



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"CUAUTITLAN"**

**SIMULACION EN COMPUTADORA DEL SISTEMA
DE CONTROL DE LA TURBINA DE UNA
PLANTA TERMOELECTRICA.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

JUAN CARLOS ALTAMIRANO CANO

**DIRECTOR DE LA TESIS:
ING. BENJAMIN CONTRERAS**

1982.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

		Pag.
	INTRODUCCION	
CAPITULO 1.	DESCRIPCION DE LA CENTRAL TERMoeLECTRICA PROTOTIPO.	4
	1.1 Generalidades	5
	1.2 Sistemas que Componen la Central Termoe- léctrica.	8
CAPITULO 2.	DESCRIPCION FUNCIONAL DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA TURBINA	15
	2.1 Generalidades	16
	2.2 Identificación de los Elementos	16
CAPITULO 3.	DEFINICION DE HIPOTESIS Y SIMPLIFICACIONES	29
	3.1 Generalidades	30
	3.2 Lista de Hipótesis y Simplificaciones	31
	3.3 Diagrama Simplificado	33
CAPITULO 4.	ECUACIONES MATEMATICAS Y CALCULO DE LOS PARA- METROS CARACTERISTICOS.	36
	4.1 Generalidades	37
	4.2 Desarrollo de los Modelos de los Elemen- tos del Sistema de Control de la Turbina	37
CAPITULO 5.	SOLUCION NUMERICA DE LAS ECUACIONES DEL MODELO	60
	5.1 Generalidades	61
	5.2 Desarrollo de la Solución Explícita	61
	5.3 Estructuración del Programa de Computado- ra.	66
CAPITULO 6.	PRUEBAS DE AJUSTE Y VALIDACION	70
	6.1 Generalidades	71
	6.2 Pruebas en Estado Estacionario	72
	6.3 Pruebas de Transitorios	74
	6.4 Transitorio Crítico	76
	6.5 Simulación Aproximada	77

	Pag.
CAPITULO 7. ANALISIS ECONOMICO	81
CONCLUSIONES	85
APENDICE I	87
APENDICE II	90
APENDICE III	107
REFERENCIAS	116

Introducción

En el presente trabajo se desarrolla el modelo matemático del sistema de control de la turbina de una Central Termoeléctrica para su simulación en computadora digital. Este modelo forma parte del simulador que se construye en el Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Federal de Electricidad y cuyos objetivos fundamentales son:

- Aumentar el índice de disponibilidad y confiabilidad de centrales termoeléctricas.
- Adiestrar con rapidez y eficiencia al personal de operación de dichas centrales.
- Mejorar procedimientos de operación.
- Analizar dinámicamente los sistemas de control de centrales de generación de energía.
- Mejorar diseños de centrales termoeléctricas.
- Promover la investigación en el país.
- Contar con tecnología nacional en el área de simulación.
- Evitar fallas por mala operación lo que involucra grandes pérdidas económicas.
- Aumentar la continuidad del servicio eléctrico.

La unidad número uno de la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos "Tula" se toma como base para desarrollar el simulador. - Se tiene una réplica con los instrumentos de sus tableros de control de tal manera que el operador adiestrado en él esté familiarizado tanto con la operación de la unidad como con la disposición característica de los instrumentos.

Los modelos del simulador deben reproducir con un criterio de similitud al comportamiento de la unidad en todos sus rangos de operación, desde el arranque "en frío" hasta la operación a plena carga, incluyendo maniobras tales como cambios en la energía generada y fallas de diversos equipos. De tal manera que el instructor de los futuros operadores puede de una manera flexible reproducir cualquier situación que crea conveniente durante el en trenamiento.

La simulación de la respuesta de los modelos de la central se realiza en tiempo real, esto quiere decir que la ejecución del programa de computadora y la generación de resultados es en un lapso de tiempo menor que cualquier Δt que se quiera simular.

Tomando en cuenta esto último se modelan los diversos sistemas que componen la central termoeléctrica así como el sistema del control de la turbina. Este control tiene diversas funciones, entre las cuales es importante mencionar el control de carga, la regulación de velocidad y las de protección en caso de diversas contingencias que dañan a la turbina.

Para el desarrollo del modelo matemático del sistema y la simulación del mismo se sigue el siguiente procedimiento: En primer término se proporciona una descripción general de la Central Termoeléctrica con el fin de visualizar el ciclo termodinámico y situar al sistema de control de la turbina dentro del mismo. En el capítulo 2 se analiza el funcionamiento de cada uno de los elementos que conforman al control. Después de estudiar el comportamiento del sistema se pasa a establecer las hipótesis y simplificaciones necesarias para el modelado matemático. El siguiente paso dentro del trabajo es la elaboración del modelo tomando en consideración las diversas interacciones que tiene con otros sistemas y las particulares del simulador, esto es las señales que requiere el ins tructor. En el capítulo 5 se describe el método numérico que se uti liza para resolver las ecuaciones dinámicas del modelo y la estructura del programa de computadora. Enseguida se presentan las prue bas de ajuste y validación hechas para comprobar el comportamiento del modelo con respecto al esperado en diversas situaciones.

Por último se hace un breve análisis económico de las ventajas que se obtienen con el desarrollo de modelos matemáticos aplicados a simuladores de centrales termoeléctricas.

CAPITULO 1

DESCRIPCION DE LA CENTRAL TERMoeLECTRICA PROTOTIPO

1. DESCRIPCION DE LA CENTRAL TERMOELECTRICA PROTOTIPO.

1.1 Generalidades.

La central termoeléctrica que se utiliza como prototipo en el desarrollo del modelo que se presenta en esta tesis es la "Francisco Pérez Ríos" ¹. Esta central se localiza a 96 Km. al noroeste de la Ciudad de México y a 8 Km. al sur de la Ciudad de Tula en el Estado de Hidalgo.

Dicha central forma parte del Sistema Interconectado Nacional, integrándose por un lado con las líneas de transmisión a 400 KV, Tula, Salamanca, Tula-Poza Rica, Tula-Texcoco y Tula-Victoria-Nopala y por el otro lado con las líneas de transmisión a 230 KV, Tula-Apasco, Tula-Querétaro, así como otras que alimentan al área metropolitana.

La capacidad de generación de la central termoeléctrica es de 1,200 MW de potencia eléctrica, la cual se produce por medio de cuatro unidades, cada una de las cuales suministra 300 MW. El combustible y gas natural necesarios para la operación de esta central los proporciona la refinería "Miguel Hidalgo" de PEMEX, que se encuentra cercana a las instalaciones.

A plena carga el consumo diario es de 41,500 barriles de combustible o 7,500,000 metros cúbicos de gas. Con el objeto de centralizar el manejo de las cuatro unidades, los dispositivos de mando, protección y monitoreo de todos los equipos de la central se encuentran en el "Cuarto de Control". Además, desde este cuarto se efectúan a control remoto las maniobras que permiten la operación de los diferentes sistemas.

¹ Se agradece a C.F.E. la información proporcionada.

A continuación se hace una breve descripción de las diferentes etapas que tienen lugar en la conversión de la energía calorífica a energía eléctrica [1].

La transformación se efectúa en los tres equipos principales siguientes:

- El Generador de Vapor
- La Turbina de Vapor (Turbina)
- El Generador de Corriente Alterna (Generador)

Además de lo anterior, se cuenta con el equipo auxiliar que ayuda al funcionamiento del equipo principal. La transformación escalonada de la energía calorífica en energía eléctrica se lleva a cabo en las cuatro etapas que a continuación se enlistan:

- a) La primera etapa consiste en realizar el encendido del combustible lo cual tiene lugar en el generador de vapor.
- b) La segunda etapa se realiza también en el generador de vapor y consiste en el calentamiento del agua hasta convertirla en vapor.
- c) La tercera etapa tiene lugar en la turbina al girar su rotor por la acción del vapor procedente de la caldera.
- d) La cuarta etapa se efectúa en el generador eléctrico en donde la potencia mecánica de la turbina se transforma en potencia eléctrica.

Enseguida se analizan las cuatro etapas arriba mencionadas:

- a) Para realizar el encendido del combustible de la primera etapa es necesario que concurren los tres elementos de la combustión a saber: oxígeno, combustible y calor. El combustible se envía desde su tanque hasta los quemadores en el hogar del generador de vapor. El

oxígeno que se requiere está contenido en el aire, el cual es impulsado por los ventiladores de tiro forzado a través de ductos y del precalentador de aire regenerativo hasta llegar al interior del hogar, en donde se mezcla con el combustible. Por último, el calor necesario se obtiene de la flama de los pilotos que hace que entren en reacción el combustible y el oxígeno produciéndose así la energía calorífica.

b) El calor que se produce por el proceso de combustión se absorbe por las paredes de agua con el fin de elevar la temperatura de ésta hasta llegar al punto de evaporación. El vapor se separa del agua en el domo superior en donde sale para pasar a través del sobrecalentador y alcanzar una temperatura adicional para dar las características de vapor seco que requiere la turbina.

c) En la tercera etapa el vapor, ya sobrecalentado, es conducido al interior de la turbina en donde la energía calorífica se convierte en energía mecánica al chocar con los álabes produciéndose como consecuencia el giro del rotor de la turbina. El vapor después de trabajar en la turbina pasa al condensador en donde se enfría por medio del agua de la torre de enfriamiento convirtiéndose en agua de condensado. La bomba de condensado succiona el agua y la hace pasar por los cuatro calentadores de baja presión y el deareador para que después las bombas de agua de alimentación de la caldera envíen el fluido a través de los calentadores de alta presión y del economizador al domo superior y así producir nuevamente vapor.

d) El giro del rotor de la turbina produce a su vez el movimiento del generador eléctrico, creándose así la electricidad que se lleva mediante conductores al transformador, en donde su tensión se eleva para transportarse a grandes distancias mediante las líneas de transmisión.

Todo el proceso descrito se ilustra en el diagrama de flujo de la figura número 1.1

1.2 Sistemas que Componen la Central Termoeléctrica.

Con el objeto de facilitar la descripción se divide a la unidad en dos partes: sección mecánica y sección eléctrica, las cuales a su vez se subdividen en varios sistemas que a continuación se describen [3] .

1.2.1 Sección Mecánica.

a) Generador de Vapor.

El generador de vapor trabaja con gas natural o con aceite combustible y suministra aproximadamente 977.0 ton/hr de vapor cuando se encuentra con carga máxima. La caldera consta de los siguientes elementos: domo de vapor, economizador, recalentador de vapor, dos precalentadores de aire regenerativo y dos calentadores de aire a vapor.

Además se cuenta con el sistema de control de combustión que tiene como objetivo principal el definir las proporciones correctas de la mezcla de aire y combustible, con el fin de liberar la cantidad de calor que permita producir el vapor necesario que el turbogenerador demanda según su carga.

b) Sistema de Combustible.

El sistema de combustible de la unidad esta compuesto por:

- b.1 Tanques de almacenamiento y diario.
- b.2 Sistema de descarga de combustible.
- b.3 Sistema de bombeo.
- b.4 Calentadores de aceite combustible.
- b.5 Sistema de quemadores.

c) Turbogenerador.

Este sistema se encuentra constituido por la turbina, el equipo de supervisión y de prueba, el sistema de sellos de vapor, el del tornaflecha y el sistema de control de la turbina. Este último regula la velocidad de la misma, controlando el flujo de vapor que le llega por medio de las válvulas de gobierno, interceptoras, de estrangulamiento y de paro de recalentado. Además le brinda protección en caso de ocurrencia de algún disturbio que pueda dañarla.

La turbina es del tipo impulso-reacción con escape doble de vapor que descarga directamente al condensador. Los rotores de alta presión y presión intermedia están contruidos en el mismo cilindro con el fin de reducir la longitud total de la turbina. La unidad consta de cuatro cajas de vapor, las cuales se conectan a la carcasa de alta presión y de presión intermedia.

d) Sistemas de Vapor.

Los sistemas de vapor incluyen el sistema de vapor principal que transporta el vapor de la caldera hasta la turbina; el sistema de extracción de vapor que interconecta los puntos de extracción con los calentadores de condensado y agua de alimentación; el sistema de venteo que se utiliza para eliminar incondensables del domo, del deareador y del condensador; el sistema de vapor auxiliar y su equipo de operación correspondiente.

e) Sistema de Condensado, Agua de Alimentación y Extracción de Incondensables.

El sistema de condensado o de baja presión abarca desde el condensador hasta la entrada al deareador y tanques de oscilación.

El sistema de agua de alimentación o de alta presión comprende desde la succión de sus bombas hasta la entrada en el economizador de la caldera.

El sistema de extracción de incondensables incluye las conexiones para la extracción de aire del condensador, así como los eyectores de aire y los dispositivos de disipación a la atmósfera.

f) Sistema de Agua de Circulación.

Este sistema suministra el flujo de agua que se requiere para condensar el vapor del escape de la turbina, además de proporcionar agua de enfriamiento a todos los sistemas de chumaceras y cojinetes de los equipos auxiliares en donde sea necesario.

g) Sistema de Agua de Enfriamiento.

Parte del agua de circulación es utilizada como agua de enfriamiento siendo distribuida en los siguientes equipos:

- g.1 Enfriadores del aceite lubricante para los calentadores de aire regenerativos.
- g.2 Enfriadores de las bombas de agua de circulación del generador de vapor.
- g.3 Condensadores de la unidad enfriadora de muestras.
- g.4 Compresores de aire.
- g.5 Unidad de aire acondicionado.
- g.6 Enfriadores para el aceite de las bombas de alimentación de agua del generador de vapor.
- g.7 Enfriadores del aceite lubricante del turbogenerador.
- g.8 Enfriadores del aceite.
- g.9 Enfriadores del aceite de sellos del generador.
- g.10 Enfriadores primarios para muestreo.

g.11 Enfriadores de H₂ del generador.

g.12 Enfriadores de los excitadores.

h) Sistema de Dosificación de Químicos.

El propósito de la dosificación química es inyectar soluciones de concentración y en cantidad apropiadas para controlar los niveles de PH, conductividad y oxígeno disueltos en el flujo, evitando así en lo posible la corrosión e incrustaciones que se pueden formar en las tuberías y equipo.

i) Sistemas de Nitrógeno, Hidrógeno y Bióxido de Carbono.

El gas nitrógeno se usa para purgar el aire del domo de la caldera, de los calentadores de alta y baja presión (excepto el 1 y 2), así como del deareador durante paros prolongados.

Una atmósfera de hidrógeno se mantiene dentro del generador eléctrico en operación normal para enfriamiento del mismo.

Finalmente el bióxido de carbono es utilizado con el objeto de purgar el aire del generador cuando se va a iniciar un llenado con gas hidrógeno o si se va a cambiar el existente.

1.2.2 Sección Eléctrica.

a) Generador.

El generador es movido por la turbina de vapor siendo producida la energía en 20 KV, 3 fases, 60 Hz. La conexión del generador es en estrella con neutro conectado a tierra a través de una impedancia que en este caso es un transformador con resistencia en derivación en el secundario.

b) Sistema de 20 KV y Transformadores Principales.

El sistema de 20 KV forma la red eléctrica entre las terminales del generador, los bancos de transformadores principales, los transformadores auxiliares y el transformador del neutro del generador. El circuito de interconexión comprende el bus de fase aislada, el equipo de protección contra sobretensiones, los transformadores de corriente y potencial que alimentan a los relevadores de protección e instrumentos de medición y la impedancia del neutro del generador.

c) Subestación Principal 230 KV.

A esta subestación se encuentran conectadas las unidades generadoras 1 y 2, el transformador de arranque de la planta, cuatro líneas de transmisión y el banco de autotransformadores que liga a esta subestación con la de 400 KV a la cual se conectan las unidades 3 y 4.

d) Equipos Auxiliares.

d.1 Sistemas eléctricos auxiliares 4160 V. y 480 V.

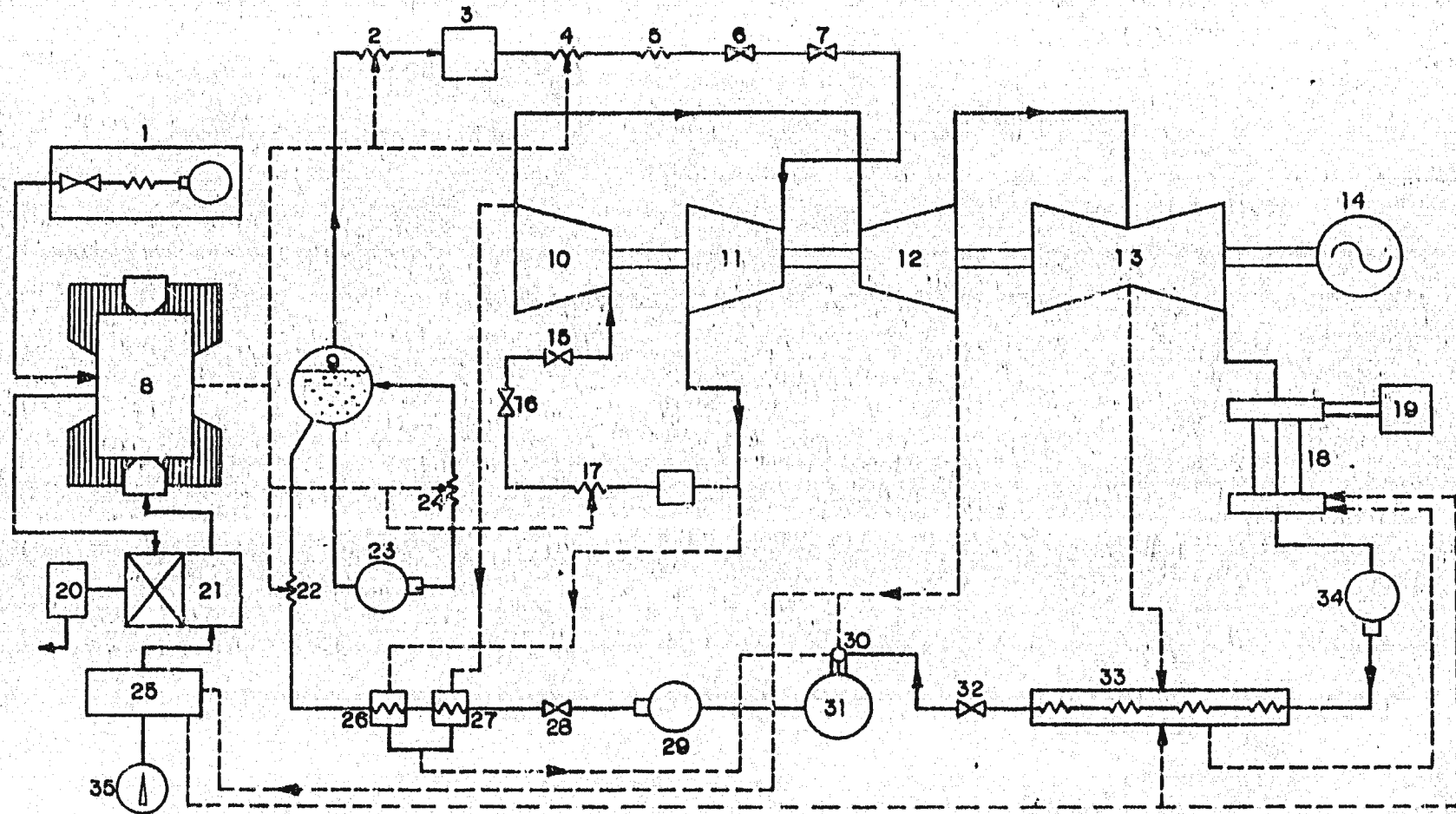
d.2 Tableros de relevadores de protección-planta.

d.3 Sistema de anunciadores.

d.4 Sistemas de 125 V.C.C. y 120 V.C.A.

d.5 Sistema de alumbrado.

d.6 Sistema de intercomunicación y teléfonos.



UNAM
 = FES - CUAUTILAN =
 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA CENTRAL
 TERMOELECTRICA FRANCISCO PEREZ
 RIOS
 JUAN G. ALTAMIRANO FEB. 1.9 1962

Claves correspondientes a la figura 1.1

1. Sistema de combustión.
2. Sobrecalentador de baja temperatura.
3. Atemporador.
4. Sobrecalentador de temperatura intermedia.
5. Sobrecalentador de alta temperatura.
6. Válvula de estrangulamiento (2).
7. Válvula de gobierno (8).
8. Hogar.
9. Domo.
10. Turbina de presión intermedia 1.
11. Turbina de alta presión.
12. Turbina de presión intermedia 2.
13. Turbina de baja presión.
14. Generador eléctrico.
15. Válvula interceptora (2).
16. Válvula de paro de recalentado (2).
17. Recalentador.
18. Condensador.
19. Sistema de agua enfriamiento.
20. Chimenea.
21. Precalentador regenerativo.
22. Economizador.
23. Bombas de recirculación.
24. Paredes de agua.
25. Precalentador de aire a vapor.
26. Precalentador de alta presión 2.
27. Precalentador de alta presión 1.
28. Válvula de control de agua de alimentación.
29. Bombas de alimentación.
30. Deareador.
31. Tanque de oscilación.
32. Válvula de control de nivel del deareador.
33. Precalentadores de baja presión.
34. Bombas de condensado.
35. Ventilador de tiro forzado.

CAPITULO 2

DESCRIPCION FUNCIONAL DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA TURBINA

2. DESCRIPCION FUNCIONAL DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA TURBINA.

2.1 Generalidades.

Debido a que la operación de una central termoeléctrica debe llevarse a cabo de la manera más eficiente posible, es necesario que sus componentes trabajen en forma óptima.

Por lo tanto como la turbina es parte esencial en el proceso de generación de energía eléctrica se requiere tener un buen control de ella. Esto último se logra por medio del sistema de control de la turbina el cual tiene como funciones primordiales las de regular la velocidad de la misma y de controlar la carga de la unidad. El control no solo sirve para lo anterior sino que además incluye dispositivos de protección en diferentes situaciones.

En éste capítulo, en primer término, se proporciona una lista de los diversos elementos que constituyen al sistema de control, para después describir la función que desempeñan cada uno de ellos [9]. La representación gráfica de los dispositivos se muestra en la figura 2.1

2.2 Identificación de los Elementos.

Los elementos que conforman al sistema de control de la turbina son los siguientes :

- a) Válvulas de Gobierno y Caja de Distribución de Vapor.
 - a.1 Servomotor de las válvulas de gobierno.
 - a.2 Válvula de prueba del servomotor de las válvulas de gobierno.
 - a.3 Switch de señal del servomotor de las válvulas de gobierno.

- b) Válvula Interceptora.
 - b.1 Servomotor de la válvula interceptora.
 - b.2 Válvula de prueba del servomotor de la válvula interceptora operada por solenoide.
 - b.3 Switch de señal del servomotor de la válvula interceptora y switch de prueba.
- c) Válvula de Paro de Recalentado.
 - c.1 Servomotor de la válvula de paro de recalentado.
 - c.2 Válvula de prueba del servomotor de la válvula de paro de recalentado operada por solenoide.
 - c.3 Switch de prueba y switch de señal de posición de la válvula de paro de recalentado.
- d) Válvula de Estrangulamiento.
 - d.1 Servomotor de la válvula de estrangulamiento.
 - d.2 Válvula de prueba del servomotor de la válvula de estrangulamiento operada por solenoide.
 - d.3 Switch límite de la válvula de estrangulamiento.
- e) Controlador de Válvulas de Estrangulamiento.
- f) Impulsores de la Bomba Principal de Aceite y del Gobernador.
- g) Gobernador Principal.
 - g.1 Transformador del gobernador principal.
 - g.2 Cambiador de velocidad.

- h) Autotransferencia del Gobernador.
- i) Limitador de Carga.
- j) Válvula de Disparo de Emergencia del Sistema de Gobierno.
- k) Gobernador Auxiliar.
- l) Válvula de Desfogue.
- ll) Anticipador de Rechazo de Carga.
- m) Regulador de Presión de Estrangulamiento.
- n) Orificios Múltiples y Válvulas Check.
- o) Mecanismo de Disparo por Sobrevelocidad.
- p) Dispositivos de Protección.
 - p.1 Disparo por bajo vacío.
 - p.2 Disparo por baja presión de aceite de cojinetes.
 - p.3 Disparo por cojinete de empuje.
 - p.4 Disparo operado por solenoide.
- q) Válvula de Purga por Disparo.

2.3 Descripción Funcional.

- a) Válvulas de Gobierno y Caja de Distribución de Vapor.

Dos cajas de distribución controlan el vapor que se suministra a la turbina de alta presión, dentro de cada una de ellas se encuentran cuatro válvulas de gobierno además de los elementos que a continuación se enlistan:

a.1 Servomotor de las válvulas de gobierno.

Este se encuentra constituido por el pistón del servomotor, pistón relevador y émbolo relevador, el vástago del primero se encuentra conectado a la palanca de operación de las válvulas, de tal manera que un movimiento hacia arriba del pistón de operación abre las válvulas y un movimiento hacia abajo las cierra.

La operación del servomotor es la siguiente, el aceite de control entra en la cámara superior del pistón relevador, creándose así una presión de control que ejerce una fuerza tendiente a mover hacia abajo a dicho dispositivo. Esta fuerza es opuesta por el resorte de compresión que tiende a mover hacia arriba el pistón relevador, en consecuencia, cualquier cambio en la presión de control desbalancea las fuerzas y origina que el pistón se mueva hasta que la fuerza del resorte balancee la de la presión de control.

El movimiento del pistón relevador produce un movimiento correspondiente del émbolo relevador, por lo tanto, si la presión del aceite de control sufre un incremento, el aceite de alta presión fluye a la cámara inferior del pistón del servomotor haciendo que éste se mueva hacia arriba y por lo tanto se abren las válvulas de gobierno. En el caso de una disminución en la presión del aceite de control el pistón relevador se mueve hacia arriba cerrando los puertos por los cuales entra el aceite de alta presión y abre el pasaje al dren por lo que el pistón del servomotor baja y las válvulas de gobierno se cierran;

a.2 Válvula de prueba del servomotor de las válvulas de gobierno.

Esta válvula sirve para probar la holgura del vástago de las válvulas de gobierno durante operación normal. Esto se lleva a cabo girando un volante manualmente o bien por medio de un motor que se controla remotamente, de cualquiera de las formas se crea una presión que hace que se cierren las válvulas.

a.3 Switch de señal del servomotor de las válvulas de gobierno.

El switch está conectado al vástago del pistón del servomotor, por lo que cualquier movimiento origina la rotación de la palanca del switch, y consecuentemente de su eje. Conforme gira éste último, unas levas abren o cierran los contactos lo que da una indicación de la posición de las válvulas de gobierno.

b) Válvula Interceptora.

Esta válvula es de tipo hidráulico y se encuentra montada en la tapa de la carcasa de la turbina de presión intermedia. Existen dos, una del lado derecho y otra del lado izquierdo.

b.1 Servomotor de la válvula interceptora.

El funcionamiento de este servomotor es similar al descrito en el punto a,1 del inciso a).

b.2 Válvula de prueba del servomotor de la válvula interceptora.

Esta válvula de prueba se opera por un solenoide, el cual se encuentra desenergizado durante operación normal, cuando se requiere efectuar la prueba el solenoide es energizado, lo que provoca que el conducto por el cual se drena el aceite que se encuentra debajo del pistón relevador se cierre, creándose un efecto igual al descrito en la válvula de prueba del servomotor de válvulas de gobierno.

b.3 Switch de señal del servomotor de la válvula interceptora

El switch opera de la misma forma que el descrito en el punto a,3 del inciso a).

c) Válvula de Paro de Recalentado.

La válvula de paro de recalentado está instalada en la línea que se encuentra entre el recalentador y la válvula interceptora, su propósito es dar un dispositivo de seguridad adicional para evitar la sobrevelocidad de la turbina, debiendo cerrarse cuando opera el mecanismo de disparo por sobrevelocidad.

c.1 Servomotor de la válvula de paro de recalentado.

La operación de este servomotor es similar al de los anteriores.

c.2 Válvula de prueba del servomotor de la válvula de paro de recalentado operada por solenoide.

La válvula de prueba de este servomotor es igual al de la válvula interceptora.

c.3 Switch de prueba y de señal de posición de la válvula de paro de recalentado.

Este switch opera de la misma forma que los descritos anteriormente.

d) Válvula de Estrangulamiento.

Esta válvula se encuentra en la línea de flujo de vapor principal que va hacia la turbina de alta presión y tiene dos funciones importantes, una en el arranque que es la de controlar el flujo de vapor y la otra en operación como protección debiendo cerrarse cuando ocurre un disparo.

d.1 Servomotor de la válvula de estrangulamiento.

El servomotor de esta válvula funciona de la misma forma que los anteriores.

d.2 Válvula de prueba del servomotor de la válvula de estrangulamiento operada por solenoide.

Está válvula opera igual que las descritas para las válvulas interceptora y de paro de recalentado.

d.3 Switch límite de la válvula de estrangulamiento.

El switch de límite sirve para detectar la posición de la válvula de estrangulamiento y funciona de la misma forma que los descritos anteriormente.

e) Controlador de Válvulas de Estrangulamiento.

El controlador es una válvula sensora de regulación de presión de aceite, la cual controla el posicionamiento de los servomotores de las válvulas de estrangulamiento. El aceite de alta presión se admite a la línea de aceite de control de estrangulamiento a través de un orificio localizado en el cuerpo de orificios múltiples y válvulas check. Otra de las funciones que desempeña este dispositivo, es el de regular el flujo de vapor que va hacia la turbina por medio de la posición de las válvulas de estrangulamiento durante el arranque de la unidad hasta que el gobernador principal puede tomar el mando.

Cuando opera el mecanismo de disparo por sobrevelocidad, el aceite de auto-stop se drena y la presión del aceite de control se abate, operación que se lleva a cabo por medio de los orificios múltiples y válvulas check, originándose que los servomotores cierran las válvulas de estrangulamiento.

f) Impulsores de la Bomba Principal de Aceite y del Gobernador.

Existen dos impulsores localizados en el eje de la turbina de alta presión, uno de ellos sirve como bomba principal de aceite y el otro es el impulsor del gobernador, el cual descarga aceite que va hacia el transformador del mismo. Los cambios de presión pro

ducidos por los cambios de velocidad constituyen la fuerza que controla los servomotores de las válvulas de gobierno.

g) Gobernador Principal.

Este es un dispositivo sensible a la velocidad que sirve para controlar la velocidad de la turbina, para sincronización y como controlador de carga cuando la turbina está operando en paralelo con otras unidades. El gobernador se encuentra constituido por los siguientes elementos:

g.1 Transformador del gobernador principal.

El transformador funciona de tal manera que aumenta los cambios de presión de la descarga del impulsor del gobernador y su operación es como sigue. El aceite a la presión de descarga del impulsor ejerce una fuerza hacia arriba en el transformador, ésta es opuesta por la fuerza hacia abajo del resorte de compresión, por lo que cualquier diferencia producirá un cambio en la posición de su válvula de copa y, por lo tanto, se modificará la presión existente en la parte inferior de ella. Al disminuir esta presión, el aceite de control comienza a drenarse cerrándose por consiguiente las válvulas de gobierno.

g.2 Cambiador de velocidad

El cambiador de velocidad tiene como función ajustar la fuerza del resorte que actúa sobre la válvula de copa del transformador lo cual se lleva a cabo por medio de un motor operado desde el cuarto de control.

h) Autotransferencia del Gobernador.

El propósito de la autotransferencia es eliminar la operación fatigosa del gobernador principal, cuando es necesario disminuir la velocidad de la turbina después de una pérdida súbita de carga. Lo anterior se logra mediante las tres acciones siguientes: moviendo el gobernador en la dirección de bajar carga, disminuyen-

do la presión del aceite de alta presión con el gobernador auxiliar y drenando el aceite de control por medio de la válvula de desfogue.

i) Limitador de Carga.

El limitador de carga controla la apertura máxima de las válvulas de gobierno. Esto se hace ajustando la compresión del resorte de su correspondiente válvula de copa a cualquier presión de control de gobierno entre marcha en vacío y a plena carga. Cuando la presión de aceite de control se eleva arriba de la presión de control del limitador, una válvula check se abre evitando así que el gobernador abra más las válvulas de gobierno.

j) Válvula de Disparo de Emergencia del Sistema de Gobierno.

La función de esta válvula es conectar al dren la línea de aceite de control de gobierno cuando ocurre un disparo.

k) Gobernador Auxiliar.

El gobernador auxiliar actúa como resultado de una sobrevelocidad ayudando al gobernador principal en el drenado del aceite de control, además dicho mecanismo es sensible a cambios en la aceleración.

Este dispositivo es similar al principal con la diferencia de que no tiene motor para su ajuste y cuenta con un sistema de fuelles de retardo de tiempo. El ajuste del gobernador auxiliar es más allá del rango del gobernador principal.

l) Válvula de Desfogue.

Esta válvula se mantiene cerrada por la acción del gobernador auxiliar y desfoga al dren el aceite de control de gobierno, cuando el primero tiene el control de la unidad. Tan pronto como el gobernador auxiliar rearma, su válvula de copa cierra y el control es devuelto al gobernador principal.

11) Anticipador de Rechazo de Carga.

El anticipador de rechazo de carga es un dispositivo que sirve para detectar una pérdida de carga, cerrando las válvulas de gobierno e interceptoras en proporción a dicha pérdida evitando que se eleve la velocidad de la turbina. Se encuentra constituido por un switch que detecta la presión de entrada de vapor a la turbina de presión intermedia, un relevador de corriente y una válvula operada por solenoide.

m) Regulador de Presión de Estrangulamiento.

El regulador de presión es un dispositivo diseñado para proteger a la turbina contra cambios repentinos de la presión de vapor principal. Este elemento detecta la presión de aire de control de la caldera que es proporcional a la presión de vapor. Si dicha variable cae abajo de un valor predeterminado se cierran las válvulas hasta que la caldera pueda mantener una presión proporcional a la carga dada. Si las condiciones de la caldera persisten la carga se reduce a algún valor mínimo arriba de marcha en vacío.

Cuando se desea sacar de servicio al regulador por un corto tiempo, una válvula de solenoide se energiza cerrándose la conexión del aceite de control.

n) Orificios Múltiples y Válvulas Chek.

Con el objeto de simplificar la tubería del aceite de operación de las válvulas de estrangulamiento y de las de paro de recalentado, se cuenta con dos montajes de orificios múltiples, los cuales hacen más fácil la conexión al mecanismo de disparo por sobrevelocidad. Cuando éste actúa todas las cámaras del aceite de operación de los servomotores mencionados se conectan simultáneamente al dren a través de una tubería sencilla. En estos bloques se encuentran también las válvulas de prueba operadas por solenoide de las válvulas de estrangulamiento y de paro de recalentado.

Las válvulas check tienen la función de abrir y conectar al dren el aceite de control de las válvulas de estrangulamiento cuando ocurre un disparo de la turbina.

o) Mecanismo de Disparo por Sobrevelocidad.

El trabajo que desempeña este mecanismo consiste en detener todo el flujo de vapor dentro o a través de toda la turbina. El cuerpo del mecanismo de disparo por sobrevelocidad está roscado en el extremo del eje de extensión del rotor de la turbina con rosca opuesta a la dirección de rotación. Existe un peso de disparo que normalmente se mantiene en su posición interior por medio de un resorte de compresión, si la velocidad de la turbina se incrementa al punto en el cual está ajustado el mecanismo, la fuerza centrífuga vence a la compresión del resorte, lo cual hace que el peso salga de su lugar ocasionando la apertura del dren por lo cual se abre el aceite de auto-stop y el aceite de control. El mecanismo es imposible de rearmar mientras la velocidad del rotor no disminuya hasta un 1% arriba de la velocidad normal, que es cuando el peso retorna a su posición.

p) Dispositivos de Protección.

Además del mecanismo de disparo por sobrevelocidad, la turbina cuenta con protecciones adicionales contra diversas contingencias posibles, que puedan causar daños a la unidad si ésta no fuera sacada de servicio inmediatamente y son los siguientes:

p.1 Disparo por bajo vacío.

Este dispositivo se encuentra diseñado para detener a la turbina en el caso de una seria elevación de la presión de desfogue. Cuando dicho caso sucede un diafragma se mueve hacia arriba abriendo la válvula de disparo y parando así la unidad. Para evitar el disparo de la unidad durante el período de arranque cuando el vacío es menor que el de ajuste, se tiene un trinquete de disparo el cual se desenclava en estos casos.

p.2 Disparo por baja presión de aceite de cojinetes.

La función de este dispositivo es detener a la unidad si la presión de aceite de cojinetes de la turbina se desvía demasiado de su punto de ajuste durante operación.

p.3 Disparo por cojinete de empuje.

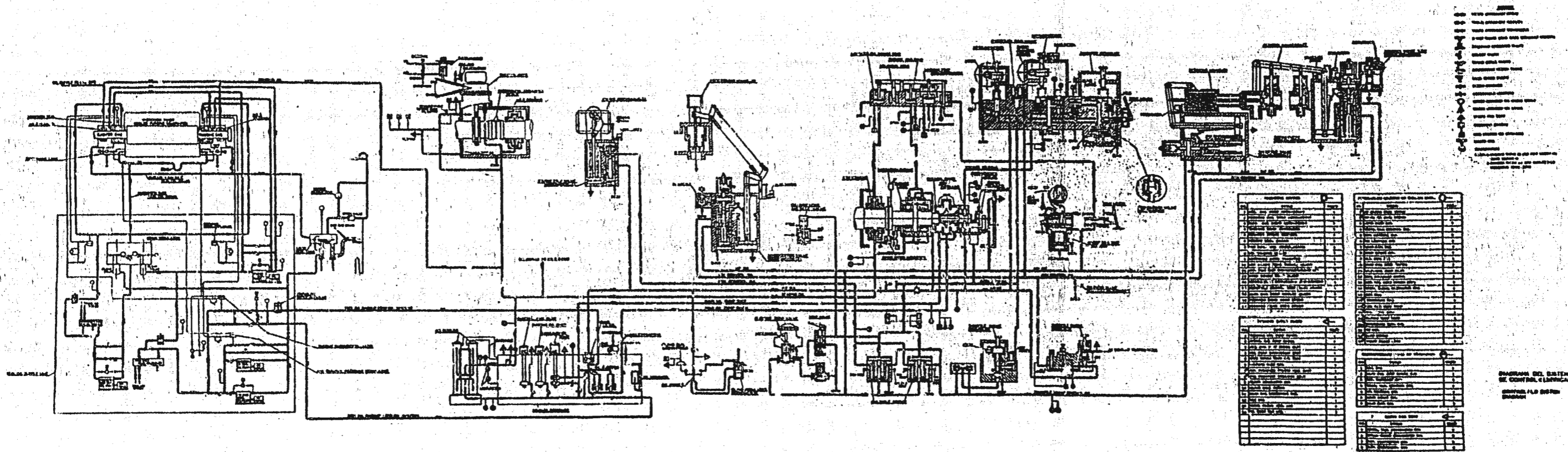
El dispositivo de disparo por cojinete de empuje se utiliza para detener a la unidad cuando la presión de control de disparo de cojinete se eleva del predeterminado.

p.4 Disparo operado por solenoide.

Este solenoide se energiza a control remoto cuando se requiere parar la unidad, al efectuar esta operación, un pasador se mueve hacia abajo girando la palanca de operación que abre la válvula de disparo parando a la unidad.

q) Válvula de Purga por Disparo.

La válvula de purga es un dispositivo que cierra la extracción número cinco en caso de un disparo como medida de protección. Dicha válvula también tiene la opción de cierre desde el tablero de control.



CAPITULO 3

DEFINICION DE HIPOTESIS Y SIMPLIFICACIONES

3. DEFINICION DE HIPOTESIS Y SIMPLIFICACIONES.

3.1 Generalidades.

En este capítulo se definen y describen las hipótesis que se utilizan así como las simplificaciones que se realizan al sistema de control de la turbina, con el fin de cumplir con los requerimientos de su simulación. Partiendo de esta última premisa es importante, en primer término, explicar que se entiende por un proceso de simulación. Existen en la literatura especializada un buen número de definiciones diferentes, pero en términos generales se puede decir que "Simulación es la utilización del modelo de un sistema real encaminado a entender el comportamiento del mismo o de evaluar varias estrategias (con los límites impuestos por uno o varios criterios) para su operación". La anterior definición se complementa definiendo el modelo de un sistema real [8], como el conjunto de objetos o ideas que lo representan pero que son diferentes a su esencia, y aquí el término real se utiliza en el sentido de "en existencia o capaz de comenzar su existencia".

Un diagrama de bloques del proceso por medio del cual se llega a realizar una simulación se ilustra en la figura 3.1, en donde la entrada es el sistema a ser simulado y la salida es la simulación del mismo.

La primera etapa es el desarrollo del modelo matemático del sistema, esto implica la generación de ecuaciones que por lo general se efectúa con diagramas de bloques o sistemas de ecuaciones u otros algoritmos matemáticos. La segunda etapa en el proceso, es el desarrollo del modelo matemático para su ejecución en la computadora, para ello es necesario seleccionar los algoritmos y métodos numéricos que faciliten el diseño del programa de computadora. La tercera etapa consiste en la escritura del programa, lo que involucra el escoger una buena estructuración del mismo que genere la información de acuerdo a la secuencia lógica de eventos que tienen lugar en el sistema real. La cuarta etapa es esencial y consiste en la verificación de la simulación. Solo cuando se cumplen todas las etapas mencionadas se puede decir que se tiene terminado el proceso.

