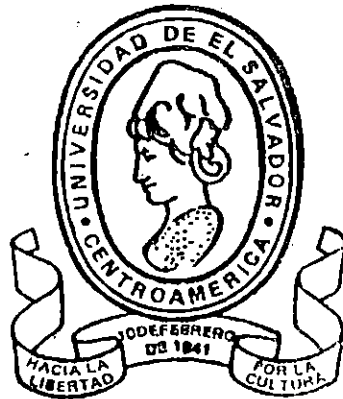


# UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



“DETERMINACION PRACTICA DE LOS PARAMETROS DE  
LOS REGULADORES DE VELOCIDAD DE GENERADORES  
SINCRONOS DE CENTRALES REPRESENTATIVAS DEL  
SISTEMA DE POTENCIA DE LA COMISION EJECUTIVA  
HIDROELECTRICA DEL RIO LEMPA (CEL)”

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR

**RICARDO ANTONIO RIVAS MOLINA**

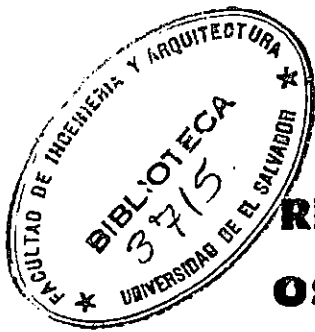
**OSCAR ORLANDO TORRES BERRIOS**

PARA OPTAR AL TITULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

AGOSTO DE 1993

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMERICA



15101398  
15101398

*Recibida: 21/09/93*

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

RECTOR: DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA.

SECRETARIA GENERAL: LIC. MIRNA ANTONIETA PERLA DE ANAYA.

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA:

DECANO: ING. JUAN JESUS SANCHEZ SALAZAR.

SECRETARIO: ING. JOSE RIGOBERTO MURILLO CAMPOS.

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA.

DIRECTOR: ING. RICARDO ERNESTO CORTEZ.






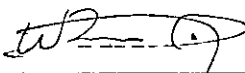
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR


TRABAJO DE GRADUACION

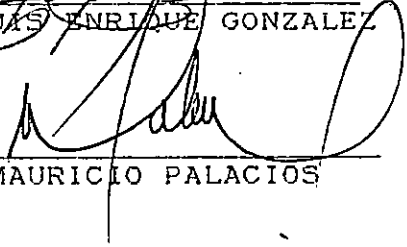
COORDINADOR:

  
\_\_\_\_\_  
ING. MARIO ANTONIO LOPEZ.

ASESORES:

  
\_\_\_\_\_  
ING. WILLIAN ALGUERA

  
\_\_\_\_\_  
ING. LUIS ENRIQUE GONZALEZ

  
\_\_\_\_\_  
ING. MAURICIO PALACIOS

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
Y ARQUITECTURA  
Universidad de El Salvador

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, 30 de Agosto de 1963  
en el local de Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica  
a las 10:00 horas, con la presencia de las siguientes autoridades de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

- 1- Ing. Ricardo E. Cortez  
Director de la E.I.E.
- 2- Ing. Jorge A. Galdámez  
Secretario de la E.I.E.
- 3- \_\_\_\_\_

*[Handwritten signature]*  
*[Handwritten signature]*

Y con el Honorable Jurado de evaluación integrado por las personas  
siguientes:

- 1- Ing. Luis Ramón Portillo
- 2- Ing. Miguel Angel Ramírez
- 3- Ing. Rafaél Bautista Coto
- 4- \_\_\_\_\_
- 5- \_\_\_\_\_
- 6- \_\_\_\_\_

*[Handwritten signature]*  
*[Handwritten signature]*

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de  
Graduación: "DETERMINACION PRACTICA DE LOS PARAMETROS DE LOS REGULADORES DE VELOCIDAD DE  
GENERADORES SINCRONOS DE CENTRALES REPRESENTATIVAS DEL SISTEMA DE POTENCIA DE LA COMISION  
EJECUTIVA HIDROELECTRICA DEL RIO LEMPA (C.E.L.)"

a cargo del (los) Br(es): Ricardo Antonio Rivas Molina y  
Oscar Orlando Torres Berríos.

Habiendo obtenido el presente trabajo una nota final, global de 6.7

( Seis punto siete )



TRABAJO DEDICADO A:

DIOS :

POR QUIEN TODO FUE HECHO, A SU HIJO JESUS, EL CRISTO QUE MURIO POR NOSOTROS Y A SU SANTISIMA MADRE, MARIA.

MI PADRE:

RICARDO RIVAS,  
QUIEN SIEMPRE CONFIO EN MI, INCLUSO EN LOS PEORES MOMENTOS.

MI MADRE:

DIGNA EMERITA MOLINA DE RIVAS,  
DULCE Y CARINOSA EN ALGUNOS MOMENTOS DURA Y FUERTE CUANDO LA SITUACION LO EXIGUIA, A ELLA QUE ME DIO ALGO QUE MANTENDRE TODA LA VIDA; CARACTER.

