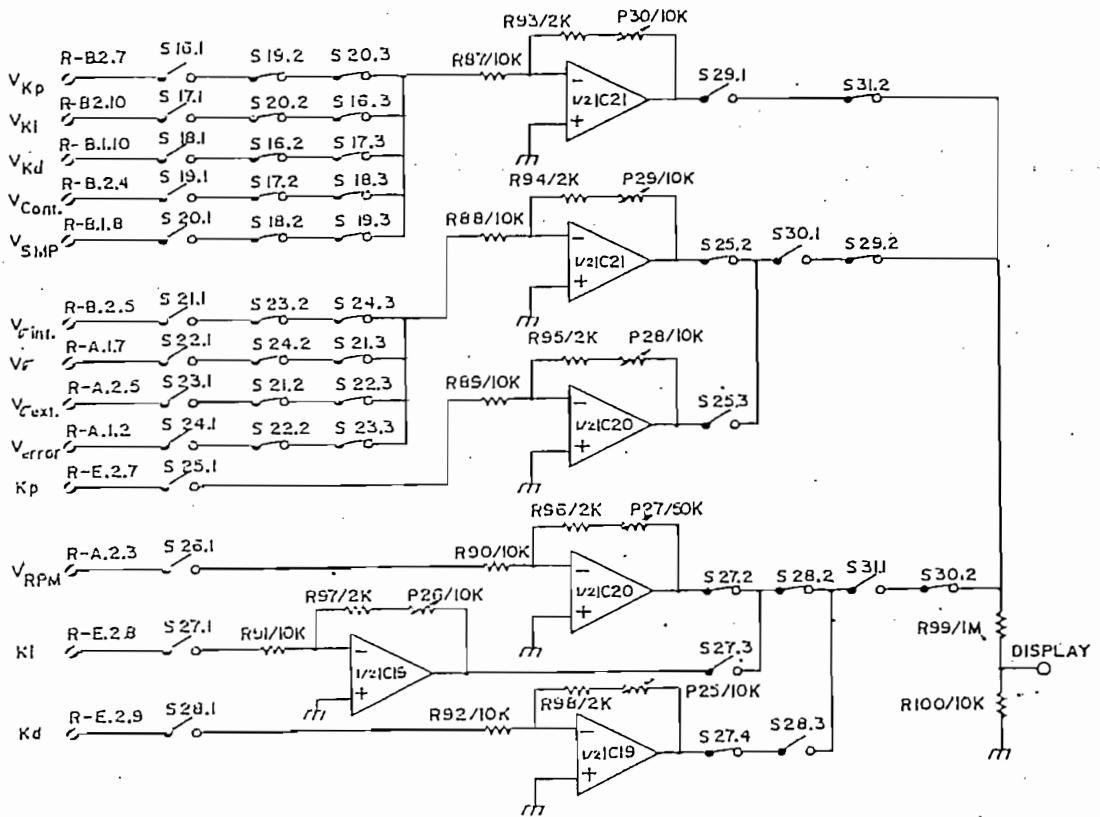


Figura # 10.11

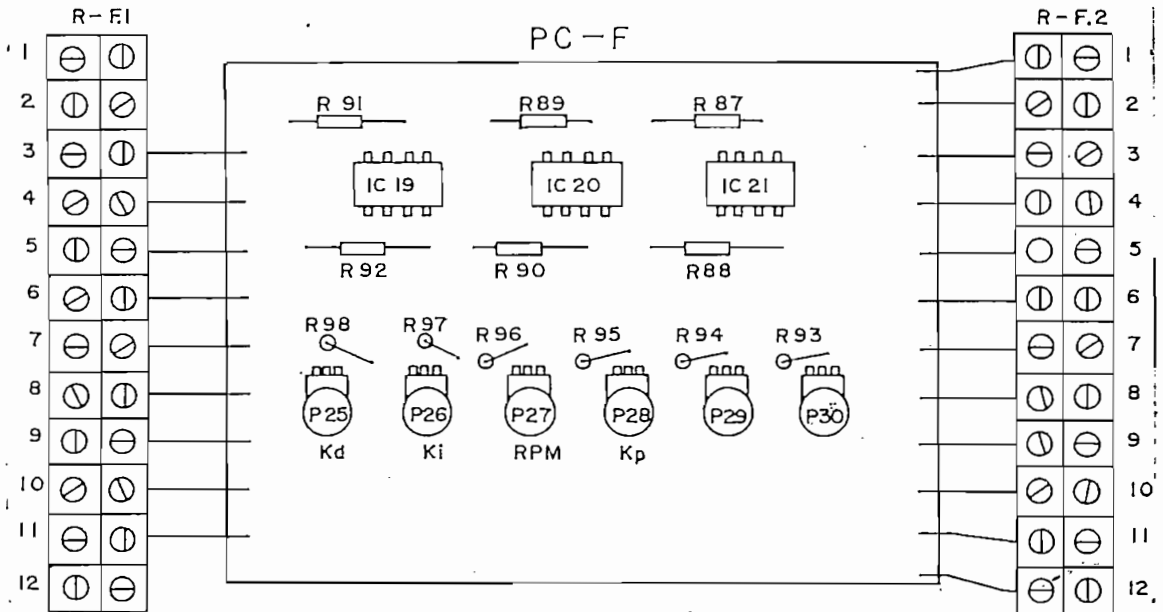


Figura # 10.12

TABLA # 10.1

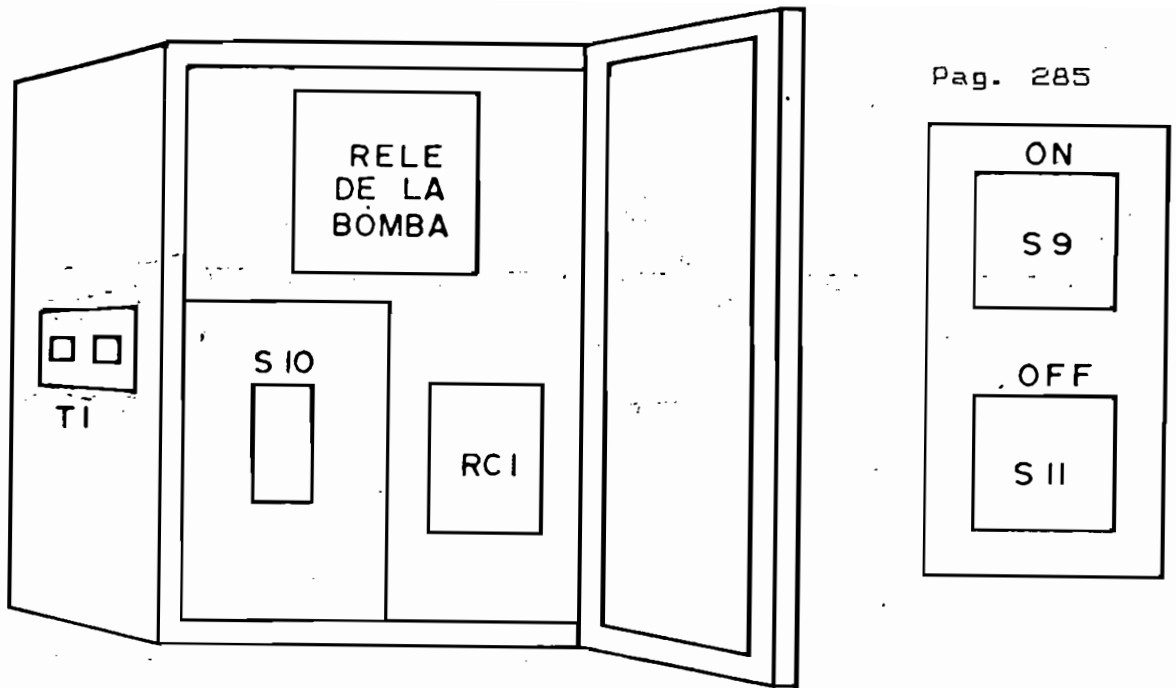
SEÑAL	SELECTOR	DESCRIPCION
----->	S29	Selector que activa el 1 <sup>er</sup> grupo:
$V_{Kp}$	S16	Señal de control proporcional
$V_{Ki}$	S17	Señal de control integral
$V_{Kd}$	S18	Señal de control derivativo
$V_{cont.}$	S19	Señal de control manual/automático
$V_{smp}$	S20	Señal de posición del servomotor
----->	S30	Selector que activa el 2 <sup>do</sup> grupo:
$V_{\sigma ext}$	S21	Señal de sigma exterior
$V_{\sigma}$	S22	Señal de realimentación sigma
$V_{\sigma int}$	S23	Señal de sigma interior
$V_e$	S24	Señal de error
$K_p$	S25	Valor de ganancia proporcional
----->	S31	Selector que activa el 3 <sup>er</sup> grupo:
$V_{RPM}$	S26	Velocidad sensada por el fototacómetro
$K_i$	S27	Valor de ganancia integral
$K_d$	S28	Valor de ganancia derivativa

### X.D.3.- REALIMENTACION DE POSICION

La señal de posición del pivote de la varilla de realimentación, movido por el servomotor, es tomada del potenciómetro P22 que se encuentra ubicado junto al sistema tornillo-tuerca (conectado en forma semejante al potenciómetro de sigma, Fig. # 10.6), el cual es movido por un pasador colocado en la tuerca del tornillo del sistema oleo-mecánico. El potenciómetro de ajuste de la ganancia de esta señal se encuentra igualmente ubicado en la tapa frontal del tablero de control. Estos dos potenciómetros reciben polarización de la segunda etapa de la fuente de poder (sección VII.E.1 y X.D.1).

### X.D.4.- SISTEMA DE SEGURIDAD

Las figuras # 10.13 y 10.6 muestran la ubicación de los elementos que conforman el circuito de seguridad, limitador de carrera del inyector, conectados externamente al tablero de control, y correspondientes a los indicados en los diagramas desarrollados para este efecto en la sección VII y presentados en las figuras # 7.33 y 7.34 (pulsadores de encendido y apagado S9 y S11, relé Rc1 y los interruptores de fin de carrera S7 y S8).



CAJETIN DE CONTROL DEL SISTEMA OLEO-MECANICO

Figura # 10.13

X. D. 5. - CIRCUITO DE FORMACION DEL VALOR DE LOS PARAMETROS DE CONTROL  $K_p$ ,  $K_i$  Y  $K_d$  PARA MACRO Y MICRO CONEXION

Las señales que llegan al display para ser interpretadas en su valor de acción o trabajo, en algunos casos, requieren de circuitos adicionales que proporcionen su valor real. Tal es el requerimiento de las señales de control  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , las cuales están conformadas por una conexión en macro y micro ajuste; por lo tanto, se implementó el circuito de la figura # 10.14 que suma las señales de cada par de potenciómetros que definen las ganancias de estas modalidades de control, y que además permite calibrar el valor mínimo de trabajo de cada modalidad (mediante el potenciómetro P correspondiente, según la Tabla # 10.2, y que están ubicados en la placa PC-E de la figura # 10.8) a fin de leerse en el display su valor exacto.

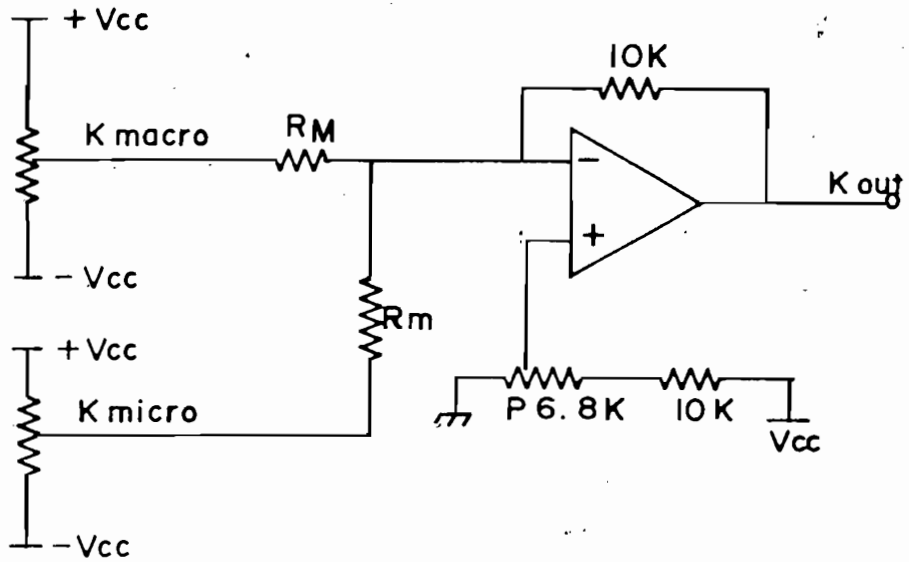


Figura # 10.14

TABLA # 10.2

	POTENCIOMETROS			RESISTENCIAS	
	P	P <sub>M</sub>	P <sub>m</sub>	R <sub>M</sub>	R <sub>m</sub>
Kp	P31	P10.2	P9.2	10KΩ	50KΩ
Ki...	P32	P13.2	P12.2	10KΩ	100KΩ
Kd	P33	P16.2	P15.2	10KΩ	100KΩ

## X.D.6.- DISTRIBUCION DE PLACAS Y ELEMENTOS EXTERNOS

Las placas que contienen elementos electrónicos y todos los elementos externos a estas placas que se interconectan con ellas han sido ubicados en una estructura de caja metálica a la que se le ha denominado "Tablero de Control". Este tablero esta dividido en dos secciones con sus respectivas tapas: Frontal y Posterior; y cada una contiene a las placas y elementos según la distribución presentada en las figuras # 10.15, 10.16, 10.17 y 10.18; y corresponden por su denominación a los elementos codificados en los distintos circuitos desarrollados y en el diagrama general del controlador (anexos).

En la figura # 10.18 se presentan los terminalés T6, T7, T8 y T9 que permiten conectar los elementos externos del tablero de control con los elementos internos completando la configuración diseñada para el controlador.

T6 = Fotosensor

T7 = Circuito de seguridad

T8 = Polarización de potenciómetros de sigma y de posición del servomotor, y toma señal de sigma

T9 = Servomotor y señal de posición

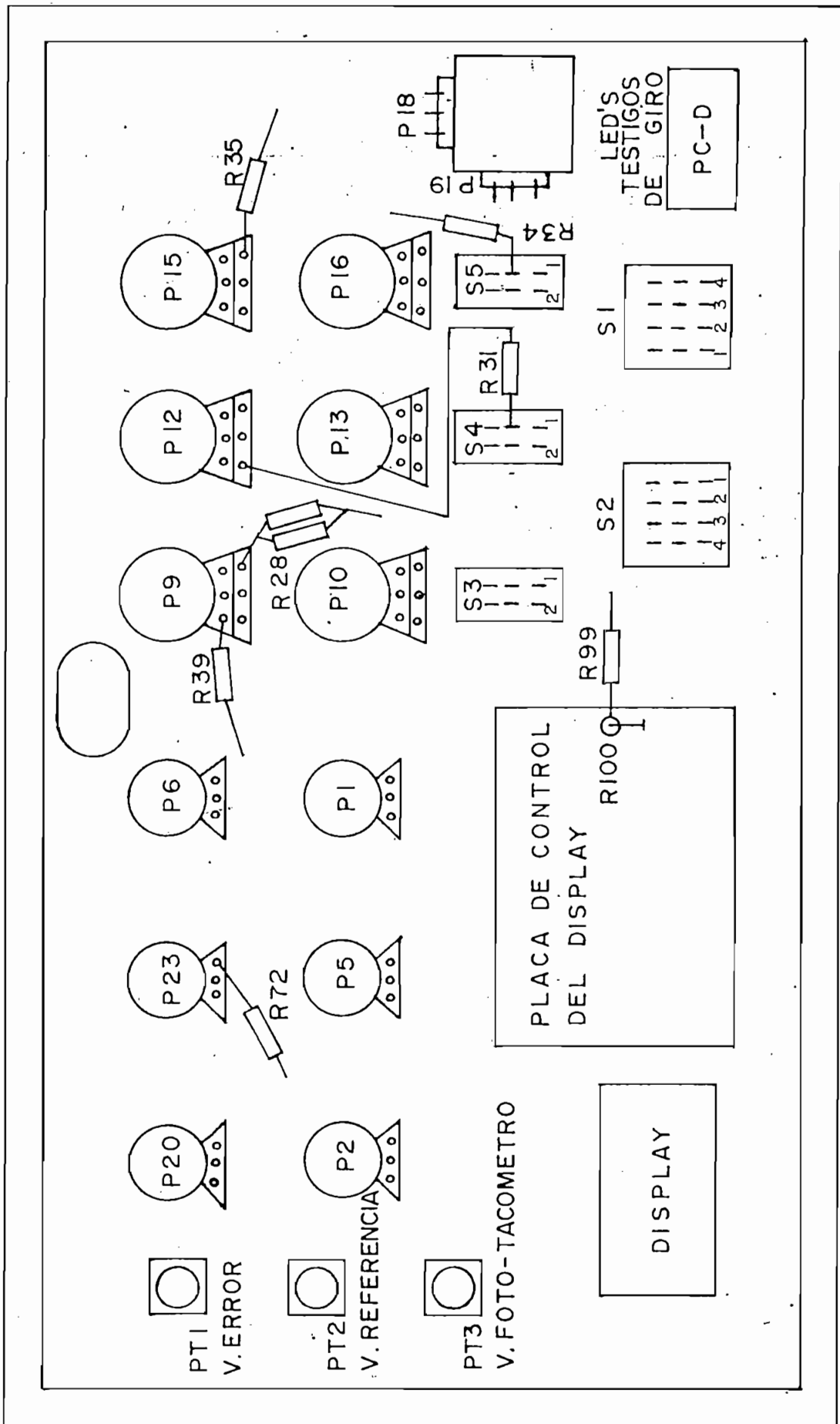


FIGURA 10.15



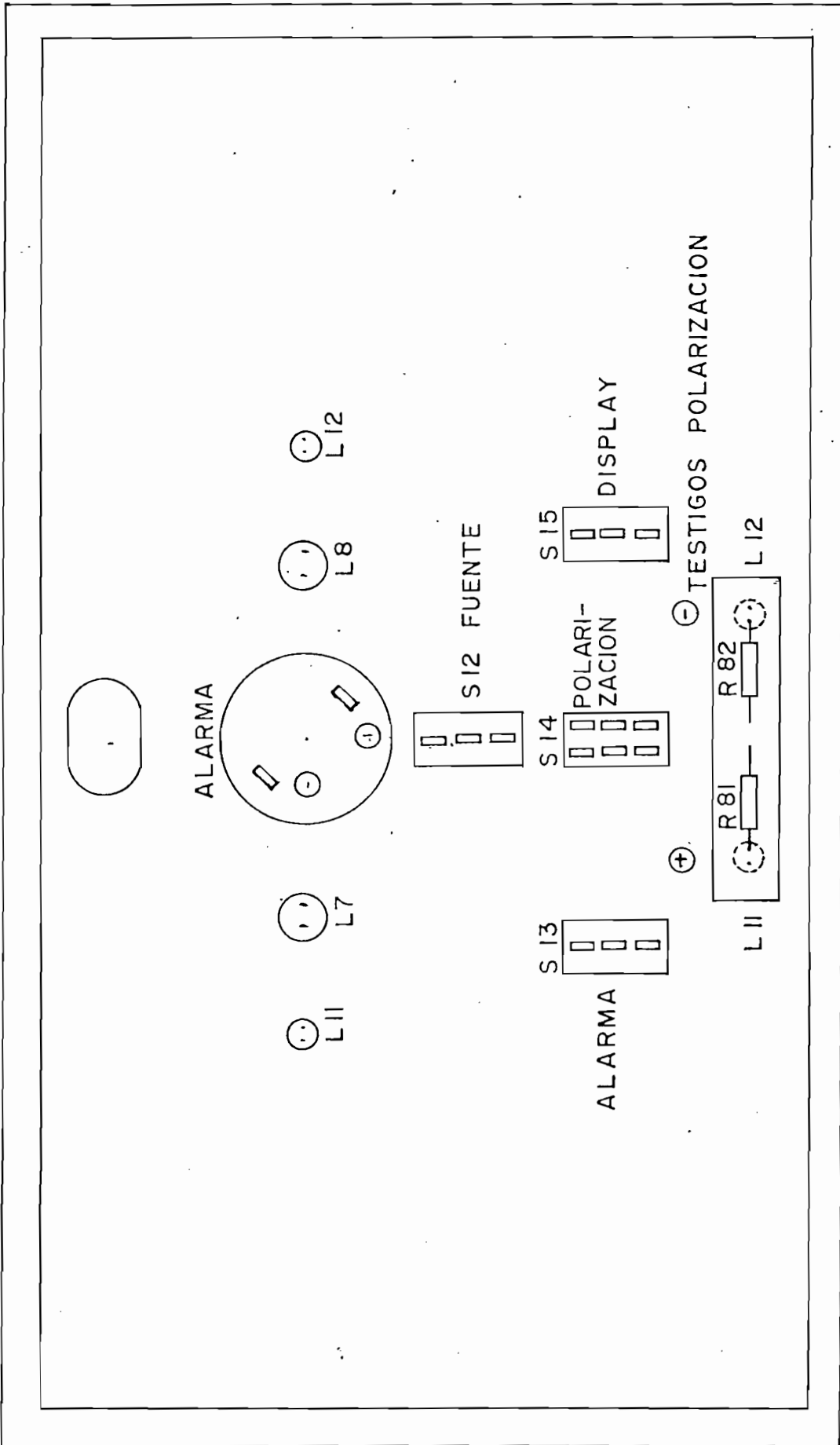


FIGURA 10.16

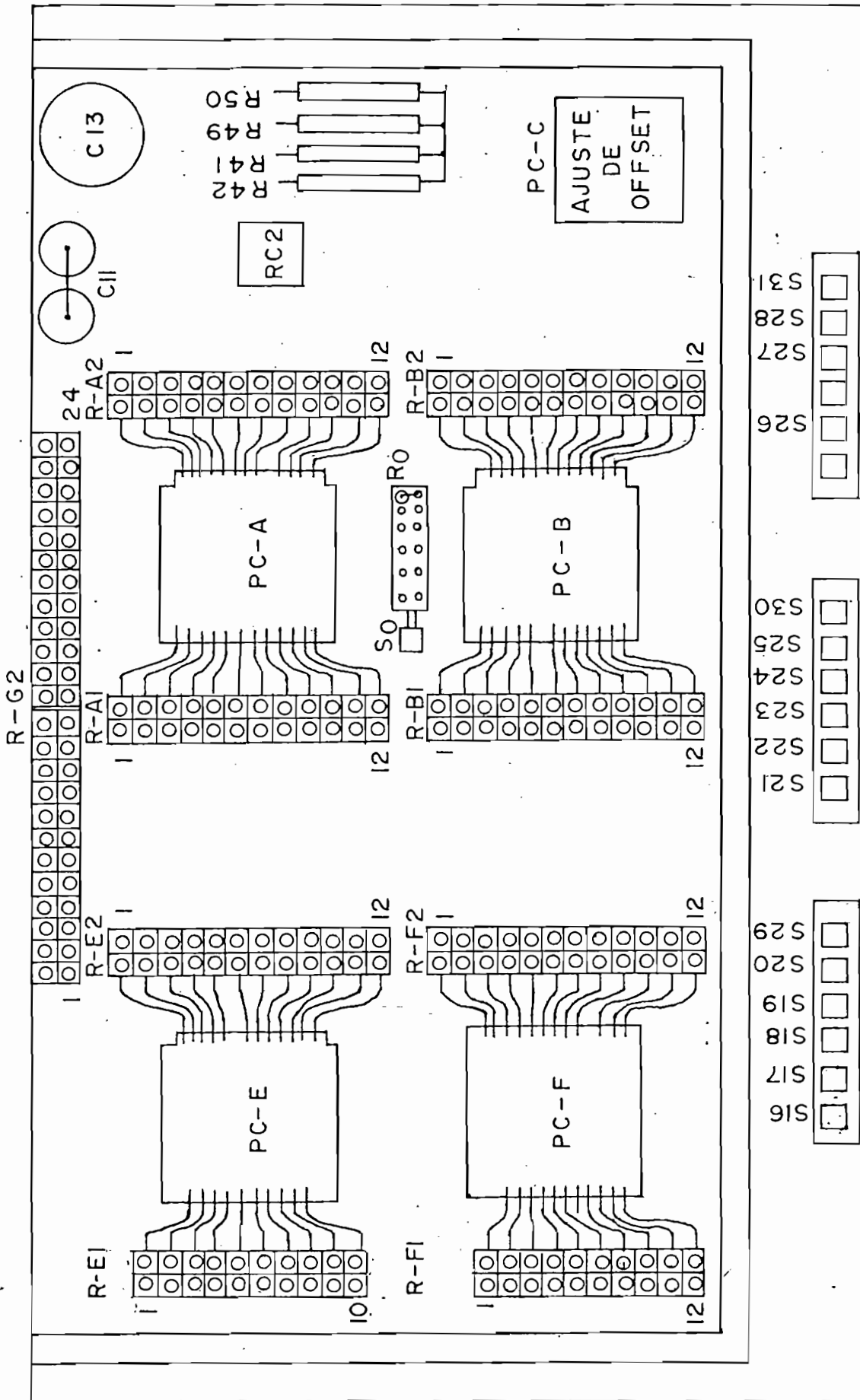


FIGURA 10.17

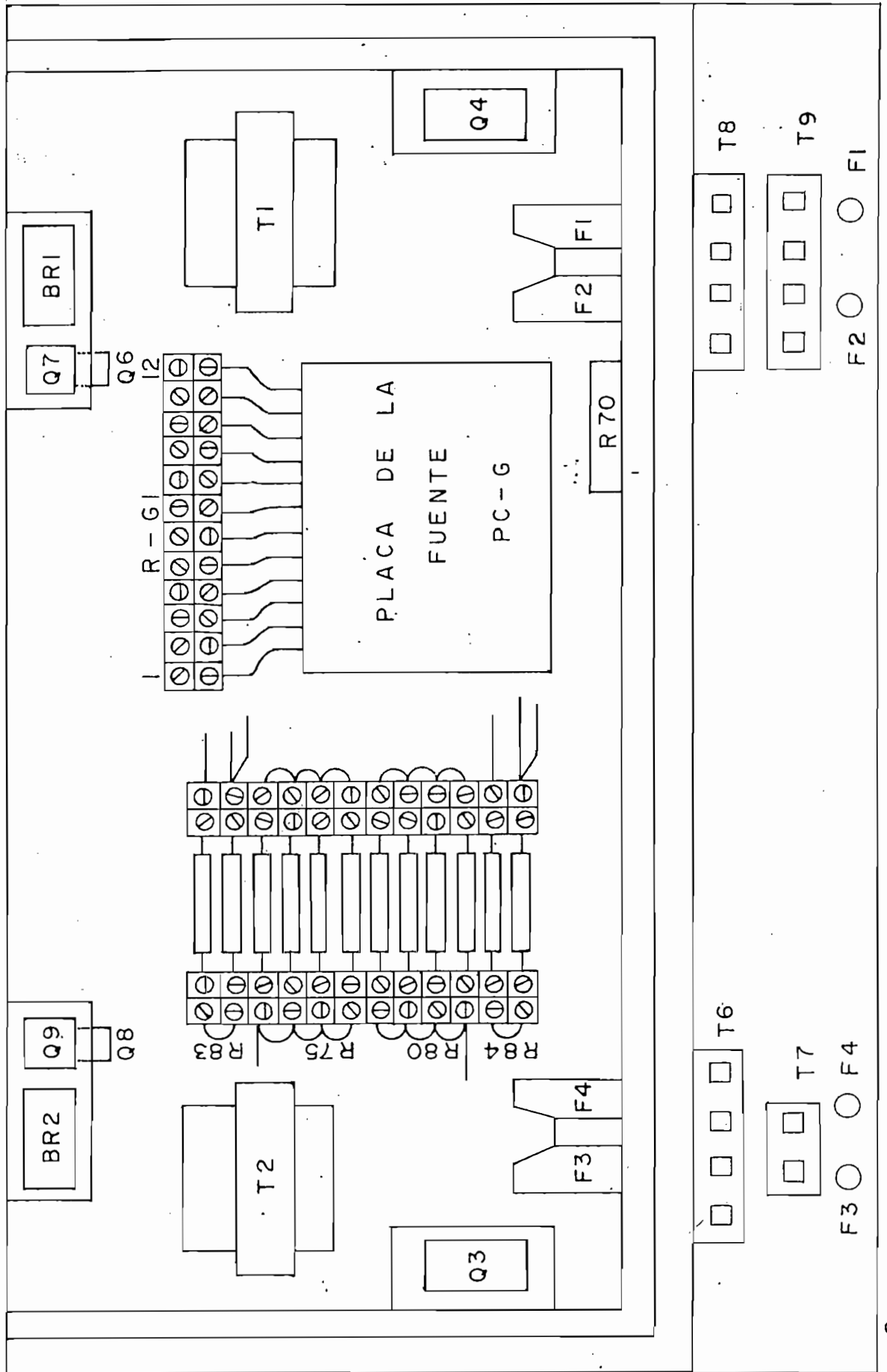


FIGURA 10.18

## CAPITULO XI

### PRUEBAS Y COMPARACION CON LA SIMULACION

#### XI.A.- INTRODUCCION

Una vez concluidos la construcción y montaje se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento. Primeramente se realizó la respectiva calibración del equipo como se describe en el apéndice D, y posteriormente se efectuaron las pruebas definitivas que fueron comparadas con la simulación (sección XI.C). El objetivo principal de estas pruebas es el de llegar a definir puntos de calibración de las ganancias del lazo de control que permitan tener buenas características de respuesta de velocidad del sistema en el tiempo.

#### XI.A.1.- PRUEBAS DE RESPUESTA EN TIEMPO DEL LAZO DE CONTROL

Los objetivos que se pretenden alcanzar son:

- 1.- Comprobar el correcto funcionamiento de los subsistemas que componen el lazo de control.
- 2.- Comprobar la efectividad en el ajuste del lazo de los diferentes parámetros regulables que se pueden manipular desde el tablero de control y que son:

- Ganancia proporcional  $K_p$
  - Ganancia integral  $K_i$
  - Ganancia diferencial  $K_d$
  - Presión y caudal de aceite del sistema oleomecánico
  - Voltaje de referencia
  - Voltaje del servomotor
  - Ganancia de la realimentación  $\sigma$
  - Realimentación del sistema oleomecánico ( $K_R$ )
- 3.- Observar la forma funcional de la respuesta del sistema de una manera práctica y compararla con la obtenida en la simulación.
- 4.- Determinación de los puntos de calibración óptimos, que permitan obtener tiempos satisfactorios de respuesta y buenas características de estabilidad en forma práctica.

Para lograr estos objetivos es necesario contar con los siguientes equipos e instalaciones.

#### A.- EQUIPOS PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES.

##### INSTRUMENTOS

Osciloscopio  
Lámpara estroboscópica

##### CARACTERISTICAS

Tektronix tipo 564B  
Tipo C-12 Stobotack  
1531

B.- EQUIPOS PARA SIMULACION.

Para la simulación es necesario el uso del siguiente equipo:

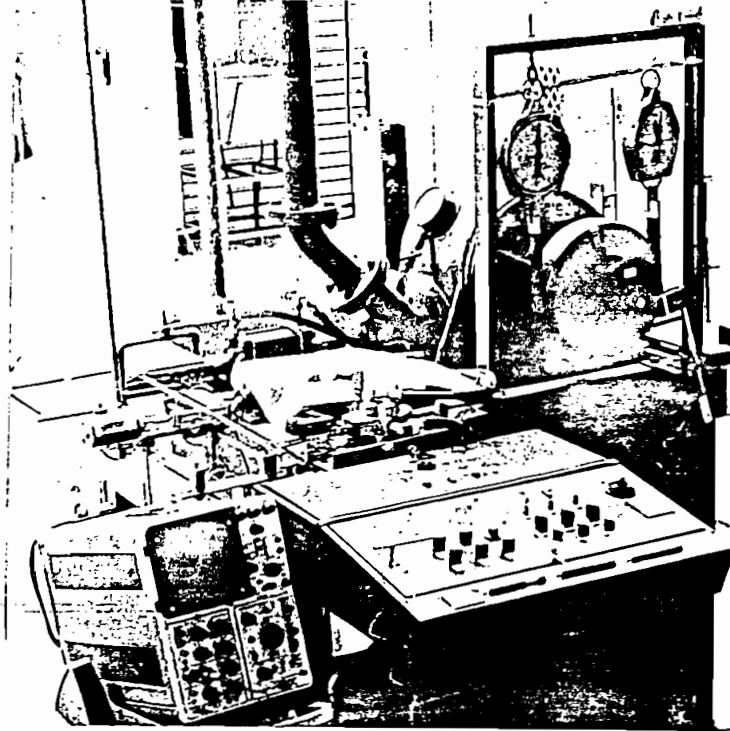
INSTRUMENTOS

Computadora digital  
Grafizador  
Impresora

CARACTERISTICAS

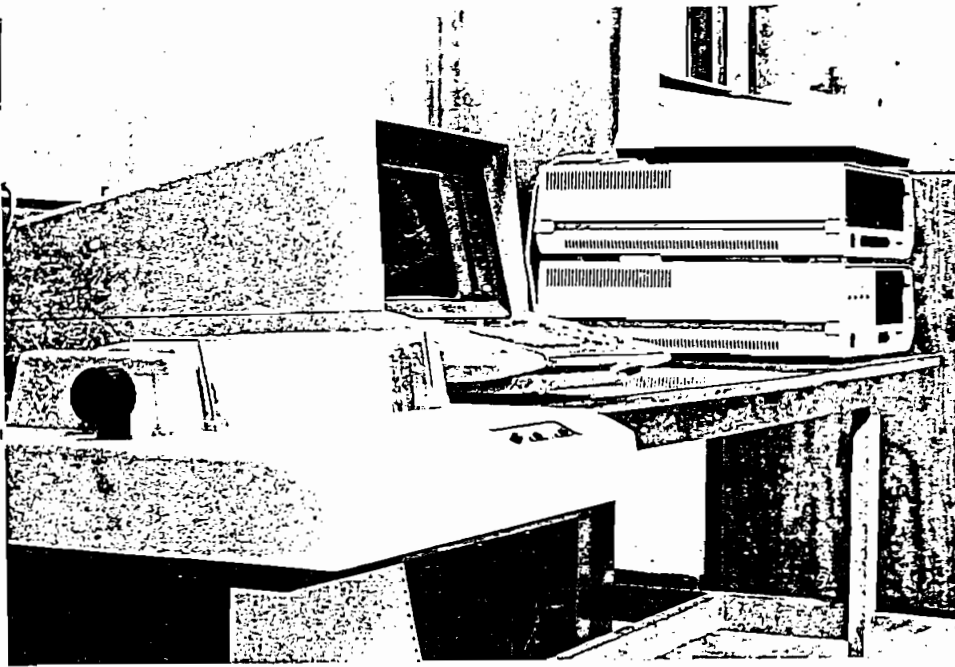
Tektronix 4051  
Tektronix 4662  
Tektronix 4641

VISTA DE LOS EQUIPOS REQUERIDOS



Fotografía 11.1

Vista general de instalaciones y equipos de laboratorio



Fotografía 11.2

Vista general del equipo de computación

#### XI.B. - CALIBRACION

Para llevar a cabo la calibración es necesario el observar algunas precauciones y seguir una secuencia en la puesta en marcha del equipo, procedimiento que se detalla en el apéndice D.

#### XI.C. - PRUEBAS

Ubicado el sistema en su punto nominal de funcionamiento, con todos los sistemas encendidos y calibrados como se indica en el apéndice D, se pasa el sistema a la modali-

dad de automático; mediante el freno de Prony se dan perturbaciones del tipo escalón, fotografiándose los resultados obtenidos, se anotan todos los parámetros para los cuales fue efectuada la prueba y se llena el cuadro de valores dado para cada prueba. En base a estos valores se realiza la simulación correspondiente.

#### XI.C.1.- PRESENTACION DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS Y LA SIMULACION CORRESPONDIENTE.

Los resultados de las pruebas realizadas se presentan en las siguientes fotografías, junto a la simulación correspondiente. En cuadros individuales se detallan los valores dados a cada parámetro, también se indican: tiempo de respuesta y sobretiro de velocidad máximo obtenidos.

#### NOTA. -

Escalas utilizadas para las fotografías y la simulación.

EJE	X	Y
Fotos	5 s/div	0.2 vol/div (30 RPM)
Simulación	5 s/div	5% (30 RPM)





## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 1

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	---	---
Velocidad Mínima	555 RPM	555 RPM
Torque Nominal	1.88 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	25%	0.25 p. u.
Carga / Descarga	C	C
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	2	2
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	1.6	1.6
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo ( $K$ )	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	6	6
Ganancia $K_i$	0	0
Ganancia $K_d$	0	0
Tiempo de Estabilidad	7	7
Error E.E.	-2.5%	-2.5%

PRUEBA # 2

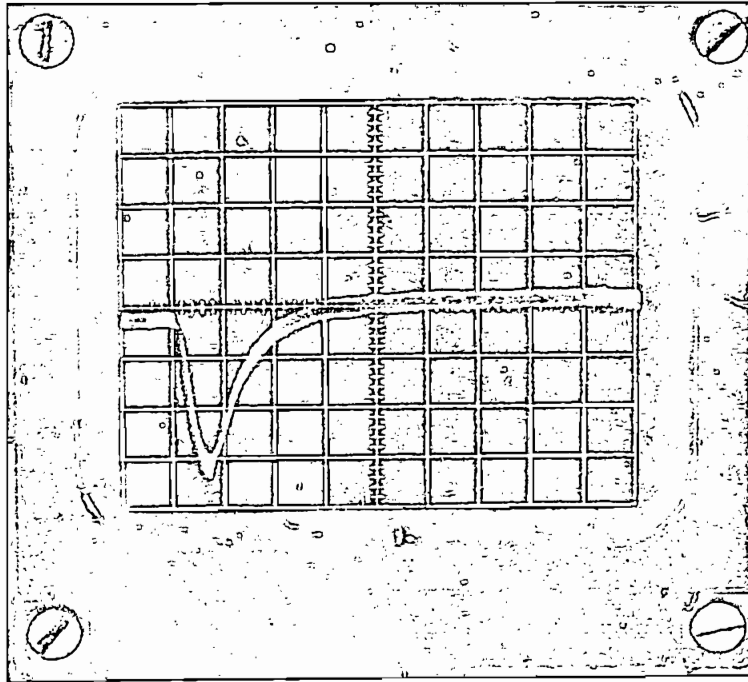
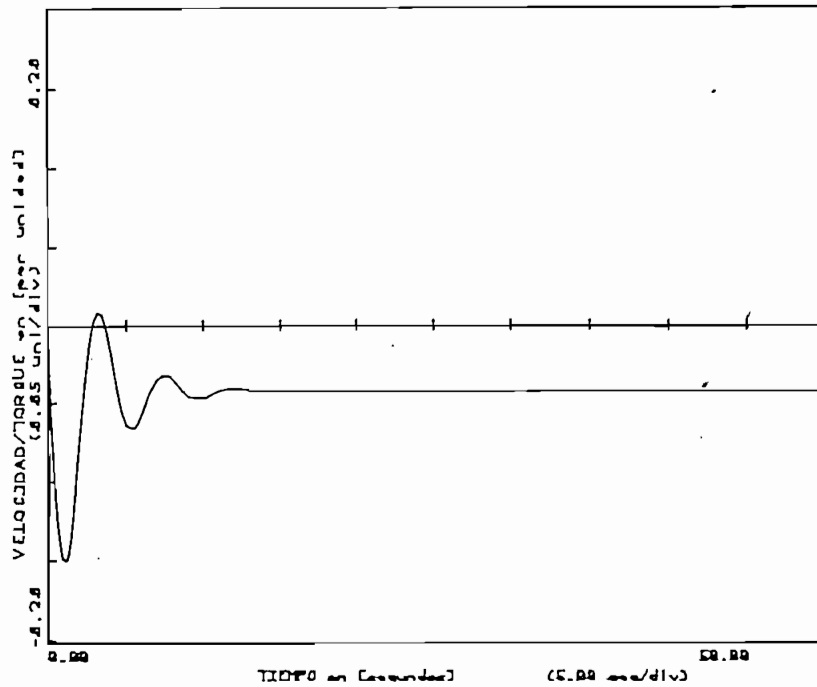


FOTO # 11.2

Fig. 2 TORQUE DE CARGA. CQX PARAMETROS:  $K_p=6$ ,  $K_1=0$  y  $K_2=0$



RESPUESTA SIMULADA # 11.2

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 2

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	---	---
Velocidad Mínima	510 RPM	510 RPM
Torque Nominal	1.63 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	50%	0.5 p. u.
Carga / Descarga	C	C
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	2	2
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	1.6	1.6
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo ( $K$ )	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	6	6
Ganancia $K_i$	0	0
Ganancia $K_d$	0	0
Tiempo de Estabilidad	10	8
Error E. E.	0.8%	-4%

PRUEBA # 3

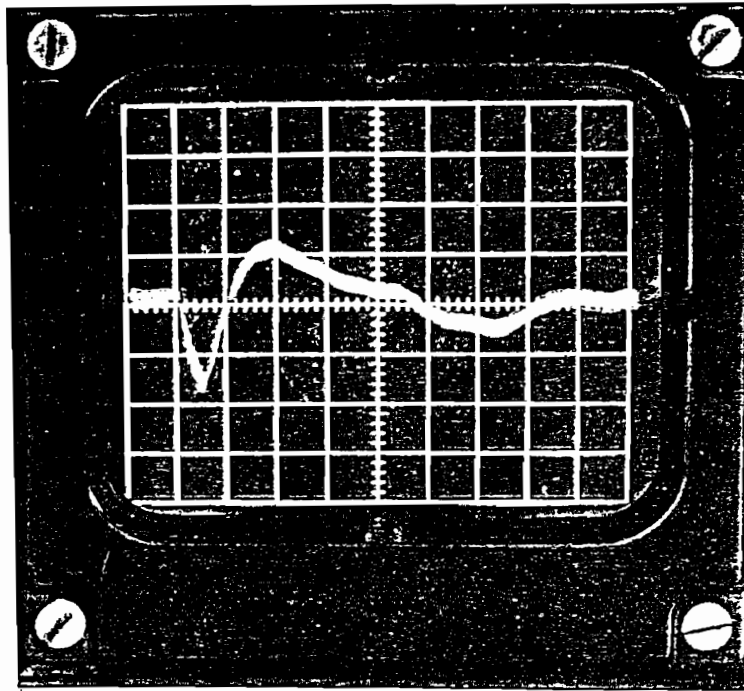
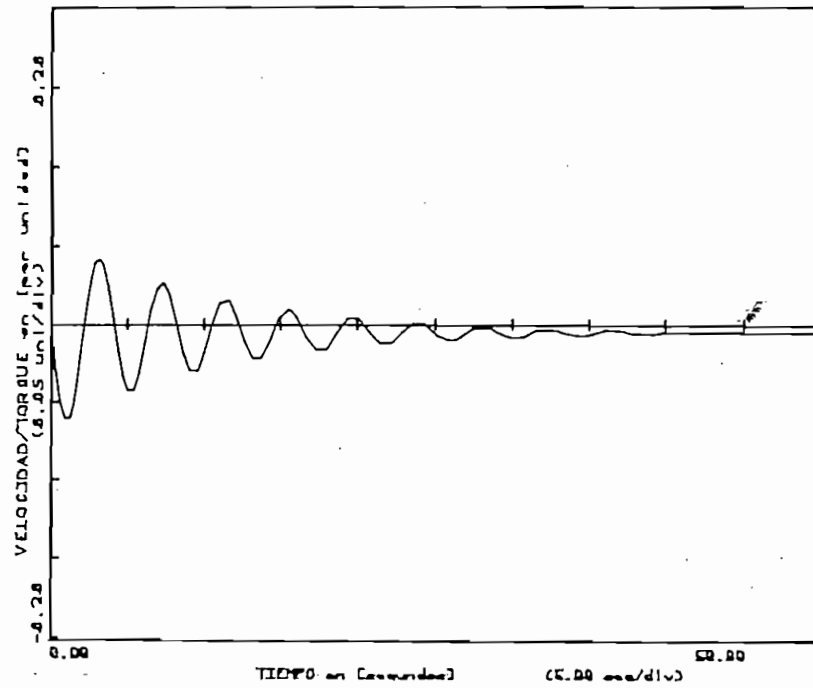


FOTO # 11.3

Fig. 11.3 TORQUE DE CARGA. 36L PARANETROS:  $K_p=12$ ,  $K_i=6$  y  $K_d=8$



RESPUESTA SIMULADA # 11.3

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 3

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	640 RPM	620 RPM
Velocidad Mínima	530 RPM	560 RPM
Torque Nominal	1.38 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	38%	0.38 p. u.
Carga / Descarga	C	C
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	2	2
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	1.6	1.6
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo ( $K$ )	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	12	12
Ganancia $K_i$	5	5
Ganancia $K_d$	0	0
Tiempo de Estabilidad	35	35
Error E. E.	0.4%	-0.3%

PRUEBA # 4

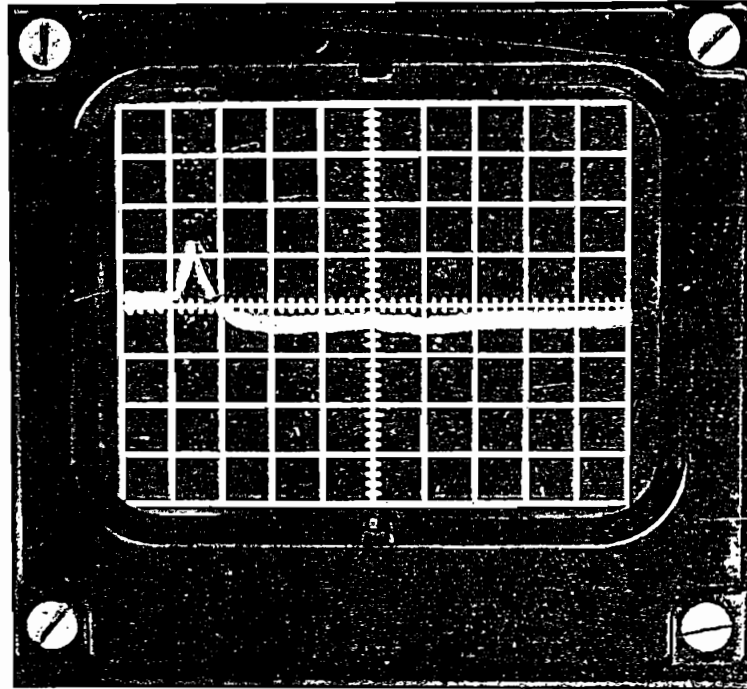
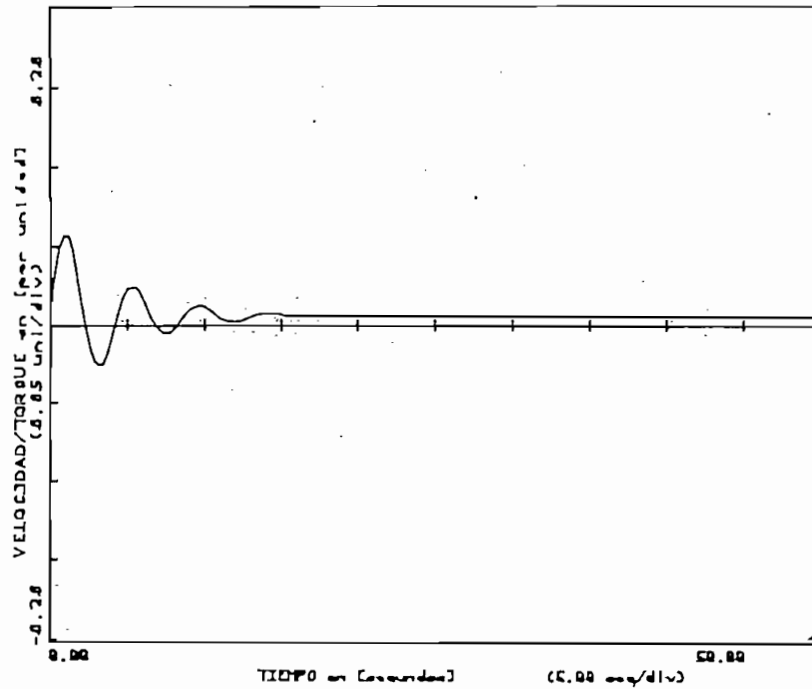


FOTO # 11.4

Fig. 4 TORQUE DE DESCARGA. 43X PARAMETROS:  $K_p=12$ ,  $K_I=5$  y  $K_D=0$



RESPUESTA SIMULADA # 11.4

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 4

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	640 RPM	640 RPM
Velocidad Mínima	585 RPM	585 RPM
Torque Nominal	1.9 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	43%	0.43 p. u.
Carga / Descarga	D	D
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	2	2
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	1.6	1.6
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo ( $K$ )	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	8	8
Ganancia $K_i$	8	8
Ganancia $K_d$	0	0
Tiempo de Estabilidad	7	10
Error E.E.	-3%	-0.5%



PRUEBA # 5

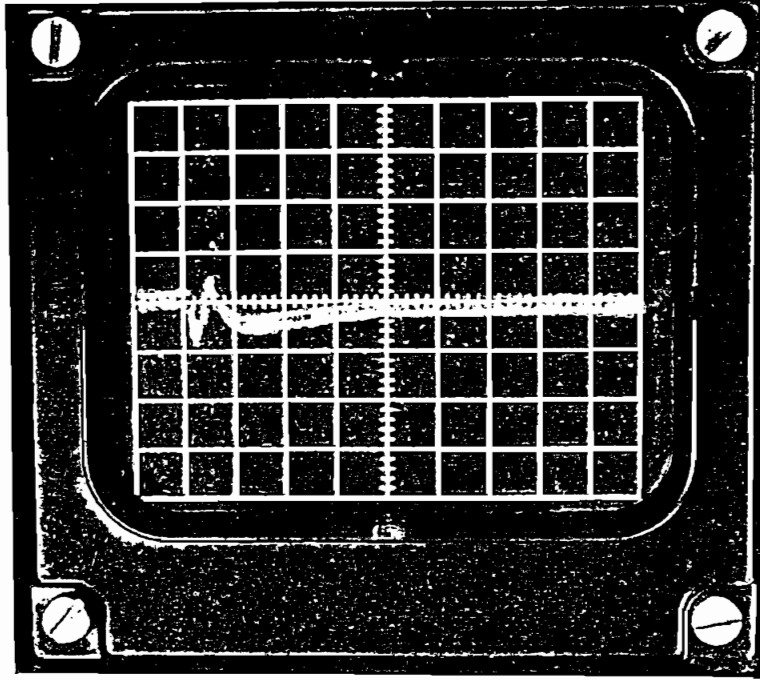
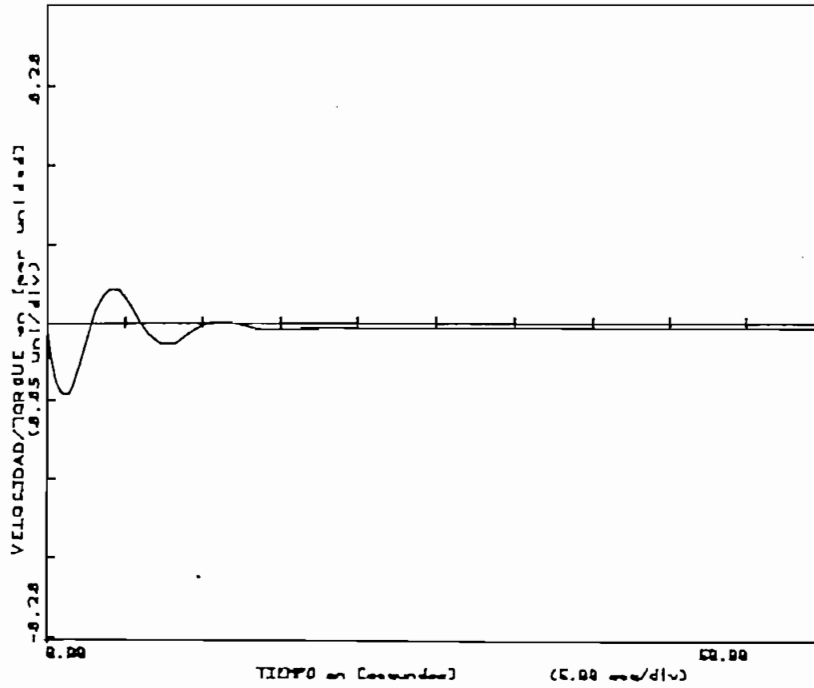


FOTO # 11.5

Fig. 4.5 TORQUE DE CARGA. EQX PARAMETROS:  $K_p=10$ ,  $K_i=10$  y  $K_d=6$



RESPUESTA SIMULADA # 11.5

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 5

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	610 RPM	610 RPM
Velocidad Mínima	585 RPM	575 RPM
Torque Nominal	0.5 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	50%	0.5 p. u.
Carga / Descarga	C	C
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	2	2
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	1.6	1.6
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo ( $K$ )	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	10	10
Ganancia $K_i$	10	10
Ganancia $K_d$	8	8
Tiempo de Estabilidad	10	12
Error E.E.	-0.3%	-0.3%

PRUEBA # 6

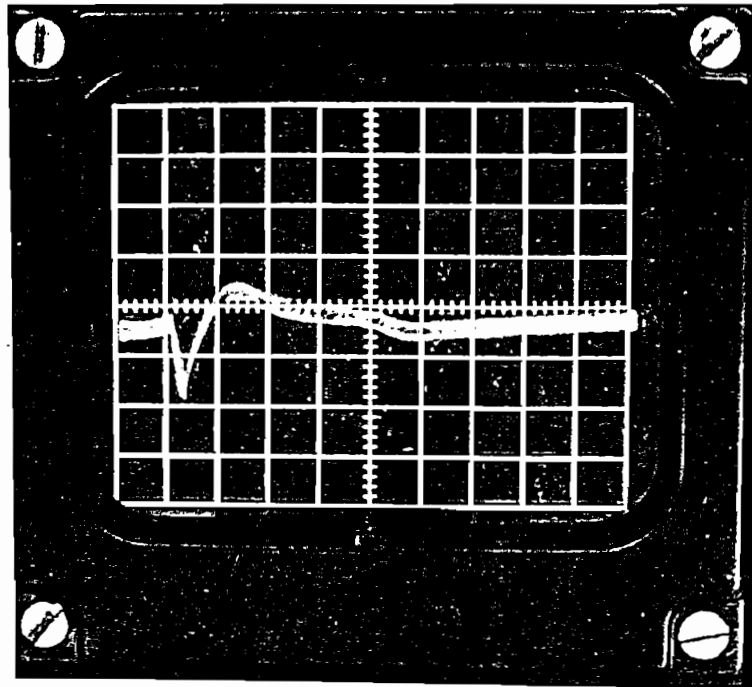
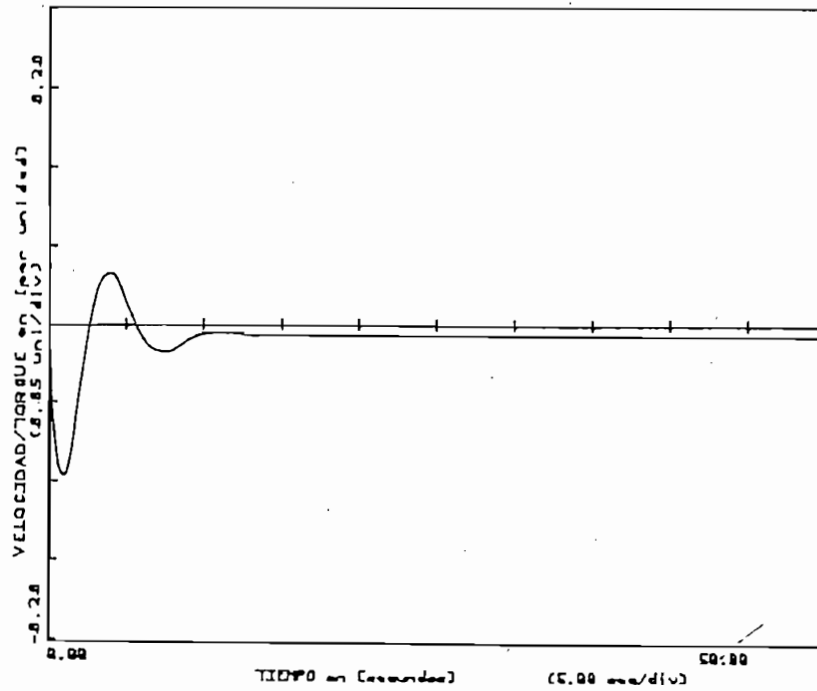


FOTO # 11.6

Fig. 6 TORQUE DE CARGA: 100X PARAMETROS:  $K_p=10$ ,  $K_I=10$  y  $K_D=6$



RESPUESTA SIMULADA # 11.6

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 6

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	610 RPM	620 RPM
Velocidad Mínima	550 RPM	545 RPM
Torque Nominal	0.5 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	100%	1 p. u.
Carga / Descarga	C	C
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	2	2
Realimentación (K <sub>R</sub> )	2	2
Constante C <sub>3</sub>	1.6	1.6
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo (K)	1/3	1 p. u.
Ganancia K <sub>p</sub>	10	10
Ganancia K <sub>i</sub>	10	10
Ganancia K <sub>d</sub>	8	8
Tiempo de Estabilidad	25	10
Error E.E.	-1%	-0.5%

PRUEBA # 7

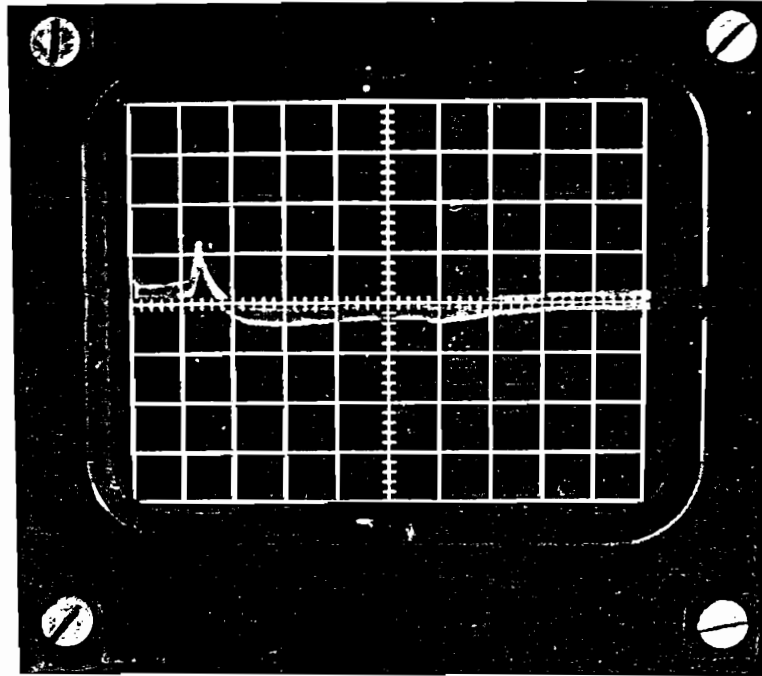
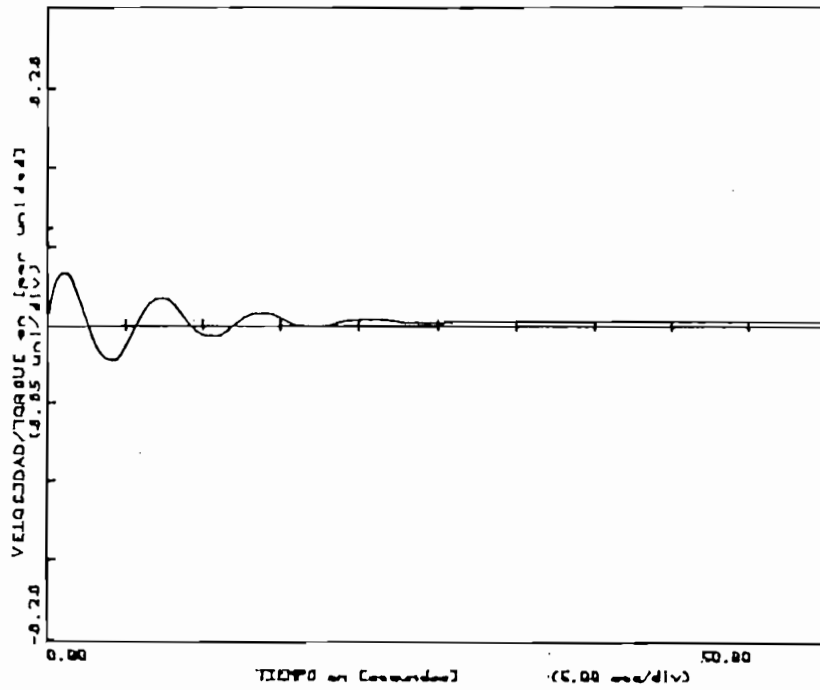


FOTO # 11.7

FIG. 11.7 TORQUE DE DESCARGA - 30X PARAMETROS:  $K_p=7$ ,  $K_i=7$  Y  $K_d=6.7$



RESPUESTA SIMULADA # 11.7

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 7

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	630 RPM	620 RPM
Velocidad Mínima	585 RPM	585 RPM
Torque Nominal	1.88 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	30%	0.3 p. u.
Carga / Descarga	D	D
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	2	2
Realimentación (K <sub>R</sub> )	2	2
Constante C <sub>3</sub>	1.6	1.6
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo (K)	1/3	1 p. u.
Ganancia K <sub>p</sub>	7	7
Ganancia K <sub>i</sub>	7	7
Ganancia K <sub>d</sub>	6.7	6.7
Tiempo de Estabilidad	5	15
Error E. E.	-1.6%	-0.5%

PRUEBA # 8

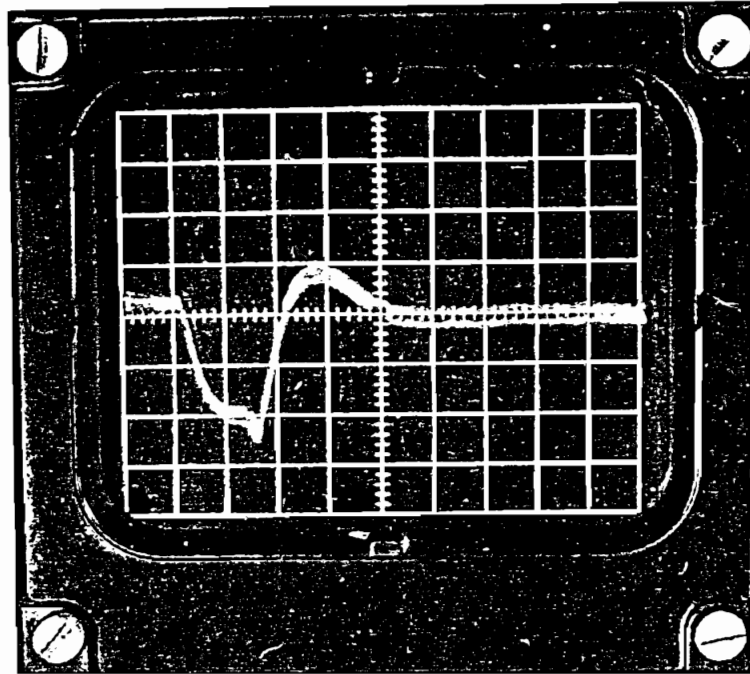
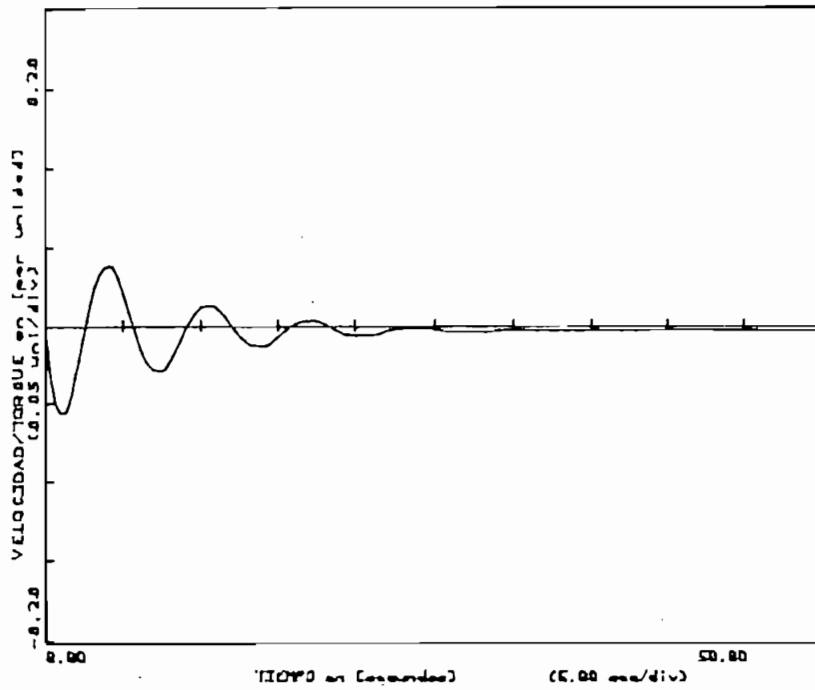


FOTO # 11.8

Fig. # 8 TORQUE DE CARGA COX PARAMETROS:  $K_p=7$ ,  $K_i=7$  y  $K_d=6.7$



RESPUESTA SIMULADA # 11.8

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 8

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	625 RPM	625 RPM
Velocidad Mínima	540 RPM	560 RPM
Torque Nominal	1.25 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	50%	0.5 p. u.
Carga / Descarga	C	C
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	2	2
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	1.6	1.6
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo (K)	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	7	7
Ganancia $K_i$	7	7
Ganancia $K_d$	6.7	6.7
Tiempo de Estabilidad	20	25
Error E. E.	-0.5%	±0.5%



PRUEBA # 9

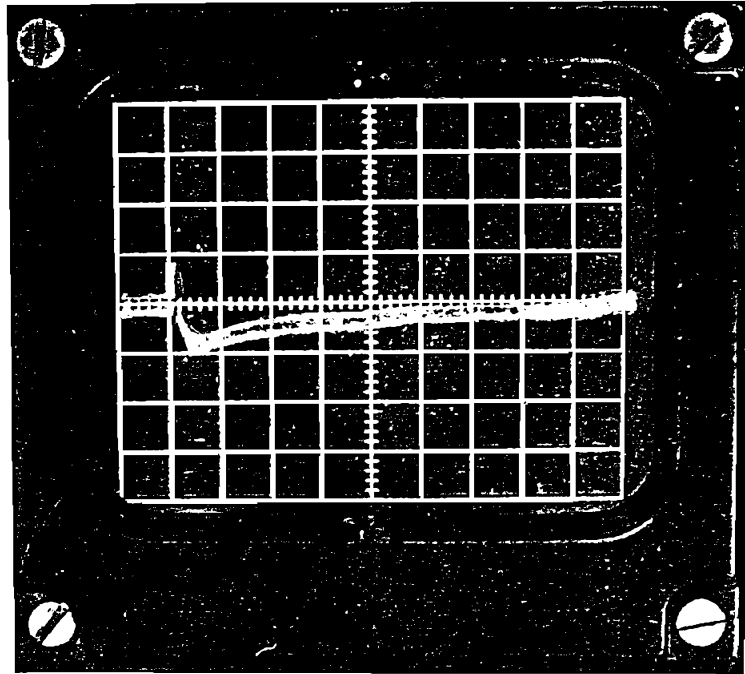
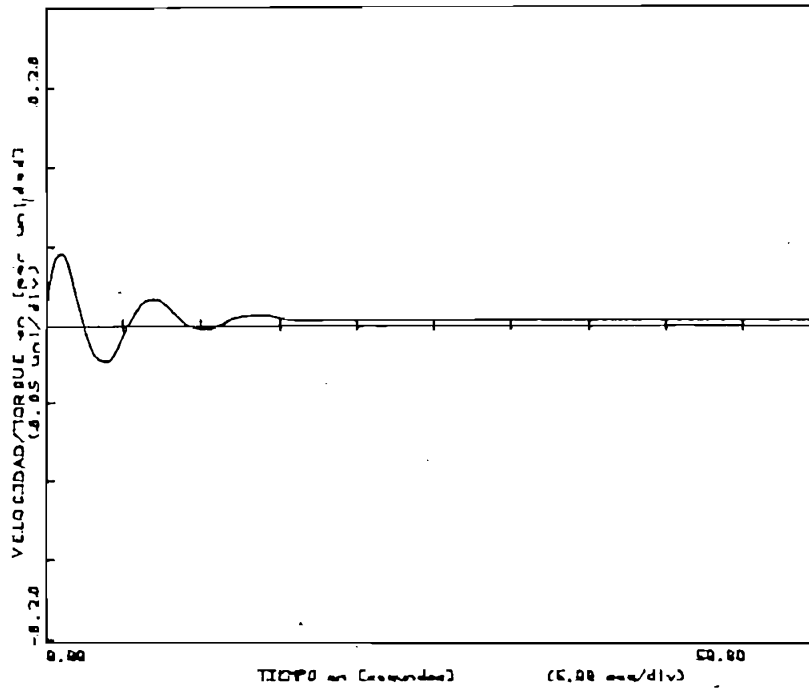


FOTO # 11.9

Fig. # 9 TORQUE DE DESCARGA, EDY PARAMETROS:  $K_p=7$ ,  $K_I=7$  y  $K_d=6.7$



RESPUESTA SIMULADA # 11.9

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 9

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	620 RPM	625 RPM
Velocidad Mínima	580 RPM	575 RPM
Torque Nominal	1.75 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	50%	0.5 p. u.
Carga / Descarga	D	D
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	6	6
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	1.2	1.2
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo ( $K$ )	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	7	7
Ganancia $K_i$	7	7
Ganancia $K_d$	6.7	6.7
Tiempo de Estabilidad	20	15
Error E.E.	0.0%	0.5%

PRUEBA # 10

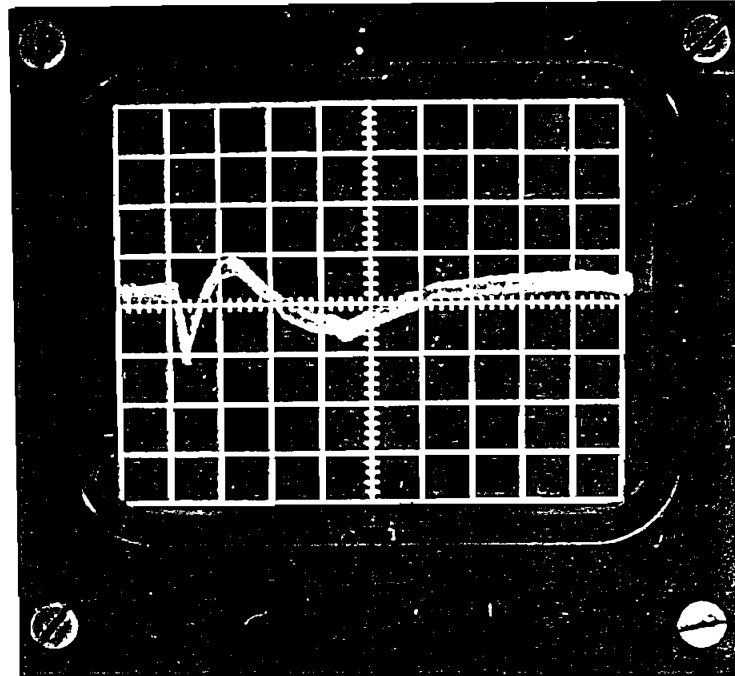
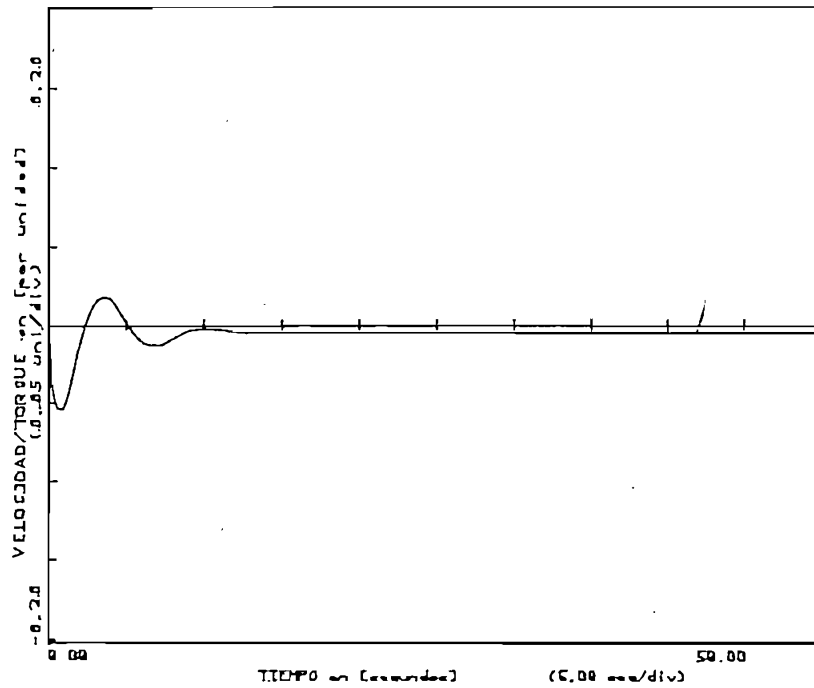