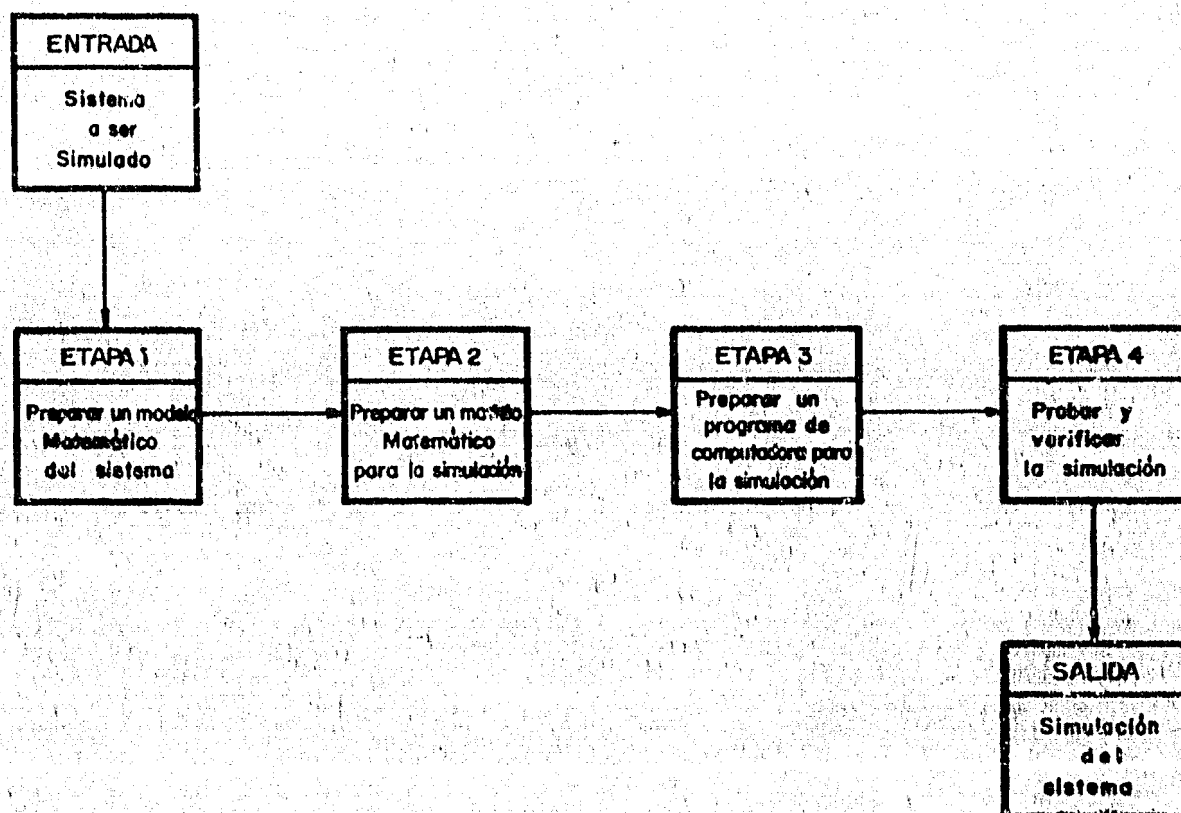


Fig. 3.1.

En el presente caso la simulación tiene ciertas restricciones debido a que se utiliza para entrenamiento de operadores; una de ellas es que la ejecución del programa del modelo se tiene que realizar en tiempo real. Además como se tiene interacción con diversos instrumentos tales como medidores de presión, de porcentaje de apertura, etc., es necesario tener ciertos rangos de precisión que es importante respetar para un mejor desempeño de la simulación, (en este caso se consideran rangos del 3 al 5 por ciento de precisión).

3.2 Lista de Hipótesis y Simplificaciones.

Tomando en cuenta lo mencionado en el punto anterior, se establecen una serie de hipótesis y simplificaciones con el fin de facilitar la simulación del sistema de control de la turbina.

A continuación se proporcionan las hipótesis y simplificaciones con sus correspondientes justificaciones.

- a) El sistema se modela con base en interrelaciones funcionales de sus componentes.
- Un modelo matemático con bases físicas resulta en un sistema con un gran número de variables y ecuaciones que genera un modelo demasiado complejo para los requerimientos de la simulación.
- b) Cada uno de los elementos principales se representa por medio de su función de transferencia.
- De esta forma se pueden modelar las interrelaciones entre componentes y la dinámica de cada uno de ellos.
- c) Se consideran inexistentes a los orificios múltiples.
- Sus efectos pueden ser modelados directamente en los bloques afectados.
- d) Las funciones de transferencia de los servomotores se consideran de primer orden con límites de razón de cambio y de salida.
- Permiten modelar la dinámica más importante de los mismos incluyendo los efectos de limitaciones físicas.
- e) Todas las señales de control internas se manejan con valores adimensionales entre cero y uno, por lo tanto, las variables de presión de vapor principal, así como las de velocidad y aceleración de la turbina que llegan con unidades en el sistema internacional se modifican por medio de transductores lineales con saturación.
- Permite trabajar con valores normalizados adimensionales del mismo orden de magnitud.

f) Las señales de apertura de las válvulas gobernadoras, interceptoras, de estrangulamiento y de paro de recalentado se dan con valores en porciento de posición.

- Dichas señales son requeridas de esta forma por el modelo de turbina para el cálculo del flujo de vapor que entra a la misma.

g). Los mecanismos motores del gobernador principal, el limitador de carga, el controlador de válvulas de estrangulamiento y de la válvula de prueba de las válvulas gobernadoras se consideran generadores de rampa con respuesta instantánea y un tiempo de subida y otro de bajada (Tiempo que utiliza el vástago en ir de su posición inferior a la superior y viceversa) además de contar con un limitador de salida.

- La utilización de generadores de rampa con respuesta instantánea se debe a que los tiempos que se mencionan en el punto anterior son muy grandes comparados con la dinámica de los elementos.

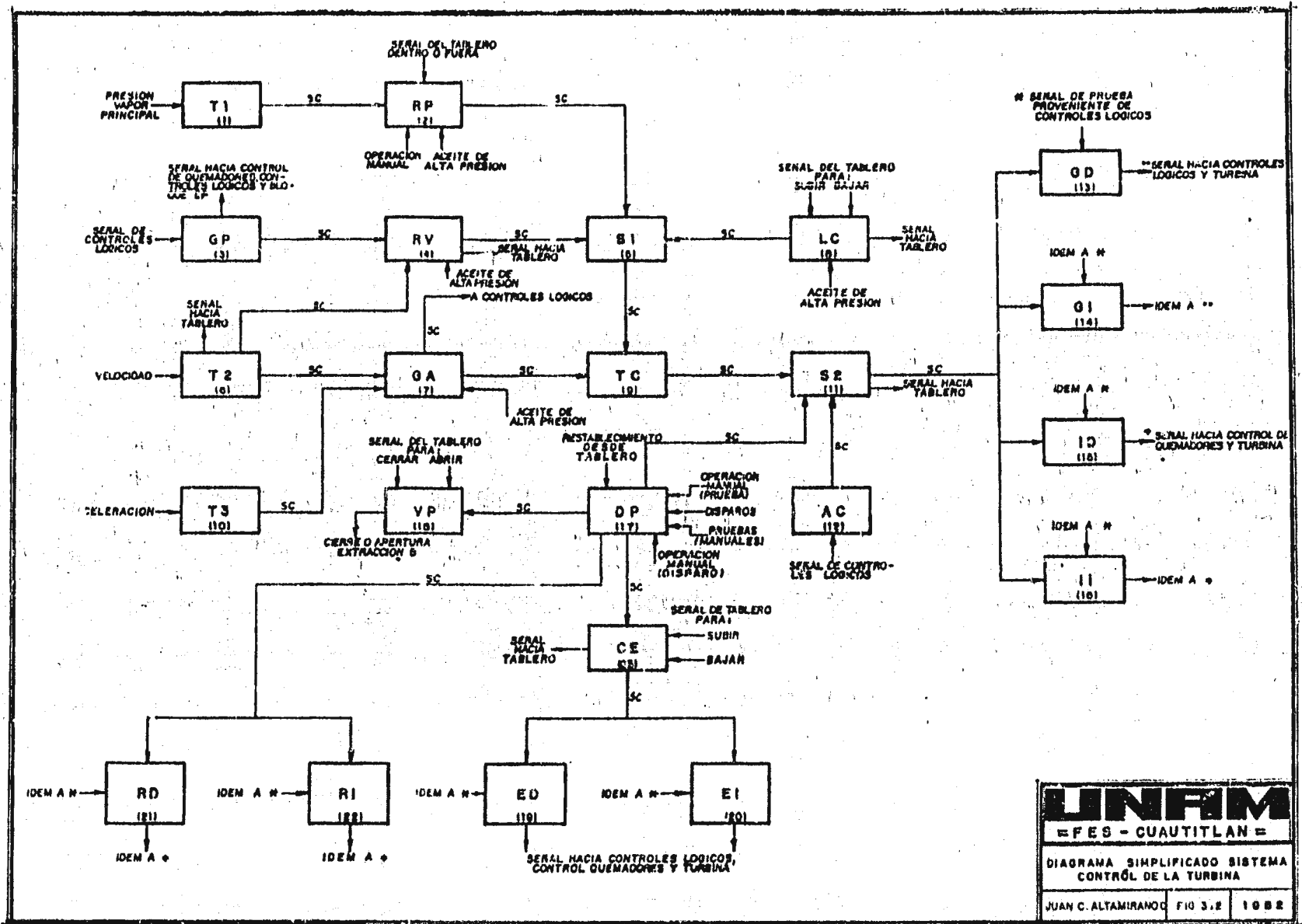
h) El anticipador de rechazo de carga y el mecanismo de disparo por sobrevelocidad se consideran de acción instantánea.

- Las constantes de tiempo de los elementos que se mencionan son muy pequeñas.

3.3 Diagrama Simplificado.

El siguiente paso en este capítulo es el presentar un diagrama simplificado, mostrado en la figura 3.2, en el cual se consideran los elementos importantes que constituyen el sistema de control. En dicho diagrama se toma en consideración a las hipótesis y simplificaciones que se establecieron en el punto anterior. El diagrama muestra a las interacciones tanto internas como con los siguientes sistemas: Control de Quemadores, Controles Lógicos, Control de Agua de Alimentación, Turbina, Condensado, Agua de Alimentación, Generador, Tableros (BTG, Auxiliares y Registradores) e Instructor.

La descripción de las claves que se utilizan en el diagrama simplificado se encuentran en el Apéndice I.



CAPITULO 4

ECUACIONES MATEMATICAS Y CALCULO DE LOS PARAMETROS CARACTERISTICOS

4. ECUACIONES MATEMATICAS Y CALCULO DE LOS PARAMETROS CARACTERISTICOS.

4.1 Generalidades.

El modelo matemático de un sistema es una analogía o aproximación del mismo, lo cual involucra la transformación de sus elementos a representaciones simbólicas que se expresan en una serie de ecuaciones. Los modelos matemáticos pueden ser continuos o discretos. Los modelos continuos se representan generalmente por medio de ecuaciones diferenciales que describen la proporción de cambio de sus variables con respecto al tiempo. Los modelos discretos se definen por funciones discretas (ecuaciones de diferencias). El modelo del control de la turbina es un proceso continuo el cual consta de ecuaciones lógicas, algebraicas y diferenciales. El objetivo entonces en este capítulo es establecer las ecuaciones que representan el comportamiento de los diferentes dispositivos que constituyen al sistema.

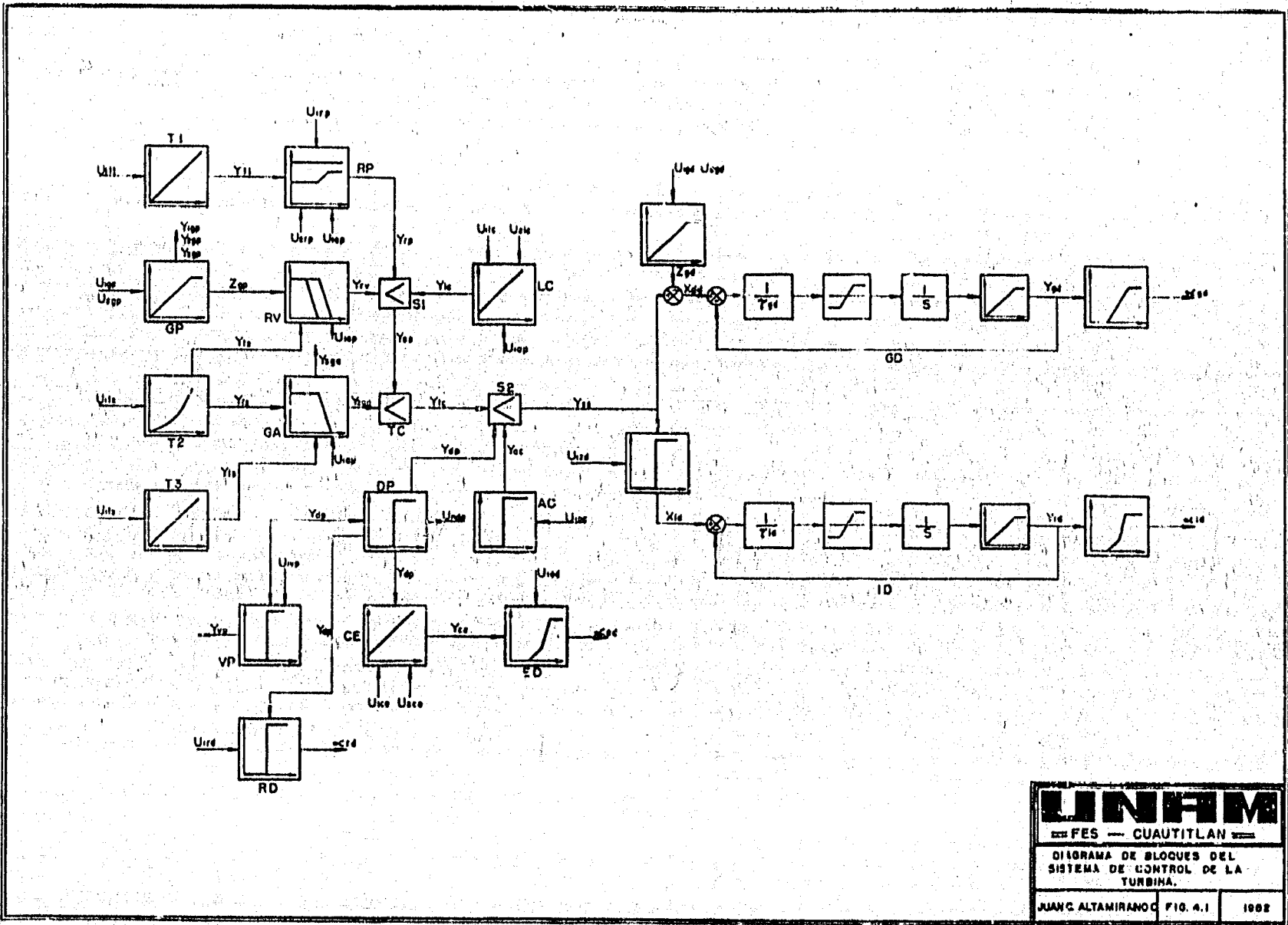
Con el objeto de facilitar el trabajo se genera en primer término el diagrama de bloques del control el cual se muestra en la figura 4.1

Posteriormente se desarrollan las ecuaciones para cada bloque, disponiéndose además de los modelos generalizados servomotor básico y mecanismo motor con limitador de salida, los cuales se utilizan debido a que se repiten en varias ocasiones en distintos elementos. Así mismo se calculan y establecen los parámetros de cada uno de los bloques, proporcionándose sus gráficas correspondientes en aquellos casos que lo requieren.

4.2 Desarrollo de los Modelos de los Elementos del Sistema de Control de la Turbina.

a) Bloque Generalizado Servomotor Básico.

El bloque servomotor básico está constituido por un integrador con constante de tiempo τ_g y retroalimentación directa. En adi-



UNAM
 FES — CUAUTILAN
 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA TURBINA.
 JUAN C. ALTAMIRANO C. FIG. 4.1 1988

ción se cuenta con un limitador de razón de cambio el cual se utiliza como su propio nombre lo indica para limitar la señal de salida a un valor máximo de rapidez de cambio. Además con el fin de tener una señal entre cero y uno se cuenta con un limitador de posición, todo esto se representa en la figura 4.2.

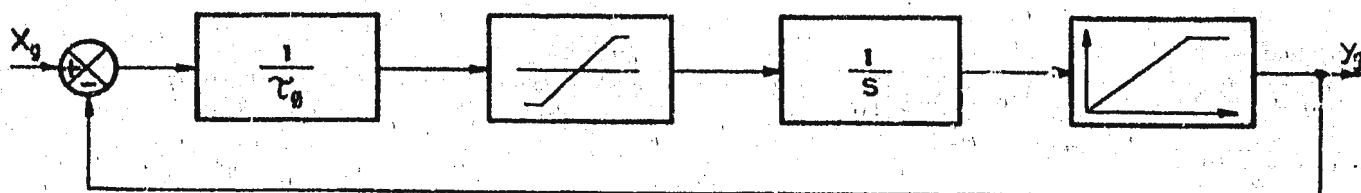


Fig. 4.2.

A continuación se proporcionan las ecuaciones que describen el servomotor básico.

a.1) Sistema de primer orden.

La señal de salida se da por medio de la ecuación (4.1) la cual representa a un sistema de primer orden, en ella se observa que el valor de la salida se calcula en cualquier instante de tiempo en función de la señal de entrada, la señal de salida anterior y la constante de tiempo de servomotor².

$$dy_g(t) / dt = (x_g - y_g) / \tau_g \quad (4.1)$$

a.2) Limitador de razón de cambio

El efecto de limitación de razón de cambio se obtiene a través de las siguientes ecuaciones.

$$\left| dy_g(t) / dt \right| > \epsilon_g \quad \therefore \quad dy_g(t) / dt = \text{SIGN} (dy_g(t) / dt) \epsilon_g \quad (4.2)$$

²Para nomenclatura y valores de parámetros ver Apéndice If.

$$dy_g(t) / dt > 0.0 \text{ y } y_g \geq 1.0 \quad \therefore \quad dy_g(t) / dt = 0.0, \quad (4.3)$$

$$dy_g(t) / dt < 0.0 \text{ y } y_g \leq 0.0 \quad \therefore \quad dy_g(t) / dt = 0.0. \quad (4.4)$$

a.3) Limitador de posición.

Los límites mínimo y máximo de posición se definen con las relaciones que se dan a continuación.

$$y_g > 1.0 \quad \therefore \quad y_g = 1.0, \quad (4.5)$$

$$y_g < 0.0 \quad \therefore \quad y_g = 0.0. \quad (4.6)$$

b) Bloque Generalizado Mecanismo Motor con Limitador de Salida.

La dinámica del mecanismo motor se establece con los tiempos de subida y de bajada de su vástago cuya gráfica se muestra en la figura 4.3. Dicha característica se representa por medio de un generador de rampa que cuenta también con limitador de salida..

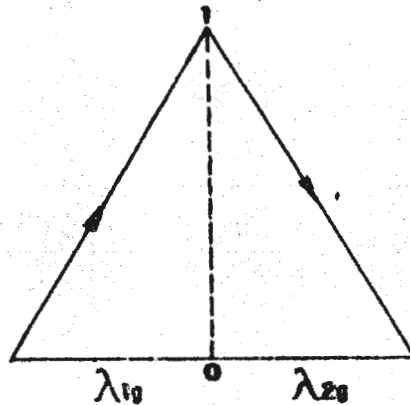


Fig. 4.3.

b.1) Generador de rampa

En estado estático se tiene que

$$dz_g(t) / dt = 0.0 \quad (4.7)$$

Si existen condiciones de subir o bajar el mecanismo, la posición del motor varía de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$U_{1g} = 1 \text{ y } z_g < 1.0 \quad \therefore \quad dz_g(t) / dt = 1 / \lambda_{1g}' \quad (4.8)$$

$$U_{2g} = 1 \text{ y } z_g > 0.0 \quad \therefore \quad dz_g(t) / dt = -1 / \lambda_{2g}' \quad (4.9)$$

b.2) Limitador de salida.

En este mecanismo es necesario representar los límites mínimo y máximo de posición por lo que se debe cumplir que

$$z_g > 1.0 \quad \therefore \quad z_g = 1.0, \quad (4.10)$$

$$z_g < 0.0 \quad \therefore \quad z_g = 0.0. \quad (4.11)$$

c) Transductor Número 1.

El transductor número uno es un dispositivo que convierte la señal de presión de vapor principal que llega con unidades en el sistema internacional a valores adimensionales. Para llevar a cabo lo anterior se toma como valor de normalización al de presión máxima de vapor³. La relación resultante es lineal y se muestra en la siguiente figura.

³Curva de ajuste del regulador de presión de estrangulamiento.

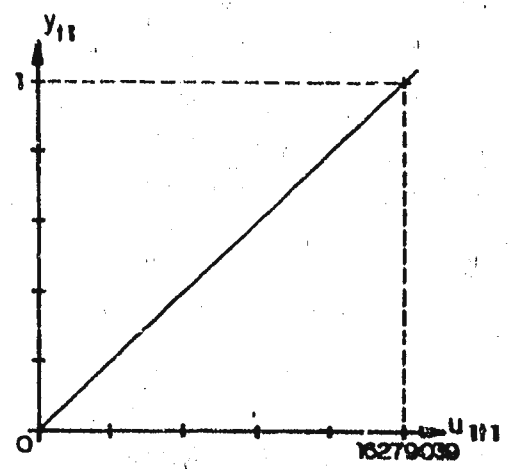


Fig. 4.4.

d) Regulador de Presión de Estrangulamiento.

El comportamiento de este dispositivo se representa por la curva normalizada³ de la figura 4.5. En la gráfica se consideran los casos que se presentan a saber; regulador fuera de servicio, en servicio pero no operando y en operación (zona de regulación lineal).

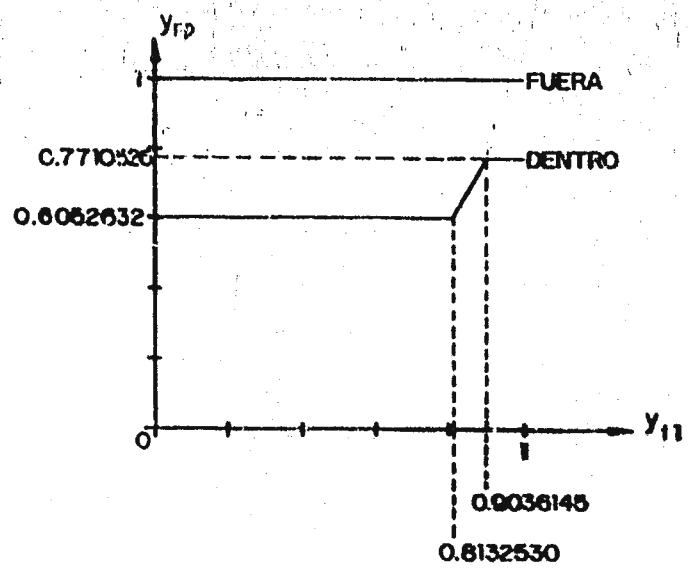


Fig. 4.5.

La interacción con tableros de control y alarmas se da con las relaciones (4.12) y 4.13).

$$U_{1rp} = 0 \quad \therefore \quad y_{rp} = 1.0, \tag{4.1}$$

$$K_{1rp} \leq y_{1t1} \leq K_{2rp} \quad \therefore \quad y_{rp} = 1. \tag{4.1}$$

La operación manual es descrita por

$$U_{2rp} = 1 \quad \therefore \quad y_{rp} = 1.0. \quad (4.14)$$

El regulador de presión de estrangulamiento así como otros dispositivos del control de la turbina tienen interacción con el sistema de lubricación, por lo tanto, cualquier variación en el valor de ajuste de éste último provoca un abatimiento en las salidas de control respectivas de cada elemento. En esta parte se proporciona la relación que considera dicho efecto, que es la misma para cualquier otro bloque que tenga esta interacción, modificándose únicamente la señal de control de salida por la del elemento correspondiente.

$$U_{lap} < K_g \quad \therefore \quad y_{rp} = (U_{lap} / K_g) y_{rp}. \quad (4.15)$$

e) Transductor Número 2.

De acuerdo a la información proporcionada por C.F.E. el comportamiento de la velocidad es lineal en el rango de 345.58 rad/seg a 414,7 rad/seg, pero de 0.0 rad/seg al primer valor solo se sabe que es cuadrático. Tomando en cuenta estas consideraciones se obtienen las curvas mostradas en la figura 4.6

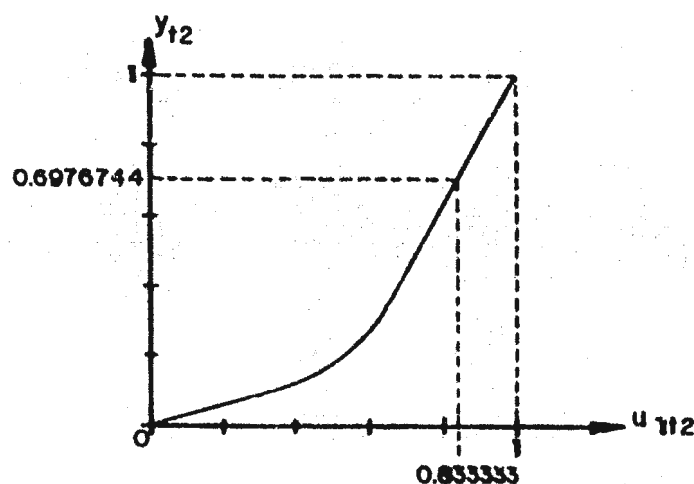


Fig. 4.6.

Para la primera zona se ajusta un polinomio cuadrático con pendiente y ordenada igual a la recta en el punto correspondiente

“Curva de ajuste del aceite de control.

a 0,8333333 y ordenada cero para un valor de velocidad igual a cero obteniéndose la siguiente ecuación:

$$K_{1t2} \leq U_{1t2} \leq K_{2t2} \quad \therefore \quad Y_{t2} = K_{3t2} U_{1t2}^2 - K_{4t2} U_{1t2}, \quad (4.16)$$

y en la zona de regulación lineal se obtiene

$$U_{1t2} > K_{2t2} \quad \therefore \quad Y_{t2} = K_{5t2} + K_{6t2} (U_{1t2} - K_{2t2}). \quad (4.17)$$

En este bloque se calcula la presión de impulsor lo cual se hace multiplicando la señal de control por el factor de normalización K_{7t2} .

f) Gobernador Principal.

Este dispositivo hace uso del bloque generalizado mecanismo motor con limitador de salida usando los siguientes parámetros⁵:

$$U_{1gp}, U_{2gp}, \lambda_{1gp}, \lambda_{2gp}, Z_{gp}$$

De la curva de ajuste del aceite de control y de la ecuación del regulador de velocidad se obtienen los valores de posición de no carga, mínima y máxima carga los cuales cumplen las siguientes condiciones.

Posición de no carga.

$$Z_{gp} = K_{1gp} \pm 3\% \quad \therefore \quad Y_{1gp} = 1, \quad (4.18)$$

$$Z_{gp} > K_{1gp} \pm 3\% \quad \therefore \quad Y_{1gp} = 0. \quad (4.19)$$

Posición de mínima carga

$$Z_{gp} = 0.0 \quad \therefore \quad Y_{2gp} = 1, \quad (4.20)$$

$$Z_{gp} > 0.0 \quad \therefore \quad Y_{2gp} = 0. \quad (4.21)$$

⁵ Informes de operación turbogeneradores, Mitsubishi, C.F.E.

Posición de máxima carga

$$z_{gp} = 1.0 \therefore y_{3gp} = 1, \quad (4.22)$$

$$z_{gp} < 1.0 \therefore y_{3gp} = 0. \quad (4.23)$$

g) Regulador de Velocidad

La señal de control del regulador de velocidad es función de la salida del transductor número dos y de la posición en la que se encuentre el gobernador principal. Esta última variable se representa por una familia de rectas función de la posición del vástago del gobernador principal. La gráfica que describe lo anterior es la siguiente.

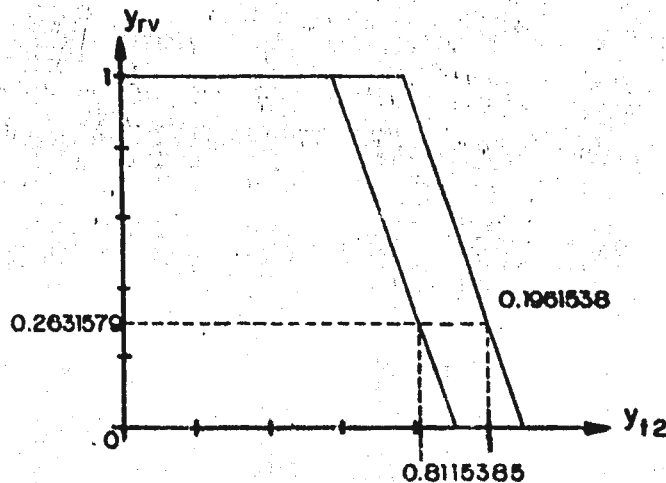


Fig. 4.7.

La familia de rectas se representa por la siguiente ecuación

$$y_{rv} = K_{1rv} - K_{2rv} [y_{t2} - (K_{3rv} + K_{4rv} z_{gp})] \quad (4.24)$$

El valor que se calcula se limita por las relaciones siguientes

$$y_{rv} > 1.0 \therefore y_{rv} = 1.0, \quad (4.25)$$

$$y_{rv} < 0.0 \therefore y_{rv} = 0.0. \quad (4.26)$$

En este bloque se tiene interacción con el sistema de lubricación por lo que se usa la ecuación (4.15), y además se calcula la presión de gobernador principal por medio de la constante de normalización K_{5rv} .

h) Limitador de Carga.

El limitador de carga hace uso del mecanismo motor con limitador de salida con los siguientes parámetros⁵: U_{11c} , U_{21c} , λ_{11c} , λ_{21c} y Z_{1c} .

La gráfica de comportamiento del limitador de carga⁴ se da en la figura 4.8 y se observa en ella que la señal de control se encuentra en función de la posición del vástago del mismo y se define por una relación lineal.

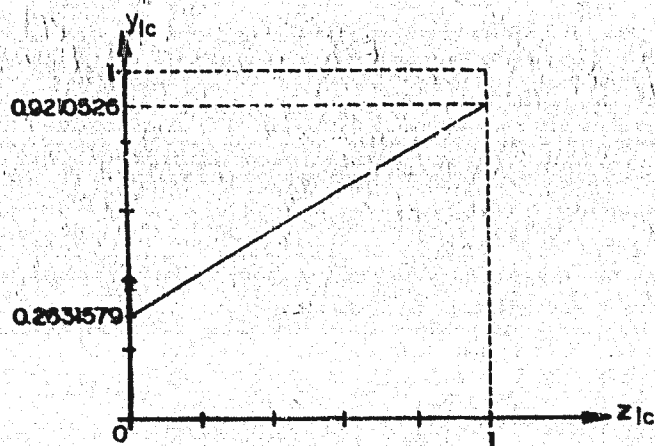


Fig. 4.8.

La ecuación (4.15) se usa en este bloque debido a la interacción con el sistema de lubricación. En este elemento también es necesario calcular su presión de aceite lo cual se efectúa con el factor de normalización K_{11c} .

i) Transductor Número 3.

Con el fin de considerar las variaciones en aceleración que se presentan en el sistema se obtiene una relación de presión de aceite de impulsor en función de la aceleración⁶ obteniéndose la recta mostrada en la figura 4.9

⁶ Pruebas de aceleración del gobernador auxiliar.

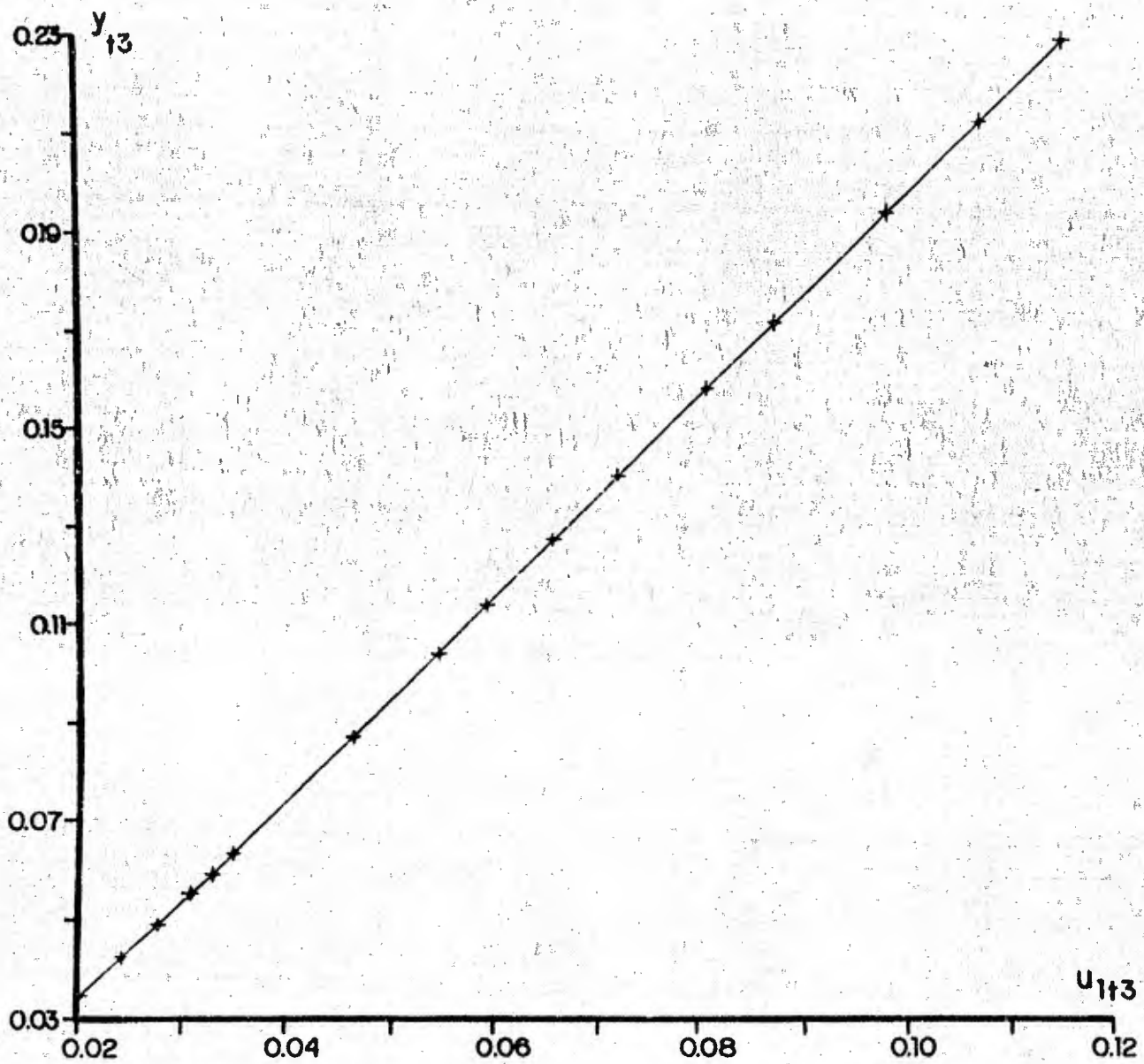


Fig. 4.9.

j) Gobernador Auxiliar.

En este dispositivo se consideran los cambios de velocidad y de aceleración. Estos últimos proporcionan un efecto de adelanto en el tiempo de activación de la válvula de desfogue. Esto sucede aproximadamente a partir de 101 % de sobrevelocidad cuando se presenta una aceleración arriba del 3%.

El control por velocidad se proporciona con la ecuación (4.27) que se obtiene de la recta de comportamiento del gobernador auxiliar^h, que se proporciona a continuación en forma ya normalizada.

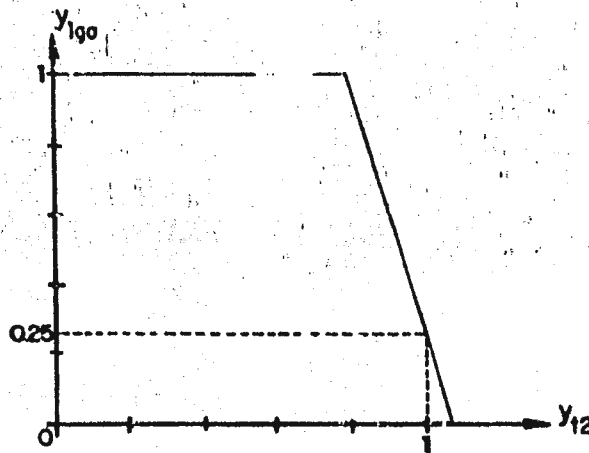


Fig. 4.10.

La ecuación correspondiente es

$$y_{t3} \leq K_{1ga} \cdot y_{1ga} = K_{2ga} - K_{3ga} (y_{t2} - 1.0). \quad (4.27)$$

El valor de la señal de control se limita a valores entre 0 y 1 por medio de las relaciones siguientes.

$$y_{1ga} > 1.0 \cdot y_{1ga} = 1.0 \quad (4.28)$$

$$y_{1ga} < 0.0 \cdot y_{1ga} = 0.0 \quad (4.29)$$

Cuando ocurre una sobrevelocidad y se llega al punto de ajuste de la válvula de desfogue ésta se activa o desactiva por medio de las ecuaciones que se dan a continuación.

$$Y_{1ga} \leq K_{4ga} \quad \therefore \quad Y_{2ga} = 1, \quad (4.30)$$

$$Y_{1ga} > K_{4ga} \quad \therefore \quad Y_{2ga} = 0. \quad (4.31)$$

En este mismo bloque se tiene la autotransferencia, la cual activa al gobernador principal por medio de los controles lógicos para sobrevelocidades arriba del 104 %, y desactiva cuando dicha variable llega a un 101 % de su valor nominal, por lo que

$$Y_{t2} \geq K_{5ga} \quad \therefore \quad Y_{3ga} = 1, \quad (4.32)$$

$$Y_{t2} < K_{6ga} \quad \therefore \quad Y_{3ga} = 0. \quad (4.33)$$

Al activarse la autotransferencia se opera la alarma correspondiente por medio de las siguientes ecuaciones.

$$Y_{3ga} = 1 \quad \therefore \quad V_{ga} = 1, \quad (4.34)$$

$$Y_{3ga} = 0 \quad \therefore \quad V_{ga} = 0. \quad (4.35)$$

El efecto de aceleración se logra obteniendo primero el tiempo de adelanto. Para lograr esto se toman varios casos⁶ y después con los datos se ajusta un polinomio cuadrático por medio de mínimos cuadrados, resultando la gráfica que se muestra a continuación.

la ecuación de la curva es

$$\tau_{ga} = K_{7ga} Y_{t3}^2 - K_{8ga} Y_{t3} + K_{9ga} \quad (4.36)$$

la ecuación de efecto de aceleración queda por lo tanto

$$Y_{t3} > K_{1ga} \quad \therefore \quad Y_{1ga} = K_{2ga} - K_{3ga} [Y_{t2} - (1.0 - \tau_{ga} Y_{t3})] \quad (4.37)$$

esta señal de control se limita también por medio de las ecuaciones (4.28) y (4.29)

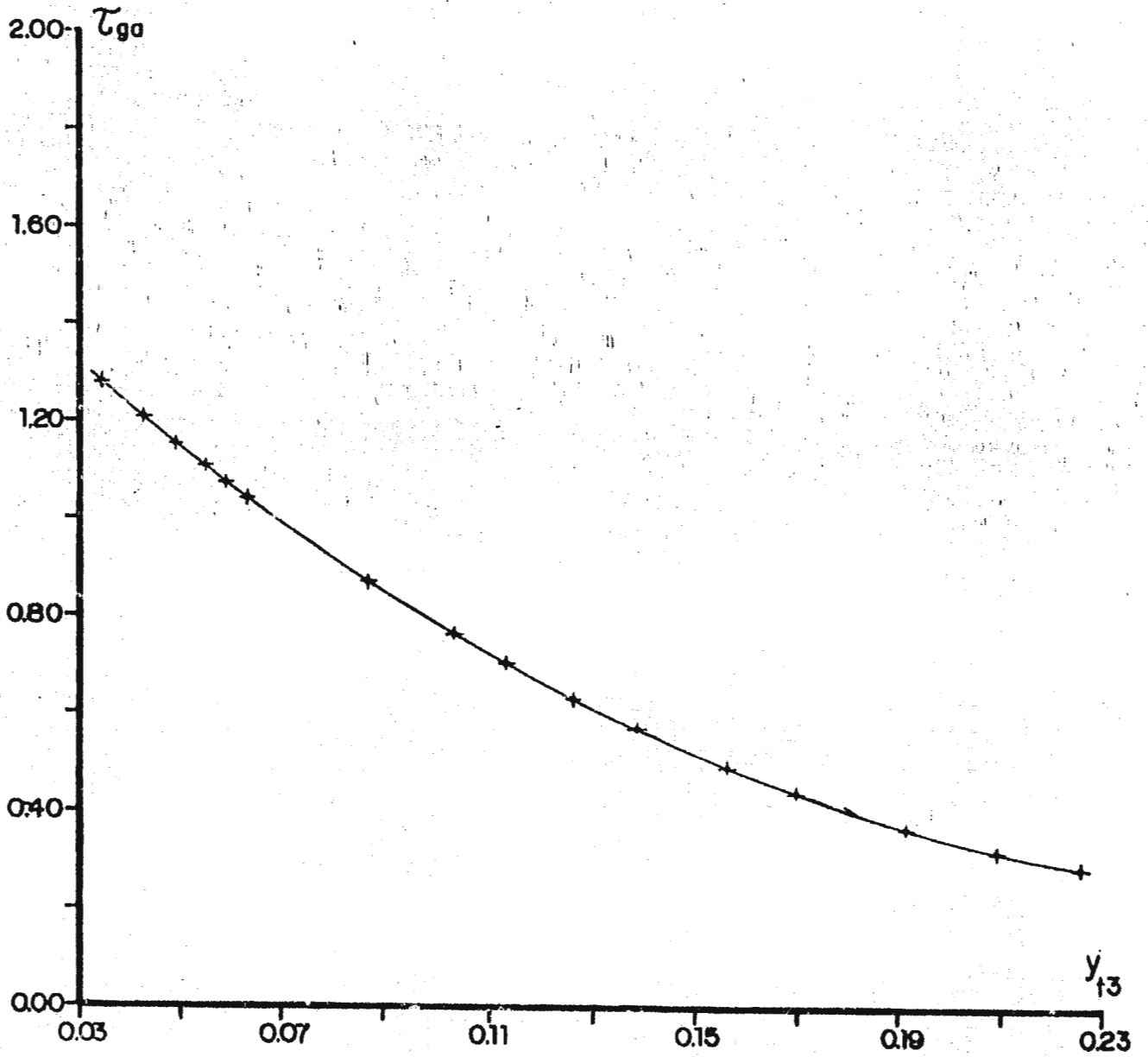


Fig. 4.11.