MIS HERMANOS:

TOMAS WILFREDO RIVAS MOLINA,  
WALTER ROBERTO RIVAS MOLINA,  
YOLANDA CAROLINA RIVAS MOLINA,  
DE QUIENES JAMAS OI UN REPROCHE, POR SER YO EL "ESTUDIANTE" DE LA FAMILIA Y POR EL CONTRARIO SIEMPRE ME APOYARON.

MIS COMPANEROS:

QUIENES DIERON EL PRIVILEGIO DE SER PARTE DEL GRUPO, Y LA TRANQUILIDAD DE SABER QUE ANTE CUALQUIER PROBLEMA, SIEMPRE TENIA EL HOMBRO DE UN COMPANERO DISPUESTO A AYUDARME. EN ESPECIAL A OSCAR ORLANDO, POR HABERME "SOPORTADO" DURANTE LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

AL PUEBLO SALVADORENO:

DE QUIEN APRENDI A ENFRENTAR LAS PEORES ABVERSIDADES. DE FRENTE Y SIN BAJAR JAMAS LAS MANOS, A TI PEQUEÑO DAVID, QUE MAS TEMPRANO QUE TARDE TUMBARAS EL ENGRANDECIDO COLIAT, POR HABERME PERMITIDO SER DE LOS TUYOS. "SALVADORENO".

RICARDO ANTONIO RIVAS MOLINA

TRABAJO DEDICADO A:

DIOS TODOPODEROSO:

POR HABERME PERMITIDO VIVIR Y LOGRAR UNO  
DE LOS OBJETIVOS PRINCIPALES. SER  
PROFESIONAL..

MIS PADRES:

SANTANA TORRES POLIO,  
MARTHA ERLINDA BERRIOS DE TORRES,  
POR SUS GRANDES SACRIFICIOS, SU AMOR,  
CONFIANZA QUE SIRVIERON DE ESTIMULO PARA  
ALCANZAR LA META QUE ME HABIA PROPUESTO.

MIS HERMANOS:

ING. LUIS NAPOLEON TORRES BERRIOS ,  
LIC. ROXANA DEL CARMEN TORRES BERRIOS,  
CON AMOR FRANTERNAL.

MIS TIOS Y DEMAS FAMILIA:

CON CARINO Y APRECIO.

A MIS COMPANEROS Y AMIGOS:

POR HABER COMPARTIDO GRATOS  
MOMENTOS.

MI PAIS:

EL SALVADOR.

OSCAR ORLANDO TORRES BERRIOS

## AGRADECIMIENTOS

AL PERSONAL DEL COS:

ING. WILLIAN ALGUERA, ING. LUIS ENRIQUE GONZALES Y AL  
ING. MAURICIO PALACIOS, POR SUS VALIOSAS OBSERVACIONES Y  
RECOMENDACIONES QUE CONTRIBUYERON A MEJORAR NUESTRO TRABAJO.

CENTRAL HIDROELECTRICA 15 DE SEPTIEMBRE:

A TODO EL PERSONAL, POR LA COLABORACION QUE NOS BRINDARON  
PARA OBTENER LA INFORMACION NECESARIA. EN ESPECIAL A LOS  
INGENIEROS FRANCISCO EQUILEO GUILLEN Y LUIS ALONSO ARDON.

ING. OSCAR ATILIO ESTRADA VALLE:

POR SU COLABORACION QUE NOS BRINDO EN UNA FORMA  
DESINTERESADA PARA OBTENER TODA LA INFORMACION REQUERIDA.

A NUSTROS COMPANEROS Y AMIGOS:

POR HABERNOS DADO TODO SU APOYO DESDE EL INICIO HASTA EL  
FINAL DE NUESTRO TRABAJO.

ING. LAURA IRIS AGUIRRE SILIEZAR:

POR LA COLABORACION QUE NOS BRINDO AL FINAL DEL TRABAJO  
DE GRADUACION.



## PREFACIO

La próxima integración centroamericana, presenta como uno de sus aspectos, la interconexión eléctrica del istmo, y mas a corto plazo la interconexión de Honduras y El Salvador, esto obliga a las compañías distribuidoras del área a considerar un aspecto que hasta el momento no ha sido tomado en la importancia que realmente amerita, un estudio de estabilidad, con miras a preveer y evitar las consecuencias negativas que la interconexión podría producir en la región, como seria la oscilación de los sistemas que en el peor de los casos podría llegar al colapso de los mismo, pero para que este estudio sea valido, es necesario que los parámetros eléctricos que caracterizan la vida sean confiables.

El presente trabajo presenta la metodología y las técnicas necesarias para obtener los parámetros eléctricos de el gobernador de velocidad de la unida 1 de la C. H. 15 de Septiembre, se espera que los aspectos aquí expuestos sirvan como fundamento para determinar los parámetros de los gobernadores de velocidad de otras centrales generadoras del país.

La obtención práctica de los parámetros se vio recortada por la imposibilidad de realizar las pruebas en la central 15 de Septiembre debido a las políticas de generación de C.E.L.