FOTO # 11.10

Fig. 10 TORQUE DE CARGA. COX PARANETROS:  $K_p=7$ ,  $K_i=7$  y  $K_d=6.7$



RESPUESTA SIMULADA # 11.10

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 10

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	610 RPM	610 RPM
Velocidad Mínima	580 RPM	570 RPM
Torque Nominal	1.28 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	80%	0.8 p. u.
Carga / Descarga	C	C
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	10	10
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	0.8	0.8
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo ( $K$ )	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	7	7
Ganancia $K_i$	7	7
Ganancia $K_d$	6.7	6.7
Tiempo de Estabilidad	20	10
Error E. E.	1.6%	-0.5%

PRUEBA # 11

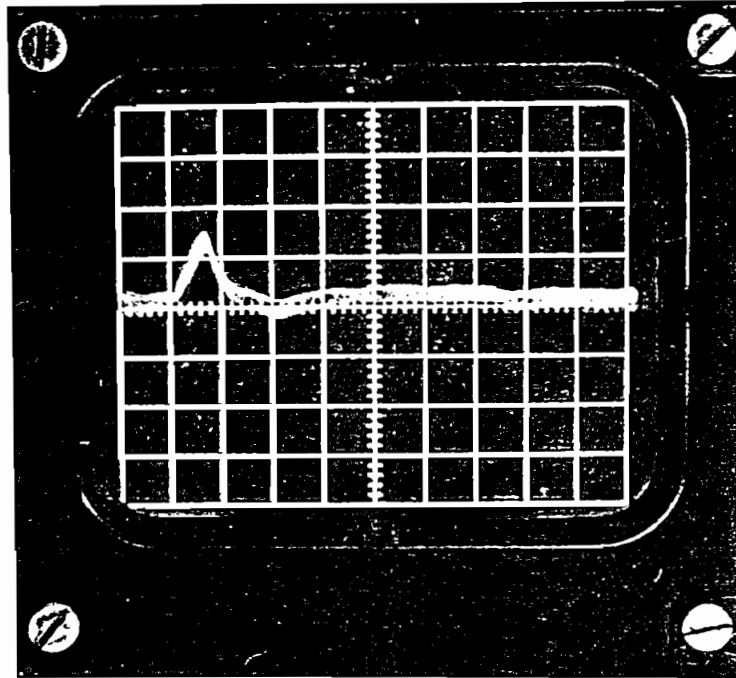
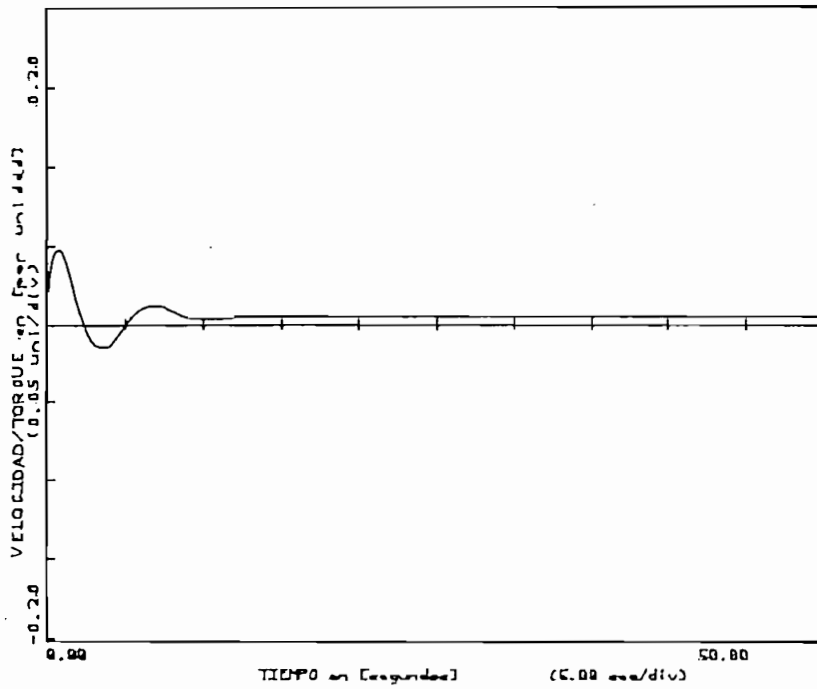


FOTO # 11.11

Fig. # 11 TORQUE DE DESCARGA - 70X PARAMETROS:  $K_p=7$ ,  $K_I=7$  Y  $K_D=5.7$



RESPUESTA SIMULADA # 11.11

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 11

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	640 RPM	630 RPM
Velocidad Mínima	595 RPM	590 RPM
Torque Nominal	2.01 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	70%	0.7 p. u.
Carga / Descarga	D	D
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	10	10
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	0.8	0.8
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo (K)	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	7	7
Ganancia $K_i$	7	7
Ganancia $K_d$	6.7	6.7
Tiempo de Estabilidad	10	10
Error E. E.	0.8%	0.5%

PRUEBA # 12

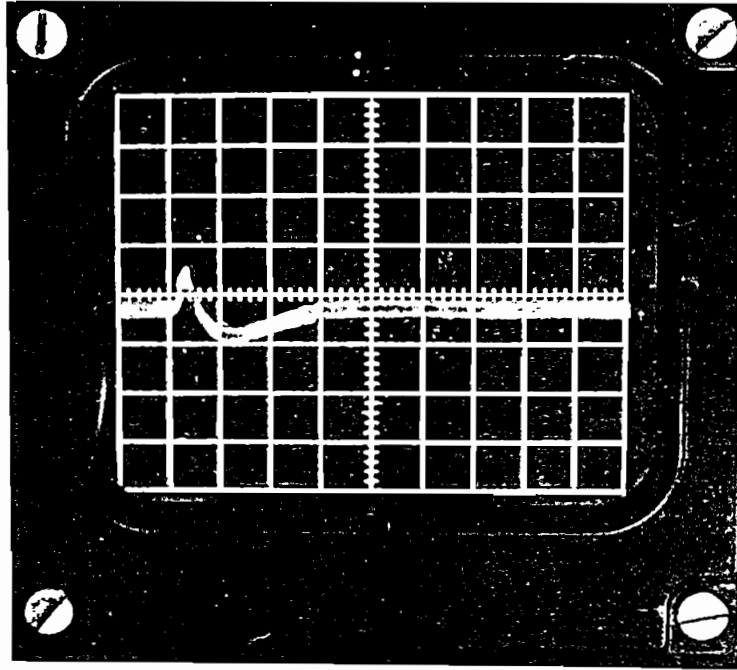
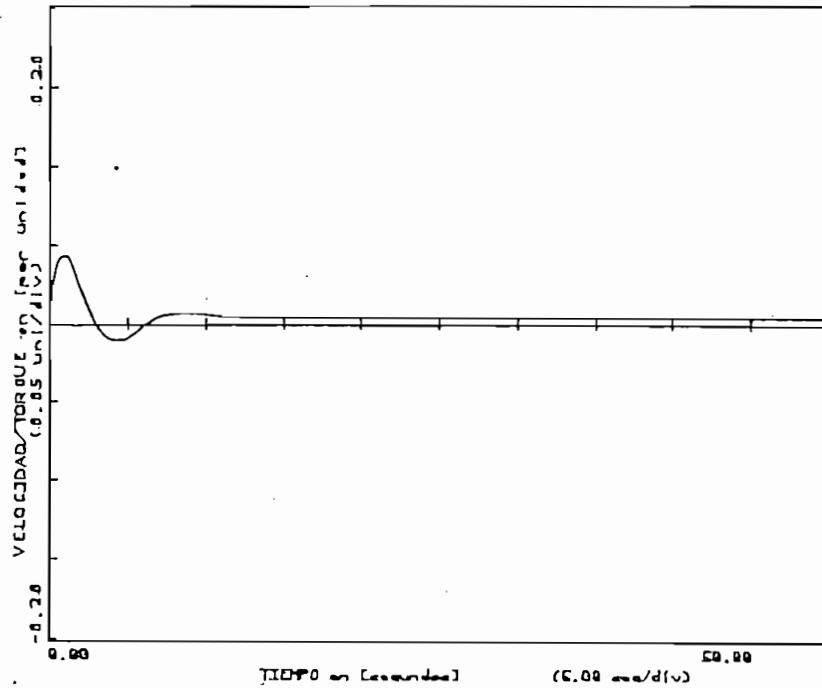


FOTO # 11.12

Fig. # 12 TORQUE DE DESCARGA. EOX PARAMETROS:  $K_p=10$ ,  $K_i=10$  y  $K_d=10$



RESPUESTA SIMULADA # 11.12

## CUADRO DE VALORES PARA LA PRUEBA # 12

PARAMETRO	VALOR PRACTICO	VALOR TEORICO
Velocidad Nominal	600 RPM	600 RPM
Velocidad Máxima	620 RPM	620 RPM
Velocidad Mínima	580 RPM	590 RPM
Torque Nominal	2.01 lb-pie	1 p. u.
Porcentaje de Torque	50%	0.5 p. u.
Carga / Descarga	D	D
Posición de la válvula de Caudal de Aceite	2	2
Realimentación ( $K_R$ )	2	2
Constante $C_3$	1.6	1.6
Ganancia Sigma	2/3	1 p. u.
Ganancia de Error	max.	1 p. u.
Veloc. Resp. Servo	max.	1 p. u.
Realim. Servo ( $K$ )	1/3	1 p. u.
Ganancia $K_p$	10	10
Ganancia $K_i$	10	10
Ganancia $K_d$	10	10
Tiempo de Estabilidad	15	10
Error E.E.	0.0%	0.5%



## CAPITULO XII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### XII.A. - CONCLUSIONES

1.- El modelo matemático de la turbina, sin aproximaciones, puede ser utilizado tanto para simulación cuanto para diseño; en tanto que, al despreciar el factor  $G$  en este modelo da como resultado una función de transferencia utilizable exclusivamente para análisis por simulación.

2.- El modelo desarrollado para describir el funcionamiento de una mini central de generación es totalmente diferente al modelo matemático de la turbina del laboratorio; por lo cual, este modelo debe ser usado estrictamente cuando pueda considerarse  $T_w=0$ . El caso fue tratado en la sección III.B.1.4, y es el que se usará debido a que sobre este sistema se realiza la construcción del regulador.

3.- El valor de la constante  $a_{23}$  es de fundamental importancia en la respuesta de la turbina. El valor  $a_{23}$  indicará qué tan sensible es la respuesta de la turbina ante variaciones de la posición del inyector, lo cual ha sido debidamente comprobado con la simulación de la sección III.B.

4.- En mini y micro generación, los valores que tome  $T_m$ , deben estar dentro del rango de 6 a 12 segundos, para que la turbina no sea ni sensible ni lenta a las perturbaciones y a las acciones de control.

5.- En el presente trabajo no se ha realizado un profundo estudio del efecto de la variación de los diferentes  $a_{ij}$ , sobre la respuesta de la turbina, sino el suficiente para entender el funcionamiento de los circuitos hidráulicos de mini o micro generación y comprobar de esta manera la teoría que existe respecto de este tópico.

6.- Los sistemas oleo-mecánicos para posicionar el o los inyectores, en centrales de generación proporcionan gran comodidad de instalación y calibración.

7.- En el equipo de laboratorio, la fuerza necesaria para mover el inyector es prácticamente nula debido a las dimensiones reducidas del circuito hidráulico, esto modifica la ecuación que describe el sistema oleo-mecánico (sec. IV.C).

8.- De los análisis desarrollados, se puede concluir que una amplia variación de los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , de las realimentaciones del lazo (en el tablero de control), así como de  $C_3$ , y de  $K_R$ , (en el sistema oleo-mecánico) son de fundamental importancia dado el carácter demostrativo que hace que el regulador sea un banco de pruebas para regula-

ción de velocidades, con el fin de poder realizar una investigación de los valores óptimos en los parámetros de control que se apliquen a una determinada turbina.

9.- En vista del gran número de funciones de transferencia de las que se requerían analizar su respuesta en el tiempo se implementó el programa presentado en el apéndice A, el mismo que permite el ágil manejo de estos datos y en forma organizada.

10.- El tipo de amplificador utilizado es el más comercialmente empleado y útil para propósitos generales. Su empleo en esta diseño radica, además, en la facilidad de su adquisición, por su bajo costo y porque su comportamiento en las diferentes pruebas resultó aceptable debido a sus características de compensación interna.

11.- El sistema de visualización del valor de los potenciómetros en el control, es un circuito acoplado para facilitar la medición inmediata de estos valores y agilizar la realización de las diferentes pruebas en el menor tiempo, para un mejor aprovechamiento de los resultados.

12.- El servomotor eléctrico auxiliar necesariamente requiere de una realimentación de posición dado su carácter integrador.

13.- El fototacómetro resultó ser el más adecuado método de detección de la velocidad, dadas las excelentes características de su circuito principal, además que requiere de un número mínimo de componentes.

14.- Las acciones proporcional, integral, y derivativa han sido seleccionadas para la construcción del gobernador, por el adecuado control que ejercen en el lazo. Esto se puede comprobar en las respuestas experimentales obtenidas en la sección XI.

15.- En el equipo construido se pueden variar el valor de los parámetros:  $K_p$  desde 0 hasta 60,  $K_i$  desde 0.1 hasta 50, y  $K_d$  desde 1 hasta 50; ajustables mediante potenciómetros y habilitados por los selectores correspondientes.

16.- Se han implementado tres modalidades de sigma que pueden conducir a un lazo estable, y debido al carácter demostrativo del equipo, el sistema permite operar con cualquiera de las modalidades de sigma.

17.- En vista de que el equipo no está sujeto a fuerzas elevadas pues solamente es un transmisor de señales de posición, no es necesario efectuar análisis de esfuerzos en el diseño de los elementos mecánicos que conforman el lazo de control.

18.- En la comparación de los resultados entre la simulación y la prueba experimental (capítulo XI) puede notarse que las respuestas son aproximadamente iguales. La diferencia existente se debe fundamentalmente a tiempos de retardo y zonas muertas producidas por juegos en el acoplamiento entre los elementos mecánicos; y, por mínimas señales requeridas para la reacción del servo motor eléctrico, además de las zonas muertas introducidas en el circuito electrónico para acoplamiento de los sistemas. La señal de perturbación obtenida con el freno Prony no es un escalón puro, tal como se lo considera en la simulación, lo cual influye en la diferencia señalada. Así mismo, las aproximaciones efectuadas en el modelo matemático contribuyen a que estos resultados no sean exactamente iguales.

#### XII.B.- RECOMENDACIONES

1.- Es importante realizar un mayor estudio sobre la influencia de los diferentes parámetros  $a_{ij}$ , en la respuesta de la turbina, para ejecutar correctos diseños de sistemas de control. Dicho estudio se lo debe realizar en base a la función de transferencia de la turbina y del programa desarrollado para este efecto.

2.- Cuando se realicen pruebas experimentales en el regulador es necesario proceder a una verificación de conexiones

y el ajuste correspondiente de las desviaciones offset de cada amplificador operacional de acuerdo al apéndice D.

3.- Las mejores características de respuesta se tiene, cuando el sistema trabaja con realimentación transiente sigma interior, por lo que se recomienda su utilización.

4.- Este trabajo no ha pretendido ser sino el primer acercamiento a la teoría de regulación de turbinas, con la comprobación experimental respectiva, que avalice el trabajo, y permita ser la base para futuras investigaciones.

5.- La utilización de este equipo, y del programa para simulación, por parte de estudiantes en las prácticas de laboratorio de control, dirigidas con el propósito de investigación, pueden proporcionar un aporte significativo sobre los conceptos y aplicación de la teoría de control.

6.- La realización de tesis conjuntas como la actual entre las Facultades de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica, ha permitido una mejor comprensión de los procesos multidisciplinarios que intervienen en las tecnologías modernas, razón por la cual se debería dar énfasis en este tipo de trabajos conjuntos, de los cuales éste es un ejemplo.

## APENDICE A

### PROGRAMA RESPUESTA DE UN SISTEMA LINEAL

Una propiedad común a todas las leyes básicas de la física es que ciertas cantidades fundamentales se pueden definir por medio de valores numéricos. Las leyes físicas definen relaciones entre estas cantidades fundamentales y generalmente se representan por medio de ecuaciones.

Una clase de ecuaciones que tiene amplia aplicación en la descripción de las leyes físicas es la de las ecuaciones diferenciales, que involucran ya sea diferenciales o derivadas; y, son útiles para relacionar las tasas de cambio de variables y otros parámetros.

Los sistemas dinámicos, que comprenden los sistemas de control automático, se representan matemáticamente mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales simultáneas; que, con la introducción de la transformación de Laplace, se reduce el problema a la solución de un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales. Puesto que los sistemas de control se ocupan del control de variables específicas, se requiere conocer la interrelación de las variables controladas con las de control. Esta relación se representa típicamente mediante la función de transferencia del subsistema que relaciona las variables de entrada y salida.

Cuando se dispone de un modelo para un componente o sistema, puede utilizarse una computadora para investigar el comportamiento del sistema. Una simulación de computadora emplea este modelo (en una forma matemática adecuada para demostrar el funcionamiento del sistema) y las condiciones reales que se modela, así como también instrucciones reales de entrada a las cuales estará sujeto el sistema.

Un sistema puede simularse usando computadoras digitales o analógicas. En sí, el objetivo es obtener el gráfico de  $y$  en función de  $t$ , a partir del conocimiento de  $Y$  en función del operador  $s$  ( $s = d/dt$ ); siendo  $Y(s)$  una relación de dos polinomios en  $s$  y multiplicada por la entrada escalón  $X(s)$ .

La simulación para computadora digital puede desarrollarse en un lenguaje para computadoras, tal como FORTRAN, BASIC, o en un lenguaje desarrollado específicamente para la simulación.

#### A.1.- METODO EN COMPUTADOR DIGITAL

1. Separar  $Y(s)$  en fracciones parciales.
2. Formular  $y(t)$
3. Graficar  $y(t)$

##### 1. SEPARAR $Y(s)$ EN FRACCIONES PARCIALES

$$Y(s) = [N(s)/D(s)].X(s)$$

donde:

- $N(s)$  y  $D(s)$  son polinomios en  $s$
- $X(s)$  es el valor de la entrada escalón.
- El grado de  $N(s)$  debe ser menor o igual (para respuesta a escalón) que el de  $D(s)$

##### Procedimiento:

##### 1.1 Obtener las raíces de la ecuación característica ( $D(s) = 0$ ).

Raíces	(	Reales	—)	$p$
	(	Complejas	—)	$p \pm jq$

Asumiendo que las raíces no son repetidas, son siempre distintas: cada raíz real  $p$  da lugar a una fracción parcial, que con la transformada inversa de Laplace genera una función de la forma:

$$A / (s - p) \longrightarrow A e^{pt}$$

Cada par de raíces complejas da lugar a fracciones parciales de la forma:

$$\frac{As + B}{s^2 - 2ps + (p^2 + q^2)} = \frac{As + B}{(s - p)^2 + q^2}$$

Y deberá conseguirse la forma:

$$A \frac{s - p}{(s - p)^2 + q^2} + B \frac{q}{(s - p)^2 + q^2}$$

Que con la transformada inversa de Laplace quedará:

$$A e^{pt} \cos(qt) + B e^{pt} \sin(qt)$$

1.2 Escribir las fracciones parciales mencionadas

1.3 Formular un sistema de ecuaciones algebraicas lineales para obtener los coeficientes.

## 2. FORMULAR $y(t)$

$y(t)$  se formula directamente conociendo el número de raíces reales y complejas:

$$y(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \cos(q_2 t) + B_2 e^{p_2 t} \sin(q_2 t) + \dots + A_{n-1} e^{p_{n-1} t} + A_n e^{p_n t} \cos(q_n t) + B_n e^{p_n t} \sin(q_n t)$$

## 3. GRAFIZAR $y(t)$

Para la grafización se generan una cierta cantidad de pares ordenados a partir de  $y(t)$  ya formulada; y, se los representa por medio de un periférico del computador: el Grafizador o PLOTTER, o en la PANTALLA.

Para todo ésto, se usará el computador TEKTRONIX 4051 el cual incluye unidades de disco, impresora y grafizador. El lenguaje a usarse es el BASIC.

### A.2.- PROGRAMA PARA OBTENER LA RESPUESTA A ESCALON DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE SISTEMAS LINEALES: [FLMENU]

METODO: Transformada de Laplace para funciones polinomiales de la forma  $N(s) / D(s)$ .

MODO DE USARLO: Una vez colocado el disco en alguna unidad se ejecutan las siguientes instrucciones:

```
CALL "MOUNT", #, X$
OLD "EDUSBECK/FLMENU"
RUN
```

Donde # → Es el número de la unidad del disco



Realizado lo anterior, aparecerá en pantalla el siguiente mensaje:

PROGRAMA RESPUESTA DE UN SISTEMA LINEAL

UNIDAD DONDE ESTA EL DISCO DEL PROGRAMA: ?

Ingresado el número de la unidad solicitada, se llega a la presentación principal: el MENU, mostrado a continuación:

MENU PRINCIPAL DEL PROGRAMA (FLMENU)

Respuesta en Tiempo a Escalón de Funciones  
de Transferencia de Sistemas Lineales

METODO: Transformada Inversa de Laplace para  
Funciones Polinomiales  $N(s)/D(s)$

\*\*\* MENU \*\*\*

- KEY # 1 → Return to Menu
- (F) KEY # 2 → Enter New Function  
(SHIFT -) New Points to same Function)
- (F) KEY # 3 → Check last Function Graphic  
(SHIFT -) Check Data)
- (P) KEY # 4 → Save and Print last Function  
(SHIFT -) Creating or Using other File)
- (F) KEY # 5 → Check any Function Graphic and Data  
(SHIFT -) Directory of Files)
- (F) KEY # 6 → Draw some Functions in same Graphic  
(SHIFT -) Draw a Function Set)
- (P) KEY # 7 → Edit any Function Graphic [DATA]  
(SHIFT -) Edit any Function Set [FILE]
- [ON] KEY # 8 → Printer (P) and Flag (F) ON/OFF

DUM

El cuadro anterior presenta las diferentes opciones que ofrece el programa maestro "FL - MENU"; seleccionables indistintamente, bajo un orden lógico de operación, de acuerdo a los requerimientos del operador.

Una vez seleccionada la opción, y habiendo presionado la tecla que corresponda, el programa principal (FL - MENU) cargará el subprograma correspondiente ejecutándolo.

El programa incluye una "bandera" (P) para decidir si debe imprimir ciertos datos, o presentarlos en pantalla; ó (F) para decidir si presenta o no (en pantalla) los últimos datos usados en la ejecución anterior de algún subprograma, como opción para cambiarlos o usarlos nuevamente. Esta bandera se habilita o deshabilita mediante la tecla ocho (KEY # 8) y está representada por las letras P ó F (siendo ambas la misma bandera con diferente función de uno a otro subprograma), que acompañan a cada descripción de la tecla en el margen izquierdo del cuadro de selección (MENU), y entre paréntesis. Junto a la tecla ocho, encerrado en corchetes, se encuentra el estado de esta bandera: [ON] = habilitada, y [OFF] = deshabilitada.

A.3.- DESCRIPCION DE LAS TECLAS

Todas las teclas, a excepción de las teclas uno y ocho, ofrecen una doble función: la una se consigue presionando únicamente la tecla cuya función está indicada por la flecha; la otra función, indicada por SHIFT, se ejecuta cuando antes de presionar esta tecla se ha mantenido presionada la tecla [SHIFT].

KEY # 1 "RETORNO AL MENU"

Cada vez que se presione esta tecla se presentará en pantalla el cuadro de selecciones, habilitándose simultáneamente el acceso a los programas. Es decir, que si el MENU no se ha presentado, ninguna de las restantes teclas ejecutará su correspondiente asignación, ejecutándose principalmente la función de esta tecla: Retorno al Menú.

KEY # 2 "INGRESO DE UNA NUEVA FUNCION"  
(F) (SHIFT ->) NUEVOS PUNTOS PARA LA MISMA FUNCION)

La función de esta tecla constituye el corazón del programa, donde se ingresan los datos de la función de transferencia: Valor del escalón, Número de puntos y los tiempos inicial y final; además, para una mejor definición de la curva, se ingresa un grado de concentración de puntos al margen izquierdo (explicado más adelante). El programa ejecuta la transformada inversa de Laplace, previa separación en fracciones parciales de la función ingresada. Por último, se calculan los pares ordenados de las ecuaciones obtenidas.

A fin de comprender mejor el modo de ejecución de esta parte del programa (KEY # 2) se incluye, al final de este anexo, un diagrama de flujo del "modus operandi" de la transformada inversa de Laplace, usada en el programa, junto con el listado completo de todo el programa.

En la otra función (Tecla 12 en este computador), seleccionada con SHIFT, se ejecuta la obtención de pares ordenados de la transformada de la misma función para nuevos tiempos inicial y final, selección de número de puntos entre éstos, valor del escalón a usarse y grado de concentración de puntos (este último se detalla más adelante en este apéndice).

Por último, este subprograma hace uso de la bandera (F), para cambiar o aceptar las condiciones de cálculo: Valor de escalón, Número de puntos, Tiempos inicial y final, y grado de concentración de puntos. O bien que las mismas condiciones de cálculo sean usadas directamente para la obtención de pares ordenados de una nueva función de transferencia ingresada.

KEY # 3 "CHEQUEO DEL GRAFICO DE ULTIMA FUNCION"  
(F) (SHIFT ->) CHEQUEO DE TABLA DE DATOS)

La función principal es grafizar en pantalla los pares ordenados del subprograma anterior. Con SHIFT (Tecla 13) se publica en pantalla los datos de la función de transferencia ingresada con sus polos y ceros.

La bandera (F) actúa sobre los parámetros de grafización: Valores máximos y mínimos para los ejes coordenados y los intervalos para las marcas respectivas, así como el punto de cruce de los ejes.

KEY # 4 "GUARDAR E IMPRIMIR DATOS DE ULTIMA FUNCION"  
(P) (SHIFT →) CREACION O USO DE OTRO ARCHIVO)

Este subprograma guarda en archivo (en el disco de datos) los parámetros correspondientes a la última función ingresada, a saber: Los pares ordenados, Sus valores máximos y mínimos, Grado del numerador y denominador, Coeficientes de los términos de los polinomios que conforman la función de transferencia  $N(s)/D(s)$ , Polos y ceros del sistema con respuesta a escalón, El valor del escalón usado y el título que se le asigne a esta función.

El subprograma ejecutado con SHIFT (Tecla 14) permite guardar los datos en un archivo ya creado o crear uno para este propósito. Para lo último, exigirá se introduzcan parámetros que definan a este archivo, tales como: Nombre del archivo, Número de gráficas a guardarse (aproximadamente), Número de puntos o pares ordenados a guardarse como máximo, Grado del numerador y denominador máximos (especificados estos máximos, el archivo no admitirá mayores), y título principal.

Ejecutando lo descrito anteriormente, el subprograma guardará los datos y los imprimirá en papel de la impresora si se halla habilitada [ON] la bandera (P) o en pantalla si la bandera (P) está deshabilitada [OFF].

Si se ejecuta por segunda, tercera, etc., ocasiones, sin haber ejecutado previamente un nuevo ingreso de datos (Teclas 2 ó 12), no se producirá un ingreso de estos datos en un nuevo registro del archivo en el cual se está trabajando, pero sí en otro archivo (Tecla 14). Sin embargo, si se ejecutará la impresión de los mismos en pantalla o en papel.

KEY # 5 "CHEQUEO DE CUALQUIER GRAFICA Y DATOS"  
(F) (SHIFT →) DIRECTORIO DE ARCHIVOS)

El subprograma imprimirá los datos archivados y/o presentará la gráfica de los mismos; especificando previamente, conforme el programa solicite: La unidad del disco de datos, Nombre del archivo y número del registro. Previo a la impresión de datos se presentará la opción de hacerlo en pantalla o en papel de la impresora.

La segunda función de este subprograma (obtenida con SHIFT) permite conocer los diferentes archivos tipo DATA/ ó FILE/ que se hayan creado con los subprogramas KEY # 4 y KEY # 6 respectivamente. Se puede observar un directorio de estos archivos y/o revisar características de cada uno.

Los archivos tipo DATA/ corresponden a la reunión de varias gráficas con similares características de almacenaje de datos: Número de puntos, Título principal que las agrupa, Grados máximos del numerador y denominador, etc. Mientras que los archivos tipo FILE/ reúnen a un conjunto de varias gráficas del mismo o de diferentes archivos DATA/ para grafizarlas en un mismo plano. Esto ayuda a comparar unas curvas con otras. Estos archivos (FILE/) únicamente guardan: El número de curvas a mostrarse, Los nombres de los archivos DATA/ con los registros a utilizarse y por supuesto el número de la unidad de disco donde se encontrarán estos archivos, además un encabezamiento con el título que las agrupa, nombre y unidades del eje de ordenadas, parámetros de grafización (WINDOW y VIEWPORT).

La bandera (F) actúa en el número de la unidad del disco de datos y en el nombre del archivo, excepto el número del registro; facilitando así el chequeo de distintos registros del mismo archivo, sin que se requiera introducir cada vez el nombre de éste.

Cabe mencionar que el uso de este subprograma no afecta a los datos de las variables de los otros subprogramas, excepto a la variable que contiene el nombre del archivo.

KEY # 6 "TRAZAR ALGUNAS FUNCIONES EN LA MISMA GRAFICA"  
 (F) (SHIFT -) TRAZAR UN CONJUNTO DE FUNCIONES)

Este subprograma permite trazar una o más funciones de archivos diferentes (ó del mismo archivo) en una sola gráfica para propósitos de comprobación. Para ello solicitará datos como número de funciones a grafizar, y en base a este número pedirá los datos necesarios correspondientes al nombre del archivo, unidad del disco donde se halla, y el número del registro. Si el nombre del archivo se repite basta con presionar [RETURN] y el programa tomará directamente el nombre anterior con su unidad de disco.

Concluido el proceso anterior, el programa preguntará si se desea gráfico en pantalla. A continuación presentará la opción de hacerlo en papel de plotter, después de lo cual preguntará si se desea guardar esta información en el disco de datos, especificando con un nombre este conjunto y con los datos descritos en el subprograma anterior para archivos tipo FILE. Por último retornará al menú principal.

La segunda función de este subprograma (accesible con SHIFT) permite trazar gráficas de funciones que han sido guardadas en conjunto en el disco de datos. Para el efecto solo se requerirán los datos: Nombre asignado al conjunto y unidad del disco donde se encuentra; y el subprograma preguntará si se desea en pantalla y/o papel.

Además, en estos subprogramas se incluye la opción de usar un diferenciador de trazos de las curvas o la opción de realizarlas solo con trazo continuo. Este diferenciador es un generador de diferentes trazos combinados entre puntos y rayas (se lo detalla más adelante en este apéndice).

La bandera (F) actúa para las condiciones de grafización: Máximos y mínimos de coordenadas, intervalos y punto de cruce de los ejes.

KEY # 7 "EDITAR CUALQUIER GRAFICA DE UNA FUNCION [DATA]"  
 (F) (SHIFT -) EDITAR CUALQUIER CONJUNTO [FILE])

Con este subprograma pueden cambiarse datos de las funciones o de los conjuntos de funciones. Las funciones corresponden a los datos que se guardan en el subprograma KEY # 4, y el conjunto de funciones a aquellas que se agrupan y guardan en el subprograma anterior (KEY # 6). Las primeras corresponden a archivos de biblioteca DATA/ y las segundas a los archivos FILE/.

La edición de archivos tipo DATA/ tiene dos opciones: Una es solo cambio de subtítulo asignado a esta función, y la segunda corresponde a un cambio global; que, requiere haber ingresado previamente los nuevos datos de la función, a editarse, a través del subprograma KEY # 2.

La edición de archivos tipo FILE/, mediante el subprograma asignado con SHIFT, permite: Disminuir el número de funciones de este conjunto a grafizarse en un mismo cuadro, Cambiar el orden o secuencia de grafización, o corregir errores de ingreso de datos.

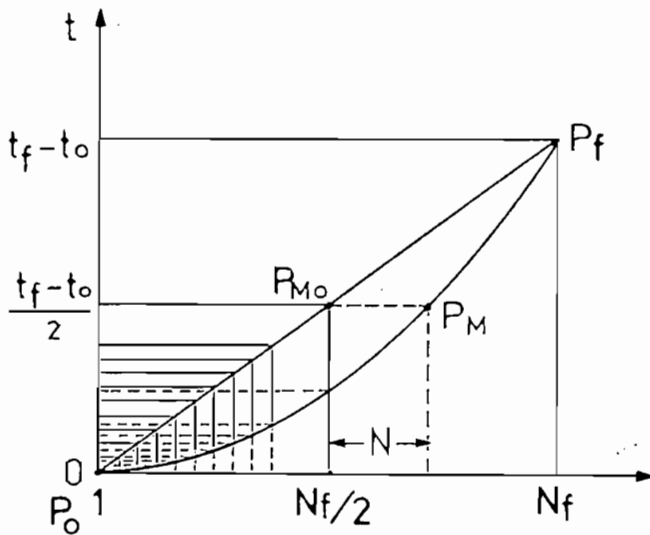
KEY # 8 "IMPRESORA (P) Y BANDERA (F) ON/OFF"  
 [ON] ó [OFF]

Este subprograma esta incluido en el programa principal y su única función es habilitar o deshabilitar la bandera P/F, alternando: habilitación y luego deshabilitación, y nuevamente habilitación, y así cada vez que se la presione.

**A.4.- CONCENTRACION DE PUNTOS:**

Para la obtención de las gráficas, producto de la simulación, se requiere de la definición de una densidad de puntos o resolución gráfica de la curva (los valores digitales son discretos no continuos). Para conseguir esta densidad el programa solicita número de puntos, los cuales pueden distribuirse uniformemente a lo largo del eje de las abscisas. Sin embargo, esta distribución no considera los cambios de pendiente alta en el eje de ordenadas, lo que se refleja en curvas con trazos de forma trapezoidal o que exigen mayor cantidad de puntos para definirse en mejor forma.

A fin de evitar el uso de mayor número de puntos y puesto que la mayoría de funciones a simularse (objeto de este programa) poseen transitorios en su fase inicial y tienden a estabilizarse (sin variaciones muy significativas en el eje de ordenadas) se implementó en el programa una distribución de puntos basada en diferentes grados de seguimiento de una curva parabólica (definida por tres puntos: inicial, final y el especificado por el grado de concentración), lo cual determinará una mayor o menor concentración de puntos al lado izquierdo de la gráfica, sin que sea muy notorio (suavemente), de acuerdo a la siguiente descripción gráfica y análisis matemático:



$$P_0 \rightarrow [1 ; 0]$$

$$P_M \rightarrow [Nf/2 + N ; (t_f - t_0)/2]$$

$$P_f \rightarrow [Nf ; t_f - t_0]$$

$$0 < N < 2Nf/5$$

$$P_{M|N=0} = P_{M0} = Nf/2$$

ECUACION:  $t = A.N^2 + B.N + C$

Para:  $P_0 \rightarrow A + B + C = 0$

$P_f \rightarrow A.Nf^2 + B.Nf + C = t_f - t_0$

$P_M \rightarrow A.(Nf/2 + N)^2 + B.(Nf/2 + N) + C = (t_f - t_0)/2$

Despejando C en  $P_0$ :  $C = -A - B$

Reemplazando:  $P_f \rightarrow A.(Nf^2 - 1) + B.(Nf - 1) = t_f - t_0$

$P_M \rightarrow A.(Nf^2/4 + Nf.N + N^2 - 1) + B.(Nf/2 + N - 1) = (t_f - t_0)/2$

Despejando B en Pf:

$$B = \frac{t_f - t_o - A \cdot (Nf^2 - 1)}{Nf - 1}$$

Reemplazando en P<sub>M</sub>:

$$A \cdot (Nf^2/4 + Nf \cdot N + N^2 - 1) + \frac{t_f - t_o}{Nf - 1} (Nf/2 + N - 1) - \frac{A \cdot (Nf^2 - 1)}{Nf - 1} (Nf/2 + N - 1) = \frac{t_f - t_o}{2}$$

Despejando A:

$$A = \frac{\frac{t_f - t_o}{2} \left( 1 - \frac{Nf + 2N - 2}{Nf - 1} \right)}{Nf^2/4 + Nf \cdot N + N^2 - 1 - (Nf + 1)(Nf/2 + N - 1)}$$

$$A = \frac{\frac{t_f - t_o}{2} \left( \frac{1 - 2N}{Nf - 1} \right)}{N^2 - N - Nf^2/2}$$

Queda:

$$\begin{aligned} A &= \frac{(t_f - t_o)(1 - 2N)}{(Nf - 1)[2N(N - 1) - Nf^2]} \\ B &= \frac{t_f - t_o}{Nf - 1} - A \cdot (Nf + 1) \\ C &= -(A + B) \end{aligned}$$

Siendo A, B y C coeficientes que definen la curva parabólica, los cuales se hallan implementados en el programa, y que se calculan mediante las ecuaciones anteriores. En estas ecuaciones se define igualmente un término N, el cual corresponde a un 40% máximo de variación de Nf/2, seleccionables mediante grados de concentración del valor 0 al 10. El valor 0 equivale a una distribución completamente uniforme, y 10 a una concentración máxima al lado izquierdo.



... y así indefinidamente y como se puede notar, depende de la densidad de puntos que definen a cada curva; la cual exige que todas las curvas guarden similar densidad. Caso contrario, y si la gráfica no resultase adecuada con este tipo de trazo, se puede optar por realizarla solo con trazo continuo.

En la siguiente página se presenta el diagrama de bloques que explica el modo de ejecución de este trazador, el mismo que se lo encuentra dentro del listado del subprograma KEY # 6, implementado en el lenguaje BASIC.

LISTADO DE VARIABLES:

- M1 → Número de curvas a graficar.
- A# → Nombre de archivos tipo DATA.
- H7 → Unidad del disco donde se encuentra el archivo A#
- Y3 → Número del registro, en el archivo A#, que contiene la curva a graficar.
- H5 → Número de puntos que definen a las curvas.
- T\$ → Bandera de selección del tipo de trazo.
- V, I, J, K → Banderas de propósito interno.

EJEMPLO:

Trazo Continuo

Trazo No Continuo

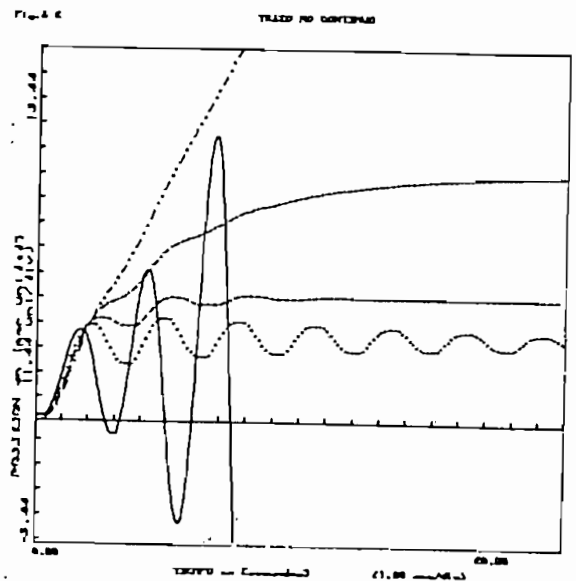
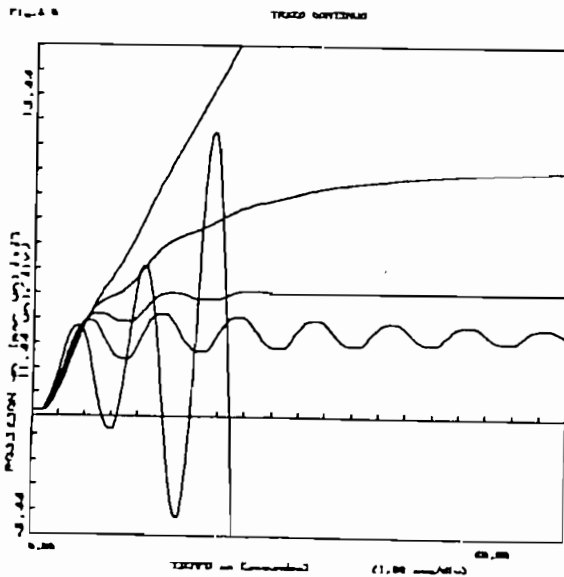
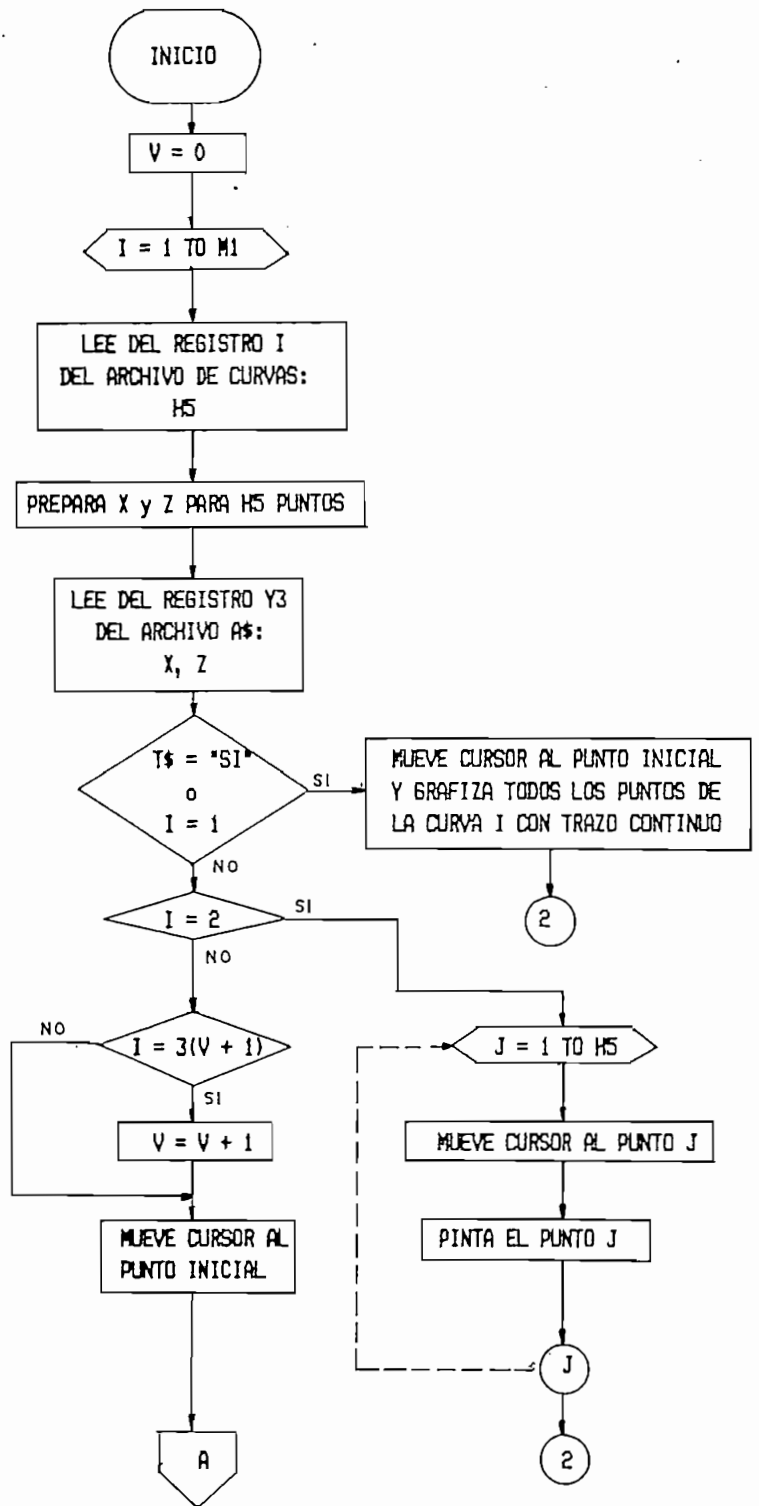
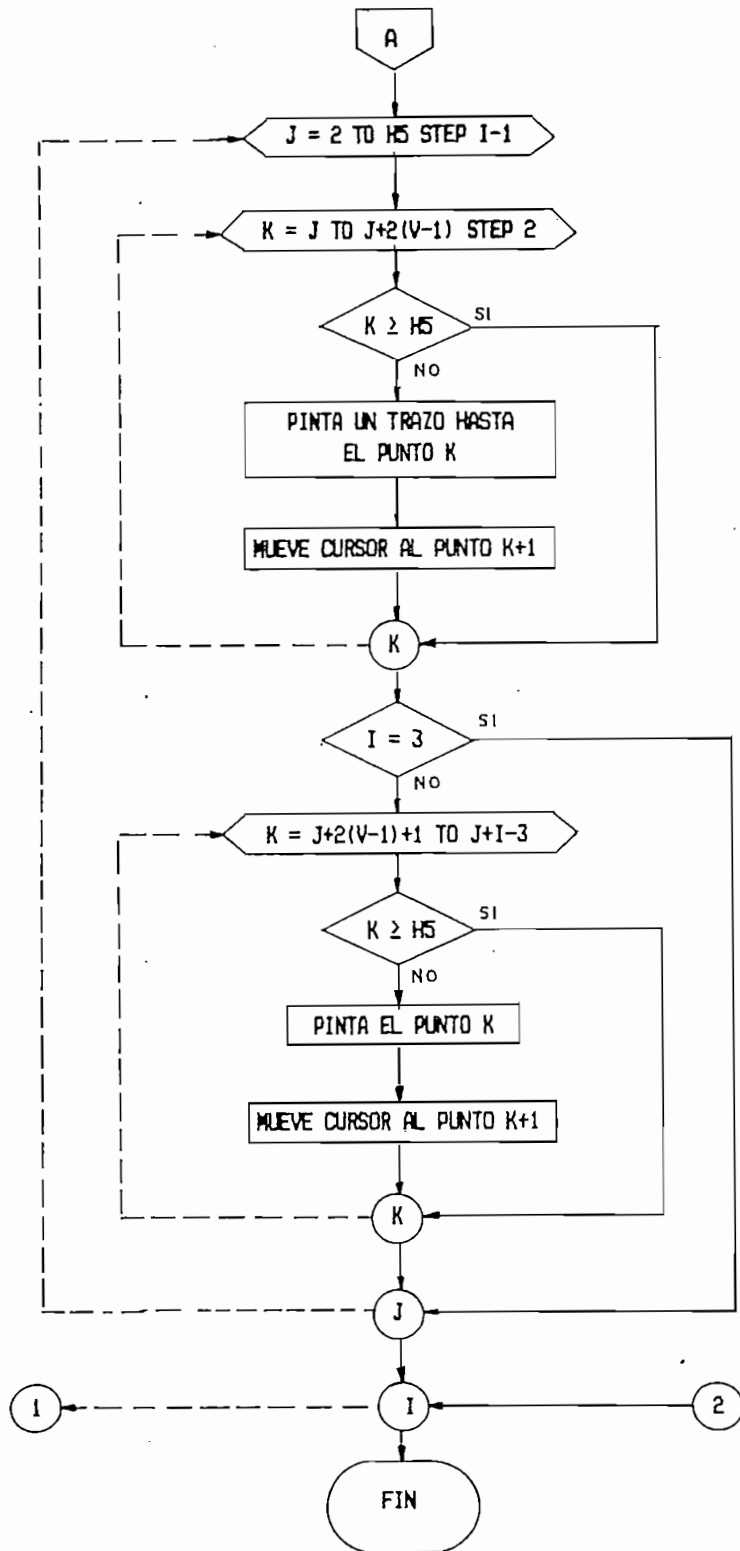




DIAGRAMA DE FLUJO DEL TRAZADOR DE CURVAS:





A.6.- EJEMPLO DEMOSTRATIVO

A fin de verificar el funcionamiento correcto del programa, y de usar como guía de manejo del mismo, se presenta a continuación el ingreso de varias curvas con el detalle de mensajes y resultados obtenidos.

Partiendo de que el programa se halla presentando el MENU principal; es decir, cargado el programa en el computador e inicializado (ver literal-numeral A.2), se simularán los siguientes ejemplos.

A.6.1.- Muchos sistemas de control se pueden describir o aproximar por la ecuación diferencial general de segundo orden:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dy}{dt} + \omega_n^2 y = \omega_n^2 x$$

El coeficiente positivo  $\omega_n$  se llama la frecuencia natural no amortiguada y el coeficiente  $\zeta$  es la razón de amortiguación del sistema. (B11)

La transformada de Laplace de  $y(t)$  cuando las condiciones iniciales son cero, es:

$$Y(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} X(S)$$

Los polos de la función  $Y(S)/X(S)$  son:

$$S = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

Observándose que:

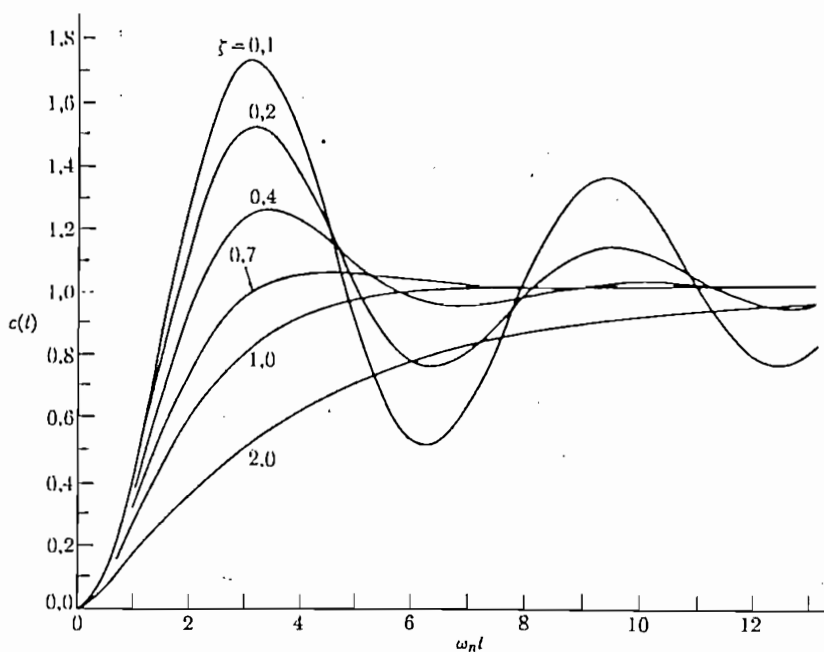
1. Si  $\zeta > 1$ , ambos polos son negativos y reales.
2. Si  $\zeta = 1$ , los polos son iguales, negativos y reales ( $S = -\omega_n$ ).
3. Si  $0 < \zeta < 1$ , los polos son conjugados complejos con partes reales negativas ( $S = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$ ).
4. Si  $\zeta = 0$ , los polos son imaginarios y conjugados complejos ( $S = \pm j\omega_n$ ).
5. Si  $\zeta < 0$ , los polos se hallan en la mitad derecha del plano S. (B11)

Para los siguientes cálculos se supondrá  $\omega_n = 1$ , y se pretenderá encontrar la gráfica # A.1.

A.6.1.1.- Para  $\zeta = 0,1$  se tendrá la siguiente función:

$$\frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{1}{S^2 + 0,2S + 1}$$

A.6.1.2.- Presionando TECLA 2 en el computador, se realizarán los siguientes ingresos (resaltados con subrayado) directamente en la pantalla de éste, mediante el seguimiento de los siguientes mensajes:



Respuesta transitoria de un sistema de segundo orden para una entrada de escalón.

Figura # A.1

INGRESAR NUEVA FUNCION

INGRESE FUNCION DE TRANSFERENCIA N(S)/D(S)

DATOS DEL POLINOMIO N(S)

GRADO = 0

COEFICIENTES:

S<sup>0</sup> = 1

DATOS DEL POLINOMIO D(S)

GRADO = 2

COEFICIENTES:

S<sup>2</sup> = 1

S<sup>1</sup> = 0.2

S<sup>0</sup> = 1

Es necesario esperar unos segundos hasta que el programa encuentre los polos y ceros del sistema ingresado y que elabore las fracciones parciales; luego, aparecerán los siguientes mensajes:

VALOR DE ESCALON = 1

NUMERO DE PUNTOS = 100

VALOR INICIAL = 0

VALOR FINAL = 12

GRADO CONCENTRACION PUNTOS = 0

DESEA CAMBIAR DATOS? (SI o NO):   

Esto aparece si la bandera "F" se encuentra activada (ON), caso contrario pedirá uno a uno los valores publicados. Esto último ocurre también si la respuesta es SI a la pregunta planteada. Para propósitos de este ejemplo concuerdan los valores prefijados en el programa:

DESEA CAMBIAR DATOS? (SI o NO): NO

Nota: Para contestar un NO, es suficiente presionar la tecla [RETURN] sin requerir escribirlo. Esto es válido para todas las preguntas del programa.

El tiempo que tarda, a partir de este momento, en resolver la función  $y(t)$  dependerá del número de puntos especificado y de la complejidad de la función. Transcurrido este tiempo, automáticamente el programa se ubicará en el MENU principal para la siguiente selección de opciones.

A.6.1.2.- Presionando TECLA 3 se procederá a chequear gráficamente lo obtenido en el subprograma anterior. Para ello se requiere responder los siguientes mensajes (con F activada):

Rangos de Escala:

Horizontal:	Vertical:
Min. = 0	Min. = 0
Max. = 12	Max. = 3

Marcas en el Eje Horizontal = 1  
 Marcas en el Eje Vertical = 0.5

Punto de Cruce de los Ejes:

Horizontal = 0                      Vertical = 0

HORIZONTAL :	Mínimo = 0.00E+000	Máximo = 1.20E+001
VERTICAL :	Mínimo = 7.11E-015	Máximo = 1.73E+000

DESEA CAMBIAR DATOS? (SI o NO):   

Puesto que se conoce la gráfica con la cual se comparará este resultado, es notoria la necesidad de ajustar esta escala a la de la gráfica mencionada, por tanto:

DESEA CAMBIAR DATOS? (SI o NO): SI

Nota: Para contestar un SI, y que éste sea aceptado como tal en el programa, es suficiente responder tan solo con una S. Así mismo, éste es válido para todas las preguntas del programa.

Rangos de Escala:

Horizontal:	Vertical:
Min. = <u>0</u>	Min. = <u>0</u>
Max. = <u>12</u>	Max. = <u>1.8</u>

Marcas en el Eje Horizontal = 1  
 Marcas en el Eje Vertical = 0.1

Punto de Cruce de los Ejes:

Horizontal = 0                      Vertical = 0

Inmediatamente del último ingreso, en pantalla se desarrollará la grafización de la curva obtenida. Finalmente aparecerá, en la parte superior de la gráfica, el siguiente mensaje que la mantiene en pantalla el tiempo que considere el operador del programa:

[RETURN] PARA CONTINUAR

Lo cual indica que se debe presionar la tecla [RETURN] para regresar al MENU.

Cuando se trabaja con la bandera F desactivada (OFF) en este subprograma, la tabla de los rangos de escala no aparece, presentándose la gráfica inmediatamente con la última escala usada, o con la prefijada por el programa si ésta no ha sido cambiada.

Si se desea verificar los datos ingresados, con los cuales se obtuvo esta gráfica, bastará consultar la segunda opción de este subprograma. Presionando SHIFT y TECLA 3 simultáneamente, se obtendrá lo descrito anteriormente en forma de una tabla (similar a la mostrada más adelante en el literal-numeral A.6.1.4).

Para grafizar varias curvas en una misma gráfica, es necesario disponer de ellas desde algún archivo de datos (archivos tipo DATA). Por tanto se debe crear uno para guardar ésta y las restantes curvas a fin de reproducir la gráfica # A.1. La siguiente opción del MENU permite hacerlo fácilmente.

A.6.1.3.- Presionando las teclas SHIFT y TECLA 4, simultáneamente, se podrá crear un archivo de datos (o usar un archivo diferente ya creado) de la siguiente manera:

UNIDAD DONDE ESTA EL DISCO DE DATOS : 1

NOMBRE DEL ARCHIVO DE GRAFICOS : RTSSOEE

Utilizamos el nombre RTSSOEE como clave cuyo significado corresponde a Respuesta Transitoria de un Sistema de Segundo Orden para una Entrada Escalón unitario. Luego de breves segundos el programa responderá que no existe este archivo (si efectivamente no ha sido creado con anterioridad).

NO EXISTE EL ARCHIVO : RTSSOEE

DESEA CREARLO? (SI o NO): SI

Respondiendo afirmativamente, solicitará los siguientes datos que regirán a este archivo:

NUMERO DE GRAFICAS A GUARDARSE (APROXIMADO): 6

NUMERO DE PUNTOS PARA CADA GRAFICA (MAXIMO): 100

GRADO DEL NUMERADOR (MAXIMO): 0

GRADO DEL DENOMINADOR (MAXIMO): 2

Y a continuación:

TITULO PRINCIPAL (MAXIMO 62 CARACTERES):

RESPUESTA TRANSITORIA DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN

(—

El título solicitado es general para todo el archivo creado, por ello pedirá a continuación el ingreso de un subtítulo para esta gráfica específica:

INGRESE SUBTITULO PARA ESTA GRAFICA (Max. 50 caracteres):

FREC. NATURAL = 1 y COEF. AMORTIGUAMIENTO = 0.1 (—

Inmediatamente aparece en pantalla el siguiente mensaje:

LOS DATOS SE GUARDARAN EN:

REGISTRO : 2  
 ARCHIVO : RTSSOEE  
 UNIDAD : 1

SE PROCEDE? (SI o NO) : SI

A continuación, y si la bandera "P" está activada (ON), se presentará el siguiente mensaje:

PREPARE LA IMPRESORA ([RETURN])

Esto recuerda que se debe chequear si la misma se halla lista, después de lo cual se presionará la tecla [RETURN] para obtener una copia de los datos ingresados de esta gráfica que se imprimirán así:

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
 SISTEMAS DE CONTROL

FECHA : 14-JUN-85 21:50:00

TITULO : RESPUESTA TRANSITORIA DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN

REGISTRO : 2  
 ARCHIVO : RTSSOEE      FREQ. NATURAL = 1 y COEF. AMORTIGUAMIENTO = 0.1

Grado del Numerador      0  
 Grado del Denominador    2  
 Valor del Escalón        1

Coefficientes del Numerador :

S\*\*0  
 1.0000

Coefficientes del Denominador :

S\*\*0      S\*\*1      S\*\*0  
 1.0000    0.4000    1.0000

Polos y Ceros de la Función :

Parte Real	Parte Imaginaria	Tipo
0.00	0.00	POLO
-0.20	0.98	POLO
-0.20	-0.98	POLO

Al terminar la impresión, en pantalla aparecerá el MENU principal. En la tabla anterior se imprimen los polos y ceros de la función; el hecho de que no aparezcan CEROS significa que la función carece de ceros finitos.

Si la bandera P se encuentra desactivada, esta tabla de datos aparecerá directamente en la pantalla con el siguiente mensaje (el cual una vez cumplido llevará al MENU):

[RETORNO] PARA CONTINUAR

Nota: El registro 1 en todos los archivos es utilizado para guardar las características de creación del archivo; por lo cual, la primera gráfica es guardada en el segundo registro. El programa utiliza archivos de acceso aleatorio.

A.6.1.4.- Para  $\xi = 0.2$  se obtiene la función:

$$\frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{1}{S^2 + 0.4S + 1}$$

Siguiendo paso a paso lo descrito en los numeral-literales A.6.1.1 al A.6.1.3 para estos nuevos datos, se conseguirá llenar el registro 3.

Nota: Una vez ingresado el nombre del archivo, para guardar en éste los datos requeridos, el mismo se convierte en archivo de trabajo. Lo anterior significa que para guardar nuevos datos, ingresados por TECLA 2, se podrá utilizar la TECLA 4 (sin SHIFT) para que el programa directamente use un nuevo registro del mismo archivo.

A.6.1.5.- Repitiendo el literal-numeral anterior completaremos la siguiente tabla:

<u>REGISTRO</u>	<u>ECUACION</u>	<u>SUBTITULO</u>
2	$1 / (S^2 + 0.2S + 1)$	FREC. NATURAL = 1 y COEF. AMORTIGUAMIENTO = 0.1
3	$1 / (S^2 + 0.4S + 1)$	FREC. NATURAL = 1 y COEF. AMORTIGUAMIENTO = 0.2
4	$1 / (S^2 + 0.8S + 1)$	FREC. NATURAL = 1 y COEF. AMORTIGUAMIENTO = 0.4
5	$1 / (S^2 + 1.4S + 1)$	FREC. NATURAL = 1 y COEF. AMORTIGUAMIENTO = 0.7
6	$1 / (S^2 + 2.0S + 1)$	FREC. NATURAL = 1 y COEF. AMORTIGUAMIENTO = 1.0
7	$1 / (S^2 + 4.0S + 1)$	FREC. NATURAL = 1 y COEF. AMORTIGUAMIENTO = 2.0

Nota: Al realizar el ingreso de los datos que corresponden al registro 6, se produce la siguiente señal de error:

INVALID FUNCTION ARGUMENT IN LINE 3500 - MESSAGE NUMBER 31

Este se produce debido a que existen raíces repetidas en el polinomio del denominador, lo cual no se contempla en el algoritmo de este programa. Como artificio para poder superar este inconveniente se sugiere reducir uno de los coeficientes de la ecuación característica (denominador) en una cantidad pequeña (del orden de  $10^{-4}$ ) lo cual aproxima suficientemente y permite la simulación. Para el caso del registro 6 se aproximó el coeficiente de S (de valor 2) a 1.9999.



A.6.1.6.- Presionando TECLA 5 se puede comprobar que los ingresos realizados han sido realmente guardados en el archivo RTSSOEE. Con SHIFT y TECLA 5 y seleccionando como tipo de archivo DATA, se consigue la información de las características de éste y de los archivos que se seleccionen.

A.6.1.7.- Para concluir este ejemplo demostrativo se procede a grafizar las curvas de la tabla anterior, sobre la misma gráfica, presionando desde el MENU principal la TECLA 6 y respondiendo a los siguientes mensajes:

TRAZAR UNA O MAS FUNCIONES EN LA MISMA GRAFICA

NUMERO DE FUNCIONES : 6

ITEM	ARCHIVO	UNIDAD	REGISTRO
1	-> <u>RTSSOEE</u>	-> <u>1</u>	-> <u>2</u>
2	-> <u>RTSSOEE</u>	<u>1</u>	-> <u>3</u>
3	-> <u>RTSSOEE</u>	<u>1</u>	-> <u>4</u>
4	-> <u>RTSSOEE</u>	<u>1</u>	-> <u>5</u>
5	-> <u>RTSSOEE</u>	<u>1</u>	-> <u>6</u>
6	-> <u>RTSSOEE</u>	<u>1</u>	-> <u>7</u>

Nota: Para facilidad de llenado de esta tabla, una vez ingresado el nombre del archivo y la unidad donde se lo encuentra, no se requiere volverlo a escribir si éste se repite como en este ejemplo. Cuando se solicita el nombre del archivo en el ítem 2, y si éste se repite, es suficiente con presionar la tecla [RETURN] y se reproducirá el nombre y la unidad donde se halla este archivo.

A continuación se darán los siguientes mensajes:

Desea Gráfico en PANTALLA? (SI o NO) : SI

Luego de responder afirmativamente se presenta la tabla de rangos de escala, explicada en el literal-numeral A.6.1.2, a la cual no será necesario realizar cambios presionando directamente la tecla [RETURN] como respuesta negativa. Como último mensaje, previo a la grafización, se deberá optar por el tipo de trazo (ver literal-numeral A.5):

DESEA SOLO TRAZO CONTINUO? (SI o NO) : SI

En pantalla se observará el desarrollo de la figura # A.1, y al término de la misma y en la parte superior se presentará el mensaje:

DESEA CAMBIAR DATOS? (T = Total / P = Parcial / NO) :   

Donde:

T = Total, significa que se desea cambiar la tabla de las curvas.

P = Parcial, para cambios de escala y/o tipo de trazo.

NO = [RETURN], para seguir adelante con el programa.

Si se ha realizado los cambios requeridos y se opta por continuar el programa se presentará el mensaje:

Desea Gráfico en el PLOTTER? (SI o NO) :

Directamente se puede obtener la gráfica en papel; sin embargo, es preferible utilizar la segunda opción de este subprograma (SHIFT + TECLA 6), para lo cual se requiere crear un archivo tipo FILE continuando el programa con respuesta negativa al último mensaje (RETURN) y con respuesta afirmativa al siguiente:

Desea guardar este conjunto? (SI o NO) : SI

UNIDAD DEL DISCO DE DATOS : 1

NOMBRE PARA EL ARCHIVO DE ESTE CONJUNTO : RTSSOEE

Nota: Observese que el mismo nombre puede ser utilizado. Esto es posible por que son archivos diferentes (tipo DATA y tipo FILE como bibliotecas de archivos).

Si este archivo no existe se presentarán los siguientes mensajes:

TITULO UNICO (Máximo 70 caracteres) :  
RESPUESTA TRANSITORIA DEL SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN CON ENTRADA ESCALON (—

NUMERO DE FIGURA ASIGNADO : 1

NOMBRE DE LA ORDENADA (Máximo 20 caracteres) :  
SALIDA c(t) (—

UNIDADES DE SALIDA c(t) (Máximo 15 caracteres) :  
por unidad (—

Nota: Estos dos últimos ingresos (SALIDA c(t) y "por unidad") quedan grabados en el programa en forma similar al nombre del archivo de trabajo, y posteriormente (en la creación de otro archivo FILE) se presentará como opción para utilizarlos o cambiarlos. Debe tomarse en cuenta que la escala utilizada para observar en pantalla a esta gráfica se guardará conjuntamente con todos los datos solicitados en el archivo FILE/RTSSOEE.

Finalmente, se presentará el mensaje:

Desea regresar al MENU? (SI o NO) : SI

A.6.1.8.- Para concluir este ejemplo, se obtendrá la gráfica esperada presionando SHIFT + TECLA 6:

DIBUJAR UN CONJUNTO DE FUNCIONES

COLOQUE EL DISCO DE DATOS E INGRESE NUMERO DE LA UNIDAD : 1

Desea impresión en papel del Directorio (SI o NO)? : —

La respuesta del último mensaje queda a voluntad del operador. En caso de ser negativa, se presentará en pantalla lo siguiente:

DUSBECK/FILE/RTSSOEE

... y restantes archivos tipo FILE existentes en la unidad seleccionada.

CONJUNTO ELEGIDO: FILE/RTSSOEE  
 (SOLO (RETURN) PARA CAMBIO)

Nota: En el último mensaje aparece "(SOLO [RETURN] PARA CAMBIO)"; lo cual significa que si se presiona la tecla [RETURN], sin escribir el nombre del archivo, el programa volverá a presentar el primer mensaje de este literal-numeral para efectos de cambiar el número de la unidad del disco de datos (al no hallarse en el listado de archivos el que se requiera).

Ejecutado el último mensaje se presentarán los siguientes mensajes, a los cuales se respondió de la siguiente manera para efectos de este ejemplo:

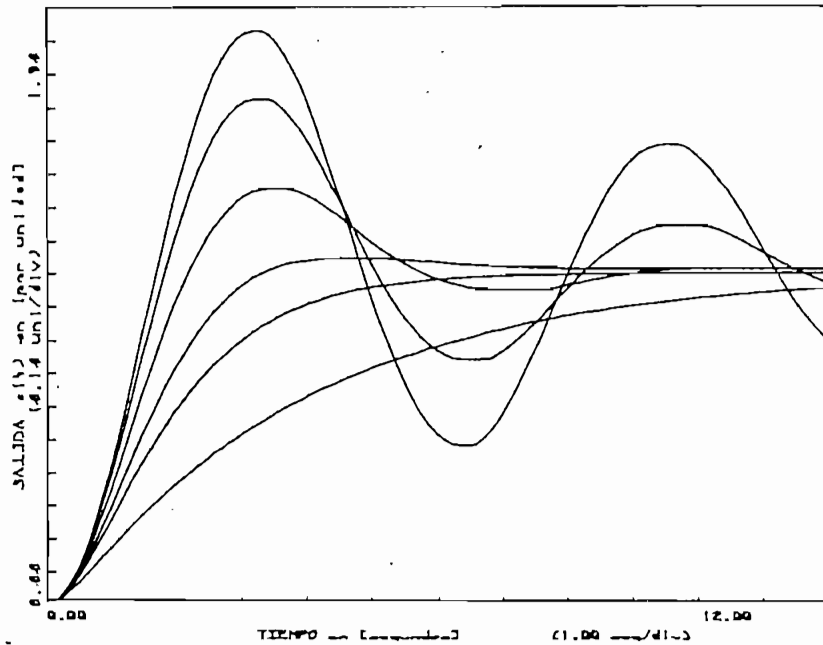
Desea Gráfico en PANTALLA? (SI o NO) : NO

Desea Gráfico en el PLOTTER? (SI o NO) : SI

DESEA SOLO TRAZO CONTINUO? (SI o NO) : SI

<< PREPARE EL GRAFIZADOR >> ([RETURN])

Fig. # 1 RESPUESTA TRANSITORIA DEL SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN CON ENTRADA ESCALON



Desea Regresar al MENU? (SI o NO) : SI

Comparando esta gráfica con la figura # A.1 pueden constatar resultados satisfactorios.