La señal de control del gobernador auxiliar se afecta por cambios en el aceite de alta presión por lo que en esta parte se usa la ecuación (4.15).

k) Mecanismo de Disparo.

El mecanismo de disparo se activa por diversos motivos por lo que en este bloque se consideran todas las diferentes condiciones que se presentan para cada caso.

En primer término se tienen las principales causas de disparo las cuales son: por baja presión de aceite de cojinetes, por cojinete de empuje, por solenoide, por bajo vacío y por sobrevelocidad, todas estas condiciones se representan por las siguientes ecuaciones.

$$y_{dp} = U_{1dp} + U_{2dp} + U_{3dp} + U_{4dp} \quad (4.38)$$

$$y_{t2} \geq 1.0 \quad \therefore \quad y_{dp} = 0. \quad (4.39)$$

A su vez el disparo por solenoide se opera por otras causas que son: disparo de turbina (protección MFT), alto nivel en el domo, sobrenivel calentador número 6, sobrenivel calentador número 7, disparo de protección del generador (disparo por posición de no carga e interruptores del generador cerrados).

$$U_{3dp} = U_{5dp} + U_{6dp} + U_{7dp} + U_{8dp} + U_{9dp} \quad (4.40)$$

En el último caso se tiene un retardo de 10 segundos antes de que se active el solenoide y ocurra el disparo, estas condiciones se representan como sigue.

$$U_{9dp} = (U_{10dp} + U_{11dp}) \cdot y_{1gp} \quad (4.41)$$

La alarma correspondiente se activa de la siguiente forma

$$U_{9dp} = 1 \quad \therefore \quad V_{1dp} = 1. \quad (4.42)$$

El mecanismo de disparo se activa desde el tablero de control por medio de tres botones, dos para disparo y uno de restablecimiento cuyas ecuaciones son las siguientes.

$$y_{dp} = \bar{u}_{12dp} \bar{u}_{13dp} \quad (4.43)$$

En la anterior ecuación al tomar el valor de cero la variable y_{dp} , las alarmas v_{3dp} y v_{9dp} se activan.

el restablecimiento se efectúa como sigue

$$U_{14dp} = 1 \text{ y } y_{t2} < K_{1dp} \quad \therefore \quad y_{dp} = 1. \quad (4.44)$$

Las alarmas correspondientes a las variables que causan disparo son:

$$y_{dp} = 0 \quad \therefore \quad v_{2dp} = 1, \quad (4.45)$$

$$U_{3dp} = 1 \quad \therefore \quad v_{3dp} = 1, \quad (4.46)$$

$$y_{t2} = 1.0 \quad \therefore \quad v_{4dp} = 1, \quad (4.47)$$

$$U_{15dp} = 1 \quad \therefore \quad v_{5dp} = 1 \text{ y } v_{6dp} = 1, \quad (4.48)$$

$$U_{16dp} = 1 \quad \therefore \quad v_{7dp} = 1, \quad (4.49)$$

$$U_{17dp} = 1 \quad \therefore \quad v_{8dp} = 1. \quad (4.50)$$

Además de las operaciones automáticas que se tienen existen algunas que son manuales, tales como las pruebas que se efectúan a los dispositivos de disparo por bajo vacío, por cojinete de empuje y por baja presión de aceite de cojinetes. En las pruebas que se mencionan se debe de cumplir que la palanca de prueba se encuentre enclavada o de lo contrario se dispara la unidad, las ecuaciones de estas pruebas son.

$$U_{18dp} = 1 \text{ y } U_{19dp} = 1 \quad \therefore \quad v_{7dp} = 1, \quad (4.51)$$

$$U_{18dp} = 0 \text{ y } U_{19dp} = 1 \quad \therefore \quad Y_{dp} = 0, V_{7dp} = 1, \quad (4.52)$$

$$U_{18dp} = 1 \text{ y } U_{20dp} = 1 \quad \therefore \quad V_{5dp} = 1, V_{6dp} = 1, \quad (4.53)$$

$$U_{18dp} = 0 \text{ y } U_{20dp} = 1 \quad \therefore \quad Y_{dp} = 0, V_{5dp} = 1, \\ V_{6dp} = 1 \quad (4.54)$$

$$U_{18dp} = 1 \text{ y } U_{21dp} = 1 \quad \therefore \quad V_{8dp} = 1, \quad (4.55)$$

$$U_{18dp} = 0 \text{ y } U_{21dp} = 1 \quad \therefore \quad Y_{dp} = 0, V_{8dp} = 1. \quad (4.56)$$

1) Selector Número 1.

El selector es un elemento auxiliar el cual tiene la función de dejar pasar la señal de menor valor de entre las que le llegan. En este caso las señales son las del regulador de presión de estrangulamiento, del regulador de velocidad y del limitador de carga. Las ecuaciones correspondientes se dan a continuación.

$$Y_{rv} < Y_{lc} < Y_{rp} \quad \therefore \quad Y_{sl} = Y_{rv} \quad (4.57)$$

$$Y_{lc} < Y_{rp} < Y_{rv} \quad \therefore \quad Y_{sl} = Y_{lc} \quad (4.58)$$

$$Y_{rp} < Y_{rv} < Y_{lc} \quad \therefore \quad Y_{sl} = Y_{rp} \quad (4.59)$$

11) Controlador de Válvula de Estrangulamiento.

El controlador de válvula de estrangulamiento hace uso del bloque generalizado mecanismo motor con limitador de salida con los siguientes parámetros⁵: U_{1ce} , U_{2ce} , λ_{1ce} , λ_{2ce} , Z_{1ce} .

El comportamiento del dispositivo⁴ en función de la disposición de su vástago se muestra en la figura 4.12.

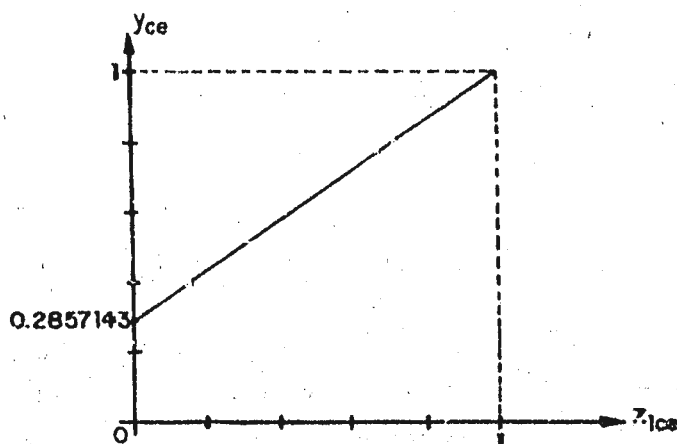


Fig. 4.12.

En este elemento se consideran varios casos de operación ya que su funcionamiento se encuentra ligado al del mecanismo de disparo, teniéndose las cuatro condiciones que siguen:

11.1) En el primer caso no existe disparo y el controlador se encuentra operando normalmente encontrándose el eje de fiador dentro. Por lo tanto se utiliza el mecanismo motor y la señal de control se calcula con la recta que se muestra en la figura 4.12. Además el encamisado del vástago no se mueve, por lo tanto

$$dz_{2ce}(t) / dt = 0.0. \quad (4.60)$$

11.2) El segundo caso se presenta cuando existe disparo y el eje de fiador se encuentra dentro. Para ésta combinación se considera la curva de la figura 4.13, la cual proporciona la característica de comportamiento de la señal de control en función de la posición del encamisado del vástago. Para éste caso se desenchava el eje de fiador y el encamisado se sitúa en posición de mínima presión.

$$y_{dp} = 0 \text{ y } \sigma_{ce} = 1, \quad \therefore \quad \sigma_{ce} = 0, \quad z_{1ce} = 0.0, \\ z_{2ce} = 1.0, \quad (4.61)$$

$$dz_{1ce}(t) / dt = 0.0, \quad (4.62)$$

$$dz_{2ce}(t) / dt = 0.0, \quad (4.63)$$

$$y_{ce} = -K_{1ce} z_{2ce}^2 + K_{2ce} z_{2ce} + K_{3ce} \quad (4.64)$$

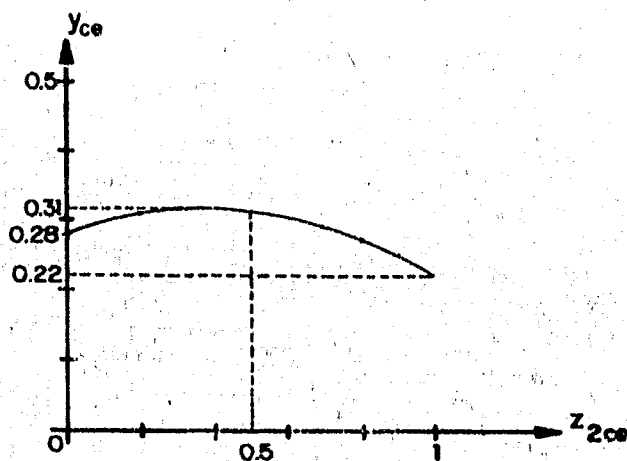


Fig. 4.13.

11.3) El tercer caso considera la presencia de la condición de disparo y el fiador fuera, por lo tanto se utilizan las mismas ecuaciones del punto anterior.

11.4) En el cuarto caso se tiene que no existe disparo y el eje de fiador se encuentra fuera, para poder restablecer es necesario que éste último se enclave. Lo anterior implica que la posición del encamisado sea menor o igual a cero, tomando en cuenta lo anterior se tiene que.

$$y_{dp} = 1, \text{ y } \sigma_{ce} = 0 \text{ y } z_{1ce} = 0.0 \quad \therefore$$

$$\sigma_{ce} = 1. \quad (4.65)$$

Para que el encamisado tome el valor de cero se utiliza el bloque mecanismo motor.

$$U_{2ce} = 1 \quad \therefore \quad dz_{2ce}(t) / dt = -1/\lambda_{3ce} \quad (4.66)$$

$$U_{2ce} = 0 \quad \therefore \quad dz_{2ce}(t) / dt = 0.0. \quad (4.67)$$

Durante el lapso que dura el encamisado en bajar la señal de control se calcula con la ecuación (4.64). Cuando se han cumplido todas las condiciones para este caso, se calcula la señal de control

con la recta de la figura 4.12 y se pueden abrir las válvulas de estrangulamiento.

m) Transferencia de Control.

Este dispositivo selecciona a la señal de menor valor de entre la del selector número uno y la del gobernador auxiliar.

$$Y_{2ga} < Y_{s1} \quad \therefore \quad Y_{tc} = Y_{2ga}, \quad (4.68)$$

$$Y_{s1} < Y_{2ga} \quad \therefore \quad Y_{tc} = Y_{s1}. \quad (4.69)$$

n) Anticipador de Rechazo de Carga.

El anticipador de rechazo de carga se activa por medio de los controles lógicos de la siguiente manera.

$$u_{lac} = 0 \quad \therefore \quad Y_{ac} = 1, \quad (4.70)$$

$$u_{lac} = 1 \quad \therefore \quad Y_{ac} = 0. \quad (4.71)$$

ñ) Selector Número 2.

Este bloque selecciona la menor de entre las siguientes señales: salida del mecanismo de disparo, salida del anticipador de rechazo de carga y la transferencia de control.

$$Y_{dp} = 0 \quad \vee \quad Y_{ac} = 0 \quad \therefore \quad Y_{s2} = 0, \quad (4.72)$$

$$Y_{dp} = 1 \quad \vee \quad Y_{ac} = 1 \quad \therefore \quad Y_{s2} = Y_{tc}. \quad (4.73)$$

La presión de aceite de control se calcula en este bloque por medio del factor de normalización K_{s2} .

o) Válvula de Purga por Disparo.

La válvula de purga se opera desde el tablero de control o por disparo de acuerdo a las relaciones siguientes.

$$y_{dp} = 0 \text{ o } U_{1vp} = 1 \quad \therefore \quad y_{vp} = 1, \quad (4.74)$$

$$y_{dp} = 1 \text{ y } U_{1vp} = 0 \quad \therefore \quad y_{vp} = 0. \quad (4.75)$$

p) Servomotor de las Válvulas Gobernadoras Derechas.

En esta parte se describe el comportamiento del servomotor de las válvulas gobernadoras derechas, que es válida también para las del lado izquierdo. En las descripciones de los servomotores de las demás válvulas se toma en cuenta a ésta consideración también.

Este dispositivo hace uso del bloque generalizado servomotor básico con los siguientes parámetros: X_{gd} , Y_{gd} , τ_{gd} y ϵ_{gd} .

Debido a que éstas válvulas tienen un mecanismo de prueba que se acciona por medio de un motor, se hace uso del bloque generalizado mecanismo motor con limitador de salida, considerándose los parámetros que se dan a continuación: U_{1gd} , U_{2gd} , λ_{1gd} , λ_{2gd} y Z_{gd} .

La señal de control de entrada al servomotor se obtiene al realizarse la diferencia entre la señal del selector número dos y la posición del vástago de la válvula de prueba. Si no existe prueba la señal de entrada es la del selector.

$$X_{gd} = y_{s2} - Z_{gd}$$

De acuerdo a la descripción de comportamiento de las válvulas⁷ se tiene la gráfica de la figura 4.14.

: Servomotor de la Válvula Interceptora Derecha.

Con referencia al bloque generalizado servomotor básico se utilizan los siguientes parámetros: X_{id} , Y_{id} , τ_{id} y ϵ_{id} .

De acuerdo a la curva de comportamiento de éstas válvulas⁷ se obtiene la gráfica de la figura 4.15. El mecanismo de prueba de la válvula se opera por medio de un solenoide, por lo que

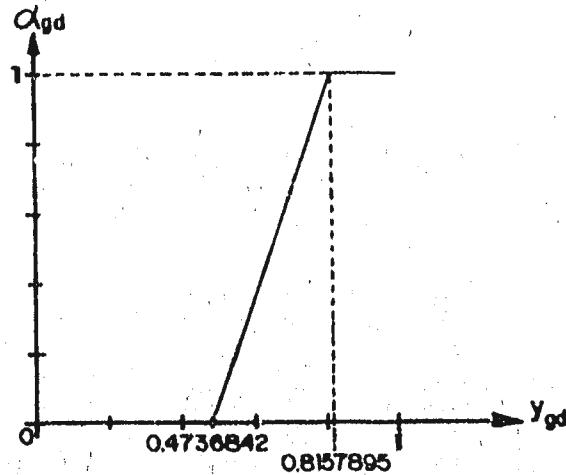


Fig. 4.14.

$$U_{1id} = 0 \quad \therefore \quad X_{id} = y_{s2} \quad (4.77)$$

$$U_{1id} = 1 \quad \therefore \quad X_{id} = 0.0. \quad (4.78)$$

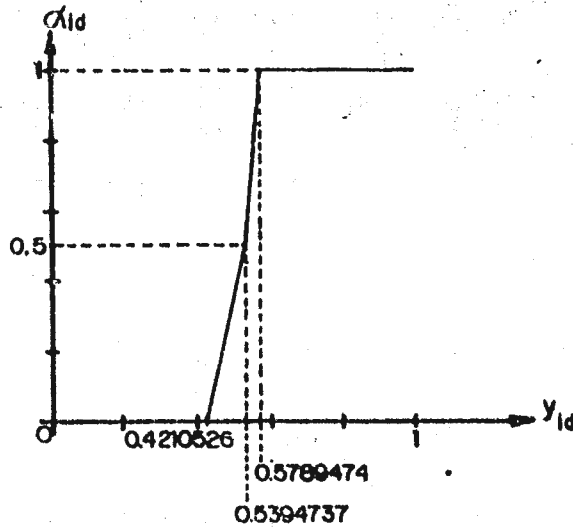


Fig. 4.15.

r) Servomotor de la Válvula de Estrangulamiento Derecha.

La apertura de ésta válvula se proporciona en función de la señal del controlador de válvula de estrangulamiento, de acuerdo a la gráfica de la figura 4.16^o.

⁷ Gráfica de presión de aceite de control vs. apertura valvs. gobs. e interceptoras.

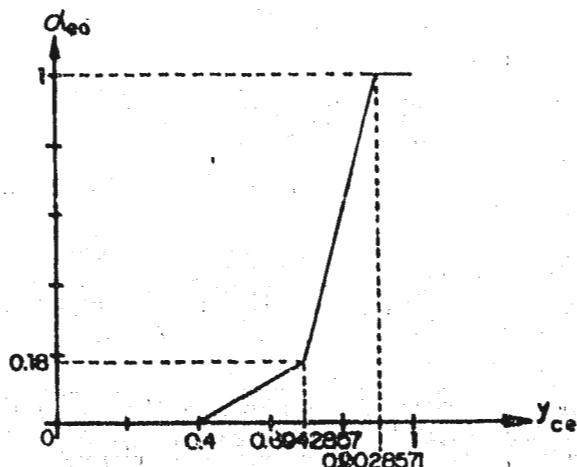


Fig. 4.16.

La prueba es por medio de un solenoide por lo que

$$U_{led} = 0 \quad \therefore \quad \text{se calcula } \alpha_{ed} \text{ con la figura 4.16, (4.79)}$$

$$U_{led} = 1 \quad \therefore \quad \alpha_{ed} = 0.0. \quad (4.80)$$

s) Servomotor de la Válvula de Paro de Recalentado Derecha.

La operación de este dispositivo se considera de acción instantánea por lo que su comportamiento lo dan las siguientes expresiones.

$$y_{dp} = 1 \quad \therefore \quad \alpha_{rd} = 1.0, \quad (4.81)$$

$$y_{dp} = 0 \quad \therefore \quad \alpha_{rd} = 0.0. \quad (4.82)$$

La prueba de esta válvula es por solenoide, entonces tenemos

$$U_{lrd} = 1 \quad \therefore \quad \alpha_{rd} = 0.0, \quad (4.83)$$

$$U_{lrd} = 0 \text{ y } y_{dp} = 1 \quad \therefore \quad \alpha_{rd} = 1.0. \quad (4.84)$$

³ Gráfica de presión de aceite de control vs. apertura válvula de estrangulamiento .

CAPITULO 5

SOLUCION NUMERICA DE LAS ECUACIONES DEL MODELO

5. SOLUCION NUMERICA DE LAS ECUACIONES DEL MODELO.

5.1 Generalidades.

Puesto que el objetivo que se persigue en este trabajo es el de llevar a cabo la simulación del modelo matemático del sistema por medio de un programa de computadora digital, es necesario tomar en cuenta que éstas operan solo con cantidades discretas, lo que implica una serie de procedimientos que envuelven cálculos discretos y lógicos. Estos procedimientos incluyen desde las operaciones aritméticas más simples hasta las más complejas y a todos aquellos elementos básicos que son reducibles a decisiones si-no.

Haciendo las anteriores consideraciones, se tiene que en el sistema de control de la turbina es necesario resolver los siguientes tipos de ecuaciones: lógicas, algebraicas y diferenciales.

En el caso de los dos primeros tipos no existe problema alguno ya que se reducen a operaciones aritméticas y lógicas. Para el tercer caso se tienen tres variantes de ecuaciones que son: sistemas de primer orden, integradores y generadores de rampas, para los que se requiere utilizar algún método de integración numérica lo más sencillo posible. En el presente caso se utiliza el método de soluciones explícitas por su eficiencia para resolver sistemas lineales, ya que reduce la solución de dichas ecuaciones a simples expresiones algebraicas.

En este capítulo, en primer término, se proporciona el desarrollo de la solución explícita para los casos que se tienen, y después se muestra la forma en que se estructura el programa del modelo.

5.2 Desarrollo de la Solución Explícita.

a) Sistema de Primer orden

Se tiene la ecuación diferencial de primer orden del tipo

$$dy / dt = (u - y) / \tau, \quad (5.1)$$

la cual se puede escribir como

$$\tau dy / dt + y = u. \quad (5.2)$$

La solución homogénea para la ecuación anterior es

$$y_n(t) = K e^{-(t-t_0) / \tau}, \quad (5.3)$$

$$K = y(t_0),$$

y por lo tanto

$$y_n(t) = y(t_0) e^{-(t-t_0) / \tau}. \quad (5.4)$$

La solución particular es

$$y_p(t) = e^{-(t-t_0) / \tau} v(t). \quad (5.5)$$

Derivando (5.5) se tiene

$$dy_p(t) / dt = -\frac{1}{\tau} e^{-(t-t_0) / \tau} v(t) + e^{-(t-t_0) / \tau} dv(t) / dt, \quad (5.6)$$

sustituyendo (5.5) en (5.6) se obtiene,

$$dy_p(t) / dt = -\frac{1}{\tau} y_p(t) + e^{-(t-t_0) / \tau} dv(t) / dt \quad (5.7)$$

y sustituyendo (5.7) en (5.2),

$$\tau \left(-\frac{1}{\tau} y_p(t) + e^{-(t-t_0) / \tau} dv(t) / dt \right) + y_p(t) = u(t) \quad (5.8)$$

simplificando (5.8)

$$\tau \bar{e}^{(t-t_0)} / \tau \, dv(t) / dt = u(t) \quad (5.9)$$

Despejando $dv(t) / dt$ de (5.9)

$$dv(t) / dt = \frac{1}{\tau} \bar{e}^{(t-t_0)} / \tau \, u(t) \quad (5.10)$$

integrando

$$v(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^t \bar{e}^{(\gamma-t_0)} / \tau \, u(\gamma) \, d\gamma \quad (5.11)$$

por lo que la solución particular es

$$y_p(t) = \bar{e}^{(t-t_0)} / \tau \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^t \bar{e}^{(\gamma-t_0)} / \tau \, u(\gamma) \, d\gamma \quad (5.12)$$

de (5.4) y (5.12) la solución total es

$$y(t) = y(t_0) \bar{e}^{(t-t_0)} / \tau + \frac{1}{\tau} \bar{e}^{(t-t_0)} / \tau \int_{t_0}^t \bar{e}^{(\gamma-t_0)} / \tau \, u(\gamma) \, d\gamma \quad (5.13)$$

simplificando

$$y(t) = y(t_0) \bar{e}^{(t-t_0)} / \tau + \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^t \bar{e}^{(t-\gamma)} / \tau \, u(\gamma) \, d\gamma \quad (5.14)$$

haciendo cambios de variables

$$\eta = t - \gamma \Rightarrow d\eta = -d\gamma$$

$$y(t) = y(t_0) \bar{e}^{(t-t_0)} / \tau + \frac{1}{\tau} \int_0^{t-t_0} \bar{e}^{\eta/\tau} u(t-\eta) \, d\eta \quad (5.15)$$

Si $t = t_0 + \Delta t$ y $u(t-\eta)$ es un escalón de magnitud $u(t_0)$

entonces

$$y(t) = y(t_0) \bar{e}^{\Delta t / \tau} / \tau + u(t_0) / \tau \int_0^{\Delta t} \bar{e}^{\eta/\tau} \, d\eta, \quad (5.16)$$

integrando se tiene

$$y(t) = y(t_0) e^{-\Delta t/\tau} + u(t_0) (1 - e^{-\Delta t/\tau}). \quad (5.17)$$

(5.17) es la solución exacta de (5.2) bajo la suposición de que $u(t)$ está compuesto por una sucesión de escalones aplicados cada Δt unidades de tiempo

b) Integrador

La ecuación diferencial es

$$dy / dt = Ku \quad (5.18)$$

integrando ambos miembros

$$y(t) = y(t_0) + \int_{t_0}^t Ku(\gamma) d\gamma \quad (5.19)$$

Si $t = t_0 + \Delta t$ y $u(\gamma)$ es un escalón de magnitud $u(t_0)$

$$y(t) = y(t_0) + Ku(t_0) \int_{t_0}^t d\gamma \quad (5.20)$$

finalmente se tiene

$$y(t) = y(t_0) + Ku(t_0) \Delta t \quad (5.21)$$

c) Generador de Rampa

Se tiene la ecuación del tipo

$$dy / dt = K, \quad (5.22)$$

integrando

$$y(t) = y(t_0) + K \Delta t, \quad (5.23)$$

Tomando en cuenta entonces las soluciones obtenidas se procede a establecer las ecuaciones de los bloques que las utilizan, los cuales son el servomotor básico y el mecanismo motor con limitador de salida.

d) Modelo del Servomotor Básico.

$$\text{DER} = (u - y) / \tau, \quad (5.24)$$

$$\text{DER} < K_{\max}$$

$$\text{Si } \therefore y(t) = y(t_0) e^{-\Delta t / \tau} + u(t_0) (1 - e^{-\Delta t / \tau}), \quad (5.25)$$

$$\text{No } \therefore y(t) = y(t_0) + K_{\max} \Delta t u(t_0) \quad (5.26)$$

$$y > y_{\max} \therefore y = y_{\max}, \quad (5.27)$$

$$y < y_{\min} \therefore y = y_{\min}. \quad (5.28)$$

en donde

K_{\max} = límite máximo de la rapidez de cambio,

y_{\max} = valor máximo de la señal,

y_{\min} = valor mínimo de la señal.

e) Modelo del Mecanismo Motor con Limitador de Salida.

$$y(t) = y(t_0)$$

$$\text{SU} = 1 \text{ e } y < 1.0 \therefore y(t) = y(t) + K_{\text{sub}} \Delta t, \quad (5.29)$$

$$\text{BA} = 1 \text{ e } y > 0.0 \therefore y(t) = y(t) + K_{\text{haj}} \Delta t, \quad (5.30)$$

$$y > 1.0 \therefore y = 1.0, \quad (5.31)$$

$$y < 0.0 \therefore y = 0.0. \quad (5.32)$$

en donde

K_{sub} = Tiempo de subida del vástago del mecanismo motor.

K_{baj} = Tiempo de bajada del vástago del mecanismo motor.

5.3 Estructuración del Programa de Computadora

a) Diagrama de Estructura del Programa.

De acuerdo al análisis hecho sobre el tipo de ecuaciones a manejar se tienen dos grandes grupos, el de algebraicas y el de dinámicas o diferenciales. Cada uno de los modelos del sistema de control contiene ecuaciones del primero o segundo grupo y algunos utilizan ambos. Por lo tanto es necesario agrupar a aquéllos módulos que efectúan operaciones similares con el fin de establecer los niveles de ejecución, las precedencias y el orden de llamada a las subrutinas. Todo lo anterior es necesario para que no exista generación y utilización de información adelantada o atrasada y también con el fin de facilitar la verificación de cada uno de los modelos de los elementos del sistema. El diagrama de estructura se muestra en la figura 5.1.

b) Descripción de las Subrutinas que Conforman el Modelo del Sistema de Control de la Turbina.

ALARM - Subrutina de activación de alarmas

CONTUA - Subrutina principal que llama a los módulos que ejecutan las ecuaciones algebraicas.

CONTUD - Subrutina principal que llama a los módulos que ejecutan las ecuaciones dinámicas.

DISPAN - Subrutina que calcula las señales de control del anticipador de rechazo de carga y el mecanismo de disparo

LIMITA - Subrutina que calcula las señales de control del regulador de presión de estrangulamiento, el limitador de carga, el selector número uno y la transferencia de control.

LIMITD - Subrutina que calcula la posición del mecanismo motor del limitador de carga.

- MECNMO - Subrutina general que calcula la posición del mecanismo motor con limitador de salida.
- REGPRA - Subrutina que calcula las señales de control del gobernador principal, el regulador de velocidad y el gobernador auxiliar.
- REGPRD - Subrutina que calcula la posición del mecanismo motor del gobernador principal.
- PRINCI - Programa principal.
- RETARD - Subrutina de retardo.
- SERVOB - Subrutina general que calcula la señal de control del servomotor básico.
- TRANEA - Subrutina que calcula las señales de control de los transductores uno, dos y tres.
- VESPAA - Subrutina que calcula la señal de control del controlador de válvulas de estrangulamiento para obtener el porcentaje de apertura de dichas válvulas y además calcula la apertura de las válvulas de paro de recalentado.
- VESPAD - Subrutina que calcula la posición del mecanismo motor del controlador de válvulas de estrangulamiento y del encamisado del mismo.
- VGOINA - Subrutina que calcula las señales de control del selector número dos y de los servomotores de las válvulas de gobierno e interceptoras.
- VGOIND - Subrutina que calcula las posiciones de los mecanismos motores de las válvulas de prueba de las válvulas gobernadoras.
- VLVEST - Subrutina que calcula las aperturas de las válvulas de estrangulamiento.
- VLVGOB - Subrutina que calcula las aperturas de las válvulas de gobierno.
- VLVINT - Subrutina que calcula las aperturas de las válvulas interceptoras.

c) Estructuras "COMMON" empleadas.

Con el objeto de transmitir la información entre subrutinas se utiliza la proposición "COMMON" etiquetado designándose los nombres

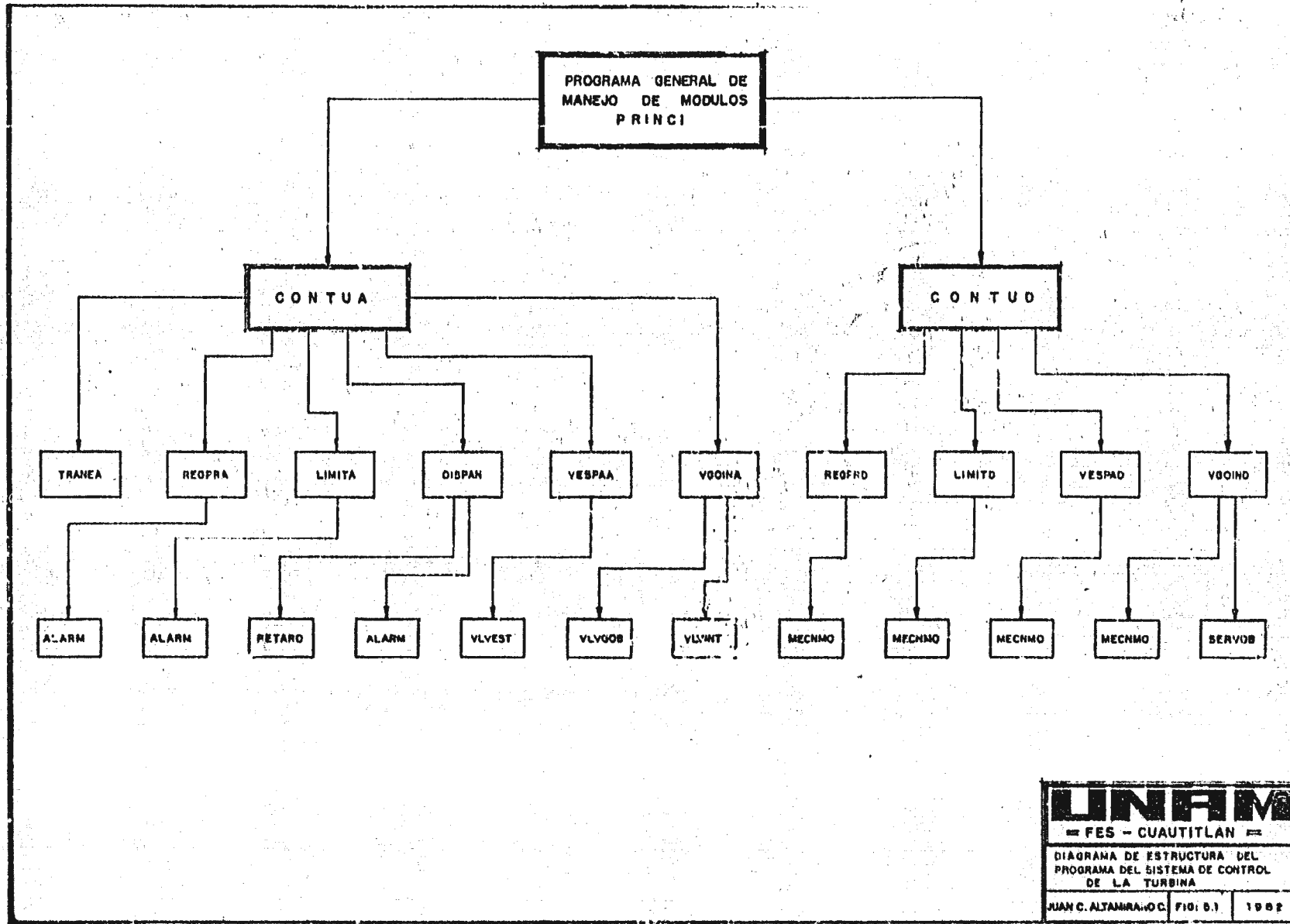
de identificación en función del tipo de variables. A continuación se proporciona una lista de los mismos así como su correspondiente descripción.

- COMMON / ALARMA / - Variables que indican el estado de operación de manejo de alarmas.
- COMMON / HIBRIDO / - Variables que se calculan en los módulos de ecuaciones algebraicas y que se utilizan en los módulos de ecuaciones diferenciales.
- COMMON / LOGICO / - Variables logicas que entran al control de la turbina.
- COMMON / SALECAU / - Variables de información interna del control de la turbina.
- COMMON / SALLOG / - Variables logicas que salen del control de la turbina.
- COMMON / VAREST / - Variables de estado del control de la turbina.
- COMMON / VENEXI / - Variables analógicas que entran al control de la turbina.

d) Precedencias.

Para cada subrutina se lista el grupo de subrutinas precedentes, esto es aquellas que deben ejecutarse con anterioridad debido a que generan información utilizada por la subrutina en cuestión.

Subrutina	Subrutinas Precedentes
DISPAN	TRANEA, REGPRA
LIMITA	TRANEA, REGPRA
REGPRA	TRANEA
YESPAA	DISPAN
VGOINA	DISPAN, LIMITA



CAPITULO 6

PRUEBAS DE AJUSTE Y VALIDACION

6. PRUEBAS DE AJUSTE Y VALIDACION

6.1 Generalidades.

En esta sección se presentan las pruebas que se realizan al programa del modelo matemático del sistema, con la finalidad de verificar si los resultados que se obtienen se encuentran en concordancia con la información de la cual se dispone o en su defecto realizar los cambios necesarios para poder efectuar la simulación de mejor forma.

El plan de pruebas comprende los siguientes aspectos: pruebas de lógica, pruebas en estado estacionario y pruebas con transitorios.

Las pruebas de lógica consisten en verificar que todas las operaciones de este tipo trabajen correctamente. Estas pruebas se efectúan con minuciosidad de manera que no exista error posible en las estructuras lógicas del programa o en la activación y desactivación de variables involucradas en estas pruebas.

En las pruebas en estado estacionario y transitorios se selecciona, en primer término, un conjunto y se utiliza un paso de integración de 0.01 (simulación exacta), monitoreándose a un grupo de variables. Existen dos tipos de variables, las críticas y las no críticas, las primeras son aquellas que afectan de una manera importante a la dinámica del modelo o de los modelos que interaccionan con el control. Las no críticas son las que producen variaciones en el comportamiento del modelo pero que son de menor importancia. Para estas pruebas se establece una tolerancia de error en las variables críticas del 2% y en las no críticas del 5%.

Después de realizar las anteriores pruebas se selecciona un transitorio crítico, esto es, aquel que permite analizar la dinámica del modelo de manera detallada. Dicho transitorio se repite para pasos de integración de 0.125, 0.25, 0.5 y 1.0 con el objeto de identificar el máximo paso que tenga desempeño adecuado, es decir, que cumpla con las especificaciones de tiempo real y las restricciones de

tiempo para la simulación de todos los modelos de la central termoeléctrica.

Ya que se escoge el paso máximo se repiten todas las pruebas con dicho paso, verificándose el porcentaje de error que se obtiene con respecto a los valores que se tienen de los patrones de comparación.

6.2 Pruebas en Estado Estacionario.

Se simulan los estados estacionarios a 25%, 50%, 75% y 100% - de carga, monitoreándose diversas variables con el fin de comparar - los resultados con los que se tienen en la información proporcionada por Comisión Federal de Electricidad [7] . Los porcentajes de error que se obtienen oscilan entre 0.0% y 0.66%. Los valores de variables y porcentajes de error se dan a continuación.

TABLA 6.1 Pruebas en Estado Estable

Variable monito-- reada	Porcentaje de carga	Valor espera <u>d</u> o	Tolerancia de error	Porcentaje de error
α_{gd}	25	0.33	2.0 %	0.0 %
α_{id}	25	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{ed}	25	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{rd}	25	1.0	2.0 %	0.0 %
y_{s2}	25	215.7463 KPa	5.0 %	0.07%
y_{t2}	25	205.9396 KPa	5.0 %	0.02%

Variable monito-- reada	Porcentaje de carga	Valor espera do	Tolerancia de error	Porcentaje de error
y_{rv}	25	215.7463 KPa	5.0 %	0.07 %
α_{gd}	50	0.49	2.0 %	0.0 %
α_{id}	50	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{ed}	50	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{rd}	50	1.0	2.0 %	0.0 %
y_{s2}	50	235.3596 KPa	5.0 %	0.4 %
y_{t2}	50	205.9396 KPa	5.0 %	0.02 %
y_{rv}	50	235.3596 KPa	5.0 %	0.4 %
α_{gd}	75	0.68	2.0 %	0.0 %
α_{id}	75	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{ed}	75	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{rd}	75	1.0	2.0 %	0.0 %
y_{s2}	75	254.9729 KPa	5.0 %	0.06 %
y_{t2}	75	205.9396 KPa	5.0 %	0.02 %
y_{rv}	75	254.9729 KPa	5.0 %	0.06 %
α_{gd}	100	0.82	2.0 %	0.0 %

Variable monito-- reada	Porcentaje de carga	Valor esperado	Tolerancia de error	Porcentaje de error
α_{id}	100	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{ed}	100	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{rd}	100	1.0	2.0 %	0.0 %
y_{s2}	100	274.5862 KPa	5.0 %	0.66 %
y_{t2}	100	205.9396 KPa	5.0 %	0.02 %
y_{rv}	100	274.5862 KPa	5.0 %	0.05 %

6.3 Pruebas de Transitorios.

Estas pruebas se diseñan en función de aquellas partes dinámicas más importantes que se requiere analizar. En el presente caso se realizan diez y la descripción de cada una de las pruebas es la siguiente:

a) Variación de Velocidad sin Sobreaceleración.

En esta prueba se genera una rampa con pendiente menor al 3% de aceleración para lo cual se utilizan condiciones de 100 % de carga. El tiempo de simulación es de 10 segundos y termina en disparo por sobrevelocidad a los 9.2 segundos.

b) Variación de Velocidad con Sobreaceleración.

Esta prueba es similar a la anterior con la única diferencia de que se aplica una pendiente mayor al 3% por lo tanto existe un efecto de adelanto en la condición de disparo por sobrevelocidad. La simulación es de 10 segundos obteniéndose el disparo por sobrevelocidad a los 4.2 segundos.

c) Variación de la Presión de Estrangulamiento.

La prueba de la variación de presión de estrangulamiento se logra iniciando la simulación con condiciones de 100% de carga. Después se abate la presión de vapor principal de 166 Kg/cm² a 130 Kg/cm² observándose el comportamiento que este dispositivo provoca al entrar en operación. El efecto que se tiene consiste en la disminución de la presión del aceite el cual hace que las válvulas gobernadoras e interceptoras cierren en proporción a la variación de la presión del vapor. El tiempo de simulación para este caso es de 32 segundos.

d) Variación de 75 % a 100 % y de 75 % a 25 % de Carga (con gobernador principal).

La forma en que se realiza esta prueba consiste en mover el mecanismo motor del gobernador principal de tal manera que se alcance la posición correspondiente a los porcentajes de carga. Los valores de las variables monitoreadas son comparados con los valores reales para su aprobación. El tiempo de simulación para la variación de 75 a 100 es de 7 segundos y el correspondiente a la de 75 a 25 - es de 5 segundos.

e) Variación de la Posición del Limitador de Carga.