## **RESUMEN DE TRABAJO.**

El presente documento plantea una serie de procedimientos y técnicas necesarias para la obtención de los parámetros eléctricos del gobernador de velocidad de la unidad 1 de la C.H. 15 de Septiembre, de El Salvador, se introduce el tema como una presentación de aspectos teóricos de la máquina generadora síncrona, ya que dicho generador es el usado por todos las centrales del país, se prosigue con una reseña teórica del gobernador de velocidad, definición, función, desarrollo histórico, etc. A continuación se presentan una serie de técnicas utilizadas para determinar los parámetros del gobernador de velocidad y se concluye, con los algoritmos necesarios para obtener dichos parámetros en el caso específico del gobernador de velocidad, en estudio.

En los anexos se presentan los valores proporcionados por el fabricante, de los parámetros a determinar.

## TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO	Pág.
I. Conceptos fundamentales	
1.0. Principios de generación de una máquina síncrona.....	1
1.0.1. Definición de máquina eléctrica.....	1
1.0.2. Definición de la máquina generadora síncrona o alternador.....	3
1.0.3. Terminología aplicable a las máquinas giratorias.....	3
1.1. Descripción y desarrollo de la generación de potencia.....	6
1.2. Control potencia - frecuencia.....	7
1.3. Conclusiones.....	9
Referencias bibliográficas.....	10
II. Modelos matemáticos de gobernadores de velocidad.	11
2.0. Regulador de velocidad.....	11
2.1. Historia.....	12
2.2. Características del modelado matemático....	14
2.3. Tipos de modelos matemáticos de gobernadores.....	14
2.3.1. Sensor de velocidad.....	15
2.3.2. Gobernador.....	16
2.3.2.1. Controlador.....	17
2.3.2.1.1. Control proporcional..	18
2.3.2.1.2. Acción de control integral.....	18
2.3.2.1.3. Acción de control pro- porcional integral....	19
2.3.2.1.4. Acción de control pro- porcional derivativo..	20
2.3.2.1.5. Acción control de tres términos (PID).....	22
2.3.2.1.6. Acción de control acelerométrico.....	23
2.3.2.2. Tipos de gobernadores.....	23
2.3.3. Servomecanismos (arreglo servomotor- válvula).....	24
2.3.4. Turbinas.....	24
2.3.4.1. Turbinas hidráulicas.....	24
2.4. Modelos de sistemas de gobernación de velocidad.....	26
2.4.1. Control mecánico - hidráulico.....	26
2.4.2. Control electro - hidráulico.....	28
2.5. Cálculo de la constante de tiempo de agua (Tw).....	29
2.6. Conclusiones.....	30
Referencias bibliográficas.....	30

CAPITULO	Pág.
III. Métodos de prueba.....	32
3.0. Definiciones y abreviaturas.....	32
3.0.1. Pruebas de validación.....	32
3.0.2. Velocidad:.....	32
3.0.3. Error de velocidad ( $\epsilon_n$ ).....	32
3.0.4. Regulación permanente de velocidad..	33
3.0.5. Caída de velocidad.....	33
3.0.6. Carrera del servomotor.....	33
3.0.7. Cavitación.....	34
3.0.8. Estatismo permanente ( $\sigma$ ).....	34
3.0.9. Estatismo transitorio ( $\delta$ ).....	35
3.1. Pruebas.....	35
3.1.1. Generalidades.....	35
3.1.2. Prueba de respuesta al escalón y cálculo de resultados.....	36
3.1.2.1. Respuesta al escalón unitario en un sistema de primer orden	36
3.1.3. Prueba de respuesta a la frecuencia.	39
3.1.4. Prueba de rechazo de potencia activa	40
3.2. Validación del modelo de regulación.....	40
3.2.1. Generalidades.....	40
3.3. Conclusiones.....	40
Referencias bibliográficas.....	41
IV. Algoritmos para la determinación experimental de los parámetros de la C.H. 15 de Septiembre.....	42
4.0. Modelo matemático de la C.H. 15 de Septiembre.....	42
4.1. Determinación de la ganancia y constante de tiempo del bloque integrador ( $K_1$ y $t_f$ ).....	43
4.2. Determinación de la constante de tiempo del bloque derivador ( $t_d$ y $K_B$ ).....	44
4.3. Determinación de la ganancia del bloque amplificador eléctrico ( $K_2$ ).....	45
4.4. Determinación de las ganancias y constantes de tiempo de la bobina móvil ( $K_3$ , $T_t$ ) y la servoválvula y el servomotor ( $K_4$ , $t_v$ y $t_s$ )..	46
4.4.1. Algoritmo.....	47
4.5. Determinación de la ganancia del sensor de posición ( $K_s$ ).....	48
4.6. Prueba de rechazo de carga para determinar el estatismo permanente ( $\sigma$ ) y la constante de inercia ( $H$ ).....	49
4.7. Procedimiento para determinar las constantes de tiempo del agua ( $T_w$ ), Dashpot ( $T_N$ ), el estatismo transitorio ( $\delta$ ) e inercia de la unidad ( $H$ ).....	50
4.8. Métodos de análisis de respuesta.....	52
4.8.1. Procedimiento de respuesta al escalón	52
4.8.2. Procedimiento de la prueba de respuesta a la frecuencia.....	53