A.7.- LISTA DE VARIABLES

VARIABLES PRINCIPALES

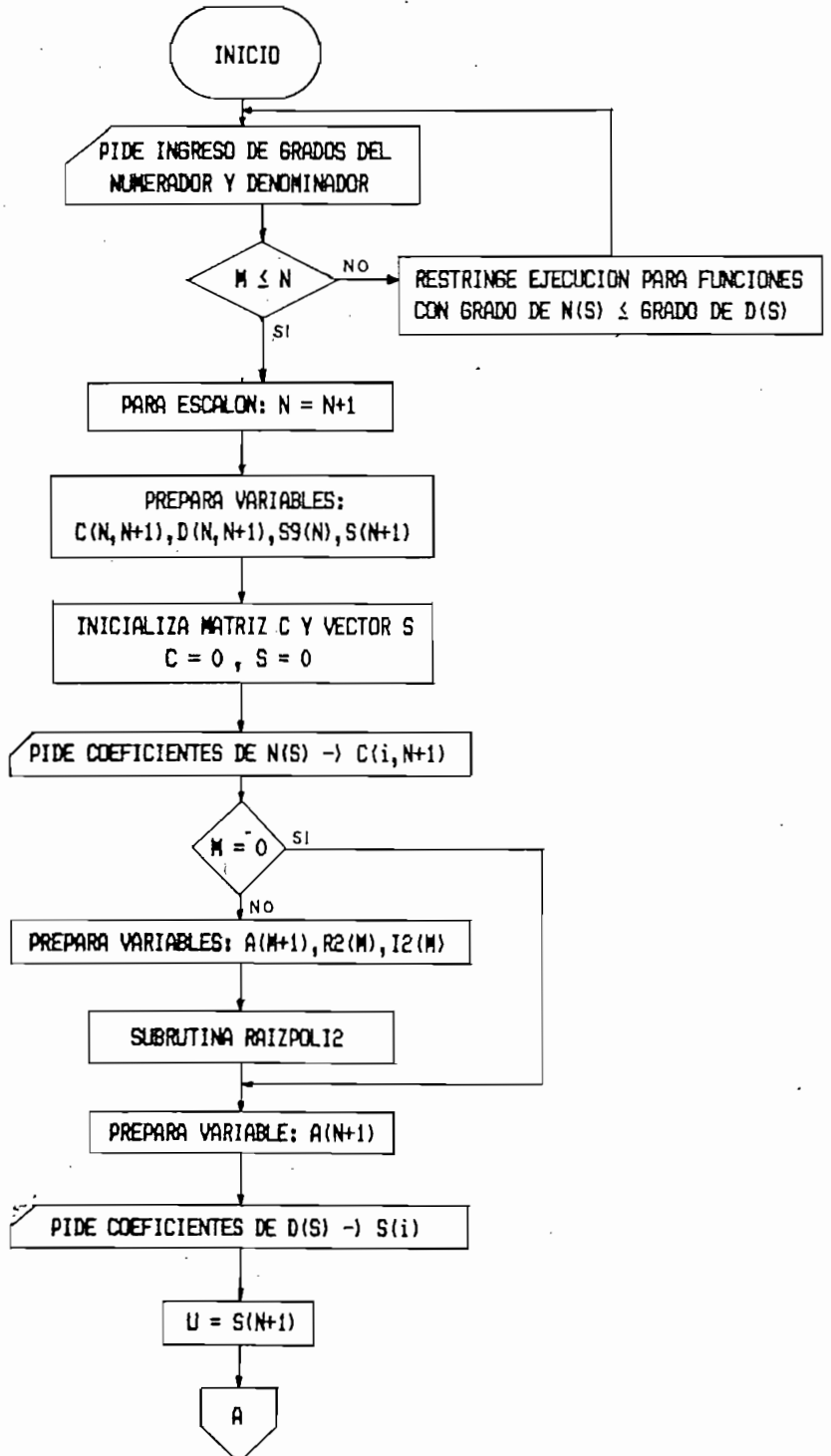
- HO → Número correspondiente a un subprograma seleccionado.
- S → Arreglo con coeficientes de D(s) en orden ascendente de potencias.
- C → Arreglo para coeficientes de N(s) y sistema de ecuaciones de fracciones parciales.
- M → Grado del Numerador.
- N → grado del Denominador.
- T,Y,X,Z → Arreglos para abscisas y ordenadas de los puntos que definen una gráfica.
- U → Factor de reducción a la unidad del coeficiente del término de mayor grado de D(s).
- E → Valor del escalón.
- N1 → Cantidad de puntos para la densidad de la gráfica.
- T1,T2 → Valores inicial y final de la abscisa.
- MO → Grado de concentración de puntos al margen izquierdo.
- G\$ → Nombre del archivo de gráficas.
- Y3 → Número del registro de una gráfica en un archivo.
- H1 → Grado máximo del numerador en un archivo.
- H2 → Grado máximo del denominador.
- H5 → Número máximo de puntos por cada gráfica en un archivo.
- H6 → Número de gráficas de capacidad, reservada para un archivo.
- U1,U2,U3,U4 → Rangos de alcance de una gráfica.
- R1,I1,R2,I2 → Arreglos para polos y ceros.
- P7 → Bandera de impresión en pantalla o en papel.
- P8 → Bandera de grafización en pantalla o en papel.
- H7 → Unidad del disco de datos.
- H8 → Unidad del disco del programa.

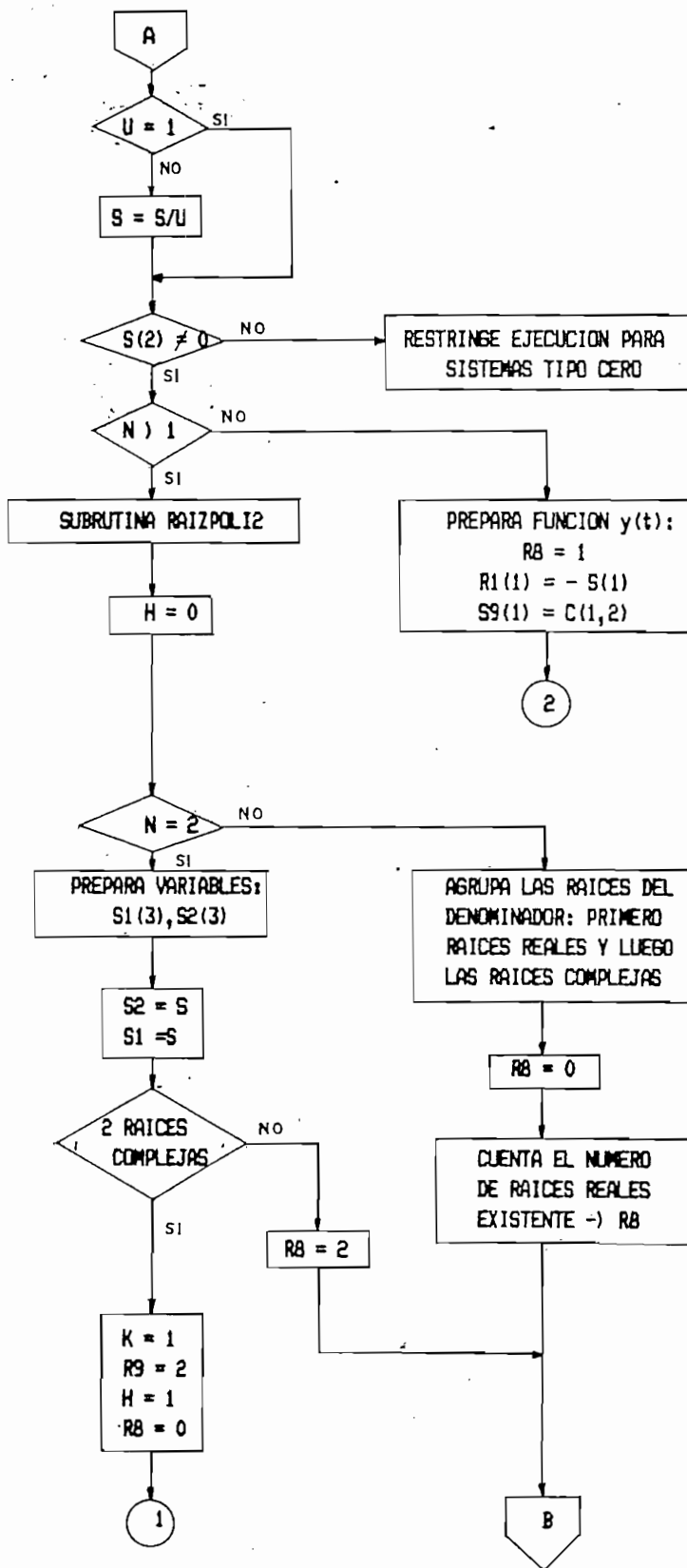
VARIABLES AUXILIARES: A\$,X\$,Y\$,G,I,J,K,K1,L,R3

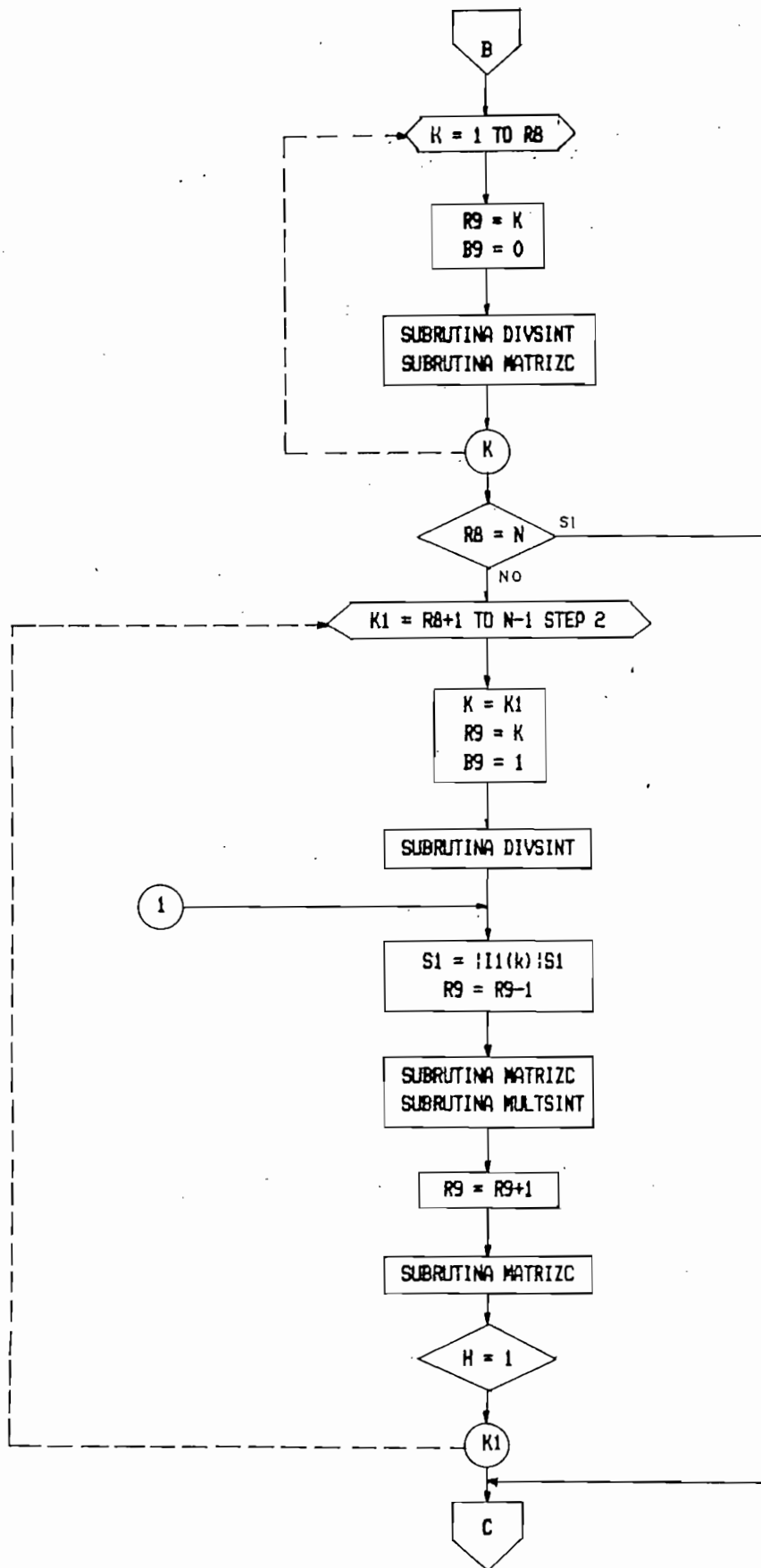
BANDERAS: T\$, B9, H, H4, H9, V, V6, V7, X0, X9.

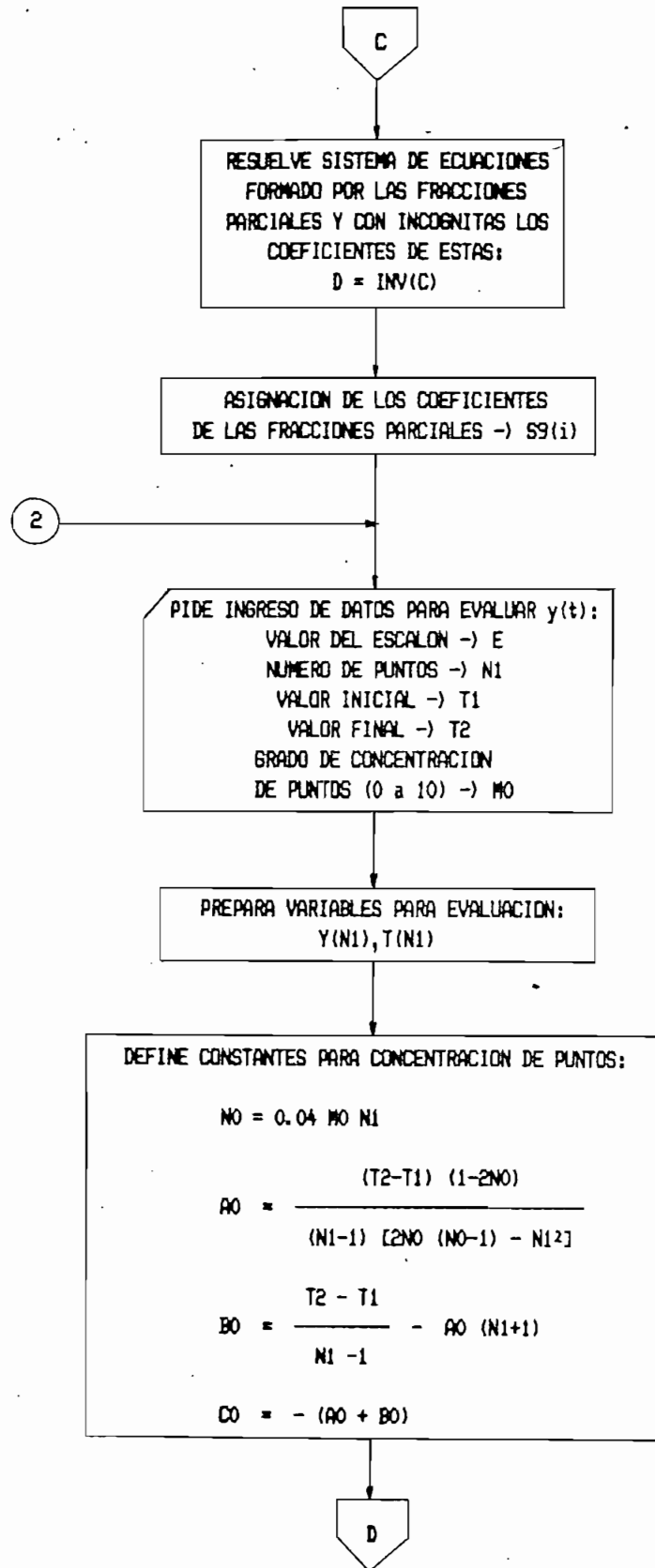
SUBROUTINA INCLUIDA: RAIZPOLI2 (Autor: Ing. Efraim Del Pino)

A.8. - DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA TRANSFORMACION INVERSA DE LAPLACE

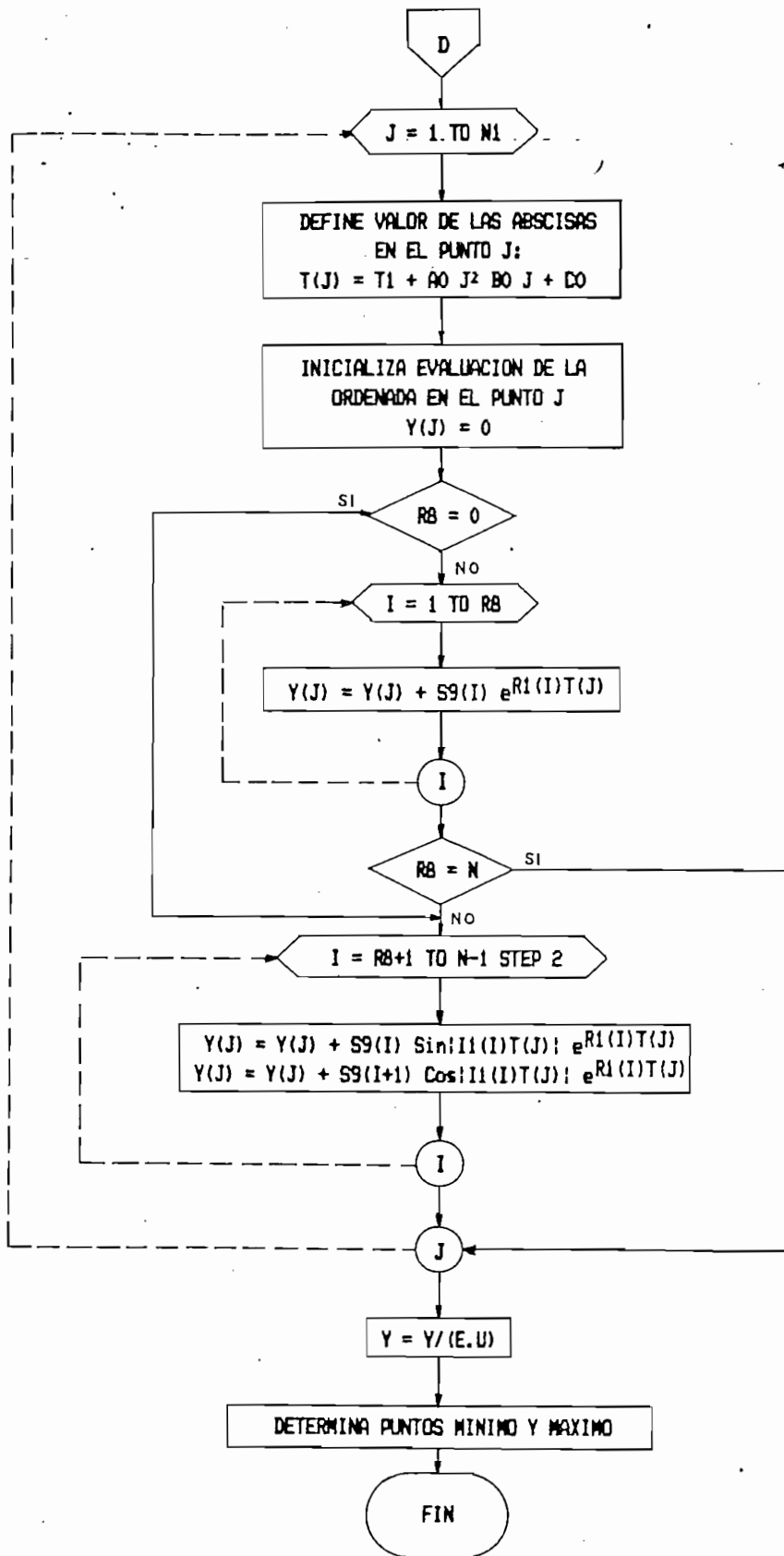




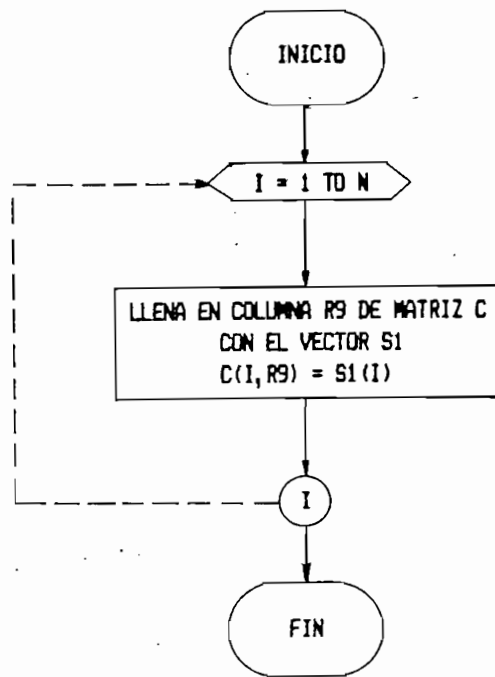




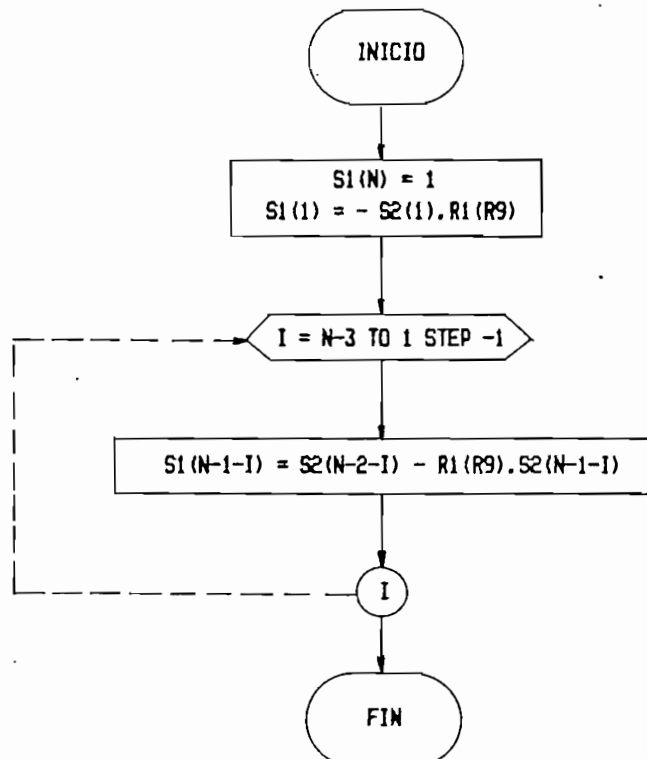




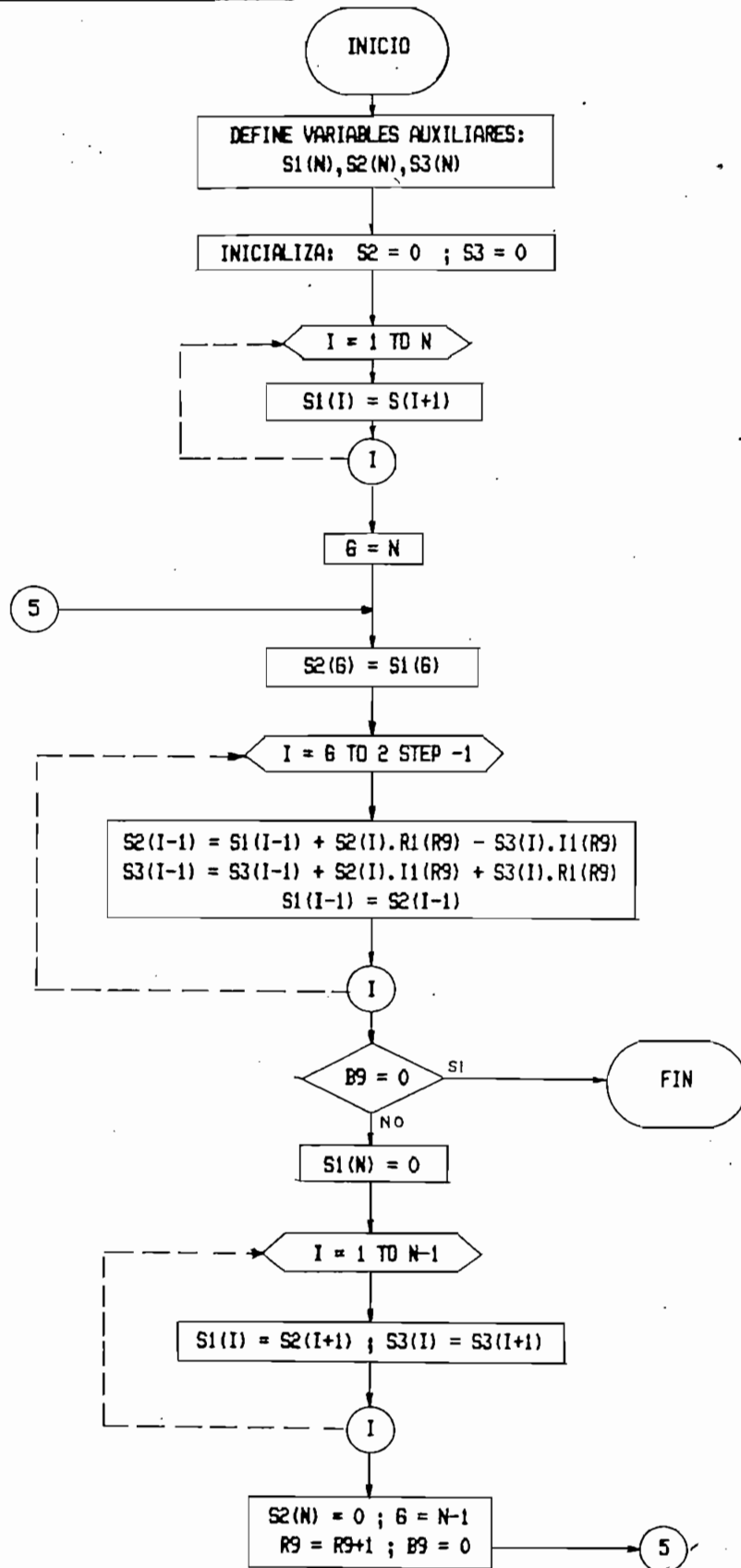
A.8.1.- DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINA MATRIZC



A.8.2.- DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINA MULTSINT



A.8.3.- DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINA DIVSINT



**LISTADO DEL PROGRAMA**

A.9.- LISTADO DEL PROGRAMA

```

1 REM PROGRAMA RESPUESTA DE UN SISTEMA LINEAL / [DUSBECK/FLMENU]
2 INIT
3 GO TO 1430
4 GO TO 100
8 IF H9<>1 THEN 100
9 X0=0
10 H0=2
11 GO TO 1810
12 IF H9<>1 THEN 100
13 H0=3
14 X0=0
15 GO TO 1810
16 IF H9<>1 THEN 100
17 H0=4
18 X0=0
19 GO TO 1810
20 IF H9<>1 THEN 100
21 H0=5
22 X0=0
23 GO TO 1810
24 IF H9<>1 THEN 100
25 H0=6
26 X0=0
27 GO TO 1810
28 IF H9<>1 THEN 100
29 H0=7
30 X0=0
31 GO TO 1810
32 IF H9<>1 THEN 100
33 H0=8
34 GO TO 1680

```

```

35 REM -----
36 REM |
37 REM |           ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
38 REM |
39 REM |           FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
40 REM |
41 REM |           DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA Y CONTROL
42 REM |
43 REM |
44 REM |
45 REM |
46 REM |           TESIS DE GRADO
47 REM |
48 IF H9<>1 THEN 100
49 H0=12
50 GO TO 1810
52 IF H9<>1 THEN 100
53 H0=13
54 GO TO 1810
56 IF H9<>1 THEN 100
57 H0=14
58 GO TO 1810
60 IF H9<>1 THEN 100
61 H0=15
62 GO TO 1810
64 IF H9<>1 THEN 100
65 H0=16
66 GO TO 1810
68 IF H9<>1 THEN 100
69 H0=17
70 GO TO 1810
71 REM |
72 REM |   *DISENO Y CONSTRUCCION DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD PARA
73 REM |
74 REM |   UNA MINI-TURBINA PELTON CON APLICACION AL LABORATORIO*
75 REM |
76 REM |
77 REM |
78 REM |
79 REM |
80 REM |           PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:
81 REM |
82 REM |           INGENIERO EN ELECTRONICA Y CONTROL
83 REM |
84 REM |
85 REM |
86 REM |           DANILO USBECK WANDEMBERG
87 REM |
88 REM |
89 REM |
90 REM |
91 REM |
92 REM |
93 REM |
94 REM |
95 REM |           QUITO, MARZO DE 1986
96 REM |
97 REM |
98 REM |
99 REM |
100 CALL "USERLIB", "DUSBECK"

```

```

110 REM PROGRAMA RESPUESTA DE UN SISTEMA LINEAL
120 REM
130 REM      [DUSBECK/FLMENU]
140 REM
150 REM      DANILO USBECK WANDEMBERG
160 REM
170 REM      30 de Mayo de 1985
180 REM
190 REM
200 REM PROGRAMA PARA OBTENER LA RESPUESTA A ESCALON DE
210 REM FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE SISTEMAS LINEALES
220 REM
230 REM METODO: TRANSFORMADA INVERSA DE LAPLACE PARA
240 REM      FUNCIONES POLINOMIALES EN FRACCIONES PARCIALES
250 REM
260 REM VARIABLES PRINCIPALES:
270 REM
280 REM      H0 --> Numero correspondiente a un subprograma seleccionado.
290 REM
300 REM      S --> Arreglo con coeficientes de  $D(s)$  en orden ascendente de
310 REM      potencias.
320 REM
330 REM      C --> Arreglo para coeficientes de  $N(s)$  y sistema de ecuacio-
340 REM      nes de fracciones parciales.
350 REM
360 REM      M --> Grado del numerador.
370 REM
380 REM      N --> Grado del denominador.
390 REM
400 REM      T,Y (X,Z) --> Arreglos para abscisa y ordenada de los puntos
410 REM      que definen una grafica.
420 REM
430 REM      U --> Factor de reduccion a la unidad del coeficiente del
440 REM      termino de mayor grado de  $D(s)$ .
450 REM
460 REM      E --> Valor del escalon.
470 REM
480 REM      N1 --> Cantidad de puntos para la densidad de la grafica.
490 REM
500 REM      T1,T2 --> Valores inicial y final de la abscisa.
510 REM
520 REM      M0 --> Grado de concentracion de puntos al margen izquierdo.
530 REM
540 REM      G$ --> Nombre del archivo de graficas.
550 REM
560 REM      Y3 --> Numero del registro de una grafica en un archivo.
570 REM
580 REM      H1 --> Grado maximo del numerador en un archivo.
590 REM
600 REM      H2 --> Grado maximo del denominador.
610 REM
620 REM      H5 --> Numero maximo de puntos por cada grafica en un archivo

```

```

630 REM
640 REM H6 --> Numero de graficas de capacidad reservada para un
650 REM archivo.
660 REM
670 REM U1,U2,U3,U4 --> Rangos de alcance de una grafica.
680 REM
690 REM R1,I1,R2,I2 --> Arreglos para polos y ceros.
700 REM
710 REM F7 --> Bandera de impresion en pantalla o en papel.
720 REM
730 REM F8 --> Bandera de grafizacion en pantalla o en papel.
740 REM
750 REM H7 --> Unidad del disco de datos.
760 REM
770 REM H8 --> Unidad del disco del programa.
780 REM
790 REM
800 REM VARIABLES AUXILIARES: A$,X$,Y$,G,I,J,K,K1,L,R3.
810 REM
820 REM
830 REM BANDERAS: T$,B9,H,H4,H9,V,U6,U7,X0,X9.
840 REM
850 REM
860 REM
870 REM
880 REM SUBROUTINA INCLUIDA: RAIZPOLI2 (Autor: Ins. Efrain Del Pino)
890 REM
900 IF H8<0-1 THEN 960
910 PRINT "LJJ PROGRAMA RESPUESTA DE UN SISTEMA LINEAL"
920 PRINT "JJJ UNIDAD DONDE ESTA EL DISCO DEL PROGRAMA: ";
930 INPUT H8
940 IF NOT(H8=0 OR H8=1 OR H8=2) THEN 3
950 H7=-1
960 PAGE
970 H9=1
980 PRINT USING 1000:
990 IMA/14T,"(F) KEY # 4 ---> Save and Print last Function ",BA,/30T,FA
1000 IMAGE/////14T,"Respuesta en Tiempo a EscalaH'n de"
1010 PRINT USING 1020:
1020 IMAGE 14T,"Funciones de Transferencia de Sistemas Lineales"
1030 PRINT USING 1040:
1040 IMAGE//14T,"METODO: Transformada Inversa de Laplace para"
1050 PRINT USING 1060:
1060 IMAGE 22T,"Funciones Polinomiales N(s)/D(s)"
1070 CALL "TIME",Z$
1080 PRINT USING 1090:Z$
1090 IMAGE///18T,"* * * M E N U ",FA," * * *"
1100 PRINT USING 1110:
1110 IMAGE/18T,"KEY # 1 ---> Return to Menu"
1120 GOSUB 1740
1130 PRINT USING 1140:" (SHIFT -> New Points to same Function)K"

```



```

1140 IMAGE 14T,"(F) KEY # 2 ---> Enter new Function"/30T,FA
1150 GOSUB 1740
1160 PRINT USING 1170:" (SHIFT -> Check Data)K"
1170 IMAGE/14T,"(F) KEY # 3 ---> Check last Function Graphic"/30T,FA
1180 GOSUB 1740
1190 PRI USI 990:"Graphics", (SHIFT -> Creating or Using other File)K"
1210 GOSUB 1740
1220 PRINT USING 1230:"and Data", (SHIFT -> Directory of Files)K"
1230 IMAGE/14T,"(F) KEY # 5 ---> Check any Function Graphic ",8A/30T,FA
1240 GOSUB 1740
1250 PRINT USING 1260:"Graphic", (SHIFT -> Draw a Function Set)K"
1260 IMA/14T,"(F) KEY # 6 ---> Draw some Functions in same ",7A,/30T,FA
1270 GOSUB 1740
1280 PRINT USING 1290:" (SHIFT -> Edit any Functions Set [FILE])K"
1290 IMA/14T,"(F) KEY # 7 ---> Edit any Function Graphic [DATA]"/30T,FA
1300 GOSUB 1740
1310 IF P7=51 THEN 1350
1320 PRINT USING 1330:"[OFF]"
1330 IMAGE/12T,FA,18T,"KEY # 8 ---> Printer(P) and Flas(F) ON/OFF"
1340 GO TO 1360
1350 PRINT USING 1330:" [ON]"
1360 GOSUB 1740
1370 PRINT USING 1380:
1380 IMAGE/56T,"DUW"
1390 CALL "UNIT",H8
1400 I9=0
1410 CLOSE
1420 END
1430 REM  CONDICIONES INICIALES DEL PROGRAMA
1440 P7=51
1450 H8=-1
1460 H7=-1
1470 N1=100
1480 T1=0
1490 T2=12
1500 E=1
1510 H4=1
1520 X1=1
1530 W1=0
1540 W2=12
1550 W3=0
1560 W4=3
1570 A1=1
1580 A2=0.5
1590 A3=0
1600 A4=0
1610 H0=0
1620 I9=0
1630 G#=" "

```

```

1640 W$= ' '
1650 M0=0
1660 N0=0
1670 GO TO 100
1680 REM            ***        TECLA 8        ***
1690 IF F7=51 THEN 1720
1700 F7=51
1710 GO TO 100
1720 F7=32
1730 GO TO 100
1740 REM SUBROUTINA AVISO DE ULTIMA TECLA USADA
1750 IF H0=0 THEN 1800
1760 I9=I9+1
1770 IF H0<>I9 THEN 1800
1780 PRINT USING 1790:
1790 IMAGE 'K',25T,'<'
1800 RETURN
1810 REM ----- LINEA PARA USO DE PROGRAMAS DESDE ARCHIVO -----
1820 IF H0<>12 THEN 1850
1830 H0=2
1840 X0=1
1850 IF H0<>13 THEN 1880
1860 H0=3
1870 X0=1
1880 IF H0<>14 THEN 1910
1890 H0=4
1900 X0=1
1910 IF H0<>15 THEN 1940
1920 H0=5
1930 X0=1
1940 IF H0<>16 THEN 1970
1950 H0=6
1960 X0=1
1970 IF H0<>17 THEN 2000
1980 H0=7
1990 X0=1
2000 IF X1=H0 THEN 2090
2010 DATA 'TECLA2','TECLA3','TECLA4','TECLA5','TECLA6','TECLA7'
2020 RESTORE 2010
2030 FOR J=2 TO H0
2040 READ X$
2050 NEXT J
2060 DELETE 2130,30000
2070 J=MEMORY
2080 APPEND X$;2120
2090 X1=H0
2100 GOSUB 2120
2110 GO TO 100
2120 REM -----CARGA DE PROGRAMAS-----
2130 REM

```

```

100 REM          ***   TECLA  2   ***
110 REM          ***   7-FEB-85   ***
120 CALL 'USERLIB', 'DUSBECK'
130 H9=0
140 PAGE
150 IF X0=1 THEN 1630
160 PRINT 'JJINGRESAR NUEVA FUNCION'
170 PRINT USING 180:
180 IMAGE ///15T, 'INGRESE FUNCION DE TRANSFERENCIA  N(s)/D(s)'
190 PRINT USING 200:
200 IMAGE 10T, 58('-')
210 PRINT USING 220:
220 IMA  12T, 'DATOS DEL POLINOMIO N(s)' 41T, 'DATOS DEL POLINOMIO D(s)'
230 PRINT USING 240:
240 IMAGE 12T, 'GRADO = ', S
250 INPUT M
260 M=ABS(M)
270 PRINT USING 280:
280 IMAGE 'K', 41T, 'GRADO = ', S
290 INPUT N
300 N=ABS(N)
310 IF M<=N THEN 370
320 PRINT 'JJEL SISTEMA NO PODRA SER RESUELTO EN ESTE PROGRAMA DEBIDO A'
330 PRINT 'QUE EL GRADO DE N(s) ES MAYOR QUE EL GRADO DE D(s)'
340 PRINT 'JJJIIPresione [RETURN] para continuar';
350 INPUT X$
360 GO TO 160
370 DELETE S,C,D,S9
380 N=N+1
390 DIM S(N+1),C(N,N+1),D(N,N+1),S9(N)
400 C=0
410 S=0
420 PRINT USING 430:
430 IMAGE 12T, 'COEFICIENTES:'
440 FOR I=M+1 TO 1 STEP -1
450 PRINT USING 460:I-1
460 IMAGE 12T, 'S^', FD, ' = ', S
470 INPUT C(I,N+1)
480 NEXT I
490 IF M=0 THEN 590
500 DELETE A,R2,I2
510 DIM A(M+1),R2(M),I2(M)
520 FOR I=1 TO M+1
530 A(I)=C(M+2-I,N+1)
540 NEXT I
550 N9=M
560 GOSUB 2500
570 R2=R1
580 I2=I1
590 DELETE A
600 DIM A(N+1)
610 FOR I=1 TO M+2

```

```

620 PRINT "KK"
630 NEXT I
640 PRINT USING 650:
650 IMAGE 41T,"COEFICIENTES:"
660 FOR I=N+1 TO 2 STEP -1
670 PRINT USING 680:I-2
680 IMAGE 41T,"S",FD," = ",S
690 INPUT S(I)
700 NEXT I
710 U=S(N+1)
720 IF U=1 THEN 740
730 S=S/U
740 IF S(2) <> 0 THEN 800
750 PRINT "LIJJJJEL SISTEMA NO PODRA SER RESUELTO EN ESTE PROGRAMA"
760 PRINT "JIPUESTO QUE SE RESTRINGE PARA SISTEMAS TIPO CERO"
770 PRINT "JJJIIPRESIONE [RETURN] PARA CONTINUAR"
780 INPUT X$
790 RETURN
800 IF N>1 THEN 870
810 R8=1
820 DELETE R1
830 DIM R1(1)
840 R1(1)=-S(1)
850 S9(1)=C(1,2)
860 GO TO 1520
870 N9=N
880 FOR I=1 TO N+1
890 J=N+2-I
900 A(I)=S(J)
910 NEXT I
920 GOSUB 2500
930 H=0
940 IF N=2 THEN 1120
950 REM ORDENAMIENTO DE RAICES
960 FOR I=2 TO N
970 IF ABS(I1(I))=>1.0E-10 THEN 1050
980 R3=R1(I)
990 FOR J=I-1 TO 1 STEP -1
1000 R1(J+1)=R1(J)
1010 I1(J+1)=I1(J)
1020 NEXT J
1030 R1(1)=R3
1040 I1(1)=0
1050 NEXT I
1060 R8=0
1070 FOR I=1 TO N
1080 IF ABS(I1(I)) <> 0 THEN 1100
1090 R8=R8+1
1100 NEXT I
1110 GO TO 1240
1120 DELETE S1,S2
1130 DIM S1(3),S2(3)

```

```

1140 S2=S
1150 S1=S
1160 IF ABS(I1(1))<=1.0E-10 THEN 1220
1170 K=1
1180 R9=2
1190 H=1
1200 R8=0
1210 GO TO 1380
1220 R8=2
1230 REM FRACCIONES PARCIALES LINEALES
1240 FOR K=1 TO R8
1250 R9=K
1260 B9=0
1270 GOSUB 2230
1280 GOSUB 2180
1290 NEXT K
1300 IF R8=N THEN 1480
1310 REM FRACCIONES PARCIALES CUADRATICAS
1320 FOR K1=R8+1 TO N-1 STEP 2
1330 K=K1
1340 R9=K
1350 B9=1
1360 GOSUB 2230
1370 REM PRIMERA PARTE FRACCION CUADRATICA
1380 S1=ABS(I1(K))*S1
1390 R9=R9-1
1400 GOSUB 2180
1410 REM SEGUNDA PARTE FRACCION CUADRATICA
1420 GOSUB 2110
1430 R9=R9+1
1440 GOSUB 2180
1450 IF H=1 THEN 1480
1460 NEXT K1
1470 REM SOLUCION SISTEMA DE ECUACIONES
1480 D=INV(C)
1490 FOR I=1 TO N
1500 S9(I)=D(I,N+1)
1510 NEXT I
1520 REM FUNCIONES DE Y(t) (EVALUACION)
1530 IF F7=32 THEN 1630
1540 PRINT *LJJIVALOR DE ESCALON = *;E
1550 PRINT *JINUMERO DE PUNTOS = *;N1
1560 PRINT *JIVALOR INICIAL      = *;T1
1570 PRINT *JIVALOR FINAL        = *;T2
1580 PRINT *JIGRADO CONCENTRACION PUNTOS = *;M0
1590 PRINT USING 1600:
1600 IMAGE /25T,*DESEA CAMBIAR DATOS? (SI o NO): *,S
1610 INPUT X$
1620 IF NOT(X$='S' OR X$='SI') THEN 1770
1630 PRINT *JJIVALOR DE ESCALON = *;
1640 INPUT E
1650 PRINT *JINUMERO DE PUNTOS = *;

```

```

1660 INPUT N1
1670 PRINT 'JIVALOR INICIAL = ';
1680 INPUT T1
1690 PRINT 'JIVALOR FINAL = ';
1700 INPUT T2
1710 PRINT 'JIGRADO CONCENTRACION PUNTOS (0 a 10) = ';
1720 INPUT M0
1730 M0=ABS(M0)
1740 IF M0<=10 THEN 1760
1750 M0=10
1760 N0=0.04*M0*N1
1770 DELETE Y,T
1780 DIM Y(N1),T(N1)
1790 A0=(T2-T1)*(1-2*N0)/((N1-1)*(2*N0*(N0-1)-N1*N1))
1800 B0=(T2-T1)/(N1-1)-A0*(N1+1)
1810 C0=-A0-B0
1820 SET RADIANS
1830 FOR J=1 TO N1
1840 T(J)=T1+A0*J*J+B0*J+C0
1850 Y(J)=0
1860 IF R8=0 THEN 1930
1870 FOR I=1 TO R8
1880 F=R1(I)*T(J)
1890 IF F<-700 THEN 1910
1900 Y(J)=Y(J)+S9(I)*EXP(F)
1910 NEXT I
1920 IF R8=N THEN 1990
1930 FOR I=R8+1 TO N-1 STEP 2
1940 F=R1(I)*T(J)
1950 IF F<-700 THEN 1980
1960 Y(J)=Y(J)+S9(I)*SIN(ABS(I1(I)*T(J)))*EXP(F)
1970 Y(J)=Y(J)+S9(I+1)*COS(ABS(I1(I))*T(J))*EXP(F)
1980 NEXT I
1990 NEXT J
2000 Y=Y*(E/U)
2010 U1=1.0E+100
2020 U2=-U1
2030 FOR I=1 TO N1
2040 U1=U1 MIN Y(I)
2050 U2=U2 MAX Y(I)
2060 NEXT I
2070 U3=T1
2080 U4=T2
2090 H4=0
2100 RETURN
2110 REM SUB. MULTIPLICACION SINTETICA
2120 S1(N)=1
2130 S1(1)=-S2(1)*R1(R9)
2140 FOR I=N-3 TO 0 STEP -1
2150 S1(N-1-I)=S2(N-2-I)-R1(R9)*S2(N-1-I)
2160 NEXT I
2170 RETURN
2180 REM SUB. LLENADO MATRIZ COEFICIENTES

```

```

2190 FOR I=1 TO N
2200 C(I,R9)=S1(I)
2210 NEXT I
2220 RETURN
2230 REM SUBROUTINA DIVISION SINTETICA COMPLEJA
2240 DELETE S1,S2,S3
2250 DIM S2(N),S3(N),S1(N)
2260 S3=0
2270 S2=0
2280 FOR I=1 TO N
2290 S1(I)=S(I+1)
2300 NEXT I
2310 G=N
2320 S2(G)=S1(G)
2330 FOR I=G TO 2 STEP -1
2340 S2(I-1)=S1(I-1)+S2(I)*R1(R9)-S3(I)*I1(R9)
2350 S3(I-1)=S3(I-1)+S2(I)*I1(R9)+S3(I)*R1(R9)
2360 S1(I-1)=S2(I-1)
2370 NEXT I
2380 IF B9=0 THEN 2490
2390 S1(N)=0
2400 FOR I=1 TO N-1
2410 S1(I)=S2(I+1)
2420 S3(I)=S3(I+1)
2430 NEXT I
2440 S2(N)=0
2450 G=N-1
2460 R9=R9+1
2470 B9=0
2480 GO TO 2320
2490 RETURN
2500 REM               RAIZPOLI2
2510 REM
2520 REM       SUB. PARA SOLUCION DE ECUACIONES POLINOMIALES
2530 REM       METODO: DESCENSO MAS PRONUNCIADO CON ESCALAMIENTO DE RAICE
2540 REM       31 DE MAYO DE 1980
2550 REM       ING. EFRAIN DEL PINO V.
2560 REM
2570 O0=N9
2580 DELETE Q0,Q1,R1,I1,Q2,Q3,Q4,Q5
2590 DIM Q0(O0),Q1(O0),R1(O0),I1(O0)
2600 Q6=0
2610 O1=1.0E-10
2620 O2=O1^2
2630 R1=0
2640 I1=0
2650 FOR Q7=1 TO O0
2660 Q0(Q7)=A(Q7+1)/A(1)
2670 NEXT Q7
2680 IF O0>0 THEN 2700
2690 RETURN
2700 IF Q0(O0)<>0 THEN 2740

```

```

2710 Q6=Q6+1
2720 Q0=Q0-1
2730 GO TO 2680
2740 IF Q0<>1 THEN 2780
2750 Q6=Q6+1
2760 R1(Q6)=-Q0(Q0)
2770 RETURN
2780 IF Q0<>2 THEN 3100
2790 Q8=-Q0(1)/2
2800 Q6=Q6+1
2810 Q3=Q8*Q8-Q0(2)
2820 IF Q3<0 THEN 2870
2830 Q3=SQR(Q3)
2840 R1(Q6)=Q8+Q3
2850 R1(Q6+1)=Q8-Q3
2860 RETURN
2870 R1(Q6)=Q8
2880 R1(Q6+1)=R1(Q6)
2890 I1(Q6)=SQR(-Q3)
2900 I1(Q6+1)=-I1(Q6)
2910 RETURN
2920 REM SUB. EVALUACION DE F(Z)=Q2+ JQ3
2930 Q2=1
2940 Q3=0
2950 FOR Q7=1 TO Q0
2960 Q3=Q2*Q8-Q3*Q9+Q1(Q7)
2970 Q3=Q3*Q8+Q2*Q9
2980 Q2=Q3
2990 NEXT Q7
3000 RETURN
3010 REM SUB. EVAL. F'(Z)=Q4 + JQ5
3020 Q4=Q0
3030 Q5=0
3040 FOR Q7=1 TO Q0-1
3050 Q3=Q4*Q8-Q5*Q9+(Q0-Q7)*Q1(Q7)
3060 Q5=Q5*Q8+Q4*Q9
3070 Q4=Q3
3080 NEXT Q7
3090 RETURN
3100 REM DESCENSO MAS PRONUNCIADO
3110 Q3=ABS(Q0(Q0))
3120 DIM Q0(Q0),Q1(Q0)
3130 IF Q3=1 THEN 3210
3140 Q6=Q3^(1/Q0)
3150 Q3=1
3160 FOR Q7=1 TO Q0
3170 Q3=Q3*Q6
3180 Q1(Q7)=Q0(Q7)/Q3
3190 NEXT Q7
3200 GO TO 3230
3210 Q1=Q0
3220 Q6=1

```



```

3230 Q8=0.7
3240 Q9=0.6
3250 GOSUB 2920
3260 O7=Q2*Q2+Q3*Q3
3270 IF O7<O2 THEN 3470
3280 GOSUB 3010
3290 O3=Q4*Q4+Q5*Q5
3300 O4=-(Q2*Q4+Q3*Q5)/O3
3310 O5=(Q2*Q5-Q3*Q4)/O3
3320 Q8=Q8+O4
3330 Q9=Q9+O5
3340 GOSUB 2920
3350 O8=Q2*Q2+Q3*Q3
3360 IF O8<O2 THEN 3450
3370 IF O8<O7 THEN 3430
3380 Q8=Q8-O4
3390 Q9=Q9-O5
3400 O4=0.8*O4
3410 O5=0.8*O5
3420 GO TO 3320
3430 O7=O8
3440 GO TO 3280
3450 IF ABS(O4)<O1 AND ABS(O5)<O1 THEN 3470
3460 GO TO 3430
3470 Q8=Q8*O6
3480 Q9=Q9*O6
3490 IF ABS(Q9)>O1 THEN 3510
3500 Q9=0
3510 Q6=Q6+1
3520 R1(Q6)=Q8
3530 I1(Q6)=Q9
3540 IF Q9=0 THEN 3680
3550 Q6=Q6+1
3560 R1(Q6)=Q8
3570 I1(Q6)=-Q9
3580 O9=-2*Q8
3590 R9=Q8*Q8+Q9*Q9
3600 Q0(1)=Q0(1)-O9
3610 Q0(2)=Q0(2)-O9*Q0(1)-R9
3620 IF O0<5 THEN 3660
3630 FOR Q7=3 TO O0-2
3640 Q0(Q7)=Q0(Q7)-O9*Q0(Q7-1)-R9*Q0(Q7-2)
3650 NEXT Q7
3660 O0=O0-2
3670 GO TO 2740
3680 O3=1
3690 FOR Q7=1 TO O0-1
3700 O3=O3*Q8+Q0(Q7)
3710 Q0(Q7)=O3
3720 NEXT Q7
3730 O0=O0-1
3740 GO TO 2740

```

```

100 REM      ***  TECLA  3      ***
110 REM      ***  7-FEB-85      ***
120 H9=0
130 IF X0=1 THEN 1130
140 VIEWPORT 25,130,10,94
150 PAGE
160 IF F7=51 THEN 490
170 GO TO 680
180 PRINT USING 190:
190 IMAGE/25T,"Ramos de Escala:",/15T,44("-")
200 PRINT USING 210:
210 IMAGE/18T,"Horizontal:",40T,"Vertical:"
220 PRINT USING 230:
230 IMAGE 23T,"Min. = ",S
240 INPUT W1
250 PRINT USING 260:
260 IMAGE 23T,"Max. = ",S
270 INPUT W2
280 PRINT USING 290:
290 IMAGE "KK",43T,"Min. = ",S
300 INPUT W3
310 PRINT USING 320:
320 IMAGE 43T,"Max. = ",S
330 INPUT W4
340 PRINT USING 350:
350 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Horizontal = ",S
360 INPUT A1
370 PRINT USING 380:
380 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Vertical = ",S
390 INPUT A2
400 PRINT USING 410:
410 IMAGE/25T,"Punto de Cruce de los Ejes:"
420 PRINT USING 430:
430 IMAGE 18T,"Horizontal = ",S
440 INPUT A3
450 PRINT USING 460:
460 IMAGE "K",40T,"Vertical = ",S
470 INPUT A4
480 GO TO 680
490 PRINT USING 190:
500 PRINT USING 210:
510 PRINT USING 520:W1,W3
520 IMAGE 23T,"Min. = ",FD.2D,43T,"Min. = ",FD.2D
530 PRINT USING 540:W2,W4
540 IMAGE 23T,"Max. = ",FD.2D,43T,"Max. = ",FD.2D
550 PRINT USING 560:A1
560 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Horizontal = ",FD.2D
570 PRINT USING 580:A2
580 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Vertical = ",FD.2D
590 PRINT USING 410:
600 PRINT USING 610:A3,A4

```

```

610 IMAGE 18T,"Horizontal = ",FD.2D,40T,"Vertical = ",FD.2D
620 PRINT USING 630:"HORIZONTAL",U3,U4,"VERTICAL",U1,U2
630 IMAGE/2(FA," ;      MiH'nimo = ",2E,5X,"MaH'ximo = ",2E/)
640 PRINT USING 650:
650 IMAGE/30T,"DESEA CAMBIAR DATOS? (SI o NO) : ",S
660 INPUT X$
670 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 180
680 PAGE
690 WINDOW W1,W2,W3,W4
700 MOVE W1,W3
710 DRAW W2,W3
720 DRAW W2,W4
730 DRAW W1,W4
740 DRAW W1,W3
750 AXIS A1,A2,A3,A4
760 MOVE W1,W3
770 IF W1<1.0E-4 AND W1<>0 AND W1>0 THEN 930
780 IF W1>-1.0E-4 AND W1<0 OR W2>10000 THEN 930
790 IF W3<1.0E-4 AND W3<>0 AND W3>0 THEN 930
800 IF W3>-1.0E-4 AND W3<0 OR W4>10000 THEN 930
810 PRINT USING 820:W3,W1,W2
820 IMAGE/,"K",1T,FD.2D/15T,FD.2D,63T,FD.2D
830 PRINT USING 840:"VERTICAL : ",A2,"HORIZONTAL : ",A1
840 IMAGE FA,FD.2D," uni/div",10X,FA,FD.2D," uni/div"
850 IF A3=W1 AND A4=W3 OR (A3=W1 AND A4=W4) THEN 890
860 MOVE A3,A4
870 PRINT USING 880:A3,A4
880 IMAGE/"KH = ",FD.2D/"V = ",FD.2D
890 MOVE W1,W4
900 PRINT USING 910:W4
910 IMAGE/FD.2D
920 GO TO 1040
930 PRINT USING 940:W3,W1,W2
940 IMAGE/,"K",1T,2E/15T,2E,63T,2E
950 PRINT USING 960:"VERTICAL : ",A2,"HORIZONTAL : ",A1
960 IMAGE FA,2E," uni/div",10X,FA,2E," uni/div"
970 IF A3=W1 AND A4=W3 OR (A3=W1 AND A4=W4) THEN 1010
980 MOVE A3,A4
990 PRINT USING 1000:A3,A4
1000 IMAGE/"KH = ",2E/"V = ",2E
1010 MOVE W1,W4
1020 PRINT USING 1030:W4
1030 IMAGE/2E
1040 HOME
1050 PRINT "ICHEQUED DE LA ULTIMA FUNCION INGRESADÁ"
1060 MOVE T(1),Y(1)
1070 DRAW T,Y
1080 HOME
1090 PRINT USING 1100:
1100 IMAGE/30X,"[RETURN] PARA CONTINUAR"S
1110 INPUT X$

```

```

1120 RETURN
1130 REM SUBROUTINA PARA TABLA DE DATOS
1140 CALL "TIME",Z$
1150 PRINT "LJESCUELA POLITECNICA NACIONAL"
1160 PRINT "FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA"
1170 PRINT USING 1180:"SISTEMAS DE CONTROL", "FECHA : ",Z$
1180 IMAGE FA,27X,FA,18A
1190 PRINT USING 1200:
1200 IMAGE 72("-")
1210 PRINT "JGrado del Numerador           ";M
1220 PRINT "Grado del Denominador         ";N-1
1230 PRINT "Valor del EscaloH'n              ";E
1240 PRINT "JCoeficientes del Numerador :J"
1250 IF M=0 THEN 1300
1260 FOR I=1 TO M
1270 PRINT USING 1280:"          S**",M-I+1
1280 IMAGE FA,FD,S
1290 NEXT I
1300 PRINT "          S**0"
1310 FOR I=M+1 TO 1 STEP -1
1320 PRINT USING 1330:C(I,N+1)
1330 IMAGE " ",6D,4D,S
1340 NEXT I
1350 PRINT " "
1360 PRINT "JJCoeficientes del Denominador :J"
1370 FOR I=1 TO N-1
1380 PRINT USING 1280:"          S**",N-I
1390 NEXT I
1400 PRINT "          S**0"
1410 FOR I=N TO 1 STEP -1
1420 PRINT USING 1330:S(I+1)*U
1430 NEXT I
1440 PRINT " "
1450 PRINT "JJJPolos y Ceros de la FuncioH'n : "
1460 PRINT USING 1470:"Parte Real", "Parte Imasinaris", "Tipo"
1470 IMAGE/4X,FA,8X,FA,9X,FA,/
1480 FOR I=1 TO N
1490 PRINT USING 1500:R1(I),I1(I), "POLO"
1500 IMAGE 5X,5D,2D,12X,5D,2D,14X,4A
1510 NEXT I
1520 IF M=0 THEN 1090
1530 FOR I=1 TO M
1540 PRINT USING 1500:R2(I),I2(I), "CERO"
1550 NEXT I
1560 GO TO 1090

```

```

100 REM                      *** TECLA - 4 ***
110 REM                      *** 4-FEBRERO/85 ***
120 PAGE
130 H9=0
140 CALL "USERLIB", "DUSBECK/DATA"
150 IF X0=1 THEN 190
160 IF H4=1 THEN 1220
170 PRINT "JJGUARDAR E IMPRIMIR DATOS DE ULTIMA FUNCION INGRESADA"
180 IF H7<=-1 THEN 230
190 PRINT "JJUNIDAD DONDE ESTA EL DISCO DE DATOS : ";
200 INPUT H7
210 PRINT "JJNOMBRE DEL ARCHIVO DE GRAFICOS : ";
220 INPUT G$
230 CALL "UNIT",H7
240 CALL "MOUNT",H7,X$
250 CALL "FILE",H7,G$,X$
260 IF NOT(X$="") THEN 510
270 PRINT "JJJNO EXISTE EL ARCHIVO : ";G$
280 PRINT "JJDESEA CREARLO ? (SI o NO) : ";
290 DELETE X$
300 INPUT X$
310 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 340
320 H7=-1
330 RETURN
340 PRINT "LJJNUMERO DE GRAFICAS A GUARDARSE (APROXIMADO) : ";
350 INPUT H6
360 PRINT "JNUMERO DE PUNTOS PARA CADA GRAFICA (MAXIMO) : ";
370 INPUT H5
380 PRINT "JGRADO DEL NUMERADOR (MAXIMO) : ";
390 INPUT H1
400 PRINT "JGRADO DEL DENOMINADOR (MAXIMO) : ";
410 INPUT H2
420 PRINT "JJTITULO PRINCIPAL (MAXIMO 62 CARACTERES) : "
430 PRINT USING 440:
440 IMAGE 63T,"<H--K"
450 INPUT V$
460 CREATE G$;H6,H5*20+30*(H1+H2)+170
470 OPEN G$;1,"F",X$
480 WRITE #1,1:H1,H2,H5,V$
490 CLOSE 1
500 GO TO 550
510 CALL "UNIT",H7
520 OPEN G$;1,"F",X$
530 READ #1,1:H1,H2,H5,V$
540 CLOSE 1
550 DELETE X$
560 DIM X$(300)
570 CALL "FILE",H7,G$,X$
580 IF NOT(H5<N1) THEN 640
590 DELETE X$
600 PRINT "LJJLA GRAFICA TIENE EXCESIVOS PUNTOS PARA ESTE ARCHIVO"

```

```

610 PRINT "JJJII[RETURN] PARA CONTINUAR"
620 INPUT X$
630 RETURN
640 IF NOT(M>H1 AND N>H2) THEN 680
650 PRI "LJJGRADO DEL NUMERADOR y/o DENOMINADOR MAYOR AL ESPECIFICADO";
660 PRINT " PARA ESTE ARCHIVO"
670 GO TO 610
680 Y$=SEG(X$,86,6)
690 Y1=VAL(Y$)
700 Y$=SEG(X$,148,6)
710 Y2=VAL(Y$)
720 Y3=Y1/Y2+1
730 DELETE X$,X,Z,S4,R4,I4,S5,R5,I5
740 IF H1=0 THEN 760
750 DIM R4(H1),I4(H1)
760 DIM X(H5),Z(H5),S4(H1+1),S5(H2+1),R5(H2+1),I5(H2+1)
770 FOR I=1 TO N1
780 X(I)=T(I)
790 Z(I)=Y(I)
800 NEXT I
810 FOR I=N1 TO H5
820 X(I)=T(N1)
830 Z(I)=Y(N1)
840 NEXT I
850 S4=0
860 R4=0
870 I4=0
880 S5=0
890 R5=0
900 I5=0
910 FOR I=1 TO M+1
920 S4(I)=C(I,N+1)
930 IF I=M+1 THEN 960
940 R4(I)=R2(I)
950 I4(I)=I2(I)
960 NEXT I
970 FOR I=1 TO N
980 S5(I)=S(I+1)
990 R5(I)=R1(I)
1000 I5(I)=I1(I)
1010 NEXT I
1020 PRI "LJINGRESE SUBTITULO PARA ESTA GRAFICA (Max. 50 caracteres)
1030 PRINT USING 1040:
1040 IMAGE 51T,"<H--K"
1050 INPUT H$
1060 H$=" "&H$
1070 H$=G$&H$
1080 H$="ARCHIVO : "&H$
1090 PRINT "JJJJLOS DATOS SE GUARDARAN EN:"
1100 PRINT "JIREGISTRO : ";Y3
1110 PRINT "IARCHIVO : ";G$

```

```

1120 PRINT "UNIDAD : ";H7
1130 PRINT "¿IISE PROCEDE? (SI o NO) : ";
1140 INPUT X$
1150 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 190
1160 CALL "UNIT",H7
1170 CALL "MOUNT",H7,X$
1180 OPEN G$;1,"F",X$
1190 WRITE #1,Y3;X,Z,U1,U2,U3,U4,M,N,U,E,S4,R4,I4,S5,R5,I5,H$
1200 CLOSE 1
1210 IF P7=32 THEN 1240
1220 PRINT "LJJJJJJIPREPARE LA IMPRESORA (RETURN)";
1230 INPUT X$
1240 CALL "TIME",Z$
1250 PRINT @F7:"LJESCUELA POLITECNICA NACIONAL"
1260 PRINT @F7:"FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA"
1270 PRINT @F7: USING 1280:"SISTEMAS DE CONTROL","FECHA : ",Z$
1280 IMAGE FA,27X,FA,18A
1290 PRINT @F7: USING 1300:V$
1300 IMAGE/"TITULO : ",60A
1310 PRINT @F7: USING 1320:"REGISTRO : ",Y3,H$
1320 IMAGE/FA,FD,/72A
1330 PRINT @F7: USING 1340:
1340 IMAGE 72("-")
1350 PRINT @F7:"JJGrado del Numerador ";M
1360 PRINT @F7:"Grado del Denominador ";N-1
1370 PRINT @F7:"Valor del EscaloH'n ";E
1380 PRINT @F7:"JJCoeficientes del Numerador :J"
1390 IF M=0 THEN 1440
1400 FOR I=1 TO M
1410 PRINT @F7: USING 1420:" S**",M-I+1
1420 IMAGE FA,FD,S
1430 NEXT I
1440 PRINT @F7:" S**0"
1450 FOR I=M+1 TO 1 STEP -1
1460 PRINT @F7: USING 1470:S4(I)
1470 IMAGE " ",6D,4D,S
1480 NEXT I
1490 PRINT @F7:" "
1500 PRINT @F7:"JJCoeficientes del Denominador :J"
1510 FOR I=1 TO N-1
1520 PRINT @F7: USING 1420:" S**",N-I
1530 NEXT I
1540 PRINT @F7:" S**0"
1550 FOR I=N TO 1 STEP -1
1560 PRINT @F7: USING 1470:S5(I)*U
1570 NEXT I
1580 PRINT @F7:" "
1590 PRINT @F7:"JJJJJPolos y Ceros de la FuncioH'n : "
1600 PRINT @F7: USING 1610:"Parte Real","Parte Imaginaria","Tipo"
1610 IMAGE/4X,FA,8X,FA,9X,FA,/
1620 FOR I=1 TO N

```

```
1630 PRINT @P7: USING 1640:R5(I),I5(I), "POLO"  
1640 IMAGE 5X,5D,2D,12X,5D,2D,14X,4A  
1650 NEXT I  
1660 IF M=0 THEN 1700  
1670 FOR I=1 TO M  
1680 PRINT @P7: USING 1640:R4(I),I4(I), "CERO"  
1690 NEXT I  
1700 H4=1  
1710 IF P7=32 THEN 610  
1720 RETURN
```



```

100 REM                                     ***  TECLA  -  5  ***
110 REM                                     ***  7-FEBRERO/85  ***
120 H9=0
130 IF X0=1 THEN 2270
140 PRINT "LJJCHEQUED DE CUALQUIER GRAFICA DESDE ARCHIVO:"
150 PRINT "JJIELEGIR ALGUNA OPCION:"
160 PRINT "JJITABLA ----> 1"
170 PRINT "JIGRAFICO --> 2"
180 PRINT "JIAMBOS ----> 3"
190 PRINT "JICRETURN] -> 0 oH' >3"
200 PRINT "JJIELECCION: ";
210 INPUT X9
220 IF NOT(X9=1 OR X9=2 OR X9=3) THEN 610
230 IF H7=-1 OR G$=" " THEN 300
240 IF F7=32 THEN 300
250 PRINT "JJUNIDAD DONDE ESTA EL DISCO DE DATOS : ";H7
260 PRINT "JNOMBRE DEL ARCHIVO DE GRAFICAS : ";G$
270 PRINT "JJIDESEA CAMBIAR DATOS (SI o NO) : ";
280 INPUT X$
290 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 340
300 PRINT "JJUNIDAD DEL DISCO DE DATOS : ";
310 INPUT H7
320 PRINT "JJNOMBRE DEL ARCHIVO : ";
330 INPUT G$
340 CALL "MOUNT",H7,X$
350 CALL "UNIT",H7
360 A$="DATA/"&G$
370 OPEN A$;1,"F",X$
380 READ #1,1:H1,H2,H5,V$
390 DELETE X$
400 DIM X$(300)
410 CALL "FILE",H7,A$,X$
420 Y$=SEG(X$,86,6)
430 Y1=VAL(Y$)
440 Y$=SEG(X$,148,6)
450 Y2=VAL(Y$)
460 Y4=Y1/Y2+1
470 DELETE X$
480 DELETE X,Z,S4,R4,I4,S5,R5,I5
490 IF H1=0 THEN 510
500 DIM R4(H1),I4(H1)
510 DIM X(H5),Z(H5),S4(H1+1),S5(H2+1),R5(H2+1),I5(H2+1)
520 PRINT "LJJJJJINGRESE NUMERO DEL REGISTRO ( #<=1 --H> [RETURN] ) : "
530 INPUT Y3
540 IF Y3<=1 THEN 610
550 IF Y4>Y3 THEN 620
560 PRINT "JJNO EXISTE EL REGISTRO : ";Y3
570 PRINT "JJIDESEA REGRESAR AL MENU ? (SI o NO) : ";
580 INPUT X$
590 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 610
600 GO TO 520
610 RETURN

```

```

620 READ #1,Y3:X,Z,U1,U2,U3,U4,M,N,U,E,S4,R4,I4,S5,R5,I5,H#
630 IF X9=2 THEN 780
640 PRINT 'JJDESEA IMPRESION EN PAPEL? (SI o NO) : ';
650 INPUT X#
660 IF NOT(X#='S' OR X#='SI') THEN 720
670 IF F7=51 THEN 770
680 F7=51
690 GOSUB 1780
700 F7=32
710 GO TO 780
720 IF F7=32 THEN 770
730 F7=32
740 GOSUB 1780
750 F7=51
760 GO TO 780
770 GOSUB 1780
780 IF X9=1 THEN 520
790 VIEWPORT 25,130,10,94
800 PAGE
810 IF F7=51 THEN 1140
820 GO TO 1330
830 PRINT USING 840:
840 IMAGE/25T,'Rangos de Escala:',/15T,44("-")
850 PRINT USING 860:
860 IMAGE/18T,'Horizontal:',40T,'Vertical:'
870 PRINT USING 880:
880 IMAGE 23T,'Min. = ',S
890 INPUT W1
900 PRINT USING 910:
910 IMAGE 23T,'Max. = ',S
920 INPUT W2
930 PRINT USING 940:
940 IMAGE 'KK',43T,'Min. = ',S
950 INPUT W3
960 PRINT USING 970:
970 IMAGE 43T,'Max. = ',S
980 INPUT W4
990 PRINT USING 1000:
1000 IMAGE/18T,'Marcas en el Eje Horizontal = ',S
1010 INPUT A1
1020 PRINT USING 1030:
1030 IMAGE/18T,'Marcas en el Eje Vertical = ',S
1040 INPUT A2
1050 PRINT USING 1060:
1060 IMAGE/25T,'Punto de Cruce de los Ejes:'
1070 PRINT USING 1080:
1080 IMAGE 18T,'Horizontal = ',S
1090 INPUT A3
1100 PRINT USING 1110:
1110 IMAGE 'K',40T,'Vertical = ',S
1120 INPUT A4
1130 GO TO 1330

```

```

1140 PRINT USING 840:
1150 PRINT USING 860:
1160 PRINT USING 1170:W1,W3
1170 IMAGE 23T,"Min. = ",FD.2D,43T,"Min. = ",FD.2D
1180 PRINT USING 1190:W2,W4
1190 IMAGE 23T,"Max. = ",FD.2D,43T,"Max. = ",FD.2D
1200 PRINT USING 1210:A1
1210 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Horizontal = ",FD.2D
1220 PRINT USING 1230:A2
1230 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Vertical = ",FD.2D
1240 PRINT USING 1060:
1250 PRINT USING 1260:A3,A4
1260 IMAGE 18T,"Horizontal = ",FD.2D,40T,"Vertical = ",FD.2D
1270 PRINT USING 1280:"HORIZONTAL",U3,U4,"VERTICAL",U1,U2
1280 IMAGE/2(FA," :      MiH'nimo = ",2E,5X,"MaH'ximo = ",2E/)
1290 PRINT USING 1300:
1300 IMAGE/30T,"DESEA CAMBIAR DATOS? (SI o NO) : ",S
1310 INPUT X$
1320 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 830
1330 PAGE
1340 WINDOW W1,W2,W3,W4
1350 MOVE W1,W3
1360 DRAW W2,W3
1370 DRAW W2,W4
1380 DRAW W1,W4
1390 DRAW W1,W3
1400 AXIS A1,A2,A3,A4
1410 MOVE W1,W3
1420 IF W1<1.0E-4 AND W1<>0 AND W1>0 THEN 1580
1430 IF W1>-1.0E-4 AND W1<0 OR W2>10000 THEN 1580
1440 IF W3<1.0E-4 AND W3<>0 AND W3>0 THEN 1580
1450 IF W3>-1.0E-4 AND W3<0 OR W4>10000 THEN 1580
1460 PRINT USING 1470:W3,W1,W2
1470 IMAGE/,"K",1T,FD.2D/12T,FD.2D,60T,FD.2D
1480 PRINT USING 1490:"VERTICAL : ",A2,"HORIZONTAL : ",A1
1490 IMAGE FA,FD.2D," uni/div",10X,FA,FD.2D," uni/div"
1500 IF A3=W1 AND A4=W3 OR (A3=W1 AND A4=W4) THEN 1540
1510 MOVE A3,A4
1520 PRINT USING 1530:A3,A4
1530 IMAGE/"KH = ",FD.2D/"V = ",FD.2D
1540 MOVE W1,W4
1550 PRINT USING 1560:W4
1560 IMAGE/FD.2D
1570 GO TO 1690
1580 PRINT USING 1590:W3,W1,W2
1590 IMAGE/,"K",1T,2E/12T,2E,60T,2E
1600 PRINT USING 1610:"VERTICAL : ",A2,"HORIZONTAL : ",A1
1610 IMAGE FA,2E," uni/div",10X,FA,2E," uni/div"
1620 IF A3=W1 AND A4=W3 OR (A3=W1 AND A4=W4) THEN 1660
1630 MOVE A3,A4
1640 PRINT USING 1650:A3,A4
1650 IMAGE/"KH = ",2E/"V = ",2E