Se comprueba el funcionamiento del mecanismo motor del limitador de carga para lo cual se sube y baja el vástago del mismo. El tiempo de simulación es de 7 segundos.

f) Variación de la Posición del Control de Válvulas de Estrangulamiento.

En esta prueba se mueve el vástago del controlador de la válvula de estrangulamiento hacia la posición de cierre de las mismas, confirmándose sus valores correspondientes. La simulación para este caso dura 10 segundos.

g) Rechazo de Carga a 25%.

Se inicia esta prueba con condiciones de 25% de carga y después de un lapso de tiempo se efectúa el rechazo. La forma en que se simula es por medio de rampas de velocidad y escalones de aceleración de tal forma que dichas variables se incrementan al principio disminuyendo después en su valor hasta llegar a la posición de no carga. En esta prueba se utiliza un tiempo de simulación de 95 segundos.

h) Rechazo de Carga a 50%.

Esta prueba se inicia con condiciones de 50% de carga someténdola al rechazo de igual manera que en el inciso (g) pero con un tiempo de 112 segundos.

i) Rechazo de Carga a 75%.

El rechazo de carga se efectúa en forma similar al descrito en el inciso (g), con un tiempo de simulación de 145 segundos.

j) Rechazo de Carga a 100%.

El rechazo de carga a 100% se hace igual que el mencionado en el inciso (g) y el tiempo para este caso es de 158 segundos.

6.4 Transitorio Crítico.

Después de analizar las diferentes pruebas con el objeto de seleccionar el transitorio crítico se toma como patron de comparación a las pruebas de rechazo de carga de la central termoeléctrica 7, y en particular el efectuado a 25% de carga.

Este se debe a que esta prueba permite analizar con un nivel razonable de detalle el comportamiento del sistema de control ya que se pueden ver las tendencias de las variables que son monitoreadas. Los demás rechazos no se escogen debido a que las mismas variables tienen una respues

ta demasiado rápida para su análisis detallado. Como se establece al principio de este capítulo se efectúa a la prueba con diferentes pasos de integración esto es con 0.125, 0.25, 0.5 y 1.0.

El paso de integración que se selecciona es de 0.25 segundos ya que el efecto de utilizar pasos de integración mayores se refleja en un retraso de la detección de condiciones asociadas a la lógica del modelo lo cual se debe a el uso del método de solución explícita. Sin embargo se pueden aceptar pasos de integración mayores manteniéndose la misma precisión teniéndose un retraso máximo de un segundo con un paso de integración de 1.0 . A continuación se proporciona la característica de ejecución que se obtiene para el presente caso.

TABLA 6.2 Tiempos de Ejecución del Transitorio Crítico.

Paso de Integración	Tiempo simulado	No. de veces más rápido que tiempo real
0.01	95 seg.	2
0.125	95 seg.	39
0.25	95 seg.	77
0.5	95 seg.	188
1.0	95 seg.	394

6.5 Simulación Aproximada.

Finalmente se repiten todas las pruebas en estado estacionario y transitorios con el paso seleccionado obteniéndose los siguientes valores.

6.5.1 Estados Estables,

Tabla 6.3 Pruebas en Estado Estable

Variable monitoreada	Porcentaje de carga	Valor esperado	Tolerancia de error	Porcentaje de error.
α_{gd}	25	0.33	2.0 %	0.0 %
α_{id}	25	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{ed}	25	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{rd}	25	1.0	2.0 %	0.0 %
y_{s2}	25	215.7463 KPa	5.0 %	0.07 %
y_{t2}	25	205.9396 KPa	5.0 %	0.02 %
y_{rv}	25	215.7463 KPa	5.0 %	0.07 %
α_{gd}	50	0.49	2.0 %	0.02 %
α_{id}	50	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{ed}	50	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{rd}	50	1.0	2.0 %	0.0 %
y_{s2}	50	235.3596 KPa	5.0 %	0.48 %
y_{t2}	50	205.9396 KPa	5.0 %	0.02 %
y_{rv}	50	235.3596 KPa	5.0 %	0.48 %

Variable monitoreada	Porcentaje de carga	Valores perado	Tolerancia de error	Porcentaje de error
α_{gd}	75	0.58	2.0 %	0.0 %
α_{id}	75	1.0 %	2.0 %	0.0 %
α_{ed}	75	1.0 %	2.0 %	0.0 %
α_{rd}	75	1.0	2.0 %	0.0 %
y_{s2}	75	254.9729 KPa	5.0 %	0.06 %
y_{t2}	75	205.9396 KPa	5.0 %	0.02 %
y_{rv}	75	254.9729 KPa	5.0 %	0.06 %
α_{gd}	100	0.82	2.0 %	0.0 %
α_{id}	100	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{ed}	100	1.0	2.0 %	0.0 %
α_{rd}	100	1.0	2.0 %	0.0 %
y_{s2}	100	274.5862 KPa	5.0 %	0.66 %
y_{t2}	100	205.9396 KPa	5.0 %	0.02 %
y_{rv}	100	274.5682 KPa	5.0 %	0.66 %

6.5.2 Pruebas con Transitorios.

Enseguida se muestran los tiempos de ejecución que se obtienen al realizar los diferentes transitorios con excepción del rechazo a 25% de carga que ya se describió. Las gráficas de los rechazos que se realizan a 25, 50, 75 y 100 por ciento de carga se encuentran en el apéndice número III.

TABLA 6.4 Tiempos de Ejecución de los
Transitorios.

Identificación	Máximo tiempo CPU por paso de inte- gración (microse- gundos)	No. de veces más rápido que tiempo real
6.3 (a)	2611	95
6.3 (b)	2458	101
6.3 (c)	3033	82
6.3 (d)	2458	101
6.3 (e)	2765	90
6.3 (f)	2573	97
6.3 (h)	3225	77
6.3 (i)	3264	76
6.3 (j)	3264	76

CAPITULO 7
ANALISIS ECONOMICO

7. ANALISIS ECONOMICO.

En este capítulo, se efectúa un análisis económico sobre las ventajas y/o desventajas del desarrollo de modelos matemáticos como el que se presenta en este trabajo aplicados a simuladores de centrales termoeléctricas.

De acuerdo al Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico (POISE), el país requerirá para el período de 1981 a -- 1990 la instalación de centrales de generación con una capacidad total de 25,000 MW. Para su operación y mantenimiento deberán capacitarse 5,400 trabajadores sólo para centrales termoeléctricas, de los cuales 735 serán operables.

Para afrontar el problema que representa el adiestramiento, se ha comprobado la efectividad de la capacitación a través de simuladores, que son réplicas de las centrales termoeléctricas que emplean gas, combustóleo, carbón o nucleares, y que alcanzan un alto grado de similitud.

Debido al crecimiento acelerado que tiene el sector eléctrico, se estima que la calidad, que se requiere de adiestramiento -- obliga necesariamente a usar esta herramienta.

Los alcances y el costo de cada simulador dependen del propósito con el que se construya, así existen por tanto simuladores para:

TABLA 7.1 Propósitos y costos de simuladores

Simulador	Propósito	Costo en pesos
Adiestramiento de principios básicos.	El aprendizaje y adiestramiento de principios básicos para el personal de -- centrales o para <u>aprendizaje</u> en las universidades.	de 9 200 000 a 18 400 000
Para adiestramiento en una réplica de una central termoeléctrica.	Adiestramiento de procedimientos. Adiestramiento y obtención de licencias a -- operadores. Desarrollo de procedimiento (limitado).	de 80 500 000 a 161 000 000

Simulador	Propósito	Costo en pesos
	Estudio de diseño (limitado).	
Adiestrar en una tarea específica.	Adiestramiento de procedimientos de un sistema específico.	de 18 400 000 a 80 500 000
Ingeniería	Investigación del rango de accidentes y eventos normales del número de centrales existentes. Investigación con rangos normales de tiempo real y tiempo real más rápido que el normal. Estudios de diseño.	de 161 000 000 a 575 000 000

La C.F.E. tiene en la actualidad una capacidad instalada de 13 736 MW, de los cuales 65% corresponden a centrales térmicas convencionales. El sistema eléctrico nacional cuenta, actualmente con 9 unidades de 300 MW, que necesitan 4 operadores por unidad y 5 jefes de turno por central.

El sistema eléctrico del país se duplica cada 6 años, por lo que la capacidad instalada, el número de unidades termoeléctricas y el personal de operación y mantenimiento aumentan como se muestra en la tabla 7.2.

TABLA 7.2 Expansión de la C.F.E. conforme al POISE

Año	Capacidad Térmica	Instalada MW total	Incremento capacidad térmica.	Incremento unidades térmicas.	Personal que requiere adiestramiento en térmicas.
1979	7 967	13 297			
1980	8 717	15 615	750	3	205
1981	9 551	16 833	834	4	564
1982	10 985	18 333	1 434	7	197
1983	12 372	19 829	1 387	7	376
1984	13 422	21 344	1 050	5	178
1985	15 456	24 469	2 034	9	1 207

Año	Capacidad Térmica	Instalada MW Total	Incremento capacidad térmica.	Incremento unidades térmicas.	Personal que requiere adiestramiento en térmicas.
1986	16 556	27 502	2 100	8	292
1987	19 478	30 419	1 921	9	456
1988	22 328	33 729	2 850	11	664
1989	25 178	36 989	2 380	8	746
1990	27 558	40 509	2 420	8	406

El simulador de central termoeléctrica del que forma parte el modelo matemático del sistema de control de la turbina, tiene un costo total aproximado de 120 000 000 de pesos.

Se puede observar que tomando en cuenta los datos que se tienen de costos proporcionados en la tabla 7.1, este simulador es más económico, y su amortización se calcula que será en seis meses a partir de que entre en operación. La recuperación de la inversión es rápida debido a que con el entrenamiento que recibirán los operadores se evitarán grandes daños al equipo de las centrales. El simulador trabajará a 100 % de su capacidad las 24 horas del día. En dos años más, se prevé la construcción de otros dos simuladores similares.

Por lo tanto es de hacerse notar que el desarrollo de este tipo de proyectos es sumamente ventajoso ya que en el caso particular de la parte de modelado de sistemas permite realizar el análisis y diseño de los mismos con una aplicación real y lo que es más importante con una recuperación de la inversión en poco tiempo.

Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo matemático del Sistema de Control de la Turbina de una Central Generadora Termoeléctrica de 300 MW, así como la simulación del mismo en computadora digital. Para elaborar el modelo se realiza en primer término el estudio de los diferentes sistemas que constituyen a la central, con el objetivo de situar al sistema de control dentro del ciclo termodinámico y visualizar a aquellas partes con las que tiene transmisión de información.

Después de lo anterior se procede al análisis del modo de comportamiento de cada uno de los diversos elementos que constituyen el control, y de las relaciones funcionales e interacciones entre ellos. En esta parte se realiza también el trabajo de adquisición de información de datos sobre parámetros de diseño.

Al finalizar la etapa de entendimiento del funcionamiento del control se presenta una parte muy importante que es necesario realizar antes del modelado matemático, y la cual consiste en las hipótesis y simplificaciones que se realizan tomando en consideración los requerimientos para el proceso de simulación.

En esta sección se llega a la conclusión de que la forma más eficiente de llevar a cabo el modelado consiste en realizar un modelo matemático que represente las características funcionales de los elementos que constituyen el sistema.

En el capítulo 4 se desarrolla el modelo matemático considerando lo expuesto anteriormente y todas las señales de control se normalizan para poder manejar los valores de variables internas de una manera coherente. La elaboración del modelo con base en interrelaciones funcionales de los componentes da como resultado una representación matemática que proporciona los efectos del sistema físico de una manera bastante fiel.

Para efectuar la simulación del modelo, en el capítulo 5 se procede a seleccionar el método de solución numérica de las ecuaciones. El método seleccionado correspondió al de solución explícita debido a las características cuasilineales de los elementos dinámicos del sistema. El desarrollo de dicha solución se presenta para los casos que se tienen los cuales fueron sistemas de primer orden y generadores de rampas.

Por otra parte se presenta la forma como se estructura el programa de computadora, proporcionándose la descripción de las funciones que desempeñan cada una de las subrutinas que la constituyen. El programa se elabora con un estricto orden jerárquico de ejecución y el lenguaje utilizado fué FORTRAN 77 o programación estructurada.

Como parte importante del trabajo se somete al programa del modelo a diversas pruebas confirmándose la eficiencia de la representación matemática, ya que los errores que se obtienen oscilan entre 0.0% y 0.66% para las principales variables del mismo comparadas contra datos de diseño y pruebas.

Además de lo anterior, en esta misma sección se verifica que la simulación cumple con las especificaciones de tiempo real; los valores obtenidos son de 76 a 101 veces más rápido que tiempo real, lo que hace posible la ejecución del programa y permite la posibilidad de su acoplamiento con otros modelos del simulador.

Por último, en base a la información sobre las causas que llevan a la necesidad de la construcción de un simulador de central termoeléctrica, en el que se encuentra incluido el desarrollo del modelo matemático que se presenta en éste tema, se llega a concluir que este tipo de proyectos es de gran utilidad ya que la inversión que se efectúa es rápidamente amortizable, y además sirve para mejorar procedimientos de operación y de diseño.

APENDICE I

APENDICE I

Claves de identificación del la figura numero 3.2

No.	Descripcion	Clave
1.	Transductor numero uno.	T1
2.	Regulador de Presion de Estran... gulamiento.	RP
3.	Gobernador Principal.	GP
4.	Regulador de Velocidad.	RV
5.	Selector numero uno.	S1
6.	Transductor numero dos.	T2
7.	Gobernador Auxiliar.	GA
8.	Limitador de Carga.	LC
9.	Transferencia de Control	TC
10.	Selector numero dos.	S2
11.	Anticipador de Rechazo de Carga.	AC

12.	Servomotor Valvulas de Gobierno Derechas.	GD
13.	Servomotor Valvulas de Gobierno Izquierdas.	GI
14.	Servomotor Valvula Intercepto- ra Derecha.	ID
15.	Servomotor Valvula Intercepto- ra Izquierda.	II
16.	Servomotor Valvula de Estrangu- lamiento Derecha.	ED
17.	Servomotor Valvula de Estrangu- lamiento Izquierda.	EI
18.	Servomotor Valvula de Paso de - Recalentado Derecha.	RD
19.	Servomotor Valvula de Paso de - Recalentado Izquierda	RI
20.	Mecanismo de Disparo.	DP
21.	Valvula de Purga por disparo.	VP
22.	Controlador de Valvulas de Es- tranguamiento.	CE
23.	Señal de control.	SC

APENDICE II

APENDICE II

Variables de entrada, de salida e internas del sistema de control de la turbina.

Parametro	Descripcion	Unidades	Valor o Rango de operacion
a_{gd}	Apertura de las valvulas sober-nadoras derechas.	A	0.0 - 1.0
a_{id}	Apertura de la valvula intercep-tora derecha.	A	0.0 - 1.0
a_{ed}	Apertura de la valvula de es--transulamiento derecha.	A	0.0 - 1.0
a_{rd}	Apertura de la valvula de paro de recalentado derecha.	A	0 o 1
ϵ_g	Limite maximo de la rapidez de cambio del servomotor basico.	A	-
ϵ_{gd}	Limite maximo de la rapidez de cambio del servomotor valvulas soberadoras derechas.	A	3.3
ϵ_{id}	Limite maximo de la rapidez de cambio del servomotor valvula - interceptora derecha.	A	3.3
x_g	Señal de control de entrada al servomotor basico.	A	0.0 - 1.0
x_{gd}	Señal de control de entrada al servomotor de las valvulas so-beradoras derechas.	A	0 o 1

X_{id}	Señal de control de entrada al servomotor de la válvula interceptora derecha.	A	0 0 1
U_{lid}	Señal de prueba para válvula interceptora derecha.	A	0 0 1
U_{ied}	Señal de prueba para válvula de estrangulamiento derecha.	A	0 0 1
U_{lrd}	Señal de prueba para válvula de paro de recalentado derecha.	A	0 0 1
U_{lg}	Señal que ordena subir mecanismo motor general.	A	0 0 1
U_{lgp}	Señal que ordena subir mecanismo motor del gobernador principal.	A	0 0 1
U_{llc}	Señal que ordena subir mecanismo motor del limitador de carga.	A	0 0 1
U_{lce}	Señal que ordena subir mecanismo motor del controlador de válvulas de estrangulamiento.	A	0 0 1
U_{lgd}	Señal que ordena subir mecanismo motor de la válvula de prueba de las válvulas gobernadoras derechas.	A	0 0 1
U_{lgd}	Orden de energizar el solenoide del regulador de presión de estrangulamiento.	A	0 0 1

U _{lap}	Aceite de alta presion.	Pa	0.0 - 1716163.75
U _{lt1}	Presion del flujo de vapor principal.	Pa	0.0 - 16279039
U _{lt2}	Velocidad normalizada de la turbina.	A	0.0 - 1.0
U _{lac}	Anticipador de rechazo de carga dentro o fuera.	A	0 o 1
U _{lt3}	Aceleracion normalizada de la turbina.	A	0.0 - 1.0
U _{ldp}	Senal de baja presion de aceite de cojinetes.	A	0 o 1
U _{lvp}	Abrir o cerrar valvula de purga.	A	0 o 1
U _{2g}	Senal que ordena bajar el mecanismo motor general.	A	0 o 1
U _{2gp}	Senal que ordena bajar el mecanismo motor del gobernador principal.	A	0 o 1
U _{2lc}	Senal que ordena bajar el mecanismo motor del limitador de carga.	A	0 o 1
U _{2ce}	Senal que ordena bajar el mecanismo motor del controlador de valvula de estrangulamiento.	A	0 o 1

U _{2gd}	Señal que ordena bajar mecanismo motor de la válvula de prueba de las válvulas gobernadoras derechas.	A	0 o 1
U _{2dp}	Señal de disparo por cojinete de empuje.	A	0 o 1
U _{2rp}	Válvula check del regulador de presión de estrangulamiento -- candadeada.	A	0 o 1
U _{3dp}	Señal del solenoide.	A	0 o 1
U _{4dp}	Disparo por bajo vacío.	A	0 o 1
U _{5dp}	Disparo de turbina (protección MFT).	A	0 o 1
U _{6dp}	Alto nivel en el domo.	A	0 o 1
U _{7dp}	Alto nivel calentador número 6.	A	0 o 1
U _{8dp}	Alto nivel calentador número 7.	A	0 o 1
U _{9dp}	Disparo de protección del generador.	A	0 o 1
U _{10dp}	Interruptor 452 - 11 del generador cerrado.	A	0 o 1
U _{11dp}	Interruptor 452 - 12 del generador cerrado.	A	0 o 1

U _{12dp}	Disparo PB - 1	A	0 o 1
U _{13dp}	Disparo PB - 2	A	0 o 1
U _{14dp}	Restablecimiento PB - 3	A	0 o 1
U _{15dp}	Senal de alarma de disparo por cojinete de empuje.	A	0 o 1
U _{16dp}	Senal de alarma disparo por bajo vacio.	A	0 o 1
U _{17dp}	Senal de alarma disparo por baja presion de aceite de cojinetes.	A	0 o 1
U _{18dp}	Palanca de prueba.	A	0 o 1
U _{19dp}	Prueba a disparo por bajo vacio.	A	0 o 1
U _{20dp}	Prueba a disparo por cojinete de empuje.	A	0 o 1
U _{21dp}	Prueba a disparo por baja presion de aceite de cojinetes.	A	0 o 1
Y _g	Senal de control de salida del servomotor basico.	A	0.0 - 1.0
Y _{gd}	Senal de control de salida del servomotor de las valvulas gobernadoras derechas.	A	0.0 - 1.0

Y_{id}	Senal de control de salida del servomotor de la valvula interceptora derecha.	A	0.0 - 1.0
Y_{t1}	Senal de control del transductor numero 1.	A	0.0 - 1.0
Y_{s1}	Senal de control del selector numero uno.	A	0.0 - 1.0
Y_{rp}	Senal de control del regulador de presion de estrangulamiento.	A	0.0 - 1.0
Y_{1gp}	Senal de control igual a posicion de no carga.	A	0 o 1
Y_{2gp}	Senal de control igual a posicion de minima carga.	A	0 o 1
Y_{3gp}	Senal de control igual a posicion de maxima carga.	A	0 o 1
Y_{t2}	Senal de control del transductor numero 2.	A	0.0 - 1.0
Y_{rv}	Senal de control del regulador de velocidad.	A	0.0 - 1.0
Y_{1c}	Senal de control del limitador de carga.	A	0.0 - 1.0
Y_{t3}	Senal de control del transductor numero 3.	A	0.0 - 1.0

Y_{1ga}	Señal de control del gobernador auxiliar.	A	0.0 - 1.0
Y_{2ga}	Señal de control que activa a la válvula de gases.	A	0.0 - 1.0
Y_{3ga}	Señal de transferencia dentro o fuera.	A	0 o 1
Y_{dp}	Señal de control del mecanismo de depósito.	A	0 o 1
Y_{ce}	Señal de control del controlador de válvula de estrangulamiento.	A	0.0 - 1.0
Y_{tc}	Señal de control de la transferencia de control.	A	0.0 - 1.0
Y_{ac}	Señal de control del anticipador de rechazo de carga.	A	0 o 1
Y_{s2}	Señal de control del selector 2.	A	0.0 - 1.0
Y_{vp}	Señal de control de la válvula de purga.	A	0 o 1
λ_{1g}	Tiempo de subida del mecanismo motor generalizado.	A	-
λ_{2g}	Tiempo de bajada del mecanismo motor generalizado.	A	-
λ_{1gp}	Tiempo de subida del mecanismo motor del gobernador principal.	Ses.	35

λ_{2gp}	Tiempo de bajada del mecanismo motor del gobernador principal.	Ses.	31
λ_{1lc}	Tiempo de subida del mecanismo motor del limitador de carga.	Ses.	48
λ_{2lc}	Tiempo de bajada del mecanismo motor del limitador de carga.	Ses.	46
λ_{1ce}	Tiempo de subida del mecanismo motor del controlador de valvula de estrangulamiento.	Ses.	58
λ_{2ce}	Tiempo de bajada del mecanismo motor del controlador de valvula de estrangulamiento.	Ses.	38
λ_{3ce}	Tiempo de bajada del mecanismo motor para situar al encamisado del vastago dentro.	Ses.	15
λ_{1gd}	Tiempo de subida del mecanismo motor para prueba de valvulas gobernadoras derechas.	Ses.	35
λ_{2gd}	Tiempo de bajada del mecanismo motor para prueba de valvulas gobernadoras derechas.	Ses.	31
K_{1rp}	Valor minimo de la senal del transductor numero 1 en la zona en la cual actua el regulador de presion de estrangulamiento.	A	0.8132530
K_{2rp}	Valor maximo de la senal de transductor numero 1 en la zona en la cual actua el regulador de presion de estrangulamiento.	A	0.9036145

K_g	Valor minimo del aceite de alta presion.	Pa	1716163.75
K_{1t2}	Limite inferior de la zona de regulacion cuadratica.	A	0.0
K_{2t2}	Limite superior de la zona de - regulacion cuadratica igual al limite inferior de la zona de - regulacion lineal.	A	0.8333333
K_{3t2}	Primera constante de la ecuacion cuadratica de la primera zona de regulacion.	A	1.172042,
K_{4t2}	Segunda constante de la ecuacion cuadratica de la primera zona de regulacion.	A	0.1395346
K_{5t2}	Ordenada de la ecuacion lineal - de la segunda zona de regulacion	A	0.6976744
K_{6t2}	Pendiente de la ecuacion lineal de la segunda zona de regulacion	A	1.8139532
K_{7t2}	Constante para el calculo de la presion de aceite de impulsor.	KPa	246.5482169
K_{19p}	Constante igual al valor de posicion de no carga.	A	0.5345316
K_{1rv}	Ordenada de la ecuacion lineal del regulador de velocidad.	A	0.2631579
K_{2rv}	Pendiente de la ecuacion lineal del regulador de velocidad.	A	3.3989813

K _{3rv}	Valor mínimo de la señal de control del transductor número 2 - correspondiente a la posición mínima del gobernador principal.	A	0.8115385
------------------	---	---	-----------

K _{4rv}	Constante igual a la diferencia entre los valores máximo y mínimo de la señal de control del transductor número 2 en función de las posiciones mínima y máxima del gobernador principal.	A	0.1961538
------------------	--	---	-----------

K _{5rv}	Constante para el cálculo de la presión de aceite del gobernador principal.	KPa	372.6527
------------------	---	-----	----------

K _{11c}	Constante para el cálculo de la presión de aceite del limitador de carga.	KPa	372.6527
------------------	---	-----	----------

K _{1ga}	Constante igual a 3 % de aceleración.	A	0.03
------------------	---------------------------------------	---	------

K _{2ga}	Ordenada de la ecuación de efecto de velocidad.	A	0.3
------------------	---	---	-----

K _{3ga}	Pendiente de la ecuación de efecto de velocidad.	A	3.3
------------------	--	---	-----

K _{4ga}	Constante igual al valor de ajuste de activación de la válvula de desfoque.	A	0.45
------------------	---	---	------

K _{5ga}	Constante igual a 104 % de sobrevelocidad.	A	0.9010571
------------------	--	---	-----------

K _{6ga}	Constante igual a 101 % de sobrevelocidad.	A	0.8515056
------------------	--	---	-----------

K_{7ga}	Primera constante de la ecuacion cuadratica del tiempo de adelanto.	A	17.986
K_{8ga}	Segunda constante de la ecuacion cuadratica del tiempo de adelanto.	A	9.928
K_{9ga}	Tercera constante de la ecuacion cuadratica del tiempo de adelanto.	A	1.605
K_{1dp}	Ajuste de velocidad para rearme.	A	0.927272
K_{1ce}	Primera constante de la ecuacion cuadratica del controlador de valvula de estrangulamiento.	A	0.23
K_{2ce}	Segunda constante de la ecuacion cuadratica del controlador de valvula de estrangulamiento.	A	0.17
K_{3ce}	Tercera constante de la ecuacion cuadratica del controlador de valvula de estrangulamiento.	A	0.23
K_{s2}	Constante de normalizacion de la presion de aceite de control.	KPa	372.6527
σ_{ce}	Eje de fiador dentro o fuera.	A	0 o 1
V_{rp}	Alarma regulador de presion inicial en operacion.	A	0 o 1
V_{qd}	Alarma gobernador de turbinas transferencia automatica.	A	0 o 1

V _{1dp}	Alarma motor del gobernador tur- bina posición de cero carga.	A	0 o 1
V _{2dp}	Alarma turbina unidad 1. disparo	A	0 o 1
V _{3dp}	Alarma turbina unidad 1. disparo por solenoides.	A	0 o 1
V _{4dp}	Alarma turbina unidad 1. sobre- velocidad.	A	0 o 1
V _{5dp}	Alarma chusacera de entrada tur- bina unidad 1. densidad.	A	0 o 1
V _{6dp}	Alarma turbina fuerza de escape alta.	A	0 o 1
V _{7dp}	Alarma turbina unidad 1. disparo por bajo vacío.	A	0 o 1
V _{8dp}	Alarma aceite de lubricación presión bajo disparo.	A	0 o 1
V _{9dp}	Alarma turbina unidad 1. disparo manual.	A	0 o 1
Z _g	Señal de posición del mecanismo motor general.	A	0 o 1
Z _{gp}	Señal de posición del mecanismo motor del gobernador principal.	A	0.0 - 1.0
Z _{lc}	Señal de posición del mecanismo motor del limitador de carga.	A	0.0 - 1.0

Z_{1ce}	Señal de posición del mecanismo motor del controlador de válvula de estrangulamiento.	A	0.0 - 1.0
Z_{2ce}	Señal de posición del mecanismo del vástago del controlador de válvula de estrangulamiento.	A	0.0 - 1.0
Z_{gd}	Señal de posición de la válvula de prueba gobernadora derecha.	A	0 o 1
Z_{gi}	Señal de posición de la válvula de prueba gobernadora izquierda.	A	0 o 1
τ_g	Constante de tiempo general del servomotor básico.	A	-
τ_{ga}	Tiempo de adelanto.	A	0.2796 - 1.2917
τ_{gd}	Constante de tiempo del servomotor de las válvulas gobernadoras derechas.	Segs.	0.15
τ_{id}	Constante de tiempo del servomotor de la válvula interceptora derecha.	Segs.	0.15

Valores Base de Normalizacion.

Elemento	Señal normalizada	Valor de Normalizacion (mínimo o máximo)	Valor Normalizado
T1	u_{1t1}	0.0 Pa	0.0
T1	u_{1t1}	16279039 Pa	1.0
RP	y_{rp}	0.0 Pa	0.0
RP	y_{rp}	372652.7 Pa	1.0
T2	u_{1t2}	0.0 Rad/seg	0.0
T2	u_{1t2}	414.7 Rad/seg	1.0
T2	y_{t2}	0.0 Pa	0.0
T2	y_{t2}	253011.57 Pa	1.0
RV	y_{rv}	0.0 Pa	0.0
RV	y_{rv}	372652.7 Pa	1.0
LC	y_{lc}	0.0 Pa	0.0
LC	y_{lc}	372652.7 Pa	1.0

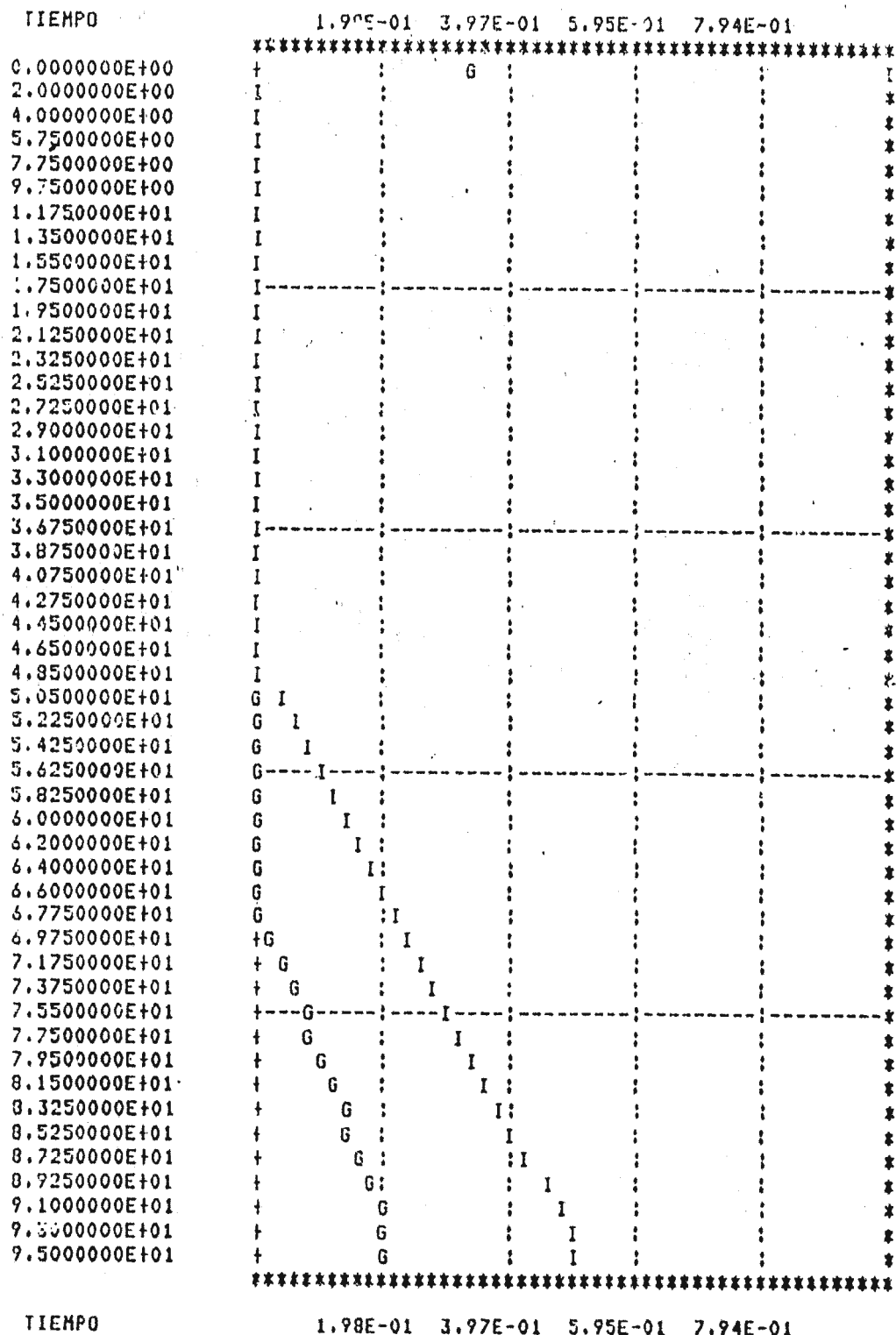
T3	u_{1t3}	0.0 Rad/sec	0.0
T3	u_{1t3}	377.0 Rad/sec	1.0
T3	y_{t3}	0.0 Pa	0.0
T3	y_{t3}	210842.98 Pa	1.0
GA	y_{2ga}	0.0 Pa	0.0
GA	y_{2ga}	392266.0 Pa	1.0
CE	y_{ce}	0.0 Pa	0.0
CE	y_{ce}	343232.8 Pa	1.0
GD,GI	y_{gd}	0.0 Pa	0.0
GD,GI	y_{gd}	372652.7 Pa	1.0
GD,GI	a_{gd}	0.0 mm	0.0
GD,GI	a_{gd}	210.0 mm	1.0
ID,II	y_{id}	0.0 Pa	0.0
ID,II	y_{id}	372652.7 Pa	1.0

ID,II	α_{id}	0.0 mm	0.0
ID,II	α_{id}	154.0 mm	1.0
ED,EI	α_{ed}	0.0 mm	0.0
ED,EI	α_{ed}	246.0 mm	1.0

APENDICE III

GRAFICA DE RECHAZO DE CARGA A 25 % (GD E ID)

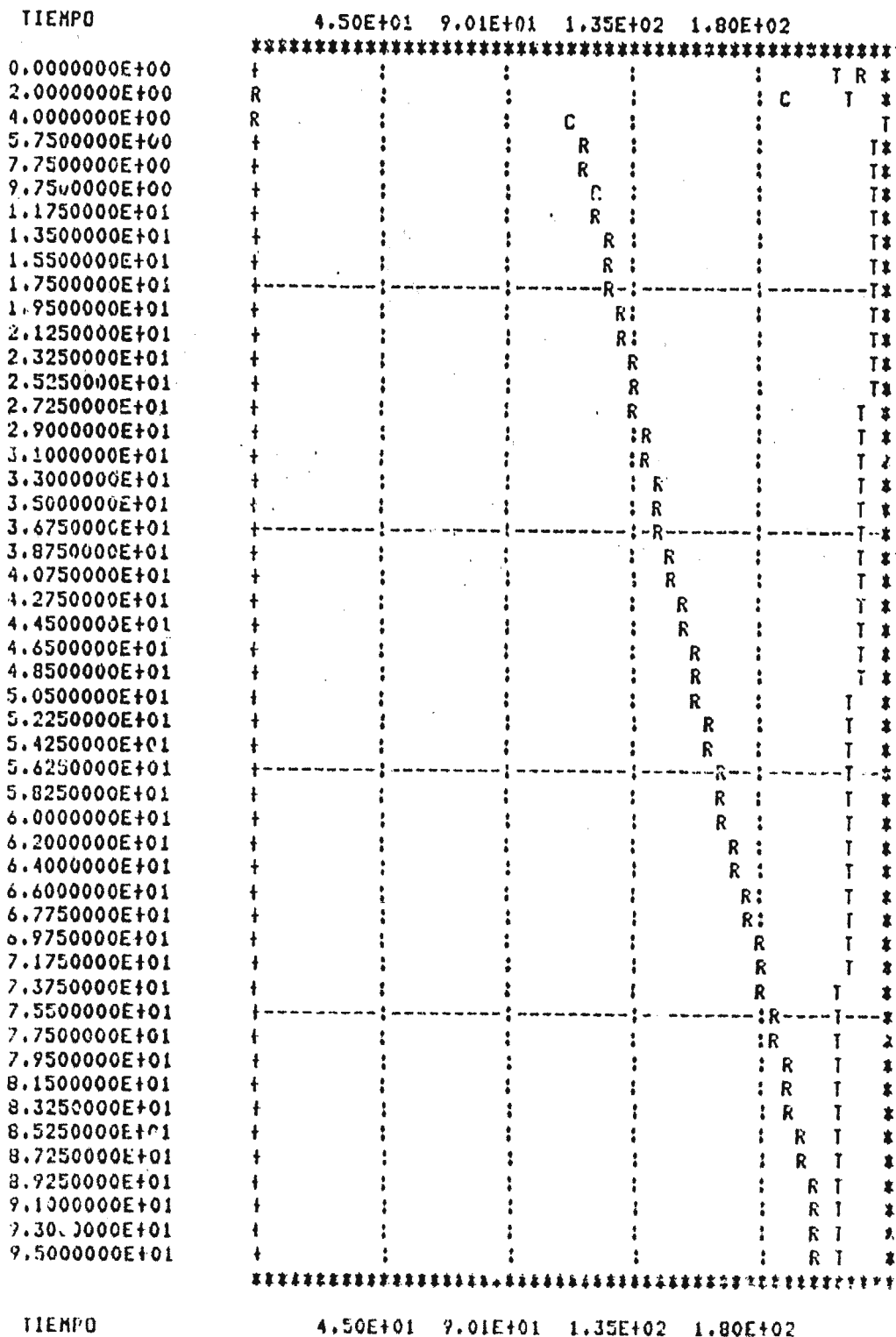
DAT.MIN = 0.000000E+00 DAT.MAX = 9.918790E-01



TIEMPO 1.98E-01 3.97E-01 5.95E-01 7.94E-01

GRAFICA DE RECHAZO DE CARGA A 25 % (CE, RV Y T2)

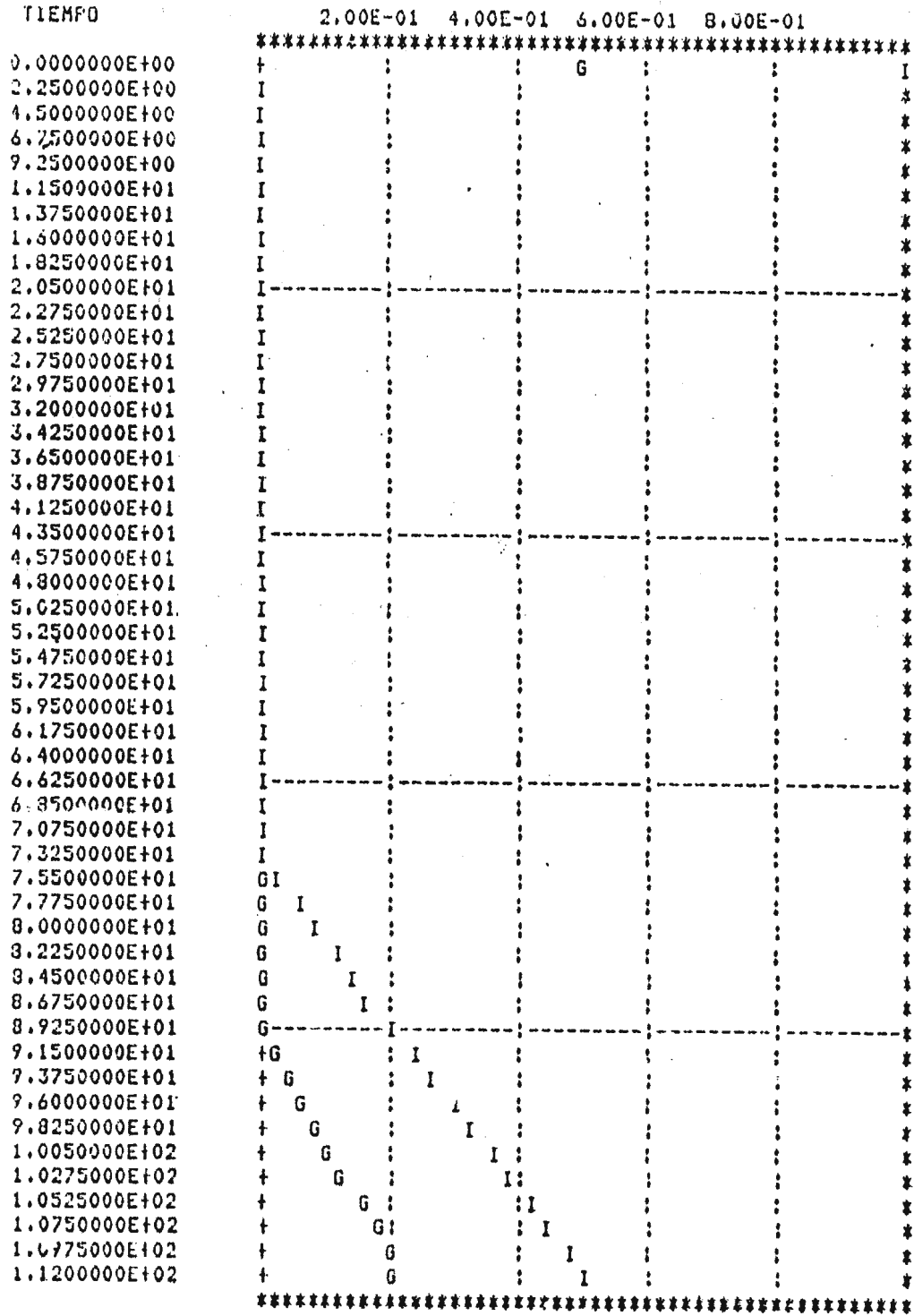
DAT.MIN = 0.000000E+00 DAT.MAX = 2.252209E+02