4.9. Equipo utilizado.....	53
4.10 Conclusiones.....	54
Referencias bibliográficas.....	55
Conclusiones y Recomendaciones generales.....	56
Anexos.....	57
Anexo A	
Recomendaciones prácticas de la IEEE para especificaciones de equipos para el manejo de gobernadores de velocidad y turbinas hidráulicas.....	58
Especificaciones del equipo.....	59
Construcciones y operación.....	59
Equipo de gobernación.....	59
Construcción del gabinete del gobernador....	60
Anexo B	
Resultados.....	61
Presentación de resultados.....	62
Resultados teóricos de las pruebas al bloque integrador.....	62
Resultados teóricos de las pruebas al bloque derivador.....	63
Resultados teóricos de las respuestas de los bloques de la bobina móvil, la válvula piloto y el servomotor.....	64
Resultados teóricos de las respuestas de los bloques, amplificador eléctrico y sensor de posición.....	65
Anexo C	
Transductores.....	67
Transductores.....	68
Consideraciones de la fuente de potencia.....	69
Ajuste de offset y ganancia.....	69
Convertidor de voltaje a frecuencia frecuencia/voltaje.....	70
Potenciómetros.....	71
Linealidad de un potenciómetro.....	72
Resolución del potenciómetro.....	74
Transformadores diferenciales de variación lineal (LVDTs).....	75
Transductores de presión.....	76
Tubos de Bourdon.....	76
Fuelles.....	77
Convertidor de voltaje a frecuencia frecuencia/voltaje, VFC 32.....	79
Anexo D	
Diagramas.....	84
Gráfica caudal Vrs potencia.....	85
Diagrama de alambreado común.....	86
Tarjeta 2.....	87

CAPITULO

Pág.

Tarjeta 6.....	89
Tarjeta 5.....	91
Anexo E	
Puesta en servicio y verificación de sistemas de regulación con reguladores electrohidráulicos	
EHR 785.....	94
Verificación y ajuste estando parada la máquina.....	95
Proceso de arranque y parada.....	96
Puesta en servicio y verificación de sistemas de regulación con reguladores electrohidráulicos EHR 78.....	97
Verificación y ajustes al estar parada la unidad.....	97
Procesos de arranque y parada y verificaciones estando funcionando la unidad.....	112
Arranque manual de la unidad.....	113
Sistema automático de arranque del regulador.....	114
Unidad conectada a la red.....	114
Verificaciones estando conectada la unidad a la red.....	115
Sistema automático completo.....	117

## LISTA DE FIGURAS

Figura	pág.
1.1. Flujo a través de una espira giratoria.....	2
1.2. Partes básicas de una máquina.....	4
1.3. a) Rotor de polos salientes de una máquina sincrónica de seis polos; b) fotografía del rotor de polos salientes de una máquina sincrónica de ocho polos, en la cual puede verse el arrollamiento de cada polo; c) fotografía de un polo saliente sin el arrollamiento de campo; d) un polo saliente sin el arrollamiento de campo pero aún sin montar sobre el rotor.....	5
1.4. Sistema turbina - generador - excitador.....	6
2.1. Regulador de velocidad - control de frecuencia potencia. S= servomotor, P = bomba de aceite, A= dispositivo de ajuste, V = variador de velocidad, D = distribuidor de turbina.....	12
2.2. Gobernador de Watt.....	13
2.3. Diagrama de bloques funcional mostrando la ubicación del sistema de gobernación de velocidad y la turbina en relación con el sistema completo.....	15
2.4. Diagrama simplificado del lazo de control principal de un generador.....	15
2.5. Diagrama de bloques del control proporcional.....	18
2.6. Diagrama de bloques de un control integral.....	19
2.7. a) Diagrama de bloques de un control proporcional e integral; b) entrada escalón unitario; c) salida.....	20
2.8. a) Diagrama de un bloque de control proporcional y derivativo; b) entrada rampa unitaria; c) salida de control.....	21
2.9. a) Diagrama de bloques de un PID; b) entrada rampa unitaria; c) salida de control.....	22
2.10 Control acelerométrico, para un sistema hidráulico ; a) esquema; b) modelo de control.....	23
2.11 Sistema de control mecánico hidráulico para hidroturbina; a) diagrama de bloques funcional; b) aproximación matemática.....	26
2.12 Sistema general de gobernador de velocidad para turbinas hidráulicas.....	27
2.13 Turbina.....	30
3.1. Gráfica de regulación de velocidad.....	33
3.2. Gráfica de caída de velocidad.....	34
3.3. Diagrama de bloques de un sistema de primer orden.....	36
3.4. Curva de respuesta exponencial.....	38
3.5. Un sistema general.....	39