```

```

1660 MOVE W1,W4
1670 PRINT USING 1680;W4
1680 IMAGE/2E
1690 HOME
1700 PRINT *ICHEQUEO DE LA ULTIMA FUNCION INGRESADA*
1710 MOVE X(1),Z(1)
1720 DRAW X,Z
1730 HOME
1740 PRINT USING 1750:
1750 IMAGE/30X,"DESEA REGRESAR AL MENU ? (SI o NO) : ",S
1760 INPUT X$
1770 GO TO 590
1780 REM SUBROUTINA PARA TABLA DE DATOS
1790 CALL "TIME",Z$
1800 PRINT @P7:"LJESCUELA POLITECNICA NACIONAL"
1810 PRINT @P7:"FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA"
1820 PRINT @P7: USING 1830:"SISTEMAS DE CONTROL","FECHA : ",Z$
1830 IMAGE FA,27X,FA,18A
1840 PRINT @P7: USING 1850:V$
1850 IMAGE/"TITULO : ",60A
1860 PRINT @P7: USING 1870:"REGISTRO : ",Y3,H$
1870 IMAGE/FA,FD,/72A
1880 PRINT @P7: USING 1890:
1890 IMAGE 72("-")
1900 PRINT @P7:"JJGrado del Numerador           ";M
1910 PRINT @P7:"Grado del Denominador           ";N-1
1920 PRINT @P7:"Valor del EscaloH'n           ";E
1930 PRINT @P7:"JJCoeficientes del Numerador :J"
1940 FOR I=1 TO M
1950 PRINT @P7: USING 1960:"           S**",M-I+1
1960 IMAGE FA,FD,S
1970 NEXT I
1980 PRINT @P7:"           S**0"
1990 FOR I=M+1 TO 1 STEP -1
2000 PRINT @P7: USING 2010:S4(I)
2010 IMAGE " ",6D,4D,S
2020 NEXT I
2030 PRINT @P7:" "
2040 PRINT @P7:"JJCoeficientes del Denominador :J"
2050 FOR I=1 TO N-1
2060 PRINT @P7: USING 1960:"           S**",N-I
2070 NEXT I
2080 PRINT @P7:"           S**0"
2090 FOR I=N TO 1 STEP -1
2100 PRINT @P7: USING 2010:S5(I)
2110 NEXT I
2120 PRINT @P7:" "
2130 PRINT @P7:"JJJJJPolos y Ceros de la FuncioH'n : "
2140 PRINT @P7: USING 2150:"Parte Real","Parte Imaginaria","Tipo"
2150 IMAGE/4X,FA,8X,FA,9X,FA,/
2160 FOR I=1 TO N
2170 PRINT @P7: USING 2180:R5(I),I5(I),"POLO"

```

```

2180 IMAGE 5X,5D,2D,12X,5D,2D,14X,4A
2190 NEXT I
2200 IF M=0 THEN 2240
2210 FOR I=1 TO M
2220 PRINT @P7: USING 2180:R4(I),I4(I),'CERO'
2230 NEXT I
2240 PRINT 'JJICRETORNJ PARA CONTINUAR';
2250 INPUT X$
2260 RETURN
2270 REM PROGRAMA PARA DIRECTORIOS DE [DATA] Y [FILE]
2280 PRINT 'LJJIDIRECTORIO DE ARCHIVOS [DATA]/[FILE]'
2290 PRINT 'JJUNIDAD DONDE ESTA EL DISCO DE DATOS : ';
2300 INPUT H7
2310 CALL 'MOUNT',H7,X$
2320 CALL 'UNIT',H7
2330 PRINT 'JJTIPO DE ARCHIVO (DATA oH' FILE) : ';
2340 INPUT N$
2350 M$='DUSBECK/'&N$
2360 CALL 'USERLIB',M$
2370 PAGE
2380 DIRECTORY
2390 PRINT 'JJIDesea mayor informacioH'n? (SI/NO/C=Cambio) : ';
2400 INPUT X$
2410 IF X$<>'C' THEN 2470
2420 IF N$='DATA' THEN 2450
2430 N$='DATA'
2440 GO TO 2350
2450 N$='FILE'
2460 GO TO 2350
2470 IF NOT(X$='S' OR X$='SI') THEN 2260
2480 PAGE
2490 DIRECTORY
2500 PRINT 'JJNOMBRE DEL ARCHIVO : ';
2510 INPUT G$
2520 CALL 'UNIT',H7
2530 DELETE X$
2540 DIM X$(300)
2550 CALL 'FILE',H7,G$,X$
2560 IF X$<>' ' THEN 2590
2570 PRINT 'LJJI<< NO EXISTE EL ARCHIVO : ';G$;' >>'
2580 GO TO 2380
2590 OPEN G$;1,'F',A$
2600 Y$=SEG(X$,86,6)
2610 Y1=VAL(Y$)
2620 Y$=SEG(X$,148,6)
2630 Y2=VAL(Y$)
2640 Y3=Y1/Y2
2650 Y$=SEG(X$,25,6)
2660 Y1=VAL(Y$)
2670 Y4=Y1/Y2
2680 IF N$='FILE' THEN 2870
2690 READ #1,1:H1,H2,H5,U$

```

```

2700 F9=32
2710 PRINT @F9:"LJJNOMBRE DEL ARCHIVO : ";G$
2720 PRINT @F9:"JTITULO : ";V$
2730 PRINT @F9:"JREGISTROS : "
2740 PRINT @F9: USING 2750:Y4,Y3
2750 IMAGE13T,"ABIERTOS : ",FD/13T,"OCUPADOS : ",FD
2760 PRINT @F9:"JGRADO MAXIMO DEL : "
2770 PRINT @F9: USING 2780:H1,H2
2780 IMAGE20T,"NUMERADOR : ",FD/20T,"DENOMINADOR : ",FD
2790 PRINT @F9:"JNUMERO MAXIMO DE PUNTOS : ";H5
2800 CLOSE
2810 IF F9=51 THEN 2370
2820 PRINT "JJJIDEESEA IMPRESION EN PAPEL? (SI o NO) : ";
2830 INPUT X$
2840 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 2370
2850 F9=51
2860 GO TO 2710
2870 READ #1,1:V$
2880 READ #1,2:A$
2890 V$=V$&A$
2900 READ #1,3:M1,V5
2910 READ #1,4:W1,W2,W3,W4
2920 READ #1,6:W$
2930 F9=32
2940 PRINT @F9:"LJJNOMBRE DEL ARCHIVO : ";G$
2950 PRINT @F9:"JTITULO : ";V$
2960 PRINT @F9:"JNUMERO DE FUNCIONES : ";M1
2970 PRINT @F9:"JNOMBRE DE LA ORDENADA Y UNIDADES : ";W$
2980 PRINT @F9:"JNUMERO DE FIGURA ASIGNADO : ";V5
2990 PRINT @F9:"JJIRANGOS DE PRESENTACION : "
3000 PRINT @F9: USING 3010:
3010 IMAGE//20T,"MAXIMO",40T,"MINIMO"
3020 PRINT @F9: USING 3030:W1,W2
3030 IMAGE1T,"HORIZONTAL : ",20T,2E,40T,2E
3040 PRINT @F9: USING 3050:W3,W4
3050 IMAGE1T,"VERTICAL : ",20T,2E,40T,2E
3060 PRINT @F9: USING 3070:"ITEM","ARCHIVO","UNIDAD","REGISTRO"
3070 IMAGE//12T,FA,20T,FA,35T,FA,45T,FA/10T,45("-")/
3080 FOR I=1 TO M1
3090 READ #1,I+6:J,K,A$
3100 A$=SEG(A$,6,LEN(A$))
3110 PRINT @F9: USING 3120:I,A$,K,J
3120 IMAGE 14T,FD,20T,FA,38T,FD,48T,FD
3130 NEXT I
3140 IF F9=51 THEN 3200
3150 PRINT "JJJIDEESEA IMPRESION EN PAPEL? (SI o NO) : ";
3160 INPUT X$
3170 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 3200
3180 F9=51
3190 GO TO 2940
3200 CLOSE
3210 GO TO 2370

```

```

100 REM          *** TECLA - 6 ***
110 REM          *** 7-FEBRERO/85 ***
120 H9=0
130 IF X0=1 THEN 3280
140 U6=0
150 U7=0
160 PRINT 'LJJTRAZAR UNA O MAS FUNCIONES EN LA MISMA GRAFICA'
170 PRINT 'JJNUMERO DE FUNCIONES : ';
180 INPUT M1
190 G$='DUW'
200 CLOSE
210 KILL G$
220 CREATE G$;M1,50
230 OPEN G$;2,'F',X$
240 PRINT USING 250:'ITEM','ARCHIVO','UNIDAD','REGISTRO'
250 IMAGE 'L'//12T,FA,20T,FA,30T,FA,40T,FA/10T,40('-')/
260 L=1
270 A$=' '
280 U1=1.0E+100
290 U3=U1
300 U2=-U1
310 U4=U2
320 FOR I=1 TO M1
330 IF NOT(I=15*L) THEN 360
340 L=L+1
350 PRINT USING 250:'ITEM','ARCHIVO','UNIDAD','REGISTRO'
360 PRINT USING 370:I
370 IMAGE/14T,FD,19T,'-H>',S
380 INPUT X$
390 IF X$<>' ' THEN 450
400 IF I=1 THEN 350
410 X$=SEG(A$,6,LEN(A$)-5)
420 PRINT USING 430:X$,H7
430 IMAGE 'K',20T,FA,33T,FD)
440 GO TO 480
450 PRINT USING 460:
460 IMAGE 'K',32T,'-H>',S
470 INPUT H7
480 PRINT USING 490:
490 IMAGE 'K',43T,'-H>',S
500 INPUT Y3
510 IF A$=X$ THEN 530
520 A$='DATA/'&X$
530 WRITE #2,I:Y3,H7,A$
540 CALL 'MOUNT',H7,X$
550 CALL 'UNIT',H7
560 OPEN A$;1,'F',X$
570 READ #1,1:H1,H2,H5,U$
580 DELETE X,Z
590 DIM X(H5),Z(H5)
600 READ #1,Y3:X,Z,U5,U6,U7,U8

```

```

610 U1=U1 MIN U5
620 U2=U2 MAX U6
630 U3=U3 MIN U7
640 U4=U4 MAX U8
650 CLOSE 1
660 CALL "UNIT",H8
670 NEXT I
680 PRINT "LJJIDesea Gráfico en PANTALLA? (SI o NO) : ";
690 INPUT X$
700 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 820
710 F8=32
720 VIEWPORT 25,130,10,94
730 GOSUB 1700
740 GOSUB 2770
750 HOME
760 PRINT "IDESEA CAMBIAR DATOS? (T=Total/F=Parcial/NO) : ";
770 INPUT X$
780 IF X$="T" THEN 160
790 IF X$="F" THEN 820
800 F7=51
810 GO TO 710
820 PRINT "LJJIDesea Gráfico en el PLOTTER? (SI o NO) : ";
830 INPUT X$
840 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 900
850 F8=1
860 VIEWPORT 7,146,6,94
870 GOSUB 1350
880 GOSUB 1700
890 GOSUB 3070
900 IF V7=1 THEN 1280
910 PRINT "LJJIDesea guardar este conjunto? (SI o NO) : ";
920 INPUT X$
930 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 1280
940 PRINT "UNIDAD DEL DISCO DE DATOS : ";
950 INPUT H7
960 PRINT "NOMBRE PARA EL ARCHIVO DE ESTE CONJUNTO : ";
970 INPUT G$
980 G$="FILE/"&G$
990 CALL "MOUNT",H7,X$
1000 CALL "UNIT",H7
1010 CALL "FILE",H7,G$,X$
1020 IF X$="" THEN 1070
1030 PRINT "LJJYA EXISTE EL CONJUNTO : ";G$
1040 PRINT "JJJJICRETORN] PARA CONTINUAR";
1050 INPUT X$
1060 GO TO 910
1070 IF V6=1 THEN 1090
1080 GOSUB 1350
1090 CALL "UNIT",H7
1100 CREATE G$;M1+6,50
1110 OPEN G$;1,"F",X$

```



```

1120 X#=SEG(V#,1,35)
1130 WRITE #1,1:X#
1140 X#=SEG(V#,36,LEN(V#)-35)
1150 WRITE #1,2:X#
1160 WRITE #1,3:M1,V5
1170 WRITE #1,4:W1,W2,W3,W4
1180 WRITE #1,5:A1,A2,A3,A4
1190 WRITE #1,6:W#
1200 FOR I=1 TO M1
1210 CALL "UNIT",H8
1220 READ #2,I:J,K,A#
1230 CALL "UNIT",H7
1240 WRITE #1,I+6:J,K,A#
1250 NEXT I
1260 CLOSE 1
1270 V7=1
1280 PRINT "LJJDesee regresar al MENU? (SI o NO) : ";
1290 INPUT X#
1300 IF NOT(X#="S" OR X#="SI") THEN 680
1310 CLOSE
1320 CALL "UNIT",H8
1330 KILL "DUW"
1340 RETURN
1350 REM SUBROUTINA DE ARCHIVOS [FILE]
1360 V6=1
1370 DELETE V#
1380 PRINT "LJJTITULO UNICO (MaH'ximo 70 caracteres) : "
1390 PRINT USING 1400:
1400 IMAGE 71T,"<H--K"
1410 INPUT V#
1420 PRINT "JNUMERO DE FIGURA ASIGNADO : ";
1430 INPUT V5
1440 IF P7=51 THEN 1580
1450 GO TO 1640
1460 PRINT "JJNOMBRE DE LA ORDENADA (MaH'ximo 20 caracteres) : "
1470 PRINT USING 1480:
1480 IMAGE 21T,"<H--K"
1490 INPUT W#
1500 PRINT "JJUNIDADES DE ";W#;" (MaH'ximo 15 caracteres) : "
1510 PRINT USING 1520:
1520 IMAGE 16T,"<H--K"
1530 INPUT X#
1540 W#=W#&" en C"
1550 W#=W#&X#
1560 W#=W#&"J"
1570 GO TO 1640
1580 IF W#="" THEN 1460
1590 PRINT "LJJNOMBRE DE LA ORDENADA Y UNIDADES : ";W#
1600 PRINT USING 1610:
1610 IMAGE/30T,"DESEA CAMBIAR DATOS? (SI o NO) :";S
1620 INPUT X#

```

```

1630 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 1460
1640 V0=LEN(V$)
1650 V0=(70-V0)/2
1660 FOR I=1 TO V0
1670 V$=" "&V$
1680 NEXT I
1690 RETURN
1700 PAGE
1710 IF P7=51 THEN 2040
1720 GO TO 2230
1730 PRINT USING 1740:
1740 IMAGE/25T,"Rangos de Escala:",/15T,44("-")
1750 PRINT USING 1760:
1760 IMAGE/18T,"Horizontal:",40T,"Vertical:"
1770 PRINT USING 1780:
1780 IMAGE 23T,"Min. = ",S
1790 INPUT W1
1800 PRINT USING 1810:
1810 IMAGE 23T,"Max. = ",S
1820 INPUT W2
1830 PRINT USING 1840:
1840 IMAGE "K",43T,"Min. = ",S
1850 INPUT W3
1860 PRINT USING 1870:
1870 IMAGE 43T,"Max. = ",S
1880 INPUT W4
1890 PRINT USING 1900:
1900 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Horizontal = ",S
1910 INPUT A1
1920 PRINT USING 1930:
1930 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Vertical = ",S
1940 INPUT A2
1950 PRINT USING 1960:
1960 IMAGE/25T,"Punto de Cruce de los Ejes:"
1970 PRINT USING 1980:
1980 IMAGE 18T,"Horizontal = ",S
1990 INPUT A3
2000 PRINT USING 2010:
2010 IMAGE "K",40T,"Vertical = ",S
2020 INPUT A4
2030 GO TO 2230
2040 PRINT USING 1740:
2050 PRINT USING 1760:
2060 PRINT USING 2070:W1,W3
2070 IMAGE 23T,"Min. = ",FD,2D,43T,"Min. = ",FD,2D
2080 PRINT USING 2090:W2,W4
2090 IMAGE 23T,"Max. = ",FD,2D,43T,"Max. = ",FD,2D
2100 PRINT USING 2110:A1
2110 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Horizontal = ",FD,2D
2120 PRINT USING 2130:A2
2130 IMAGE/18T,"Marcas en el Eje Vertical = ",FD,2D

```

```

2140 PRINT USING 1960:
2150 PRINT USING 2160:A3,A4
2160 IMAGE 18T,"Horizontal = ",FD,2D,40T,"Vertical = ",FD,2D
2170 PRINT USING 2180:"HORIZONTAL",U3,U4,"VERTICAL",U1,U2
2180 IMAGE/2(FA," :      MiB'nimo = ",2E,5X,"MaB'ximo = ",2E/)
2190 PRINT USING 2200:
2200 IMAGE/30T,"DESEA CAMBIAR DATOS? (SI o NO) : ",S
2210 INPUT X$
2220 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 1730
2230 PRINT "LJJJJIDESEA SOLO TRAZO CONTINUO? (SI o NO) : ";
2240 INPUT T$
2250 PAGE
2260 WINDOW W1,W2,W3,W4
2270 IF P8=32 THEN 2300
2280 PRINT "LJJJJJI<<  PREPARE EL GRAFIZADOR  >>  (RETURN)"
2290 INPUT X$
2300 MOVE @P8:W1,W3
2310 DRAW @P8:W2,W3
2320 DRAW @P8:W2,W4
2330 DRAW @P8:W1,W4
2340 DRAW @P8:W1,W3
2350 AXIS @P8:A1,A2,A3,A4
2360 RETURN
2370 V=0
2380 FOR I=1 TO M1
2390 CALL "UNIT",H8
2400 READ #2,I:Y3,H7,A$
2410 CALL "MOUNT",H7,X$
2420 CALL "UNIT",H7
2430 OPEN A$;1,"F",X$
2440 READ #1,1:H1,H2,H5
2450 DELETE X,Z
2460 DIM X(H5),Z(H5)
2470 READ #1,Y3:X,Z
2480 CLOSE 1
2490 IF T$="S" OR T$="SI" OR I=1 THEN 2680
2500 IF I=2 THEN 2710
2510 IF NOT(I=3*(V+1)) THEN 2530
2520 V=V+1
2530 MOVE @P8:X(1),Z(1)
2540 FOR J=2 TO H5 STEP I-1
2550 FOR K=J TO J+2*(V-1) STEP 2
2560 IF K=>H5 THEN 2590
2570 DRAW @P8:X(K),Z(K)
2580 MOVE @P8:X(K+1),Z(K+1)
2590 NEXT K
2600 IF I=3 THEN 2660
2610 FOR K=J+2*(V-1)+1 TO J+I-3
2620 IF K=>H5 THEN 2650
2630 DRAW @P8:X(K),Z(K)
2640 MOVE @P8:X(K+1),Z(K+1)-

```

```

2650 NEXT K
2660 NEXT J
2670 GO TO 2750
2680 MOVE @P8:X(1),Z(1)
2690 DRAW @P8:X,Z
2700 GO TO 2750
2710 FOR J=2 TO H5
2720 MOVE @P8:X(J),Z(J)
2730 DRAW @P8:X(J),Z(J)
2740 NEXT J
2750 NEXT I
2760 RETURN
2770 MOVE W1,W3
2780 IF W1<1.0E-4 AND W1<>0 AND W1>0 THEN 2940
2790 IF W1>-1.0E-4 AND W1<0 OR W2>10000 THEN 2940
2800 IF W3<1.0E-4 AND W3<>0 AND W3>0 THEN 2940
2810 IF W3>-1.0E-4 AND W3<0 OR W4>10000 THEN 2940
2820 PRINT USING 2830:W3,W1,W2
2830 IMAGE/,"K",1T,FD.2D/15T,FD.2D,63T,FD.2D
2840 PRINT USING 2850:"HORIZONTAL : ",A1,"VERTICAL : ",A2
2850 IMAGE FA,FD.2D," uni/div",10X,FA,FD.2D," uni/div"
2860 IF A3=W1 AND A4=W3 OR (A3=W1 AND A4=W4) THEN 2900
2870 MOVE A3,A4
2880 PRINT USING 2890:A3,A4
2890 IMAGE/"KH = ",FD.2D/"V = ",FD.2D
2900 MOVE W1,W4
2910 PRINT USING 2920:W4
2920 IMAGE/FD.2D
2930 GO TO 3050
2940 PRINT USING 2950:W3,W1,W2
2950 IMAGE/,"K",1T,2E/15T,2E,63T,2E
2960 PRINT USING 2970:"HORIZONTAL : ",A1,"VERTICAL : ",A2
2970 IMAGE FA,2E," uni/div",10X,FA,2E," uni/div"
2980 IF A3=W1 AND A4=W3 OR (A3=W1 AND A4=W4) THEN 3020
2990 MOVE A3,A4
3000 PRINT USING 3010:A3,A4
3010 IMAGE/"KH = ",2E/"V = ",2E
3020 MOVE W1,W4
3030 PRINT USING 3040:W4
3040 IMAGE/2E
3050 GOSUB 2370
3060 RETURN
3070 MOVE @1:W1,W3
3080 IF W1<1.0E-4 AND W1<>0 AND W1>0 THEN 3130
3090 IF W1>-1.0E-4 AND W1<0 OR W2>10000 THEN 3130
3100 PRINT @1: USING 3110:W1,W2,"TIEMPO en [segundos]",A1
3110 IMAGE/5T,FD.2D,70T,FD.2D/25X,FA,9X,"(",FD.2D," seg/div)"
3120 GO TO 3150
3130 PRINT @1: USING 3140:W1,W2,"TIEMPO en [segundos]",A1
3140 IMAGE/5T,2E,70T,2E/25X,FA,9X,"(",2E," seg/div)"
3150 PRINT @1,25:90

```

```

3160 IF W3<1.0E-4 AND W3<>0 AND W3>0 THEN 3210
3170 IF W3>-1.0E-4 AND W3<0 OR W4>10000 THEN 3210
3180 PRINT @1: USING 3190:W$,W3,A2,W4
3190 IMAGE/11T,FA/4T,FD.2D,20T,"(",FD.2D," uni/div)",46T,FD.2D
3200 GO TO 3230
3210 PRINT @1: USING 3220:W$,W3,A2,W4
3220 IMAGE/11T,FA/4T,2E,20T,"(",2E," uni/div)"46T,2E
3230 PRINT @1,25:0
3240 HOME @1:
3250 PRINT @1:"Fig.# ";V5;" ";V$
3260 GOSUB 2370
3270 RETURN
3280 PRINT "LJJIDIBUJAR UN CONJUNTO DE FUNCIONES"
3290 PRI "JJCOLOQUE EL DISCO DE DATOS E INGRESE NUMERO DE LA UNIDAD :
3300 INPUT H7
3310 CALL "MOUNT",H7,X$
3320 CALL "UNIT",H7
3330 PAGE
3340 CALL "USERLIB","DUSBECK/FILE"
3350 PRINT "LJJDesea impresioH'n en papel del Directorio (SI o NO)? :
3360 INPUT X$
3370 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 3400
3380 DIRECTORY
3390 GO TO 3410
3400 DIRECTORY @51:
3410 CALL "USERLIB","DUSBECK"
3420 PRI "JJI(SOLO [RETURN] PARA CAMBIO)","KKIICONJUNTO ELEGIDO: FILE/"
3430 INPUT G$
3440 IF G$="" THEN 3280
3450 G$="FILE/"&G$
3460 OPEN G$;9,"F",X$
3470 KILL "DUW"
3480 READ #9,3:M1,V5
3490 CREATE "DUW";M1,50
3500 OPEN "DUW";2,"F",X$
3510 FOR I=1 TO M1
3520 READ #9,I+6:J,K,A$
3530 WRITE #2,I:J,K,A$
3540 NEXT I
3550 READ #9,1:V$
3560 READ #9,2:X$
3570 V$=V$&X$
3580 READ #9,5:A1,A2,A3,A4
3590 READ #9,6:W$
3600 READ #9,4:W1,W2,W3,W4
3610 WINDOW W1,W2,W3,W4
3620 PRINT "LJJIDesea GraH'fico en PANTALLA? (SI o NO) : ";
3630 INPUT X$
3640 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 3700
3650 P8=32
3660 VIEWPORT 25,130,10,94

```

```

3670 GOSUB 2230
3680 GOSUB 2770
3690 HOME
3700 PRINT '¿Desea Gráfico en el PLOTTER? (SI o NO) : ';
3710 INPUT X$
3720 IF NOT(X$='S' OR X$='SI') THEN 3770
3730 F8=1
3740 VIEWPORT 7,146,6,94
3750 GOSUB 2230
3760 GOSUB 3070
3770 PRINT '¿Desea Regresar al MENU? (SI o NO) : ';
3780 INPUT X$
3790 IF NOT(X$='S' OR X$='SI') THEN 3620
3800 CLOSE
3810 KILL 'DUW'
3820 RETURN

```

```

100 REM *** TECLA - 7 ***
110 REM *** 16-MARZO785 ***
120 H9=0
130 IF X0=1 THEN 1510
140 PRINT "LJJJEDITAR CUALQUIER GRAFICA DE UNA FUNCION [DATA]"
150 PRINT "JJJI1. ---> Cambiar Subtítulo"
160 PRINT "JI2. ---> Cambiar la Función"
170 PRINT "JI3. ---> Cambio Total"
180 PRINT "JIIESCOJA OPCION : ";
190 INPUT X9
200 IF NOT(X9=1 OR X9=2 OR X9=3) THEN 350
210 PRINT "JJJNOMBRE DEL ARCHIVO : ";
220 INPUT G$
230 PRINT "JJUNIDAD DEL DISCO DE DATOS : ";
240 INPUT H7
250 PRINT "JJNUMERO DEL REGISTRO A CAMBIARLO : ";
260 INPUT Y3
270 CALL "USERLIB", "DUSBECK/DATA"
280 CALL "UNIT", H7
290 CALL "MOUNT", H7, X$
300 CALL "FILE", H7, G$, X$
310 IF NOT(X$="") THEN 360
320 PRINT "LJJJJJJJI<< NO EXISTE EL ARCHIVO : "; G$; " >>"
330 PRINT "JJJICRETURN] PARA CONTINUAR";
340 INPUT X$
350 RETURN
360 OPEN G$;1,"F",X$
370 READ #1,1:H1,H2,H5,V$
380 CLOSE 1
390 IF X9=1 THEN 540
400 PRINT "JJYA INGRESO LA NUEVA FUNCION (SI o NO) : ";
410 INPUT X$
420 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 350
430 IF NOT(H5<N1) THEN 460
440 PRINT "LJJJLA GRAFICA TIENE EXCESIVOS PUNTOS PARA ESTE ARCHIVO"
450 GO TO 330
460 IF NOT(M>H1 AND N>H2) THEN 500
470 PRI "LJJJGRADO DEL NUMERADOR y/o DENOMINADOR MAYOR AL ESPECIFICADO"
480 PRINT " PARA ESTE ARCHIVO"
490 GO TO 330
500 DELETE X$,X,Z,S4,R4,I4,S5,R5,I5
510 IF H1=0 THEN 530
520 DIM R4(H1),I4(H1)
530 DIM X(H5),Z(H5),S4(H1+1),S5(H2+1),R5(H2+1),I5(H2+1)
540 OPEN G$;1,"F",X$
550 READ #1,Y3:X,Z,U5,U6,U7,U8,M9,N9,U0,E0,S4,R4,I4,S5,R5,I5,H$
560 IF X9=2 THEN 650
570 PRI "LJJJINGRESE NOMBRE PARA ESTA GRAFICA (Máximo 50 caracteres);
580 PRINT USING 590:
590 IMAGE 51T,"<H---K"
600 INPUT H$

```

```

610 H$="      "&H$
620 H$=G$&H$
630 H$="ARCHIVO : "&H$
640 IF X9=1 THEN 930
650 FOR I=1 TO N1
660 X(I)=T(I)
670 Z(I)=Y(I)
680 NEXT I
690 FOR I=N1 TO H5
700 X(I)=T(N1)
710 Z(I)=Y(N1)
720 NEXT I
730 S4=0
740 R4=0
750 I4=0
760 S5=0
770 R5=0
780 I5=0
790 FOR I=1 TO M+1
800 S4(I)=C(I,N+1)
810 IF I=M+1 THEN 840
820 R4(I)=R2(I)
830 I4(I)=I2(I)
840 NEXT I
850 FOR I=1 TO N
860 S5(I)=S(I+1)
870 R5(I)=R1(I)
880 I5(I)=I1(I)
890 NEXT I
900 H4=1
910 WRITE #1,Y3:X,Z,U1,U2,U3,U4,M,N,U,E,S4,R4,I4,S5,R5,I5,H$
920 GO TO 980
930 WRITE #1,Y3:X,Z,U5,U6,U7,U8,M9,N9,U0,E0,S4,R4,I4,S5,R5,I5,H$
940 M=M9
950 N=N9
960 U=U0
970 E=E0
980 CLOSE
990 IF F7=32 THEN 1020
1000 PRINT "LJJJJJI<<  PREPARE LA IMPRESORA  >>  ([RETURN])";
1010 INPUT X$
1020 CALL "TIME",Z$
1030 PRINT @F7:"LJESCUELA POLITECNICA NACIONAL"
1040 PRINT @F7:"FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA"
1050 PRINT @F7: USING 1060:"SISTEMAS DE CONTROL",FECHA : ",Z$
1060 IMAGE FA,27X,FA,18A
1070 PRINT @F7: USING 1080:U$
1080 IMAGE/"TITULO : ",60A
1090 PRINT @F7: USING 1100:"REGISTRO : ",Y3,H$
1100 IMAGE/FA,FD,/72A
1110 PRINT @F7: USING 1120:

```



```

1120 IMAGE 72("-").
1130 PRINT @F7:"JJGrado del Numerador           ";M
1140 PRINT @F7:"Grado del Denominador         ";N-1
1150 PRINT @F7:"Valor del EscaloH'n           ";E
1160 PRINT @F7:"JJCoeficientes del Numerador :J"
1170 IF M=0 THEN 1220
1180 FOR I=1 TO M
1190 PRINT @F7: USING 1200:"          S**",M-I+1
1200 IMAGE FA,FD,S
1210 NEXT I
1220 PRINT @F7:"          S**0"
1230 FOR I=M+1 TO 1 STEP -1
1240 PRINT @F7: USING 1250:S4(I)
1250 IMAGE " ",6D,4D,S
1260 NEXT I
1270 PRINT @F7:" "
1280 PRINT @F7:"JJCoeficientes del Denominador :J"
1290 FOR I=1 TO N-1
1300 PRINT @F7: USING 1200:"          S**",N-I
1310 NEXT I
1320 PRINT @F7:"          S**0"
1330 FOR I=N TO 1 STEP -1
1340 PRINT @F7: USING 1250:S5(I)*U
1350 NEXT I
1360 PRINT @F7:" "
1370 PRINT @F7:"JJJJPolos y Ceros de la FuncioH'n : "
1380 PRINT @F7: USING 1390:"Parte Real","Parte Imaginaria","Tipo"
1390 IMAGE/4X,FA,8X,FA,9X,FA,/
1400 FOR I=1 TO N
1410 PRINT @F7: USING 1420:R5(I),I5(I),"POLO"
1420 IMAGE 5X,5D.2D,12X,5D.2D,14X,4A
1430 NEXT I
1440 IF M=0 THEN 1480
1450 FOR I=1 TO M
1460 PRINT @F7: USING 1420:R4(I),I4(I),"CERO"
1470 NEXT I
1480 H4=1
1490 IF F7=32 THEN 330
1500 RETURN
1510 PRINT *LJJEDITAR CUALQUIER CONJUNTO [FILE]*
1520 PRINT *JJJIELEGIR ALGUNA OPCION:*
1530 PRINT *JIEDICION DE TITULOS ---> 1*
1540 PRINT *JICAMBIO DE SECUENCIA --> 2*
1550 PRINT *JIEDICION DE DATOS -----> 3*
1560 PRINT *JJJIELECCION (0 oH' >3 MENU): *;
1570 INPUT X9
1580 CLOSE
1590 IF NOT(X9=1 OR X9=2 OR X9=3) THEN 2590
1600 PRINT *JJJNOMBRE DEL ARCHIVO: *;
1610 INPUT G$
1620 PRINT *JJUNIDAD DEL DISCO DE DATOS: *;

```

```

1630 INPUT H7
1640 CALL "USERLIB", "DUSBECK/FILE"
1650 CALL "UNIT", H7
1660 CALL "FILE", H7, G$, X$
1670 IF X$="" THEN 320
1680 KILL "DUW"
1690 OPEN G$;1,"F",X$
1700 READ #1,1;V$
1710 READ #1,2;A$
1720 V$=V$&A$
1730 READ #1,6;W$
1740 IF X9<>1 THEN 2080
1750 PRINT "L";V$,"JINGRESE NUEVO TITULO (MaH'x. 70 caracteres): "
1760 PRINT USING 1770:
1770 IMAGE 71T,"<H--K"
1780 INPUT A$
1790 IF A$="" THEN 1850
1800 V$=A$
1810 V0=LEN(V$)
1820 V0=(70-V0)/2
1830 FOR I=1 TO V0
1840 V$=" "&V$
1850 NEXT I
1860 PRINT "JJJNOMBRE DE LA ORDENADA Y UNIDADES: ";W$
1870 PRINT USING 1880:
1880 IMAGE/30T,"DESEA CAMBIARLOS (SI o NO): ",S
1890 INPUT X$
1900 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 2030
1910 PRINT "JJNOMBRE DE LA ORDENADA (MaH'ximo 20 caracteres): "
1920 PRINT USING 1930:
1930 IMAGE 21T,"<H--K"
1940 INPUT W$
1950 PRINT "JJUNIDADES DE ";W$;" (MaH'ximo 15 caracteres): "
1960 PRINT USING 1970:
1970 IMAGE 16T,"<H--K"
1980 INPUT A$
1990 W$=W$&" en ["
2000 W$=W$&A$
2010 W$=W$&"]"
2020 WRITE #1,6;W$
2030 A$=SEG(V$,1,35)
2040 WRITE #1,1;A$
2050 A$=SEG(V$,36,LEN(V$)-35)
2060 WRITE #1,2;A$
2070 GO TO 1510
2080 READ #1,3;M1,U5
2090 IF M1>1 THEN 2140
2100 PRINT "LJJJIARCHIVO ";G$;" TIENE UN SOLO ELEMENTO"
2110 PRINT "JJJICRETURN] PARA CONTINUAR"
2120 INPUT X$
2130 GO TO 1510

```

```

2140 READ #1,4:W1,W2,W3,W4
2150 READ #1,5:V1,V2,V3,V4
2160 A$="DUW"
2170 CREATE A$;M1,50
2180 OPEN A$;2,"F",X$
2190 IF X9=3 THEN 2600
2200 DELETE A9
2210 DIM A9(M1)
2220 L=1
2230 GOSUB 2570
2240 FOR I=1 TO M1
2250 IF NOT(I=15*L) THEN 2280
2260 L=L+1
2270 GOSUB 2570
2280 READ #1,I+6:J,K,A$
2290 A$=SEG(A$,6,LEN(A$)-5)
2300 PRINT USING 2310:I,A$,K,J
2310 IMAGE 8T,FD,14T,FA,27T,FD,35T,FD,53T,"-H> ",S
2320 INPUT A9(I)
2330 NEXT I
2340 FOR I=1 TO M1-1
2350 FOR J=I+1 TO M1
2360 IF A9(I)=A9(J) THEN 2400
2370 NEXT J
2380 NEXT I
2390 GO TO 2450
2400 PRINT "LJJERROR, NUEVA SECUENCIA REPITE DATOS"
2410 PRINT "JJJIDEESEA INTENTAR NUEVAMENTE (SI o NO): ";
2420 INPUT X$
2430 IF X$="S" OR X$="SI" THEN 2200
2440 GO TO 1510
2450 FOR I=1 TO M1
2460 L=0
2470 L=L+1
2480 IF A9(L) <> I THEN 2470
2490 READ #1,L+6:J,K,A$
2500 WRITE #2,I:J,K,A$
2510 NEXT I
2520 FOR I=1 TO M1
2530 READ #2,I:J,K,A$
2540 WRITE #1,I+6:J,K,A$
2550 NEXT I
2560 GO TO 1510
2570 PRINT USING 2580:"ITEM","ARCHIVO","UNIDAD","REGISTRO","NUEVO ITEM
2580 IMAGE"L"//6T,FA,14T,FA,24T,FA,32T,FA,50T,FA/4T,62("-")/
2590 RETURN
2600 DELETE A9
2610 DIM A9(M1)
2620 A9=0
2630 M2=0
2640 FOR I=1 TO M1

```

```

2650 FRI USI 2580:"ITEM","ARCHIVO","UNIDAD","REGISTRO","CAMBIOS? (S/N)"
2660 READ #1,I+6:J,K,A$
2670 A$=SEG(A$,6,LEN(A$)-5)
2680 PRINT USING 2690:I,A$,K,J
2690 IMAGE 8T,FD,14T,FA,27T,FD,35T,FD,55T,"-H>" ,S
2700 INPUT X$
2710 IF NOT(X$="S" OR X$="SI") THEN 2900
2720 PRINT "JJJJJICRETURNJ = ELIMINACION DE ESTE DATO"
2730 PRINT USING 2740:"ITEM","ARCHIVO","UNIDAD","REGISTRO"
2740 IMAGE///12T,FA,20T,FA,30T,FA,40T,FA/10T,40("-")/
2750 PRINT USING 2760:I
2760 IMAGE/14T,FD,19T,"-H>" ,S
2770 INPUT X$
2780 IF X$<>" " THEN 2820
2790 A9(I)=1
2800 M2=1
2810 GO TO 2900
2820 A$="DATA/"&X$
2830 PRINT USING 2840:
2840 IMAGE"K",32T,"-H>" ,S
2850 INPUT H3
2860 PRINT USING 2870:
2870 IMAGE "K",43T,"-H>" ,S
2880 INPUT Y3
2890 WRITE #1,I+6:Y3,H3,A$
2900 NEXT I
2910 IF M2=0 THEN 3160
2920 FOR I=1 TO M1
2930 IF A9(I)=1 THEN 2970
2940 READ #1,I+6:J,K,A$
2950 WRITE #2,H0:J,K,A$
2960 M2=M2+1
2970 NEXT I
2980 M1=M2
2990 CLOSE
3000 KILL G$
3010 CREATE G$;M1+6,50
3020 OPEN G$;1,"F",X$
3030 OPEN "DUW";2,"F",X$
3040 X$=SEG(U$,1,35)
3050 WRITE #1,1:X$
3060 X$=SEG(U$,36,LEN(U$)-35)
3070 WRITE #1,2:X$
3080 WRITE #1,3:M1,U5
3090 WRITE #1,4:W1,W2,W3,W4
3100 WRITE #1,5:A1,A2,A3,A4
3110 WRITE #1,6:W$
3120 FOR I=1 TO M1
3130 READ #2,I:J,K,A$
3140 WRITE #1,I+6:J,K,A$
3150 NEXT I
3160 GO TO 1510

```

**APENDICE B**

**B.1.- OBTENCION DEL OPERADOR F1**

$$F_1 = -h_t / q_{p1}$$

$$(2.6) \quad h_t = \operatorname{sech}(T_{ec}D)h_w - Z_c q_c \tanh(T_{ec}D) - \bar{\xi}_c q_c \quad (i)$$

$$(2.5) \quad h_w = 0 \quad (ii)$$

$$(2.7) \quad q_c = (q_t + q_r) + q_{p1} \quad (iii)$$

$$(2.8) \quad q_t + q_r = T_t D h_t \quad (iv)$$

$$\text{De (2.5) y (2.6)} \quad h_t = -Z_c q_c \tanh(T_{ec}D) - \bar{\xi}_c q_c \quad (A)$$

$$\text{De (2.7) y (2.8)} \quad q_c = (T_t D h_t) + q_{p1} \quad (B)$$

Reemplazando (B) en (A):

$$h_t = -Z_c (T_t D h_t + q_{p1}) \tanh(T_{ec}D) - \bar{\xi}_c (T_t D h_t + q_{p1})$$

$$h_t = (T_t D h_t + q_{p1}) (-Z_c \tanh(T_{ec}D) - \bar{\xi}_c)$$

$$-h_t = (T_t D h_t) (Z_c \tanh(T_{ec}D) + \bar{\xi}_c) + q_{p1} (Z_c \tanh(T_{ec}D) + \bar{\xi}_c)$$

$$-h_t - T_t D h_t (Z_c \tanh(T_{ec}D) + \bar{\xi}_c) = q_{p1} (Z_c \tanh(T_{ec}D) + \bar{\xi}_c)$$

$$-h_t (1 + T_t D (Z_c \tanh(T_{ec}D) + \bar{\xi}_c)) = q_{p1} (Z_c \tanh(T_{ec}D) + \bar{\xi}_c)$$

$$\frac{h_t}{q_{p1}} = \frac{Z_c \tanh(T_{ec}D) + \bar{\xi}_c}{1 + T_t \bar{\xi}_c D + T_t Z_c D \tanh(T_{ec}D)}$$

$$h_t / q_{p1} = -F_1$$

Donde  $F_1$  queda:

$$F_1 = \frac{Z_c \tanh(T_{ec}D) + \bar{\xi}_c}{1 + T_t \bar{\xi}_c D + T_t Z_c D \tanh(T_{ec}D)}$$

B.2.- OBTENCION DEL OPERADOR F3

$$F_3 = -q_1 / h_1$$

$$(2.9) \quad h_t = h_t \operatorname{sech}(T_e D) - q_1 Z_{p1} \tanh(T_e D) - \bar{x}_{p1} q_1$$

$$q_{p1} = q_1 \cosh(T_e D) + (h_1 / Z_{p1}) \sinh(T_e D)$$

$$(2.12) \quad h_t / q_{p1} = -F_1$$

$$h_t \operatorname{sech}(T_e D) = h_1 + q_1 Z_{p1} \tanh(T_e D) + \bar{x}_{p1} q_1$$

$$h_t = (h_1 + q_1 Z_{p1} \tanh(T_e D) + \bar{x}_{p1} q_1) / (\operatorname{sech}(T_e D))$$

$$\frac{h_t}{q_{p1}} = -F_1 = \frac{h_1 + Z_{p1} q_1 \tanh(T_e D) + \bar{x}_{p1} q_1}{(1 / \cosh(T_e D)) (q_1 \cosh(T_e D) + (h_1 / Z_{p1}) (\sinh(T_e D)))}$$

$$-F_1 = \frac{h_1 + Z_{p1} q_1 \tanh(T_e D) + \bar{x}_{p1} q_1}{q_1 + (h_1 / Z_{p1}) (\tanh(T_e D))}$$

$$-F_1 q_1 - (h_1 / Z_{p1}) F_1 \tanh(T_e D) = h_1 + q_1 Z_{p1} \tanh(T_e D) + \bar{x}_{p1} q_1$$

$$h_1 + (F_1 / Z_{p1}) h_1 \tanh(T_e D) = -F_1 q_1 - Z_{p1} q_1 \tanh(T_e D) - \bar{x}_{p1} q_1$$

$$h_1 (1 + (F_1 / Z_{p1}) \tanh(T_e D)) = -q_1 (F_1 + Z_{p1} \tanh(T_e D) + \bar{x}_{p1})$$

$$-\frac{q_1}{h_1} = F_3 = \frac{1 + (F_1 / Z_{p1}) \tanh(T_e D)}{\bar{x}_{p1} + F_1 + Z_{p1} \tanh(T_e D)}$$

B.3.- OBTENCION DEL OPERADOR G

ECUACION DE TRANSFERENCIA DE LA TURBINA EN FUNCION DE LA VELOCIDAD  $n_1$  RESPECTO AL RECORRIDO DEL INYECTOR  $z_1$ .

$$G = n_1 / z_1$$

$$q_1 = a_{11} h_1 + a_{12} n_1 + a_{13} z_1 \quad (2.10a)$$

$$m_1 = a_{21} h_1 + a_{22} n_1 + a_{23} z_1 \quad (2.10b)$$

$$T_m D n_1 = m_1 \quad (2.11)$$

$$q_1 / h_1 = -F_3 \quad (2.14)$$

se tiene:

$$\frac{q_1 - a_{11}h_1}{-a_{21}h_1} = \frac{a_{12}n_1 + a_{13}z_1}{a_{22}n_1 + a_{23}z_1 - n_1}$$

$$\frac{-q_1}{a_{21}h_1} + \frac{a_{11}h_1}{a_{21}h_1} = \frac{a_{12}n_1 + a_{13}z_1}{a_{22}n_1 + a_{23}z_1 - n_1}$$

$$\frac{F_3 + a_{11}}{a_{21}} = \frac{a_{12}n_1 + a_{13}z_1}{a_{22}n_1 + a_{23}z_1 - T_{\square}Dn_1}$$

$$a_{22}n_1F_3 - T_{\square}Dn_1F_3 + a_{22}a_{11}n_1 - T_{\square}a_{11}Dn_1 + a_{23}F_3z_1 + a_{23}a_{11}z_1 = a_{21}a_{12}n_1 + a_{21}a_{13}z_1$$

$$n_1(a_{22}F_3 - T_{\square}(F_3 + a_{11})D + a_{22}a_{11} - a_{12}a_{21}) = a_{13}a_{21}z_1 - a_{23}F_3z_1 - a_{23}a_{11}z_1$$

$$n_1(-T_{\square}(F_3 + a_{11})D + a_{22}(F_3 + a_{11}) - a_{12}a_{21}) = z_1(a_{13}a_{21} - a_{23}a_{11} - a_{23}F_3)$$

$$\frac{n_1}{z_1} = G = \frac{-(a_{23}F_3 + a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21})}{-((T_{\square}(F_3 + a_{11})D + a_{22}(F_3 + a_{11}) + a_{12}a_{21}))}$$

$$G = \frac{a_{23}F_3 + a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}}{T_{\square}(F_3 + a_{11})D - a_{22}(F_3 + a_{11}) + a_{12}a_{21}} \quad (2.21)$$

#### B.4. - OBTENCION DE F1 MODIFICADO

$$q_c = 0$$

$$(2.7) \quad 0 = (q_t + q_r) + q_{p1}$$

$$(2.8) \quad T_t Dh_t = q_t + q_r$$

$$q_{p1} = -T_t Dh_t$$

$$(2.12) \quad h_t / q_{p1} = -F_1$$

en donde:

$$-F_1 = -h_t / T_t Dh_t$$

$$F_1 = 1 / T_t D$$

B.5.- OBTENCION DEL OPERADOR G POR MEDIO DE LA PRIMERA APROXIMACION

$$(2.21) \quad G = \frac{a_{23}F_3 + a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13}}{(T_w(F_3 + a_{11}))D - a_{22}(F_3 + a_{11}) + a_{12}a_{21}}$$

$$(2.24) \quad F_3 = 1 / T_w D$$

$$(2.28) \quad G = \frac{a_{23} + T_w D(a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13})}{(T_w D - a_{22})(1 + T_w a_{11} D) + T_w a_{12} a_{21} D}$$

B.6.- OBTENCION DE F1 MODIFICADO POR TEORIA DE LA COLUMNA RIGIDA

Si se desarrolla en series de potencias en término de  $\tanh TeD$ , se tiene:

$$\tanh TeD = TeD - (TeD)^3/3 + 2(TeD)^5/15 - 7(TeD)^7/315 + \dots$$

Para  $Te$  parciales correspondientes a los diferentes tramos de las tuberías, que conforman el sistema hidráulico se tiene:

$$0 \leq Te < 1 \text{ s}$$

Entonces la serie converge lo suficientemente rápido, por tanto los términos superiores a  $TeD$ , pueden ser despreciados. Por lo tanto se puede decir que para estas condiciones se tiene:

$$\tanh TeD = TeD$$

B.7.- OBTENCION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA  $m_1/z_1$  (en p.u.)

$$q_1 = a_{11}h_1 + a_{12}n_1 + a_{13}z_1 \quad (2.10a)$$

$$m_1 = a_{21}h_1 + a_{22}n_1 + a_{23}z_1 \quad (2.10b)$$

$$-h_1 = Z_{p1}Teq_1 \quad (2.23')$$

$$F_3 = -q_1/h_1 \quad (2.14)$$

Reemplazando en (2.10a):

$$(-h_1 F_3) - a_{11}h_1 = a_{12}n_1 + a_{13}z_1$$



$$-h_1(1 + a_{11}/F_3) = (a_{12}n_1 + a_{13}z_1)(1/F_3)$$

$$h_1 = \frac{-(a_{12}n_1 + a_{13}z_1)(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} \quad (2.16)$$

Reemplazando en (2.10b):

$$m_1 = \left( \frac{-(a_{12}n_1 + a_{13}z_1)(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} \right) a_{21} + a_{22}n_1 + a_{23}z_1$$

Ordenando se tiene:

$$m_1 = \frac{-a_{12}a_{21}(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} - \frac{a_{13}a_{21}(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} + a_{22}n_1 + a_{23}z_1$$

$$m_1 = \left( a_{23} - \frac{a_{13}a_{21}(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} \right) z_1 + \left( a_{22} - \frac{a_{12}a_{21}(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} \right) n_1$$

$$m_1 = \left( \frac{a_{23} + (a_{23}a_{11} - a_{13}a_{21})(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} \right) z_1 + \left( \frac{a_{22} + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} \right) n_1$$

Si  $F_t = m_1 / z_1$  se tiene :

$$F_t = \frac{a_{23} + (a_{23}a_{11} - a_{13}a_{21})(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} + \left( \frac{a_{22} + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})(1/F_3)}{1 + a_{11}(1/F_3)} \right) 6$$

$6 = n_1 / z_1$  está dado por la ecuación (2.21).

B.8. - OBTENCION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA TOTAL (SIN APROXIMACIONES)

$$(2.27) \quad F_t = \frac{a_{23} + A_0 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} + \left( \frac{a_{22} + A_1 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} \right) 6$$

donde:

$$A_0 = a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}$$

$$A_1 = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$$

$$A_2 \approx z_{p1} T_e$$

$$A_4 = A_2 a_{12} a_{21} - A_2 a_{22} a_{12} = a_{12} A_2 (a_{21} - a_{22})$$

$$(2.31) \quad G = \frac{a_{23} + A_2 A_0 D}{(T_{\square} D - a_{22})(1 + A_2 a_{11} D) + A_2 a_{12} a_{21} D}$$

$$G = \frac{a_{23} + A_2 A_0 D}{(A_2 a_{11} T_{\square})^2 + (T_{\square} - A_2 a_{22} a_{11} + A_2 a_{12} a_{21}) D - a_{22}}$$

$$F_t = \frac{a_{23} + A_0 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} + \frac{(a_{22} + A_1 T_w D)(a_{23} + A_2 A_0 D)}{(1 + a_{11} T_w D)[(A_2 a_{11} T_{\square})^2 D^2 + (T_{\square} - A_2 a_{22} a_{11} + A_2 a_{12} a_{21}) D - a_{22}]}$$

$$F_t = \frac{a_{23} + A_0 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} + \frac{a_{22} a_{23} + A_1 A_2 A_0 T_w D^2 + (a_{22} A_2 A_0 - A_1 a_{23} T_w) D}{a_{11}^2 A_2 T_w T_{\square} D^3 + [A_2 a_{11} T_{\square} + a_{11} T_w (T_{\square} + A_4)] D^2 + (T_{\square} + A_4 - a_{11} a_{22} T_w) D - a_{22}}$$

ECUACION TOTAL DE  $F_t$ :

Primera aproximación: Los términos del coeficiente de  $D^3$  se desprecian. La ecuación resultante corresponde a la función aproximada de  $F_t$  con cambios apreciables en la velocidad.

$$F_t = \frac{a_{23} + A_0 T_w D}{1 + a_{11} T_w D} + \frac{a_{22} a_{23} + A_1 A_2 A_0 T_w D^2 + (a_{22} A_2 A_0 - A_1 a_{23} T_w) D}{[A_2 a_{11} T_{\square} + a_{11} T_w (T_{\square} + A_4)] D^2 + (T_{\square} + A_4 - a_{11} a_{22} T_w) D - a_{22}}$$

B.9. - ECUACIONES HIDRAULICAS BASICAS

Considerando un tubo cilíndrico horizontal de sección transversal uniforme, como el mostrado en la figura # B.1, se definen las constantes y variables de la siguiente manera:

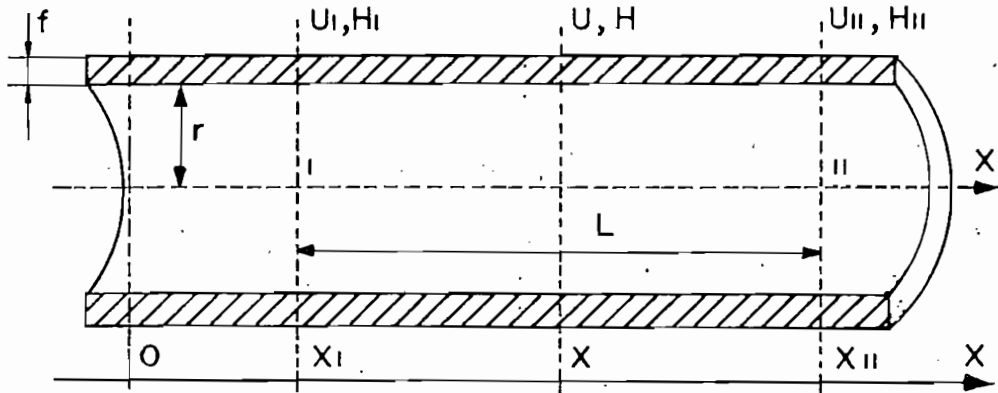


Figura # B.1

Donde:

- $r$  = Radio interno del tubo
- $f$  = Espesor de la pared del tubo
- $X$  = Coordenada longitudinal del tubo
- $X_i$  = Coordenada  $x$  en una sección cualquiera  $i$  (de I a II)
- $H$  = Cabeza en una sección
- $H_i$  = Cabeza de la sección  $i$
- $U$  = Velocidad del fluido en una sección
- $U_i$  = Velocidad promedio en una sección  $i$
- $Q$  = Flujo volumétrico del fluido en una sección
- $Q_i$  = Flujo volumétrico promedio del fluido en una sección  $i$
- $g$  = Aceleración de la gravedad
- $\rho$  = Densidad del fluido
- $K$  = Modulo de elasticidad del fluido
- $E$  = Modulo de Young para la tubería
- $L$  = Distancia entre las secciones I y II

$T_e$  = Tiempo de elasticidad o elástico.

$A$  = Area transversal interna del tubo ( $\pi r^2$ )

$Z_0$  =  $a/gA$  Impedancia.

$h_i$  = Desviación de la cabeza  $H_i$  alrededor del estado estable.

$q_i$  = Desviación en la relación de flujo volumétrico  $Q_i$  alrededor del estado estable.

$D$  = Operador derivativo con respecto al tiempo.

En el apéndice B (12-13) se deducen las siguientes expresiones de las ecuaciones modificadas para describir el fenómeno de golpe de ariete.

$$\alpha = \sqrt{g \left[ \frac{1}{K} + \frac{2r}{fE} \right]}$$

$a = \sqrt{g/\alpha}$  Velocidad de la onda de sobrepresión.

El coeficiente de fricción de la tubería  $\xi$  está dado por la rugosidad e dividida por el diámetro  $D$  de la tubería.

En el apéndice B.10 se deducen las siguientes expresiones hidráulicas correspondientes a las ecuaciones de Navier y Stokes modificadas para describir el golpe de ariete.

$$\frac{dU}{dX} = -\alpha \frac{dH}{dt} ; \quad \frac{dU}{dt} = -g \frac{dH}{dX} \quad (1)$$

Y para un tiempo  $t$ :

Se consideran  $U^*$  y  $H^*$  como las transformadas de Laplace de  $U$  y  $H$  respectivamente. Operando las ecuaciones (1) por medio de las transformadas de Laplace a ambos lados sobre los derivativos del tiempo se tiene:

$$\frac{\partial U^*}{\partial X} = -\alpha [DH^* - H(X, 0^+)]$$

$$DU^* - U(X, 0^+) = -g \frac{\partial H^*}{\partial X} \quad (2)$$

Para los valores iniciales de  $H$  y  $U$  en  $t = 0$ , los siguientes términos desaparecen:

$$H(X, 0^+) = U(X, 0^+)X_0 = 0$$

Las ecuaciones (2) se transforman en:

$$\frac{\partial U^*}{\partial X} = -\alpha DH^*$$

$$DU^* = -g \frac{\partial H^*}{\partial x} \quad (2^*)$$

Las soluciones de las ecuaciones (2\*) son conocidas por fórmulas matemáticamente ya desarrolladas, y son:

$$U^* = C_1 \cosh \frac{D}{a} X + C_2 \sinh \frac{D}{a} X \quad (3)$$

$$H^* = \pm \frac{-C_1}{\sqrt{ag}} \sinh \frac{D}{a} X - \frac{C_2}{\sqrt{ag}} \cosh \frac{D}{a} X$$

Se podría escribir las ecuaciones (3) para las secciones I y II donde se tendría:

$$U_i^* = C_1 \cosh \frac{D}{a} X_i + C_2 \sinh \frac{D}{a} X_i$$

$$\sqrt{ag} H_i^* = C_1 \sinh \frac{D}{a} X_i + C_2 \cosh \frac{D}{a} X_i \quad \text{para } i = I, II \quad (4)$$

Aplicando la identidad trigonométrica hiperbólica:

$$\cosh^2 X - \sinh^2 X = 1$$

Se tiene la solución de estas ecuaciones dada por la regla de Kramer

$$C_1 = U_i^* \cosh \frac{D}{a} X_I + \sqrt{ag} H_i^* \sinh \frac{D}{a} X_I$$

$$C_2 = -\sqrt{ag} H_i^* \cosh \frac{D}{a} X_I - U_i^* \sinh \frac{D}{a} X_I \quad (5)$$

Tomando  $C_1$  y  $C_2$  de las ecuaciones (5) y combinando en las ecuaciones (4) para el tramo  $i = II$ , se tiene:

$$U_{II}^* = U_I^* \cosh \frac{D}{a} X_I \cosh \frac{D}{a} X_{II} + \sqrt{ag} H_I^* \cosh \frac{D}{a} X_{II} \sinh \frac{D}{a} X_I -$$

$$-\sqrt{ag} H_I^* \sinh \frac{D}{a} X_{II} \cosh \frac{D}{a} X_I - U_I^* \sinh \frac{D}{a} X_I \sinh \frac{D}{a} X_{II} \quad (6)$$

Para simplificar este set de ecuaciones, se aplican los límites de frontera:

$$X_I = 0, \quad X_{II} = L \quad (7)$$

$$C_1 = U_I^*, \quad C_2 = -\sqrt{ag} H_I^* \quad (8)$$

Y también:

$$U_{II}^* = U_I^* \cosh T_e D - \sqrt{c g} H_I^* \sinh T_e D \quad (9)$$

Para el tiempo de elasticidad  $T_e = L/a$ , y combinando las ecuaciones (8) y la segunda ecuación de (4) se tiene:

$$H_{II}^* = -[U_I^*/\sqrt{c g}] \sinh T_e D - H_I^* \cosh T_e D \quad (10)$$

Además la ecuación del caudal establece que:

$$Q_i^* = A U_i^* \quad i = I, II \quad (11)$$

Entonces las ecuaciones (9) y (10), en donde se ha introducido la impedancia  $Z_0 = 1/A\sqrt{c g}$ , pueden ser escritas como:

$$\begin{aligned} Q_{II}^* &= Q_I^* \cosh T_e D - [1/Z_0] H_I^* \sinh T_e D \\ H_{II}^* &= -Z_0 Q_I^* \sinh T_e D + H_I^* \cosh T_e D \end{aligned} \quad (12)$$

Por definición los operadores de retardo  $e^{-TeD}$  y de adelanto  $e^{TeD}$ , aplicados a una función dan el siguiente arreglo:

$$\begin{aligned} e^{-TeD}.f(t) &= f(t - T_e) \\ e^{TeD}.f(t) &= f(t + T_e) \end{aligned} \quad (14)$$

El operador  $\sinh T_e D$  es por definición de la misma función:

$$\sinh T_e D = \frac{e^{TeD} - e^{-TeD}}{2} \quad (15)$$

Tal que:

$$(\sinh T_e D) f(t) = \frac{f(t + T_e) - f(t - T_e)}{2} \quad (16)$$

De similar forma:

$$\cosh T_e D = \frac{e^{TeD} + e^{-TeD}}{2} \quad (17)$$

$$(\cosh T_e D) f(t) = \frac{f(t + T_e) + f(t - T_e)}{2} \quad (18)$$

Considerando las ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} Q_{II} &= (\cosh T_e D) Q_{II} - (1/Z_0) (\sinh T_e D) H, \quad \text{con } H = -H_{II} \\ H_{II} &= -Z_0 (\sinh T_e D) Q_I + (\cosh T_e D) H_I \end{aligned} \quad (19)$$

Además para  $T_e)0$  y  $f(t) = 0$  cuando  $t(0$ , la transformada de Laplace de  $f(t - T_e)$  esta dada por:

$$L f(t - T_e) = e^{-T_e D} L[f(t)] \quad (20)$$

La misma consideración además de  $t(T_e$  se aplica para  $f(t + T_e)$ ,:

$$L f(t + T_e) = e^{T_e D} L f(t + T_e) \quad (21)$$

Para las mismas condiciones las siguientes relaciones también cumplen:

$$F(D) \operatorname{sech} T_e D = L[(\operatorname{sech} T_e D) f(t)] \quad (22)$$

$$F(D) \operatorname{cosh} T_e D = L[(\operatorname{cosh} T_e D) f(t)] \quad (23)$$

Se puede llegar a demostrar que las ecuaciones (19) y (12) son equivalentes para las siguientes condiciones:

$$Q_I(0,t) - H_I(0,t) = 0 \quad (24)$$

y  $T_e) t$

Haciendo uso de las identidades entre las funciones hiperbólicas se tiene que la ecuación (12) puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} H_{II}^* &= (\operatorname{sech} T_e D) H_I^* - Z_0 (\tanh T_e D) Q_{II}^* \\ Q_I^* &= (\operatorname{cosh} T_e D) Q_{II}^* + (1/Z_0) (\operatorname{senh} T_e D) H_{II}^* \end{aligned} \quad (25)$$

Además se tiene:

$$Q_{II}(L,t) \cong H_{II}(L,t) \cong 0 \quad (26)$$

Para  $t(T_e$  la ecuación (1) va a ser completamente equivalente a la segunda ecuación (25)

Por definición el operador  $\operatorname{sech} T_e D$  satisface la relación:

$$(\operatorname{cosh} T_e D) (\operatorname{sech} T_e D) f(t) = f(t) \quad (27)$$

Pero el operador  $T_e D$  también cumple:

$$(\operatorname{cosh} T_e D) (\tanh T_e D) f(t) = (\operatorname{senh} T_e D) f(t) \quad (28)$$

De esto se deduce que la primera expresión de la ecuación (1), diferencial ordinaria para el cálculo de la ecuación de transferencia de la turbina, y va a ser:

$$(\operatorname{cosh} T_e D) H_{II} = H_I - Z_0 (\operatorname{senh} T_e D) Q_{II} \quad (29)$$

Esta ecuación puede ser transformada en:

$$(\operatorname{cosh} T_e D) H_{II}^* = H_I^* - Z_0 (\operatorname{senh} T_e D) Q_{II}^* \quad (30)$$

Con las consideraciones anteriores la función  $f(t - T_e)$ , puede expandirse como sigue:

$$f(t - T_e) = f(t) - T_e f'(t) + \frac{T_e^2 f''(t)}{2!} + \dots \quad (31)$$

Se puede escribir el mismo también como:

$$e^{-T_e D} = 1 - (T_e D) + \frac{(T_e D)^2}{2!} + \dots \quad (32)$$

Derivando esta se tiene:

$$e^{-T_e D} f(t) = f(t) - T_e f'(t) + \frac{T_e^2 f''(t)}{2!} + \dots \quad (33)$$

Si esta serie converge lo suficientemente rápido la misma puede reemplazarse por:

$$(1 - T_e D) f(t) \quad (34)$$

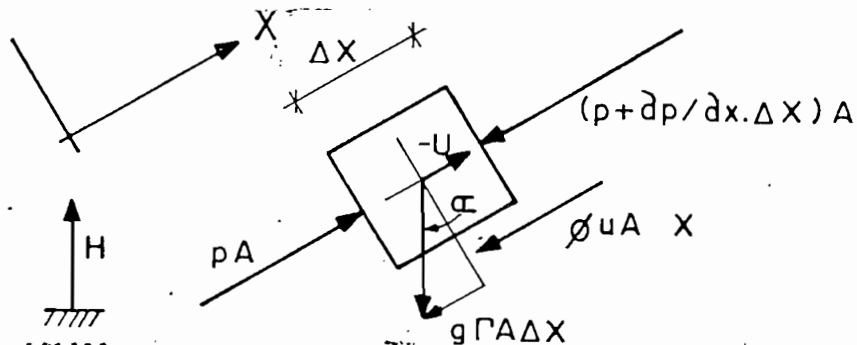
Pero si esta aproximación no es lo suficientemente precisa se puede usar una del tipo siguiente en lugar de  $e^{-T_e D}$

$$1 - (T_e + \frac{(T_e D)^2}{2!})$$

Similarmente los operadores hiperbólicos (sech  $T_e D$ ), usados en las ecuaciones (1), pueden ser expandidos en series de potencias que contienen términos  $D$ . En esta forma es posible librarse de los operadores hiperbólicos.

B.10.- DEDUCCION DE LAS ECUACIONES MODIFICADAS PARA EL GOLPE DE ARIETE

Para la deducción es necesario partir de un diagrama básico de cuerpo libre que muestre las fuerzas actuantes sobre un determinado volumen de control de fluido.



En el diagrama anterior se considera a un elemento de fluido representativo y que se encuentre dentro de la tubería de presión, en una longitud  $\Delta X$  cualquiera y una sección  $A$  transversal de la tubería en cualquier punto.

Aplicando la ley de conservación del momento a este elemento se tiene :

$$pA - (p + \frac{\partial p}{\partial x} \Delta X) A - \sum U A \Delta X - (g \Gamma \sin \theta) A \Delta X = \int A \Delta X \frac{dU}{dt} \quad (31)$$



Pero  $\text{sen}\theta = dH/dX$

$$-\frac{\partial}{\partial x}(p + \rho gH) = \rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \quad (37)$$

Considerando  $P = p + \rho gH$  y substituyendo el (37), se tiene:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \frac{\partial U}{\partial t} - \rho U \quad (38)$$

Si la fricción es considerada despreciable:

$$\rho U = 0$$

Pero  $\frac{\partial U}{\partial t} = f\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)$

Reemplazando se tiene:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \frac{\partial H}{\partial x} = \rho \frac{\partial U}{\partial t} + 0$$

Pero  $dp/dx = 0$  por ser constante en ambos lados del elemento  $\Delta X$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial x} \quad \text{Que es la primera ecuación modificada}$$

Para obtener la segunda ecuación es necesario trabajar en el dominio del tiempo, de tal forma de tener una expresión de la forma:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = f\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)$$

Si se considera un elemento de fluido de largo  $\Delta X$  en un tubo uniforme de área  $A$ , y si la presión en el elemento es cambiada desde  $p$  a  $p_1$ , la densidad  $\rho$  cambia a  $(\rho + \partial\rho)$ , así como el área  $A$  cambia a  $(A + \partial A)$ . Y por la ley de conservación de las masas se tiene:

$$\rho A \Delta X = (\rho + \partial\rho)(A + \partial A)\left(\Delta X + \frac{dn}{dX} \Delta X\right)$$

Hay que notar que  $\Delta X$  cambia a  $\left(\Delta X + \frac{dn}{dX} \Delta X\right)$

$n$  = desplazamiento del fluido en el área  $A$ , desde su posición inicial en el tiempo  $t = 0$

Se tiene:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = U \quad (a)$$

Si son despreciados los términos de orden superior por ser pequeños se tiene:

$$\frac{\partial f}{f} + \frac{\partial A}{A} + \frac{\partial n}{\partial x} = 0 \quad (39)$$

Para un fluido sensible a la compresión, los cambios en presión y densidad están dados por:

$$\frac{\partial p}{\partial f} = \frac{K}{f} \quad (40)$$

Donde K es el coeficiente de compresibilidad del fluido.

Los cambios en la presión ( $p - p_1$ ) y el cambio en el diametro D por  $\partial D$  en la tubería están dados por:

$$\partial D = \frac{(D + f)(D)}{2fE}(p - p_1)$$

$$\partial D = \frac{D^2}{2fE}(p - p_1)$$

En la ecuación anterior se consideró despreciable el término Df

$$\frac{\partial A}{A} = \frac{D}{fE}(p - p_1) \quad (41)$$

Donde:

E = Módulo de Young para la tubería.

f = Espesor de la tubería

D = Diametro.

A = Area transversal de la tubería.

Combinando las ecuaciones (39), (40) y (41) se tiene:

$$-(p - p_1) \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{fE} \right) = \frac{\partial n}{\partial x}$$

Pero por definición realizada en el apéndice B.12 se tiene:

$$f g \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{fE} \right) = \sigma$$

$$-(p - p_1) \frac{\sigma}{f g} = \frac{\partial n}{\partial x} \quad (p = p_0 + f g H)$$

$$-\alpha \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial t \cdot \partial x}$$

Aplicando la ecuación (a) a la expresión:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{dn}{dt} \right)$$

$$-\alpha \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial x}$$

Segunda ecuación que describe el fenómeno del golpe de ariete.

### B.11.- ECUACIONES DE FLUJO PARA TUBOS UNIFORMES CON FRICCIÓN DESPRECIABLE

A partir de las ecuaciones obtenidas en el apéndice B.9, se desarrollarán las ecuaciones para tubos uniformes con fricción despreciable.

Las ecuaciones para cabeza y flujo volumétrico del apéndice B.9, establecen:

$$H_{II} = (\operatorname{sech} T_e D) H_I - Z_o (\tanh T_e D) Q_{II}$$

$$Q_I = (\cosh T_e D) Q_{II} + (1/Z_o) (\sinh T_e D) H_{II} \quad (42)$$

Si los límites son reemplazados por  $X_I=0$  y  $X_{II}=L$ . Las mismas relaciones se mantienen si las cabezas  $H_I$ ,  $H_{II}$ , y las relaciones de flujo  $Q_I$ ,  $Q_{II}$  son reemplazadas por las desviaciones  $h_I$  y  $h_{II}$  así como por las desviaciones de flujo  $q_I$  y  $q_{II}$  respectivamente.

Investigaciones teóricas experimentales (24)(28), muestran que la caída de cabeza debido a la resistencia hidráulica, varía en estado estable con el cuadrado de la relación de flujo. Siguiendo las sugerencias de H. Paynter, la pérdida de cabeza debido a la fricción es aproximada, por reemplazo en la primera ecuación (42), por  $(-k\{Q_{II}\})$ , donde  $k$  es una constante y  $\{Q_{II}\}$  está denotado como el cuadrado del valor absoluto de  $Q_{II}$ .

$$H_{II} = (\operatorname{sech} T_e D) H_I - Z_o (\tanh T_e D) Q_{II} - k Q_{II} \quad (43)$$

Y en términos de desviaciones la primera ecuación es reemplazada por:

$$h_{II} = (\operatorname{sech} T_e D) h_I - Z_o (\tanh T_e D) q_{II} - K_{II} q_{II} \quad (44)$$

Donde la constante  $K_{II}$  esta dada por:

$$K_{II} = 2k|Q_{II}|.$$

B.12. - DESCRIPCION DEL FENOMENO DEL GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete se puede presentar en una tubería que conduzca líquido de tope a tope, supongase que por un tubo con una válvula en su salida se descarga un depósito. Si se cierra la válvula súbitamente, se crea dentro de la tubería una presión dinámica, además de la presión estática normal. A la presión dinámica se llama comúnmente GOLPE DE ARIETE y se produce por la transformación súbita de energía cinética a energía de presión. Así si  $P$  es la fuerza de la presión debida al golpe de ariete,  $M$  la masa de agua contenida en el tubo, cuya velocidad decrece en  $dU$  durante el intervalo  $dt$ , se tiene:

$$P = M dU/dt \quad (1-1)$$

Si  $dt = 0$ , la presión resultante sería infinita. Sin embargo no es posible que el cambio de velocidad sea instantáneo.