TIEMPO 4.50E+01 9.01E+01 1.35E+02 1.80E+02

GRAFICA DE RECHAZO DE CARGA A 50 % (GD E ID)

DAT.MIN = 0.000000E+00 DAT.MAX = 1.000000E+00



TIEMPO

2.00E-01 4.00E-01 6.00E-01 8.00E-01

GRAFICA DE RECHAZO DE CARGA A 50 % (CE, RV Y T2)

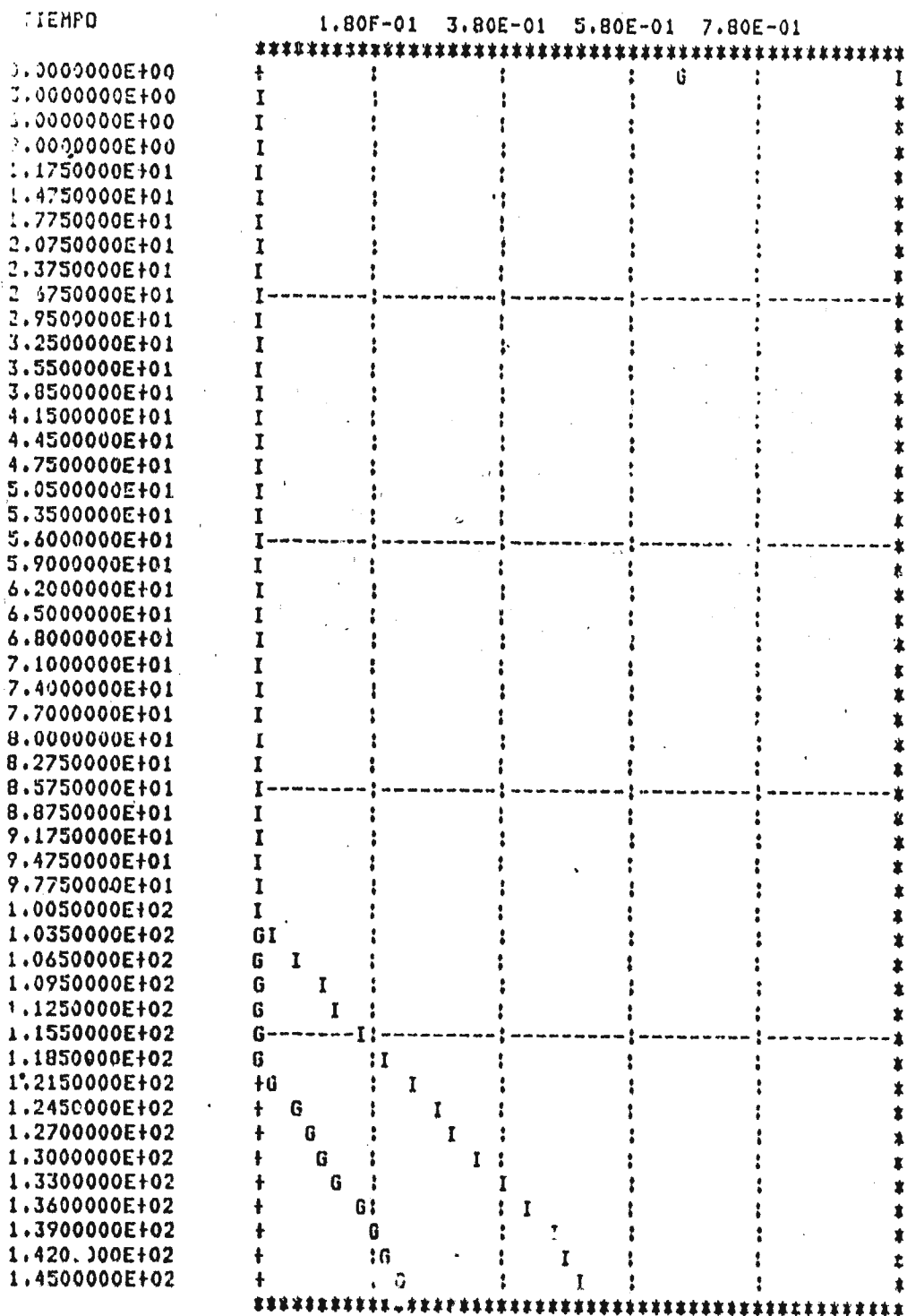
DAT.MIN = 0.000000E+00 DAT.MAX = 2.364896E+02

TIEMPO	4.73E+01	9.46E+01	1.42E+02	1.89E+02
0.000000E+00	+	:	:	T R
2.250000E+00	R	:	C	T *
4.500000E+00	R	:	C	T *
6.750000E+00	R	:	C	T *
9.250000E+00	R	:	C	T *
1.150000E+01	R	:	C	T *
1.375000E+01	R	:	C	T *
1.600000E+01	R	:	C	T *
1.825000E+01	R	:	C	T *
2.050000E+01	R	-----	C	T-----*
2.275000E+01	R	:	C	T *
2.525000E+01	R	:	C	T *
2.750000E+01	R	:	C	T *
2.975000E+01	R	:	C	T *
3.200000E+01	R	:	C	T *
3.425000E+01	R	:	C	T *
3.650000E+01	R	:	C	T *
3.875000E+01	R	:	C	T *
4.125000E+01	+	:	R	T *
4.350000E+01	+	-----	R	T-----*
4.575000E+01	+	:	R	T *
4.800000E+01	+	:	R	T *
5.025000E+01	+	:	R	T *
5.250000E+01	+	:	R	T *
5.475000E+01	+	:	R	T *
5.725000E+01	+	:	R	T *
5.950000E+01	+	:	R	T *
6.175000E+01	+	:	R	T *
6.400000E+01	+	:	R	T *
6.625000E+01	+	-----	R	T-----*
6.850000E+01	+	:	R	T *
7.075000E+01	+	:	R	T *
7.325000E+01	+	:	R	T *
7.550000E+01	+	:	R	T *
7.775000E+01	+	:	R	T *
8.000000E+01	+	:	R	T *
8.225000E+01	+	:	R	T *
8.450000E+01	+	:	R	T *
8.675000E+01	+	:	R	T *
8.925000E+01	+	-----	R	T-----*
9.150000E+01	+	:	R	T *
9.375000E+01	+	:	R	T *
9.600000E+01	+	:	R	T *
9.825000E+01	+	:	R	T *
1.005000E+02	+	:	R	T *
1.027500E+02	+	:	R	T *
1.052500E+02	+	:	R	T *
1.075000E+02	+	:	R	T *
1.097500E+02	+	:	R	T *
1.120000E+02	+	:	R	T *

TIEMPO 4.73E+01 9.46E+01 1.42E+02 1.89E+02

GRAFICA DE RECHAZO DE CARGA A 75 % (GD E ID)

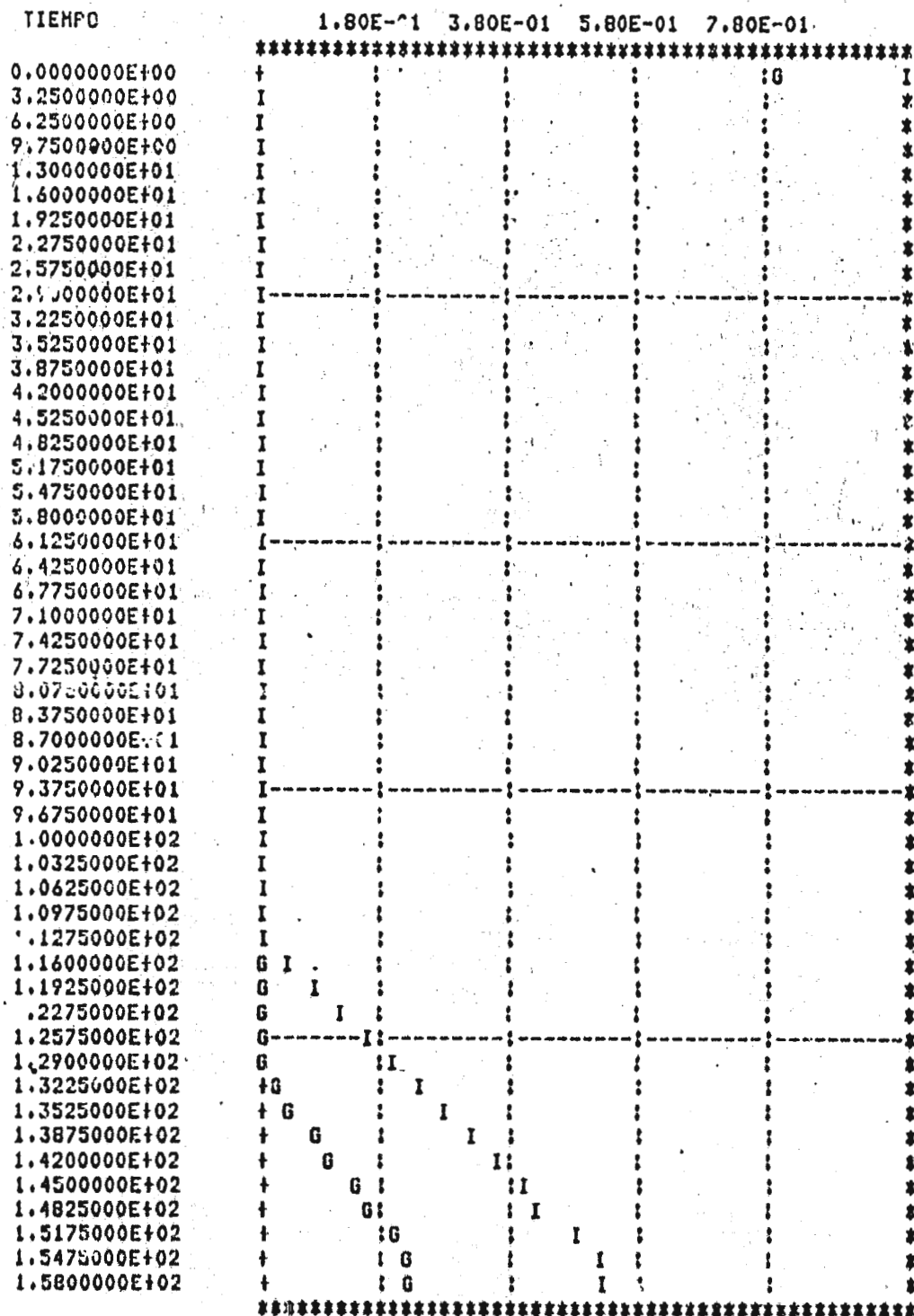
DAT.MIN = 0.000000E+00 DAT.MAX = 1.000000E+00



TIEMPO 1.80E-01 3.80E-01 5.80E-01 7.80E-01

GRAFICA DE RECHAZO DE CARGA A 100 % (GD E ID)

DAT.MIN = 0.000000E+00 DAT.MAX = 1.000000E+00



TIEMPO

1.80E-01 3.80E-01 5.80E-01 7.80E-01

GRAFICA DE RECHAZO DE CARGA A 100 Z (CE, RV Y T2)

DAT.MIN = 0.000000E+00 DAT.MAX = 4.065037E+02

TIEMPO	7.32E+01	1.54E+02	2.36E+02	3.17E+02			
0.000000E+00	+	:	:	R	:	T	*
3.250000E+00	R	:	C	:	:	:	T
6.250000E+00	R	:	C	:	:	:	T
9.750000E+00	R	:	C	:	:	:	T
1.300000E+01	R	:	C	:	:	:	T
1.600000E+01	R	:	C	:	:	:	T
1.925000E+01	R	:	C	:	:	:	T
2.275000E+01	R	:	C	:	:	:	T
2.575000E+01	R	:	C	:	:	:	T
2.900000E+01	R	:	C	:	:	:	T
3.225000E+01	R	:	C	:	:	:	T
3.525000E+01	R	:	C	:	:	:	T
3.875000E+01	R	:	C	:	:	:	T
4.200000E+01	R	:	C	:	:	:	T
4.525000E+01	R	:	C	:	:	:	T
4.825000E+01	R	:	C	:	:	:	T
5.175000E+01	R	:	C	:	:	:	T
5.475000E+01	R	:	C	:	:	:	T
5.800000E+01	R	:	C	:	:	:	T
6.125000E+01	R	:	C	:	:	:	T
6.425000E+01	R	:	C	:	:	:	T
6.775000E+01	R	:	C	:	:	:	T
7.100000E+01	R	:	C	:	:	:	T
7.425000E+01	R	:	C	:	:	:	T
7.725000E+01	R	:	C	:	:	:	T
8.075000E+01	+	:	R	:	:	:	T
8.375000E+01	+	:	R	:	:	:	T
8.700000E+01	+	:	R	:	:	:	T
9.025000E+01	+	:	R	:	:	:	T
9.375000E+01	+	:	R	:	:	:	T
9.675000E+01	+	:	R	:	:	:	T
1.000000E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.032500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.062500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.097500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.127500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.160000E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.192500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.227500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.257500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.290000E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.322500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.352500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.387500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.420000E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.450000E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.482500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.517500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.547500E+02	+	:	R	:	:	:	T
1.580000E+02	+	:	R	:	:	:	T

TIEMPO 7.32E+01 1.54E+02 2.36E+02 3.17E+02

Referencias

- 1.- "Descripción de Sistemas, Unidades 1 y 2, Planta Termoeléctrica de Tula, Comisión Federal de Electricidad.
- 2.- "Informes de Operación Turbogeneradores, Planta Francisco Pérez Ríos", Mitsubishi, Comisión Federal de Electricidad.
- 3.- "Instructivo de Operación Volúmen 1, Planta Francisco Pérez Ríos", Comisión Federal de Electricidad, Gerencia General de Operación.
- 4.- JON M. SMITH, "Mathematical Modeling and Digital Simulation for Engineers and Scientists", Ed. Wiley Interscience (1977).
- 5.- MASADA, G., "Modeling and Control of Power Plant Boiler-Turbine-Generator Systems", Ph. D. Thesis, M.I.T., November. (1979).
- 6.- OGATA, K., "Ingeniería de Control Moderna", Ed. Prentice Hall Int., (1978).
- 7.- "Registro de Velocidad Tula U.2", Comisión Federal de Electricidad.
- 8.- SHANNON, ROBERT E., "Systems Simulation the art and Science", Ed. Prentice Hall, Inc., (1975).
- 9.- "Unidades 3 y 4 de la Planta Termoeléctrica Tula, Sección 1, Turbina de Vapor", Mitsubishi, Comisión Federal de Electricidad.
- 10.- USORO, P.B., "Modeling and Simulation Drum-Boiler-Turbine Power Plant under Emergency State Control", M.S. Thesis, M.I.T. May, (1977).
- 11.- MCGOWAN, KELLY, "Top-Down Structured Programming Techniques", Ed. Petrocelli Charter (1975).

12.- WILLIAM, SCHICK., "Fortran para Ingeniería", Ed. McGraw Hill (1979).

13.- TAKAHASHI, YASUNDO., "Control and Dynamic Systems", Ed. Addison Wesley (1972).

INTRODUCCION

La inquietud latente de conocer es prioridad del ser humano para adentrarse en la investigación de los fenómenos naturales, nuestros antecesores agudizaron el ingenio e idearon instrumentos rudimentarios con el fin de conocer y explicarse hechos sobrenaturales, así como también, crearon mecanismos que les permitieron medir el tiempo.

Así brotan como necesidad imperiosa el desarrollo tecnológico dando paso a muy diferentes instrumentos de medición y precisión a realizar y donde no se pueden medir ciertos parametros de forma directa por no ser posible detectar esa forma de energía, se hace uso de los primeros transductores, como una de las formas más manejables es: la Energía Eléctrica es por esta razón como nacen los transductores Eléctricos.

OBJETIVO

En el desarrollo de ésta tesis se pretende crear una --
guía en la cual se clasifique, describan y analicen los diferentes fun-
cionamientos de los transductores Eléctricos.

Y tratando de manera práctica algunos de ellos.

I N D I C E

CAPITULO I CLASIFICACION DE LOS TRANSDUCTORES

1.1.- Definición	1
1.2.- Principales Parámetros	3
1.3.- Métodos de Selección	10
1.4.- Usos Prácticos	TABLA

CAPITULO II DISPOSITIVOS DE MEDICIONES ELECTRICAS

2.1.- Descripción	14
2.2.- El Galvanómetro	15
2.3.- El Puente de Wheatstone	20
2.4.- El Voltímetro	25
2.5.- El Osciloscopio	28

CAPITULO III TRANSDUCTORES DE FUERZA

3.1.- Descripción	30
3.2.- Indicador de Fuerza Soldado	34
3.3.- Indicador de Fuerza no Soldado	36
3.4.- Errores por Diferencia de Temperatura	40

3.5.- Transformador Diferencial con Variación Lineal	44
3.6.- Potenciómetro de Movimiento Lineal	48
3.7.- Transductores de Fuerza de Uso Específico.	54

CAPITULO IV TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA

4.1.- Descripción	57
4.2.- Cintas Bimetálicas	58
4.3.- Termistores	60
4.4.- Termómetros de Resistencia	62
4.5.- Termocuplas	64
4.6.- Pirómetros de Radiación	67

CAPITULO V TRANSDUCTORES DE PRESION Y GASTO

5.1.- Descripción	70
5.2.- Medidor Térmico	72
5.3.- Medidor de Termopar	73
5.4.- Medidor Pirani	74
5.5.- Medidor por Ionización	76
5.6.- Medidor de Fuelle	77

5.7 .-	Medidor Tipo Bourdón	78
5.8 .-	Medidor de Diafragma	79
5.9 .-	Rotámetros	81
5.10.-	Medidor de Flujo de Turbina	82
5.11.-	Medidor Magnético de Flujo	83
5.12.-	Anemómetro de Alambre Caliente	84

CAPITULO VI TRANSDUCTORES LUMINOSOS Y DE RADIACION

6.1.-	Descripción	85
6.2.-	Transductores de Sonido	87
6.3.-	Transductores de Vibraciones	90
6.4.-	Sensores de Luz Fotoemisores	92
6.5.-	Sensores de Luz Fotoconductores	96
6.6.-	Sensores de Luz Fotovoltaicos	98
6.7.-	Transductores de Radiación Nuclear y Rayos X	99
6.8.-	Transductores por Efecto Hall	103
6.9.-	Transductores de Propiedades Químicas.	106

CAPITULO VII EJEMPLO DE OPERACION Y CONSTRUCCION DE UN TRANSDUCTOR

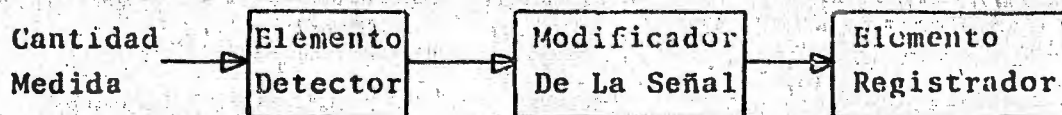
CAPITULO I

CLASIFICACION DE LOS TRANSDUCTORES

I.1.- DEFINICION

Los transductores son dispositivos que convierten energía ó información de una forma a otra y operan bajo el principio de transformar una entrada, que representa una variable física, en una señal eléctrica de salida.

Existen tres elementos principales comunes a la mayoría de los sistemas de medición y su diagrama de bloques es el siguiente:



ELEMENTOS DE UN SISTEMA GENERAL DE MEDICION

El primer elemento es el detector (ó sensor), cuyo propósito es el de responder a la magnitud (ó cambios en la magnitud) de la cantidad que se está midiendo. La respuesta es una señal de salida cuya magnitud es proporcional

a la señal de entrada.

El segundo elemento es el modificador de la señal de salida del elemento detector y la modifica ya sea -- amplificándola o cambiando su forma de onda. Cuando la señal emerge del modificador de señal, debe tener la forma -- apropiada para ser desplegada o registrada.

El tercer elemento de un sistema de medición -- es el dispositivo registrador. En los sistemas eléctricos, los dispositivos registradores incluyen instrumentos como -- medidores, tubos de rayos catódicos, registradores de papel, registradores X-Y y computadoras digitales.

Si el sistema de medición es tal que una cantidad no eléctrica se va a medir convirtiéndola a una forma -- eléctrica, se utiliza un transductor eléctrico como elemen--to detector.

El transductor eléctrico se llama activo si es capaz de producir una señal sin necesidad de una excitación eléctrica. Si el transductor es capaz de producir una señal de salida únicamente cuando se usa con una fuente de excita--ción eléctrica el transductor es pasivo.

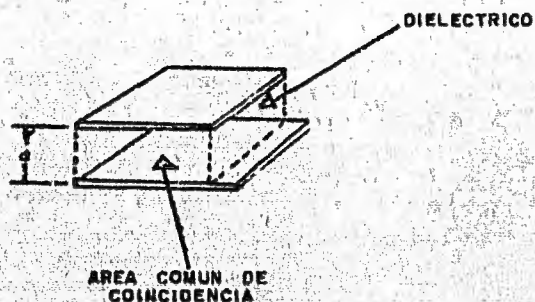
I.2.- PRINCIPALES PARAMETROS.

A continuación se numeran los principales fenómenos --
eléctricos empleados por los transductores.

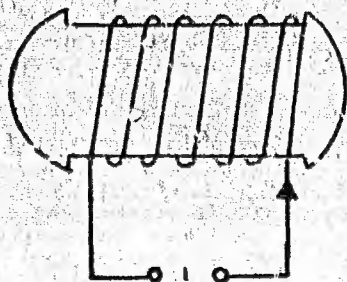
- 1.- Capacitancia
- 2.- Inductancia
- 3.- Fuerza electromagnética
- 4.- Ionización
- 5.- Fotoeléctrico ó Fotoemisor
- 6.- Fotoresistivo ó Fotoconductor
- 7.- Fotovoltaicos
- 8.- Piezoeléctrico
- 9.- Potenciométrico
- 10.- Termoeléctrico ó Termovoltaje
- 11.- Resistivo
- 12.- Variables del medio ambiente.

1.- Capacitancia.- Censa el cambio de la capacitancia al cambiar:

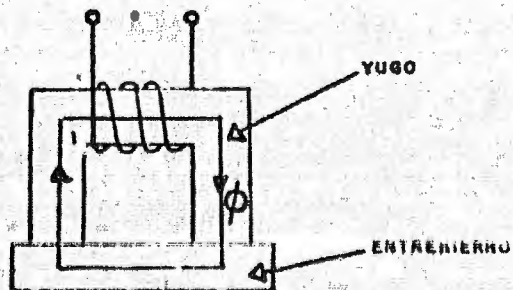
- a).- La separación entre dos placas paralelas,
- b).- Al cambio de la constante dieléctrica del medio



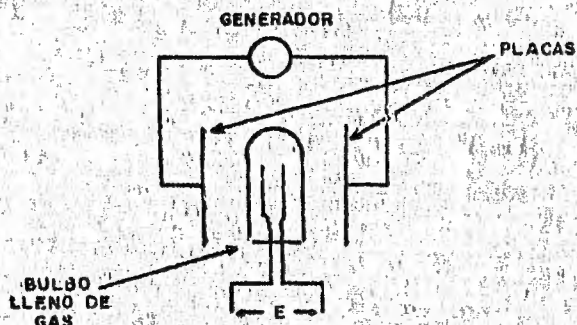
2.- Inductancia.- Censa los cambios de la inductancia propia de una bobina. Esto se logra cambiando la posición del núcleo ferromagnético de la bobina.



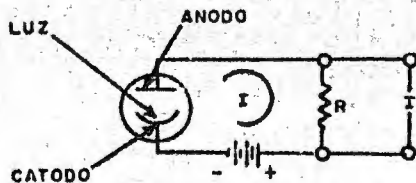
3.- Fuerza electromagnética.- Censa los efectos electromagnéticos por medio de un voltaje inducido en una bobina; el voltaje se induce al desplazar un conductor dentro de un campo magnético.



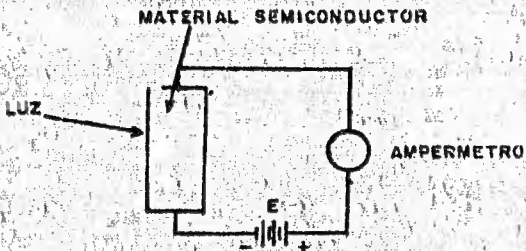
4.- Ionización.- Censa los efectos de ionización de los gases, estos efectos se determinan midiendo los cambios de corriente, resistencia ó voltaje del circuito eléctrico.



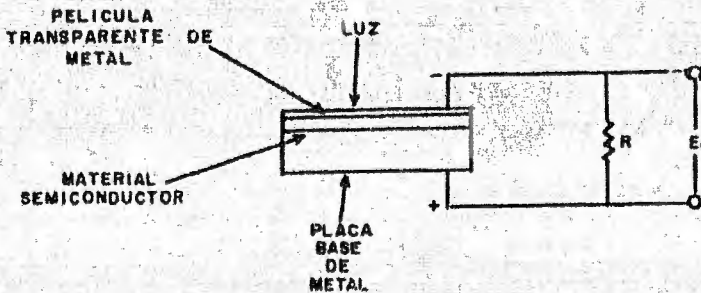
5.- Fotoeléctrico ó Fotoemisorio.- Algunas sustancias al ser iluminadas emiten un flujo de electrones el cual es proporcional al nivel de iluminación, este tipo de transductor necesita de una excitación externa.



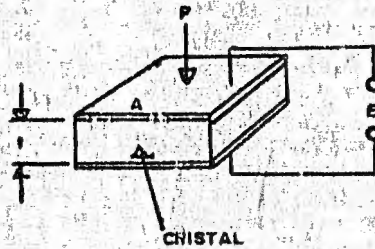
6.- Fotoresistivo ó fotoconductor.- Algunas sustancias cuando son iluminadas experimentan un cambio en su resistencia eléctrica, la cual aumenta o disminuye de acuerdo a la intensidad luminosa.



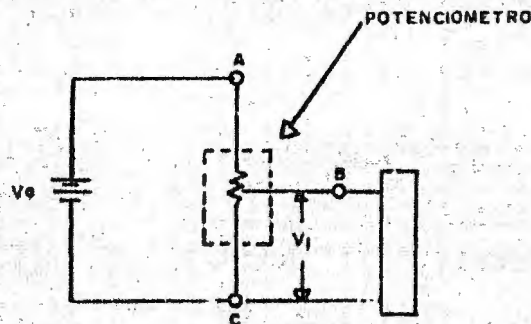
7.- Fotovoltaicos.- Si la unión de dos metales diferentes se ilumina se desarrolla un voltaje, el cual puede ser medido directamente.



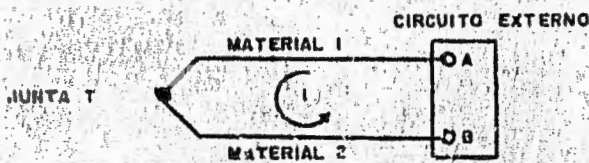
8.- Piezoeléctricos.-Ciertos cristales tienen la propiedad de que al ser sometidos a un esfuerzo mecánico, generan un voltaje el cual puede ser medido directamente.



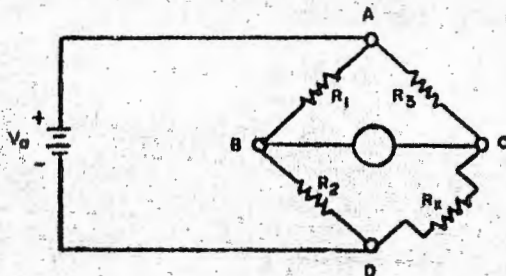
9.- Potenciométrico.- El elemento sensor debe ser un arreglo tal que al moverse el brazo de un potenciómetro registre un cambio de voltaje el cual puede medirse directamente.



10.- Termoeléctrio ó termovoltáico.- Si dos alambres de diferente material unidos en un extremo se encuentran a diferente temperatura, se producirá un voltaje en los extremos libres de los alambres, el voltaje producido es proporcional a la diferencia de temperatura.



11.- Resistivo.- El elemento sensor consiste en el cambio de resistencia que sufre un mecanismo ocasionando por un efecto físico,



12.- Variables del medio ambiente.- Estos mecanismos son similares en naturaleza a los resistivos y capacitivos, la diferencia consiste en -- que el material del cual esta hecho el resistor ó el capacitor, puede - cambiar su resistividad o permitividad de acuerdo al cambio de algunos efectos físicos tal como la humedad.

I.3.- METODOS DE SELECCION.

Cuando una medición de una cantidad no eléctrica se va a llevar a cabo convirtiendo la cantidad a una forma eléctrica, se debe seleccionar un transductor (o una combinación apropiada de ellos) para llevar a cabo la conversión. El primer paso en el proceso de selección es el de definir claramente la naturaleza de la cantidad a medir. Esto también incluye el conocimiento del rango de magnitudes y frecuencias que se espera de la cantidad exhibida. Cuando el problema se ha establecido, se deben examinar los principios fundamentales de funcionamiento del transductor aconsejable para el tipo de medición. Si uno o más transductores son capaces de producir una señal satisfactoria, debemos decidir si construir uno o utilizar uno disponible en el comercio.

Cuando las especificaciones de un transductor particular se van a examinar, los siguientes puntos se deben considerar para determinar su conveniencia para una medición.

*Ver Tabla.

- 1.- RANGO.- El rango del transductor debe ser lo suficiente grande para abarcar todas las magnitudes esperadas de la cantidad a medir.
- 2.- SENSIBILIDAD.- Para obtener un dato significativo el transductor debe producir una señal de salida suficiente por unidad de la entrada medida.
- 3.- CARACTERISTICAS DE LA SALIDA ELECTRICA.- Las características eléctricas (tales como la impedancia de salida, la respuesta de frecuencia y la respuesta en el tiempo) de la señal de salida, la respuesta de frecuencia y la respuesta en el tiempo de la señal de salida del transductor deben ser compatibles con el dispositivo registrador y el resto del equipo del sistema de medición.
- 4.- AMBIENTE FISICO.- El transductor seleccionado debe ser capaz de soportar las condiciones ambientales a las cuales puede estar sujeto mientras hace las mediciones. Parámetros tales como la temperatura, humedad y químicos corrosivos pueden dañar algunos transductores pero no otros.

5.- ERRORES.- Los errores inherentes en la operación - del transductor o aquellos causados por las condiciones ambientales deben ser lo suficiente pequeños o controlables de tal forma que no sean significativos en los datos tomados.

Una vez que el transductor se ha seleccionado e incorporado dentro del diseño del sistema de medición se deben observar las siguientes guías para incrementar la exactitud de las mediciones:

- 1.- Calibración de Transductor.- La salida del transductor se debe calibrar con respecto a algún patrón conocido mientras se utiliza bajo las condiciones - que va a trabajar. Esta calibración se debe efectuar regularmente.
- 2.- Los cambios en las condiciones ambientales del transductor se deben registrar continuamente. Si se sigue este procedimiento, los datos obtenidos se pueden corregir más tarde tomando en cuenta los cambios en las condiciones ambientales.

3.- Se pueden reducir los posibles errores de un transductor controlando artificialmente el medio ambiente. Ejemplos del control artificial del medio ambiente del transductor incluyendo su encerramiento en una caja o gabinete a temperatura controlada ó aislar el dispositivo de las vibraciones y choques externos.

CAPITULO II DISPOSITIVOS DE MEDICIONES ELECTRICIAS

2.1.- DESCRIPCION.

Una gran mayoría de los dispositivos de medición utilizan algún principio eléctrico básico para su operación o cuentan con un dispositivo electrónico para las etapas intermedia, de modificación y final de lectura,. En consecuencia resulta ventajoso discutir algunos de los más importantes dispositivos eléctricos que se emplean comúnmente y realizar su relación con los procesos de medición.

Como primer punto se analizará el principio de funcionamiento del galvanómetro como elemento sensor de corriente.

En segundo punto se describirá el funcionamiento del Puen- te de Wheatstone como comparador de resistencias, inductancias y capaci- tancias.

El tercer punto se describirá el voltímetro y sus múlti- ples usos en las mediciones eléctricas.

Por último se hablará del osciloscopio como elemento medidor de voltajes con cualquier tipo de onda en el tiempo.

2.2.- GALVANOMETRO.

Cualquier dispositivo utilizado para detectar o medir una corriente se denomina galvanómetro, y la mayor parte de estos instrumentos están basados en el par ejercido sobre una bobina colocada en un campo magnético.

Existen en la actualidad varios tipos de galvanómetros como son el de espejo, el de aguja, el de hierro móvil, etc.

De entre todos ellos el más utilizado y -- del cual se derivan los otros es el galvanómetro D' Arsonval. Su amplia aplicabilidad se debe a su sensibilidad y exactitud extremas. Corrientes menores de $1\mu\text{A}$ y 1A se pueden detectar en medidores de este tipo disponibles en el comercio. (Ciertos instrumentos especiales de laboratorio los cuales utilizan el movimiento D'Arsonval pueden medir corrientes tan pequeñas como $1 \times 10^{-13}\text{A}$).

El movimiento se detecta por medio de la fuerza, que resulta de la interacción del campo magnético formado por las piezas polares y el campo que se forma al fluir la corriente en una bobina de alambre. La fuerza se utiliza

para generar un movimiento mecánico, el cual se mide en una -
escala calibrada.

En la figura Núm.-1 se muestran los elementos y la configuración de un galvanómetro del tipo D'Arsonval.

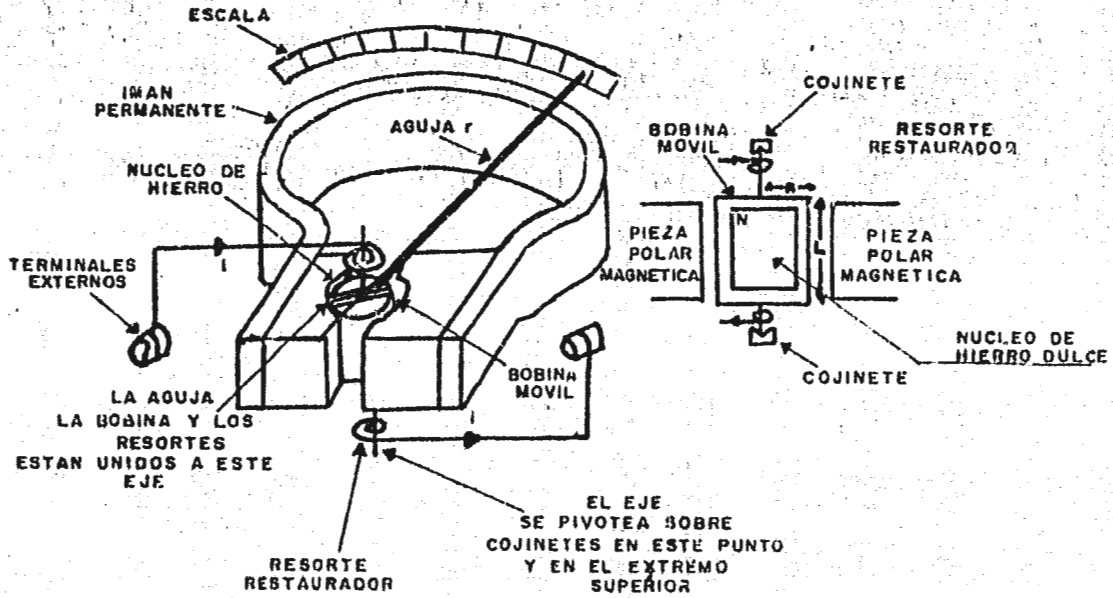
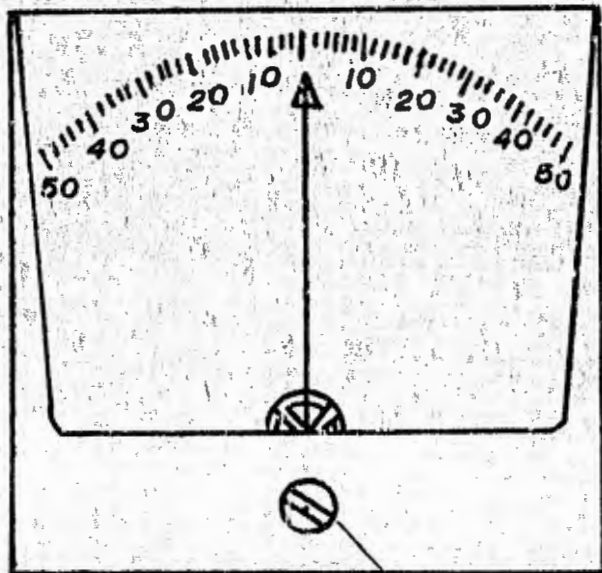


FIGURA NUM.- 1

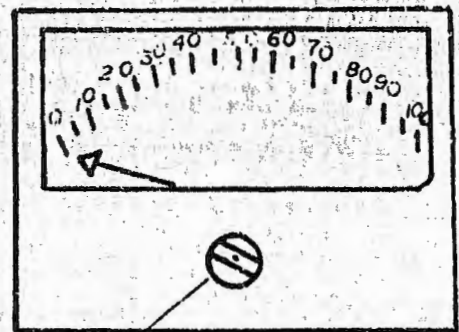
De la figura anterior se observa que una bobina de alambre se une a un eje el cual se pivotea sobre un cojinete de piedra. La bobina puede rotar en el espacio entre un núcleo cilíndrico de hierro y dos piezas polares magnéticas. Las piezas polares crean el campo magnético y el núcleo de hierro sirve para limitar el campo del hierro entre él y las piezas polares. Si se aplica una corriente a la bobina suspendida. Dos resortes pequeños suministran un torque (fuerza rotacional) que se opone al torque magnético. La tensión de los resortes está calibrada de tal forma que una corriente conocida produzca una rotación con un ángulo especificado. (Los resortes también sirven para conectar la corriente eléctrica a la bobina). Una aguja muy liviana muestra la rotación en una escala calibrada.

La deflexión de la aguja es directamente proporcional a la corriente que fluye en la bobina, con tal que el campo magnético sea uniforme y la tensión de los resorte sea lineal. Por tanto la escala del medidor también es lineal. La exactitud del movimiento D'Arsonval utilizado en los medidores comunes de laboratorio es cerca del 1 por ciento de la lectura de plena escala. Figura Núm. 2 y 3.

Los dos tipos de escalas generalmente empleados con el movimiento D'Arsonval son: los que tienen el Cero en el centro de la escala, y los que tienen el cero al extremo izquierdo de la escala.



ESCALA CON CERO CENTRAL



ESCALA CON EL CERO A LA IZQUIERDA

TORN LO PARA
EL AJUSTE DEL
CERO MECANICO

FIGURA NUM. 2 Y 3

2.3.- EL PUENTE DE WHEATSTONE.

Los circuitos puente tienen gran variedad de aplicaciones en la medición de resistencia, inductancia y capacitancia bajo condiciones tanto de estado permanente como de estado transitorio.

El puente de Wheatstone se utiliza generalmente para la comparación y medición de resistencias en un rango de 1 ohm a 1 megaohm.

En la figura Núm. 4.- se presenta un circuito esquemático de dicho puente, el cual está compuesto por cuatro resistencias R_1 , R_2 , R_3 , R_x . R_1 es una resistencia variable, mientras que R_x es la resistencia a medir.

El circuito trabaja en base al principio que no fluya corriente a través del galvanómetro (muy sensible) conectado entre los puntos b y d de la figura Núm.4, si no existe diferencia potencial entre estos puntos se dice que el puente está equilibrado. Esta condición de equilibrio se logra si el voltaje E se divide en el camino a,b y d por las resistencias R_1 y R_2 en la misma relación como en el camino a,c y d por las resistencias R_3 y R_x .