Figura	pág.
4.1. Sistema de control de velocidad de unidades de la C.H. 15 de Septiembre.....	43
4.2. Ubicación de los puntos de entrada y salida del integrador de la tarjeta (6).....	44
4.3. Ubicación de los puntos de prueba de entrada y salida del bloque derivador.....	45
4.4. Puntos de prueba de entrada y salida para el bloque amplificador .....	46
4.5. Circuito de prueba.....	47
4.6. Gráfica frecuencia-tiempo, típica de un rechazo de carga.....	50



## LISTA DE TABLAS

Tabla	pág.
2.1. Tipos de sensores de velocidad más usados en turbinas.....	16
2.2. Tipos de gobernadores usados en turbinas.....	17
2.3. Valores típicos de parámetros para hidroturbina	28
4.1. Bloques de la amplificación hidráulica.....	47

# CAPITULO I

## CONCEPTOS FUNDAMENTALES

### INTRODUCCION

Los generadores síncronos o alternadores son máquinas síncronas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de c.a. Este capítulo trata algunos aspectos fundamentales del principio de generación de la máquina de c.a., y las partes que forman al generador. Considerando en la sección final el control de potencia-frecuencia.

#### 1.0. PRINCIPIOS DE GENERACION DE UNA MAQUINA SINCRONA.

##### 1.0.1. DEFINICION DE MAQUINA ELECTRICA.

Se conoce con el nombre de máquina eléctrica al sistema de mecanismos capaz de producir, transformar o aprovechar la energía eléctrica. Las máquinas eléctricas convierten la energía eléctrica en energía mecánica o la energía mecánica en energía eléctrica. Cuando la conversión es de eléctrica a mecánica, la máquina se denomina motor. Cuando se emplea para convertir la energía mecánica a eléctrica, la máquina se denomina generador.

El campo magnético en una máquina constituye la unión de energía entre los sistemas eléctrico y mecánico. Este se produce por la corriente en las bobinas de alambre dentro de la máquina o por una combinación de bobinas de imanes permanentes. El campo magnético realiza dos funciones:

1. La atracción y repulsión magnética producen un par mecánico.

2. Según la ley de Faraday, se induce voltajes en las bobinas.

La Ley de Faraday afirma que el voltaje inducido ( $\mathcal{E}$ ) en una bobina, producido por un flujo magnético variable está dado por:

$$\text{fem} = - \frac{d}{dt} (N\phi) \quad (1.1)$$

donde  $N$  es el número de espiras de la bobina y  $\phi$  es el flujo magnético que liga o acopla a la bobina; el término  $N\phi$  se llama acoplamiento o enlace de flujo de bobina. (ver figura 1.1). Si la bobina con  $N$  espiras gira a velocidad constante, el flujo a través de ella, variará senoidalmente y por lo tanto el voltaje inducido, o fem, también es de naturaleza senoidal.

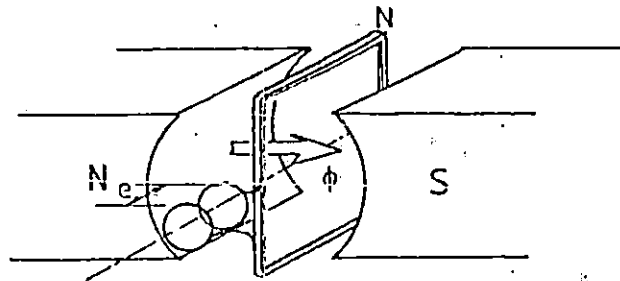


Figura 1.1. Flujo a través de una espira giratoria.

Las bobinas donde se induce el voltaje se llaman inducidas, y los campos magnéticos, inductores. En la operación real de una máquina, el fenómeno de inducción y de producción de torque ocurren simultáneamente y dependiendo del flujo de potencia, aquellos se oponen, por la ley de Lenz, a la causa que los originó, según sea el caso. Como en el caso de los motores lineales, recíprocos o vibratorios y giratorios, en la mayoría de las máquinas.

Entre las máquinas giratorias, las principales son: máquinas de inducción, máquinas c.c y las MAQUINAS SINCRONAS; siendo éstas últimas donde estará centrado el interés del presente estudio.

El rotor está montado en una barra rígida (generalmente de acero), que se denomina EJE o ARBOL. El eje se sostiene sobre cojinetes, de modo que el rotor puede girar libremente. El eje se extiende a través de uno o ambos cojinetes, pero proporciona un medio de acoplamiento entre la máquina y el sistema mecánico.

Las máquinas giratorias tienen una parte exterior (fija o estacionaria) denominada ESTATOR. La parte interior (rotatoria) se llama ROTOR. El rotor está centrado dentro del estator, de modo que su eje y el del estator son concéntricos. Al espacio entre el exterior del rotor y el interior del estator se le llama ENTREHIERRO. (véase la figura 1.2).

1.0.3. TERMINOLOGÍA APLICABLE A LAS MÁQUINAS GIRATORIAS.

Así, una máquina generadora sincrona es toda máquina que transforma energía mecánica (que recibe por su eje) en energía eléctrica (que suministra por sus bornes), manifestándose en forma de corriente alterna, cuya frecuencia angular es  $\omega$  y su deslizamiento es cero.