Serán  $L_1, L_2, L_3 \dots L_n$ , segmentos de la tubería infinitamente cortos, a partir del extremo de la descarga en el que se encuentra una válvula. En el instante en que se cierra ésta, el agua contenida en el segmento queda en reposo, y su energía cinética es transformada en energía de presión, que comprime el agua, por lo cual la pared del tubo con la que esta en contacto se dilata ligeramente. A causa del ensanchamiento del área de la sección transversal de  $L_1$ , y de la compresión del agua que contiene, habrá un incremento en la masa de agua contenida con relación a la existente antes del cierre de la válvula y, por tanto, después de cerrar ésta, entra en  $L_1$  una pequeña cantidad de agua. Un instante más tarde, tiene lugar un proceso semejante en  $L_2$  y luego en  $L_3$ , lo cual produce una onda de presión (compresión) que se propaga desde la válvula hasta el depósito. En el instante en que esta onda llega a este, toda la tubería esta dilatada transversalmente y el agua contenida en ella esta comprimida. No hay entonces ninguna masa móvil de agua para mantener esta alta presión, y la tubería comienza a contraerse y el agua a dilatarse con el consiguiente retorno a la presión estática inicial. Este proceso empieza en el depósito y se propaga, como una onda, hacia el extremo inferior de la tubería. Durante este segundo periodo, parte del agua almacenada en la tubería vuelve al depósito, pero a causa de la inercia de esta masa en movimiento, la cantidad de agua que regresa es mayor que el exeso almacenado al final del primer periodo, de manera que en el instante en que esta segunda onda llega a la válvula de presión en ese punto desciende no solo a la presión estática inicial, sino por debajo de ella. Sigue después un tercer periodo, durante el cual una onda de presión menor que la presión estática inicial se transmite desde la válvula hasta el depósito, cuando esta llega al depósito toda la tubería esta a presión menor que la estática, pero como toda el agua esta nuevamente en reposo, la presión en  $L_n$  retorna inmediatamente a la presión estática inicial debida a la carga del agua del depósito. Esto origina un cuarto periodo marcado por una onda de presión estática inicial que desciende por la tubería. Cuando esta onda llega a la válvula, la presión en esta será la inicial y, por un instante, las condiciones en toda la tubería serán semejantes a las existentes cuando la válvula fue cerrada. Sin embargo la velocidad del agua (y golpe de ariete resultante) es en ese momento un poco menor que en el cierre, a causa del rozamiento y de la elasticidad imperfecta de la tubería y del agua, lo que lo convierte en un proceso amortiguado, y que decrece paulatinamente, y así instantáneamente se inicia otro ciclo semejante al explicado, luego otro, y así sucesivamente, pero en cada grupo de ondas la intensidad decrece, hasta que finalmente las ondas desaparecen, y el fluido alcanza finalmente el estado de reposo permanente.

La ecuación (1-1) indica que en un cierre instantáneo de la válvula, la presión resultante sería infinita, si el agua no fuera incompresible y la tubería elástica. Es imposible cerrar la válvula instantáneamente, pero si es cerrada completamente antes de que la primera onda de presión (compresión) tenga tiempo a regresar hasta ella en una onda de baja presión, o, en otras palabras si  $T$  es menor que  $2L/a$ , la presión continúa aumentando hasta el momento del cierre completo, y la presión resultante será precisamente la misma que si la válvula hubiera sido cerrada instantáneamente. Si  $T$  es mayor que  $2L/a$  las primeras ondas de presión (compresión), regresan como ondas de baja presión y tienden a reducir la elevación de presión que resulta de las etapas finales del cierre de la válvula.

Por lo tanto, si  $T$  es igual o menor que  $2L/a$ ,  $h$  (carga debida al golpe de ariete, en exceso a la

carga elástica), será el correspondiente al cierre instantáneo, pero si T es mayor que 2L/a, h disminuirá a medida que aumente T. A los tiempos anteriormente descritos se los denomina rápido y lento respectivamente.

ECUACIONES PRACTICAS PARA EL CALCULO DE LA SOBRE PRESION.

En vista que el realizar un estudio completo de las ecuaciones diferenciales del golpe de ariete es largo, y necesita de la utilización de programas para resolver ecuaciones simultáneas no lineales, se han obtenido ecuaciones prácticas aproximadas para el cálculo de la sobre presión generada por el golpe de ariete, las cuales se deducirán a continuación.

CALCULO DE LA PRESION CUANDO  $T \leq 2L/a$ .

La energía cinética contenida en la columna de agua en movimiento dentro de la tubería,  $E_a$ , se consume en el trabajo de compresión del agua,  $W_c$ , y en dilatación de las paredes de la tubería,  $W_d$ .

$$E_a = W_c + W_d \tag{2-L}$$

Si la carga de presión resultante es de h, la compresión de la columna de agua absorbe:

$$W_c = \frac{(\rho h)^2 A L}{2 K} \quad \text{(unidades de energía)} \tag{3-L}$$

De manera semejante, el trabajo total efectuado para dilatar las paredes de la tubería será:

$$W_d = \frac{(\rho h)^2 A L (2r)}{2 E f} \tag{4-L}$$

Los reemplazos correspondientes de las ecuaciones (3-L) y (4-L) en la ecuación (2-L), dan:  
(Las deducciones correspondientes se hallan en el apéndice B.13)

$$\frac{\rho A L U^2}{2 g} = \frac{(\rho h)^2 A L}{2 K} + \frac{(\rho h)^2 L A (2r)}{2 E f} \tag{5-L}$$

Despejando el valor de h se tendrá:

$$h = \frac{U}{g \sqrt{\frac{r}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{2r}{E f} \right)}} \tag{6-L}$$

Considerando que en un tiempo t, un cilindro de carga cuya longitud esta dada por dt, queda en reposo. La variación de la cantidad de movimiento en la unidad de tiempo es:

$$G = \frac{\rho A a U}{g} \tag{7-L}$$

Esto debe ser igual a la fuerza,  $\rho h A$ , debida al incremento de la presión, y por tanto igualando con la ecuación 7 se tiene:

$$\Gamma h A = \frac{A a U}{g} \tag{8-L}$$

De esta expresión se puede despejar el valor de h:

$$h = \frac{a U}{g} \tag{9-L}$$

Y finalmente, igualando y simplificando las ecuaciones (9-L) y (6-L), se llega a tener:

$$a = \sqrt{\frac{g}{\rho g \left( \frac{1}{K} + \frac{2r}{E f} \right)}} \tag{10-L}$$

En esta ecuación se tiene que  $\rho$  = densidad del agua.  $\Gamma = \rho g$

En la ecuación (10-L) se define lo siguiente:

$$\sigma = \rho g \left[ \frac{1}{K} + \frac{2r}{E f} \right] \tag{11-L}$$

Por esa razón la ecuación (10-L) se puede escribir como:

$$a = \sqrt{\frac{g}{\sigma}} \tag{12-L}$$

Como el sonido es transmitido por medio de ondas de presión, a, es la velocidad de propagación del sonido a través del agua, en la tubería que la contiene.

La teoría anterior ha sido desarrollada por el profesor N. Zhukovski, y se ha verificado experimentalmente, dando resultados satisfactorios. (24) (28)

CALCULO DE LA PRESION CUANDO T ) 2L/a.

El método siguiente está basado en la teoría anterior de las ondas de presión, y consiste en seguir la acción de estas ondas instante por instante. La exactitud de este experimento ha sido verificada por muchos experimentos cuidadosos.

Se supondrá que en vez de cerrar la válvula de un modo continuo y uniforme, la cerraremos por medio de una serie de pequeños movimientos instantáneos, separados por breves intervalos. Así, cada movimiento de la válvula decremента en AU a la velocidad U, y como esta reducción es instantánea, el incremento resultante de la carga de presión será dado por la ecuación (9-L).

$$\underline{h} = \frac{a \underline{U}}{g} \tag{13-L}$$

En consecuencia, se transmiten a la tubería una serie de ondas de presión que, cuando se suman, dan el exeso total de la presión producida.

Se supone que cada pequeño movimiento de la válvula produce la misma reducción de área de la abertura. En el instante en que la válvula comienza a cerrarse, la presión detrás de ella comienza a elevarse, y esta elevación de presión incrementa la velocidad del agua a través de la abertura y disminuye la intensidad del retardo de la velocidad en la tubería. Este retardo reducido tiene gran importancia en cuanto, reduce los efectos totales del golpe de ariete.

La velocidad a través de la abertura de la válvula, se expresa por la fórmula para descargas por orificios:

$$u = C_u \sqrt{2gH} \quad (14-L)$$

O también:

$$u = K' \sqrt{H} \quad (15-L)$$

En la cual,  $K'$  puede determinarse en un problema dado, si se conoce la velocidad  $U$  en la tubería, la carga total  $H$ , y la relación  $\beta$  del área de la abertura de la válvula al área de la tubería y se tendrá:

$$u = \frac{U}{\beta} = K' \sqrt{H} \quad (16-L)$$

La ecuación (16-L) puede escribirse también de la forma siguiente:

$$U = \beta K' \sqrt{H} \quad (17-L)$$

O bien:

$$U = Kt \sqrt{H} \quad (18-L)$$

En donde:

$$Kt = \beta C_u \sqrt{2g} \quad (19-L)$$

A medida que se cierra la válvula,  $\beta$  ó  $Kt$ , se hacen más pequeños, y se producen incrementos correspondientes  $h$  en la carga, que produce la descarga a través de la válvula, y decrementos  $U$ , en la velocidad del agua en la tubería. La ecuación (18-L), por lo tanto se la puede escribir en la forma:

$$U - U = Kt \sqrt{H + \delta H} \quad (20-L)$$

La solución del problema consiste en hallar los valores de  $U$  y  $h$ , que satisfagan las ecuaciones (13-L) y (20-L), para los diferentes valores de  $Kt$ .

B.13. - DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DEL GOLPE DE ARIETE

Cálculo de la presión cuando  $T \leq 2L/a$ .

T es el tiempo de cierre de la válvula.

La energía cinética de la columna de agua será igual a:

$$E_a = \frac{1}{2} M U^2 \quad (a)$$

Donde M es la masa total de la columna de agua, que fluye por la tubería de presión.

M también se puede expresar como:

$$M = \frac{\Gamma}{g} A L \quad (b)$$

Donde:

$\Gamma$  = Peso específico del agua.

A = Sección transversal interna del tubo.

L = Longitud total del conducto.

Reemplazando el valor de la ecuación ( b ) en la ecuación ( a ) se tiene:

$$E_a = \frac{1}{2} \frac{\Gamma A L U^2}{g} \quad (c)$$

Que es la ecuación que determina la cantidad de energía cinética, que se transformará en energía de compresión del agua y energía de dilatación de las paredes de la tubería.

$$E_a = E_c + E_d \quad (d)$$

En la ecuación ( d ),  $E_c$  es la energía que se gastará en el trabajo realizado para comprimir la columna de agua.  $E_d$ , es la energía que se gastará en la dilatación de las paredes de la tubería. Y denominando  $W_c$ , como el trabajo realizado para comprimir la columna de agua, y a  $W_d$  como el trabajo realizado para dilatar las paredes de la tubería, se puede escribir las siguientes relaciones:

$$E_c = W_c$$

$$E_d = W_d \quad (e)$$

Haciendo uso de las relaciones del literal ( e ), se puede escribir la relación ( d ) como sigue:

$$E_a = W_c + W_d \quad (e)$$

Ahora considerando el trabajo realizado para comprimir la columna de agua se puede asumir:



$$W_c = F_m dt \quad (g)$$

Donde  $F_m$  es la fuerza media aplicada, la misma que será igual a una presión por una área, en este caso el área será constante y corresponde a la sección transversal de la tubería. Y además considerando:

$$F = P A \quad (h)$$

Donde  $P$  es la presión del golpe de ariete.

Para un instante inicial antes de producirse el golpe de ariete, esta fuerza tendrá un valor de cero, y por tanto la fuerza media se puede asumir como:

$$F_m = (P_f/2) A \quad (i)$$

En la ecuación ( i ) la presión final será igual a:

$$P_f = \Gamma h \quad (j)$$

De lo que la ecuación ( i ) quedará como:

$$F_m = (\Gamma h A)/2 \quad (k)$$

La ecuación J da el valor de la fuerza media ejercida por el golpe de ariete sobre la columna de agua. En la ecuación ( g ),  $dt$  es la deformación total sufrida por la columna de agua, la misma que se considera cuando el agua se comprime en forma elástica ideal. Además usando la ley de Hooke se tendrá que el esfuerzo de compresión de la misma será igual a una fuerza dividida para un área, lo que es la presión ejercida por el golpe de ariete.

$$\sigma_c = F_m/A = P \quad (l)$$

Además obedeciendo la ley de Hooke, la deformación unitaria sufrida por la columna de agua será:

$$\epsilon_c = \sigma_c/K = P/K \quad (ll)$$

Donde  $\epsilon_c$ , es la deformación unitaria sufrida por la columna de agua, y  $\sigma_c$  es el esfuerzo de compresión actuante sobre dicha columna. Reemplazando en la ecuación ( ll ) los valores de las ecuaciones ( l ) y ( j ) se tiene:

$$\epsilon_c = \Gamma h/K \quad (m)$$

De donde la deformación total sufrida por la columna de agua será:

$$dt = \epsilon_c L \quad (n)$$

Reemplazando el valor de la relación ( m ), en la ecuación ( n ) se tiene:

$$dt = \Gamma h L/K \quad (o)$$

Finalmente reemplazando los valores de las relaciones ( o ) y ( k ), en la ecuación ( g ), se tendrá el trabajo realizado para comprimir la columna de agua:

$$W_c = \frac{(\Gamma h)^2 A L}{2 K} \quad (p)$$

En forma similar se determinará el trabajo realizado para dilatar las paredes de la tubería de presión. Se considerará una fuerza media actuante la que producirá una dilatación transversal sobre las paredes de la tubería, también se asumirá un comportamiento de cilindros de paredes delgadas, y por tanto se tendrá que el trabajo de dilatación será:

$$Wd = F_m' dD \quad (q)$$

Donde:  $F_m'$  es la fuerza media ejercida sobre las paredes de la tubería de presión.  
 $dD$  es la dilatación total transversal que sufren las paredes de la tubería.

En un cilindro de paredes delgadas el esfuerzo transversal es igual a:

$$\sigma_t = P D/2 f \quad (r)$$

Donde:  $\sigma_t$  es el esfuerzo transversal ejercido sobre la tubería.  
 $D$  es el diámetro interno de la tubería.

$$D = 2 r$$

$f$  es el espesor de la pared de la tubería.

Reemplazando la ecuación ( j ) en la ecuación ( r ), se tiene:

$$\sigma_t = \Gamma h r/f \quad (s)$$

Además se tiene que la deformación unitaria transversal será:

$$\epsilon_D = \sigma_t/E \quad (t)$$

Reemplazando el valor de la ecuación ( s ), en la ecuación ( t ) se tiene:

$$\epsilon_D = h r/f E \quad (u)$$

La dilatación transversal total será:

$$dD = \epsilon_D \pi D \quad (v)$$

Substituyendo el valor de ( u ), en la ecuación ( v ), se tiene:

$$dd = \frac{\Gamma h (2r)^2 \pi}{2 f E} \quad (w)$$

La fuerza media actuante sobre la pared será:

$$F_m' = P_m A' \quad (x)$$

En la relación ( x ),  $A'$  es el área longitudinal de la tubería, la cual se la considera igual a:

$$A' = D L \quad (y)$$

Y  $P_m$  es la presión media que se ejerce sobre las paredes de la tubería de presión, y se puede aproximar a:

$$P_m = \Gamma h/4 \quad (z)$$

Reemplazando los valores de las ecuaciones ( z ) y ( y ), en la ecuación ( x ) se tiene:

$$F_m' = h D L \Gamma / 4 \quad ( a' )$$

Finalmente se tiene de reemplazar ( a' ) y ( w ), en la ecuación ( q ) la expresión que determina el trabajo realizado para dilatar la tubería de presión.

$$W_d = \frac{L A 2r h^2}{2 f E} \quad ( b' )$$

Substituyendo las ecuaciones ( c ), ( p ) y ( b' ), en la ecuación ( d ) se obtiene:

$$\frac{\Gamma A L U^2}{2 g} = \frac{(\Gamma h)^2 A L}{2 K} + \frac{(\Gamma h)^2 L A 2r}{2 f E}$$

Operando la ecuación anterior y despejando h, se tiene:

$$h = \sqrt{\frac{U}{g \left( \frac{r}{g K} + \frac{2r}{E f} \right)}} \quad ( c' )$$

A partir de estas consideraciones se puede llegar a determinar las ecuaciones que definen la velocidad de la onda del golpe de ariete [a = f(σ)], en la misma forma que se indicada en el apéndice B.12.

B.14.- DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DE F3 MODIFICADAS PARA MACRO GENERACION

Para el caso de macro centrales, se considera que el tanque de equilibrio aísla al túnel del resto del sistema hidráulico y para mini centrales se deberá considerar que el túnel no existe Fig. # 2.5 (ver sección II.B.2). La práctica ha demostrado que una misma modificación matemática produce los efectos deseados en ambos casos, y esta modificación tiene que ver con la pérdida del término de variación de caudal del túnel de aducción q<sub>c</sub>.

$$q_c = 0 \quad ( B.1 )$$

La pérdida del término q<sub>c</sub> de las ecuaciones (2.6) y (2.7) de la sección II.B.1.1 las modifica, describiendo matemáticamente el túnel para macro centrales como un tubo en el cual el flujo Q es constante y las variaciones q despreciables, es decir que el tanque de equilibrio "filtra" las fluctuaciones hacia el túnel. Para mini centrales se considera que el túnel no existe por lo que los términos correspondientes a el como z<sub>c</sub> y z<sub>c</sub> no existen tampoco.

Las ecuaciones (2.6) y (2.7) se modifican por la pérdida del término q<sub>c</sub>, para convertirse en las ecuaciones (B.2) y (B.3), que se muestran a continuación:

$$h_t = \text{sech}(T_t D) h_w \quad ( B.2 )$$

$$-(q_t + q_r) = q_{p1} \quad ( B.3 )$$

Para pequeñas centrales, ésto significa que la relación de cabeza del tanque de equilibrio  $h_t$  esta determinada exclusivamente por las variaciones de la cabeza del reservorio  $h_w$  y el tiempo del tanque de equilibrio  $T_t$ . Pero al ser un reservorio lo suficientemente grande, como ya se discutió en la sección II.B.1.1, se puede considerar que  $h_w=0$  (2.5), por lo que  $h_t$  también es cero lo cual significa que el tanque de equilibrio ha sido eliminado pasando a cumplir esta función directamente el reservorio.

Para estas condiciones el apéndice B.4 muestra la deducción de  $F_1$  modificado bajo las condiciones enunciadas en la sección II.B.1.1.

$$F_1 = 1/T_t^D \quad ( B.4 )$$

La ecuación (B.4) define dos condiciones diferentes, la primera para mini centrales, en donde el tiempo de reacción del tanque  $T_t$  es también del reservorio. Este reservorio es lo suficientemente grande, para que al producirse una variación, el tiempo de reacción sea también muy grande, por lo que se puede considerar:

$$F_1 = 0 \quad ( B.5 )$$

La segunda condición es para grandes centrales hidroeléctricas, en donde el tiempo del tanque no se desprecia, si bien es alto es característica básica para determinar el elemento que entrega el flujo  $q_{p1}$  a la tubería de presión, en el tiempo  $T_t$ , en caso de sobre cargas en el sistema de generación.

Entonces si el término  $F_1=0$  y  $Z_{p1}$  es despreciado, para los rangos de control, en el operador  $F_3$  de la ecuación (2.15) de la sección II.B.1.1, la modificación que se opera es:

$$F_3 = 1/Z_{p1} \tanh(TeD) \quad ( B.6 )$$

Con el operador  $F_3$  exactamente igual al operador (2.24), para micro centrales se puede realizar el análisis ya sea de respuesta de frecuencia o para diseño, en grandes centrales hidroeléctricas, también es posible el aplicar las consideraciones de las secciones que preceden a II.B.2 con el fin de simplificar los cálculos, aunque se nota que las ecuaciones a las que se llegará serán exactamente iguales a las encontradas para microcentrales.

APENDICE C

CONSTANTES DEL SERVOMOTOR ELECTRICO REALIMENTADO

Para la determinación de las constantes de tiempo del servomotor eléctrico realimentado,  $\tau_1$  y  $\tau_0$  dadas por las ecuaciones (C.1), y (C.2) se observa que es necesario determinar las siguientes constantes:  $K_m$ ,  $\beta$ ,  $J$ , y  $K$ .

$$\tau_1 = J/\beta \quad (C.1)$$

$$\tau_0 = \beta R_a/K_m K \quad (C.2)$$

Donde:

$\beta$  = coeficiente de amortiguamiento viscoso

$R_a$  = resistencia de armadura (44  $\Omega$ )

$K_m$  = constante de torque

$J$  = inercia total del sistema

$K$  = constante de realimentación de posición del servomotor eléctrico

C.1.- DETERMINACION DE  $K_m$ .

Para la determinación de  $K_m$  se obtiene experimentalmente la curva del torque de salida en el eje del motor ( $T_L$  a velocidad constante) vs. la intensidad de corriente  $i_a$ , la cual se indica en el gráfico C.1. En la figura anterior el torque entregado en el eje del motor ( torque de carga ) se relaciona con el torque generado por el motor mediante la ecuación (C.3).

$$T = J \, dw/dt + f \cdot w + T_L \quad (C.3)$$

Para el caso de funcionamiento en estado estacionario en la ecuación (C.3), el término afectado por  $dw/dt$  será cero, y por tanto se tendrá la ecuación (C.4).

$$T = f \cdot w + T_L \quad (C.4)$$

El término  $f \cdot w$  es constante al mantener la velocidad angular del motor constante, dependiendo la variación del torque generado por el motor ( $T$ ) solo de la variación del torque de carga ( $T_L$ ).

Igualando la ecuación (C.4) con la ecuación (5.1), se obtiene la ecuación (C.5):

$$T = K_m i_a \quad (5.1)$$

$$K_m \cdot i_a = f \cdot w + T_L \quad (C.5)$$

En la ecuación (C.5), al ser  $f.w$  constante, la intensidad de corriente  $i_a$  variará en función del cambio del torque de carga  $T_L$ , y por tanto el valor de la constante  $K_m$  se lo puede determinar como la pendiente de la curva dada por el gráfico C.1, mediante la siguiente relación:

$$K_m = T_L / i_a \tag{C.6}$$

Reemplazando valores del gráfico C.1, en la relación (C.6), da un valor de  $K_m = 4.31 \text{ N-m/A}$ .

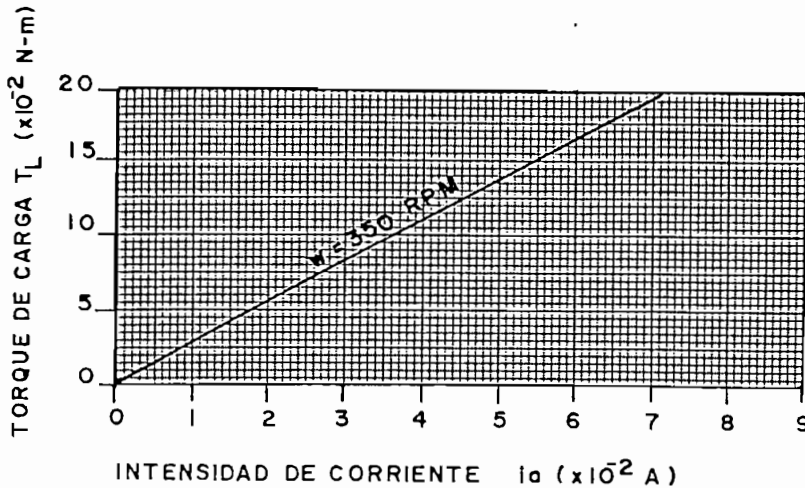


Figura C.1

C.2.- DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO  $\theta$

Para determinar experimentalmente el coeficiente de amortiguamiento ( $\theta$ ), se construye la curva Torque vs. Velocidad angular del motor, manteniendo el voltaje de alimentación constante el cual se indica en el gráfico C.2.

De la ecuación (5.9) se observa que el coeficiente  $\theta$  es igual a:

$$\theta = f + K_m.K_b / R_a \tag{C.7}$$

Donde:

$K_m$  = Constante de torque del servomotor

$K_b$  = Constante de velocidad

El coeficiente  $\theta$  se lo puede determinar como la pendiente de la curva C.2. (07) (37)

Reemplazando los valores dados por la curva (C.2) cuando el motor está bloqueado ( $w = 0$ ), y cuando está en vacío ( $T_L = 0$ ) se tiene que el valor de  $\theta$  es igual a:

$$\theta = 5,35 \times 10^{-3} \text{ N-m-s/rad}$$

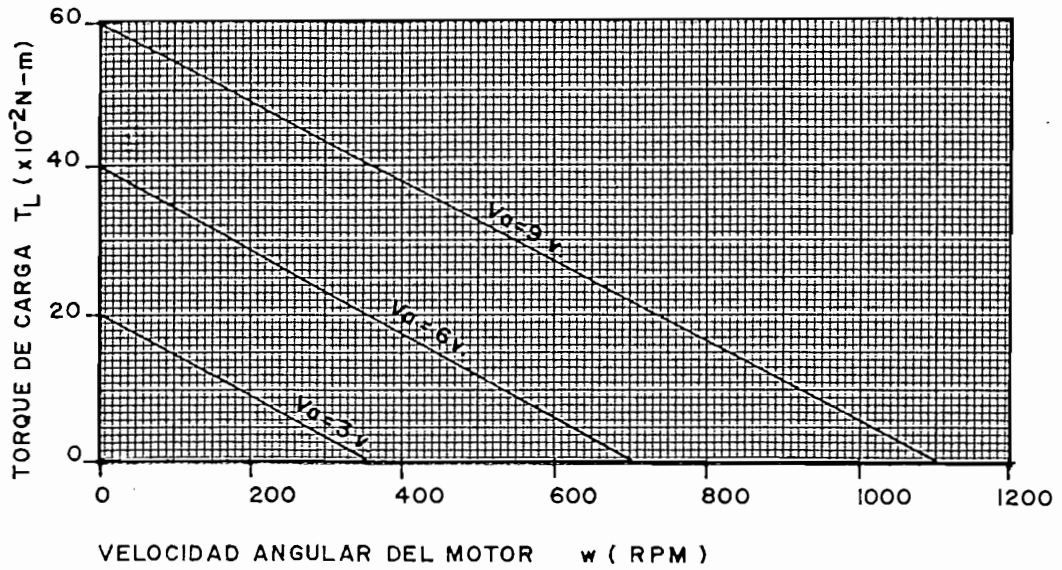


Figura C.2

C.3.- DETERMINACION DE LA INERCIA TOTAL DEL SISTEMA J

A partir de la ecuación (5.31) deducida en la sección V.C y reemplazando los siguientes datos en ésta se obtiene la inercia total del sistema:

$$J = \frac{1}{2} m_r R_r^2 + \frac{1}{3} m_v K t^2 \frac{L^2}{L_1^2} + m_{vv} K t^2 \frac{L^2}{L_1^2} \quad ( 5.31 )$$

Datos:

Masa del rotor	$m_r = 0,4 \text{ Kg}$
Radio del rotor	$R_r = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$
Masa de la varilla	$m_v = 0,3 \text{ Kg}$
Longitud de la varilla	$L = 0,63 \text{ m}$
Distancia de realimentación	$L_1 = 0,125 \text{ m}$
Masa del carrete de la válvula	$m_{vv} = 0,5 \text{ Kg}$

Reemplazando todos los valores anteriores y operando la ecuación (5.31) se tiene que la inercia total del sistema es igual a:

$$J = 9,52 \times 10^{-5} \text{ Kg-m}^2$$

C.4.- DETERMINACION DE LA REALIMENTACION DE POSICION K

La realimentación de posición (K) se define como la ecuación (C.8).

$$K = V / \theta \tag{C.8}$$

Para determinar el valor de K se debe tener en cuenta:

- 1.- El máximo desplazamiento posible de la realimentación K (desplazamiento de la tuerca), el cual es de 3 mm, cuando el sistema servomotor se halla a 125 mm del eje del pistón tal como se indica en el gráfico C.3.
- 2.- Al ser el paso del tornillo de 1 mm, para desplazarse los 3 mm el tornillo debe dar tres vueltas (18,85 radianes).

Dadas estas condiciones y puesto que el voltaje máximo aplicado al servomotor es de 9V, se tiene que K es igual a:

$$K = 0,5 \text{ V/rad}$$

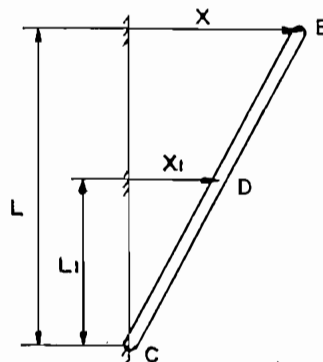


Figura C.3



## C.5.- CALCULO DE LAS CONSTANTES DE TIEMPO DEL SERVOMOTOR ELECTRICO

Reemplazando los valores determinados para los parámetros  $K_m$ ,  $\theta$ ,  $J$  y  $K$  en las ecuaciones (C.1) y (C.2) se obtienen los valores correspondientes a las constantes de tiempo del servomotor eléctrico  $\tau_1$  y  $\tau_0$ :

$$\tau_1 = 18 \text{ ms}$$

$$\tau_0 = 100 \text{ ms}$$

Los valores de las constantes de tiempo arrojados por los cálculos, demuestran que son despreciables estos retardos frente a los retardos introducidos por el sistema oleomecánico y la turbina. (Sección IV)

## APENDICE D

### MANUAL DE OPERACION

El sistema de gobernación de velocidad de la turbina requiere del seguimiento de algunos procedimientos específicos, descritos a lo largo de este apéndice, para obtener un mayor rendimiento del conjunto y evitar fallas de operación debidas a manejo impropio.

#### D.1.- INICIALIZACION

Es necesario constatar que todos los elementos se hallen instalados en forma adecuada, debiéndose verificar con el grupo de fotografías presentado en el apéndice E.

#### D.2.- VERIFICACION DE CONEXIONES

Antes de proceder a la activación del equipo, deben realizarse las siguientes verificaciones de conexiones entre los elementos externos y los terminales del tablero de control, utilizando los cables adecuados para el efecto.

- 1.- Servomotor eléctrico [GND, SERVO] entre los terminales eléctricos T5 y T9.
- 2.- Fototacómetro [polarización + Vcc, GND, y VRPM] entre T2 y T6.
- 3.- Caída de velocidad transiente sigma ( $\sigma$ ) [+Vcc, -Vcc, y Vo] entre T3 y T8.
- 4.- Circuito de seguridad del sistema oleo-mecánico, conectando los terminales T2 y T7.

#### D.3.- ACTIVACION DEL SISTEMA

- 1.- Encender el sistema oleo-mecánico de posición y fijar el caudal y presión en los puntos de operación requeridos (turbina apagada, controlador apagado).
- 2.- Si es necesario, en forma manual mover el servo motor eléctrico para colocar el inyector de la turbina en la posición nominal (1,75 cm). Esta acción se realiza con ayuda de la regleta montada junto al eje del cilindro (turbina apagada, controlador apagado).
- 3.- Se enciende la bomba de la turbina, se verifica que la altura dada por la bomba sea la nominal; en caso de ser necesario se modificará la altura accionando la válvula de paso del flujo de agua, ubicada a la salida de la bomba, y se determina el caudal suministrado a la turbina en la regleta de calibración del vertedero (controlador apagado).

- 4.- Se procede a cargar el freno de Prony y medir con ayuda de la lámpara estroboscópica la velocidad de régimen, de esta manera se ha ubicado el sistema en el punto nominal alrededor del cual va a funcionar (controlador apagado).
- 5.- Cumplidos los numerales anteriores, se ubica el selector MANUAL/AUTOMATICO en modalidad manual y se enciende la fuente de voltaje del tablero, mediante la acción del interruptor principal. En este instante se deberán encender las luces testigos ubicadas a cada lado del tablero; los cuales indican el correcto funcionamiento de los transformadores y el buen estado de los fusibles. Posteriormente, activar el interruptor de polarización comprobando que los LED's testigos se enciendan, indicando así mismo un funcionamiento adecuado de la segunda etapa de la fuente de poder, que proporciona tensión regulada de  $\pm 12$  voltios.

D.4.- AJUSTES Y CALIBRACIONES

- 1.- Si todo el sistema funciona correctamente, será posible mover el inyector mediante la perilla de comando manual que activará el servomotor eléctrico y en consecuencia el sistema hidráulico que desplaza al inyector (turbina apagada).
- 2.- Se apaga el sistema oleomecánico, se desconecta la polarización de la realimentación sigma, y se ubica la realimentación del servomotor eléctrico en su posición cero (punto medio del potenciómetro), terminada esta operación se reconecta la polarización sigma.
- 3.- Se calibra el cero físico del carrete de la válvula, con el cero de señal eléctrica de la realimentación sigma, mediante el potenciómetro denominado "CENTRADO DE SIGMA" (se conecta el sistema oleomecánico).
- 4.- Fijar la carrera útil del pistón mediante los limitadores. Verificar la misma accionando el sistema oleomecánico mediante el control manual (constatando que el interruptor de activación de la alarma se encuentre habilitado) (turbina apagada).
- 5.- Se enciende la turbina y se calibra con ayuda del display y osciloscopio que la señal del voltaje de velocidad de referencia sea igual al voltaje producido por el fototacómetro acoplado a la turbina al girar ésta a la velocidad nominal; si no se hace esto, el control regulará a la velocidad de referencia fijada anteriormente. Es necesario indicar que el voltaje producido por el fototacómetro de la turbina es proporcional al número de revoluciones, teniéndose:

INSTRUMENTO	VOLTAJE PRODUCIDO	COMENTARIOS
Fototacómetro	4 Voltios	Se consigue con el disco de 40 orificios a 600 RPM

La calibración del voltaje de referencia, se obtiene mediante el potenciómetro de "VOLTAJE DE REFERENCIA", dicho voltaje sube cuando el potenciómetro se mueve en sentido horario (aumento de la velocidad de la turbina), y disminuye (menor velocidad de la turbina), en sentido antihorario. A velocidad nominal, el voltaje producido por el fototacómetro debe ser igual al voltaje de referencia (voltaje de error cero).

- 6.- Una vez calibrado el voltaje de referencia, y ubicada la turbina en los puntos nominales de funcionamiento, se conecta el terminal del osciloscopio en el terminal de "ERROR", en una escala de tiempo y amplitud vertical adecuadas.

D.5.- MODOS DE OPERACION

- 1.- Se pone el tablero en funcionamiento automático mediante el selector "MANUAL/AUTOMATICO", y se procede a cargar a la turbina, observando su forma de respuesta en el osciloscopio.
- 2.- Existen dos modos de realimentación sigma (int/ext) seleccionables a través del selector que hace referencia a estos modos.
- 3.- La ganancia de la señal de error puede ser variada modificando la posición de la perilla correspondiente.
- 4.- Asi mismo, la ganancia de la señal de respuesta del controlador es variable en forma similar.
- 5.- Las modalidades de control: proporcional, integral y derivativa pueden ser habilitadas individualmente, en forma combinada o total por medio de los interruptores ubicados y señalados en el tablero. Las ganancias correspondientes a cada modalidad pueden ser variadas dentro de los rangos diseñados.
- 6.- Es procedente variar el valor de las ganancias Kp, Ki y Kd, de acuerdo a como se obtenga la respuesta de la turbina, hasta llegar a una óptima respuesta para el mismo escalón de carga. Además, se pueden variar los valores de las ganancias de error, velocidad de respuesta, realimentación del servo motor eléctrico y de sigma, con el fin de obtener la mejor respuesta posible.

D.6.- DESACTIVACION DEL SISTEMA

- 1.- Pasar a modo manual el control electrónico.
- 2.- Apagar la bomba de agua de la turbina.
- 3.- Si es necesario reposicionar el inyector.
- 4.- Apagar el sistema oleomecánico
- 5.- Desconectar el osciloscopio
- 6.- Apagar la alarma
- 7.- Desconectar la polarización
- 8.- Apagar la Pantalla o Display
- 9.- Apagar la fuente principal de energía

D.7.- REPOSICION DEL SISTEMA DE SEGURIDAD

Si el sistema de limitadores desconecta, por saturación de la carrera del inyector, a la bomba de presión de aceite del sistema oleomecánico, se debe proceder de la siguiente forma:

- 1.- Pasar el control electrónico a modo manual

- 2.- Mediante el control manual ubicar el carrete de válvulas en el sentido requerido de desplazamiento, para sacar el inyector del punto de saturación.
- 3.- Manteniendo presionado el pulsador ubicado en el cajetín de alimentación de la bomba del sistema oleomecánico, se vuelve a encender el sistema hasta que el inyector deje de presionar el limitador (cuando se suspende el sonido de la alarma), momento en el cual se suelta el pulsador y queda rehabilitado (no activado) el control automático.
- 4.- Mediante el control manual se lleva el giro de la turbina a la velocidad nominal de operación.
- 5.- Una vez alcanzada la velocidad nominal, se pasa el control a la modalidad de AUTOMATICO.

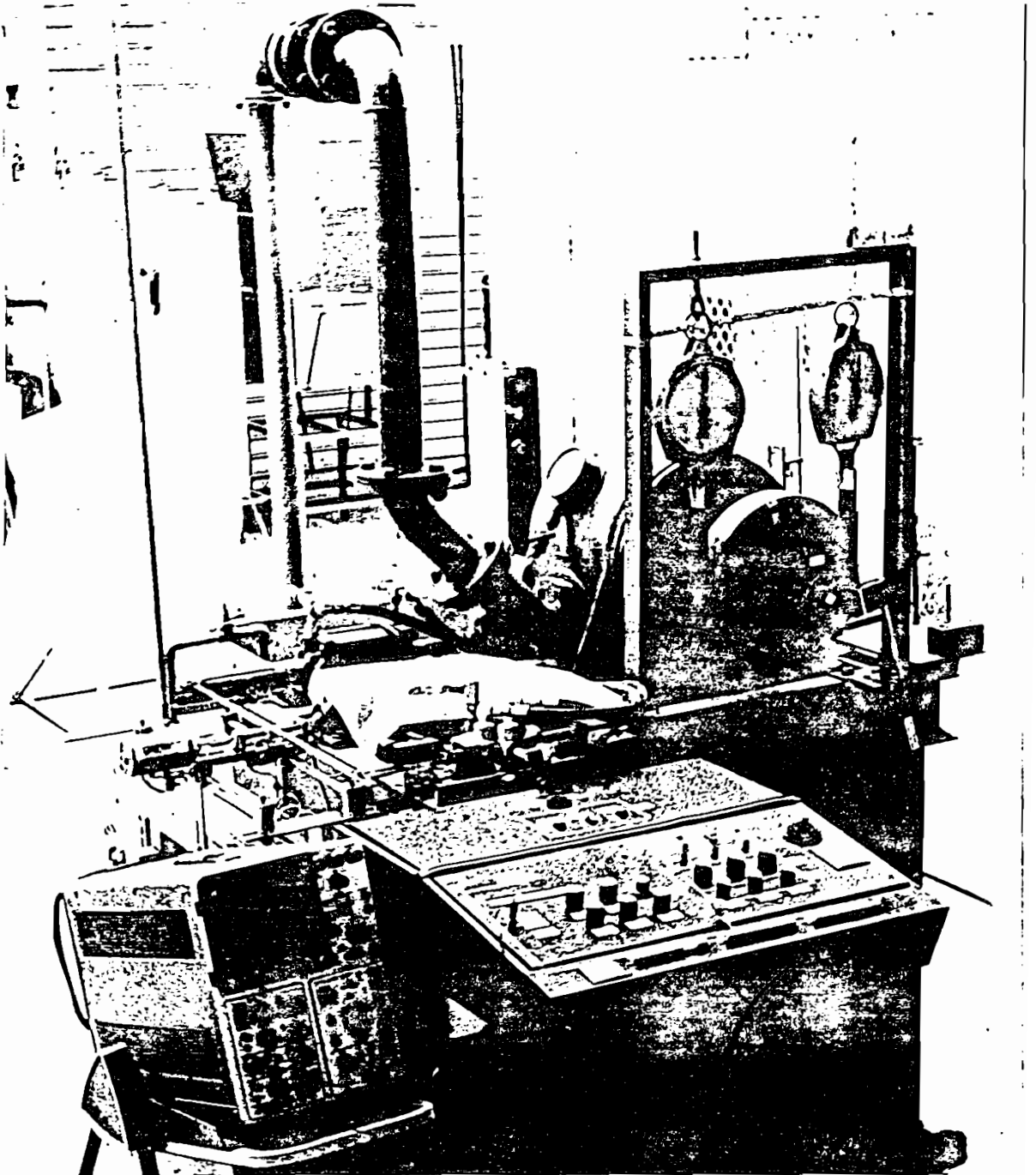
#### D.8.- AJUSTE DE OFFSET

En todos los amplificadores operacionales que requieren compensación por desviación de la señal de salida se ha incorporado un sistema de ajuste individual, comandados por un selector ubicado entre las placas del controlador en la sección interna de la parte posterior del tablero de control; debiendo procederse de la siguiente manera para compensar estas desviaciones:

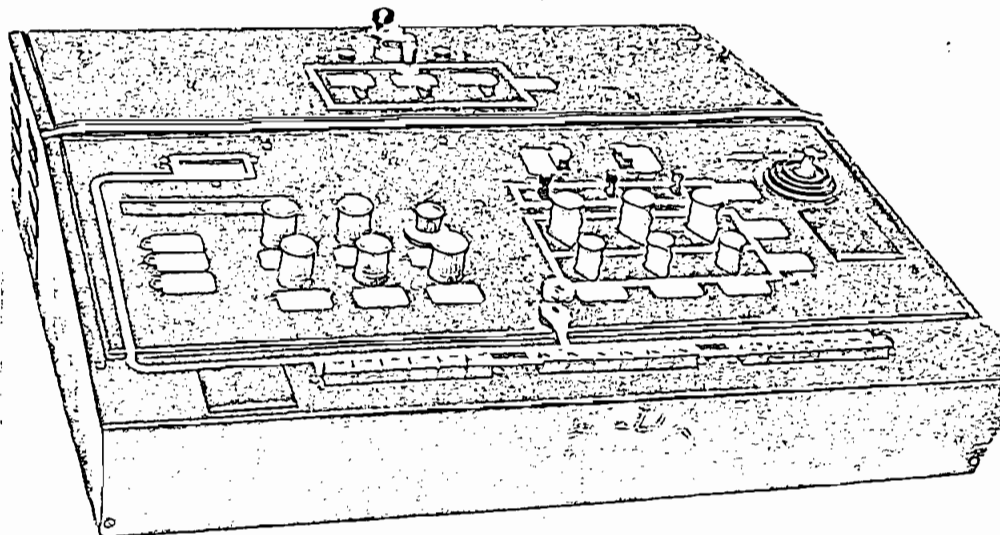
- 1.- Presionar el selector de compensación de offset (se mantiene introducido).
- 2.- Poner cada salida de un amplificador operacional (según el terminal que le corresponda, el cual está especificado en el diagrama general del controlador que se presenta en anexos) en la pantalla de un osciloscopio con una escala suficientemente sensible y variar el potenciómetro (trimmer) correspondiente hasta conseguir una salida nula.
- 3.- Repetir el proceso del numeral 2 hasta compensar los ocho amplificadores que lo requieren.
- 4.- Presionar nuevamente el selector de compensación reponiendo su posición para operación normal compensada del controlador electrónico.

APENDICE E

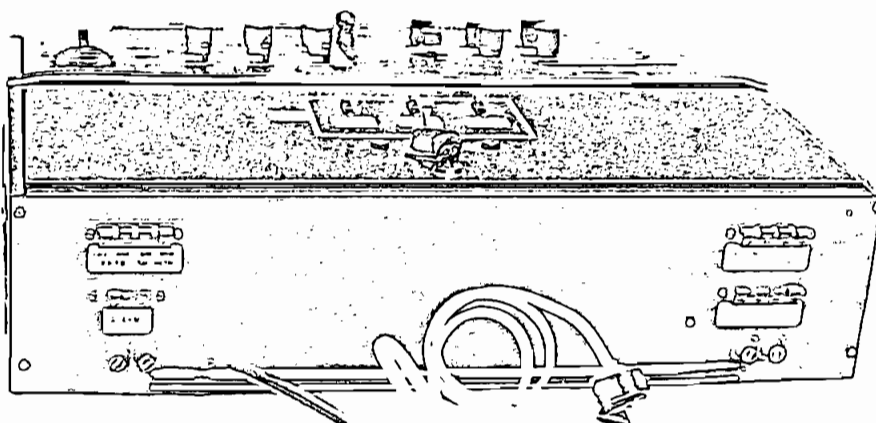
FOTOGRAFIAS DEL SISTEMA



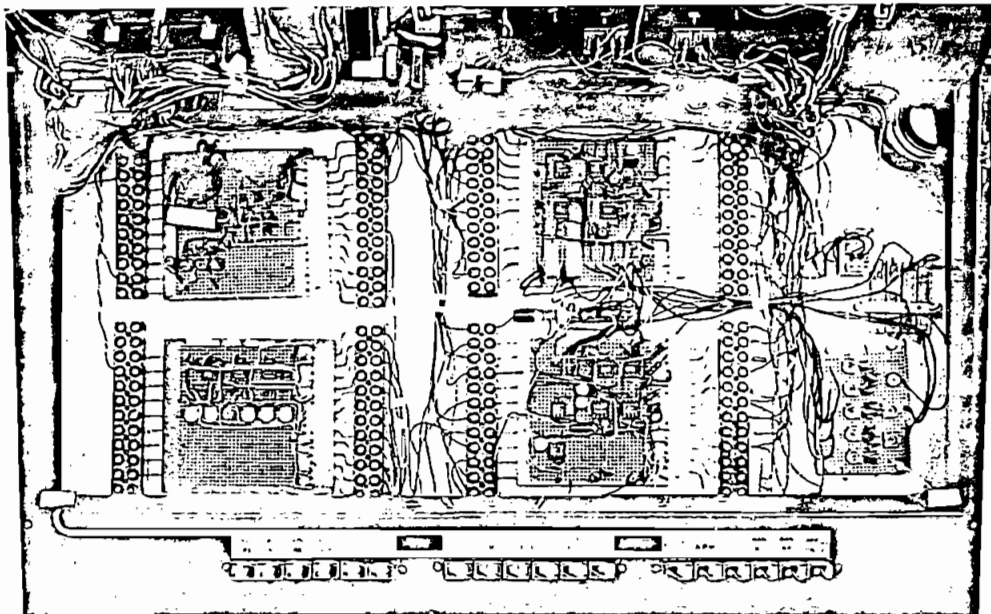
Montaje General del Equipo en el Laboratorio



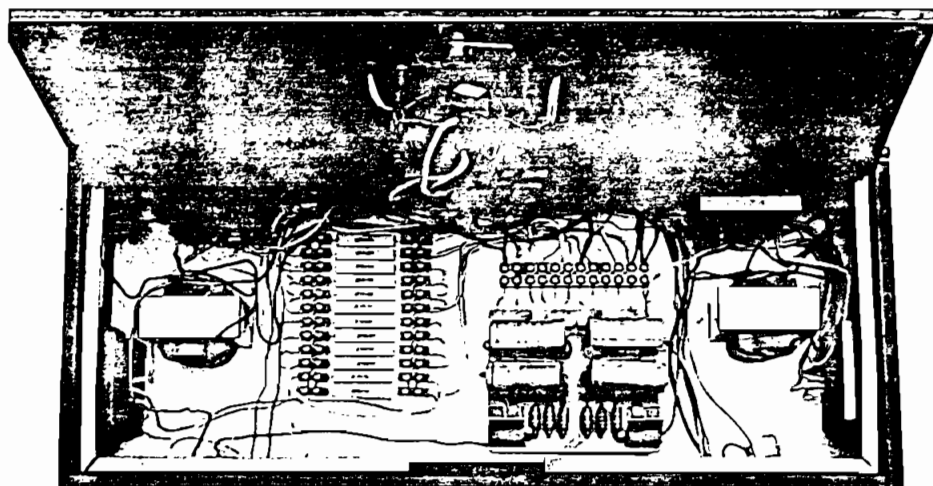
Tablero (Vista Frontal)



Tablero (Vista Posterior)

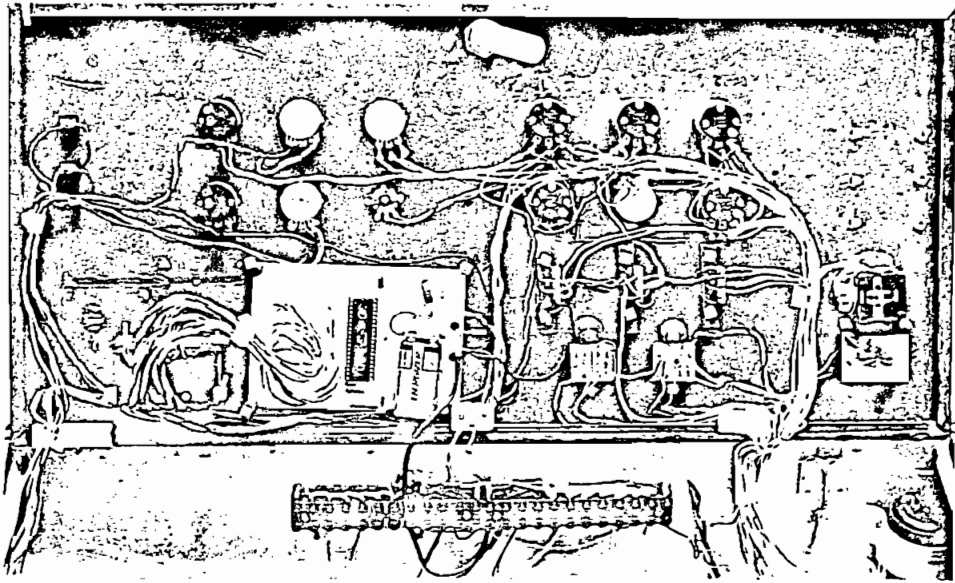


Tablero (Vista Interior-Sección Anterior)

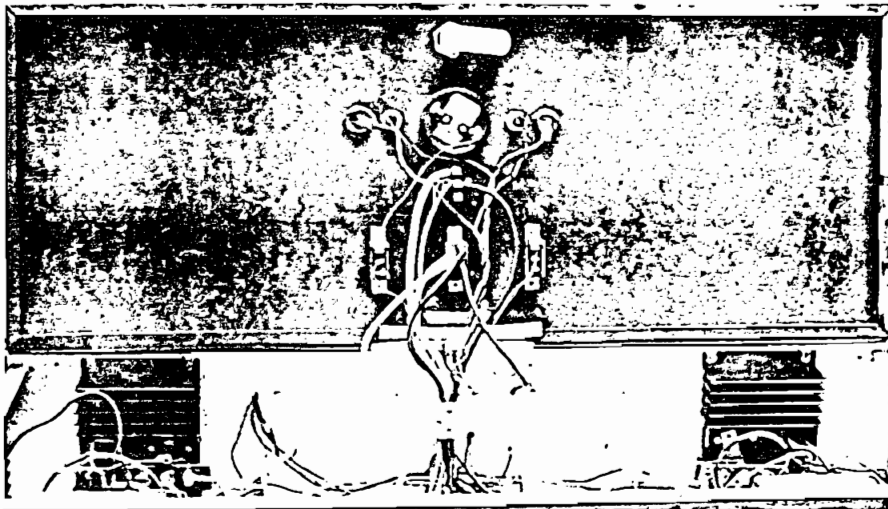


Tablero (Vista Interior-Sección Posterior)

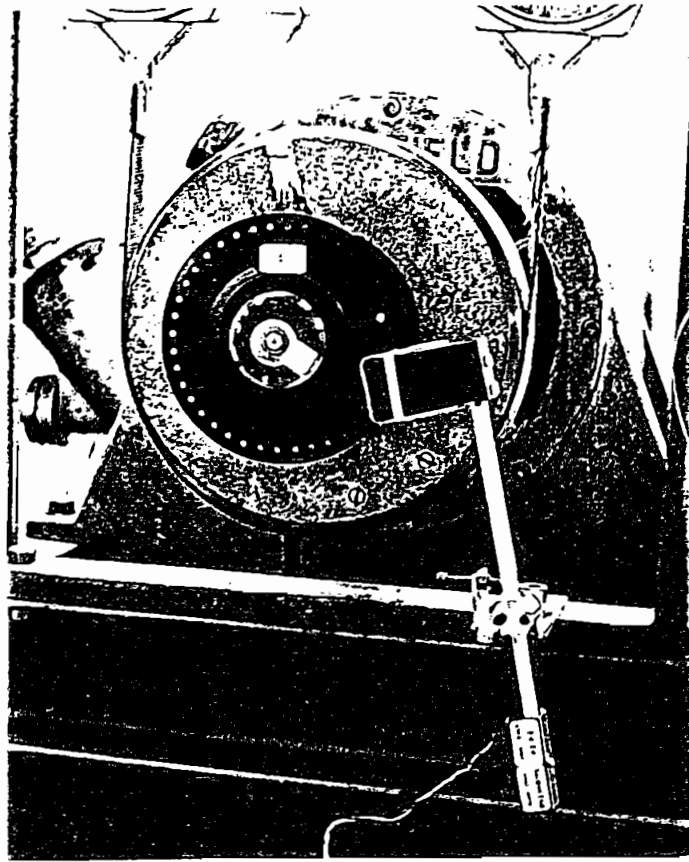




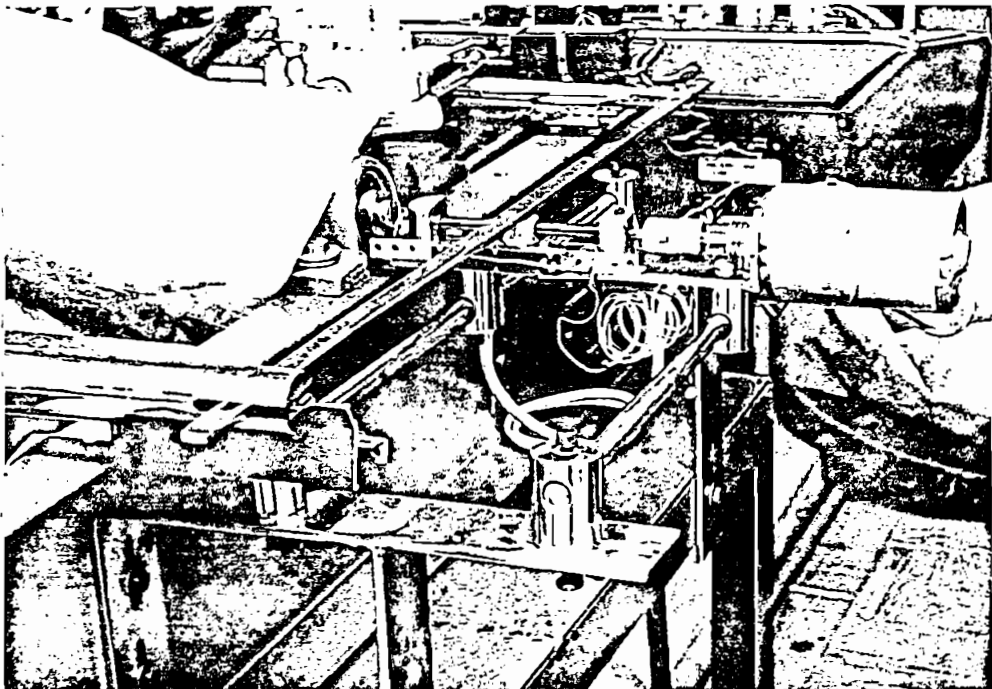
Tablero (Vista Interior- Tapa anterior)



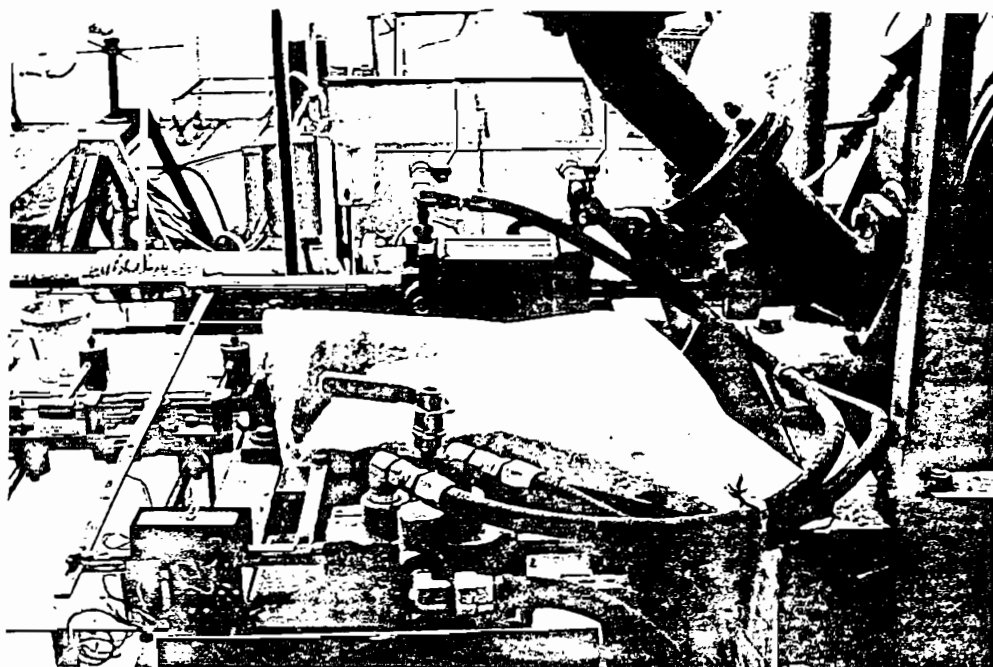
Tablero (Vista Interior- Sección Posterior)



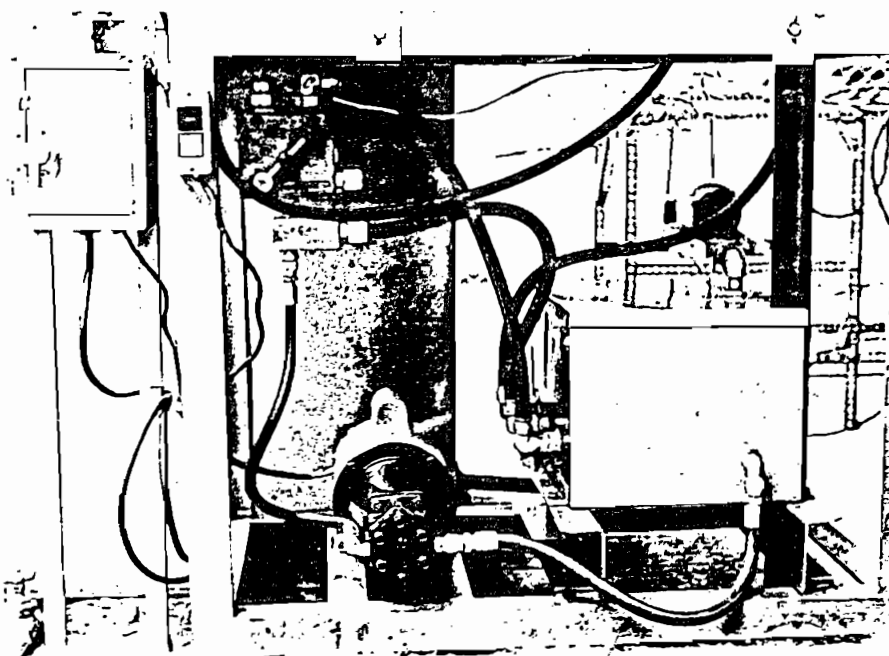
Sensor de Velocidades



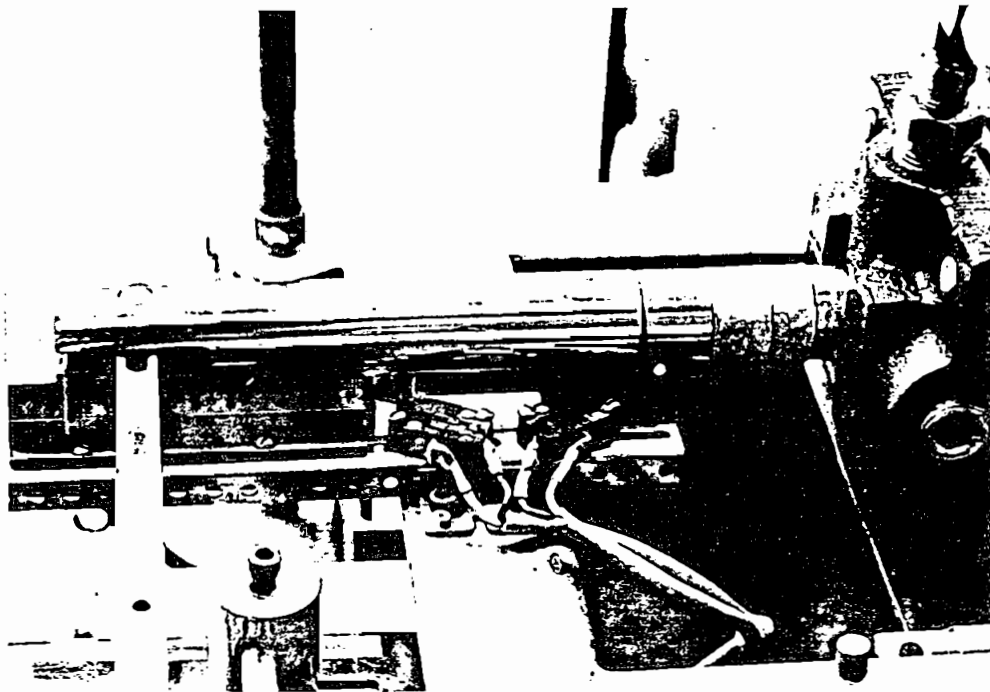
Servo Motor Eléctrico



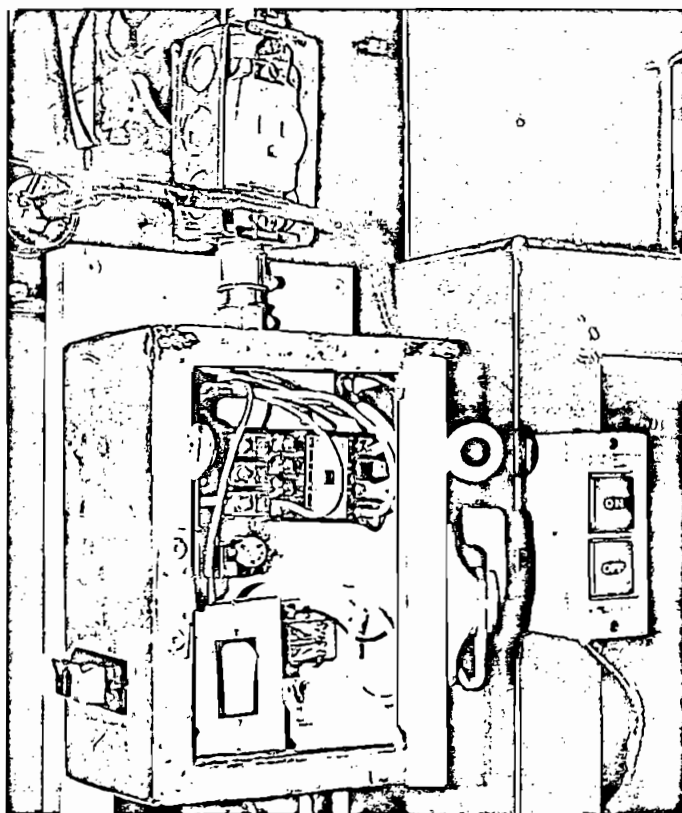
Sistema Oleo-Mecánico (Vista General)



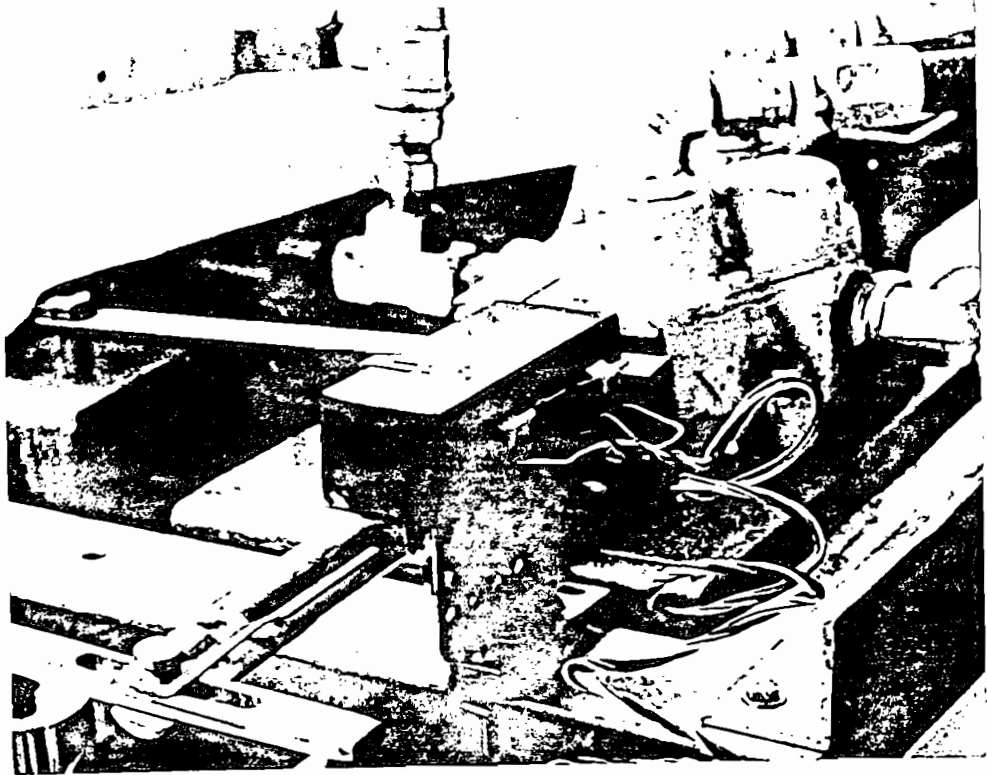
Sistema Oleo-Mecánico (Bomba y Conexiones)



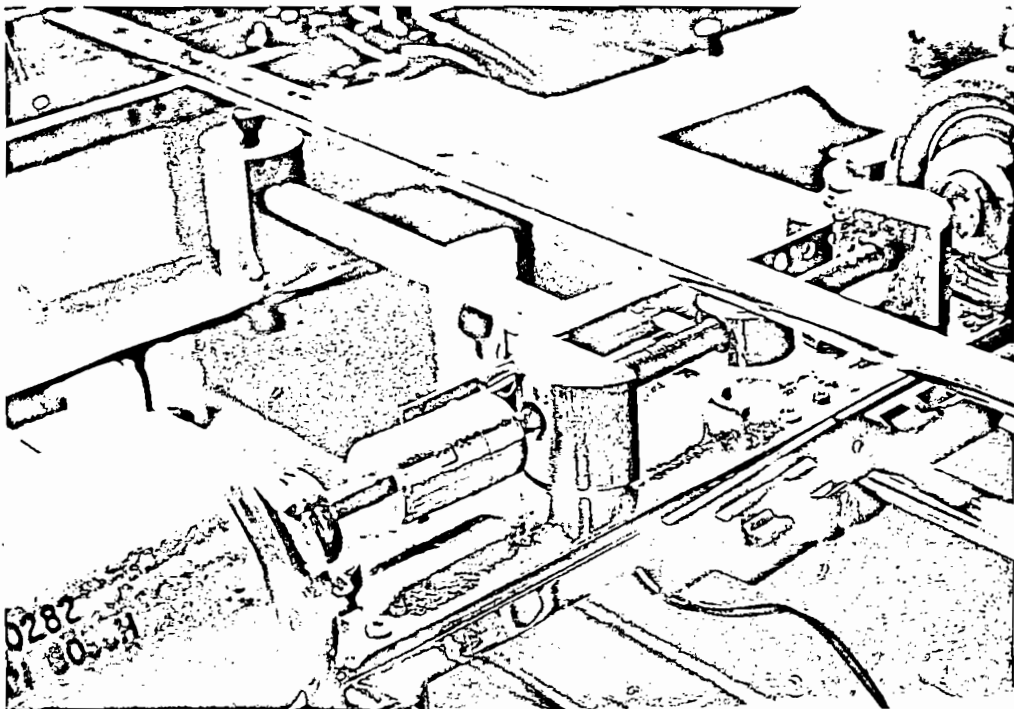
Circuito de Seguridad (Limitadores)



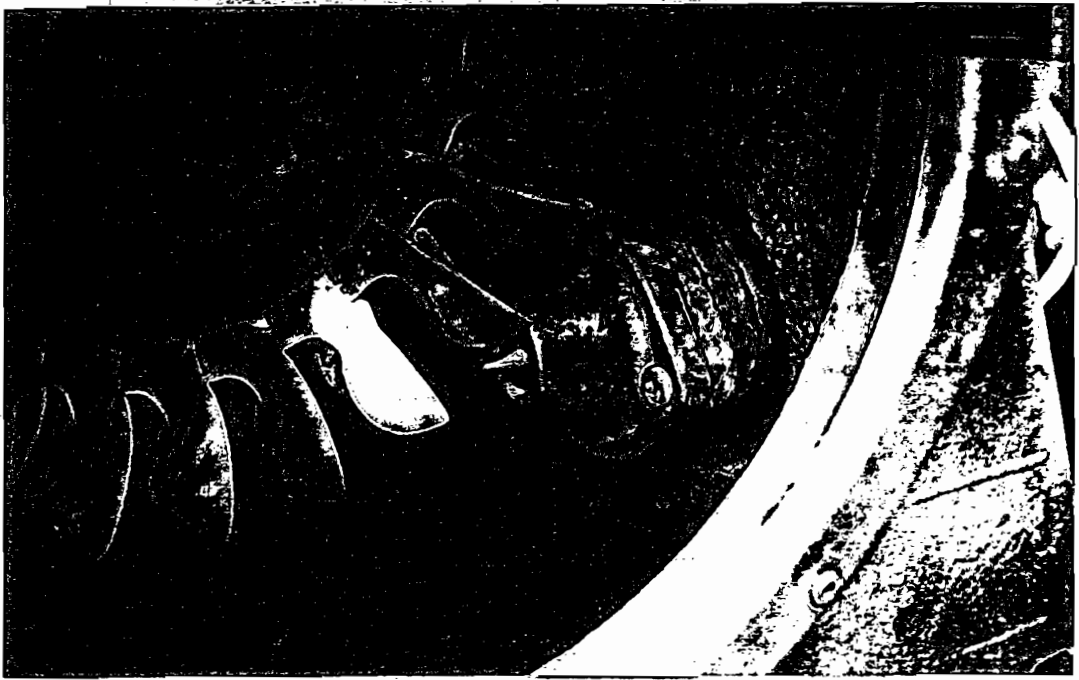
Circuito de Seguridad (Sistema de Reposición)



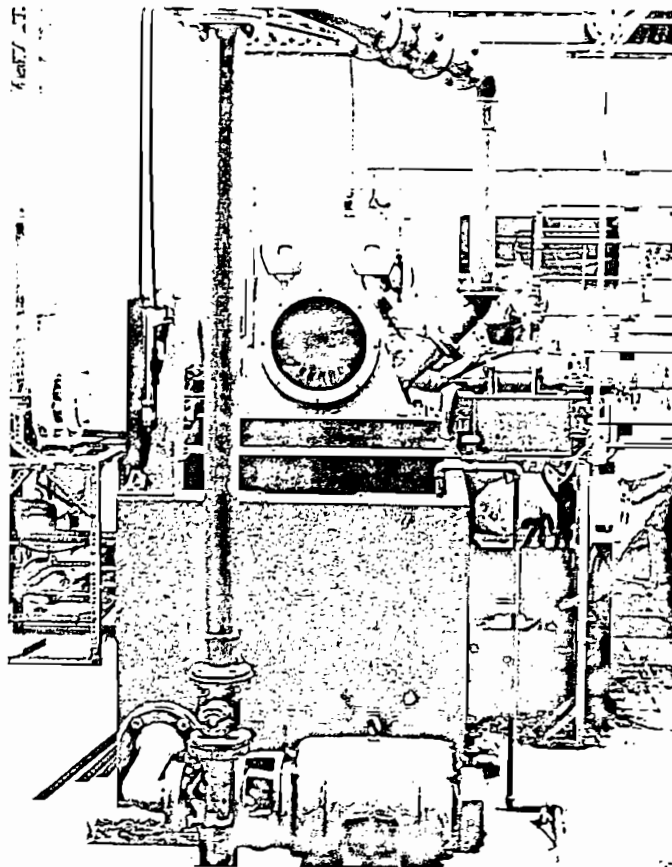
Realimentación (Sigma)



Realimentación (Posición del Servo Motor Eléctrico)



TURBINA - INYECTOR



Bomba- Tubería de Presión.