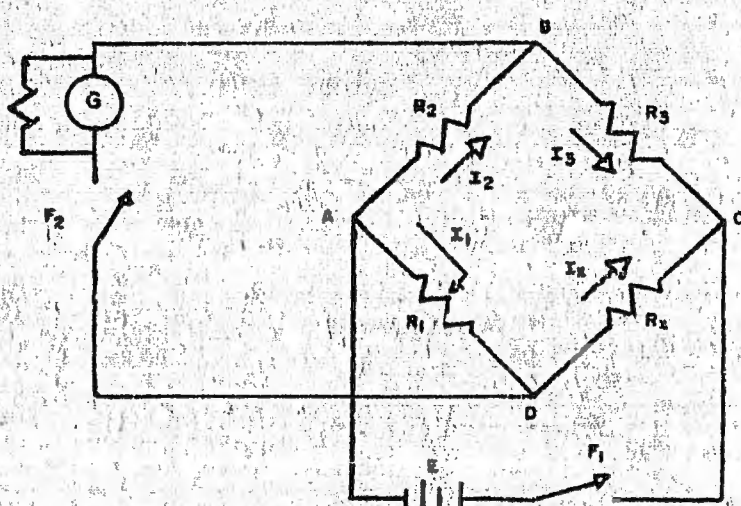


FIGURA NUM. 4

DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN PUENTE DE WHEATSTONE BASICO

Por lo tanto los puntos b y c estarán al mismo potencial. Por lo tanto la condición de no flujo de corriente en el galvanometro implica.

$$\begin{aligned} \text{a).-} \quad & V_{ab} = V_{ac} \\ & R_1 I_1 = R_3 I_2 \\ & V_{bd} = V_{cd} \end{aligned}$$

$$\text{b).-} \quad R_2 I_1 = R_x I_2$$

Dividiendo la ecuación a entre la ecuación

b queda :

$$\frac{R_1 I_1}{R_2 I_1} = \frac{R_3 I_2}{R_x I_2}$$

Reduciendo

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}$$

Despejando R_x tenemos que:

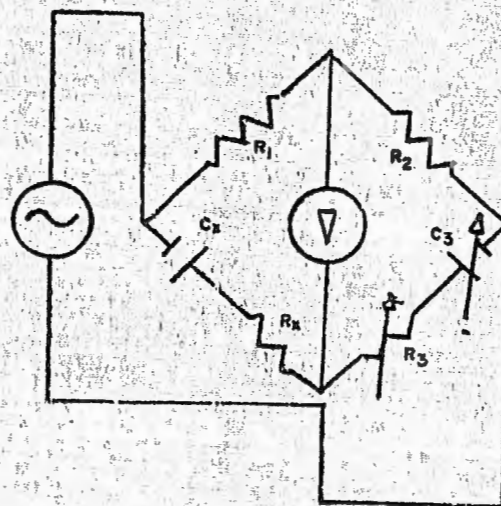
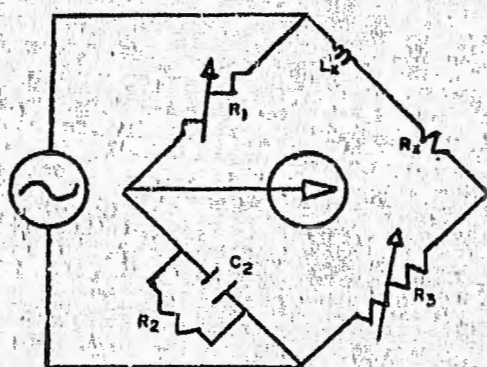
$$R_x = \frac{R_3 R_2}{R_1}$$

Como R_1 , R_2 y R_3 son resistencias conocidas, por lo que el valor de R_x se puede determinar.

En puentes prácticos, la relación R_2 a R_1 , se controla por medio de un interruptor que cambia esta relación por década (factores de 10). Por lo que esta relación se puede hacer igual a 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 1, 10, 10^2 y 10^3 .

Si se pretende realizar una medición exacta con el circuito puente, se deben conocer en forma precisa los valores de las resistencias; además, el galvanómetro debe ser lo suficientemente sensible como para detectar pequeños grados de desequilibrio en el circuito. Cuando se coloca la resistencia R_x en el circuito, se debe tener cuidado de utilizar alambres cuya resistencia sea pequeña comparada con el valor de la que se requiere conocer.

En las figuras Núm. 5 y 6.- se muestran arreglos de puentes en los cuales se pueden calcular respectivamente valores de inductancia y capacitancia utilizando el mismo principio que el puente de resistencia ha excepción que se utilizan fuentes de corriente alterna.



FIGURAS NUM. 5 Y 6
ARREGLOS DE PUENTES PARA CALCULAR INDUCTANCIAS
Y CAPACITANCIAS.

2.4.- EL VOLTÍMETRO.

El Voltímetro-Óhmetro-Miliamperímetro (VOM), es un instrumento de laboratorio muy útil y versátil. Es un medidor capaz de medir voltajes de cd y ca, corrientes de cd y resistencias. Los diferentes circuitos que se requieren para medir cada una de estas cantidades se involucran en el diseño del aparato. Para mediciones de cd, el VOM incorpora un movimiento D'Arsonval. Para mediciones de ca, un medidor de ca con rectificador se utiliza (porque el medidor de ca rectificador también usa el movimiento D'Arsonval). Las resistencias se miden por medio del circuito de un Óhmetro. En el circuito de un Óhmetro se aplica el voltaje de una batería a través de una conexión en serie de una resistencia conocida y otra desconocida. El movimiento D'Arsonval determina el valor de la resistencia desconocida midiendo la fracción del voltaje de la batería que cae a través de la resistencia conocida. Puesto que la batería está sujeta a desgaste y envejecimiento, su voltaje de salida se debe chequear periódicamente para estar seguros que todavía es capaz de funcionar adecuadamente.

Quando se utiliza como un voltímetro de cd, el VOM tiene una sensibilidad de $20.000 - \Omega / V$ y rangos de plena escala de 2.5 a 1.000 V. Como voltímetro de ca, el VOM tiene una sensibilidad -

de 5.000 Ω /V y rangos de plena escala de 2,5 a 1.000 V. -
Como amperímetro de cd el VOM es capaz de medir corrientes desde 1 mA hasta 1A. Finalmente, se pueden medir resistencias entre 0.1 Ω y 10 M Ω con el circuito del óhmetro. la exactitud típica de los VOM está entre el 1 y el 2 por ciento del valor de plena escala.

El Vóltmetro de tubo al vacío (VTVM), es uno de los aparatos de laboratorio más usados para la medición de voltajes. Se puede usar tanto para mediciones de voltaje directo como alterno y es particularmente valioso por sus características de alta impedancia de entrada, las cuales lo hacen aplicable a la medición de voltajes en circuitos electrónicos.

Vóltímetros Digitales.-En la actualidad, existe una amplia variedad de vóltmetros que producen una salida digital en vez de la indicación convencional por aguja. Este tipo de instrumentos tiene la ventaja de reducir los errores de lectura del operador, a la vez que se incrementa la velocidad de la misma. Cada vóltmetro digital opera en base a diferentes principios.

De la figura anterior se observa que una bobina de alambre se une a un eje el cual pivotea sobre un cojinete de piedra. La bobina puede girar en el espacio entre un núcleo cilíndrico de hierro y dos piezas polares magnéticas. Las piezas polares crean el campo magnético y el núcleo de hierro sirve para limitar el campo al entre hierro entre él y las piezas polares. Si se aplica una corriente a la bobina suspendida, la fuerza resultante sobre ella originará su rotación. Dos resortes pequeños suministran un torque (fuerza rotacional) que se opone al torque magnético. La tensión de los resortes está calibrada de tal forma que una corriente conocida produzca una rotación con un ángulo especificado. Los resortes también sirven para conectar la corriente eléctrica a la bobina. Una aguja muy liviana muestra la rotación en una escala calibrada.

La deflexión de la aguja es directamente proporcional a la corriente que fluye en la bobina, siempre que el campo magnético sea uniforme y la tensión de los resortes sea lineal. Por tanto la escala del medidor también es lineal. La exactitud del movimiento D'Arsonval utilizado en los medidores comunes de laboratorio es cerca del 1 por ciento de la lectura de plena escala.

2.5.- EL OSCILOSCOPIO.

Los osciloscopios de rayos catódicos (CRO), son capaces de seguir señales de frecuencia hasta de 500 -- MHz. Frecuencias aún mayores se han mostrado con el osci-- loscopio de muestreo (que es una variación del oscilosco-- pio básico).

El dispositivo que permite observar tales variaciones de alta velocidad es el tubo de rayos catódicos (muy similar al tubo de rayos catódicos de televisión). El tubo genera un haz delgado de electrones (el rayo catódico) dentro de él. Este haz se dirige de tal forma que golpea una pantalla fluorescente que cubre uno de los extremos del tubo. Mientras el haz golpea la pantalla, se emite un punto visible de luz. A medida que el haz se mueve a través de la pantalla, "pinta" un trazo de su camino. Puesto que el haz está conformado por electrones que son partículas - cargadas eléctricamente, se pueden deflectar rápida y segu- ramente por medio de campos eléctricos y magnéticos coloca- dos en su camino. Además, los electrones son muy livianos y no tienen problemas de inercia y pueden responder casi -- instantáneamente a las rápidas variaciones de las señales de frecuencias muy altas. Esta capacidad permite al CRT desple- gar virtualmente cualquier tipo de forma de onda en la pan-

talla del osciloscopio. Los campos, que causan las deflexiones del haz, se crean a lo largo de su camino por medio de las placas deflectoras. Las intensidades de los campos están determinadas por los voltajes aplicados a las placas y de esta forma la cantidad de deflexión es directamente proporcional al voltaje de la señal aplicada a ellas. Concluimos además que el osciloscopio realmente es un voltímetro con un mecanismo de una velocidad super alta para mostrar las lecturas. La figura Núm. 7.- muestra el principio de funcionamiento de un TRC (Tubo de rayo catódico).

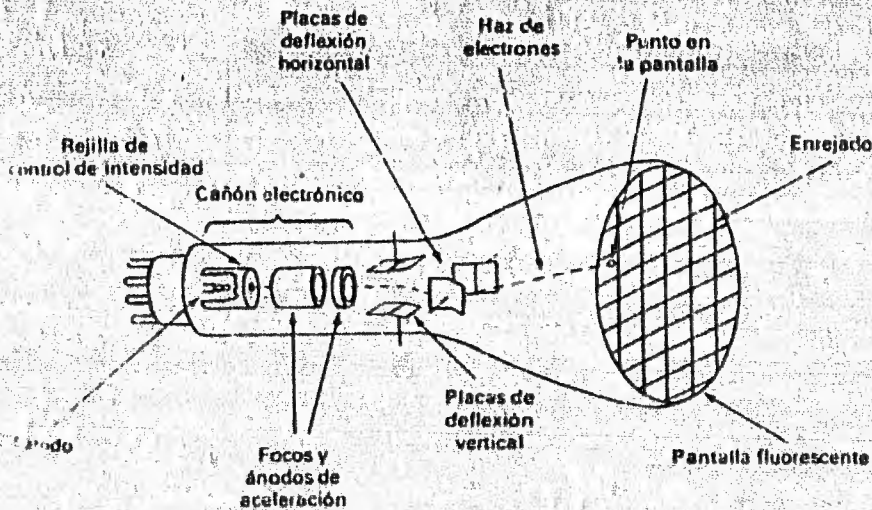


FIGURA NUM. 7.

OSCILOSCOPIO DE TUBO DE RAYOS CATODICOS

CAPITULO III

TRANSDUCTORES DE FUERZA

DESCRIPCION.

En el presente capítulo trataremos y detallaremos a los transductores de fuerza que son los más utilizados, esto se debe al hecho de que pueden detectar y -- convertir fuerza ó pequeños desplazamientos mecánicos -- forma de señales eléctricas. A esto podemos agregar que -- existen muchas otras cantidades tales como son torque, pre -- sión, peso y tensión que de alguna u otra forma involucran fuerza ó efectos mecánicos de desplazamiento efectos que -- también se pueden medir por medio de los transductores de -- fuerza. Además, si el desplazamiento mecánico a medir va -- ría con respecto al tiempo como puede ser un movimiento de tipo vibratorio, este se puede detectar en forma de señales con frecuencias hasta de 100 KHz.

En los transductores de fuerza se produce un cambio fraccional en las dimensiones lineales debido a -- una fuerza aplicada, lo cual también origina un cambio en

la resistencia eléctrica puede ser del tipo de transductor de fuerza soldado y se usa para detectar desplazamientos producidos por grandes fuerzas.

El transductor de fuerza no soldado es más sensible y tiene sus mayores aplicaciones en desplazamientos mecánicos que varían en su rango detector de fuerzas entre ± 4 gr. y 454 grs.

La medición de errores por diferencia de temperatura por métodos eléctricos resulta muy útil y conveniente ya que estos métodos permiten obtener una señal que fácilmente puede detectarse, amplificarse ó utilizarse para propósitos de control.

Otros transductor con una amplia gama de aplicaciones y que trataremos en el capítulo es el conocido como transformador diferencial con variación lineal (LVDT)

Este transductor también produce una señal eléctrica y es linealmente proporcional al desplazamiento mecánico; estos desplazamientos se pueden detectar por medio del LVDT y son relativamente grandes comparados con los que se logran con el transductor de fuerza. El LVDT tiene sus

aplicaciones donde los desplazamientos son muy grandes y no se pueden emplear los transductores de fuerza. Los transductores LVDT detectan desplazamientos desde micropulgadas hasta pulgadas.

El transductor de movimiento lineal es un poco más restringido en sus aplicaciones. Esto se debe a que tienen una menor exactitud y como consecuencia un margen de error mayor así como también el de un menor costo de construcción.

Los transductores de uso específico son mucho más exactos en cada una de sus aplicaciones como es el caso del transformador diferencial con variación rotacional ó el acelerómetro con LVDT.

Se puede concluir que por todo lo anterior estos métodos proporcionan gran exactitud, siempre que se llevan a cabo con una calibración y compensación adecuada, proporcional a la fuerza ejercida sobre el indicador. Se conoce que la resistencia de un alambre se incrementa cuando se estira su longitud y por lo tanto el cambio en la resistencia del indicador suministra una indicación de la fuerza que originó la extensión. Sin embargo, la magnitud del cam

bio de la resistencia en los indicadores soldados es única mente del orden del 0.1 por ciento del valor de la resistencia sin estirar. (la resistencia inicial de los indicadores de fuerza de alambre metálico varía entre 120 ohms y 400 ohms) por consiguiente la señal de salida debe ser controlada por medio de un circuito en puente de Wheatstone. Los indicadores del tipo soldado se construyen en tamaños de alrededor de 1/8 pul X 1/8 pul. hasta un máximo que puede ser de 1 pul. X 1 pul.

Una de las dificultades asociadas con el uso de los indicadores de fuerza es que su resistencia también depende de la temperatura. Por lo tanto un cambio en la temperatura del medio ambiente en los alrededores ó inducido por la compresión originará una señal de salida errónea del indicador.

Para evitar estos errores se usa el indicador de fuerza no soldado.

3.2.- Indicador de Fuerza Soldado.

El indicador de fuerza es uno de los transductores más comúnmente utilizado. Su demanda en el mercado se debe al hecho de que puede detectar y convertir fuerza o desplazamientos mecánicos en señales eléctricas. Ya que muchas otras unidades tales como torque, presión, peso y tensión que generan fuerza o efectos mecánicos de desplazamiento, también se pueden medir por medio de los indicadores de fuerza además. Si el desplazamiento mecánico a medir varía con el tiempo (tal como un movimiento de vibración) se pueden detectar señales con frecuencias hasta de 100 Khz.

En los transductores indicadores de fuerza se produce un cambio fraccional en la dimensión lineal debido a una fuerza aplicada, lo cual también origina un cambio en la resistencia eléctrica. Si el alambre con el cual se construye el indicador de fuerza está adherido o soldado a una base plástica ó de papel delgado, el indicador se llama indicador de fuerza soldado como se muestra en la figura Núm.8.-

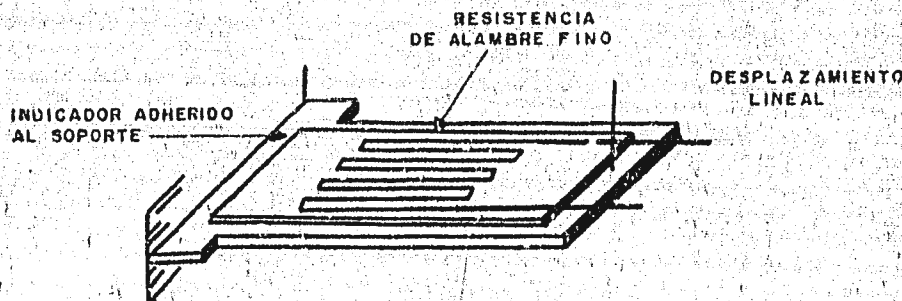


FIGURA NUM. 8

Este tipo de indicador es utilizado para -
detectar desplazamientos producidos por grandes fuerzas. -
El indicador de fuerza está soldado por medio de un adhesi--
vo especial a la estructura a medir. El adhesivo debe sos-
tener el indicador fuerte y firmemente sobre la estructura
y además debe ser capaz de brindar elasticidad bajo el indi-
cador sin rajarse. Para algunas aplicaciones el adhesivo -
también debe ser resistente a la humedad, temperatura y --
otras condiciones ambientales extremas.

3.3.- Indicador de Fuerza no Soldado.

Como se menciona al final del punto anterior el indicador de fuerza no soldado se usa para contrarrestar el efecto de la temperatura. este indicador se puede montar en la misma estructura en una dirección perpendicular a la dirección de la fuerza. según se muestra en la siguiente figura.

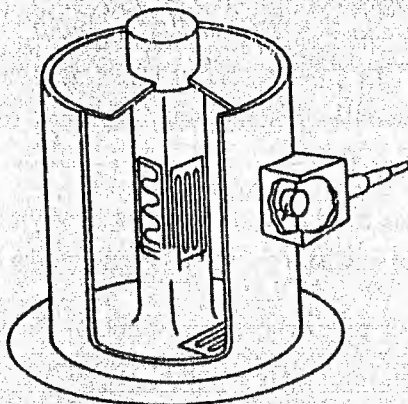


FIGURA NUM. 9

Celda de carga que muestra como los indicadores de fuerza se pueden montar para compensar los cambios de temperatura.

Esto se hace con una celda típica usada para medir cargas pesadas. Cada indicador se puede usar como la rama de un puente de resistencias. Cualquier cambio de resistencia debido a temperatura será igual en ambos indicadores y el puente permanecerá balanceado. De esta manera, las variaciones debidas a temperatura se pueden eliminar como fuente de error.

Puesto que los indicadores soldados requieren de una gran fuerza para tener cambios medibles en sus dimensiones, las fuerzas pequeñas se deben medir con indicadores de diseño diferente. Un diseño que produce dispositivos más sensibles es el utilizado en el llamado indicador de fuerza sin soldar y su nombre se deriva del hecho que los alambres del indicador se unen a un soporte fijo y otro móvil y por lo tanto se necesita tan solo una pequeña fuerza para cambiar la longitud del alambre, como se muestra en la figura Núm. 10.-

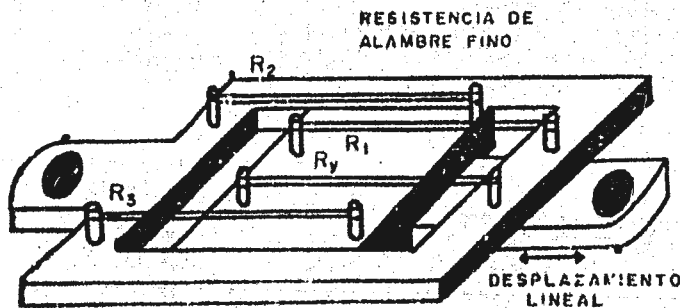


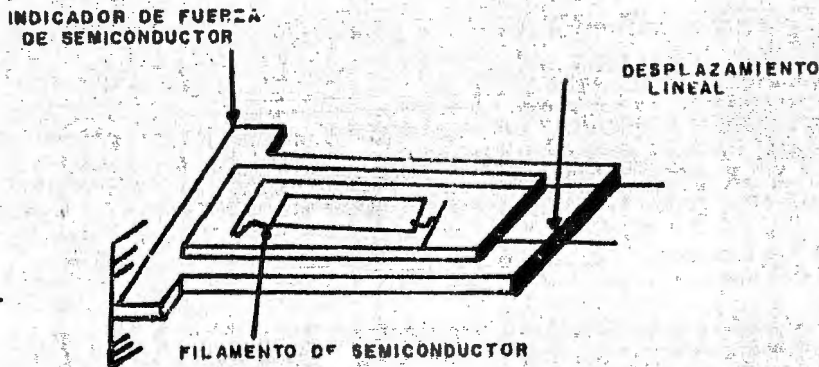
FIGURA NUM. 10.

Este tipo de indicador es capaz de detectar fuerzas entre 0.15 oz y 5 lb.

La razón entre el cambio fraccional de resistencia ($\Delta R/R$) al cambio fraccional de la longitud del alambre ($\Delta L/l$) suministra una medida de la sensibilidad del indicador de fuerza. A esta razón se llama el factor del indicador (GF):

$$GF = \frac{(\Delta R / R)}{(\Delta l / l)}$$

Un valor típico de GF está entre 2 y 3 para indicadores de fuerza de alambre metálico. Sin embargo, si el indicador de fuerza se construye con materiales especiales semiconductores, el GF asociado puede ser tan alto como 130. (ver figura Núm. 11.)



INDICADOR DE FUERZA SOLOADO

FIGURA NUM. 11

Por consiguiente el indicador de fuerza - de semiconductor es conveniente para medir tensiones más - bajas que aquellas que se pueden medir con indicadores de fuerza metálicos. Desafortunadamente, los indicadores de fuerza de semiconductores son mucho más sensibles a las fluctuaciones de la temperatura que los de alambre metálico; en consecuencia, se deben usar en sistemas con diseños efectivos de compensación por temperatura.

3.4.- Errores por Diferencia de Temperatura.

Las resistencias eléctricas son dispositivos muy exactos para la medición de temperaturas, que consiste en esencia, de un elemento resistivo que se expone a la temperatura por medir. De esta manera, el cambio en la resistencia eléctrica del material constituirá una indicación de la temperatura.

Existen varios tipos de materiales que pueden utilizarse como elementos resistivos, los cuales son.

COEFICIENTES DE RESISTENCIAS POR TEMPERATURA \propto A TEMPERATURA AMBIENTE $^{\circ}\text{C}^{-1}$

Níquel	0.0067
Hierro (aleaciones)	0.002 a 0.006
Tungsteno	0.0048
Aluminio	0.0045
Cobre	0.0043
Plomo	0.0042
Plata	0.0041
Oro	0.004

Platino	0.00392
Mercurio	0.00099
Magnanima	+0.00002
Carbón	-0.02 a -0.09
Semiconductor(termistores)	-0.068 a + 0.14

El coeficiente de resistencia por temperatura se define por:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 T_2 - R_1 T_1}$$

Donde R_1 y R_2 , son las resistencias del material a las temperaturas T_1 y T_2 respectivamente. La relación anterior se aplica generalmente en un rango limitado de temperaturas, en el que la variación de la resistencia con la temperatura sea aproximadamente lineal. Cuando se desea abarcar rangos mayores, la resistencia con la resistencia del material se expresa generalmente por la relación cuadrática siguiente:

$$R = R_0 (1 + aT + b_T^2)$$

R es la resistencia a la temperatura T .

R_0 es la resistencia a $0^\circ F$

a, b son constantes determinadas experimentalmente.

Dependiendo de la aplicación, existen varios métodos para fabricar transductores por resistencia. En todos los casos se debe estar seguro de que la resistencia esté libre de esfuerzos mecánicos, y esté colocado. De tal manera que no tenga contacto con la humedad, ya que ésta perturba la medición.

La medición de la resistencia se puede -- llevar a cabo mediante un circuito puente. En las mediciones estáticas, bastará con equilibrar el puente, mientras que en las mediciones de transitorios, habrá que medir por deflexión. Una de las fuentes principales de error en estos transductores es el efecto que produce la resistencia de los alambres que conectan el elemento sensor con el -- puente.

Para corregir lo anterior se han ideado -

algunos arreglos que se basan en la condición de equilibrio tal que el hilo central no conduce corriente, con lo que se cancela el efecto de la resistencia de los otros dos. El arreglo callender de cuatro hilos resuelve el problema colocando dos hilos adicionales en el brazo ajustable del puente de tal manera que se anule el efecto de los alambres que conectan al sensor del puente. El arreglo de pontencial flotante esta provisto de un hilo adicional, el cual puede servir para comprobar que las resistencias de los alambres son iguales. De esta manera si se efectúa una lectura en la posición mostrada y a continuación se hacen otras en las que se intercambien sucesivamente los hilos de la izquierda y la derecha, se tendrá que el promedio de las lecturas proporcionará un valor en el que se ha minimizado el error por efecto de resistencia de los alambres.

3.5.- Transformador Diferencial con Variación Lineal.

Tal como el indicador de fuerza, este -- también produce una señal eléctrica que es linealmente -- proporcional al desplazamiento mecánico. Los despla-- zamientos que se pueden detectar por medio del LVDT son re-- lativamente grandes comparados con los que se logran con -- el indicador de fuerza. Por lo tanto, los LVDT son conve-- nientes en aquellas aplicaciones donde los desplazamientos son muy grandes para emplear un indicador de fuerza. Por ejemplo, los LVDT pueden detectar desplazamientos desde -- micropulgadas hasta pulgadas. A menudo se utilizan con -- otros transductores puesto que se pueden conectar a los que tengan una salida mecánica.

El LVDT sensa desplazamiento por medio del movimiento de un núcleo ferromagnético dentro de un trans-- formador especial .

*Ver figura. Núm. 12 y Gráfica.

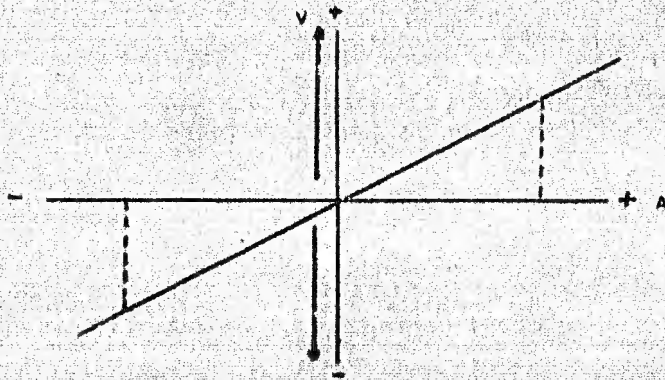
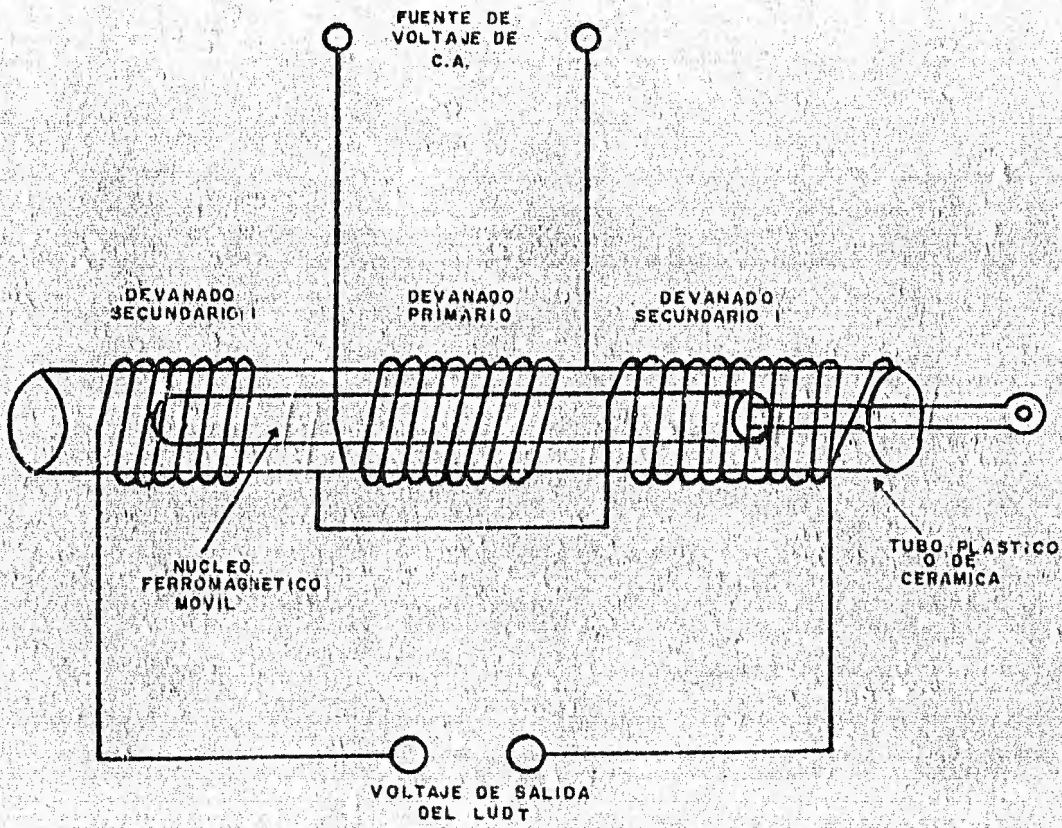
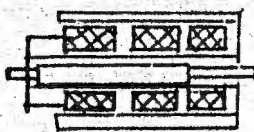


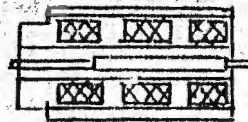
FIGURA NUM.12 Y GRAFICA

El transformador tiene un devanado primario y dos devanados secundarios. Todos los tres están devanados sobre un mismo tubo aislador hueco. El devanado primario se encuentra en el centro del tubo y los dos devanados secundarios en los extremos con igual número de vueltas y conectados en serie-oposición. Esto significa que si el acoplamiento entre cada devanado secundario y el primario es igual, el voltaje V_o , a través de los alambres de los devanados secundarios será cero, aún cuando el devanado primario esté excitado con una señal de ca.

Si el núcleo ferromagnético está centrado con respecto a la longitud del transformador, el acoplamiento es mutuo entre cada devanado secundario y el primario es igual. Mientras esta condición exista, $V_o = 0$. Sin embargo, si el núcleo se mueve de su posición central, el acoplamiento mutuo entre cada devanado secundario y el devanado primario ya no será igual. Por ejemplo si el núcleo en la figura. Núm. 13 .

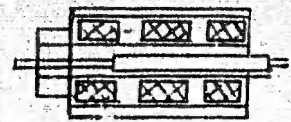


NUCLEO EN A



NUCLEO EN O

(POSICION NULA)



NUCLEO EN B

FIGURA NUM. 13

Se mueve a la derecha, el acoplamiento mutuo entre el devanado secundario N^o 2 y el primario incrementa, mientras que el acoplamiento mutuo entre el devanado secundario N^o 1 y el primario decrece. Un traslado del núcleo a la izquierda tendrá un efecto contrario. Como resultado de los cambios en el acoplamiento mutuo, el voltaje V_o , a través de los alambres de salida conectados a los devanados secundarios ya no será cero, además este voltaje de salida será proporcional linealmente a la magnitud del desplazamiento.

La sensibilidad de un LVDT se especifica en mV/0.001 pul. Su voltaje de salida actual se encuentra multiplicando la sensibilidad, el desplazamiento y el valor rms del voltaje de entrada. Como resultado, la salida de voltaje puede ser de varios voltios o más. Esto da al LVDT una gran salida de voltaje comparada con muchos otros transductores. Además, los LVDT suministran una salida cuya resolución es continua.

3.6.- Potenciómetro de Movimiento Lineal.

Cuando los voltajes de cd se miden con un medidor D' Arsonval una combinación de factores restringe la exactitud total de la medición. Fuentes de error tales como la fricción en los cojinetes, no linealidad de los resortes restauradores, errores humanos de lectura evitan -- que los voltajes medidos se conozcan con una exactitud mayor de 0,1 por ciento. Si se desea extender este límite de exactitud, se debe diseñar un procedimiento de medición que utilice componentes muy exactos y que elimine aspectos mecánicos indeseados del movimiento del metro. El potenciómetro es un instrumento que utiliza tal procedimiento de medición. Como consecuencia, aún los potenciómetros manuales son capaces de medir voltajes dentro de una exactitud de ± 0.05 por ciento. Mayores exactitudes se logran con instrumentos más elaborados del tipo de autobalanceo ($\pm 0.1\%$ ó menos), tales exactitudes hacen el potenciómetro ideal para calibrar otros voltímetros. Además de utilizarse como un patrón de calibración, los potenciómetros se pueden emplear como detectores de niveles de voltaje del orden de los microvoltios. Esta capacidad se usa para medir los minúsculos voltajes de salida de los transductores como las termocoplas, cristales piezoeléctricos y dispositivos foto-

voltáicos y se pueden hacer mediciones de corriente en el rango de los nanoamperios (10^{-9} A) Con el potenciómetro.

Los potenciómetros logran la condición nula o de balance con el mismo principio básico de medición y la linealidad. Sin embargo, el potenciómetro manual es el más simple de los instrumentos. Puesto que es más fácil comprender los principios generales de las mediciones con el potenciómetro a partir del estudio de un instrumento simple, vamos a discutir el potenciómetro manual de movimiento lineal.

La operación de este potenciómetro se puede entender mucho mejor con la ayuda de un diagrama eléctrico que muestre sus principales elementos. Figura Núm. 14.-

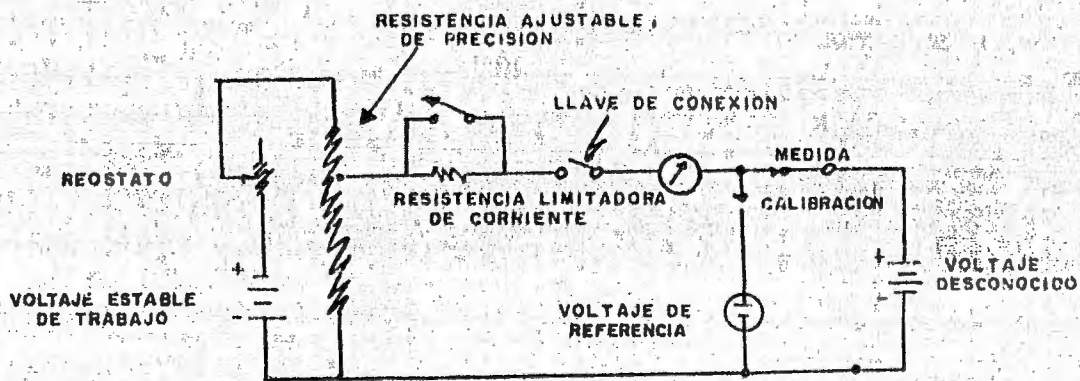


DIAGRAMA ELECTRICO DE UN POTENCIOMETRO

FIGURA NUM. 14

La resistencia ajustable de precisión es realmente el corazón de todo el dispositivo. Básicamente con siste de una longitud de alambre cuya resistencia total se co noce muy exactamente dentro de un $\pm 0.02\%$ ó más. Además la sección transversal del alambre se conserva extremadamente -- uniforme de tal forma que cualquier fracción de su longitud - total contendrá la misma fracción de su resistencia total. - Si una corriente de 10,0 mA fluye en este elemento resistivo de 150 Ohms existirá una caída de voltaje de 1.5 V a través de toda su longitud.

Un cursor deslizable se une a la resis- tencia de precisión de tal forma que una fracción conocida - del voltaje total a través de la resistencia se puede "tomar" colocando el cursor en esa fracción de la longitud de la re- sistencia. La posición de este cursor a lo largo del elemen to resistivo se indica en unidades de voltaje por medio de - los diales del potenciómetro.

El propósito del voltaje de trabajo y el reóstato es el de suministrar una cantidad de corriente exac ta que fluya por el elemento resistivo de precisión. El va-- lor de esta corriente se escoge de tal forma que produzca nú meros convenientes para el cálculo de los voltajes medidos --

por el instrumento. Para asegurarse que el voltaje de trabajo y el reóstato suministran actualmente el valor deseado de corriente a la resistencia de precisión, se emplea una fuente de voltaje exacto como dispositivo de calibración.

En el proceso de calibración del potenciómetro el cursor de la resistencia de precisión se coloca en una posición que establezca algún valor conveniente de corriente. Pueden ser 10 mA que fluyan en el alambre cuando está calibrado convenientemente. Por ejemplo, si la resistencias de 150 Ohms, 150 cm en la que se está usando, el cursor se coloca en el punto de 101,9 cm de alambre. La resistencia del alambre desde ese punto hasta el punto de tierra del potenciómetro es de 101.9 ohms. Si una corriente de 10 mA fluye en el alambre, existe una caída de voltaje de 1,019 V entre ese punto de tierra. Para calibrar el potenciómetro se conecta al mismo punto del cursor un detector de corriente que se conecta entre el cursor en la resistencia de precisión y el terminal positivo de la celda estándar. Si la caída de voltaje a través de la resistencia de precisión es actualmente igual a 1,019 V no fluirá corriente en la rama del circuito que contiene el detector porque no hay caída de voltaje entre los puntos A y B.

Puesto que el valor de la resistencia del potenciómetro de alambre se conoce que es de 101,9 ohms entre el punto A y tierra, se conoce que fluyen exactamente 10.0 mA en el alambre.

Si por otra parte, no fluyen 10.0 mA en la resistencia, el punto A no estará a un potencial de 1,019 V. En este caso, habrá una diferencia de potencial entre los puntos A y B y fluirá una corriente en la rama que existe entre ellos. Este flujo de corriente es detectado por el galvanómetro. El reóstato conectado con la batería de un trabajo y la resistencia de precisión se debe ajustar de tal forma que el flujo de corriente sea de 10 mA. En ese punto el galvanómetro detectará que no hay flujo de corriente entre los puntos A y B del circuito.

Una vez que la magnitud de la corriente que fluye en la resistencia de precisión se calibra en esta forma, el potenciómetro está listo para hacer mediciones de voltaje. A partir de este instante, el reóstato no se debe tocar. Cuando un voltaje desconocido se conecta al instrumento, el cursor de la resistencia de precisión se mueve hasta una posición donde el

galvanómetro indique de nuevo que no hay flujo de corriente. En este punto, se conoce que el voltaje desconocido es igual a la caída de voltaje a través de la fracción de la resistencia de precisión que existe entre el cursor y tierra.

3.7.1.- Transformador Diferencial con Variación Rotacional (TDVR).

El TDVR es la aplicación del principio de funcionamiento del transformador diferencial con variación líneal para un movimiento rotacional.

Consiste en un núcleo de bobina de construcción especial que gira al rededor de un eje, formando el centro de una bobina montada coaxialmente.

Diseñando cuidadosamente la bobina se obtiene un voltaje de salida proporcional a la posición angular del núcleo dentro de un rango relativamente grande.

Sus características y usos son semejantes a las del transformador diferencial con variación líneal.

3.7.2.- Acelerómetro con LVDT.

Como un ejemplo de la amplia variedad de usos en los cuales el LVDT se utiliza, examinaremos el acelerómetro con LVDT. Estos acelerómetros se utilizan para detectar terremotos y para medir la aceleración de los proyectiles. (Otros acelerómetros empleados para detectar choques y vibraciones emplean transductores de cristal piezoeléctrico.).

Una forma de acelerómetro con LVDT se muestra en la siguiente figura Núm. 15.-

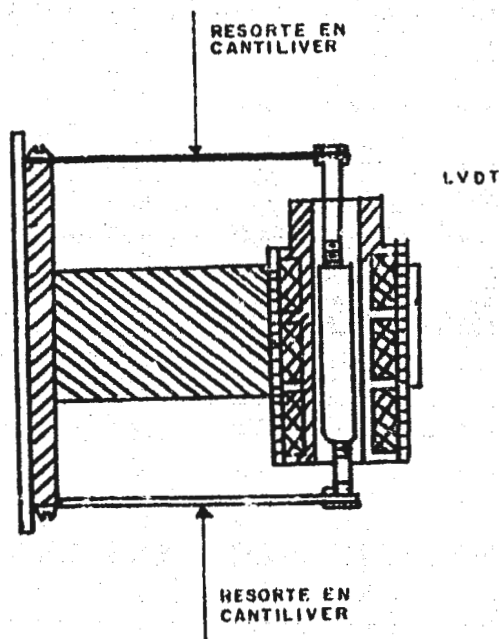


FIGURA NÚM. 15

* LVDT.- TRANSFORMADOR DIFERENCIAL CON VARIACION LINEAL.

Vemos que el núcleo magnético del LVDT se conecta por medio de dos resortes en cantiliver a una gran pieza externa del equipo. Si esta pieza del equipo se acl^{er}a en la dirección mostrada entonces el núcleo soporta una fuerza proporcional a la aceleración y por lo tanto dobla los resortes en cantiliver. El cambio en la posición del núcleo es por consiguiente proporcional a la aceleración obteniéndose un voltaje de salida que también es proporcional a ella.

Un acelerómetro típico para proyectiles tiene un voltaje de salida de 2V rms/g con voltaje de entrada de 11-V, 400 Hz.

CAPITULO IV TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA

4.1.- Descripción.

Una amplia variedad de transductores se emplean para medir temperatura. Algunos de ellos convierten temperatura directamente en señal eléctrica y otros se deben usar en combinación con un transductor eléctrico para convertir la indicación de temperatura a una forma eléctrica. Los transductores de temperatura son:

- 1.- Cintas bimetálicas.
- 2.- Termistores.
- 3.- Termómetros de resistencia.
- 4.- Termocuplas.
- 5.- Pirómetros de radiación.

Cada uno de ellos es el que mejor se acomoda a una aplicación particular o un rango de temperatura.

4.2.- Cintas Bimetálicas.

La cinta bimetálica se construye por medio de dos cintas unidas de metales diferentes. Debido a la diferencia en los coeficientes de expansión térmica de los dos metales, el calentamiento de toda la cinta origina que uno de los dos metales se expanda longitudinalmente más -- que el otro. Puesto que las cintas están soldadas a lo -- largo de toda su extensión, toda la cinta se doblará en la dirección del metal que se expanda menos. La extensión -- del doblamiento es proporcional al cambio de temperatura. Esto se puede lograr uniendo un transductor de posición -- (tal como un LVDT) al extremo libre de la cinta y calibrar su desplazamiento de acuerdo con los cambios de la temperatura.

Las cintas bimetálicas se utilizan actualmente más como dispositivos de control que como indicadores de temperatura. En este papel se utilizan como termostatos para controlar los interruptores on/off de los hornos refrigeradores, planchas y estranguladores automáticos de los automóviles. Ver figura Núm. 16.