Por otro lado, se dice que el deslizamiento es cero. Es decir, que la velocidad relativa entre el campo magnético del campo inductor (o magnetizante) y el del campo magnético de reacción del inductor es de reacción porque cuando circula una corriente en el inductor se produce un campo que reacciona en contra del campo inductor.

donde  $P$  es el número de polos magnéticos,  $\omega_s$  la velocidad angular del eje y  $\omega$  es la frecuencia angular del sistema eléctrico.

$$\omega_s = \omega / (P/2) = 2\pi f / (P/2) \quad (\text{rad/seg}) \quad (1.2)$$

Las máquinas sincronas se denominan así porque su velocidad de eje está directamente relacionado con la frecuencia de línea por medio de la ecuación:

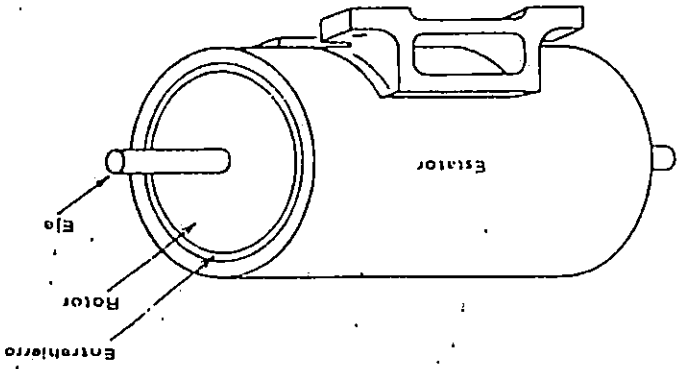
1.0.2. DEFINICIÓN DE LA MÁQUINA GENERADORA SINCRONA O ALTERNADOR

En algunas máquinas, los devanados, ya sea del rotor o del estator pueden estar alrededor de piezas de polos magnéticos sobresaliente o resultantes, denominadas "polos salientes". En la figura 1.3, se muestra esta clase de núcleos. Cuando un núcleo tiene polos salientes, las bobinas del devanado se enrollan alrededor de la cintura de las piezas del polo. Estas partes más estrechas de los polos salientes se llaman "núcleos del polo". Los extremos de los polos salientes formados se llaman "zapatas del polo". Sirven para facilitar la distribución correcta de la densidad de flujo en el entrehierro. Los polos salientes se usan en el núcleo del rotor de muchas máquinas síncronas. La debilidad mecánica y

Un devanado que lleva solamente corriente magnetizante, devanados de campo es casi siempre c.c. y en el de armadura c.e.; por consiguiente, los devanados de armadura pueden ser combinados y conectados para formar sistemas polifásicos.

Los devanados conducen las corrientes eléctricas que son la fuente del campo magnético, y proveen máximas cerradas, en las cuales el campo magnético puede inducir voltajes, de acuerdo con la ley de Faraday. Si la corriente es impuesta a la máquina se le llama "corriente de carga". Si la corriente en un devanado solo produce un campo magnético y es independiente de la carga, se le llama "armadura".

Figura 1.2. Partes básicas de una máquina



El rotor y el estator tienen cada uno tres partes básicas: el núcleo, los devanados y el aislante. Entonces es correcto hablar de "el núcleo del rotor", "los devanados del estator", "el aislante del sistema", etc. La finalidad de los núcleos del rotor y del estator es conducir el campo magnético a través de las bobinas de los devanados.

flujo en el entrehierro. Los polos salientes se usan en el núcleo del rotor de muchas máquinas síncronas. La debilidad mecánica y resistencia aerodinámicas de los polos salientes prohíbe su uso en los rotores de generadores síncronos, que se diseñan para ser movidos por turbina a gas. Los turboalternadores, como se les llama, casi siempre tienen ranuras cortadas en la superficie del rotor. Este tipo de rotor es mucho más resistente a los esfuerzos centrífugos que realizan los devanados, por las altas velocidades en la periferia.