**BIBLIOGRAFIA**

01. BRATER. Manual de Hidráulica. Mexico. UTEHA. 1981.
02. BROWN, DEMELIO, LENFEST, MILLS. Effects of Excitation Turbines Energy Control and Transmission of Transient Stability. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-89. No 6. July/August 1970.
03. CABRERA, PROAÑO. Estudio y Construcción de un Regulador de Velocidades para una Turbina Pélton de Laboratorio. Tesis. Quito. Escuela Politécnica Nacional. 1983.
04. CANALES. Análisis de Sistemas de Control Dinámicos y Control Automático. Mexico. Limusa. 1977.
05. CORINGTON, HARRISON, PEREIRA, FALVEY. Computer Representation of Electrical System Interaction with a Hydraulic Turbine and Penstock. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-101 No 8. August 1982.
06. CREUS SOLE. Instrumentos Industriales / su Ajuste y Calibración. España. Marcombo S.A. 1982.
07. DAVIS. Retroalimentación y Sistemas de Control. Mexico. Fondo Educativo Interamericano S.A. 1977
08. DHALIWAL, WICHERST. Analisis of P.I.D. Governors in Multimachine System. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-97. No 2. March/April 1978.
09. DISTEFANO III, STUBBERUD, WILLIAMS. Retroalimentación y Sistemas de Control. Mexico. Mc Graw-Hill. Serie Shaum's. 1978.
10. DDRF. Sistemas Automáticos de Control. Mexico. Fondo Educativo Interamericano S.A. 1978.

11. DRANSFIELD. Enginerring Systems and Automatic Control. London. Prentice-Hall. 1968.
12. FAIRES. Design of Machine Elements. E.U.A. Macmillan Company. 1965.
13. GREISER, GEREZ. Circuitos y Sistemas Electromecánicos. Mexico. Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. 1974.
14. HALLMARK. The Master IC Cookbook. Tab Books. No 1199. Marzo 1980.
15. HARRISON. Controles Automáticos. Mexico. Editorial Trillas. 1979.
16. KAUFMAN, SEIDMAN. Manual Para Ingenieros y Técnicos en Electrónica. Mexico. Mc Graw-Hill. 1982.
17. KRISHNAMURTHY, REGEHR, FLEMING. Optimization of Speed Governor Parameters in the Presence of Pseudorandom Load Disturbances. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-89. No 6. July/Agust 1970.
18. LEUM M. The Development and Field Experience of a Transistor Electric Governor for Hidro Turbines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-85. No 4. April 1966.
19. LONG. Joint Control of Electric Governor for Hidraulic Turbines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-87. No 9. September 1968.
20. MATAIX. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. España. Ediciones del Castillo. 1982.
21. MAX. Manual del Ingeniero Mecánico. Mexico. Mc.Graw Hill. 1979.
22. MILLMAN, HALKIAS. Integrated Electronics. Mexico. Mc Graw-Hill. 1972.



23. OGATA. Ingeniería de Control Moderno. London. Prentice-Hall. 19
24. OLDENBURGER, DONELSON. Dynamic Response of a Hydroelectric Plant. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-100. No 1. October 1962.
25. RAMAMURTHI, RAMACHANDRAM, KODANDARMASWAMG. Transient Performance and Control of Hidraulic Turbine Generator Unit. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-100. No 1. January 1981.
26. RAMEY, SKOOG LUND. Detailed Hidrogovernor Representation for Systems Stability Studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-89. No 1. January 1970.
27. REINOSO V. Modelación y Simulación de los Sistemas de Regulación de Velocidades de Turbinas. Tesis. Quito. Escuela Politécnica Nacional. 1980.
28. ROULEAU. Pressure in Pipeleines Carring Viscous Liquids. Transactions of the A.S.M.E. December 1960.
29. SAMS. Reference Data for Radio Engineers. ITT. Sixth edition. 1977.
30. SCHLEIF, MARTIN, ANGEL. Damping of System Oscillations with a Hydrogenerating Unit. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-86. No 4. April 1967.
31. SCHLEIF, ANGEL. Governor Test Simulated Isolation of Hidraulic Turbine Units. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-87. No 5. May 1968.
32. SMITH, Mc LEAN, ROBLIE. Assessment of Hidroturbine Models for Power Systems Studies. IEE Proc. Vol 130. January 1983.
33. TAUB, SCHILLING. Digital Integrated Electronics. Mexico. Mc Graw-Hill. 1977.

34. TIETZE, SCHENK. Circuitos Electrónicos Avanzados. España. Marcombo. 1983.
35. THORNE, HILL. Field Testing and Simulation of Hydraulic Turbine Governor Performance. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-74. No 3. July/Agust
37. TRUXAL. Control Engineers Handbook. EE.UU. N.Y. 1979.
38. UNDRILL, STRAUSS. Influence of Hydro Plant Design on Regulating and Reserve Response Capacity. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol Pas-74. No 6. July/Agust
39. Electrónica Fácil. 1984.
40. Linear Data Book. National Semiconductor Corporation. 1982.
41. Seminario Teórico-Práctico de Control Automático de Procesos Industriales. Digitec Cia. Ltda. Mayo 1984.

## **ANEXO 1**

HOJA DE DATOS DE ELEMENTOS UTILIZADOS

# LM117/LM217/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator

## General Description

The LM117/LM217/LM317 are adjustable 3-terminal positive voltage regulators capable of supplying in excess of 1.5A over a 1.2V to 37V output range. They are exceptionally easy to use and require only two external resistors to set the output voltage. Further, both line and load regulation are better than standard fixed regulators. Also, the LM117 is packaged in standard transistor packages which are easily mounted and handled.

In addition to higher performance than fixed regulators, the LM117 series offers full overload protection available only in IC's. Included on the chip are current limit, thermal overload protection and safe area protection. All overload protection circuitry remains fully functional even if the adjustment terminal is disconnected.

## Features

- Adjustable output down to 1.2V
- Guaranteed 1.5A output current
- Line regulation typically 0.01%/V
- Load regulation typically 0.1%
- Current limit constant with temperature
- 100% electrical burn-in
- Eliminates the need to stock many voltages
- Standard 3 lead transistor package
- 80 dB ripple rejection

Normally, no capacitors are needed unless the device is situated far from the output filter capacitors in which case an input bypass is needed. An optional output capacitor can be added to improve transient response. The adjustment terminal can be bypassed to achieve very high ripple rejections ratios which are difficult to achieve with standard 3 terminal regulators.

Besides replacing fixed regulators, the LM117 is useful in a wide variety of other applications. Since the regulator is "floating" and sees only the input-to-output differential voltage, supplies of several hundred volts can be regulated as long as the maximum input to output differential is not exceeded.

Also, it makes an especially simple adjustable switching regulator, a programmable output regulator, or by connecting a fixed resistor between the adjustment and output, the LM117 can be used as a precision current regulator. Supplies with electronic shutdown can be achieved by clamping the adjustment terminal to ground which programs the output to 1.2V where most loads draw little current.

The LM117K, LM217K and LM317K are packaged in standard TO-3 transistor packages while the LM117H, LM217H and LM317H are packaged in a solid Kovar base TO-5 transistor package. The LM117 is rated for operation from -55°C to +150°C, the LM217 from -25°C to +150°C and the LM317 from 0°C to +125°C. The LM317T and LM317MP, rated for operation over a 0°C to +125°C range, are available in a TO-220 plastic package and a TO-202 package, respectively.

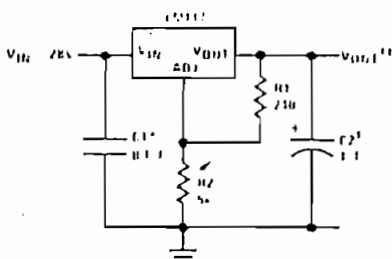
For applications requiring greater output current in excess of 3A and 5A, see LM150 series and LM138 series data sheets, respectively. For the negative complement, see LM137 series data sheet.

LM117 Series Packages and Power Capability

DEVICE	PACKAGE	RATED POWER DISSIPATION	DESIGN LOAD CURRENT
LM117	TO-3	20W	1.5A
LM217	TO-39	2W	0.5A
LM317	TO-220	15W	1.5A
LM317M	TO-202	7.5W	0.5A

## Typical Applications

1.2V - 25V Adjustable Regulator

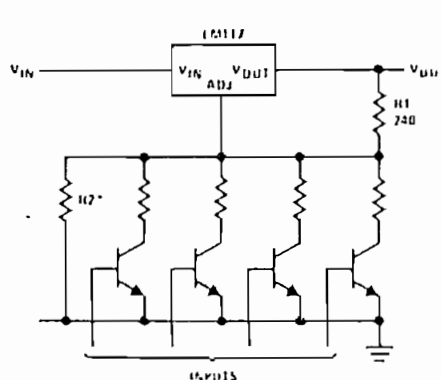


\* Optional improves transient response

\* Needed if device is far from filter capacitors

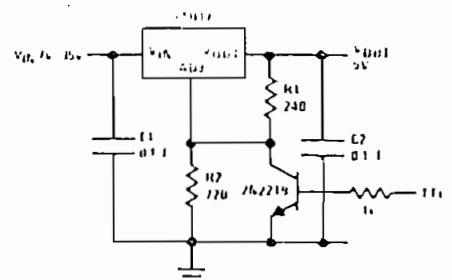
$$V_{OUT} = 1.25V \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

Digitally Selected Outputs



\* Sets maximum V<sub>OUT</sub>

5V Logic Regulator with Electronic Shutdown\*



\* Min output 1.2V

## Application Hints

In operation, the LM117 develops a nominal 1.25V reference voltage,  $V_{REF}$ , between the output and adjustment terminal. The reference voltage is impressed across program resistor  $R1$  and, since the voltage is constant, a constant current  $I_1$  then flows through the output set resistor  $R2$ , giving an output voltage of

$$V_{OUT} = V_{REF} \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) + I_{ADJ}R2$$

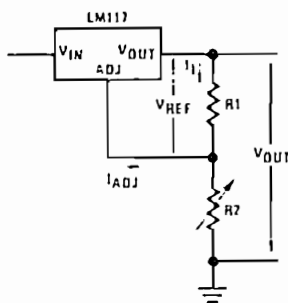


FIGURE 1.

Since the 100 $\mu$ A current from the adjustment terminal represents an error term, the LM117 was designed to minimize  $I_{ADJ}$  and make it very constant with line and load changes. To do this, all quiescent operating current is returned to the output establishing a minimum load current requirement. If there is insufficient load on the output, the output will rise.

### External Capacitors

An input bypass capacitor is recommended. A 0.1 $\mu$ F disc or 1 $\mu$ F solid tantalum on the input is suitable input bypassing for almost all applications. The device is more sensitive to the absence of input bypassing when adjustment or output capacitors are used but the above values will eliminate the possibility of problems.

The adjustment terminal can be bypassed to ground on the LM117 to improve ripple rejection. This bypass capacitor prevents ripple from being amplified as the output voltage is increased. With a 10 $\mu$ F bypass capacitor 80 dB ripple rejection is obtainable at any output level. Increases over 10 $\mu$ F do not appreciably improve the ripple rejection at frequencies above 120 Hz. If the bypass capacitor is used, it is sometimes necessary to include protection diodes to prevent the capacitor from discharging through internal low current paths and damaging the device.

In general, the best type of capacitors to use are solid tantalum. Solid tantalum capacitors have low impedance even at high frequencies. Depending upon capacitor construction, it takes about 25 $\mu$ F in aluminum electrolytic to equal 1 $\mu$ F solid tantalum at high frequencies. Ceramic capacitors are also good at high frequencies; but some types have a large decrease in capacitance at frequencies around 0.5 MHz. For this reason, 0.01 $\mu$ F disc may seem to work better than a 0.1 $\mu$ F disc as a bypass.

Although the LM117 is stable with no output capacitors, like any feedback circuit, certain values of external capacitance can cause excessive ringing. This occurs with values between 500 pF and 5000 pF. A 1 $\mu$ F solid tantalum (or 25 $\mu$ F aluminum electrolytic) on the output swamps this effect and insures stability.

### Load Regulation

The LM117 is capable of providing extremely good load regulation but a few precautions are needed to obtain maximum performance. The current set resistor connected between the adjustment terminal and the output terminal (usually 240 $\Omega$ ) should be tied directly to the output of the regulator rather than near the load. This eliminates line drops from appearing effectively in series with the reference and degrading regulation. For example, a 15V regulator with 0.05 $\Omega$  resistance between the regulator and load will have a load regulation due to line resistance of 0.05 $\Omega$   $\times$   $I_L$ . If the set resistor is connected near the load the effective line resistance will be 0.05 $\Omega$  (1 +  $R2/R1$ ) or in this case, 11.5 times worse.

Figure 2 shows the effect of resistance between the regulator and 240 $\Omega$  set resistor.

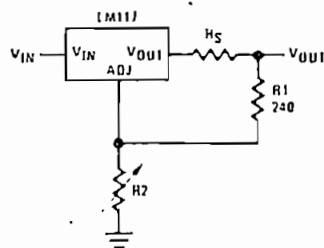


FIGURE 2. Regulator with Line Resistance in Output Lead

With the TO-3 package, it is easy to minimize the resistance from the case to the set resistor, by using two separate leads to the case. However, with the TO-5 package, care should be taken to minimize the wire length of the output lead. The ground of  $R2$  can be returned near the ground of the load to provide remote ground sensing and improve load regulation.

### Protection Diodes

When external capacitors are used with any IC regulator it is sometimes necessary to add protection diodes to prevent the capacitors from discharging through low current points into the regulator. Most 10 $\mu$ F capacitors have low enough internal series resistance to deliver 20A spikes when shorted. Although the surge is short, there is enough energy to damage parts of the IC.

When an output capacitor is connected to a regulator and the input is shorted, the output capacitor will discharge into the output of the regulator. The discharge

# Absolute Maximum Ratings

Power Dissipation	Internally limited
Input-Output Voltage Differential	40V
Operating Junction Temperature Range	
LM117	-55°C to +150°C
LM217	-25°C to +150°C
LM317	0°C to +125°C
Storage Temperature	65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	300°C

## Preconditioning

Burn-In in Thermal Limit 100% All Devices

## Electrical Characteristics (Note 1)

PARAMETER	CONDITIONS	LM117/217			LM317			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Line Regulation	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $3\text{V} \leq V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}} \leq 40\text{V}$ (Note 2)		0.01	0.02		0.01	0.04	
Load Regulation	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $10\text{mA} \leq I_{\text{OUT}} \leq I_{\text{MAX}}$ $V_{\text{OUT}} = 5\text{V}$ , (Note 2)		5	15		5	25	mV
	$V_{\text{OUT}} = 5\text{V}$ , (Note 2)		0.1	0.3		0.1	0.5	%
Thermal Regulation	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , 20 ms Pulse		0.03	0.07		0.04	0.07	%/W
Adjustment Pin Current			50	100		50	100	$\mu\text{A}$
Adjustment Pin Current Change	$10\text{mA} \leq I_L \leq I_{\text{MAX}}$ $2.5\text{V} \leq (V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}}) \leq 40\text{V}$		0.2	5		0.2	5	$\mu\text{A}$
Reference Voltage	$3 \cdot (V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}}) \leq 40\text{V}$ , (Note 3) $10\text{mA} \leq I_{\text{OUT}} \leq I_{\text{MAX}}$ , $P \leq P_{\text{MAX}}$	1.20	1.25	1.30	1.20	1.25	1.30	V
Line Regulation	$3\text{V} \leq V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}} \leq 40\text{V}$ , (Note 2)		0.02	0.05		0.02	0.07	%/V
Load Regulation	$10\text{mA} \leq I_{\text{OUT}} \leq I_{\text{MAX}}$ , (Note 2) $V_{\text{OUT}} = 5\text{V}$		20	50		20	70	mV
	$V_{\text{OUT}} > 5\text{V}$		0.3	1		0.3	1.5	%
Temperature Stability	$T_{\text{MIN}} \leq T_J \leq T_{\text{MAX}}$		1			1		%
Minimum Load Current	$V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}} = 40\text{V}$		3.5	5		3.5	10	mA
Current Limit	$V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}} = 15\text{V}$ E and T Package	1.5	2.2		1.5	2.2		A
	H and P Package	0.5	0.8		0.5	0.8		A
	$V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}} = 40\text{V}$ , $T_J = 25^\circ\text{C}$ K and T Package	0.30	0.4		0.15	0.4		A
	H and P Package	0.15	0.20		0.075	0.20		A
RMS Output Noise, % of $V_{\text{OUT}}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , 10 Hz $\leq f \leq$ 10 kHz		0.003			0.003		%
Ripple Rejection Ratio	$V_{\text{OUT}} = 10\text{V}$ , $f = 120\text{Hz}$		65			65		dB
	$C_{\text{ADJ}} = 10\mu\text{F}$	66	80		66	80		dB
Long Term Stability	$T_A = 125^\circ\text{C}$		0.3	1		0.3	1	%
Thermal Resistance, Junction to Case	H Package		12	15		12	15	$^\circ\text{C}/\text{W}$
	K Package		2.3	3		2.3	3	$^\circ\text{C}/\text{W}$
	T Package					4		$^\circ\text{C}/\text{W}$
	P Package					12		$^\circ\text{C}/\text{W}$

Note 1. Unless otherwise specified, these specifications apply  $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq +150^\circ\text{C}$  for the LM117,  $-25^\circ\text{C} \leq T_J \leq +150^\circ\text{C}$  for the LM217 and  $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$  for the LM317.  $V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}} = 5\text{V}$  and  $I_{\text{OUT}} = 0.1\text{A}$  for the TO-5 and TO-202 packages and  $I_{\text{OUT}} = 0.5\text{A}$  for the TO-3 package and TO-220 package. Although power dissipation is internally limited, these specifications are applicable for power dissipations of 2W for the TO-5 and TO-202 and 20W for the TO-3 and TO-220.  $I_{\text{MAX}}$  is 1.5A for the TO-3 and TO-220 package and 0.5A for the TO-5 and TO-202 package.

Note 2. Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects are covered under the specification for thermal regulation.

Note 3. Selected devices with tight-tolerance reference voltage available.

## Application Hints (Continued)

current depends on the value of the capacitor, the output voltage of the regulator, and the rate of decrease of  $V_{IN}$ . In the LM117, this discharge path is through a large junction that is able to sustain 15A surge with no problem. This is not true of other types of positive regulators. For output capacitors of  $25\mu\text{F}$  or less, there is no need to use diodes.

The bypass capacitor on the adjustment terminal can discharge through a low current junction. Discharge

occurs when *either* the input or output is shorted. Internal to the LM117 is a  $50\Omega$  resistor which limits the peak discharge current. No protection is needed for output voltages of 25V or less and  $10\mu\text{F}$  capacitance. *Figure 3* shows an LM117 with protection diodes included for use with outputs greater than 25V and high values of output capacitance.

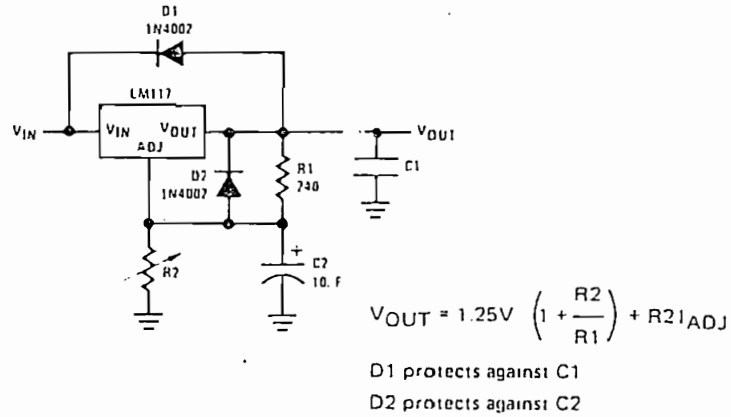
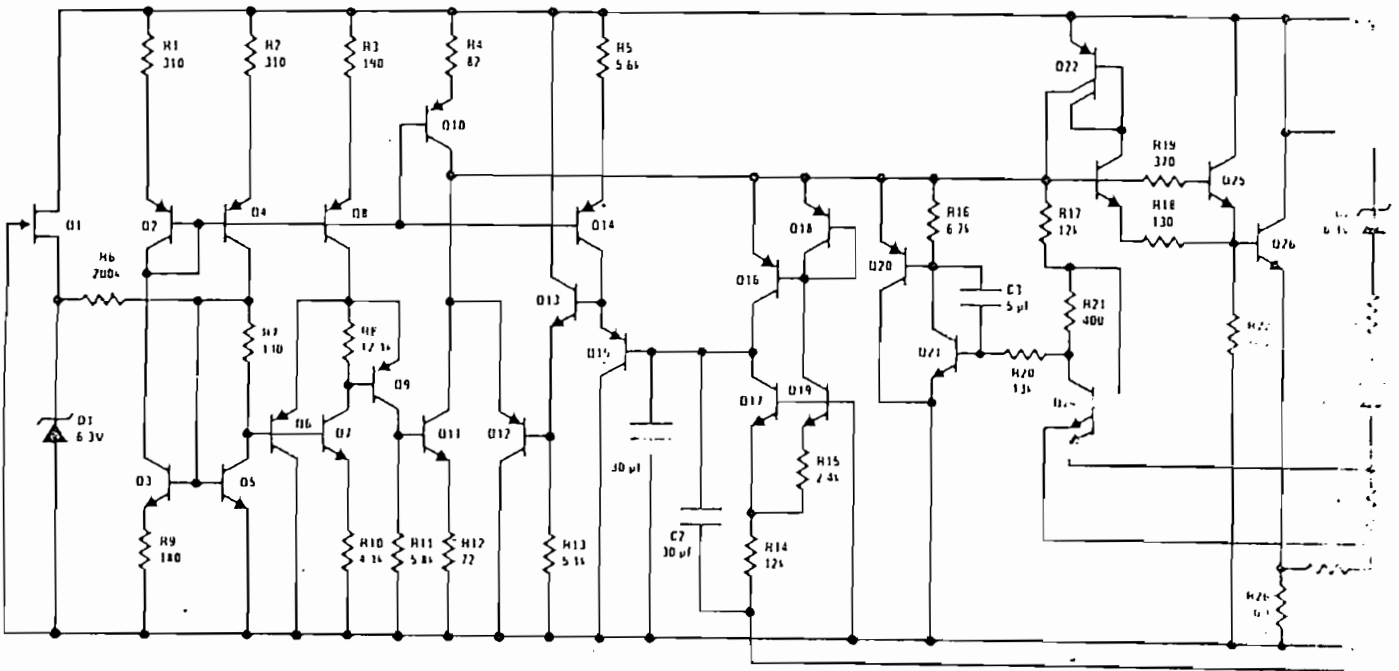
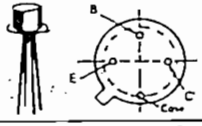
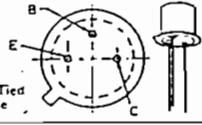


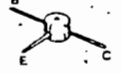
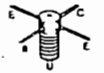

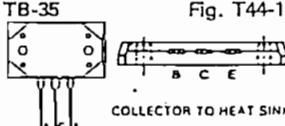
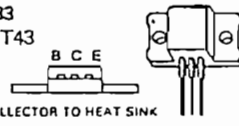
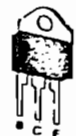


FIGURE 3. Regulator with Protection Diodes

## Schematic Diagram

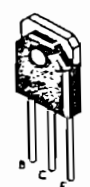
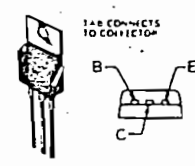

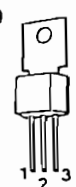
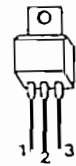


# Silicon Transistor Selector Guide (cont'd)

Breakdown Voltage		Type		Application	Collector Current $I_c$ (A)	Collector Diss. PD (W)	Current Gain hFE	Freq in MHz ft	Package
BVCBO	BVCEO	NPN	PNP						Case/Basing
30	15	ECG316	—	UHF Amp, Lo Noise	.05	.2	25 min	1400	TO-72 Fig. T4 
30	25	—	ECG395	UHF/VHF Amp	.05	.36	25 min	2.3 GHz	
45	45	ECG161	—	Gen Purp-Hi Freq, Amp	.05	.18	60 typ	800	
35	15	—	ECG106	Gen Purp-Hi Freq, Amp	.075	.25	20 min	500	TO-18 Fig. T28 
75	40	ECG123A	—	Gen Purp, Amp, Sw	.8	.5	200 typ	300	
30	30	ECG313	—	RF Amp	.02	.15	25 min	400 min	RF-15 Fig. T49 
20	12	ECG63	—	UHF/Microwave Amp/Mixer	.040	.400	40	5 GHz typ	RF-19A Fig. T49-3 
25	15	ECG64	—	UHF/Microwave Amp/Hi Speed Sw	.030	.350	60	4.5 GHz typ	
20	15	ECG65	—	UHF/Microwave Amp CATV, MATV	.025	.180	30 typ	5 GHz typ	RF-19 Fig. T49-2 
50	30	ECG76	—	CATV Broadband Amp	.4	5	30 min	1800	TO-117 Fig. T50 
160	160	ECG33	ECG34	Hi Pwr AF PO	15	150	120 min	80	TB-34 Fig. T44 
200	200	ECG92	ECG93	Hi Pwr AF PO	15	150	120 typ	20	TB-35 Fig. T44-1 
200	200	ECG58	ECG59	Hi Pwr AF PO	17	200	20 min	20	
150	120	ECG380	ECG381	Gen Purp, Pwr Amp	7	80	60 typ	9	TB-33 Fig. T43 
100	100	ECG390	ECG391	Hi Speed Sw, Amp, $t_{off} = 1 \mu s$ (typ)	10	80	40 min	3	TO-3P (TO-218) Fig. T48 
100	100	ECG392	ECG393	Hi Speed Sw, Amp, $t_{off} = .7 \mu s$ (typ)	25	125	25 min	3	
160	160	ECG2305	ECG2306	Power Amp, Sw, $t_f = 1.2 \mu s$ (typ)	16	125	60 min	1 min	
500	400	ECG394	—	HV Pwr Amp, Sw, $t_{off} = 5 \mu s$ (typ)	3	100	30 min	2.5	
1000	450	ECG2310	—	HV Hi Speed Sw, $t_f = .8 \mu s$ (max)	8	125	10 min	—	
1000	450	ECG2311	—	HV Hi Current Hi Speed Sw, $t_f = .3 \mu s$ (typ)	15	150	10	—	
1500	700	ECG2300	—	HV Horiz Output, Sw, $t_f = .7 \mu s$ (typ)	8	125	5	7	
1500	750	ECG2301	—	HV Horiz Output, Sw, $t_f = .4 \mu s$ (typ)	5	100	5	4	



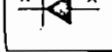
# Silicon Transistor Selector Guide (cont'd)

Breakdown Voltage		Type		Application	Collector Current I <sub>c</sub> (A)	Collector Diss. PD (W)	Current Gain h <sub>FE</sub>	Freq in MHz f <sub>t</sub>	Package																																																
BVCBO	BVCEO	NPN	PNP						Case/Basing																																																
60	50	ECG2304	---	Hi Speed Sw, Amp, t <sub>f</sub> = .1 μs (typ)	15	90	100 min	20	TO-3PJ Fig. T48-1  Collector to Heat Sink																																																
160	140	ECG36	ECG37	Gen Purp, Pwr Amp, Hi Speed Sw	12	100	60 min	15																																																	
200	180	ECG2307	---	Hi Gain Amp, Series Pass	5	80	500 min	---																																																	
500	400	ECG2308	---	Hi Speed Sw, Series Pass, t <sub>f</sub> = 1 μs (max)	12	100	15 min	20																																																	
900	800	ECG2309	---	HV, Hi Speed Sw, t <sub>f</sub> = .7 μs (max)	6	100	10 min	15																																																	
1500	800	ECG2302	---	HV, Horiz Output/Damper Diode, t <sub>f</sub> = .7 μs (max)	5	120	8 min	3																																																	
60	60	ECG152	ECG153	Gen Purp, Pwr Amp	7	50	60 typ	10	TO-220 Fig. T41 																																																
65	65	ECG235	---	RF Pwr Output	3 peak	12	40 min	200 min																																																	
70	70	ECG236	---	RF Pwr Output	8 peak	25	20 min	100																																																	
80	80	ECG241	ECG242	Gen Purp, Pwr Amp	4	60	25 min	2																																																	
80	80	ECG377	ECG378	Hi Speed Sw, Amp, t <sub>f</sub> = .14 μs (typ)	10	50	60 min	50																																																	
90	80	ECG196	ECG197	Gen Purp, Pwr Amp	7	50	20 min	.8																																																	
100	80	ECG56	---	Gen Purp Amp, Sw, Series Pass, t <sub>f</sub> = 1.3 μs (typ)	3	30	500 min	15																																																	
100	100	ECG331	ECG332	Gen Purp	15	90	40 typ	3 min																																																	
130	120	ECG291	ECG292	Gen Purp, Pwr Amp	4	40	75 typ	4 min																																																	
150	150	ECG54	ECG55	Gen Purp, Pwr Amp	8	50	100 typ	85																																																	
200	150	ECG375	ECG398	Gen Purp Linear, Vert	3/2	25	150 typ	8																																																	
300	300	ECG376	---	Gen Purp	.15	15	100 typ	80																																																	
500	500	ECG198	---	HV Amp, Sw, t <sub>off</sub> = 2 μs (typ)	1	40	80 typ	20																																																	
700	400	ECG51	---	HV, Hi Speed Sw, t <sub>f</sub> = .7 μs (typ)	4	75	25 typ	4 min																																																	
700	400	ECG379	---	Horiz Sw, t <sub>f</sub> = .7 μs (typ)	12	100	20 typ	4 min																																																	
1500	750	ECG2303	---	Horiz Sw, t <sub>f</sub> = .65 μs (typ)	2.5	65	4	4																																																	
50	40	ECG300	ECG307	Gen Purp	1.5	7	90 min	70		TO-202 Fig. T38  <table border="1" data-bbox="1276 1181 1454 1429"> <tr><td>ECG</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>49</td><td>E</td><td>B</td><td>C</td></tr> <tr><td>50</td><td>E</td><td>B</td><td>C</td></tr> <tr><td>186</td><td>B</td><td>C</td><td>E</td></tr> <tr><td>187</td><td>B</td><td>C</td><td>E</td></tr> <tr><td>299</td><td>C</td><td>B</td><td>E</td></tr> <tr><td>300</td><td>C</td><td>B</td><td>E</td></tr> <tr><td>307</td><td>C</td><td>B</td><td>E</td></tr> <tr><td>171</td><td>E</td><td>B</td><td>C</td></tr> <tr><td>210</td><td>E</td><td>B</td><td>C</td></tr> <tr><td>211</td><td>E</td><td>B</td><td>C</td></tr> <tr><td>296</td><td>E</td><td>B</td><td>C</td></tr> </table>	ECG	1	2	3	49	E	B	C	50	E	B	C	186	B	C	E	187	B	C	E	299	C	B	E	300	C	B	E	307	C	B	E	171	E	B	C	210	E	B	C	211	E	B	C	296	E	B
ECG	1	2	3																																																						
49	E	B	C																																																						
50	E	B	C																																																						
186	B	C	E																																																						
187	B	C	E																																																						
299	C	B	E																																																						
300	C	B	E																																																						
307	C	B	E																																																						
171	E	B	C																																																						
210	E	B	C																																																						
211	E	B	C																																																						
296	E	B	C																																																						
70	60	ECG186	ECG187	Hi Speed Sw, t <sub>f</sub> = .075 μs (typ)	3	12.5	80 typ	50																																																	
75	35	ECG299	---	RF Driver, Pwr Amp	1	4	10 min	200																																																	
90	75	ECG210	ECG211	Hi Speed Sw, t <sub>f</sub> = .05 μs (typ)	1	6.25	120 min	200																																																	
125	100	ECG49	ECG50	Gen Purp, Pwr Amp	2	10	100 typ	150																																																	
300	300	ECG171	ECG296	Gen Purp, Amp, Video	.5	10	40 typ	75/50																																																	
36	18	ECG78	---	RF Amp, CB	.6	5	5 min	---	TO-202M Fig. T39 <table border="1" data-bbox="1172 1471 1350 1636"> <tr><td>ECG</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>TAB</td></tr> <tr><td>78</td><td>B</td><td>C</td><td>E</td><td>C</td></tr> <tr><td>79</td><td>B</td><td>C</td><td>E</td><td>C</td></tr> <tr><td>186A</td><td>B</td><td>C</td><td>E</td><td>C</td></tr> <tr><td>187A</td><td>B</td><td>C</td><td>E</td><td>C</td></tr> <tr><td>228A</td><td>E</td><td>B</td><td>C</td><td>C</td></tr> </table> 	ECG	1	2	3	TAB	78	B	C	E	C	79	B	C	E	C	186A	B	C	E	C	187A	B	C	E	C	228A	E	B	C	C																		
ECG	1	2	3	TAB																																																					
78	B	C	E	C																																																					
79	B	C	E	C																																																					
186A	B	C	E	C																																																					
187A	B	C	E	C																																																					
228A	E	B	C	C																																																					
36	18	ECG79	---	RF Amp, CB	2	10	5 min	---																																																	
50	50	ECG186A	ECG187A	Gen Purp, Pwr Amp	3	10	80 min	150																																																	
450	350	ECG228A	---	Gen Purp, Linear Amp	1	10	40 typ	15																																																	
100	50	ECG302	---	RF Driver, Pwr Amp	1.5 peak	8	200 min	80	TO-202J Fig. T37 <table border="1" data-bbox="1172 1699 1350 1844"> <tr><td>ECG</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>80</td><td>B</td><td>C</td><td>E</td></tr> <tr><td>302</td><td>E</td><td>B</td><td>C</td></tr> <tr><td>306</td><td>B</td><td>C</td><td>E</td></tr> </table> 	ECG	1	2	3	80	B	C	E	302	E	B	C	306	B	C	E																																
ECG	1	2	3																																																						
80	B	C	E																																																						
302	E	B	C																																																						
306	B	C	E																																																						
100	50	ECG306	---	RF Driver, Pwr Amp	1.5 peak	8	200 min	80																																																	
700	300	ECG80	---	HV Sw, Horiz Driver	1	8	50 typ	13																																																	

Note: NPN Type/PNP Type

Package Outlines - See Page 66

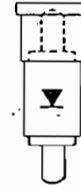
# Diodes and Rectifiers (General Purpose)



ECG Type	Description		Peak Reverse Voltage PRV Max V	Average Rectified Forward Current IO Max	Forward Current Repetitive Peak IFRM Max	Reverse Recovery Time trr	Forward Voltage Drop Max VF	AFC	Fast Sw	Gen Purp	Fast Recovery	Fig. No.
ECG109	Gen Purp	Ge	100	200 mA	---	---	---			•		Z2
ECG110A	Gen Purp	Ge	40	50 mA	150 mA	---	---			•		Z2
ECG110MP	Matched Diode Pair	Ge	30	15 mA at 60°C	---	---	---	•		•		Z2
ECG112	UHF Mixer (Schottky)	Si	5	25 mA	---	---	.5 at 60 mA					Z4
ECG113A	Common Cathode Dual Diode, Center Tap, TV Horiz	Si	100	1.5 A	---	---	0.95 V at 1 A	•		•		Z15
ECG114	Series Dual Diodes, TV Horiz	Se	20	min 1.1 mA	---	---	---	•		•		Z12
ECG115	Common Anode, Dual Diode, TV Horiz AFC	Se	20	min 1.1 mA	---	---	---	•		•		Z12
ECG116	Gen Purp Rect	Si	600	1 A	---	---	0.8 V at 1 A			•		Z3
ECG117A	Gen Purp Rect, Metal Case	Si	1000	1.5 A	---	---	0.9 V			•		Z10
ECG120	Color TV Convrg Rect	Se	18	65 mA	---	---	---			•		Z17
ECG125	Gen Purp Rect	Si	1000	2.5 A at 25°C Lead Temp	---	---	0.8 V at 1 A			•		Z3
ECG156	Gen Purp Rect	Si	1000	3 A	---	---	1.1 V at 1.5 A			•		Z6
ECG173BP	TV Damper	Si	5000	600 mA	8 A	4 μs	4.4 V at 500 mA					Z16
ECG177	Fast Sw, Det, etc.	Si	200	160 mA	250 mA	50 ns	1.0 V at 100 mA		•			Z4
ECG178MP	Matched Diode Pair, AFC, AFT, etc.	Si	50	75 mA	100 mA	---	1.0 V at 5 mA	•				Z5
ECG506	Sw, Fast Recovery, Bst Damper, Blanking	Si	1400	2 A	3.5 A	500 ns	1.0 V at 1 A		•		•	Z6
ECG507	Gen Purp Rect, Gating, Centering	Si	50	250 mA	---	3 μs	1.0 V at 1 A			•		Z6
ECG515	Sw, Fast Recovery, SCR Defl Clamp	Si	800	3 A	9 A	1.3 μs	1.3 V at 4 A		•		•	Z8
ECG519	Fast Sw Diode	Si	100 (BRV)	200 mA	450 mA	4 ns	1.0 V at 10 mA		•			Z4
ECG525	Sw, Fast Recovery, Damper	Si	2000	1 A	---	500 ns (Fwd Rec)	2 V at 2 A		•		•	Z6
ECG551	Sw, Fast Recovery, Damper, Metal Case	Si	1500	1 A	---	1 μs	1.5 V at 2 A		•		•	Z9
ECG552	Gen Purp Rect, Fast Recovery	Si	600	1 A	---	200 ns	1.5 V at 250 mA		•	•	•	Z3
ECG558	Gen Purp Rect, Fast Recovery, HV	Si	1500	1 A	---	250 ns	1.2		•	•	•	Z6
ECG580	Gen Purp Rect, Fast Recovery	Si	600	3 A	Single Surge 100 A	250 ns	1.3 V at 3 A		•	•	•	Z1A
ECG581	Gen Purp Rect, Fast Recovery	Si	400	8 A	Single Surge 150 A	200 ns	1.2 V at 3 A		•	•	•	Z41A
ECG582	TV Damper	Si	6000	300 mA	Single Surge 100 A	300 ns	8.0 V at 100 mA				•	Z17A
ECG583	Detector, Mixer, (Schottky) Hot Carrier Modulator	Si	70	15 mA	---	1 ps	.41 V at 1 mA	•	•	•	•	Z4
ECG584	Detector, Mixer, (Schottky) Hot Carrier Modulator	Si	20	35 mA	---	1 ps	.41 V at 1 mA	•	•	•	•	Z4

# Microwave Mixer Diodes

Type No.	Test Freq. (MHz)	Noise Figure (dB)	I.F. IMPED. @ 30 MHz (Ohms)	VSWR Max. Ratio	Burn Out (ERGS)	Fig. No.
1N415C	9375	9.5	325-475	1.5	2.0	Z64
1N415E	9375	7.5	335-465	1.3	2.0	Z64
1N416C	3060	8.3	300-700	—	2.0	Z64
1N416E	3060	7.0	350-450	1.3	5.0	Z64



# PIN Diodes

ECG Type	Description and Application	Max. Power (mW)	V (BR) R Min. (Volts)	IR Max. (nA)	CT Max. (pf)	LS Typ. (nH)	RA Max. (Ohms)	Fig. No.
ECG553	Si PIN Diode, UHF, VHF Switch	200	30	150	2	2.5	1.2	Z4
ECG555	Si PIN Diode, Gen Purp & VHF Switch	400	35	100	1	3.0	0.7	Z11

# Diode and Rectifier Outlines

**Fig. Z1** ECG601

COLOR END DENOTES CATHODE

**Fig. Z1A** ECG580

COLOR BAND INDICATES CATHODE END

**Fig. Z2** DO-7  
ECG  
109  
110MP

(COLOR BAND DENOTES CATHODE)

**Fig. Z3** ECG DO-41  
116 552  
125

COLOR BAND DENOTES CATHODE

**Fig. Z4** DO-35  
ECG  
112 553 600  
177 583 616  
519 584

COLOR BAND DENOTES CATHODE

**Fig. Z5** ECG178MP

(COLOR BAND DENOTES CATHODE)

**Fig. Z6** ECG  
156 525  
506 558  
507

COLOR BAND DENOTES CATHODE

**Fig. Z7** ECG  
606  
607

**Fig. Z8** ECG515

**Fig. Z9** ECG551

**Fig. Z10** ECG117A

**Fig. Z11** ECG555

**Fig. Z12** ECG114  
SERIES CONNECTED  
ECG115  
COMMON ANODE

# Bridge Rectifiers (Silicon)

## Single-Phase



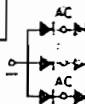
Peak Reverse Voltage (PRV Volts)	I <sub>O</sub> , Average Rectified Forward Current (Amps)				
	1 A	1.5 A	2 A	4 A	8 A
100			ECG168		ECG5312
200			ECG167	ECG5309	ECG5313
400		ECG5304	ECG108		ECG5314
600	ECG5332	ECG5305	ECG169	ECG5310	ECG5315
800		ECG5306			ECG5316
1000	ECG5334	ECG5307	ECG170	ECG5311	ECG5317
Peak Forward Surge Current (Amps)	50	50	60	250	125
Max. Forward Voltage Per. Element V <sub>F</sub> (Volts)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
T <sub>A</sub> at Rated I <sub>O</sub> (°C) Max	+40	+25	+25	+40	+50
Fig. No.	Z21	Z22	Z23	Z23-1	Z24

## Single-Phase (cont'd)

Peak Reverse Voltage (PRV Volts)	I <sub>O</sub> , Average Rectified Forward Current (Amps)			
	25 A	40 A	80 A	100 A
200	ECG5322	ECG5340		
400	ECG5324			
600	ECG5326	ECG5342	ECG5346	ECG5348
800	ECG5327			
1000	ECG5328	ECG5344		
Peak Forward Surge Current (Amps)	300	400	800	1000
Max. Forward Voltage Per. Element V <sub>F</sub> (Volts)	1.2	1.1	1.6	1.4
T <sub>C</sub> at Rated I <sub>O</sub> (°C) Max.	+60	+60	+85	+80
Fig. No.	Z25	Z26		

## Three-Phase

Peak Reverse Voltage (PRV Volts)	I <sub>O</sub> , Average Rectified Forward Current (Amps)	
	60 A	100 A
200		
400		
600	ECG5335	ECG5338
800		
1000		
Peak Forward Surge Current (Amps)	500	800
Max. Forward Voltage Per. Element V <sub>F</sub> (Volts)	1.25	1.25
T <sub>C</sub> at Rated I <sub>O</sub> (°C) Max.	+70	+100
Fig. No.	Z66	



# Discrete LED Indicators

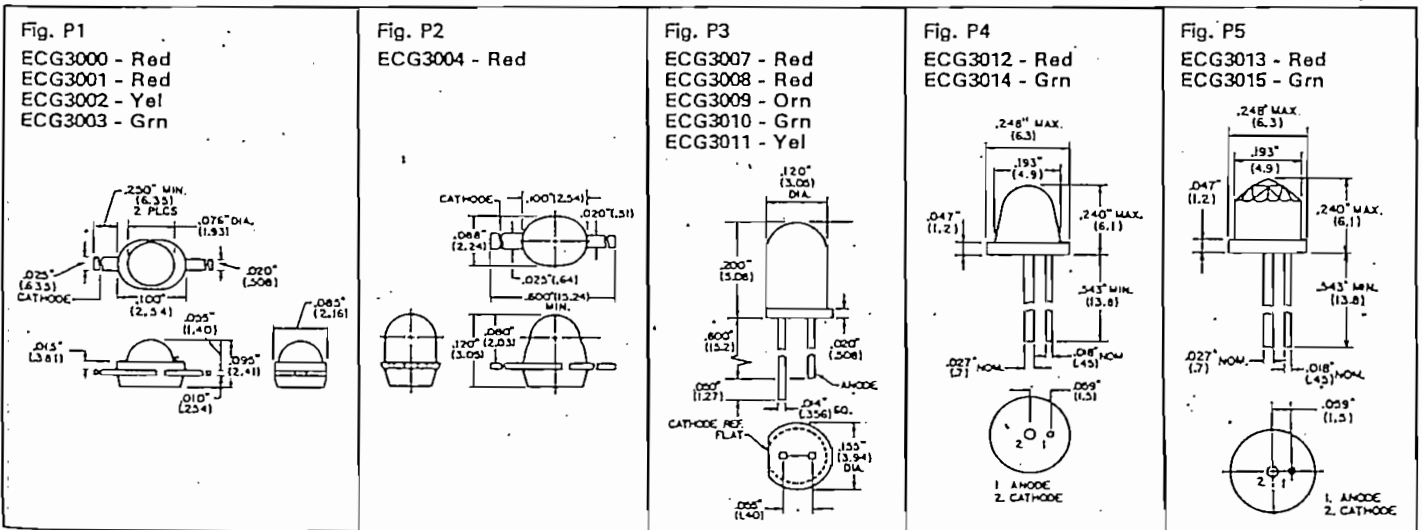
ECG Type	Description/Application	Viewed Color	Forward Voltage VF (V)	Reverse Voltage VR (V)	Max DC Forward Current IF (mA)	Maximum Power Diss. PD (mW)	Typical Viewing Angle Degrees	Typical Luminous Intensity MCD	Qty Per Pkg	Fig. No.
ECG3000	Indicator Lights, Diagnostic and Panel Displays, Printed Circuit Board Indicators, Miniature Low Profile Package	Clear Red	1.65	5.0	40	80	80	1.4	4	P1
ECG3001		Flooded Red	1.65	5.0	40	80	80	1.0	4	P1
ECG3002		Clear Yellow	2.10	5.0	35	105	80	1.0	2	P1
ECG3003		Clear Green	2.20	5.0	35	105	80	1.0	2	P1
ECG3004	Diagnostic or Indicator Lights in Low-Power/Low Current Environments, MOS Compatible	Red	1.60	5.0	5	105	25	2.0	2	P2
ECG3007	General Purpose Indicators, Developmental Projects, Breadboards	Red	1.68	5.0	50	100	70	2.5	4	P3
ECG3008		Bright Red	2.00	5.0	35	105	90	5.0	2	P3
ECG3009		Orange	2.00	5.0	35	105	90	5.0	2	P3
ECG3010		Green	2.20	5.0	35	105	90	1.0	2	P3
ECG3011		Yellow	2.10	5.0	35	105	90	3.0	2	P3
ECG3012	Panel Circuit Indicators, Low Drive Power, High Intensity Visible Emission	Diffused Red	2.20	4.0	35	100	30	1.5	4	P4
ECG3013		Clear Red Jewel	2.20	4.0	35	100	20	1.7	4	P5
ECG3014		Diffused Green	2.15	4.0	45	125	35	3.0	2	P4
ECG3015		Clear Green Jewel	2.15	4.0	45	125	25	1.8	2	P5
ECG3016	Two Color Panel Circuit Indicator	Red or Green	2.10	4.0	25	75	90	.6	2	P6
ECG3018	Instruments, Printed Circuit Board Indicators, Boardmounted Panel Display	Soft Red	1.65	5.0	100	180	90	1.6	2	P7
ECG3019		Soft Red	1.65	5.0	100	180	60	3.0	2	P7
ECG3020	Computers, General Purpose Indicators, Instruments, Test Systems, Mini- and Micro-Processors, Process Controlled Industrial Systems, Sorting Machines, Assembly Equipment, Vending Machines, Telephone Equipment, Backlight Panels. High Intensity Indicators in Four Colors	Flooded Red	1.70	5.0	100	180	80	1.6	2*	P8
ECG3021		Yellow	2.10	5.0	35	105	65	6.0	2*	P8
ECG3022		Bright Red	2.00	5.0	35	105	65	6.0	2*	P8
ECG3023		Orange	2.00	5.0	35	105	65	6.0	2*	P8
ECG3024		Green	2.20	5.0	35	105	65	1.5	2*	P8
ECG3025	Instruments, Printed Circuit Board Indicators, Boardmounted Panel Display	Red	1.80	5.0	100	180	40	3.0	2*	P9
ECG3026	Polarity Indication Tri-State Indicator, Flow Direction Display, Instruments, Tester Displays, Educational Aids	Red or Green	1.65 - R 2.20 - G	-	70 - R 35 - G	200	50	.5 - G 1.5 - R	1*	P10
ECG3030	Flashing Red LED with Integral IC. Applications Include Status Indicators and Warning Lights, Pulse Rate=3 Hz Typ at 5 VDC	Flashing Red	Max V Applied 5.25	.4	20	-	40	1.2	1	P9A
ECG3130	Flashing Yellow LED with Integral IC. For Status Indicators and Warning Lights, Pulse Rate=2.5 Hz Typ at 5 V	Flashing Yellow	Max V Applied 5.25	.4	20	-	40	3	1	P9A
ECG3131	Flashing Green LED with Integral IC. For Status Indicators and Warning Lights, Pulse Rate=2.5 Hz Typ at 5 V	Flashing Green	Max V Applied 5.25	.4	20	-	40	2	1	P9A

\* Package includes 2 piece panel mounting grommets consisting of 1 lamp holder and 1 collar for each device.

# Discrete LED Indicators (cont'd)

ECG Type	Description/Application	Viewed Color	Forward Voltage VF (V)	Reverse Voltage VR (V)	Max DC Forward Current IF (mA)	Maximum Power Diss. PD (mW)	Typical Viewing Angle Degrees	Typical Luminous Intensity MCD	Qty Per Pkg	Fig. No.
ECG3160	Rectangular LEDs. Applications Include Bar Graph Displays, Level Meters, Panel Displays, Instrumentation and General Purpose Indicators	Red	1.90	3.0	30	70	50	.4	5	P12
ECG3161		Green	2.10	3.0	30	70	50	.7	5	P12
ECG3162		Yellow	2.10	3.0	30	70	50	2.0	5	P12
ECG3163		Red	1.90	3.0	30	70	50	.4	5	P13
ECG3164		Green	2.10	3.0	30	70	50	.7	5	P13
ECG3165		Yellow	2.10	3.0	30	70	50	1.5	5	P13
ECG3166		Red	1.90	3.0	30	70	50	.5	5	P14
ECG3167		Green	2.10	3.0	30	70	50	.7	5	P14
ECG3168		Yellow	2.10	3.0	30	70	50	2.0	5	P14
ECG3169	Square LED, Used as Level Indicator, Panel Display and General Purpose	Diffused Red	2.8	5.0	20	-	-	1.5	5	P49
ECG3170		Diffused Green	2.8	5.0	20	-	-	2.0	5	P49
ECG3171		Diffused Yellow	2.8	5.0	20	-	-	2.0	5	P49
ECG3172	Triangular LED, Used as Location Indicator and Line Finder	Diffused Red	2.8	4.0	25	70	50	.4	5	P50
ECG3173		Diffused Green	2.8	4.0	30	90	50	1.0	5	P50
ECG3174		Diffused Yellow	2.8	4.0	30	90	50	1.0	5	P50
ECG3180	Surface Mount, LED, Used as Panel Indicators, Backlight Legends, Light Arrays. Mounting Grommet Supplied With Each LED	Red	2.5	5.0	35	200	120	4.5	2	P51
ECG3181		Green	3	5.0	30	200	120	4.5	2	P51
ECG3182		Yellow	2.5	5.0	25	200	120	4.5	2	P51

# Discrete LED Indicator Outlines



# Phototransistor Detectors

ECG Type	Description	Collector to Base Voltage BV <sub>CEO</sub> (V)	Max Collector Current I <sub>c</sub> (mA)	Max Dark Current I <sub>D</sub> at 25°C (nA)	Min Light Current I <sub>L</sub> (mA)	Max Power Dissipation at 25°C P <sub>T</sub> (mW)	Rise Time t <sub>r</sub> (μS)	Fig. No.
ECG3031	NPN, Si, Visible and IR	80	40	20 at V <sub>CE</sub> 5V	6	200	2 Typ	P19
ECG3032	NPN, Si, Visible and IR	80	40	20 at V <sub>CE</sub> 5V	12	200	2 Typ	P20
ECG3034	NPN, Si, Visible and IR	60	100	100 at V <sub>CE</sub> 10V	2	200	—	P21
ECG3035	NPN, Si-Darlington Amp h <sub>fe</sub> =2.0 K, Visible and IR	40	250	100 at V <sub>CE</sub> 12V	2	200	250 Max	P21
ECG3036	NPN, Si-Darlington, Visible and IR	40	250	100 at V <sub>CE</sub> 10V	12	250	40 Typ	P22
ECG3037	NPN, Si, Visible and IR	50	50	500 at V <sub>CE</sub> 30V	10	150	2 Typ	P23
ECG3038	NPN, Si-Darlington, Visible and IR	25	20	20 at V <sub>CE</sub> 10V	5	50	1.5 Typ	P24
ECG3120	NPN, Si, Visible and IR	20 (V <sub>CEO</sub> )	20	500 at V <sub>CE</sub> 10V	1	100	10 Max	P52
ECG3121	NPN, Si, Darlington Visible and IR	20 (V <sub>CEO</sub> )	30	500 at V <sub>CE</sub> 10V	.5	100	100 Typ	P52

## Phototransistor Detector Outlines

**Fig. P19**  
ECG3031

Dimensions: WINDOW .155" DIA. (3.94), .210" (5.33), .184" (4.67), .150" (3.81) DIE SEATING PLANE, .208" (5.28), .500" MIN. (12.70), .018" TYP. (4.57), .021" (5.33), .040" (1.02), .100" (2.54), 45°, 1-E, 2-B, 3-C

**Fig. P20**  
ECG3032

Dimensions: WINDOW .120" DIA. (3.05) ON CL, .184" (4.67), .240" (6.10), .150" (3.81) DIE SEATING PLANE, .021" (5.33), .500" MIN. (12.70), .018" TYP. (4.57), .040" (1.02), .100" (2.54), 45°, 1-E, 2-B, 3-C

**Fig. P21**  
ECG3034  
ECG3035

Dimensions: WINDOW ON ROUND SIDE .205" (5.20) MAX., .210" (5.33) MAX., .500" (12.7) MIN., .019" TYP. (4.83), .135" (3.43) MIN., .165" (4.19) MAX., .055" (1.40) MAX., PIN 1. EMITTER, 2. COLLECTOR, 3. BASE

**Fig. P22**  
ECG3036

Dimensions: .230" (5.84) MAX., .195" (4.95) MAX., .250" (6.35) MAX., .500" (12.7) MIN., .018" TYP. (4.57), .037 BSC (2.24), 1-E, 2-B, 3-C

**Fig. P23**  
ECG3037

Dimensions: .228" MAX. (5.8), .185" (4.7), .276" MAX. (7), .177" (4.50), .500" MIN. (12.7), .100" (2.54), .018" (4.57), 1. EMITTER, 2. BASE, 3. COLLECTOR (CASE)

**Fig. P24**  
ECG3038

Dimensions: .118" MIN. (3.00), .020" (.51), .022 (.55), .291" (7.38), .188" (4.78), .130" (3.3), .065" R (1.63), .029" (.75), .075" (1.9), .118" MIN. (3.00), .027" (.7), .048" (1.2), .070" (1.77), .089" (2.27), .121" (3.07), 1. EMITTER, 2. COLLECTOR

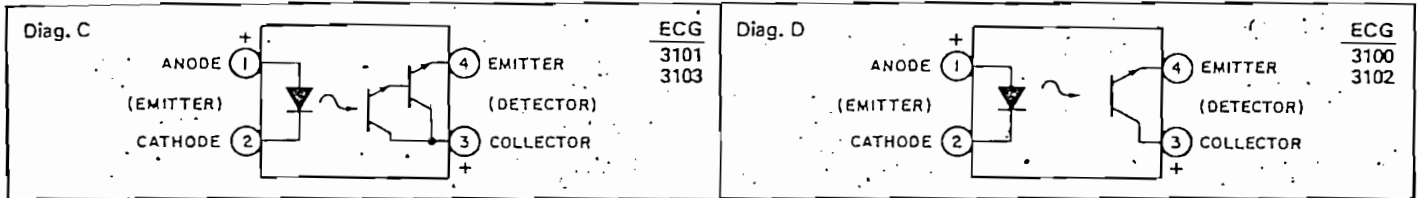
**Fig. P52**  
ECG3120  
ECG3121

Dimensions: .177" (4.5), .165" (4.2), .189" (4.8), .138" (3.5), .110" (2.8), .394" (10) MIN., .504" (12.8) MIN., .018" (.45), .100" (2.54), .075" (1.9), 1. EMITTER, 2. COLLECTOR

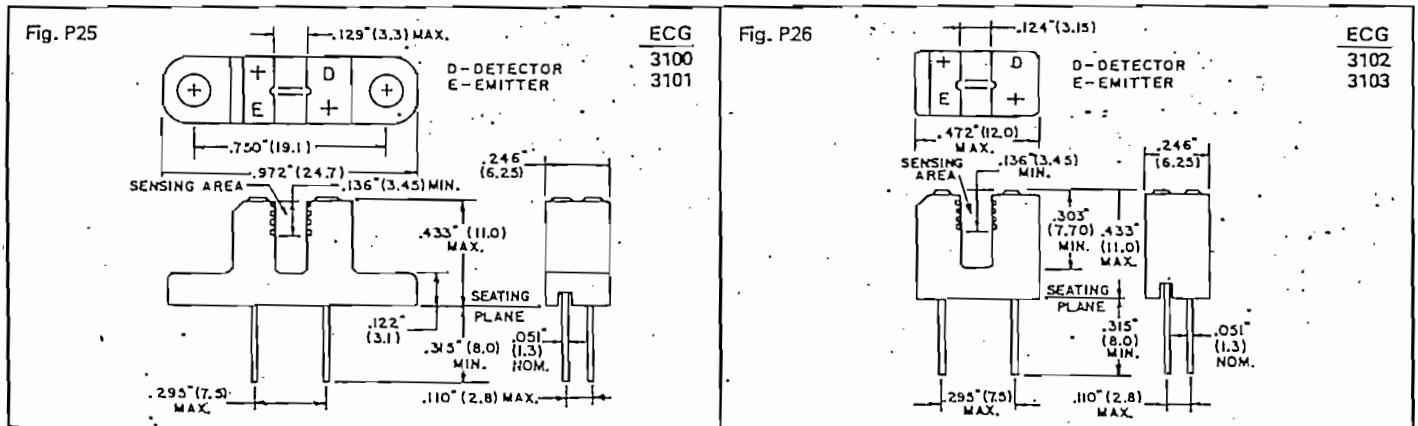
# Opto-Coupled Interrupter Modules

ECG Type	Output Configuration	Total Power Dissipation P <sub>t</sub> (mW)	LED Max Ratings		Collector To Emitter Voltage BV <sub>CEO</sub> (V)	Collector Current I <sub>c</sub> (mA)	Ckt. Diagram	Fig. No.
			Forward Current I <sub>F</sub> (mA)	Reverse Voltage V <sub>R</sub> (V)				
ECG3100	NPN Transistor	250	60	6	55	100	D	P25
ECG3101	NPN Darlington	250	60	6	55	100	C	P25
ECG3102	NPN Transistor	250	60	6	55	100	D	P26
ECG3103	NPN Darlington	250	60	6	55	100	C	P26

## Circuits



## Outlines



## Optoisolators

ECG Type	Output Configuration	Total Device Ratings			LED Max Ratings		Phototransistor Ratings				Ckt. Diag.	Fig. No.
		Isolation Voltage V <sub>iso</sub> Surge (V)	Total Power P <sub>t</sub> (mW)	DC Current Transfer Ratio % *	Forward Current I <sub>F</sub> (mA)	Reverse Voltage V <sub>R</sub> (V)	Collector to Base Voltage BV <sub>CB0</sub> (V)	Collector to Emitter Voltage BV <sub>CEO</sub> (V)	Collector Current I <sub>c</sub> (mA)	Typ Freq KHz		
ECG3040	NPN Transistor	7500	250	20	80	3	70	30	3.5 Typ	300	A	P28
ECG3041	NPN Transistor	7500	250	100	60	6	70	30	100 Max	150	A	
ECG3042	NPN Transistor	7500	250	20	60	3	70	30	50 Max	150	A	
ECG3043	NPN Transistor	3550	260	70	60	3	70	80	50 Max	100	A	
ECG3044	NPN Darlington	7500	300	300	80	3	—	80	150 Max	75	B	
ECG3045	NPN Darlington	7500	300	500	80	3	—	80	150 Max	75	B	
ECG3081	NPN Transistor	6000	250	20	60	3	30	30	100	100	D	P27
ECG3082	NPN Darlington	6000	250	400	60	3	30	30	100	75	C	
ECG3083	NPN Darlington	7500	250	200	60	3	30	30	100	75	E	P28
ECG3084	NPN Darlington	7500	250	100	60	3	55	55	100	75	E	
ECG3086	NPN Dual Transistor	7500	400	50	60	3	30	30	30	200	F	P29
ECG3088	NPN Transistor	7500	300	20	60	6	300	300 (BV <sub>CER</sub> )	100	200	A	P28

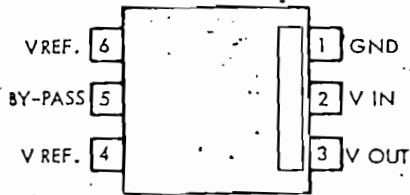
\* DC Current Transfer Ratio is the output transistor collector current divided by the LED forward current -  $h_{FE} = I_c / I_F$



# Linear IC and Module Circuits (cont'd)

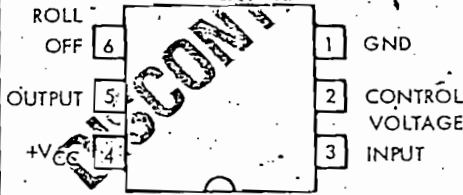
**ECG765** 6-Pin DIP-Q See Fig. L95

Voltage Regulator 9-20 Volts, 200 mA - I LOAD (max). Permits External Compensation and Current Limiting. Load Regulation 1 mA - 50 mA - 0.4% Line Regulation 0.06% Replacement for MFC6034, MFC6034A



**ECG766A** Fig. L100 (8-Pin DIP. See Alternate Fig. L97)

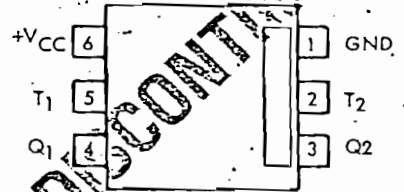
Electronic Attenuator - DC-Operated Volume Control, Compression and Expansion Amplifier. Controlled by DC Voltage or External Variable Resistor. Replacement for MFC6040



Use ECG829

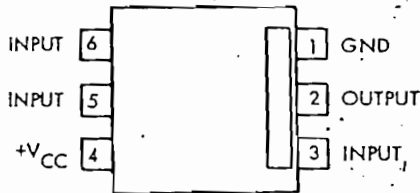
**ECG767** 6-Pin DIP-Q see Fig. L95

Dual Toggle Flip-Flop with Reset. Compatible with TTL and DTL. Reset (R) Available to Set Output to "0" Regardless of Previous History. Replacement for MFC6050



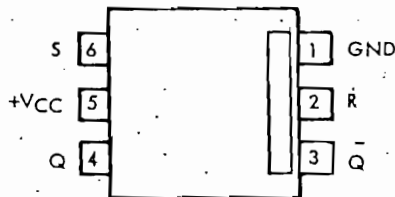
**ECG768** 6-Pin DIP-Q See Fig. L95

3-Input AND Gate. Compatible with TTL and DTL. Replacement for MFC6060



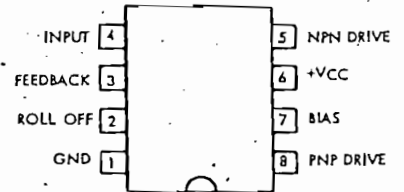
**ECG770** 6-Pin DIP-Q See Fig. L95

RS Flip-Flop. Compatible with TTL and DTL. High-Current Buffered Outputs Allow Direct Drive of Medium Current Lamps and Relays. Replacement for MFC6080



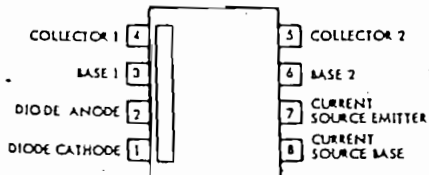
**ECG772A** 8-Pin DIP-Q See Fig. L101 (8-Pin DIP See Alternate Fig. L97)

Audio Pre-Amp and Class "B" Driver. For Complementary Output Transistors. Drives Up to 15-Watt Output into 4-Ohm Load Stages. Replacement for MFC8020



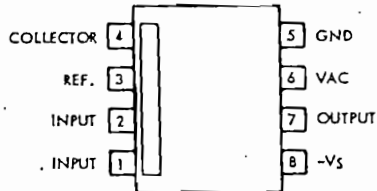
**ECG773** 8-Pin DIP-Q See Fig. L99

Differential/Cascade Amplifier. Diode Available for Biasing. Replacement for MFC8030



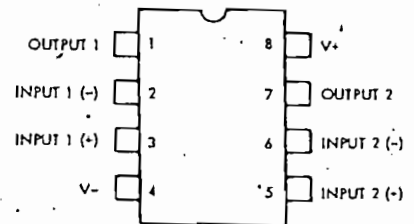
**ECG776** 8-Pin DIP-Q See Fig. L99

Zero Voltage Switch for Use in AC Power Switching Applications with Output Drive Capable of Triggering TRIAC. Replacement for MFC8070



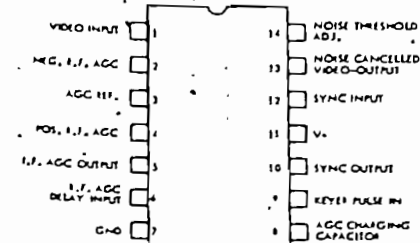
**ECG778A** 8-Pin DIP See Fig. L98

Dual, Internally Compensated, High-Performance Operational Amplifier, 8-Pin "Mini-DIP" Package



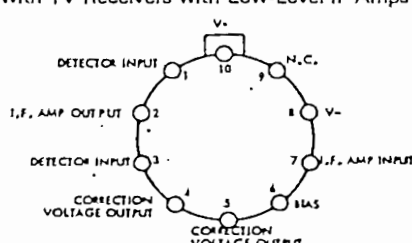
**ECG779A** 14-Pin DIP See Fig. L104

TV Signal Processor, Sync Separator, Noise Inverter, AGC Comparator, RF AGC Delay Amplifier. For Color or Monochrome TV Receivers



**ECG780** 10-Pin Can See Fig. L5

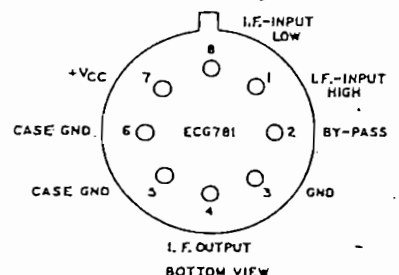
Wide-Band Amplifier, Differential Detector, DC Amplifier, and Zener Diode Regulator for Automatic Frequency Control Applications. High-Gain IF Amplifier Allows Use with TV Receivers with Low-Level IF Amps



Top View

**ECG781** 8-Pin Can See Fig. L3

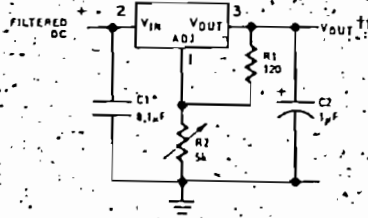
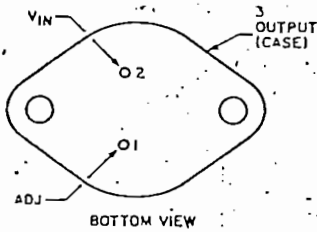
High-Gain, Wide Band IF Amplifier/Limiter for Use in High-Quality FM and Communications Receivers



# Linear IC and Module Circuits (cont'd)

ECG935

3 Terminal Positive Adjustable Voltage Regulator; 1.2 to 32 V<sub>OUT</sub>, I<sub>O</sub> = 5 A, P<sub>D</sub> = 50 W, V<sub>IN</sub> Max = 30 + V<sub>OUT</sub>, V<sub>IN</sub> MIN = 1.25 + V<sub>OUT</sub>



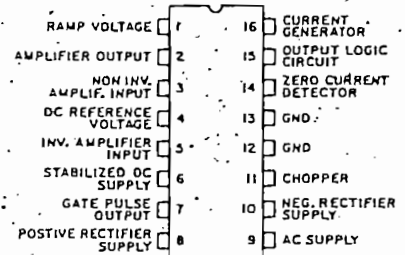
\* Required if device is more than 4" from filter capacitor.  
† Regulator is stable with no load capacitor into resistive loads.

$$V_{OUT} = 1.25 V \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

T0-3 See Fig. L11

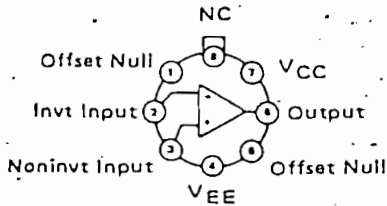
ECG936

Phase Control for SCR or TRIAC



ECG937

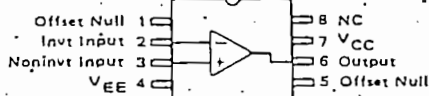
JFET Input Op Amp



8-Pin Can See Fig. L3

ECG937M

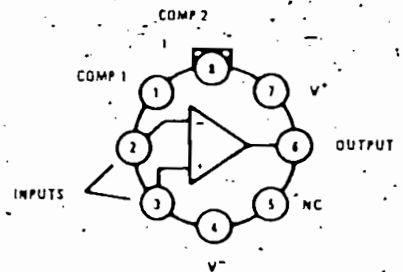
JFET Input Op Amp



8-Pin DIP See Fig. L98

ECG938

Precision Op Amp

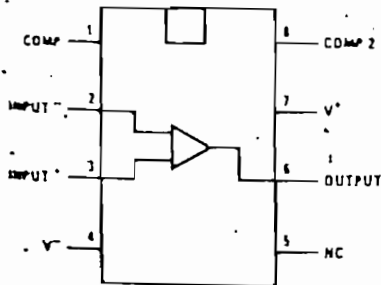


Note: Pin 4 connected to case.

8-Pin DIP See Fig. L97

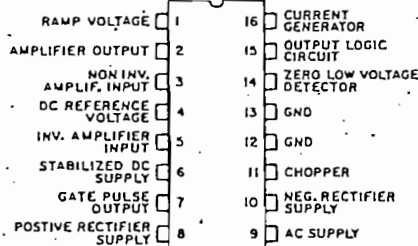
ECG938M

Precision Op Amp



ECG939

Burst Control for SCR or TRIAC

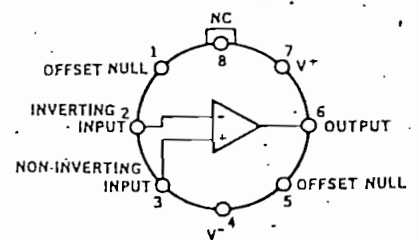


16-Pin DIP See Fig. L111

ECG940

FET-Input Op Amp

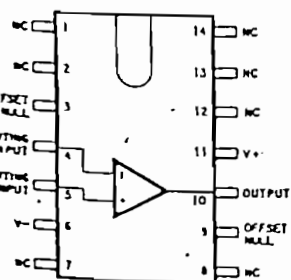
ECG941  
Freq-Compensated Op Amp



NOTE: PIN 4 CONNECTED TO CASE

ECG941D

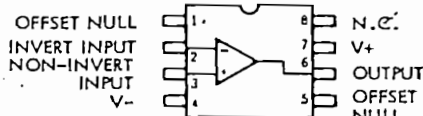
Freq-Compensated Op Amp



14-Pin DIP See Fig. L104

ECG941M

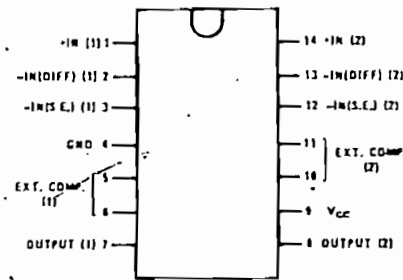
Freq-Compensated Op Amp



8-Pin DIP See Fig. L97

ECG942

Lo Noise Dual Preamp





## LM78MXX Series 3-Terminal Positive Regulators

### General Description

The LM78MXX series of three terminal regulators is available with several fixed output voltages making them useful in a wide range of applications. One of these is local on card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. The voltages available allow these regulators to be used in logic systems, instrumentation, HiFi, and other solid state electronic equipment. Although designed primarily as fixed voltage regulators these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

The LM78MXX series is available in the plastic TO-202 package. This package allows these regulators to deliver over 0.5A if adequate heat sinking is provided. Current limiting is included to limit the peak output current to a safe value. Safe area protection for the output transistor is provided to limit internal power dissipation. If internal power dissipation becomes too high for the heat sinking provided, the thermal shutdown circuit takes over preventing the IC from overheating.