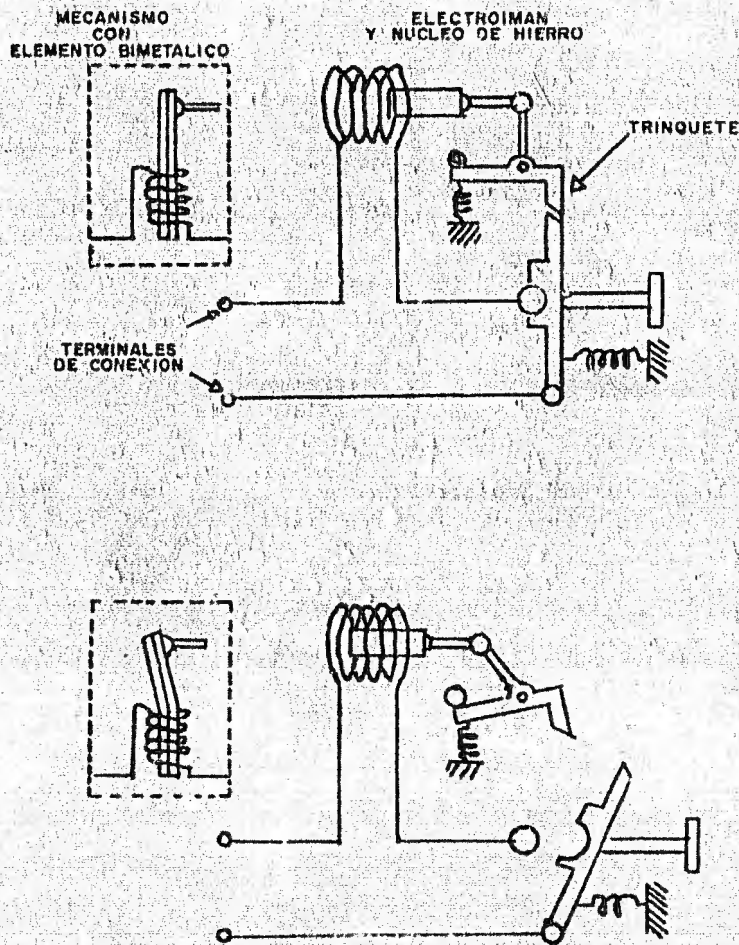


Figura Núm. 16.- Diagrama simplificado de dos de los mecanismos utilizados en los interruptores automáticos (a) Los mecanismos de desenganche bimetálico y electromagnético se muestran en su posición "cerrada" (b) Si una corriente excesiva pasa a través del mecanismo: 1) el calor generado por la corriente dobla hacia atrás el elemento bimetálico y desengancha el trinquete o 2) la corriente que pasa a través de la bobina crea un campo magnético que jala el núcleo de hierro y desengancha el trinquete.

4.3.- Termómetros de Resistencia.

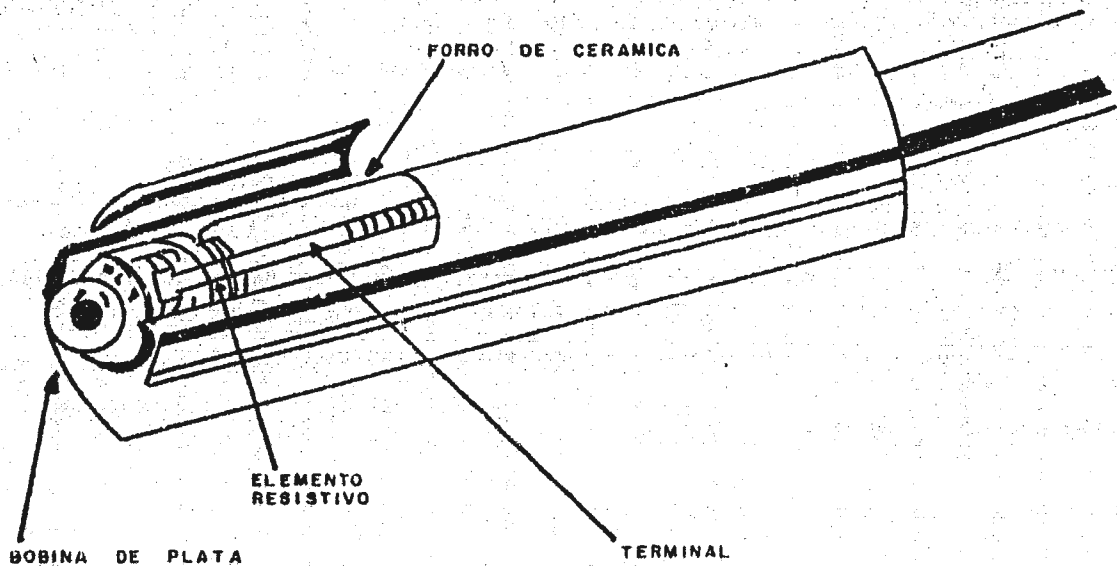
Los materiales cambian el valor de sus resistencia eléctrica con la temperatura. Este efecto hace posible el medir temperatura por medio del registro del cambio de resistencia de un dispositivo que conduce una corriente. El termómetro de resistencia es un dispositivo cuya operación se basa en este efecto. Los materiales utilizados para la construcción de los termómetros de resistencia son normalmente bobinas de alambre fino de cobre, níquel ó platino. Para trabajo a muy bajas temperaturas (esto es, menores de 50°K), se usan resistencias de carbón.

La bobina del termómetro de resistencia está encapsulada en un tubo de metal para protegerla de los daños cuando se inserta en las regiones donde se va a medir la temperatura. El tubo es hecho de un material con una alta conductividad térmica para que permita una respuesta rápida a los cambios de temperatura. La resistencia del platino contra temperaturas es casi lineal, mientras que la resistencia del cobre y el níquel son progresivamente menos lineales. Por consiguiente, los termómetros de resistencia de alambre de platino son los más exactos y se pueden usar para indicar temperaturas entre 250°C y 1200°C . En efec--

to, los termómetros de alambre de platino son tan exactos, - que se utilizan patrones de interpolación para temperatu-- ras entre -183°C (punto de ebullición del oxígeno líquido) y $+630.5^{\circ}\text{C}$ (punto de congelamiento de antimonio) Ver figura Núm. 17.-

Puentes de Wheatstone se emplean para sen-- sar los cambios de resistencias que surgen en los termó-- metros de resistencia. Los puentes se calibran normalmen-- te para que indique directamente los cambios de temperatu-- ras que originan los cambios de resistencia.

FIGURA NUM. 17



TERMOMETRO DE RESISTENCIA

4.4.- TERMISTORES.

Los termistores también son dispositivos que miden temperatura a través del efecto de cambio de resistencia. Sin embargo, la resistencia de los materiales con los cuales se fabrican los termistores decrecen con el incremento de la temperatura en el rango de -100°C a $+300^{\circ}\text{C}$. En algunos termistores el decrecimiento de la resistencia es tanto como un 6 por ciento por cada 1°C de cambio de la temperatura (aún cuando es más típico un cambio del uno -- por ciento). Figura Núm. 18..

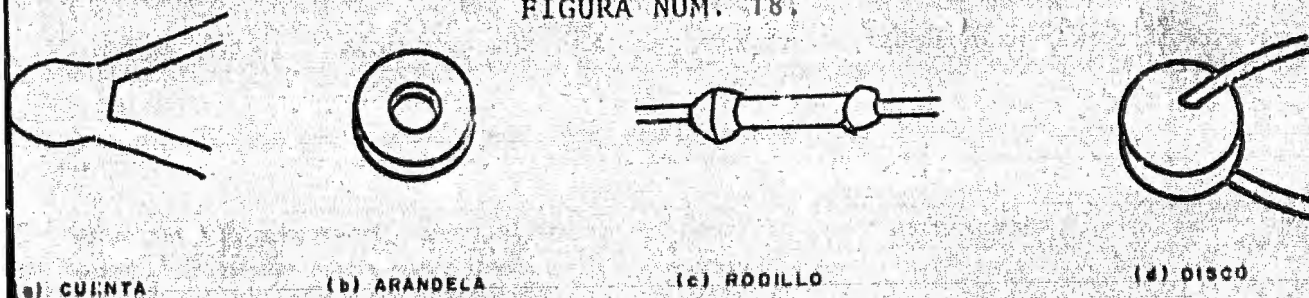
El decrecimiento de la resistencia que ocurre en los termistores tiene que ver con las propiedades químicas de los enlaces de los electrones en los materiales semiconductores. En estos materiales, los electrones de valencia están sujetos por enlaces covalentes con sus vecinos. A medida que se incrementa la temperatura del termistor, la vibración térmica de los átomos rompe algunos de estos enlaces y libera electrones. Puesto que ya los electrones no están enlazados a átomos específicos de la estructura, son capaces de responder a campos eléctricos aplicados y pueden moverse a través del material. Estos electrones móviles se suman a la corriente en el semiconductor y el material -

aparenta tener una resistencia menor.

Puesto que el cambio de resistencia por grado de cambio de la temperatura en los termistores es tan grande, pueden suministrar muy buena exactitud y resolución cuando se usan para medir temperaturas entre -100°C y -300°C si el termistor se conecta a un puente de Wheatstone el sistema de medición puede detectar cambios de temperatura tan pequeños como $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$.

Los termistores se fabrican más comúnmente en la forma de pequeñas cuentas. Debido a su pequeño tamaño, se pueden insertar en regiones donde otros dispositivos sensores de temperatura no se pueden colocar.

FIGURA NUM. 18.



TERMISTORES

4.5.- Termocuplas.

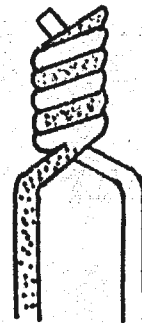
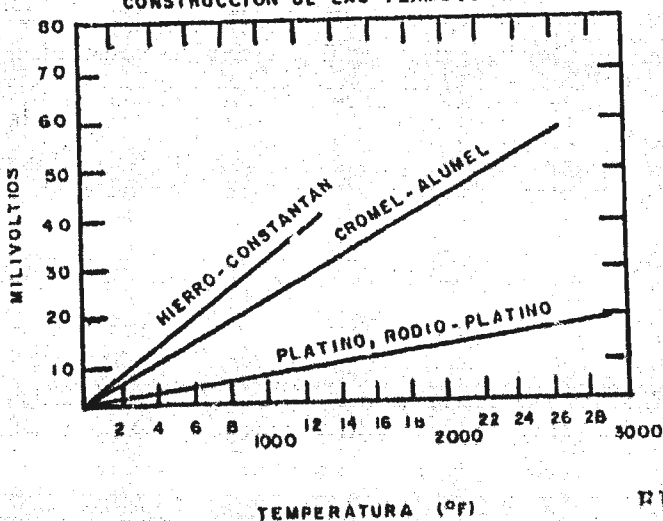
La operación de las termocuplas se basa en el principio físico de que si dos metales diferentes se juntan y el punto de unión se calienta (o se enfría), aparece una diferencia de voltaje a través de los extremos sin unir y sin calentar. Ver figura Núm. 19.- La magnitud de la diferencia de voltaje resultante es únicamente del orden de los milivoltios. Sin duda alguna, la diferencia de voltaje es directamente proporcional a la diferencia de temperatura que existe entre la unión calentada y los extremos más fríos. Si se emplea un detector lo suficientemente sensible, se puede medir la diferencia de temperatura por medio de la termocupla. Las combinaciones de metales más usados comúnmente son las siguientes: hierro y constantan; cromel (aleación de níquel y cromo) y alumel (aleación de aluminio y níquel) ; platino y radio-platino.

En la primera combinación es conveniente para temperaturas hasta de 900°C ; la segunda para temperaturas hasta de 1150°C y la tercera para temperaturas hasta de 1600°C .

La termocupla normalmente se coloca dentro de la región cuya temperatura se va a determinar. La temperatura de los dos extremos fríos se mantiene fija y se mide el voltaje entre ellos. A partir de estos datos se calcula la temperatura de la unión. A continuación se muestra la relación entre la salida de voltaje de dos termocuplas contra temperaturas para cada una de las combinaciones de los tres metales que se mencionaron anteriormente.

Puesto que la salida a través de los extremos fríos de la termocupla es de unos pocos milivoltios, se necesita un voltímetro sensible para medir este voltaje por tanto los potenciómetros o los voltímetros digitales altamente sensibles se utilizan generalmente como los dispositivos de medición.

SALIDAS DE VOLTAJE CONTRA TEMPERATURA PARA LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE LAS TERMOCUPLAS



TERMOCUPLA

Enseguida se muestra un método práctico para conectar una termocupla a un instrumento indicador para medir temperaturas. Ver figura Núm. 20

Las termocuplas son dispositivos resistentes y exactos como medidores de temperatura. Sin embargo, no responden rápidamente a los cambios de temperatura y por lo tanto no se emplean para registrar temperaturas que cambian rápidamente con el tiempo.

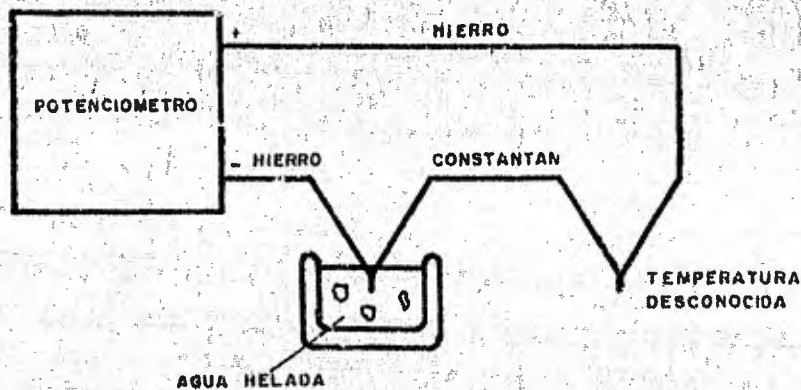


FIGURA NUM. 20.

4.6.- Pirómetros de Radiación.

Los pirómetros de radiación son dispositivos que sensan la temperatura midiendo la radiación óptica emitida por cuerpos calientes. Entre más alta es la temperatura a la cual se calienta el cuerpo, mayor es la frecuencia dominante en la radiación emitida. Esto significa que a medida que la temperatura de un cuerpo se incrementa hasta el punto donde empieza a emitir luz visible, la superficie del cuerpo tendrá primero un color rojo pálido. A medida que el cuerpo se calienta y se torna más incandescente su superficie se hace progresivamente menos roja y más blanca.

Para detectar la radiación el pirómetro no necesita colocarse sobre el cuerpo ó dentro del horno o región de medición. Lo único que se necesita es apuntarlo -- hacia la región calentada de interés para hacer la medición.

El pirómetro del tipo de filamento desaparecido utiliza un filamento de alambre caliente para suministrar un patrón de temperatura radiante. Una corriente eléctrica que pasa por el filamento suministra un método exacto de calentamiento. Cuando el filamento se calienta a la misma temperatura que existe en la superficie a partir -

del valor de esta corriente. Debido a que un cuerpo empieza a emitir luz visible cuando se calienta hasta cerca de 775°C , el pirómetro de filamento desaparecido puede medir temperaturas desde este punto hasta cerca de 4.200°C . figura Núm. 21.-

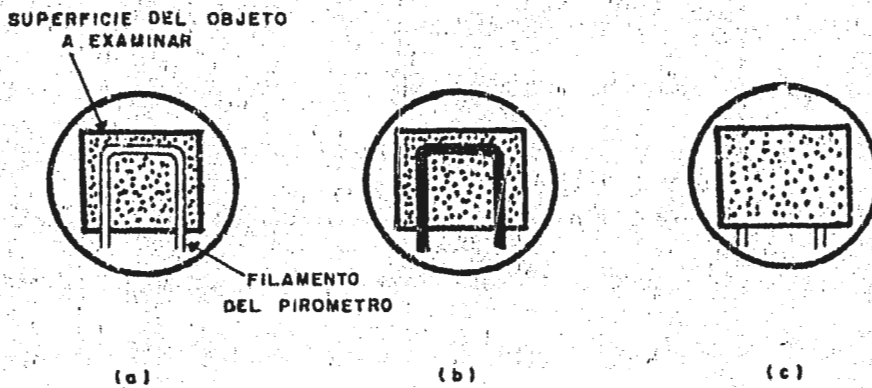


FIGURA NUM. 21

Figura Núm. 21.- Principio del pirómetro óptico del filamento desaparecido (a) Demasiada corriente en el filamento eleva su temperatura por encima de la superficie (b) Filamento del alambre muy frío. No pasa suficiente corriente a través de él (c) El filamento "desaparece" cuando alcanza la misma temperatura de la superficie examinada.

En el pirómetro del tipo más brillante, la radiación de la superficie calentada a examinar se conecta por medio de un lente y se enfoca hacia un termistor o termocupla. Puesto que todas las superficies emiten radiaciones en proporción a T^4 (donde T es la temperatura de la superficie en grados Kelvin), la radiación medida por este instrumento se puede utilizar para que dé el valor de la temperatura de la superficie directamente. Sin embargo, este tipo de pirómetro se calibra por comparación con los radiadores cerca de un cuerpo negro ideal. Por consiguiente, las temperaturas leídas en superficies que no poseen tales propiedades emisivas ideales se deben corregir para tener en cuenta esta discrepancia.

CAPITULO V TRANSDUCTORES DE PRESION Y GASTO

5.1.- Descripción.

Puesto que, tanto los líquidos como los gases actúan en muchos aspectos como fluidos, normalmente se pueden registrar muchas de sus propiedades empleando el mismo tipo de transductores, esto es especialmente cierto con las propiedades de presión y gasto.

La presión se presenta como una fuerza por unidad de área. La presión resulta de un intercambio de cantidad de movimiento entre las moléculas de un fluido y la pared del recipiente que lo contiene.

La presión se puede describir de muchas formas. Si el valor de la presión se toma con respecto al vacío, este tipo de presión se le llama presión absoluta. Cuando el valor de la presión se compara con el valor de la presión absoluta del aire al nivel del mar, se llama presión relativa. Si la presión de interés es la diferencia -

de presiones entre dos fluidos o la diferencia de presiones en diferentes partes del mismo fluido, lo que se describe es una presión diferencial.

La presión se puede medir directamente si se cambia a un parámetro eléctrico. También se puede medir si se produce un desplazamiento mecánico.

La medición del gasto es importante en aplicaciones que van desde la medición de la rapidez del fluido sanguíneo en una arteria humana, hasta la medición del gasto del combustible en un cohete.

Muchos proyectos de investigación y de procesos industriales dependen de una medición de gasto para suministrar datos importantes al análisis. En algunos se requiere una gran precisión en la medición, mientras que en otros solo se requiere que sea aproximada.

5.2.- Medidor Térmico.

Se usa en el rango de 10^{-4} a 1 mm. de Hg. -

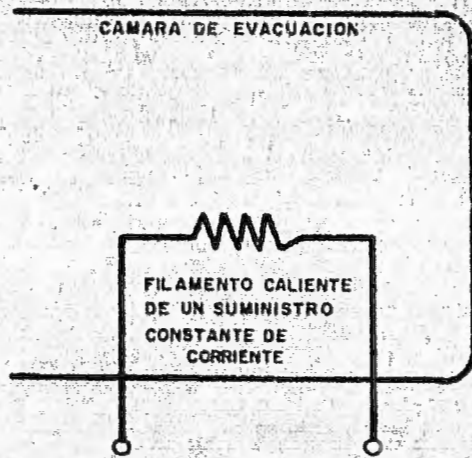
La conductividad térmica de un gas varía con la presión. -

Este ha sido la base para el desarrollo de los transductores de presión, utiliza una resistencia eléctrica cerca del elemento a sensar, y ambos la termoelectricidad y la temperatura contra la resistencia se usan como elementos transductores.

5.4.- Medidor Pirani.

A presiones bajas la conductividad térmica - efectiva de los gases decrece conforme a la presión. Este dispositivo mide la presión a través del cambio en la conductividad térmica del gas.

A continuación se muestra un esquema de este aparato. Figura Núm. 23.-



En la Fig.23 se observa una resistencia que - está localizada dentro de un espacio al vacío, se calienta - eléctricamente. Las pérdidas de calor que sufre la resis--

tencia, dependen de la conductividad térmica del gas y de la temperatura a la que se encuentra la resistencia. De esta manera, cuanto más baja es la presión, menor será la conductividad térmica y consecuentemente, la temperatura de la resistencia será mayor para una entrada de energía eléctrica dada. La medición se realiza mediante la observación de la variación de la resistencia del material (tungsteno, platino, etc.) de la misma. Esta medición puede efectuarse con un circuito puente apropiado.

Estos son robustos y económicos, y generalmente más precisos que los de termopar, pues éstos deben ca librarse individualmente y checarsse frecuentemente.

5.5.- Medidor por Ionización.

En la figura Núm. 24 se muestra un medidor por Ionización.

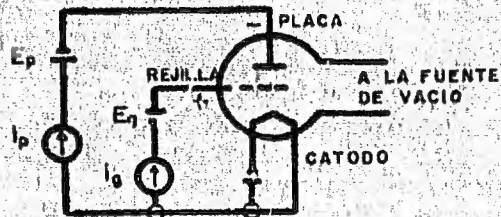


FIGURA NUM. 24

El cátodo emite electrones, que se aceleran mediante la rejilla cargada positivamente. Cuando los electrones se mueven hacia la rejilla, ionizan las moléculas del gas por efecto de las colisiones. La placa cargada negativamente atrae los iones positivos, produciéndose una corriente de placa. Los electrones y los iones negativos son atraídos por la rejilla, lo que produce una corriente de rejilla. La producción de iones depende de la presión y el núm. de electrones. Estos se usan en el rango de 10^{-12} a 10^{-3} mm. de Hg. modificándolos pueden usarse para presiones hasta de 10^{-17} mm. de Hg. Para presiones mayores existe el peligro de quemar el cátodo.

5.6.- Medidor de Fuelle.

Este es uno de los dispositivos que se utilizan para convertir presión en desplazamiento mecánico.

En la figura Núm. 25.- se muestra un medidor de fuelle:

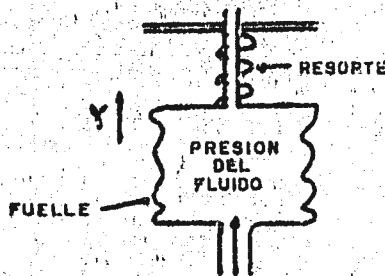


FIGURA NUM. 25

Por el fuelle flexible entra el fluido y la presión lo extiende en la dirección I. En los fuelles de baja presión, el resorte externo que se ve en la figura, no se usa. Por lo que sólo se emplea la elasticidad del fuelle -- para resistir la presión. Para altas presiones se utiliza un resorte externo para obtener una fuerza resistente adicional contra la presión.

La extensión del fuelle ocasionada por la presión mueve un rodillo, el cual está conectado a un transductor de posición que convierte el desplazamiento en una señal eléctrica. Dependiendo del diseño del fuelle y el resorte, se pueden medir presiones relativas y absolutas. Es sensible a las vibraciones por lo que no se puede usar para medir transitorios.

5.7.- Medidor tipo Bourdon.

Este aparato tiene gran variedad de aplicaciones, esencialmente en aquellos casos donde se desea una medición barata de presión estática. Se ofrecen comercialmente en muchos tamaños y exactitudes. Existen de diseño especial para laboratorio.

Como se muestra en la fig.26 generalmente el tubo de Bourdon es plano y hueco que se curva en forma de C. Cuando se introduce un fluido bajo presión dentro de él, el tubo trata de enderezarse. La magnitud del enderezamiento es proporcional a la presión. Puesto que la salida del tubo es un desplazamiento mecánico, el extremo del tubo se puede conectar a un transductor eléctrico ó a un mecanismo de relojería, que convierta este desplazamiento en una señal eléctrica ó en una rotación angular que se detecta mediante una aguja.

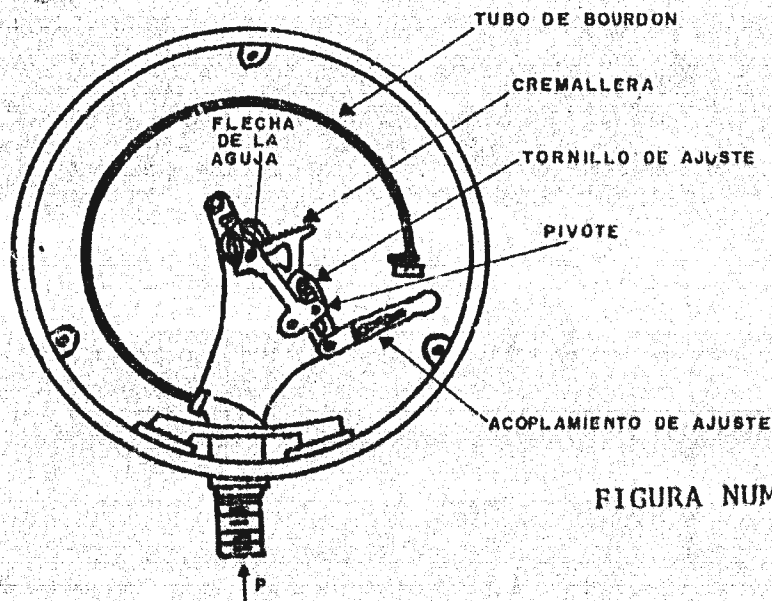


FIGURA NUM. 26

5.8.- Medidor de Diafragma.

En la figura Núm. 27.- se muestra un medidor de diafragma de capacitancia variable.

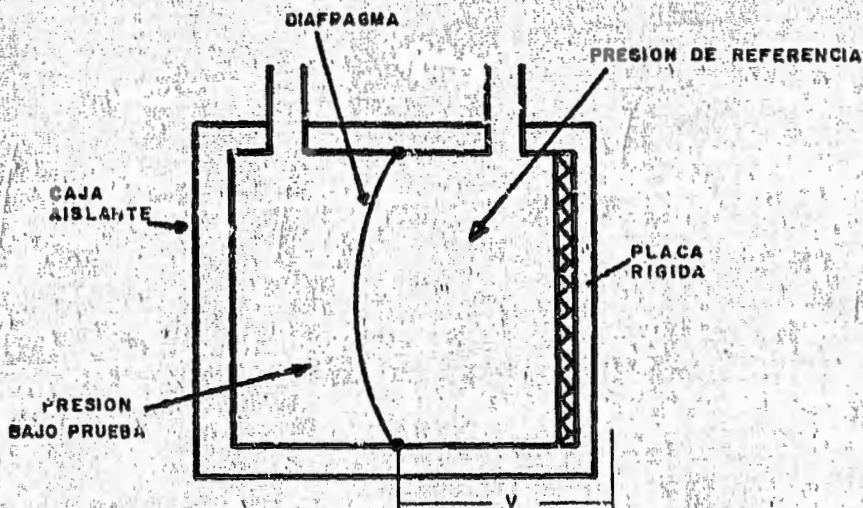


FIGURA NUM. 27

La presión de referencia del transductor de este caso puede ser la presión atmosférica (para una medición de presión relativa), el vacío (para medición absoluta) ó un fluido con una segunda presión (para una medición diferencial de presión).

Un diafragma metálico dentro del transductor se acerca y se aleja de una placa rígida y por lo tanto origina un cambio en la capacitancia de la estructura.

Si la capacitancia forma parte de un circuito oscilador, la frecuencia de éste cambiará a medida que varía la capacitancia, el cambio de frecuencia se puede registrar para indicar la variación de presión. Este transductor es de los más resistentes y exactos para la medición de presiones. Se pueden construir para que respondan a un amplio rango de valores de presión, midiéndola a alta o baja frecuencia.

5.9.- Rotámetro.

Es uno de los aparatos usados para la medición del gasto, el cual se muestra en la figura Núm.28.-

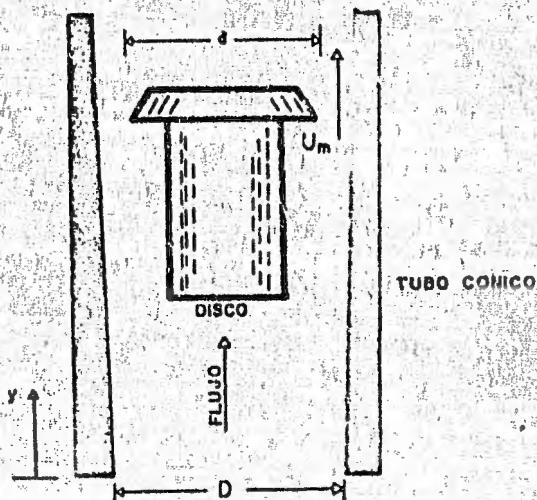


FIGURA NUM. 28.

En este aparato el fluido entra por la parte inferior del tubo vertical cónico, lo cual origina que el disco o flotador se desplace hacia arriba, el desplazamiento cesará en el punto en que la fuerza de arrastre iguale la magnitud de la fuerza de flotación y el peso del disco. En estas condiciones la posición del disco dentro del tubo será una indicación del gasto. La medición puede hacerse por medio de un transductor de desplazamiento acoplado al disco.

5.10.- Medidor de Flujo de Turbina.

Este medidor es el aparato más común. Suministra un método directo para medir el gasto tanto en los líquidos como en los gases. Son particularmente útiles para el registro remoto y en las aplicaciones aeronáuticas.

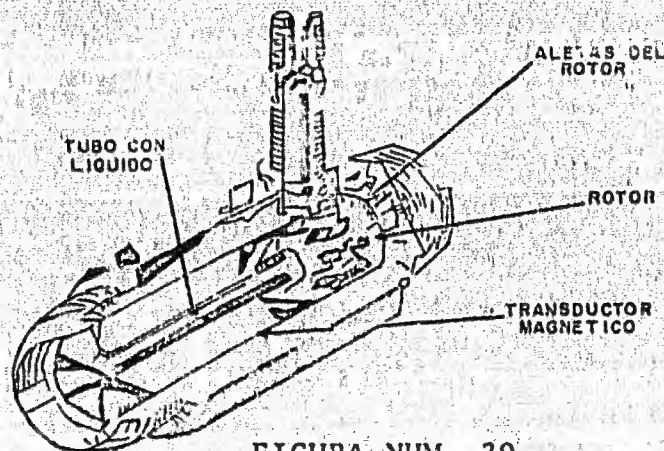


FIGURA NUM. 29

Como lo indica la fig. 29 consiste de un rotor montado dentro de un tubo a través del cual fluye el líquido. El flujo del líquido hace girar el rotor. A mayor gasto, mayor es la velocidad de rotación. Las aletas del rotor son metálicas y un captador o transductor magnético montado en la pared del tubo sensa el paso de cada aleta como un pulso eléctrico. La frecuencia de los pulsos es proporcional a la velocidad a la cual gira el rotor y por consiguiente al gasto del líquido. Existen medidores para un gasto de 0.01 galones por min. hasta más de 350,000 galones por min.

5.11.- Medidor Magnético de Flujo.

Se usa para medir el gasto de fluidos conductores de electricidad. Tiene la ventaja que no presenta -- ninguna clase de obstrucción al paso del fluido durante la medición. Este aparato se base en el principio de que un -- voltaje se induce en un conductor cuando éste se mueve en -- un campo magnético. Como el voltaje depende de la veloci-- dad en la cual se mueve un conductor a través de un campo -- magnético, la intensidad del voltaje inducido se puede uti-- lizar como una indicación del gasto del líquido. Hay apa-- ratos para medir el gasto de líquidos de alta y baja conduc-- tividad.

5.12.- Anemómetro de Alambre Caliente.

Es una resistencia de alambre fino que se calienta por medio de una corriente que pasa a través de ella. Si un fluido más frío pasa a través de ella, produce un enfriamiento al transferirse calor del alambre hacia el fluido. La velocidad de transferencia de calor varía con el tipo de fluido pero también depende de la velocidad a la cual el fluido pasa por el alambre. Si se mantiene constante la corriente en el alambre, el cambio de la resistencia por el enfriamiento proporciona una señal de voltaje. Puesto que el diámetro del alambre se puede hacer muy pequeño, el dispositivo se puede fabricar muy sensible y que responda a cambios de alta frecuencia en la velocidad del flujo. Unos de sus principales usos es en las investigaciones aerodinámicas con aplicaciones al estudio del flujo en condiciones variables.

CAPITULO VI

TRANSDUCTORES LUMINOSOS Y DE RADIACION

6.1.- Descripción.

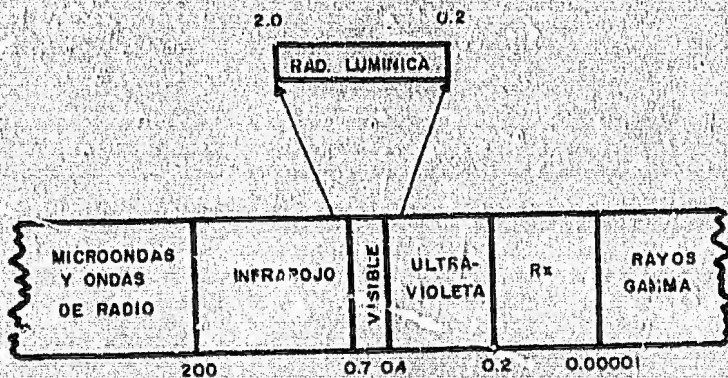
El espectro de las radiaciones electromagnéticas se extiende desde las ondas de radio (menos de 10 Hz) hasta los rayos gamma (10^{+20} Hz ó más). Las ondas de radio de muy baja frecuencia tienen las mayores longitudes de onda, los rayos gamma las más cortas. Entre estos dos extremos se encuentran todas las otras categorías de radiaciones electromagnéticas, incluyendo la luz. Para nuestros propósitos de clasificación, se define que la luz incluye las radiaciones más allá del infrarojo, luz visible y porciones ultravioletas del espectro electromagnético. Figura Núm. 30.-

A continuación, describimos los transductores de sonido, de vibraciones y además aquellos transductores que pueden censar las radiaciones de luz y convertirlas en una forma eléctrica. La clase general de transductores luminosos y de radiación también se conoce como fototransductores y se usan para detectar la presencia e intensidad de la luz en diferentes circunstancias. En efecto, muchos -

fotoconductores se pueden hacer mucho más sensibles a las radiaciones de la luz que el ojo humano. Los tres tipos -- principales de transductores de luz a energía eléctrica son: Dispositivos fotoemisores, dispositivos fotoconductores, -- dispositivos fotovoltaicos.

Cada uno de estos tipos posee ventajas especiales sobre los otros.

FIGURA N° 30



LONGITUDES DE ONDA (UN MICRON = 10⁻⁶m)
UNIDADES EN MICRONES

6.2.- Transductores de Sonido.

Puesto que el sonido puede existir como una vibración de sólidos, líquidos y del aire, los transductores que convierten energía sonora a energía eléctrica pueden operar de muchos medios diferentes. El transductor de presión de aire a voltaje usado para convertir el sonido en el aire se llama micrófono.

Los tipos de micrófonos más comunes son - los siguientes:

- a.- Micrófono de condensador.
- b.- Micrófono dinámico
- c.- Micrófono de carbón.

En seguida se describe cada uno de ellos.

a.- Micrófonos de condensador, tal como se muestra en la figura, realizan la conversión más exacta - de las vibraciones del sonido en el aire a señales eléctricas. De esta forma, se utilizan como patrones para mediciones acústicas precisas. El principio de operación se basa -- en el hecho que la capacitancia

entre dos conductores cambia si la distancia de separación entre ellos varía. El micrófono de condensador, emplea un diafragma metálico como una de las placas del condensador. Una placa rígida de metal hace las veces de la otra placa del condensador. Las variaciones de la presión del aire por la onda de sonido que golpea el diafragma hace que se mueva hacia dentro y hacia afuera. La separación variable entre las dos placas del condensador cambia el valor de la capacitancia. Un voltaje de cd fijo se aplica entre las placas y el cambio de voltaje debido al sonido inciden y existe como una componente de ca superpuesta al nivel de cd. La componente de ca posteriormente se amplifica y se entrega al instrumento de medición.

Puesto que un condensador aparece como una fuente de alta impedancia, la salida de este dispositivo se debe acoplar a un instrumento con una impedancia de entrada muy alta (para reducir los errores por efecto de carga).

b.- El micrófono dinámico reacciona a las vibraciones de sonido en el aire moviendo una bobina de alambre en un campo magnético. El movimiento de la bobina dentro del campo establece un voltaje cambiante en la bobina. Esta señal se puede amplificar y medir. El micrófono diná-

mico también se puede utilizar al revés, produciendo un sonido al aplicar un voltaje cambiante a la bobina. Este es el principio en el cual se basan los parlantes.

c.- Micrófono de carbón, detecta el sonido - por medio de la variación de la resistencia de gránulos de carbón. La variación de la resistencia ocurre cuando los gránulos de carbón cambian debido a la presión de las ondas incidentes de sonido. Un diafragma en el frente del micrófono de carbón se mueve en respuesta a la presión del sonido y comprime los gránulos de carbón dentro de un compartimiento. Una corriente de cd se pasa a través del micrófono y la modulación de la corriente debida a los cambios en la resistencia de los gránulos de carbón se superpone como una señal de ca a este nivel de cd. Como en el micrófono de condensador, la señal de ca se separa después del nivel de cd y se amplifica antes de entregarla al dispositivo de lectura.

El micrófono de carbón casi nunca se utiliza para hacer mediciones exactas del sonido. Las no linealidades de la variación de la resistencia del carbón evita que la señal sea una réplica fiel de las vibraciones del sonido. Sin embargo, el dispositivo es perfectamente adecuado para

6.3.- Transductores de Vibraciones.

Para detectar las vibraciones, casi siempre se utilizan transductores piezoeléctricos. Figura Núm. 31.-

Los cristales piezoeléctricos son materiales cristalinos que desarrollan un voltaje a través de ellos -- cuando son deformados. (la deformación necesita ser únicamente del orden de los micrómetros para producir este efecto). Si la fuerza aplicada de su magnitud (tal como las vibraciones de una pieza de metal unida al cristal piezoeléctrico), entonces la salida de voltaje del cristal también -- tendrá una forma que varía con el tiempo en forma muy similar a como varía la fuerza.

Los transductores de cristal que emplean el efecto piezoeléctrico se usan para detectar vibraciones -- acústicas en los sólidos. Los cristales utilizados para construir captadores de ca normalmente se hacen de cristales de cuarzo o de sal de Rochelle. El primero es más exacto pero también más costoso que el segundo; sin embargo, los cristales de Rochelle se ven en desventaja por el hecho que se derriten a 65° y están limitados en condiciones de alta humedad. Los micrófonos de cristal con un diafragma hacen este tipo -

de transductor sensible a las vibraciones del sonido.

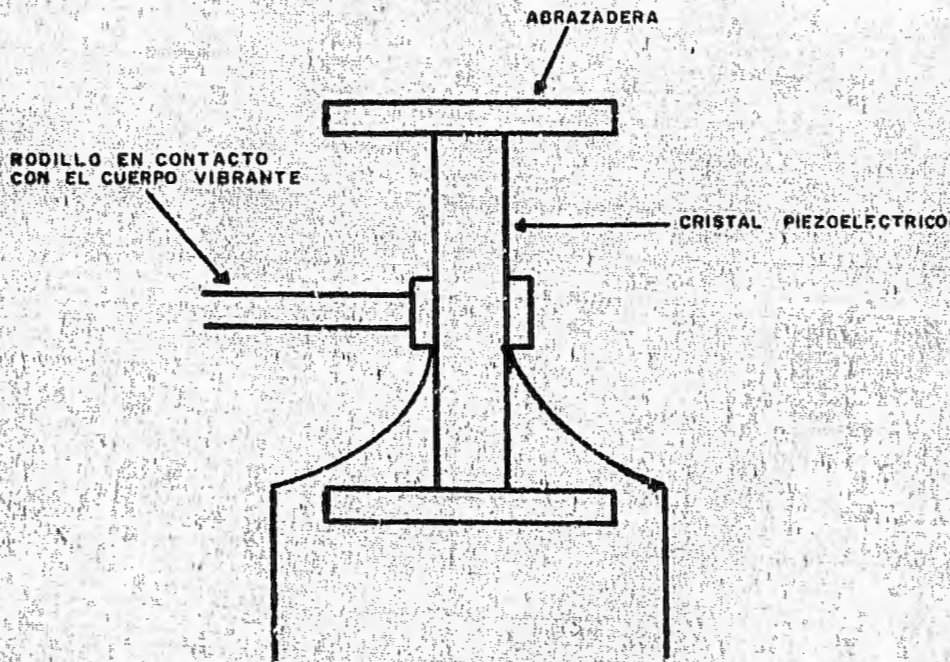


FIGURA NUM. 31

CAPTADOR DE VIBRACIONES TIPO PIEZOELECTRICO

6.4.- Sensores de Luz Fotoemisores.

Los sensores de luz fotoemisores deben su nombre a que contienen materiales cuya superficie emite electrones cuando soportan una radiación luminosa. Los electrones se emiten cuando los fotones de la luz incidente son capaces de transferir suficiente energía a los electrones para liberarlos de sus enlaces y fuerzas atómicas que existen en la red del material. Los materiales en los cuales este fenómeno toma lugar fácilmente y producen muchos electrones cuando soportan una radiación luminosa se llaman materiales fotoemisores. Debido a que el material fotoemisor normalmente está encapsulado dentro de un tubo de vidrio, los dispositivos fotoemisores también se conocen a menudo como fototubos. En la fig.32 se muestra el principio básico de la operación de los fototubos.