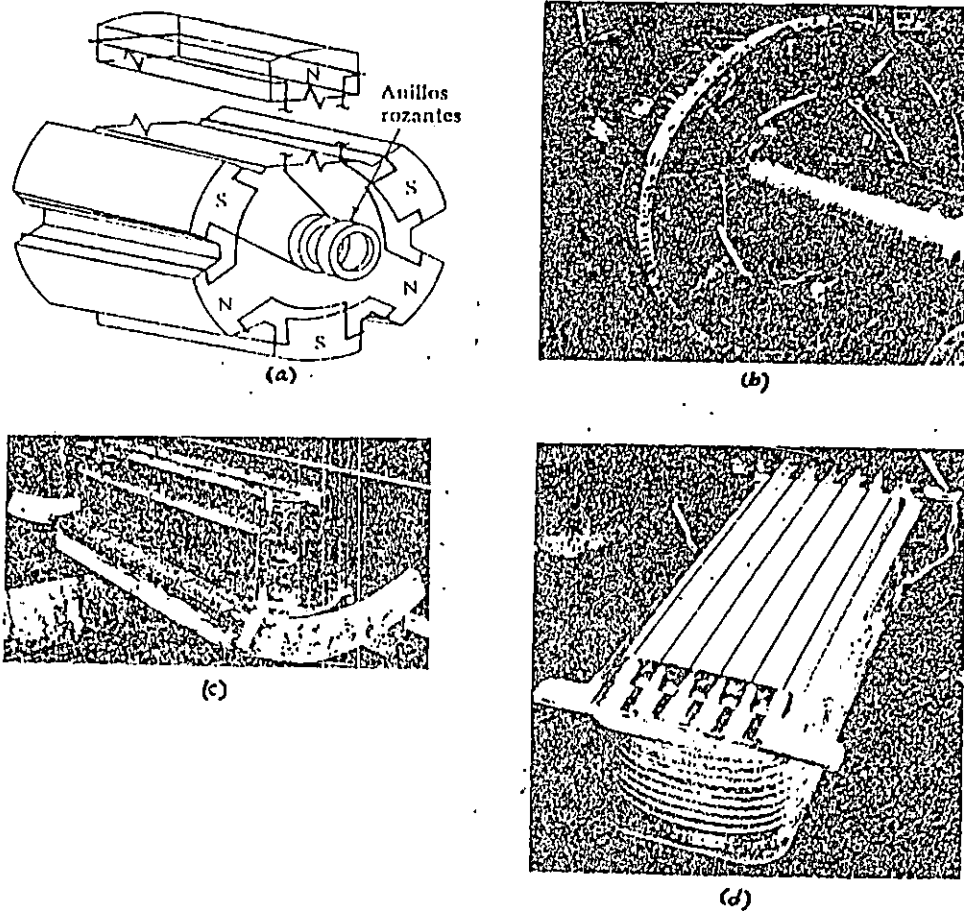


Figura 1.3. a) Rotor de polos salientes de una máquina síncrona de seis polos; b) Fotografía del rotor de polos salientes de una máquina síncrona de ocho polos, en la cual puede verse el arrollamiento de cada polo; c) Fotografía de un polo saliente sin el arrollamiento de campo; d) Un polo saliente sin el arrollamiento de campo, pero aún sin montar sobre el rotor.

### 1.1. DESCRIPCION Y DESARROLLO DE LA GENERACION DE POTENCIA.

La operación del generador se puede entender mejor si se le considera como el componente básico en un sistema que comprende : el sistema eléctrico externo, máquina generadora de energía y excitador, tal como se ilustra en la figura 1.4.

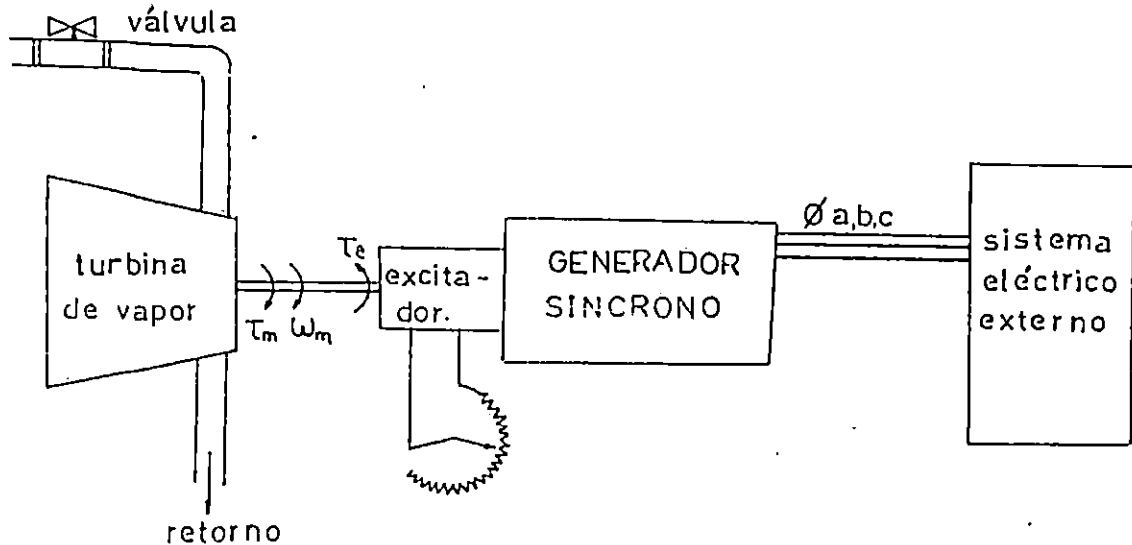


Figura 1.4. Sistema turbina-generador-excitador

La turbina produce un par  $\tau_m$  en el sentido de rotación. Este par  $\tau_m$  es directamente controlado por el flujo de vapor a la turbina y, por tanto, por la posición de la válvula principal de vapor. A este par se le opone otro par electromagnético  $\tau_e$  igual, creado físicamente por la interacción de los campos magnéticos del estator y del rotor. La potencia mecánica es la que se convierte a forma eléctrica. Aquí, la generación está limitada al caso trifásico balanceado, siendo esta estable y a velocidad constante, así que  $\tau_m = \tau_e$ .