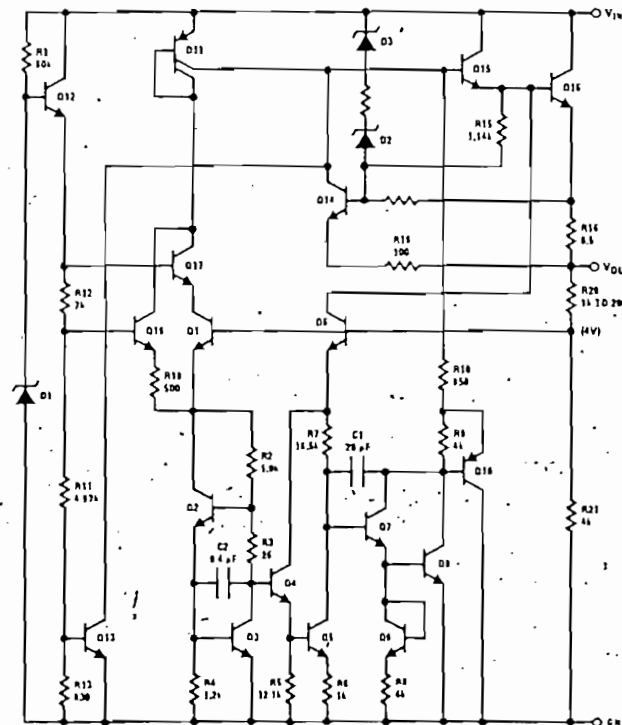
Considerable effort was expended to make the LM78MXX series of regulators easy to use and minimize the number of external components. It is not necessary to bypass the output, although this does improve transient response. Input bypassing is needed only if the regulator is located far from the filter capacitor of the power supply.

For output voltage other than 5V, 12V and 15V the LM117 series provides an output voltage range from 1.2V to 57V.

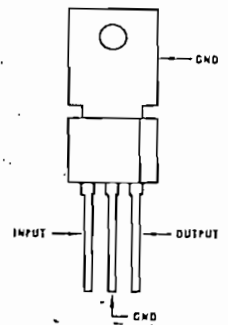
### Features

- Output current in excess of 0.5A
- Internal thermal overload protection
- No external components required
- Output transistor safe area protection
- Internal short circuit current limit
- Available in plastic TO-202 package
- Special circuitry allows start-up even if output is pulled to negative voltage ( $\pm$  supplies)

### Schematic and Connection Diagrams



Plastic Package



FRONT VIEW

Order Numbers  
LM78M05CP  
LM78M12CP  
LM78M15CP  
See Package P03A

For Tab Bend TO-202  
Order Numbers  
LM78M05CP TB  
LM78M12CP TB  
LM78M15CP TB  
See Package P03E

**Absolute Maximum Ratings**

Input Voltage	35V
Output Voltage	( $V_O = 5V, 12V, 15V$ )
Power Dissipation (Note 1)	Internally Limited
Operating Temperature Range	0°C to +70°C
Maximum Junction Temperature	+125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	+230°C

**Electrical Characteristics**  $T_A = 0^\circ\text{C}$  to  $70^\circ\text{C}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ , unless otherwise noted.

INPUT VOLTAGE		5V			12V			15V			UNITS
INPUT VOLTAGE (unless otherwise noted)		10V			19V			23V			
PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	-4.8	5	5.2	11.5	12	12.5	14.4	15	15.6	V
	$P_D < 7.5\text{W}$ , $5\text{ mA} < I_O < 500\text{ mA}$	4.75		5.25	11.4		12.6	14.25		15.75	V
	and $V_{\text{MIN}} < V_{\text{IN}} < V_{\text{MAX}}$	(7.5 < $V_{\text{IN}} < 20$ )			(14.8 < $V_{\text{IN}} < 27$ )			(18 < $V_{\text{IN}} < 30$ )			V
Line Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , $I_O = 100\text{ mA}$			50			120			150	mV
	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$			100			240			300	mV
		(7.2 < $V_{\text{IN}} < 25$ )			(14.5 < $V_{\text{IN}} < 30$ )			(17.6 < $V_{\text{IN}} < 30$ )			V
Load Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , $5\text{ mA} < I_O < 500\text{ mA}$			100			240			300	mV
Long Term Stability				20			48			60	mV/1000 hrs
Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			4			10			10	mA
Quiescent Current Change	$T_J = 25^\circ\text{C}$			0.5			0.5			0.5	mA
	$5\text{ mA} < I_O < 500\text{ mA}$										mA
Output Noise Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$			1			1			1	mV
	$V_{\text{MIN}} < V_{\text{IN}} < V_{\text{MAX}}$	(7.5 < $V_{\text{IN}} < 25$ )			(14.8 < $V_{\text{IN}} < 30$ )			(18 < $V_{\text{IN}} < 30$ )			V
Output Noise Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , $f = 10\text{ Hz} - 100\text{ kHz}$			40			75			90	$\mu\text{V}$
Ripple Rejection	$f = 120\text{ Hz}$			78			71			69	V
Input Voltage Required to Maintain Line Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , $I_O = 500\text{ mA}$			7.2			14.5			17.6	V

Note 1: Thermal resistance without a heat sink for junction to case temperature is  $12^\circ\text{C/W}$  for the TO-202 package. Thermal resistance for junction to ambient temperature is  $70^\circ\text{C/W}$  for the TO-202 package.

## LM79MXX Series 3-Terminal Negative Regulators

### General Description

The LM79MXX series of 3-terminal regulators is available with fixed output voltages of -5V, -12V, and -15V. These devices need only one external component—a compensation capacitor at the output. The LM79MXX series is packaged in the TO-202 power package and TO-39 metal can and is capable of supplying 0.5A of output current.

These regulators employ internal current limiting safe area protection and thermal shutdown for protection against virtually all overload conditions.

Low ground pin current of the LM79MXX series allows output voltage to be easily boosted above the preset

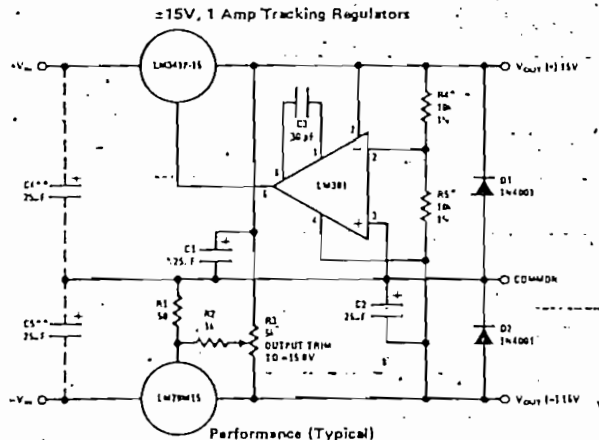
value with a resistor divider. The low quiescent current drain of these devices with a specified maximum change with line and load ensures good regulation in the voltage boosted mode.

For output voltage other than 5V, 12V and 15V the LM117 series provides an output voltage range from 1.2V to 57V.

### Features

- Thermal, short circuit and safe area protection
- High ripple rejection
- 0.5A output current
- 4% preset output voltage

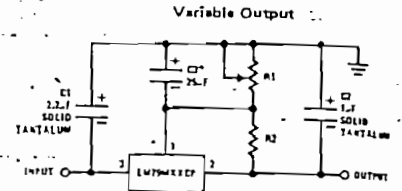
### Typical Applications



Performance (Typical)

	(-15)	(+15)
Load Regulation at 0.5A	40 mV	2 mV
Output Ripple, $C_{IN} = 3000\mu F, I_L = 0.5A$	100µVrms	100µVrms
Temperature Stability	50 mV	50 mV
Output Noise $10 Hz \leq f \leq 10 kHz$	150µVrms	150µVrms

\* Resistor tolerance of R4 and R5 determine matching of (+) and (-) outputs  
 \*\* Necessary only if raw supply filter capacitors are more than 3" from regulators

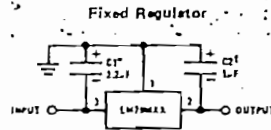


\* Improves transient response and ripple rejection. Do not increase beyond 50µF.

$$V_{OUT} = V_{SET} \left( \frac{R1 + R2}{R2} \right)$$

Select R2 as follows:

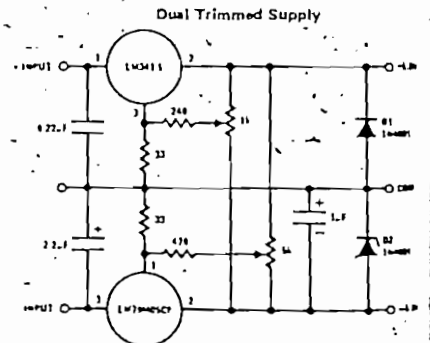
LM79M05CP	300Ω
LM79M12CP	750Ω
LM79M15CP	1k



\* Required if regulator is separated from filter capacitor by more than 3". For value given, capacitor must be solid tantalum, 25µF aluminum electrolytic may be substituted.

† Required for stability. For value given, capacitor must be solid tantalum, 25µF aluminum electrolytic may be substituted. Values given may be increased without limit.

For output capacitance in excess of 100µF, a high current diode from input to output (1N4001, etc.) will protect the regulator from momentary input shorts.



Maximum Ratings

Supply Voltage	25V
Supply Voltage (12V and 15V)	-35V
Input Differential	
Supply Voltage	25V
Supply Voltage (12V and 15V)	30V
Power Dissipation	Internally Limited
Junction Temperature Range	0°C to +125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Soldering Temperature (Soldering, 10 seconds)	230°C

Electrical Characteristics - Conditions unless otherwise noted: I<sub>OUT</sub> = 350 mA, C<sub>IN</sub> = 2.2μF, C<sub>OUT</sub> = 1μF, T<sub>J</sub> = 25°C

PARAMETER		LM79M05C	LM79M12C	LM79M15C	UNITS						
VOLTAGE (unless otherwise specified)		-5V	-12V	-15V							
VOLTAGE (unless otherwise specified)		-10V	-19V	-23V							
PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Output Voltage	T <sub>J</sub> = 25°C	-4.8	-5.0	-5.2	-11.5	-12.0	-12.5	-14.4	-15.0	-15.6	V
	5 mA < I <sub>OUT</sub> < 350 mA	-4.75	-	-5.25	-11.4	-	-12.6	-14.25	-	-15.75	V
Line Regulation	T <sub>J</sub> = 25°C, (Note 2)										
			8	50	5	80	5	80	mV		
		(-25 < V <sub>IN</sub> < -7)			(-30 < V <sub>IN</sub> < -14.5)			(- < V <sub>IN</sub> < -17.5)	V		
Load Regulation	T <sub>J</sub> = 25°C, (Note 2)										
			2	30	3	30	3	50	mV		
		(-18 < V <sub>IN</sub> < -8)			(-25 < V <sub>IN</sub> < -15)			(-28 < V <sub>IN</sub> < -18)	V		
Load Regulation	T <sub>J</sub> = 25°C, (Note 2)										
Quiescent Current	5 mA < I <sub>OUT</sub> < 0.5A			30	100	30	240	30	240	mV	
Quiescent Current Change	T <sub>J</sub> = 25°C			1	2	1.5	3	1.5	3	mA	
	With Line			0.4		0.4		0.4		mA	
Quiescent Current Change	With Load, 5 mA < I <sub>OUT</sub> < 350 mA			0.4		0.4		0.4		V	
	5 mA < I <sub>OUT</sub> < 350 mA			0.4		0.4		0.4		mA	
Output Noise Voltage	T <sub>A</sub> = 25°C, 10 Hz < f < 100 Hz			750		400		400		μV	
Rejection	f = 120 Hz	54	66		54	70		54	70	dB	
Dropout Voltage	T <sub>J</sub> = 25°C, I <sub>OUT</sub> = 0.5A										
		(-18 < V <sub>IN</sub> < -8)			(-25 < V <sub>IN</sub> < -15)			(-30 < V <sub>IN</sub> < -17.5)		V	
Dropout Voltage	T <sub>J</sub> = 25°C, I <sub>OUT</sub> = 0.5A			1.1		1.1		1.1		V	
Quiescent Current	T <sub>J</sub> = 25°C			800		800		800		mA	
Temperature Coefficient of Output Voltage	I <sub>OUT</sub> = 5 mA, 0°C < T <sub>J</sub> < 100°C			0.4		-0.8		-1.0		mV/°C	

1. For calculations of junction temperature rise due to power dissipation, thermal resistance junction to ambient (θ<sub>JA</sub>) is 70°C/W (no heat sink) and 12°C/W (infinite heat sink).

2. Regulation is measured at a constant junction temperature by pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to thermal effects must be taken into account.



**National Semiconductor**

## Operational Amplifiers/Buffers

### LM741/LM741A/LM741C/LM741E Operational Amplifier

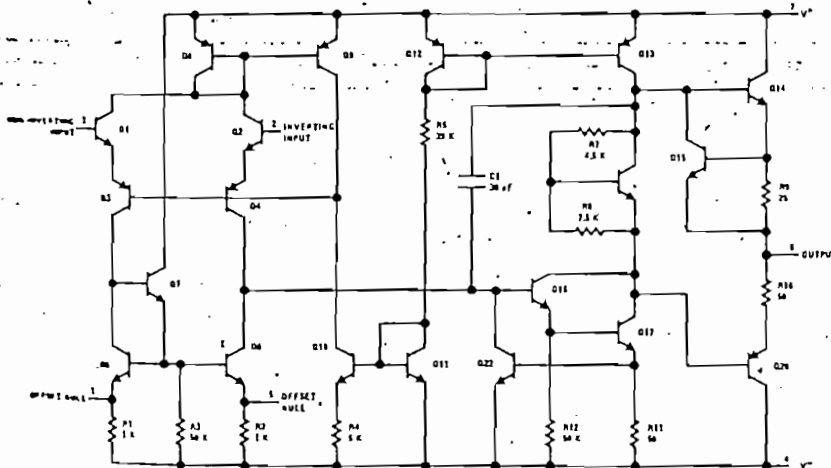
#### General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1459 and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

#### Schematic and Connection Diagrams (Top Views)

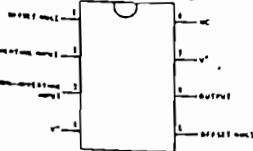


Metal Can Package



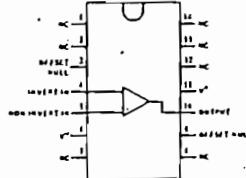
Order Number LM741H, LM741AH,  
LM741CH or LM741EH  
See NS Package H08C

Dual-In-Line Package



Order Number LM741CN or LM741EN  
See NS Package N08B  
Order Number LM741CJ  
See NS Package J08A

Dual-In-Line Package



Order Number LM741CN-14  
See NS Package N14A  
Order Number LM741J-14, LM741AJ-14  
or LM741CJ-14  
See NS Package J14A

LM741/LM741A/LM741C/LM741E

3



LM741/LM741A/LM741C/LM741

Absolute Maximum Ratings

	LM741A	LM741E	LM741	LM741C
Supply Voltage	±22V	±22V	±22V	±18V
Power Dissipation (Note 1)	500 mW	500 mW	500 mW	500 mW
Differential Input Voltage	±30V	±30V	±30V	±30V
Input Voltage (Note 2)	±15V	±15V	±15V	±15V
Output Short Circuit Duration	Indefinite	Indefinite	Indefinite	Indefinite
Operating Temperature Range	-55°C to +125°C	0°C to +70°C	-55°C to +125°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	300°C	300°C	300°C	300°C

Electrical Characteristics (Note 3)

PARAMETER	CONDITIONS	LM741A/LM741E			LM741			LM741C		
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$									
	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$					1.0	5.0		2.0	6.0
	$R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0						
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$									
	$R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5
Average Input Offset Voltage Drift			15 <sup>1</sup>							
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$	±10			±15			±15		
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30		20	200		20	200
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70		85	500			300
Average Input Offset Current Drift				0.5						
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80		80	500		80	500
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210			1.5			0.1
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0	
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}, V_S = \pm 20\text{V}$									
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							±12	±13	
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$									
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}, R_L \geq 2\text{ k}\Omega$									
	$V_S = \pm 20\text{V}, V_O = \pm 15\text{V}$		50							
	$V_S = \pm 15\text{V}, V_O = \pm 10\text{V}$					50	200		20	200
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}, R_L \geq 2\text{ k}\Omega,$ $V_S = \pm 20\text{V}, V_O = \pm 15\text{V}$									
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20\text{V}, R_L \geq 10\text{ k}\Omega$									
	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$									
	$V_S = \pm 15\text{V}, R_L \geq 10\text{ k}\Omega$									
	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$									
Output Short Circuit Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$	10	25	35			25			25
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	10		40						
Common-Mode Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}, R_S \leq 10\text{ k}\Omega, V_{CM} = \pm 12\text{V}$ $R_S \leq 50\text{ k}\Omega, V_{CM} = \pm 12\text{V}$					70	90		70	90

Electrical Characteristics (Continued)

PARAMETER	CONDITIONS	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Voltage Rejection	$T_A \leq T_A \leq T_{A \text{MAX}}$ $V_S = \pm 20V$ to $V_S = \pm 15V$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10k\Omega$	88	96		77	96		77	96		dB
Response Time	$T_A = 25^\circ C$ , Unity Gain		0.25	0.8		0.3			0.3		$\mu s$
Gain	$T_A = 25^\circ C$		6.0	20		5			5		%
Gain (Note 4)	$T_A = 25^\circ C$	0.437	1.5								MHz
Gain	$T_A = 25^\circ C$ , Unity Gain	0.3	0.7			0.5			0.5		V/ $\mu s$
Current	$T_A = 25^\circ C$					1.7	2.8		1.7	2.8	mA
Consumption	$T_A = 25^\circ C$										mW
	$V_S = \pm 20V$		80	150							mW
	$V_S = \pm 15V$					50	85		50	85	mW
	$V_S = \pm 20V$										mW
	$T_A = T_{A \text{MIN}}$			185							mW
	$T_A = T_{A \text{MAX}}$			135							mW
	$V_S = \pm 20V$			150							mW
	$T_A = T_{A \text{MIN}}$			150							mW
	$T_A = T_{A \text{MAX}}$			150							mW
	$V_S = \pm 15V$										mW
	$T_A = T_{A \text{MIN}}$					60	100				mW
	$T_A = T_{A \text{MAX}}$					45	75				mW

LM741/LM741A/LM741C/LM741E

3

1. The maximum junction temperature of the LM741/LM741A is 150°C, while that of the LM741C/LM741E is 100°C. For operation at temperatures, devices in the TO-5 package must be derated based on a thermal resistance of 150°C/W junction to ambient, or 45°C/W to case. The thermal resistance of the dual-in-line package is 100°C/W junction to ambient.

2. For supply voltages less than ±15V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

3. Unless otherwise specified, these specifications apply for  $V_S = \pm 15V$ ,  $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$  (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to  $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$ .

4. Calculated value from: BW (MHz) = 0.35/Rise Time ( $\mu s$ ).



## LM1558/LM1458 Dual Operational Amplifier

### General Description

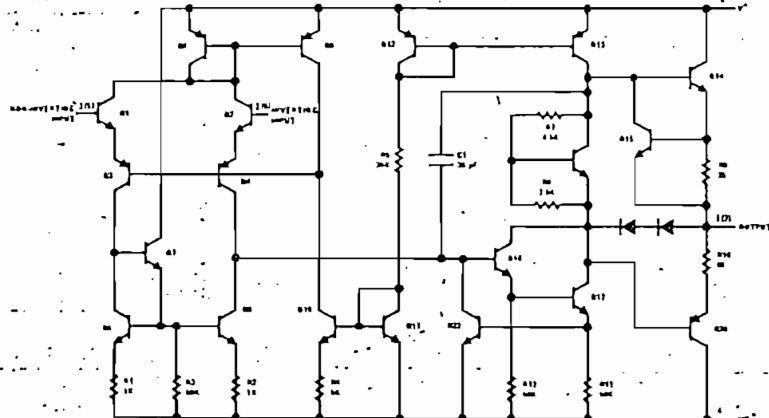
The LM1558 and the LM1458 are general purpose dual operational amplifiers. The two amplifiers share a common bias network and power supply leads. Otherwise, their operation is completely independent. Features include:

- No frequency compensation required
- Short-circuit protection
- Wide common-mode and differential voltage ranges

- Low-power consumption
- 8-lead TO-5 and 8-lead mini DIP
- No latch up when input common mode range is exceeded

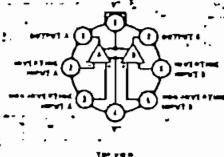
The LM1458 is identical to the LM1558 except that the LM1458 has its specifications guaranteed over the temperature range from 0°C to 70°C instead of -55°C to +125°C.

### Schematic and Connection Diagrams



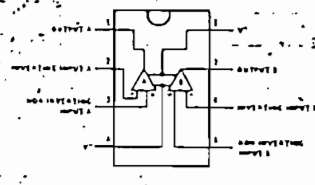
Note: Numbers in parentheses are pin numbers for amplifier B.

Metal Can Package



Order Number LM1558H  
or LM1458H  
See NS Package H08C

Dual-In-Line Package



Order Number LM1558J  
or LM1458J  
See NS Package J08A

Order Number LM1458N  
See NS Package N08B

### Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage LM1558	±22V	Output Short-Circuit Duration	Indefinite
LM1458	±18V	Operating Temperature Range LM1558	-55°C to 125°C
Power Dissipation (Note 1) LM1558H/LM1458H	500 mW	LM1458	0°C to 70°C
LM1458N	400 mW	Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Differential Input Voltage	±30V	Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	300°C
Input Voltage (Note 2)	±15V		

### Electrical Characteristics (Note 3)

PARAMETER	CONDITIONS	LM1558			LM1458			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}, R_S \leq 10\text{ k}\Omega$		1.0	5.0		1.0	6.0	mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		80	200		80	200	nA
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		200	500		200	500	nA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.3	1.0		0.3	1.0		M $\Omega$
Supply Current Both Amplifiers	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 15\text{V}$		3.0	5.0		3.0	5.6	mA
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 15\text{V}$ $V_{OUT} = \pm 10\text{V}, R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	50	160		20	160		V/mV
Input Offset Voltage	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			6.0			7.5	mV
Input Offset Current				500			300	nA
Input Bias Current				1.5			0.8	$\mu\text{A}$
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 15\text{V}, V_{OUT} = \pm 10\text{V}$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25			15			V/mV
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 15\text{V}, R_L = 10\text{ k}\Omega$ $R_L = 2\text{ k}\Omega$	±12 ±10	±14 ±13		±12 ±10	±14 ±13		V V
Input Voltage Range	$V_S = \pm 15\text{V}$	±12			±12			V
Common Mode Rejection Ratio	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	70	90		70	90		dB
Supply Voltage Rejection Ratio	$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	77	96		77	96		dB

Note 1: The maximum junction temperature of the LM1558 is 150°C, while that of the LM1458 is 100°C. For operating at elevated temperatures, devices in the TO-5 package must be derated based on a thermal resistance of 150°C/W, junction to ambient or 45°C/W, junction to case. For the DIP the device must be derated based on a thermal resistance of 187°C/W, junction to ambient.

Note 2: For supply voltages less than ±15V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Note 3: These specifications apply for  $V_S = \pm 15\text{V}$  and  $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq 125^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified. With the LM1458, however, all specifications are limited to  $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 70^\circ\text{C}$  and  $V_S = \pm 15\text{V}$ .



## LM2907, LM2917 Frequency to Voltage Converter

### General Description

The LM2907, LM2917 series are monolithic frequency to voltage converters with a high gain op amp/comparator designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low ripple, full input protection in two versions (LM2907-8, LM2917-8) and its output swings to ground for a zero frequency input.

### Advantages

- Output swings to ground for zero frequency input
- Easy to use;  $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$
- Only one RC network provides frequency doubling
- Zener regulator on chip allows accurate and stable frequency to voltage or current conversion. (LM2917)

### Features

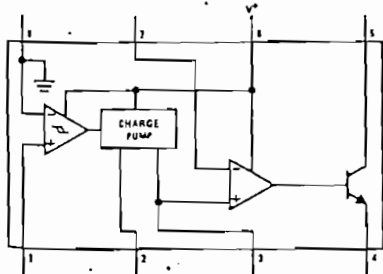
- Ground referenced tachometer input interfaces directly with variable reluctance magnetic pickups
- Op amp/comparator has floating transistor output
- 50 mA sink or source to operate relays, solenoids, meters, or LEDs

- Frequency doubling for low ripple
- Tachometer has built-in hysteresis with either differential input or ground referenced input
- Built-in zener on LM2917
- $\pm 0.3\%$  linearity typical
- Ground referenced tachometer is fully protected from damage due to swings above  $V_{CC}$  and below ground

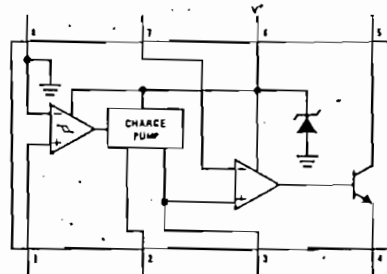
### Applications

- Over/under speed sensing
- Frequency to voltage conversion (tachometer)
- Speedometers
- Breaker point dwell meters
- Hand-held tachometer
- Speed governors.
- Cruise control
- Automotive door lock control
- Clutch control
- Horn control
- Touch or sound switches

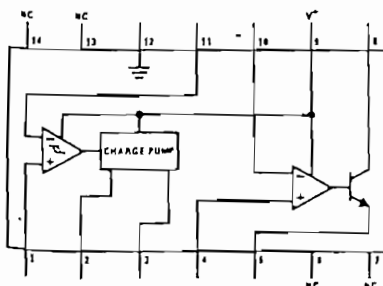
### Block and Connection Diagrams Dual-In-Line Packages, Top Views



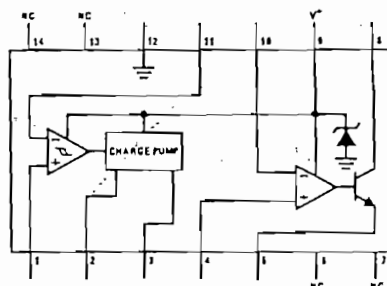
Order Number LM2907N-8  
See NS Package N08B



Order Number LM2917N-8  
See NS Package N08B



Order Number LM2907J  
See NS Package J14A  
Order Number LM2907N  
See NS Package N14A



Order Number LM2917J  
See NS Package J14A  
Order Number LM2917N  
See NS Package N14A

## Absolute Maximum Ratings (Note 1)

Supply Voltage	28V
Supply Current (Zener Options)	25 mA
Collector Voltage	28V
Differential Input Voltage	
Tachometer	28V
Op Amp/Comparator	28V

Input Voltage Range	
Tachometer	LM2907-8, LM2917-8
LM2907, LM2917	
Op Amp/Comparator	
Power Dissipation	
Operating Temperature Range	
Storage Temperature Range	
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	

0.0V  
0.0V  
-65°C  
-65°C

Electrical Characteristics  $V_{CC} = 12V_{DC}$ ,  $T_A = 25^\circ C$ , see test circuit

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX
<b>TACHOMETER</b>				
Input Thresholds	$V_{IN} = 250 \text{ mV}_{p-p} @ 1 \text{ kHz}$ (Note 2)	$\pm 10$	$\pm 15$	$\pm 40$
Hysteresis	$V_{IN} = 250 \text{ mV}_{p-p} @ 1 \text{ kHz}$ (Note 2)		30	
Offset Voltage	$V_{IN} = 250 \text{ mV}_{p-p} @ 1 \text{ kHz}$ (Note 2)			
LM2907/LM2917			3.5	10
LM2907-8/LM2917-8			5	15
Input Bias Current	$V_{IN} = \pm 50 \text{ mV}_{DC}$		0.1	1
$V_{OH}$	$V_{IN} = +125 \text{ mV}_{DC}$ (Note 3)		8.3	
Pin 2				
$V_{OL}$	$V_{IN} = -125 \text{ mV}_{DC}$ (Note 3)		2.3	
Output Current; $I_2, I_3$	$V_2 = V_3 = 6.0V$ (Note 4)	140	180	240
Leakage Current; $I_3$	$I_2 = 0, V_3 = 0$			0.1
Gain Constant, K	(Note 3)	0.9	1.0	1.1
Linearity	$f_{IN} = 1 \text{ kHz}, 5 \text{ kHz}, 10 \text{ kHz}$ , (Note 5)	-1.0	0.3	$\pm 1.0$
<b>OP/AMP COMPARATOR</b>				
$V_{OS}$	$V_{IN} = 6.0V$		3	10
$I_{BIAS}$	$V_{IN} = 6.0V$		50	500
Input Common-Mode Voltage		0		$V_{CC} - 1.5V$
Voltage Gain			200	
Output Sink Current	$V_C = 1.0$	40	50	
Output Source Current	$V_E = V_{CC} - 2.0$		10	
Saturation Voltage	$I_{SINK} = 5 \text{ mA}$		0.1	0.5
	$I_{SINK} = 20 \text{ mA}$			1.0
	$I_{SINK} = 50 \text{ mA}$		1.0	1.5
<b>ZENER REGULATOR</b>				
Regulator Voltage	$R_{DROP} = 470\Omega$		7.56	
Series Resistance			10.5	15
Temperature Stability			+1	
<b>TOTAL SUPPLY CURRENT</b>			3.8	6

Note 1: For operation in ambient temperatures above  $25^\circ C$ , the device must be derated based on a  $150^\circ C$  maximum junction temperature and a thermal resistance of  $175^\circ C/W$  junction to ambient for package 22 and 16 or a thermal resistance of  $187^\circ C/W$  junction to ambient for package 8.

Note 2: Hysteresis is the sum  $+V_{TH} - (-V_{TH})$ , offset voltage is their difference. See test circuit.

Note 3:  $V_{OH}$  is equal to  $3/4 \times V_{CC} - 1 V_{BE}$ .  $V_{OL}$  is equal to  $1/4 \times V_{CC} - 1 V_{BE}$  therefore  $V_{OH} - V_{OL} = V_{CC}/2$ . The difference,  $V_{OH} - V_{OL}$ , and the mirror gain,  $I_2/I_3$ , are the two factors that cause the tachometer gain constant to vary from 1.0.

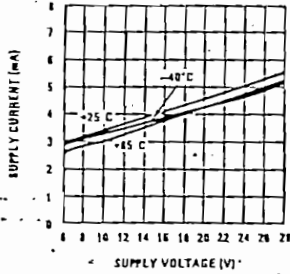
Note 4: Be sure when choosing the time constant  $R1 \times C1$  that  $R1$  is such that the maximum anticipated output voltage at pin 3 can be reached with  $I_3 \times R1$ . The maximum value for  $R1$  is limited by the output resistance of pin 3 which is greater than  $10 \text{ M}\Omega$  typically.

Note 5: Nonlinearity is defined as the deviation of  $V_{out}$  (@ pin 3) for  $f_{IN} = 5 \text{ kHz}$  from a straight line defined by the  $V_{OUT}$  @  $1 \text{ kHz}$  and  $V_{OUT}$  @  $10 \text{ kHz}$ .  $C1 = 1000 \text{ pF}$ ,  $R1 = 68k$  and  $C2 = 0.22 \text{ mFd}$ .

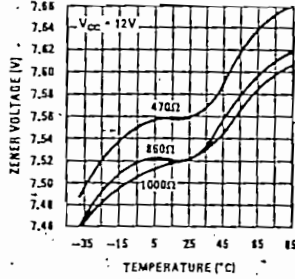
Performance Characteristics

LM2907, LM2917

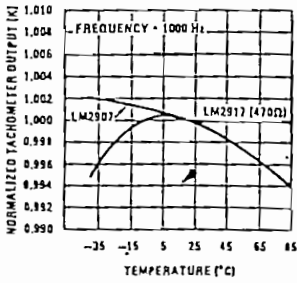
Total Supply Current



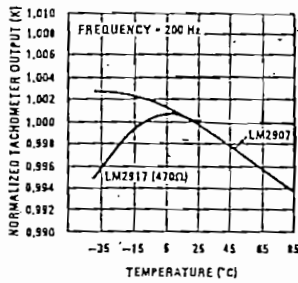
Zener Voltage vs Temperature



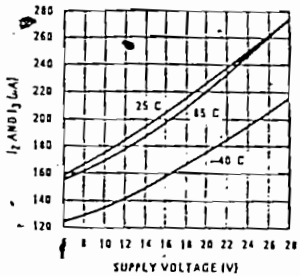
Normalized Tachometer Output vs Temperature



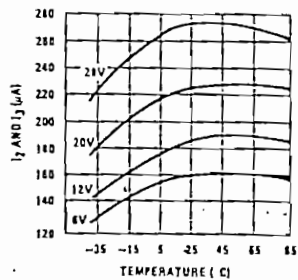
Normalized Tachometer Output vs Temperature



Tachometer Currents  $I_2$  and  $I_3$  vs Supply Voltage

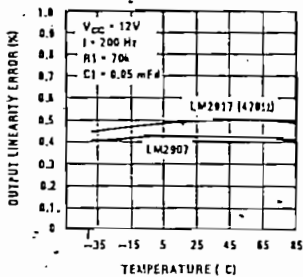


Tachometer Currents  $I_2$  and  $I_3$  vs Temperature

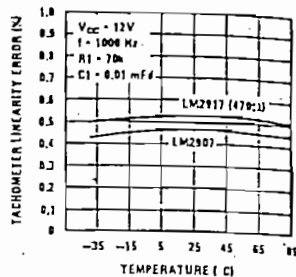


Typical Performance Characteristics (Continued)

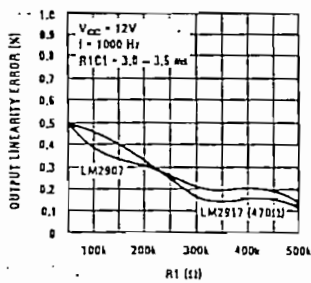
Tachometer Linearity vs Temperature



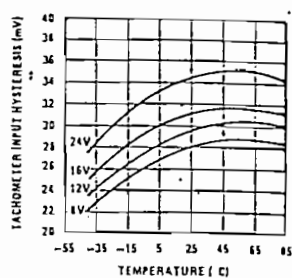
Tachometer Linearity vs Temperature



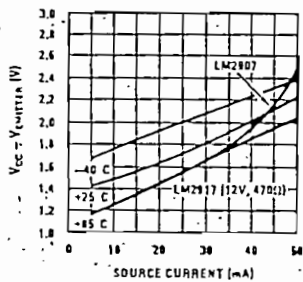
Tachometer Linearity vs R1



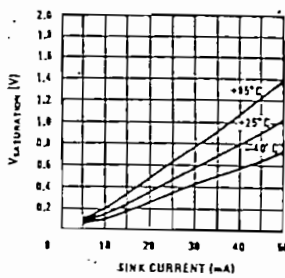
Tachometer Input Hysteresis vs Temperature



Op Amp Output Transistor Characteristics



Op Amp Output Transistor Characteristics



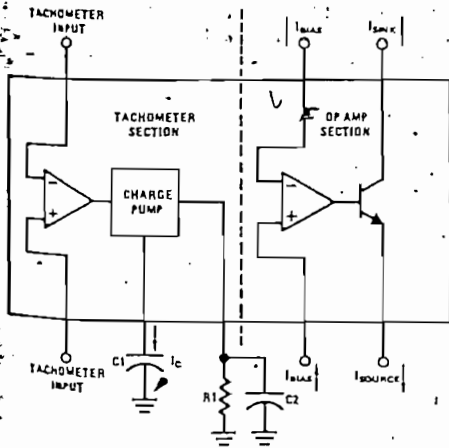


General Description (Continued)

The op amp/comparator is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. The feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above  $V_{CC}$  up to a maximum  $V_{CE}$  of 28V.

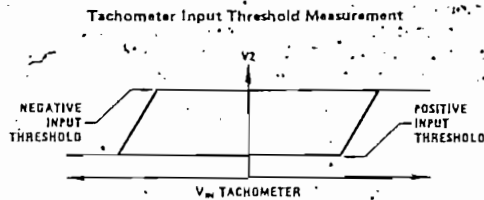
The two basic configurations offered include an 8-pin device with a ground referenced tachometer input and an internal connection between the tachometer output and the op amp non-inverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency to voltage conversion applications.

Test Circuit and Waveform



The more versatile configurations provide differential tachometer input and uncommitted op amp inputs. With this version the tachometer input may be floated and the op amp becomes suitable for active filter conditioning of the tachometer output.

Both of these configurations are available with an active shunt regulator connected across the power leads. The regulator clamps the supply such that stable frequency to voltage and frequency to current operations are possible with any supply voltage and a suitable resistor.



Applications Information

The LM2907 series of tachometer circuits is designed for minimum external part count applications and maximum versatility. In order to fully exploit its features and advantages let's examine its theory of operation. The first stage of operation is a differential amplifier driving a positive feedback flip-flop circuit. The input threshold voltage is the amount of differential input voltage at which the output of this stage changes state. Two options (LM2907-8, LM2917-8) have one input internally grounded so that an input signal must swing above and below ground and exceed the input thresholds to produce an output. This is offered specifically for magnetic variable reluctance pickups which typically provide a single-ended ac output. This single input is also fully protected against voltage swings to  $\pm 28V$ , which are easily attained with the types of pickups.

The differential input options (LM2907, LM2917) give the user the option of setting his own input switching level and still have the hysteresis around that level for excellent noise rejection in any application. Of course in order to allow the inputs to attain common-mode voltages above ground, input protection is removed

and neither input should be taken outside the limits of the supply voltage being used. It is very important that an input not go below ground without some resistance in its lead to limit the current that will then flow in the epi-substrate diode.

Following the input stage is the charge pump where the input frequency is converted to a dc voltage. To do this requires one timing capacitor, one output resistor, and an integrating or filter capacitor. When the input stage changes state (due to a suitable zero crossing or differential voltage on the input) the timing capacitor is either charged or discharged linearly between two voltages whose difference is  $V_{CC}/2$ . Then in one half cycle of the input frequency or a time equal to  $1/2 f_{IN}$  the change in charge on the timing capacitor is equal to  $V_{CC}/2 \times C1$ . The average amount of current pumped into or out of the capacitor, then is:

$$\frac{\Delta Q}{T} = i_{c(AVG)} = C1 \times \frac{V_{CC}}{2} \times (2f_{IN}) = V_{CC} \times f_{IN} \times C1$$

The output circuit mirrors this current very accurately into the load resistor R1, connected to ground, such that if the pulses of current are integrated with a filter

Applications Information (Continued)  
 capacitor, then,  $V_o = i_c \times R1$ , and the total conversion equation becomes:

$$V_o = V_{CC} \times f_{IN} \times C1 \times R1 \times K$$

Where K is the gain constant—typically 1.0.

The size of C2 is dependent only on the amount of ripple voltage allowable and the required response time.

CHOOSING R1 AND C1

There are some limitations on the choice of R1 and C1 which should be considered for optimum performance. The timing capacitor also provides internal compensation for the charge pump and should be kept larger than 100 pF for very accurate operation. Smaller values can cause an error current on R1, especially at low temperatures. Several considerations must be met when choosing R1. The output current at pin 3 is internally fixed and therefore  $V_o/R1$  must be less than or equal to this value. If R1 is too large, it can become a significant fraction of the output impedance at pin 3 which degrades linearity. Also output ripple voltage must be considered and the size of C2 is affected by R1. An expression that describes the ripple content on pin 3 for a single R1C2 combination is:

$$V_{RIPPLE} = \frac{V_{CC}}{2} \times \frac{C1}{C2} \times \left( 1 - \frac{V_{CC} \times f_{IN} \times C1}{I_2 \times R1} \right) \text{pk-pk}$$

It appears R1 can be chosen independent of ripple,

however response time, or the time it takes  $V_{OUT}$  to stabilize at a new voltage increases as the size of C2 increases so a compromise between ripple, response time, and linearity must be chosen carefully.

As a final consideration, the maximum attainable output frequency is determined by  $V_{CC}$ , C1, and  $I_2$ :

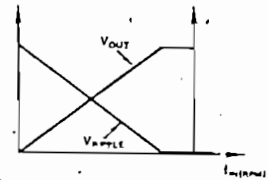
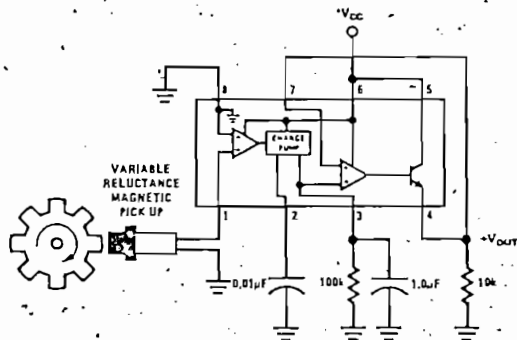
$$f_{MAX} = \frac{I_2}{C1 \times V_{CC}}$$

USING ZENER REGULATED OPTIONS (LM2917)

For those applications where an output voltage current must be obtained independent of supply voltage variations, the LM2917 is offered. The most important consideration in choosing a dropping resistor from the unregulated supply to the device is that the tachometer and op amp circuitry alone require about 3 mA at the voltage level provided by the zener. At low supply voltages there must be some current flowing in resistor above the 3 mA circuit current to operate the regulator. As an example, if the raw supply varies from 9 to 16V, a resistance of 470Ω will minimize the zener voltage variation to 160 mV. If the resistance goes under 400Ω or over 600Ω the zener variation quickly rises above 200 mV for the same input variation.

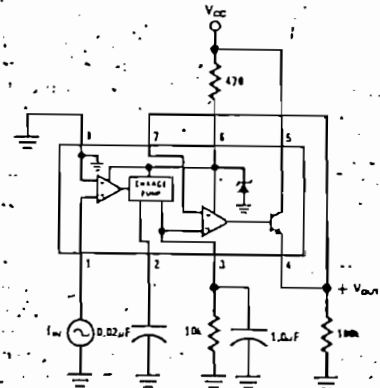
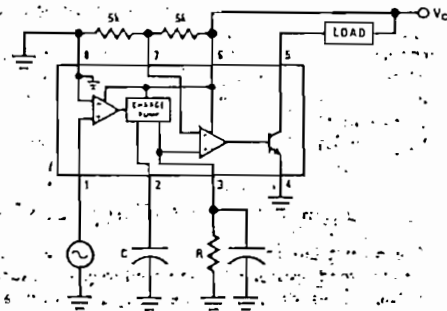
Typical Applications

Minimum Component Tachometer

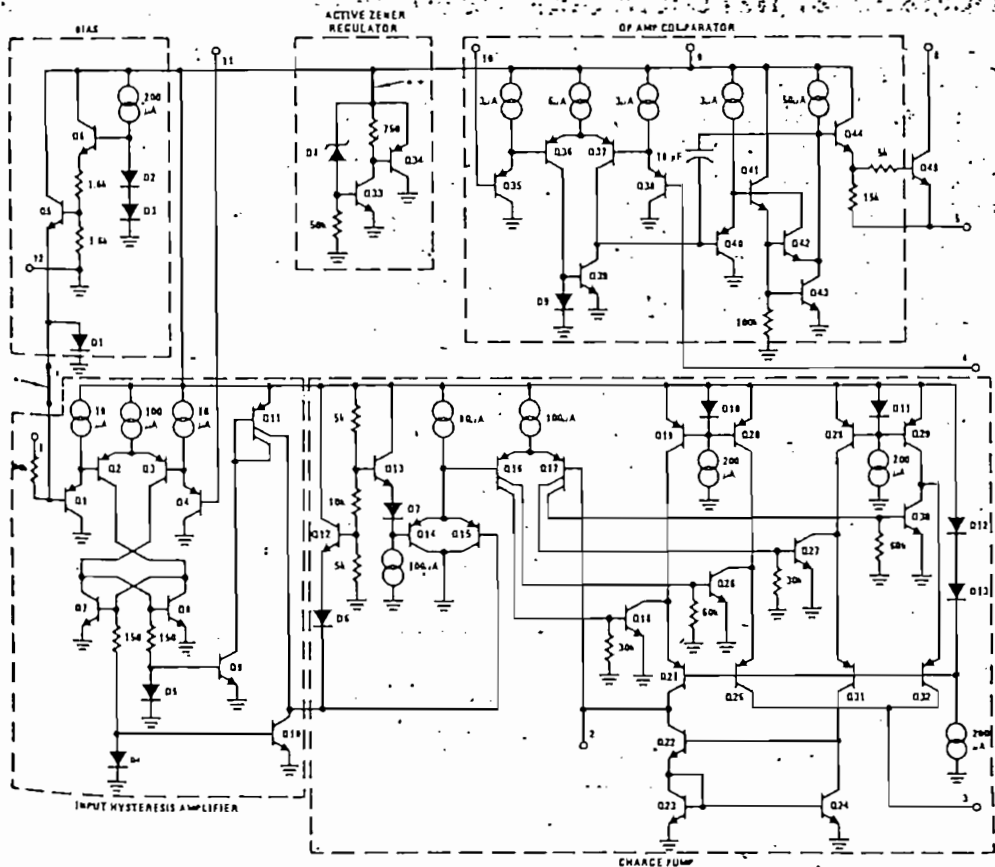


Zener Regulated Frequency to Voltage Converter

"Speed Switch" Load is Energized When  $f_{IN} \geq \frac{1}{2RC}$



Equivalent Schematic Diagram



WHEEL NO 2  
 WHEEL SPEED  
 to the lower  
 speeds.

V<sub>out</sub>  
 WHEEL NO 2  
 WHEEL SPEED  
 to the higher  
 speeds.

- Note: This connection made on LM2907-8 and LM2917-8 only.
- Note: This connection made on LM2917 and LM2917-8 only.

# ICL7106/7107 3 1/2-Digit Single Chip A/D Converter

**PARTS LIST**

PART	ICL7106 EV/KIT	ICL7107 EV/KIT	ICL7106 EV/KIT	ICL7107 EV/KIT	FUNCTION
IC1	ICL7106CPL	ICL7107CJL	7106CPL	7107CJL	A/D Converter
C1	0.1µF, Mylar	0.1µF, Mylar	0.1µF, Mylar	0.1µF, Mylar	Reference Capacitor
C2	0.47µF, Mylar	0.47µF, Mylar	0.1µF, Mylar	0.1µF, Mylar	Auto-Zero Capacitor
C3	0.22µF, Polypropylene	0.22µF, Polypropylene	0.047µF, Polypropylene	0.047µF, Polypropylene	Integrating Capacitor
C4	100µF, Mica	100µF, Mica	50µF, Mica	50µF, Mica	Oscillator Capacitor
C5	0.01µF, Mylar	0.01µF, Mylar	0.01µF, Mylar	0.01µF, Mylar	Input Filter
R1	24kΩ	24kΩ	20kΩ	20kΩ	Reference Divider
R2	47kΩ	47kΩ	180kΩ	180kΩ	Integrating Resistor
R3	100kΩ	100kΩ	180kΩ	180kΩ	Oscillator Resistor
R4	1kΩ Pot	1kΩ Pot	90kΩ Pot	90kΩ Pot	Reference Adjust.
R5	1MΩ	1MΩ	1MΩ	1MΩ	Input Filter
—	3 1/2-Digit LCD	3 of 7-Segment LED	3 1/2-Digit LCD	3 1/2-Digit LCD	Display
—	Battery Clip	1 of ±1 LED Display	Battery Clip	Battery Clip	Input Connectors
—	2 Banana Jacks	2 Banana Jacks	2 Banana Jacks	2 Banana Jacks	Test Points, etc.
—	5 Test Pins	8 Test Pins	5 Test Pins	5 Test Pins	

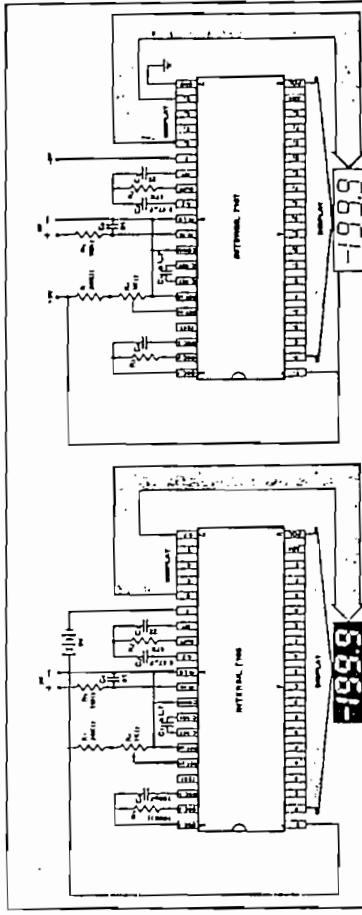
**FEATURES**

- Guaranteed zero reading for 0 volts input on all scales.
- True polarity at zero for precise null detection.
- 1 µA typical input current.
- True differential input and reference.
- Direct display drive - no external components required. — LCD ICL7106 — LED ICL7107
- Low noise - less than 15µV P-P.
- On-chip clock and reference.
- Low power dissipation - typically less than 10mW.
- No additional active circuits required.
- Evaluation Kit available.

**GENERAL DESCRIPTION**

The Intersil ICL7106 and 7107 are high performance, low power 3 1/2-digit A/D converters containing all the necessary active devices on a single CMOS IC. Included are seven-segment decoders, display drivers, reference, and a clock. The 7106 is designed to interface with a liquid crystal display (LCD) and includes a backplane drive; the 7107 will directly drive an instrument-size light emitting diode (LED) display.

The 7106 and 7107 bring together an unprecedented combination of high accuracy, versatility, and true economy. High accuracy like auto-zero to less than 10µV, zero drift of less than 1µV/°C, input bias current of 10 pA max., and roll-over error of less than one count. The versatility of true differential input and reference is useful in all systems, but gives the designer an uncommon advantage when measuring load cells, strain gauges and other bridge-type transducers. And finally the true economy of single power supply operation (7106), enabling a high performance panel meter to be built with the addition of only 7 passive components and a display.



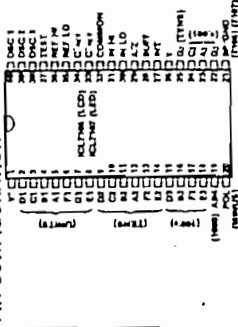
ICL7106 with Liquid Crystal Display

ICL7107 with LED Display

**ORDERING INFORMATION**

Part	Package	Temp. Range	Order Part #
7106	40 pin ceramic DIP	0°C to +70°C	ICL7106CDL
7106	40 pin plastic DIP	0°C to +70°C	ICL7106CPL
7106	40 pin CERDIP	0°C to +70°C	ICL7106CJL
7107	40 pin CERDIP	0°C to +70°C	ICL7107CJL
7107	40 pin ceramic DIP	0°C to +70°C	ICL7107CDL
7107	40 pin plastic DIP	0°C to +70°C	ICL7107CPL
7106 Kit	Evaluation Kits contain IC, display, circuit board, passive components and hardware.		ICL7106EVKIT
7107 Kit			ICL7107EVKIT

**PIN CONFIGURATION**



ICL7106/ICL7107  
TEST CIRCUITS

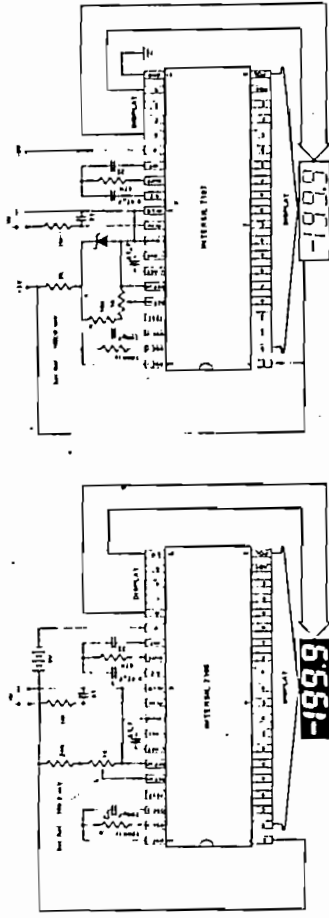


Figure 1: 7106

Figure 2: 7107

DETAILED DESCRIPTION  
ANALOG SECTION

Figure 3 shows the Block Diagram of the Analog Section for the ICL7106 and 7107. Each measurement cycle is divided

into three phases. They are (1) auto-zero (A-Z), (2) signal integrate (INT) and (3) de-integrate (DE).

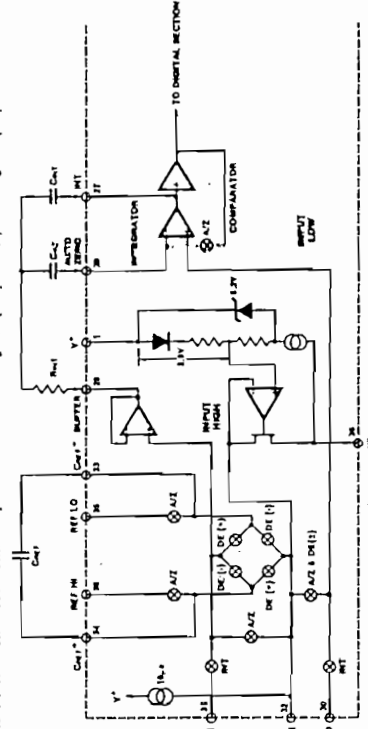


Figure 3: Analog Section of 7106/7107

1. Auto-zero phase

During auto-zero three things happen. First, Input High and Low are disconnected from the pins and internally shorted to analog COMMON. Second, the reference capacitor is charged to the reference voltage. Third, a feedback loop is closed around the system to charge the auto-zero capacitor, C<sub>AZ</sub>, to compensate for offset voltages in the buffer amplifier, integrator, and comparator. Since the comparator is included in the loop, the A-Z accuracy is limited only by the noise of the system. In any case, the offset referred to the input is less than 10 $\mu$ V.

IN LO for a fixed time. This differential voltage can be within a wide common mode range, within one volt of either supply. If, on the other hand, the input signal has no return with respect to the converter power supply, IN LO can be tied to analog COMMON to establish the correct common-mode voltage. At the end of this phase, the polarity of the integrated signal is determined.

3. De-integrate phase

The final phase is de-integrate, or reference integrate. Input Low is internally connected to analog COMMON and Input High is connected across the previously charged reference capacitor. Circuitry within the chip ensures that the capacitor will be connected with the correct polarity to cause the integrator output to return to zero. The time required for the output to return to zero is proportional to the input signal. Specifically the digital reading displayed is 1000  $\frac{V_{IN}}{V_{REF}}$ .

2. Signal Integrate phase

During signal integrate, the auto-zero loop is opened, the internal short is removed, and the internal input high and low are connected to the external pins. The converter then integrates the differential voltage between IN HI and

ICL7106/ICL7107  
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	15V
ICL7106, V <sup>+</sup> to V <sup>-</sup>	1000mW
ICL7107, V <sup>+</sup> to GND	800mW
ICL7107, V <sup>-</sup> to GND	1000mW
ICL7107, V <sup>+</sup> to V <sup>-</sup>	1000mW
Operating Temp	0°C to +70°C
Storage Temp	-65°C to +160°C
Lead Temperature (soldering, 60 sec)	300°C

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Note 1: Input voltages may exceed the supply voltages provided the input current is limited to  $\pm 100\mu$ A.

Note 2: Dissipation rating assumes device is mounted with all leads soldered to printed circuit board.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Note 3)

CHARACTERISTICS	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Zero Input Reading	V <sub>IN</sub> = 0.0V Full Scale = 200.0mV	-000.0	$\pm 000.0$	+000.0	Digital Reading
Ratiometric Reading	V <sub>IN</sub> = V <sub>REF</sub> V <sub>REF</sub> = 100mV	999	999/1000	1000	Digital Reading
Rollover Error (Difference in reading for equal positive and negative reading near Full Scale)	-V <sub>IN</sub> = +V <sub>IN</sub> = 200.0mV	-1	$\pm 2$	+1	Counts
Linearity (Max. deviation from best straight line fit)	Full scale = 200mV or full scale = 2.000V	-1	$\pm 2$	+1	Counts
Common Mode Rejection Ratio (Note 4)	V <sub>CM</sub> = $\pm 1$ V, V <sub>IN</sub> = 0V, Full Scale = 200.0mV		50		$\mu$ V/V
Noise (PK-PK value not exceeded 95% of time)	V <sub>IN</sub> = 0V Full Scale = 200.0mV		15		$\mu$ V
Input Leakage Current	V <sub>IN</sub> = 0		1	10	pA
Zero Reading Drift	V <sub>IN</sub> = 0 0° < T <sub>A</sub> < 70°C		0.2	1	$\mu$ V/°C
Scale Factor Temperature Coefficient	V <sub>IN</sub> = 199.0mV 0° < T <sub>A</sub> < 70°C (Ext. Ref. 0ppm/°C)		1	5	ppm/°C
V <sup>+</sup> Supply Current (Does not include LED current for 7107)	V <sub>IN</sub> = 0		0.8	1.8	mA
V <sup>-</sup> Supply Current (7107 only)	V <sub>IN</sub> = 0		0.6	1.8	mA
Analog Common Voltage (With respect to Pos. Supply)	25k $\Omega$ between Common & Pos. Supply	2.4	2.8	3.2	V
Temp. Coeff. of Analog Common (With respect to Pos. Supply)	25k $\Omega$ between Common & Pos. Supply		80		ppm/°C
7106 ONLY PK-PK Segment Drive Voltage, PK-PK Backplane Drive Voltage (Note 5)	V <sup>+</sup> to V <sup>-</sup> = 8V	4	5	6	V
7107 ONLY Segment Sinking Current (Except Pin 19) (Pin 19 only)	V <sup>+</sup> = 5.0V Segment voltage = 3V	5	8.0	16	mA

Note 3: Unless otherwise noted, specifications apply to both the 7106 and 7107 at T<sub>A</sub> = 25°C, V<sub>CE(sat)</sub> = 48k $\Omega$ . 7106 is tested in the circuit of Figure 1. 7107 is tested in the circuit of Figure 2.

Note 4: Refer to "Differential Input" discussion.

Note 5: Back plane drives in phase with segment driver for 'off' segment, 180° out of phase for 'on' segment. Frequency is 20 times conversion rate. Average DC component is less than 50mV.



# ICL7106/ICL7107

DISPLAY FONT

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

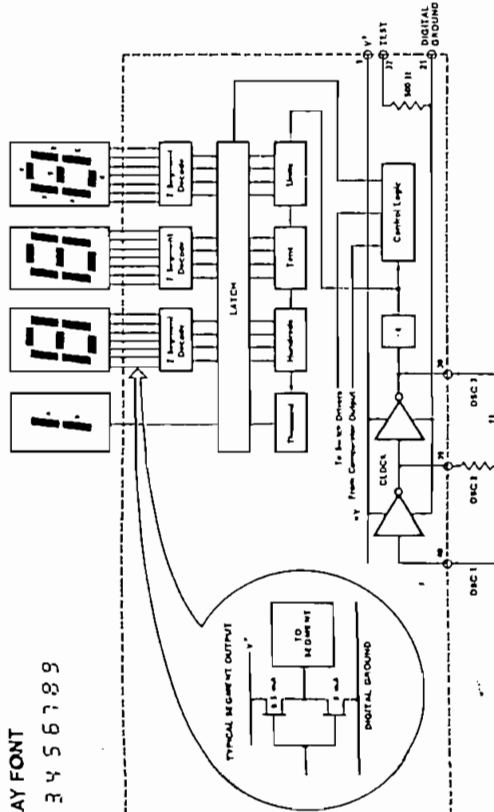


Figure 8: Digital Section 7107

**System Timing**  
 Figure 9 shows the clocking arrangement used in the 7106 and 7107. Three basic clocking arrangements can be used:

1. An external oscillator connected to pin 40.
2. A crystal oscillator using all three pins.
3. An RC oscillator using all three pins.

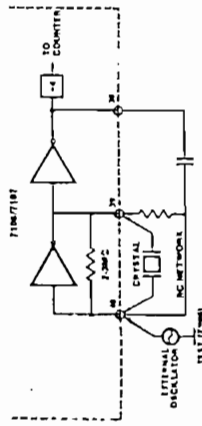


Figure 9: Clock Circuits

The oscillator frequency is divided by four before the decade counters. It is then further divided to form the three convert-cycle phases. These are signal integrate (1000 counts), reference de-integrate (0 to 2000 counts) and auto-zero (1000 to 3000 counts). For signals less than full scale, auto-zero gets the unused portion of reference de-integrate. This makes a complete measure cycle of 4,000 (16,000 clock pulses) independent of input voltage. For three readings/second, an oscillator frequency of 48kHz would be used. To achieve maximum rejection of 60 Hz pickup, the signal integrate cycle should be a multiple of 60 Hz. Oscillator frequencies of 240 Hz, 120 kHz, 80 kHz, 60 kHz, 48 kHz, 40 kHz, 33 1/3 kHz, etc. should be selected. For 50 Hz rejection, oscillator frequencies of 200 kHz, 100 kHz, 66 2/3 kHz, 50 kHz, etc. would be suitable. Note that

# ICL7106/ICL7107

is very important, a 0.47µF capacitor is recommended. On the 2 volt scale, a 0.047µF capacitor increases the speed of recovery from overload and is adequate for noise on this scale.

## 4. Reference Capacitor

A 0.1µF capacitor gives good results in most applications. However, where a large common mode voltage exists, i.e. the REF LO pin is not at analog COMMON and a 200mV scale is used, a larger value is required to prevent roll-over error. Generally 1.0µF will hold the roll-over error to 0.5 count in this instance.

## 5. Oscillator Components

For all ranges of frequency a 100kΩ resistor is recommended and the capacitor is selected from the equation  $f = \frac{1}{2\pi RC}$ . For 48kHz clock (3 readings/second),  $C \approx 100pF$ .

## 6. Reference Voltage

The analog input required to generate full-scale output (2000 counts) is:  $V_{IN} = 2V_{REF}$ . Thus, for the 200.0mV and 2.000 volt scale,  $V_{REF}$  should equal 100.0 mV and 1.000 volt, respectively. However, in many applications where the A/D is connected to a transducer, there will exist a scale factor other than unity between the input voltage and the digital reading. For instance, in a weighing system, the designer might like to have a full scale reading when the voltage from the transducer is 0.682V, instead of dividing the input down to 200.0 mV, the designer should use the input voltage directly and select  $V_{REF} = .341V$ . Suitable values for integrating resistor and capacitor would be 120kΩ and 0.22µF. This makes the system slightly quieter and also avoids a divider network on the input. The 7107 with ±5V supplies can accept input signals up to ±4V. Another advantage of this system occurs when a digital reading of zero is desired for  $V_{IN} \neq 0$ . Temperature

## TYPICAL APPLICATIONS

The 7106 and 7107 may be used in a wide variety of the configurations. The circuits which follow show some of the

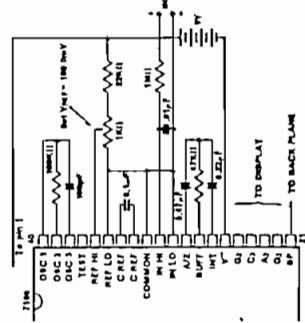


Figure 11: 7106 using the internal reference. Values shown are for 200.0 mV full scale, 3 readings per second, floating supply voltage (9V battery).

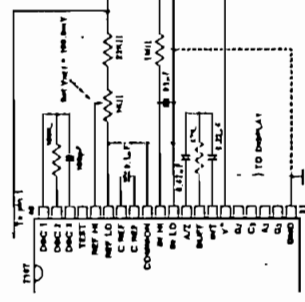


Figure 12: 7107 using the internal reference. Values shown are for 200.0 mV full scale, 3 readings per second. IN LO may be tied to either COMMON for inputs floating with respect to supplies, or GND for single ended inputs. (See discussion under Analog COMMON.)

and weighing systems with a variable tare are examples. This offset reading can be conveniently generated by connecting the voltage transducer between IN HI and COMMON and the variable for fixed offset voltage between COMMON and IN LO.

## 7. 7107 Power Supplies

The 7107 is designed to work from ±5V supplies. However, if a negative supply is not available, it can be generated from the clock output with 2 diodes, 2 capacitors, and an inexpensive IC. Figure 10 shows this application. See ICL7660 data sheet for an alternative.

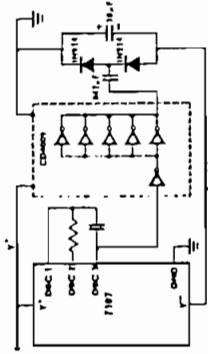


Figure 10: Generating Negative Supply from +5V

In fact, in selected applications no negative supply is required. The conditions to use a single +5V supply are:

1. The input signal can be referenced to the center of the common mode range of the converter.
2. The signal is less than ±1.5 volts.
3. An external reference is used.

possibilities, and serve to illustrate the exceptional versatility of these A/D converters.

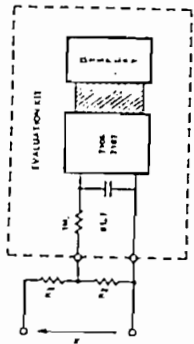


FIGURE 2: INPUT ATTENUATOR FOR  $V_{IN} > 2.0V$ .

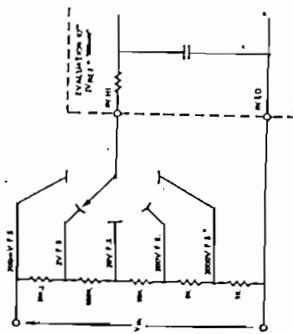


FIGURE 3(a): MULTIRANGE VOLTMETER

\*CAUTION: High voltages can be lethal. Proper operating precautions must be observed by the user. Intersil assumes no liability for unsafe operation.

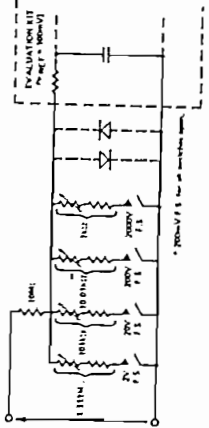
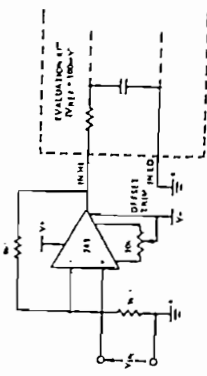
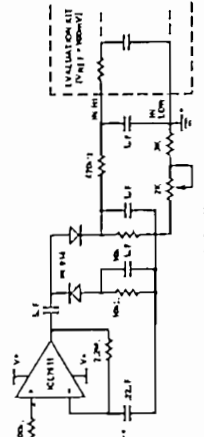


FIGURE 3(b): MULTIRANGE VOLTMETER, ALTERNATIVE SCHEME.



END - IN THE ABSENCE OF FULL SUPPLY OPERATION, TEST PIN SHOULD BE USED AS GROUND.

FIGURE 4: 20mV FULL SCALE.



END - IN THE ABSENCE OF FULL SUPPLY OPERATION, TEST PIN SHOULD BE USED AS GROUND.

FIGURE 5: AC TO DC CONVERTER

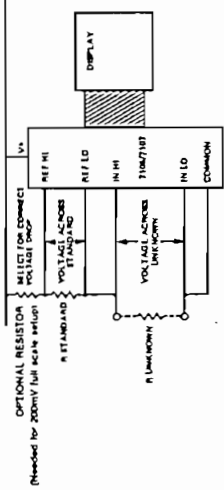


FIGURE 6: RESISTANCE MEASUREMENT\*

\*REQUIRES SOME MODIFICATION TO THE KIT

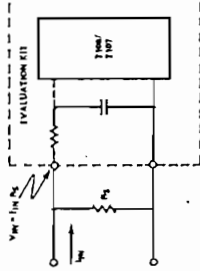


FIGURE 7: CURRENT MEASUREMENT

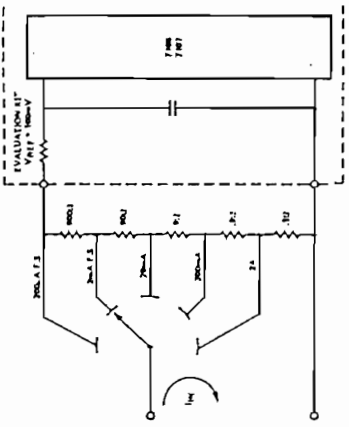
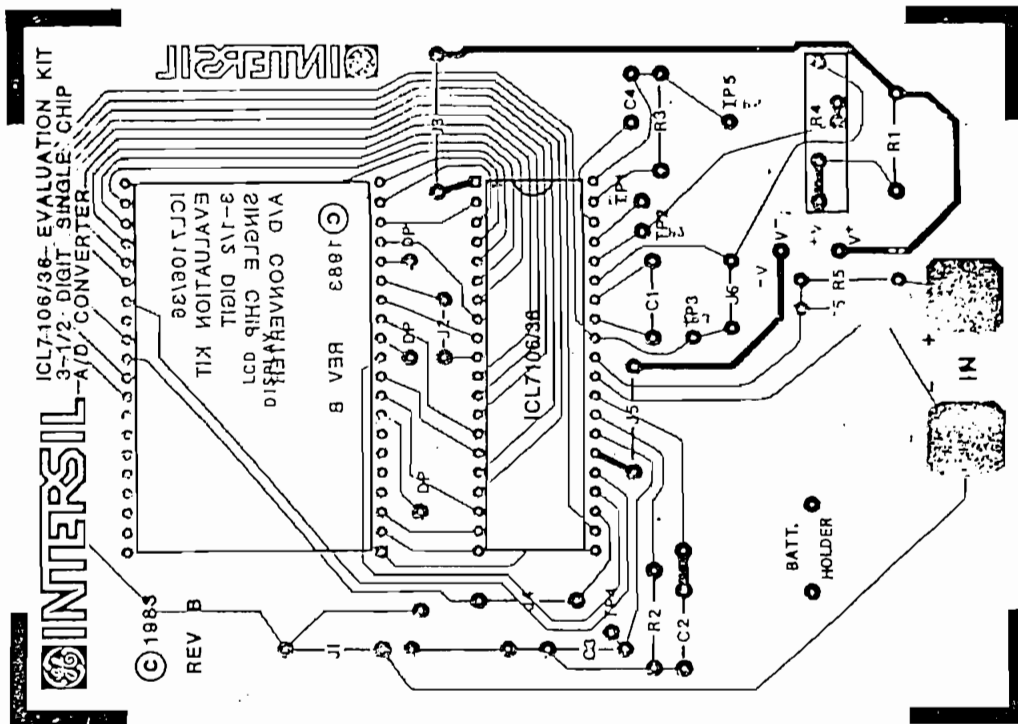


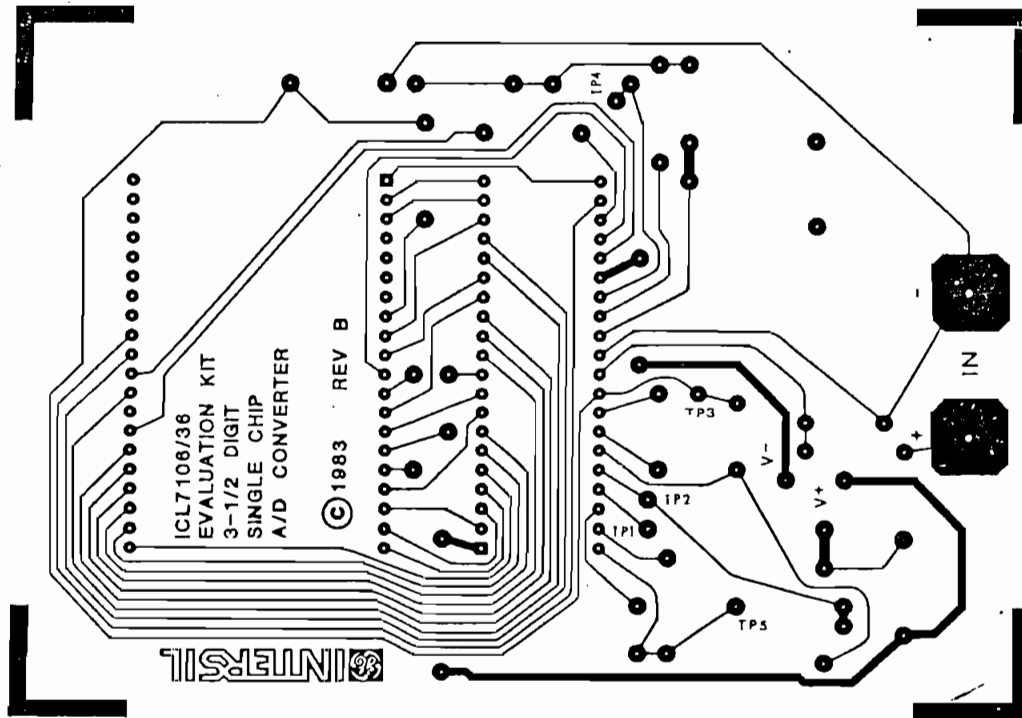
FIGURE 8: MULTIRANGE CURRENT METER.