La superficie de un cátodo de forma especial se cubre de una material fotoemisor (tal como cesio-antimonio). El cátodo (llamado ahora un fotocátodo) se coloca en un tubo sellado de vidrio junto con otro electrodos llamado el ánodo. Se crea un voltaje entre el fotocátodo y el ánodo (con el ánodo a un nivel positivo de voltaje). Cuando -

la transmisión de la voz y se usa como micrófono en casi todos los teléfonos. El hecho que son baratos, altamente con fiables y muy fuertes hace a los micrófonos de carbón muy convenientes para este tipo de aplicaciones.

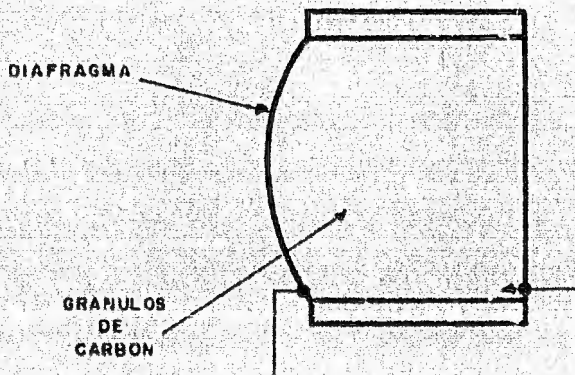
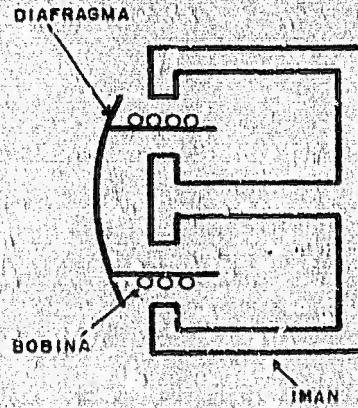
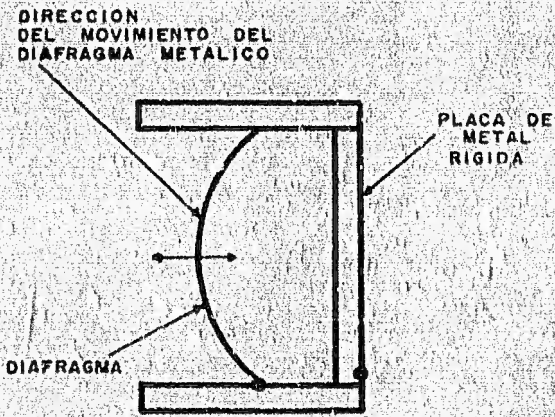
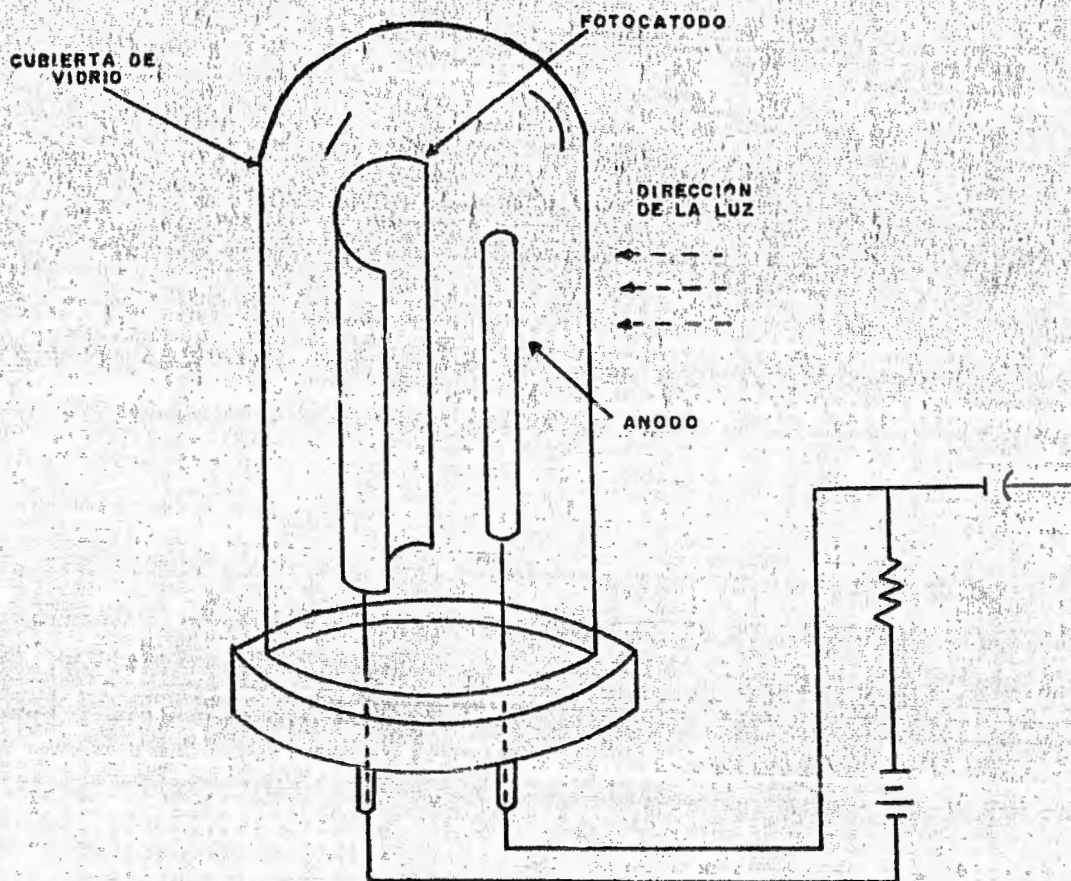


FIGURA NUM. 32

la luz golpea el fotocátodo, los electrones emitidos desde la superficie son atraídos y recogidos por el ánodo. Más electrones se emiten entre mayor sea la intensidad de la luz incidente en el fotocátodo. Por consiguiente, la magnitud de la corriente que fluye en el circuito conectado a los electrodos del tubo es directamente proporcional a la intensidad de la luz incidente en el fotocátodo.



PRINCIPIO DE OPERACION DE LOS FOTOTUBOS

FIGURA NUM. 32.

En la actualidad la técnica de los fototubos ha sido desplazada por la técnica de los fototransistores debido a que producen el mismo efecto fotoeléctrico, pero con mayores ventajas y eficiencia.

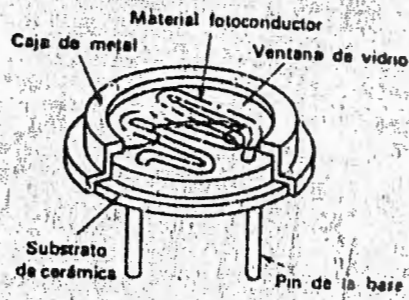
No es difícil imaginar porque el fototransistor ha sido inventado. Si en la unión base-emisor se forma una corriente de unos pocos microamperes cuando la unión es herida por la luz, en la unión base-colector de un transistor se produce una corriente de miliamperes, esta corriente es grande debido al efecto amplificador del transistor.

6.5.- Sensores de Luz Fotoconductores.

Los detectores de luz fotoconductores son básicamente resistencias sensibles a la luz. Se construyen de materiales cuya resistencia decrece cuando son iluminados. El decrecimiento de la resistencia ocurre porque la luz incidente en el material fotoconductor rompe los enlaces entre los átomos de material y sus electrones. Estos electrones quedan disponibles como portadores de cargas libres. Estos portadores extras permiten incrementar el flujo de corriente para un valor de voltaje.

Un material que se utiliza comunmente para construir los detectores fotoconductores sensibles a la luz visible es el sulfuro de cadmio. Cuando este material se conserva en la oscuridad el valor de su resistencia es del orden de muchos megohmios. Cuando la celda, se ilumina, su resistencia cae hasta un valor mucho más bajo (varios cientos de ohmios).

Las celdas fotoconductoras se utilizan a menudo en los relés fotoeléctricos, como elementos fotosensibles ó también en los controles automáticos de intensidad de la luz de las cámaras o de las luminarias empleadas en la iluminación de las calles.



VISTA DE CORTE DE UNA CELDA
FOTOELECTRICA

FIGURA NUM. 33

6.6.- Sensores de Luz, Fotovoltaicos.

Los sensores fotovoltaicos son dispositivos a través de los cuales aparece un voltaje cuando son iluminados. Este voltaje surge debido a las propiedades eléctricas del material empleado para construir este dispositivo. La celda solar es uno de los tipos de sensores fotovoltaicos. En efecto, las celdas solares convierten la energía lumínica en energía eléctrica de tal intensidad que la celda puede actuar como una fuente de potencia eléctrica. -- Las celdas solares de silicón se usan de esta forma para -- suministrar potencia eléctrica a los satélites espaciales.

Las celdas solares de selenio se usan en los medidores fotográficos de exposición.

Los sensores fotovoltaicos son los únicos fotodetectores que no requieren una fuente externa de potencia. Sin embargo, también poseen la desventaja que su salida es extremadamente no lineal en relación con la intensidad de la luz incidente.

6.7.- Transductores de Radiación Nuclear y Rayos X.

Los sensores de radiación nuclear utilizan algunos de los mismos principios de operación de los sensores a la radiación de la luz. Por ejemplo, un tipo de sensor de rayos X es como un dispositivo fotoconductor, mientras otro se construye con un material que emite luz visible cuando es golpeado por los rayos X. La intensidad de la luz visible emitida en este último tipo es proporcional a la intensidad de los rayos X incidente. La intensidad del resplandor se mide posteriormente por medio de un fototubo. Los sensores de rayos X se usan para controlar el espesor de los materiales que se fabrican en forma de láminas. También se usan para localizar fallas en las estructuras de metal y en la determinación de niveles de líquidos en tanques sellados. Los sensores de radiación nuclear más comunes son los tubos de Geiger-Muller y los contadores de centelleo. El tubo de Geiger-Muller es un tubo sellado y lleno de un gas inerte (tal como el argón). Dentro del tubo existe un cátodo con la forma de un cilindro largo y un ánodo alambre colocado a lo largo del eje central del cilindro. En uno de los extremos del tubo existe una ventana extremadamente pequeña, a través de la cual puede entrar la radiación al tubo. Si un voltaje alto ($\pm 900V$) existe entre el -

ánodo y el cátodo, cada paquete de radiaciones nucleares - (en la forma de particular beta ó rayos gamma) que entre - en el tubo ionizará algunos de los átomos de argón. Las particulas ionizadas se dirigen hacia los electrodos del tubo. Durante su viaje los eléctrones y los iones son acelerados y colisionan con otros átomos de argón que estén en turno - para ser ionizados. Cuando el paquete de iones llega a -- los eléctrodos, un pulso de corriente se origina en el circuito al cual está conectado el tubo.

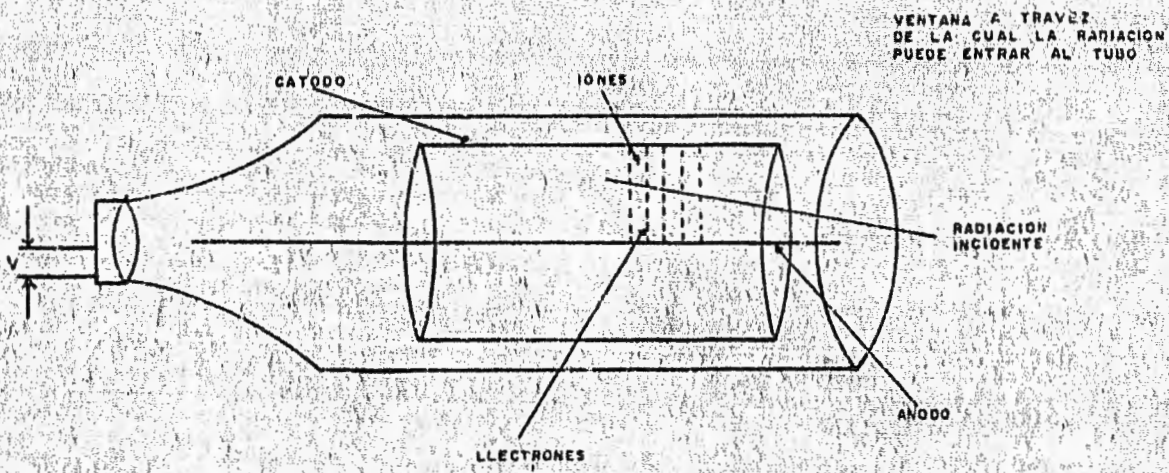
A medida que la corriente pasa a través del circuito de conexión, el voltaje entre el ánodo y el cátodo cae por debajo del valor que originó la ionización por colisión. El gas en el tubo retorna a su estado de desioniza--ción y la corriente en el circuito cesa. Entonces el voltaje entre el cátodo y el ánodo aumenta de nuevo y el tubo es tá listo para sensar la próxima radiación. El " tiempo muerto" entre cada andanada de radiación es de cerca de 100-200 MS.

El número de pulsos que ocurren en un tiempo dado es una medida de la intensidad de la radiación en la - región cercana al tubo. Los pulsos se pueden usar para producir sonidos audibles en un parlante o se pueden contar --

por medio de un contador electrónico que de el valor acumulado sobre un tiempo específico. Los medidores GM típicos pueden detectar hasta 15.000 eventos por minuto.

El contador de centelleo es un dispositivo que utiliza un fototransistor para contar los centelleos de luz que producen ciertos cristales cuando son golpeados -- por una radiación nuclear. Estos cristales (tal como el sulfuro de zinc ó el yoduro de sodio) producen un breve centelleo cada vez que uno de tales eventos ocurre. Estos centelleos emitidos son reflejados y conducidos por medio de espejos hasta el fototransistor a través de un fibra óptica ó tubería de luz. El fototransistor convierte y amplifica los debiles centelleos de luz que tienen suficiente magnitud para ser medidos. El número de pulsos que llegan al fototransistor y que este pone en la salida son una medida de la intensidad de la radiación nuclear.

Debido a la habilidad del fototransistor de amplificar, el contador de centelleo es mucho más sensible que el tubo de Geiger-Muller para la medición de radiaciones nucleares. Figura Núm. 34.

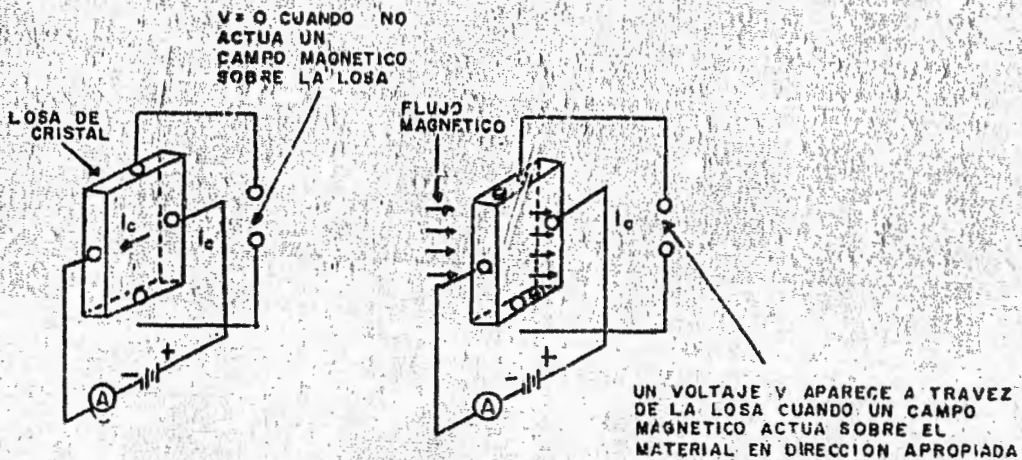


DETECTOR DE RADIACION DE GEIGER-MUELLER

FIGURA-NUN, 34

6.8.- Transductores por Efecto Hall.

Se utilizan para mediciones magnéticas. Su funcionamiento los explicaremos con la ayuda de la siguiente figura Núm. 35



PRINCIPIO DE LOS MEDIDORES POR EFECTO HALL

FIGURA NUM. 35

Vemos que una pequeña loza de material conductor se conecta a una batería de tal forma que una corriente I_c fluirá en la forma mostrada. Los electrones -- que forman la corriente, puesto que estamos usando la descripción convencional de la corriente). Si el campo magnético se aplica de tal forma que las líneas magnéticas de fuerza ángulos rectos con la loza de material, entonces los electrones de la corriente estarán sujetos a una fuerza debida al campo magnético. La fuerza actúa en una dirección vertical y los electrones son forzados hacia el tope de la loza. Como resultado se tiene un exceso de electrones en -- el tope y una deficiencia de ellos cerca del extremo inferior. Se crea de esta forma una diferencia de potencial -- entre los dos extremos (superior e inferior) de la loza. -- La magnitud del voltaje es proporcional a la intensidad del campo magnético (en Wb/m^2). Por consiguiente, cuando una corriente de valor conocido se pasa a través del material -- la lectura de voltaje a través del dispositivo se puede calibrar para que de la intensidad del campo magnético directamente. Los transductores por efecto Hall se pueden construir de tal forma que sean lo suficiente sensibles para -- detectar campos magnéticos muy pequeños.

Los transductores comerciales por el efecto

Hall se construyen de germanio y otros materiales semiconductores. Encuentran su aplicación en los instrumentos - que miden campos magnéticos con pequeñas densidades de - flujo. (también se encuentran en algunas puntas de prueba que miden la intensidad de flujo. Existen algunas puntas de prueba que miden la intensidad de corriente por medio - del campo magnético producido por ella. //

6.9.- Transductores de Propiedades Químicas.

Los transductores eléctricos también son capaces de convertir algunas propiedades químicas a señales eléctricas. Esta habilidad es útil cuando es necesario -- controlar tales propiedades para lograr que un proceso químico continúe eficientemente. La conversión a una forma eléctrica permite registrar de una manera continua la cantidad química. Además, si la concentración química de varias soluciones ó gases se puede medir eléctricamente, se puede detectar rápida y seguramente concentraciones polutantes en la atmósfera.

Una propiedad química que se controla muy a menudo es el nivel de pH de una solución líquida. El pH de una solución es un índice de su acidez o alcalinidad. El valor del pH puede variar desde 0 (puramente ácido) hasta 14 (puramente alcalino). Cuando el pH es 7, la solución es neutra (como en el caso del agua pura). El pH de una solución se puede medir exactamente por medio de un medidor -- electrónico de pH. Este medidor consiste en parte de dos -- electrodos especiales los cuales se insertan en la solución bajo prueba. Uno de los electrodos se conserva a un nivel de voltaje constante y el otro electrodo desarrolla un po--

tencial debido al pH de la solución que se mide. De esta forma la diferencia de potencial entre los electrodos depende del pH de la solución. Figura Núm. 37.

El electrodo de referencia contiene una solución de un electrólito y se permite que escape muy lentamente en la solución bajo prueba. Esto suministra una conexión eléctrica entre el electrodo de referencia y la solución. De esta forma se mantiene al mismo potencial del electrodo de referencia. Mientras tanto el electrodo de medición contiene un líquido separador (solución buffer) con un pH conocido y constante. Está contenido de un tubo de vidrio especial con una pared muy delgada que se sumerge en la solución bajo prueba. La diferencia de pH entre el líquido separador y la solución origina una diferencia de potencial entre ellas. Como resultado, la diferencia de potencial entre el electrodo de referencia y el electrodo de medición es proporcional a la diferencia en pH entre el líquido separador conocido y la solución desconocida bajo prueba.

Puesto que la diferencia de potencial se mide a través de la pared del tubo de vidrio del electrodo de prueba y esta pared tiene una resistencia de cerca de ----

500 M se debe emplear un voltímetro especial de impedancia muy alta para obtener una medición exacta.

El segundo tipo de transductor de propiedades químicas es el elemento detector de la cromatografía de los gases. Este detector mide la pureza química de un gas detectando los cambios de su conductividad térmica. La medición es posible porque los diferentes gases tienen distintos valores de conductividad térmica. Se aprovecha este fenómeno para que el gas enfrie resistencias calientes que se encuentran en el circuito de un puente de Wheatstone. Ver figura Núm. 36.

El puente se calibra primero permitiendo que el mismo gas rodee dos resistencias calientes de prueba.

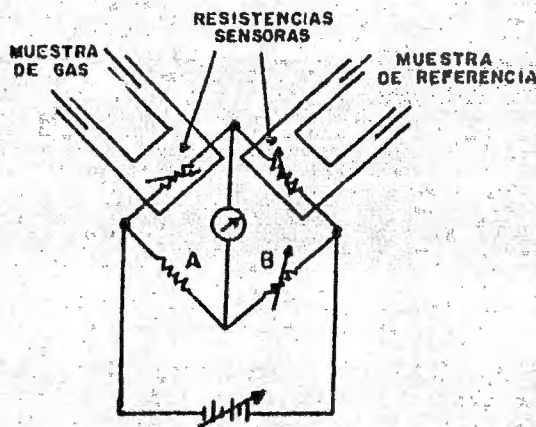


FIGURA NUM. 36

Los valores de las resistencias se ajustan para que den una condición de balance en el puente. Luego uno de los gases se reemplaza por el gas bajo prueba, fluyendo bajo las mismas condiciones de presión y temperatura. Si el gas bajo prueba contiene elementos con conductividades térmicas diferentes al gas de referencia, las resistencias se enfriarán a una rata diferente. Una diferencia en la variación de temperatura origina una variación de su resistencia. Los cambios de resistencia crean una condición de desbalance en el puente. De esta forma, la condición de desbalance actúa como un medidor que indica el cambio en la composición del gas y por consiguiente de su pureza.

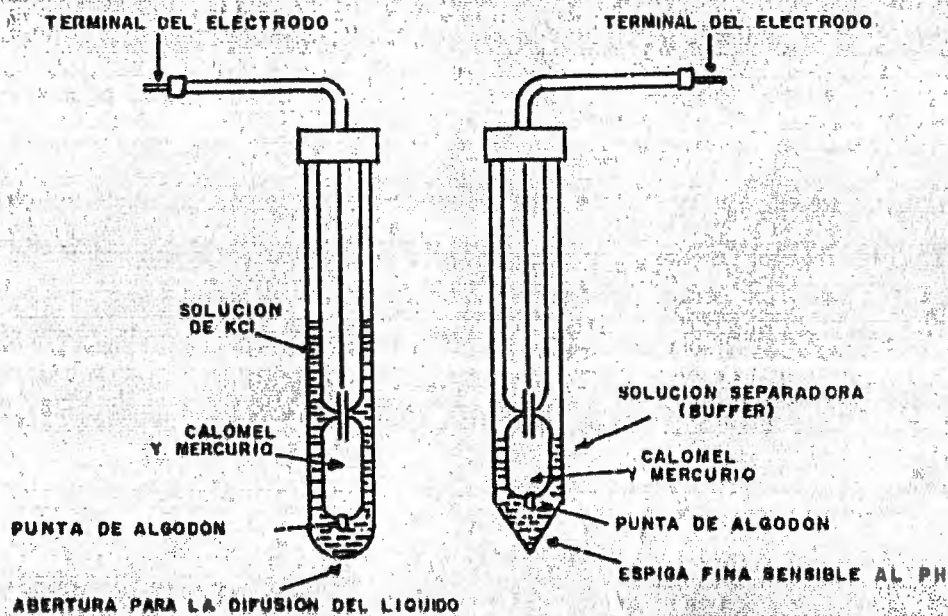


FIGURA NUM. 37

PRINCIPIO DE OPERACION DEL MEDIDOR PH

CAPITULO VII

EJEMPLO DE OPERACION Y CONSTRUCCION DE UN TRANSDUCTOR

Los fototransistores son elementos electrónicos altamente sensitivos a la iluminación. Por ser muy estables, reaccionan tanto a la luz visible como a la luz no perceptible al ojo humano como es el caso de las luces infraroja y ultravioleta.

Existen fototransistores con base planar o circular, del tipo PN ó NP, de material y uso como el Silicio o Selenio y de aleaciones de Arsenico, Galio, Germanio, etc, lo que los hace tener buenas propiedades de operación como son mayor control, buena amplificación y direccionabilidad.

Los modelos más utilizados de foto transistor son:

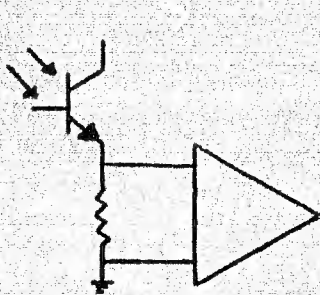


Foto-Transistor

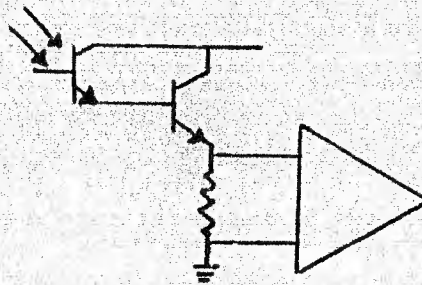


Foto-Darlington

Objetivo: Construcción de un transductor -
sensible a la luz blanca.

1.- **Elemento transductor:** El fototransis-
tor FPT120 A/B/C.

a).- **Construcción:** Silicio Nitrado, conec-
tado como transistor NPN, encapsulado en un compuesto plás-
tico especial de resina transparente.

b).- **Características de Operación:**

Temperatura de Trabajo entre - 55° y 85°C.

Humedad Relativa a 65°C es de 85%

Disipación Máxima de Potencia 100mW a 25°C.

Voltaje Colector-Emisor Máximo 20 volts.

Corriente de Colector Máxima 24mA.

Voltaje Colector-Emisor de Saturación 0.25

volts a 20 mW/cm^2 y corriente de Colector

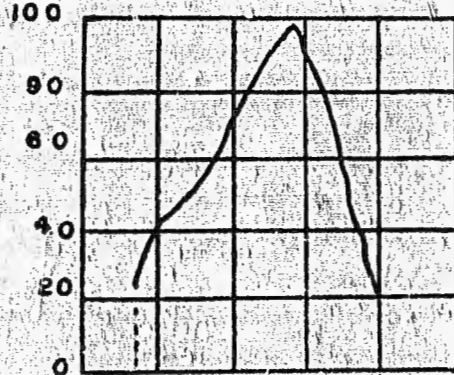
de 1mA.

Corriente de Colector a Plena Oscuridad -

10nA a un Voltaje Colector-Emisor de 5 ---
volts.

Curvas Típicas Respuesta al Espectro Luminoso

R
E
S
P
U
E
S
T
A



LONGITUD DE ONDA nm

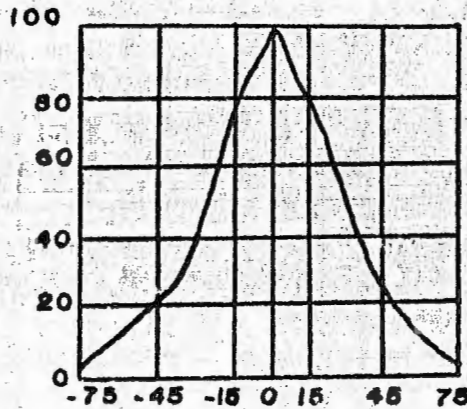
Luz Visible



Luz Infrarroja

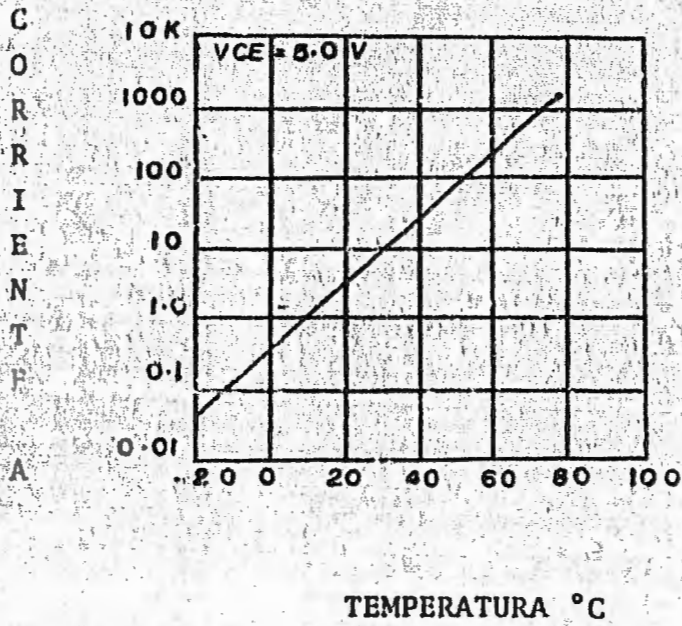
Respuesta contra angulo de incidencia.

R
E
S
P
U
E
S
T
A



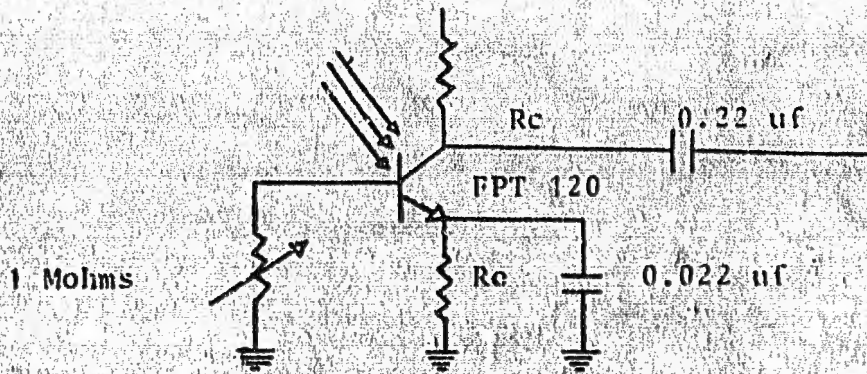
ANGULO GRADOS

Variación de la Corriente de Colector a Plena --
Obscuridad con la Temperatura.



) Polarización Universal.

Vcc=9V



CALCULOS :

Datos: Vcc = 9V

Ic = 100 mA

Vce = 8.9975V

$$V_{cc} = V_{ce} + I_c (R_c + R_e)$$

$$(R_c + R_e) = \frac{V_{cc} - V_{ce}}{I_c} = \frac{9 - 8.9975V}{100 \times 10^{-3} A}$$

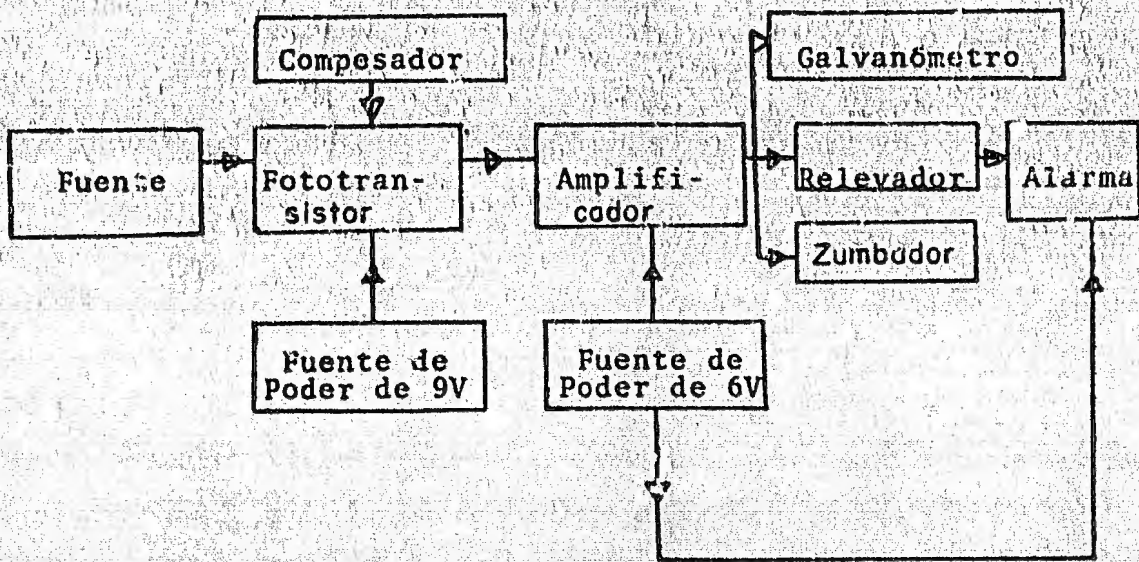
$$(R_c + R_e) = 25 \text{ Kohms}$$

$$(22 \text{ Kohms} + 2.2 \text{ Kohms}) = 24.2 \text{ Kohms} \approx 25 \text{ Kohms}$$

Los valores de los elementos se ajustarán a valores comerciales. El potenciómetro se conecta para compensar al circuito contra los cambios de voltaje, corriente

te y frecuencia ocasionado por la diferente intensidad de luz incidente a la base del transistor y así lograr una mayor estabilidad.

2.- Diagrama de bloques del circuito.



Breve descripción de cada bloque.

Fuente Luminosa: es una lámpara fluorescente ó un foco infrarrojo.

Fototransistor: Como se mencionó anteriormente.

Compensador: es un potenciómetro de 1 Mohms a 1 W, se utiliza para regular al circuito contra las variaciones de voltaje, corriente y frecuencia ocasionadas por la diferente intensidad de la luz incidente a la base del transistor y así lograr una mayor estabilidad.

Amplificador: Integrado TBA 820, amplificador de corriente, monolítico de Silicio principal característica bajos voltajes de alimentación.

Principales datos de fabricación.

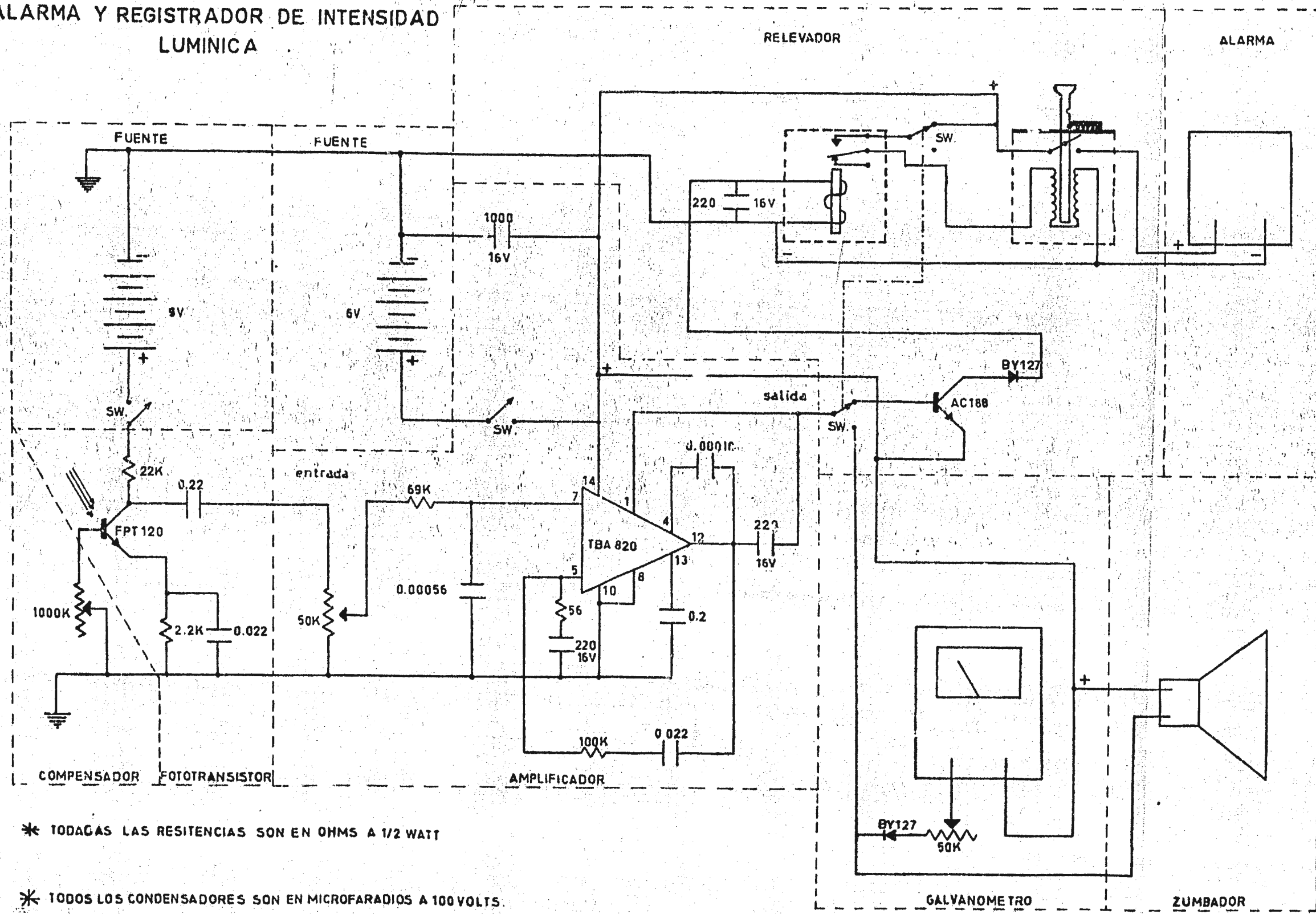
Valores máximos de Operación.

Voltaje de Alimentación	16 volts.
Corriente de Salida	1.5 Amps.
Potencia de Disipación a 50°C	1.25 Watts.
Ancho de Banda	25-25000 Hertz
Ganancia de Voltaje	75 Decibeles.

La aplicación del TBA 820 en su circuito le da:

Gran versatilidad en su uso (el voltaje de alimentación va de 3 a 16 volts).

CIRCUITO FOTOSENSOR ACTIVADOR DE ALARMA Y REGISTRADOR DE INTENSIDAD LUMINICA



* TODAS LAS RESISTENCIAS SON EN OHMS A 1/2 WATT

* TODOS LOS CONDENSADORES SON EN MICROFARADIOS A 100 VOLTS.

Alta eficiencia (70% en la potencia de salida especificada).

Ausencia de distorsión (0.4% para 500 mW).

Muy buen rechazo al rizo de la fuente.

Posibilidad de variar la sensibilidad de entrada para una potencia de salida dada.

Mínimo número de componentes externas.

Bajo consumo de corriente sin señal.

En la siguiente tabla se muestra la amplia gama de potencia de salida que se obtiene al emplear este integrado.

Voltaje de Alimentación	Impedancia de Salida	Potencia de Salida
(Volts)	(Ohms)	(Watts)
12	8	2.0
9	8	1.2
9	4	1.6
6	4	0.75

Se escogió un voltaje de alimentación de 6 volts, impedancia de salida de 4 Ohms, y 0.75 Watts de potencia de salida.

Relevador: Es un electroiman que al paso de la corriente acciona un contacto en un sentido y al cortar la corriente se acciona el contacto en sentido opuesto. Trabaja con 600A y 2 Volts. Relevador acoplo para accionar una alarma. Para accionar el relevador, se utilizó un --- transistor AC188 como interruptor, trabajandolo en sus regiones de corte y saturación.

Alarma: es un dispositivo que al recibir un flujo de corriente emite una señal sonora. Trabaja con 6 volts y consume 500 mA.

Galvanómetro: Es un dispositivo que al recibir un flujo de corriente acciona una aguja indicadora, la cual se mueve en proporción al flujo de corriente, para acoplarlo se utilizó un diodo para rectificar la corriente y un potenciómetro de prueba para graduar la escala del galvanómetro.

Se utiliza un potenciómetro de prueba debido a que en la salida resulta que el voltaje, la corriente y la frecuencia son variables. En la primera prueba se usó un potenciómetro de 1000 ohms y se observó que graduaba muy poco, después se usó uno de 10,000 ohms resultando muy sensible, finalmente se colocó una de 5000 ohms con resultados satisfactorios.

Zumbador: Es una bobina que emite un sonido en proporción a la señal emitida por el fototransistor.

Fuente de Poder de 9 volts: Sirve para polarizar el fototransistor. Es una pila del tamaño 6F22.

Fuente de Poder de 6 volts: Se utiliza para alimentar el amplificador y la alarma. Es una pila del número 4 Fd.

CONCLUSIONES.

El transductor construido es sensible a la luz fluorescente y muy sensible a la luz infrarroja, capta señales hasta 10 mts de distancia, teniendo su mayor eficiencia a 4 mts de distancia de la fuente emisora de luz.

Sus aplicaciones pueden ser muchas, tales como; fotómetros de luz blanca, abridores de puertas ó ventanas, encendedores de luz, controlador de luminosidad, -- como elemento detector para contar el paso de personas, -- animales u objetos, etc. Su costo actual aproximado es de \$400.00.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- A. ROSS, DOUGLAS
Optoelectronic Devices And
Optical Imaging Techniques
The Mac Millan Press Ltd.
Gran Bretaña. 1979.
- 2.- CREUS, ANTONIO
Instrumentación Industrial
Publicaciones Marcombo S.A.
México, 1977.
- 3.F.- COOMBS, Clyde
Basic Electronic Instrument
Handbook. Mc. Graw Hill Co.
U.S.A. 1972.
- 4.- HOLMAN, J.P.
Métodos Experimentales para
Ingenieros, Editorial Mc.
Graw Hill. México, 1977.
- 5.- P.TUNER, Rufus
Solar Cells And Photocells
Howard W. Sams & Co., Inc.
U.S.A. 1980.
- 6.- WOLF, Stanley
Guía para Mediciones Elec-
trónicas y Prácticas de La-
boratorio. Prentice-Hall --
Internacional, México, 1980.
- 7.-
Catalogo de Semiconductores
Fairchild, Fairchild Mexica-
na.
- 8.-
Linear Integrate Circuit.
Sgs-Ates Semiconductor Co-
poración. U.S.A.
- 9.-
Optoelectronics Data Book.
Fairchild Company, U.S.A.