Component Placement

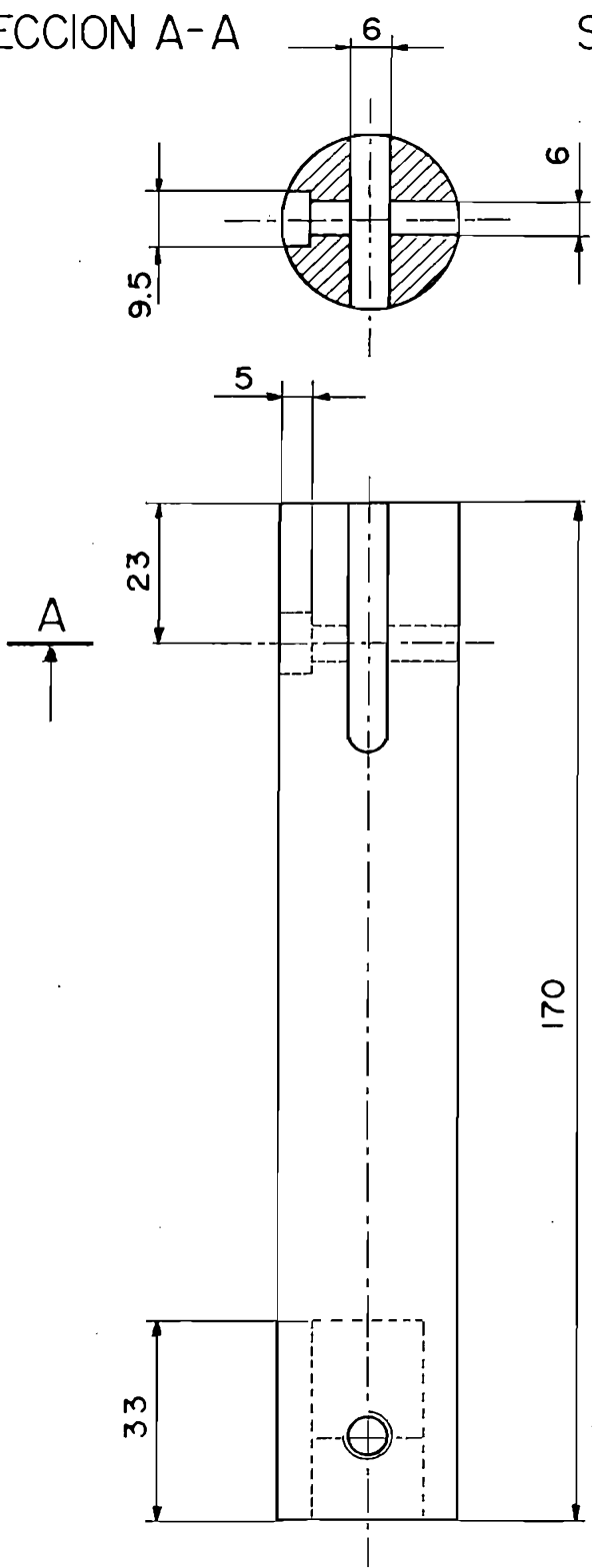
This jumper can be omitted to separate IN LO from COMMON. Jumper to display decimal for temporary decimal point. See test.



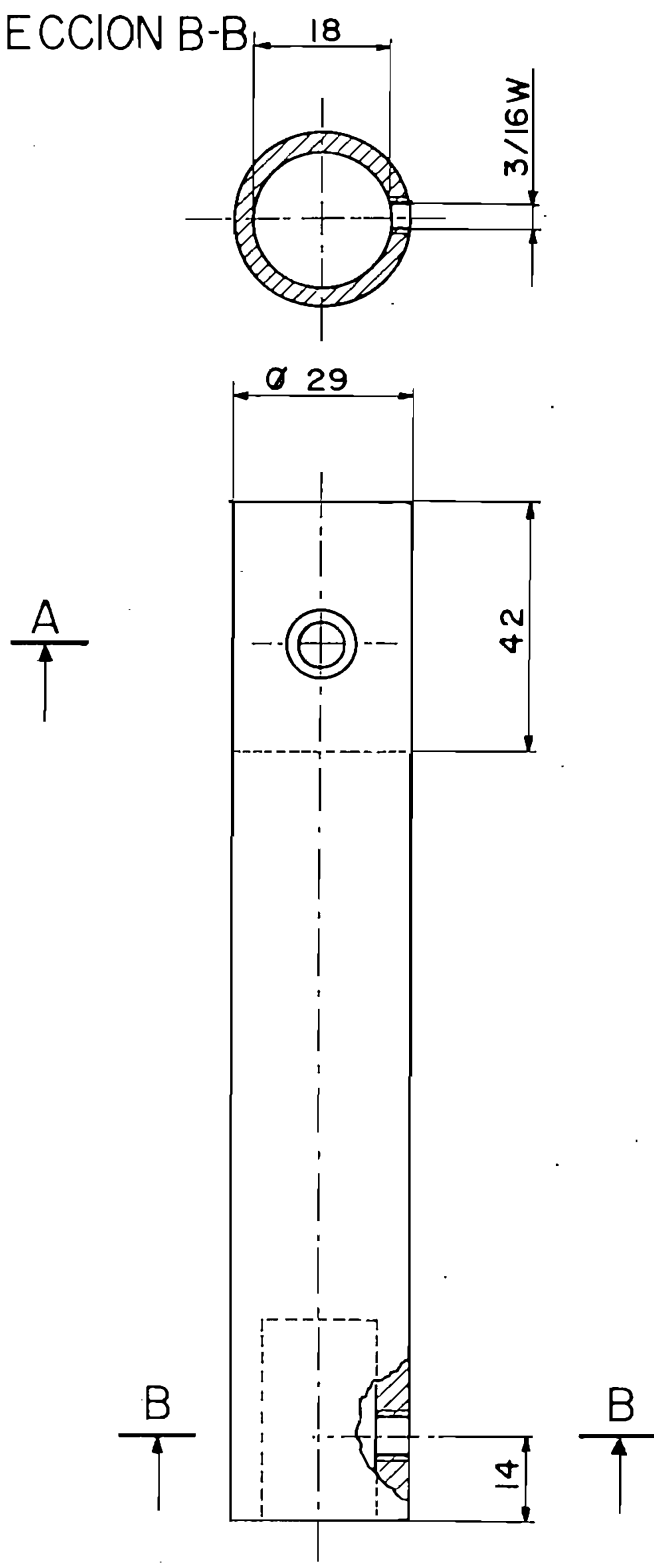
Printed Circuit Board

## PLANOS

SECCION A-A



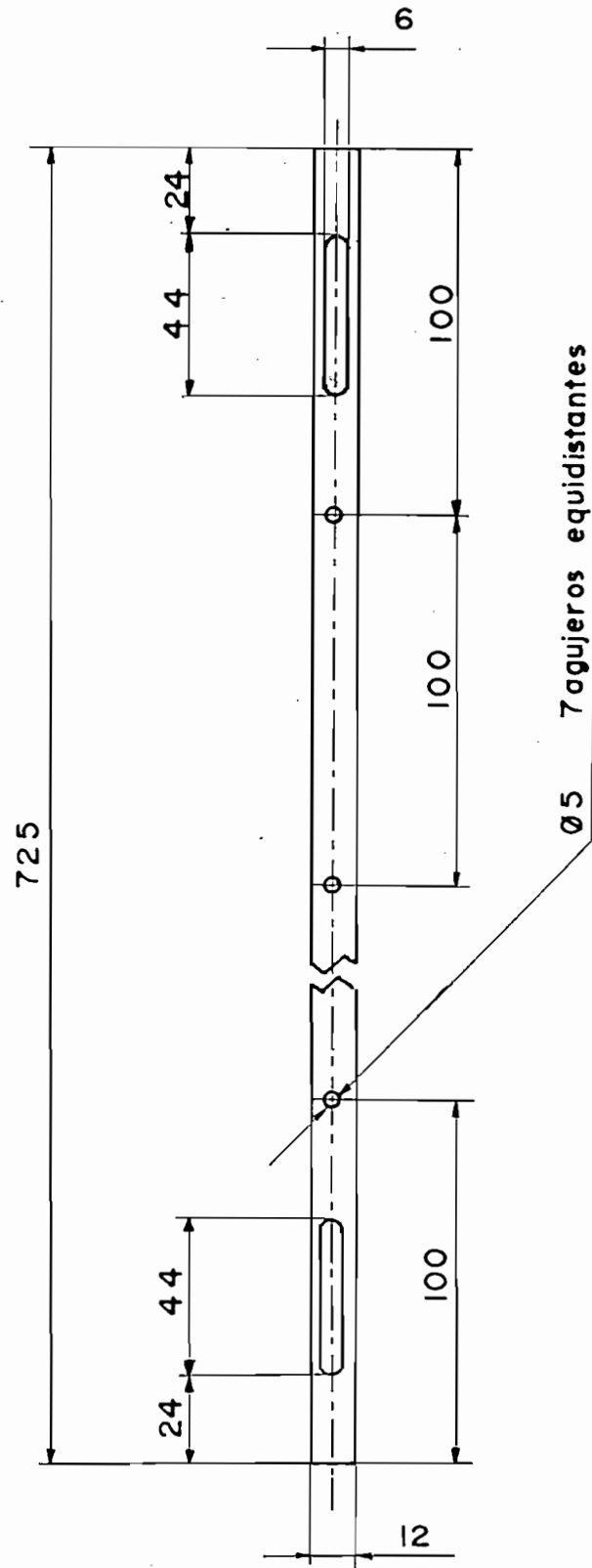
SECCION B-B



NOTA

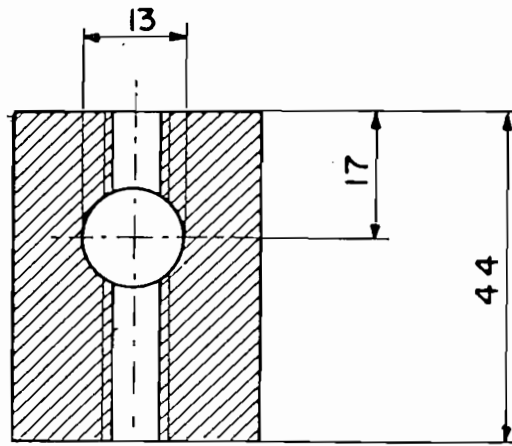
AGUJEROS PERFORADOS (BROCA Ø 6)

RECUBRIMIENTO CROMADO		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
BRONCE			DIB.	PF / MG
PRECISION FINA INEN 138	Escala: 1:1.25	DIS.	PF / MG	
		REV.	Ing. VITERI	
EXTENSION PISTON		3.445-6.101		Fecha 03-86

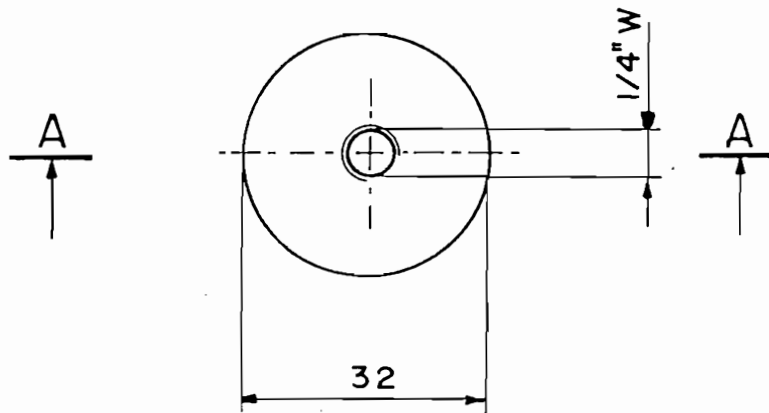


NOTA: Espesor 5

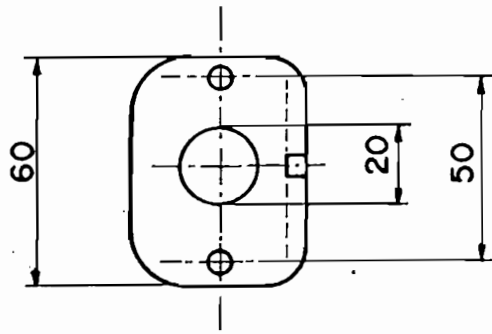
		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO	CROMADO		DIB.	PF / MG
ACERO A-36	Tol. Gnral. $\pm 2\%$	Escala: 1:2	DIS.	PF / MG
			REV.	Ing. VITERI
VARIANTE DE REALIMENTACION		3.445-6.102		Fecha 03-86



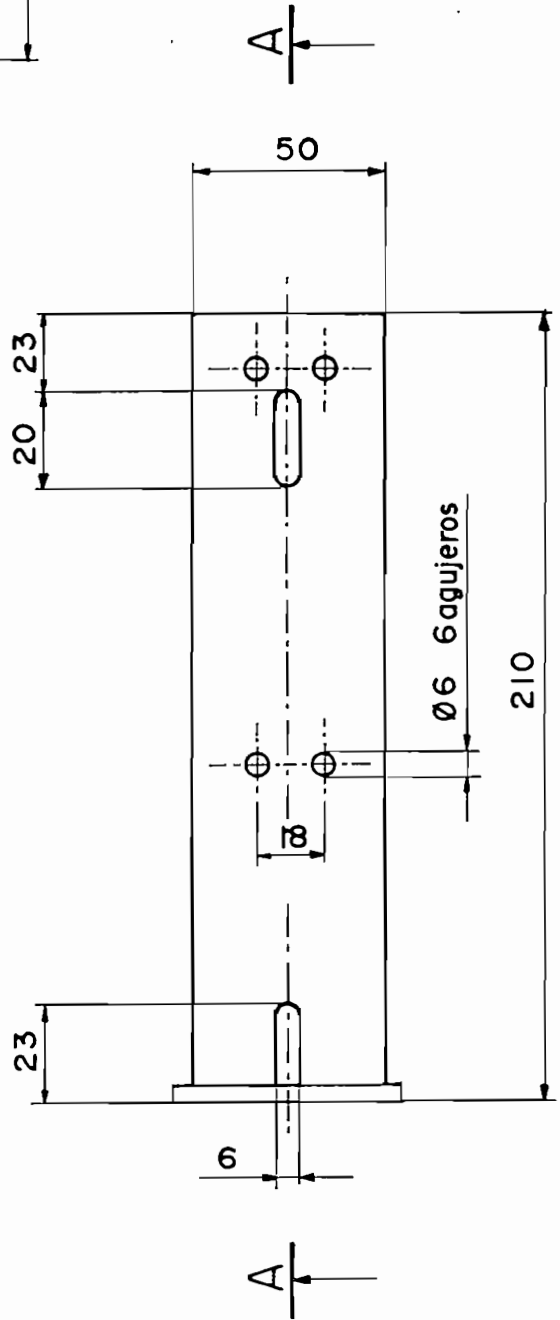
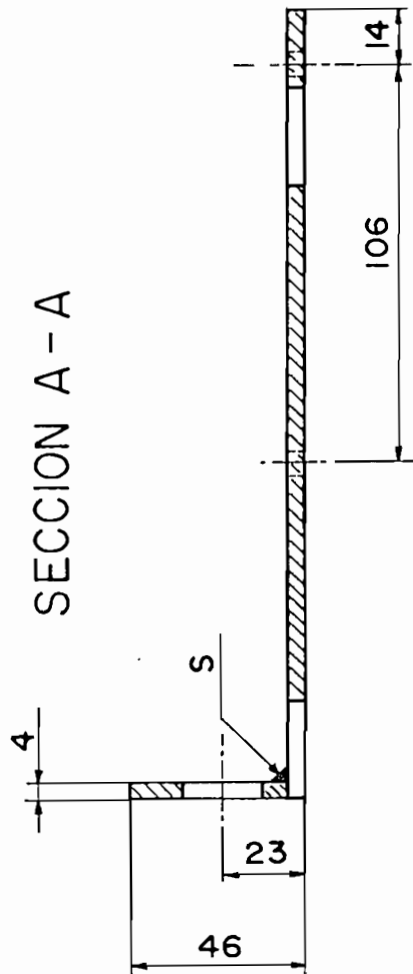
SECCION A-A



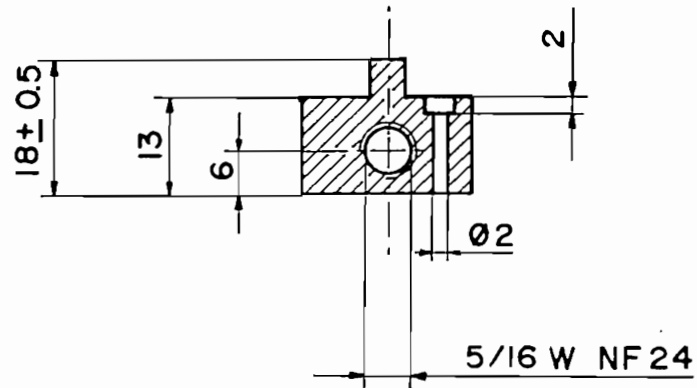
		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO	CROMADO		DIB.	PF / MG
ACERO DE TRANSMISION	Tol. Gnral ± 5%	Escala : 1:1	DIS.	PF / MG
			REV.	Ing. VITERI
DADO DE APOYO		3.445-6.103		Fecha 03-86



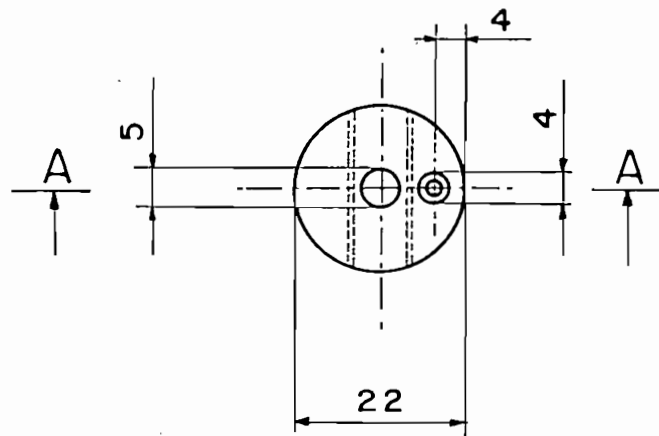
SECCION A - A



RECUBRIMIENTO CROMADO		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
ACERO A - 36	Tol. Gnral. $\pm 2\%$		DIB.	PF / MG
BASE MOTOR	Escala: 1:2	DIS.	PF / MG	
		REV.	Ing. VITERI	
3.445-6.104			Fecha	



SECCION A-A



NOTA

AJUSTAR Ø5 CON Ø DE LA VARILLA DE REALIMENTACION

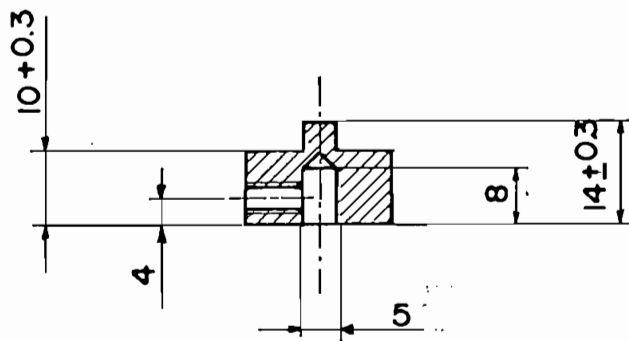
		EPN		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
ACERO DE TRANSMISION		Tol. Gnal. ± 2 %	Escala: 1 : 1	DIB.	PF / MG
				DIS.	PF / MG
				REV.	Ing. VITERI

TUERCA POSICIONADORA

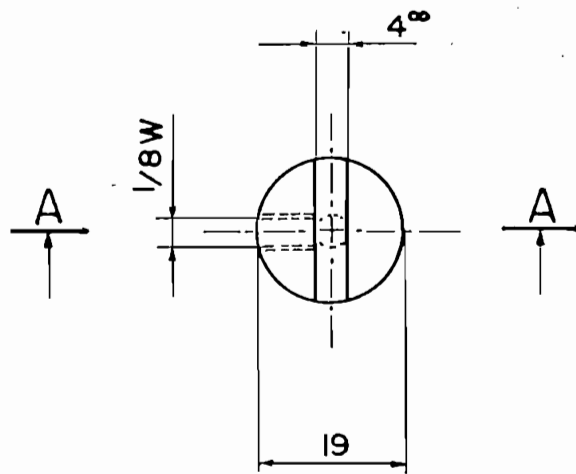
3.445-6.105

Fecha

03-86



SECCION A - A

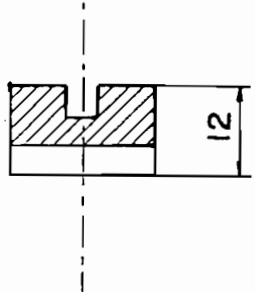


NOTA

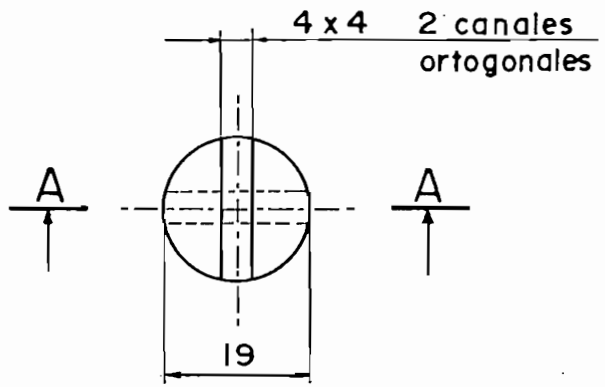
AJUSTAR COTA  $4^{\infty}$  CON CANAL 4 x 4 DE JUNTA OLDHAM(B)

		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
			DIB.	PF / MG
BRONCE FOSFORICO	PRECISION FINA INEN 138	Escala : 1:1	DIS.	PF / MG
			REV.	Ing. VITERI
JUNTA OLDHAM (A)		3.4 45-6.106		Fecha 03-86



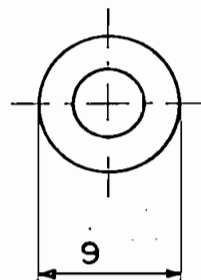
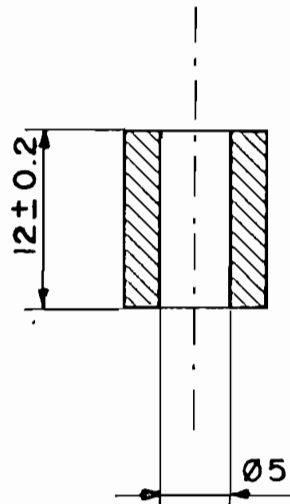


SECCION A-A



		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
BRONCE FOSFORICO	Tol. Gnral. ± 2 %		Escala: 1:1	DIB. PF / MG DIS. PF / MG REV. Ing. VITERI

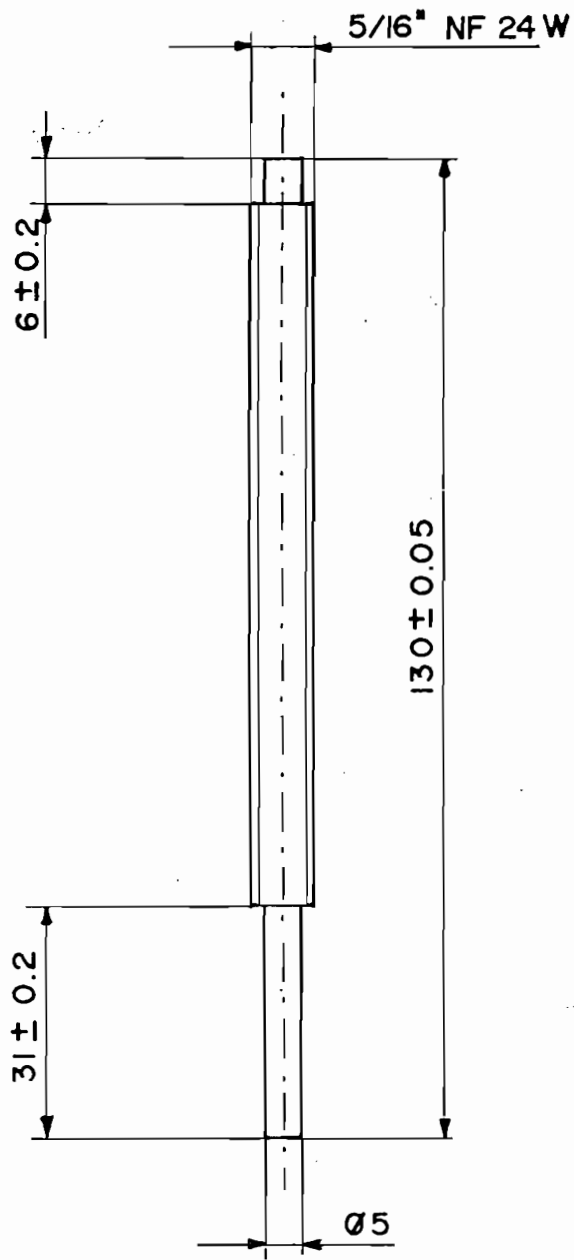
JUNTA OLDHAM (B)	3.4 45-6.107	Fecha 03-86
------------------	--------------	----------------



NOTA

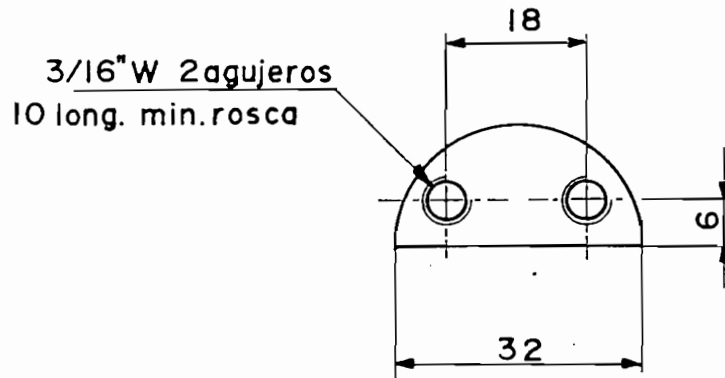
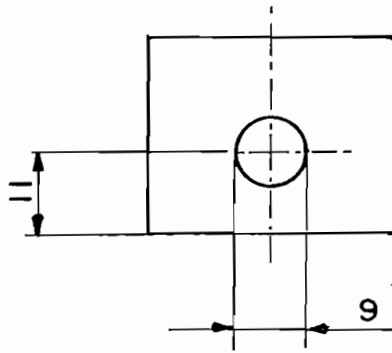
AJUSTAR Ø9 CON Ø ALOJAMIENTO DEL PORTA BOCIN

		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
			DIB.	PF / MG
BRONCE FOSFORICO	PRECISION FINA INEN 138	Escala: 2:1	DIS.	PF / MG
			REV.	Ing. VITERI
BOCIN		3.445-6.108		Fecha 03-86

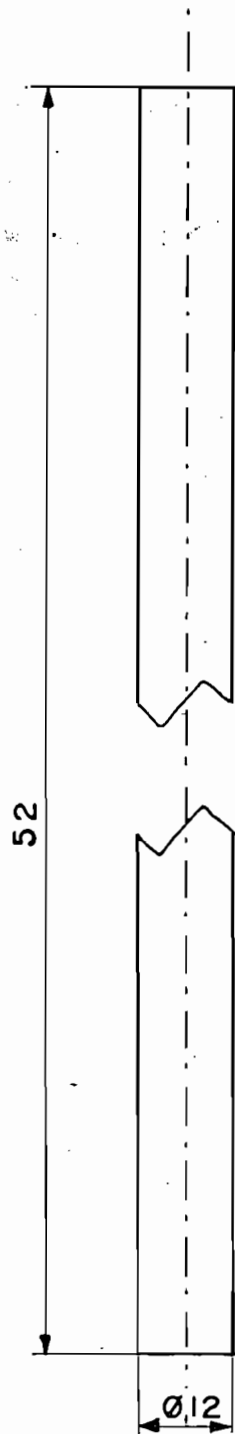


NOTA  
AJUSTAR Ø5 CON Ø DE BOCIN

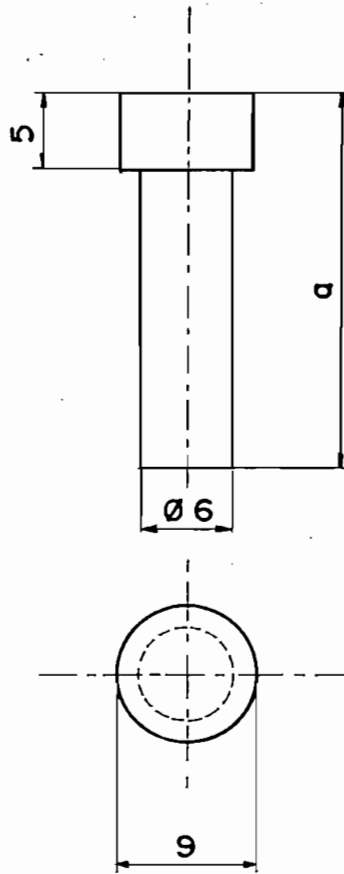
		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
			DIB.	PF / MG
ACERO BOEHLER 900	PRECISION FINA INEN 138	Escala : 1 : 1	DIS.	- PF / MG
			REV.	Ing. VITERI
TORNILLO POSICIONADOR		3.445-6.109		Fecha 03-86



		<b>EPN</b>		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
ACERO DE TRANSMISION		Tol. Gnral. $\pm 2\%$	Escala 1:1	DIB.	PF / MG
PORTA BOCIN				DIS.	PF / MG
				REV.	Ing. VITERI
			3.445-6.110		Fecha 03-86



		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO	CROMADO		DIB.	PE/MG
ACERO DE TRANSMISION	Tol. Gnral. $\pm 4\%$	Escala: 1:1	DIS.	PF/MG
VARILLA DE DESLIZAMIENTO			REV	Ing. VITERI
		3.445-6.111		Fecha 03-86

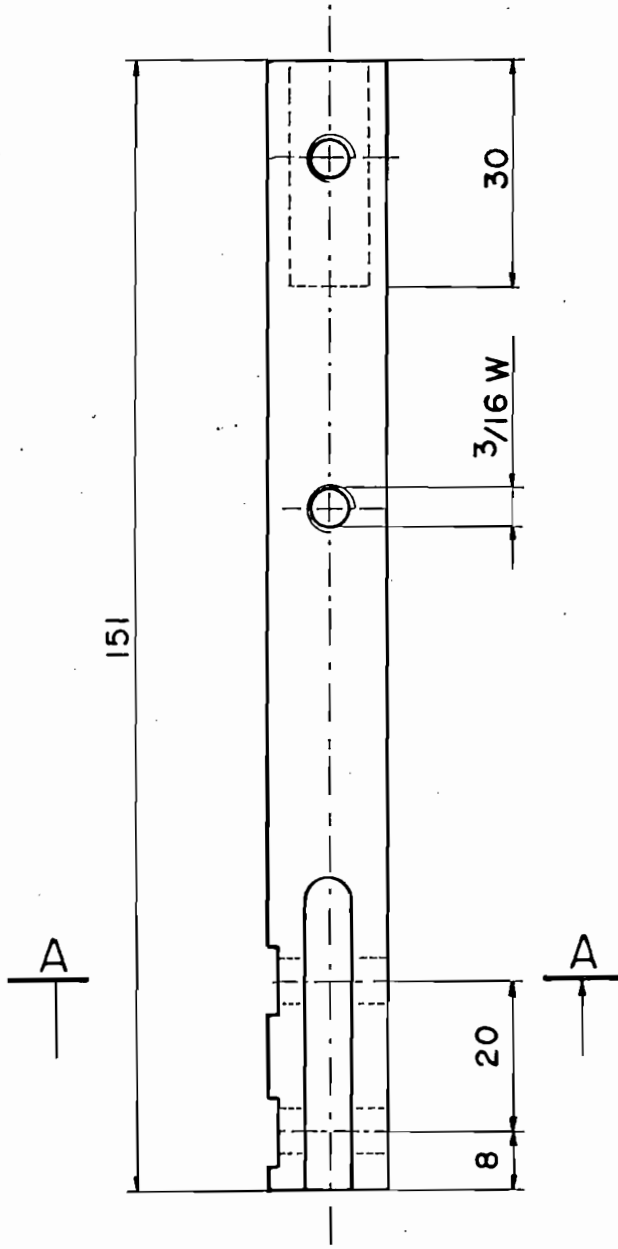
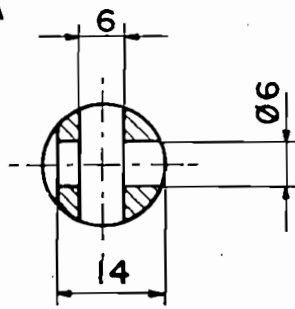


Pasador de	a
válvula	18
pistón	25

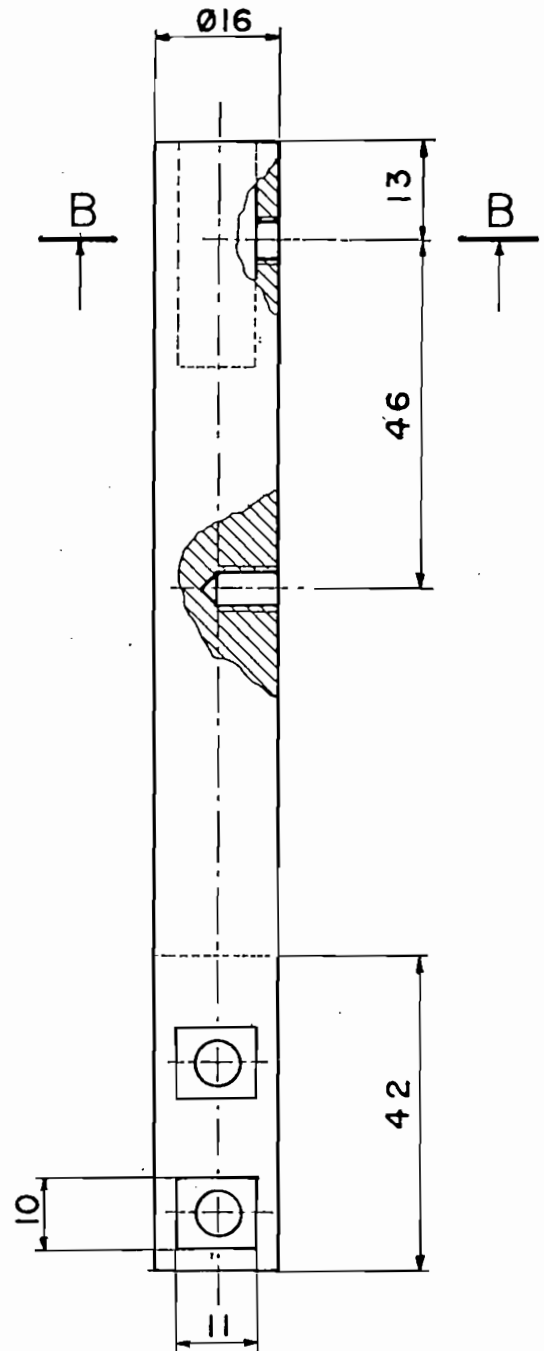
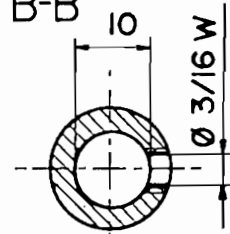
NOTA  
 AJUSTAR Ø6 CON EL ALOJAMIENTO RESPECTIVO (Extensión Válvula o Pistón)

		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO CROMADO			DIB.	PF / MG
ACERO DE TRANSMISION	Tol. Gnral ± 2%	Escala: 2:1	DIS.	PF / MG
			REV.	Ing. VITERI
PASADORES		3.445-6.112		Fecha 03-86

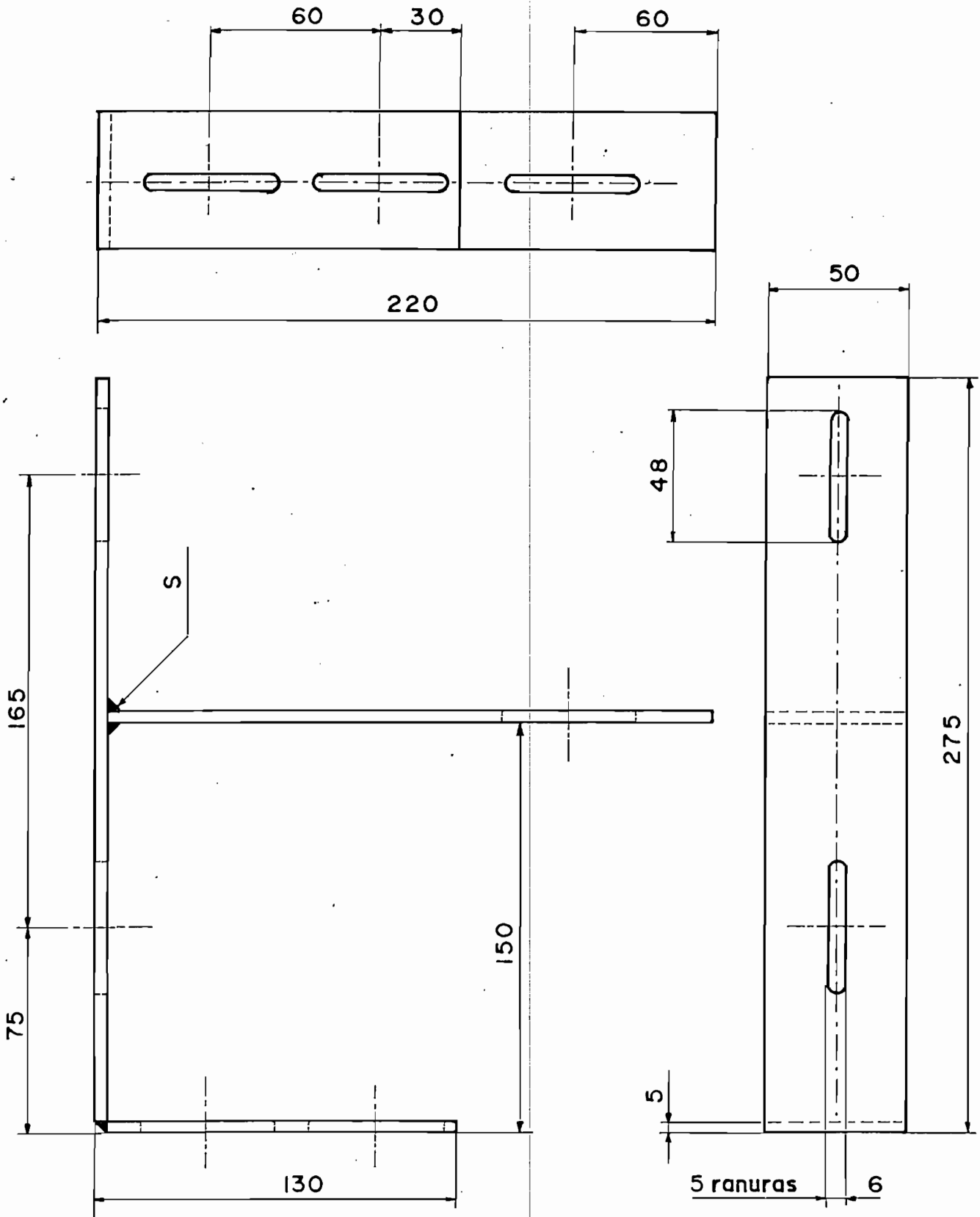
SECCION A-A



SECCION B-B

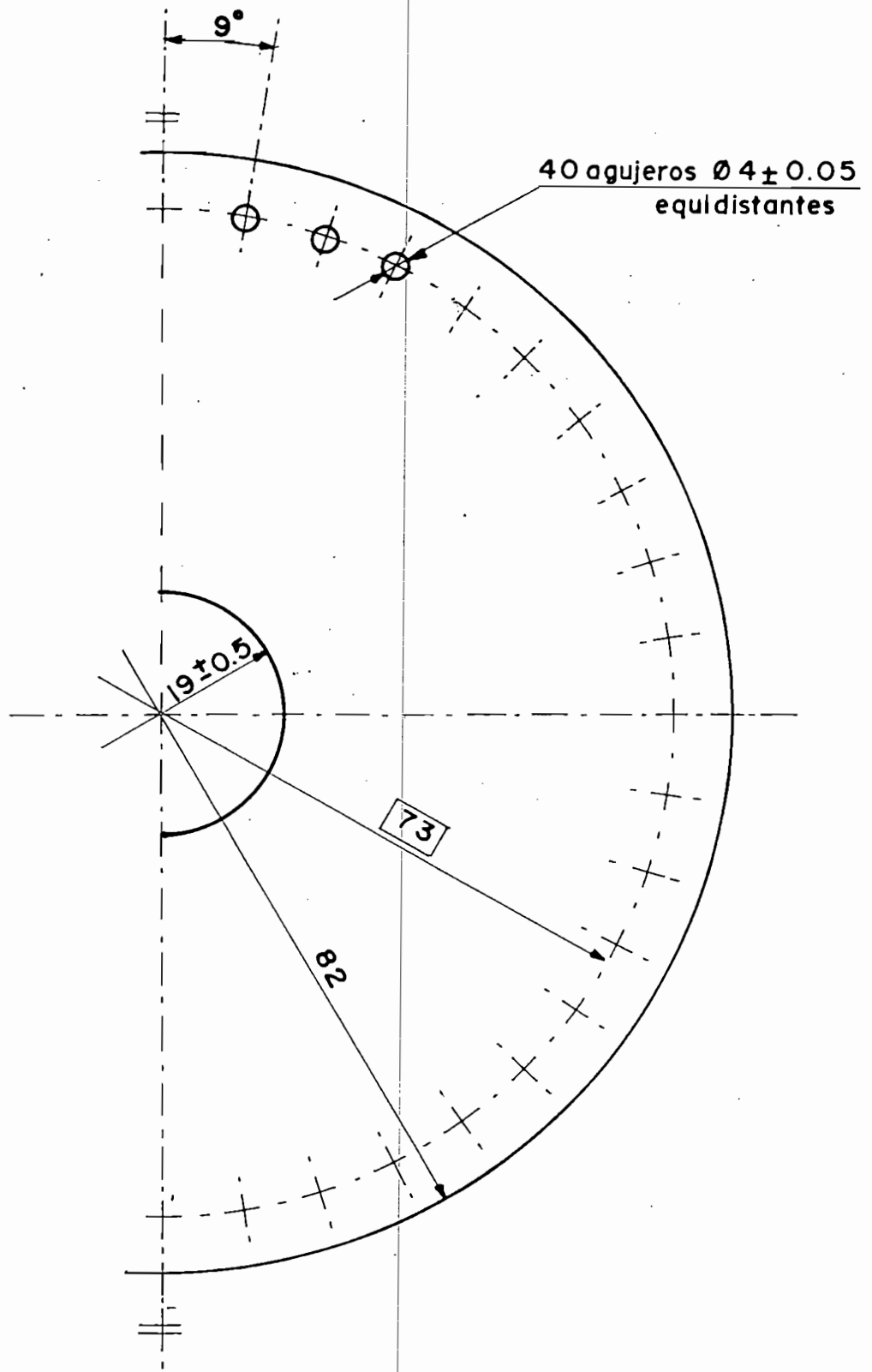


RECUBRIMIENTO CROMADO		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
BRONCE	PRECISION FINA INEN 138		DIB.	PF / MG
		Escala: 1:1	DIS.	PF / MG
			REV.	Ing. VITERI
EXTENSION VALVULA		3.445-6.113		Fecha 03-86



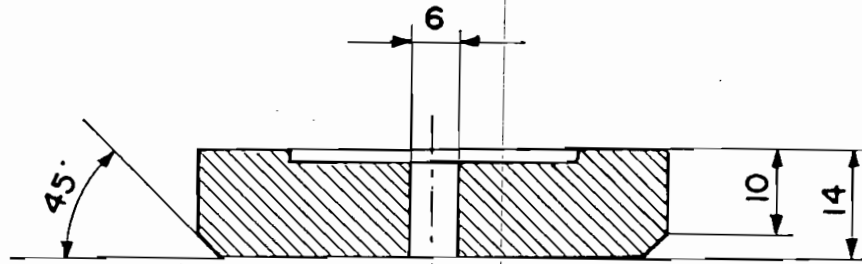
RECUBRIMIENTO		CROMADO		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
ACERO A-36		Tol. Gnral ± 4%			Escala:	DIB.
ANGULOS CODORTE				1:2	DIS.	PF / MG
					REV.	Ing. VITERI
				3.445-6.114		Fecha 03-86



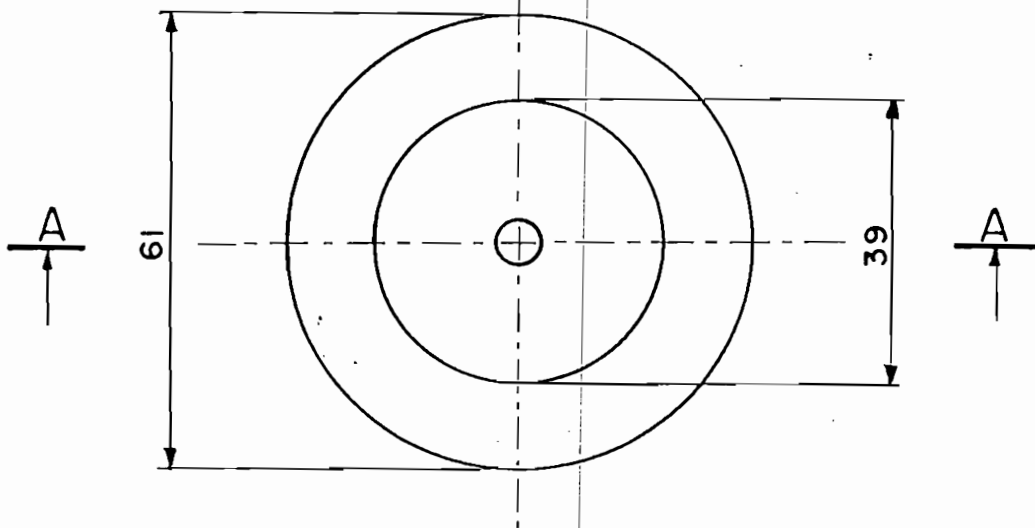


NOTAS  
 USAR PLATO DIVISOR  
 ESPESOR 3

		<b>EPN</b>		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
ACRILICO NEGRO	Tol. Gnral. ± 4 %	Escala : 1:1	DIB.	PF / MG	
			DIS.	PF / MG	
			REV.	Ing. VITERI	
DISCO DEL SENSOR		3.445-6.201			Fecha 03-86

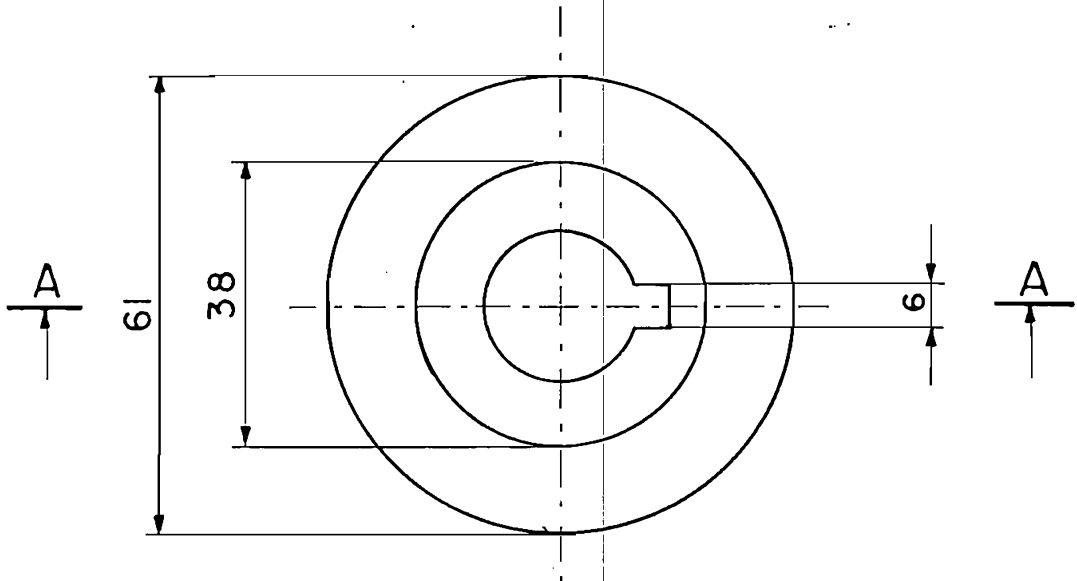
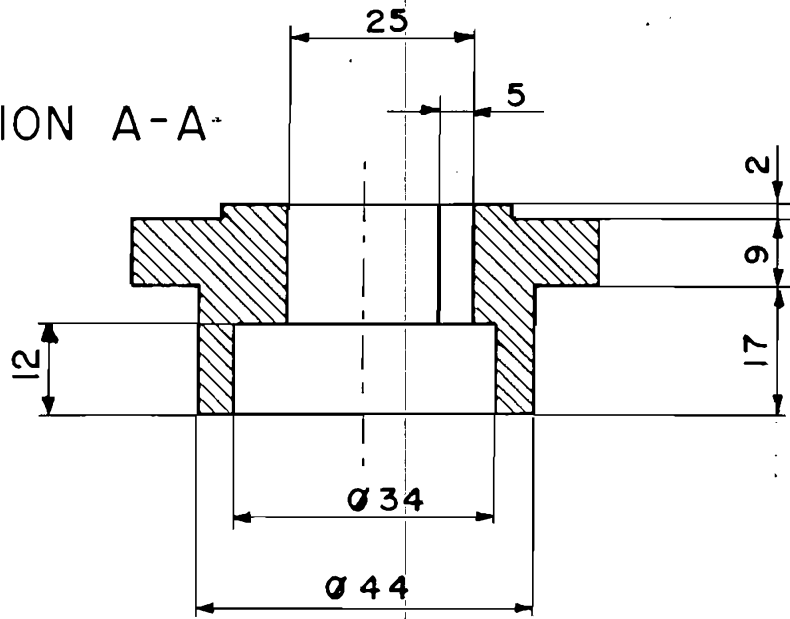


SECCION A-A

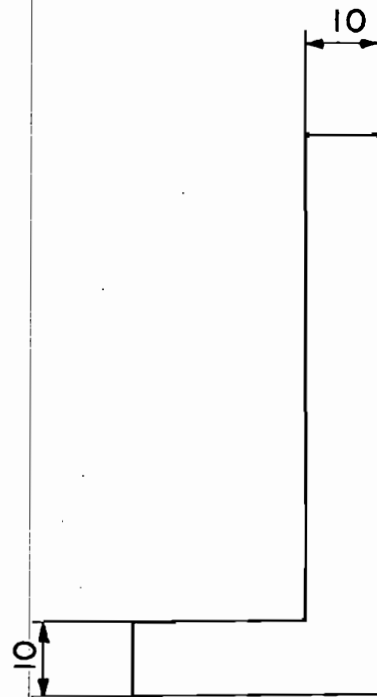
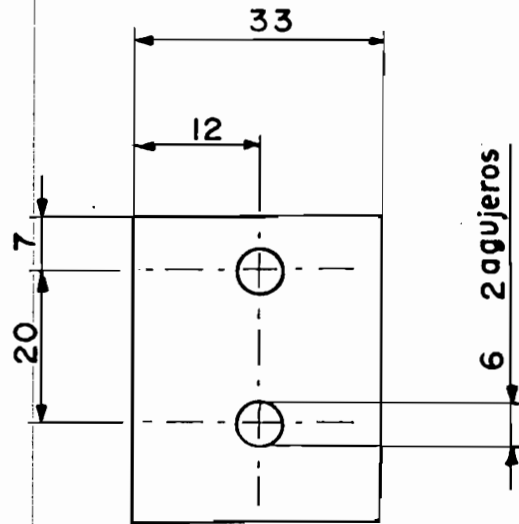
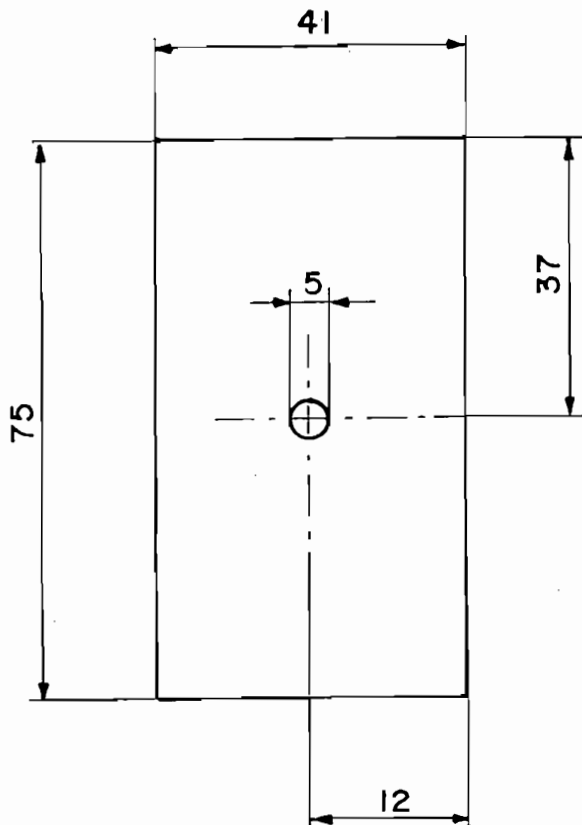


		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO	PINTURA ROJA		DIB.	PF/MG
ALUMINIO	Tol. Gnral. + 4 %	Escala:	DIS.	PF/MG
		1:1	REV	Ing. VITERI
TAPA DE MANZANA		3.445-6.202		Fecha 03-86

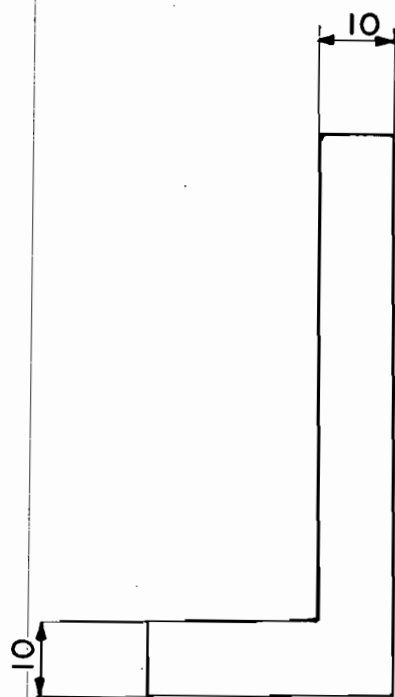
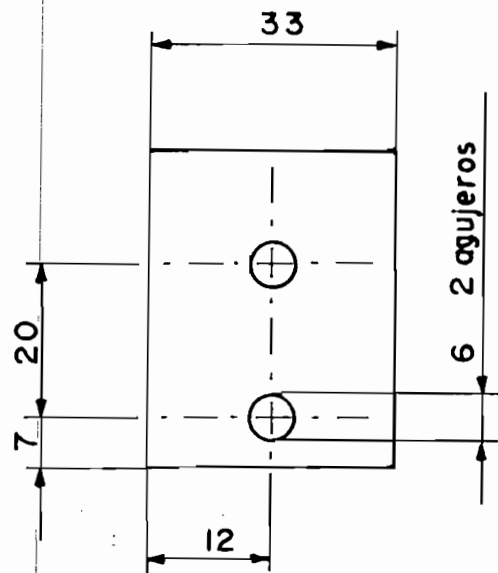
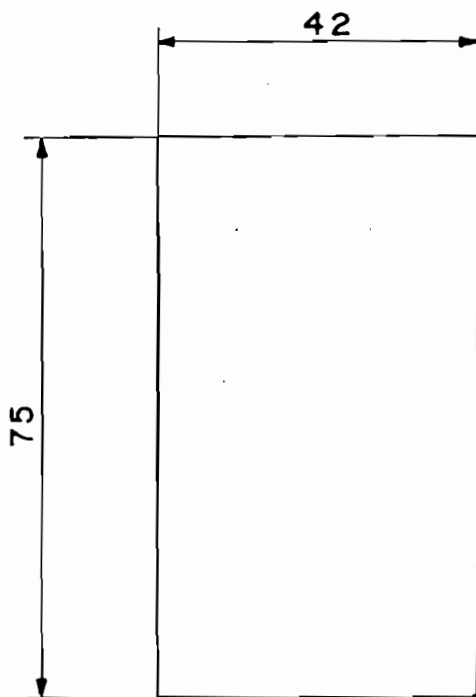
SECCION A-A



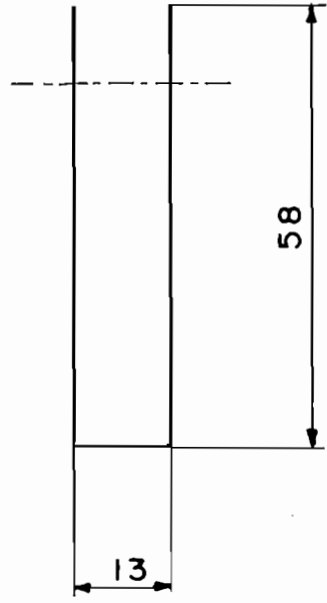
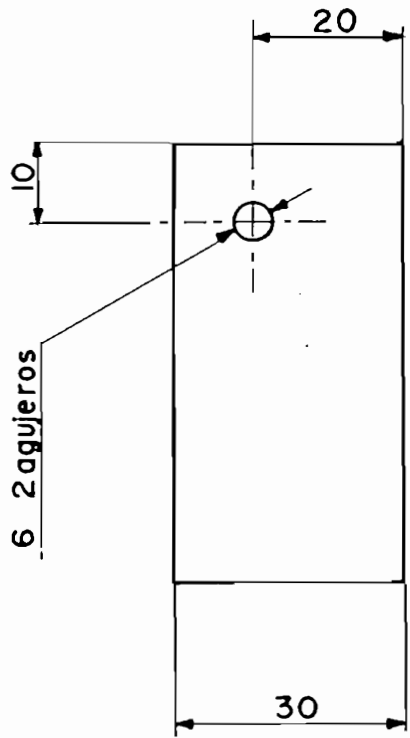
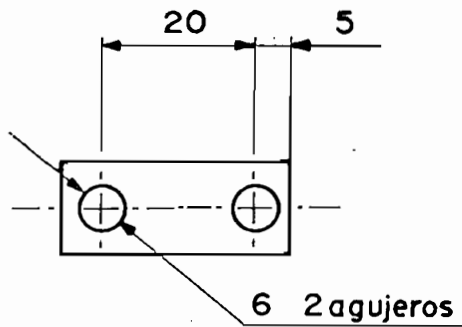
RECUBRIMIENTO		PINTURA ROJA		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
ALUMINIO		Tol. Gnral.	± 4 %		Escala:	1:1
MANZANA DE SUJECION						DIS. PF/MG
						REV. Ing. VITERI
				3.445-6203		Fecha 03-86



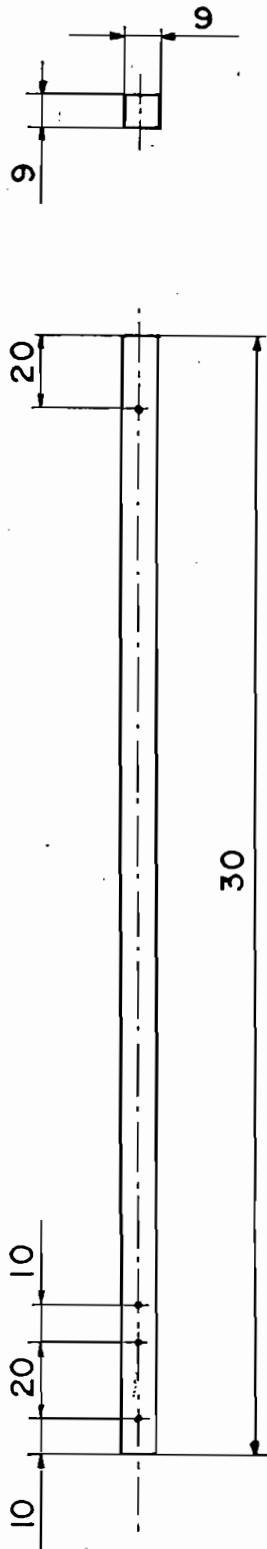
		EPN		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO PINTURA NEGRA		Escala : 1:1		DIB.	PF MG
TOL NEGRO 1/40 <sup>u</sup>		Tol. Gnral. ± 4 %		DIS.	PF MG
TAPA N°1 DFL SENSOR		3.445-6204		REV.	Ing. VITERI
					Fecha 03-86



		<b>EPN</b>		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO PINTURA NEGRA		Escala:		DIB.	PF / MG
TOL NEGRO 1/40"		Tol. Gnral. ± 4 %		DIS.	PF / MG
		1:1		REV.	Ing. VITERI
TAPA N°2 DEL SENSOR			3.445-6205		Fecha 03-86

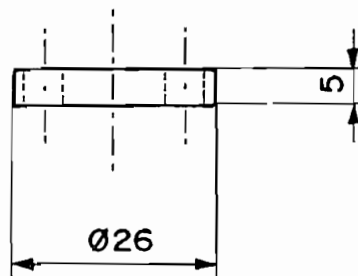
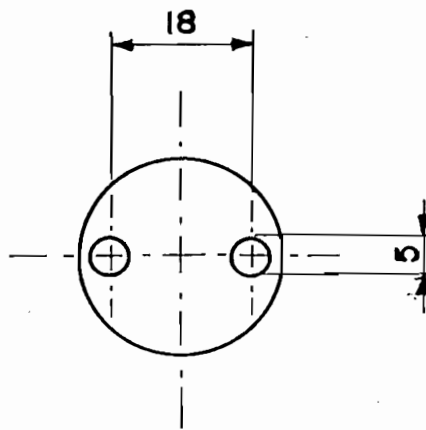


		<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO PINTURA NEGRA			DIB.	PF / MG
TOL NEGRO 1/8"	Tol. Gnral. ± 10%	Escala: 1:1	DIS.	PF / MG
			REV.	Ing. VITERI-
<b>SOPORTE FOTOSENSORES</b>		<b>3.445-6.206</b>		Fecha 03-86



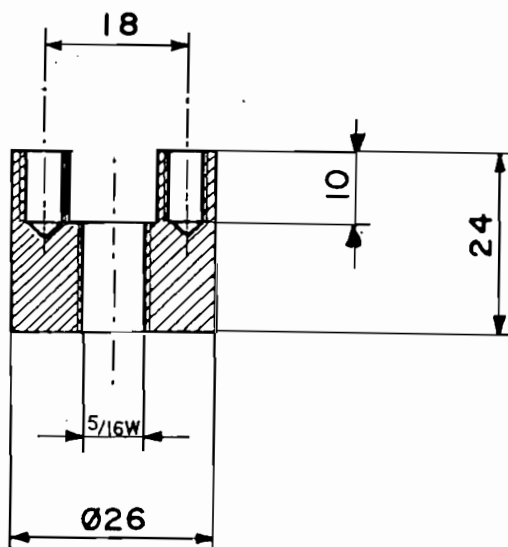
NOTA agujeros  $\emptyset 4$

		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO CROMADO			DIB.	PF / MG
TUBO DE BRONCE	Tol. Gnral.	Escala :	DIS.	PF / MG
	$\pm 3\%$	1:2	REV.	Ing. VITERI
	DADANTE FOTOCENSOR		3 445-6 207	Fecha

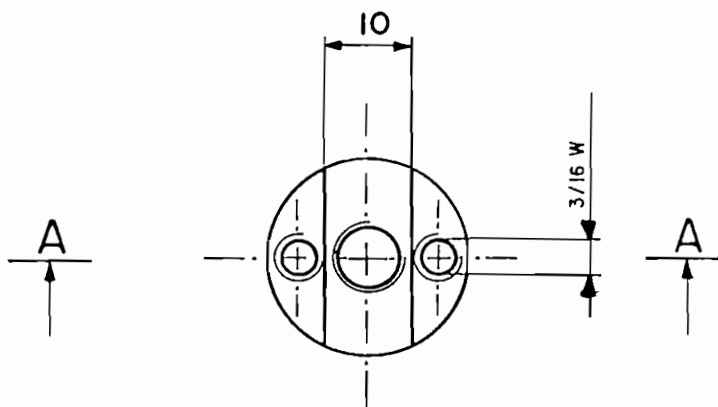


		<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO	CROMADO		DIB.	PF / MG
BRONCE	Tol. Gnral. ± 4 %	Escala:	DIS.	PF / MG
		1 : 1	REV	Ing. VITERI
<b>TAPA DEL DADO</b>		<b>3.445-6.208</b>		Fecha 03-86



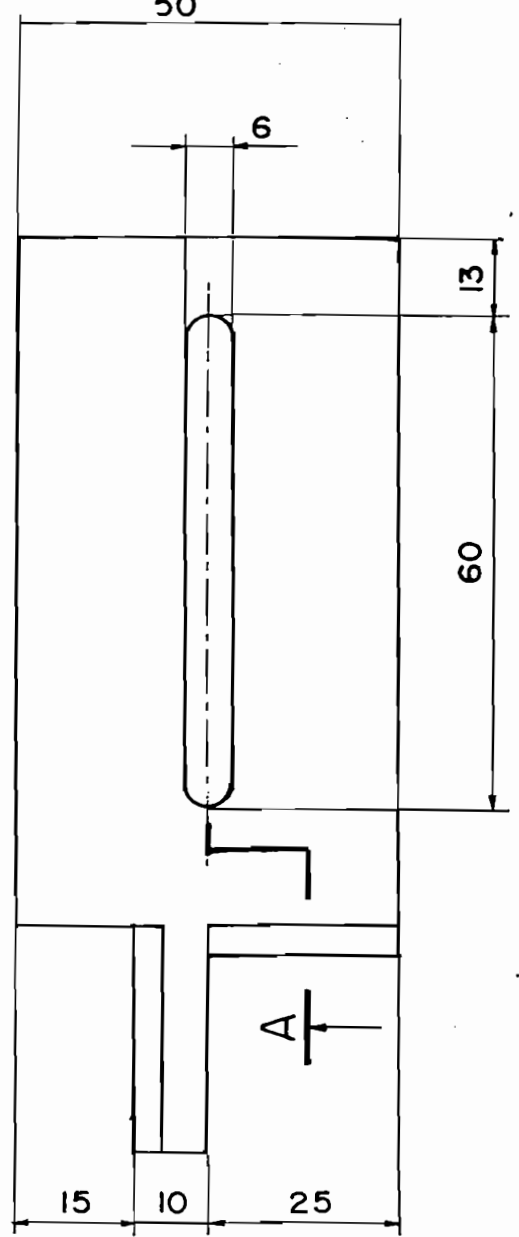
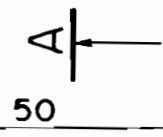
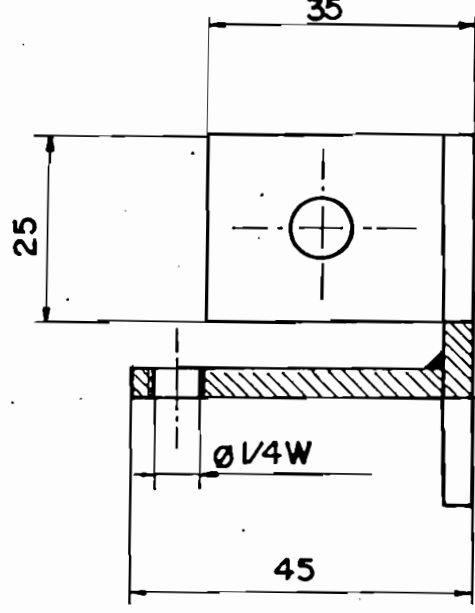


SECCION A-A

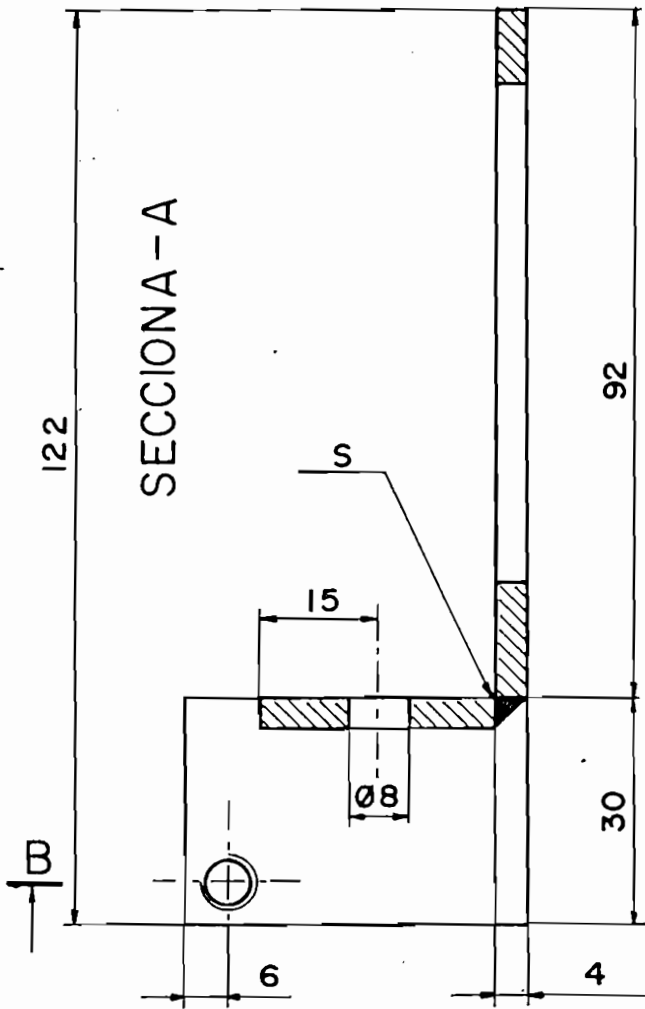


RECUBRIMIENTO		CROMADO		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
BRONCE		Tol. Gnral.	± 4%		Escala:	DIB.
DADO SOPORTE				1:1	DIS.	PF / MG
					REV.	Ing. VITERI
				3.445-6.209		Fecha 03-86

SECCION B-B



SECCIONA - A



RECUBRIMIENTO CROMADO		EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
ACERO A-36	Tol. Gnral. $\pm 4\%$		Escala: 1:1	DIB. PF / MG
			DIS. PF / MG	
			REV. Ing. VITERI	

RASE FOTOSENSOR	3.445-6.210	Fecha 03-81
-----------------	-------------	-------------