La potencia mecánica es:

$$P_m = \tau_m \cdot \omega_m \quad (1.3)$$

La potencia eléctrica es:

$$P_e = \tau_e \cdot \omega_m \quad (1.4)$$

La fem inducida detrás de la reactancia síncrona en el generador de polos lisos  $E_f$ , o la inducida detrás de las reactancias de eje directo  $X_d$  y de eje en cuadratura del generador de polos salientes, también  $E_f$ , se controla mediante el excitador, ajustando la corriente de campo  $I_f$ , y ésta, a través de un reóstato maniobrado manual o automáticamente.

En resumen, la potencia mecánica es transformada a potencia eléctrica ec. (1.4), y se controla por la posición de la válvula de vapor, para turbinas térmicas y por la apertura del distribuidor para turbinas hidráulicas; el voltaje terminal y la potencia reactiva se ajustan con la excitación.

Sin embargo, la generación se complica ya que el sistema exige que al producir potencia eléctrica la velocidad angular del rotor del generador sea igual a la velocidad síncrona, es decir,  $\omega_m = \omega_s$ ; y de la excitación, mantener un voltaje terminal deseado mientras se genera potencia reactiva.

## 1.2. CONTROL POTENCIA - FRECUENCIA.

Aunque en cierta extensión el control de la potencia y de la frecuencia está interrelacionado con el control de la potencia reactiva y la tensión, es lógico que al considerar el control de potencia y frecuencia separadamente del control de la tensión, se obtenga una mejor apreciación del funcionamiento de los sistemas de potencia. La operación de un sistema eléctrico de potencia (SEP), requiere mantener en una forma continua un equilibrio entre la generación eléctrica y la demanda variable de la carga, conservando la frecuencia, los niveles de voltaje y las condiciones de seguridad en el sistema. Los factores deben cumplirse para que un costo de generación mínimo sea posible.

El control global de frecuencia está basado en una combinación de :

- a) Intervención manual o automática de retroalimentación.
- b) Acción de control o programación de generación, basada en predicciones de carga.

La diferencia entre la potencia generada y la consumida, debe ser monitoreada; aplicándose la acción de control para mantener el equilibrio en la generación. Las inercias de las masas rotatorias en las unidades generadoras proporcionan la energía necesaria para un equilibrio temporal; un incremento en la carga del sistema se manifiesta inicialmente en una reducción en la energía cinética del sistema, como una reducción de velocidad. Sin embargo, la velocidad de los



generadores determina la frecuencia del sistema, por lo que su medición representa una medición indirecta del desequilibrio entre las potencias consumida y generada.

Donde la ecuación de equilibrio es:

$$P_e - P_m = P_a = 2H \frac{d^2S}{dt^2} \quad (1.5)$$

donde:  $P_e$  = potencia eléctrica.  
 $P_m$  = potencia mecánica.  
 $P_a$  = potencia acelerante.  
 $H$  = inercia del sistema (generador + turbina)  
 $S$  = diferencia angular del rotor.

El sistema de control de la turbina debe actuar sobre las válvulas de admisión y/o para permitir la variación continua de la energía cinética y la velocidad a un valor en que el equilibrio de energía pueda ser recuperado.

El regulador de velocidad de las máquinas generadoras cumple, básicamente, con una doble función:

- a) Igualar el par motriz y el par resistente cada vez que excita una variación en la carga.
- b) Mantener la velocidad constante, anulando las aceleraciones o desaceleraciones de las masas giratorias, al variar el par resistente.

Existen dos tipos de regulación:

-Directa:

Cuando el órgano de admisión de la turbina está comandado directamente por órgano sensible del regulador.

-Indirecta:

Cuando el comando se hace a través de un servomotor para regular la admisión al primotor.

En una máquina constituida de un primotor (turbina hidráulica, de vapor, gas, etc.) acoplada a un alternador, el equilibrio dinámico se mantiene cuando la potencia suministrada por el primotor es igual a la que demanda la carga en la red más las pérdidas inherentes, tanto mecánicas como eléctricas.

En estas condiciones el par motor es igual al resistente manteniéndose la velocidad del grupo y, por consiguiente, la frecuencia. Cuando se pierde la igualdad entre las potencias, por variación en la carga alimentada en la red, la velocidad del grupo varía así:

- $w$  AUMENTA al disminuir la potencia entregada por el generador.
- $w$  DISMINUYE al aumentar la potencia demandada.

El equilibrio de la potencia se puede restablecer actuando sobre el distribuidor del primotor, función desempeñada por el regulador de velocidad. Su intervención está determinada por la variación de la velocidad del grupo debido a la variación de la carga de la red. Debe tener, desde luego, una forma de aumentar o disminuir la apertura del distribuidor, y con ello actuar sobre el par motor.

### 1.3. CONCLUSIONES.

- Un arreglo turbo-generador consiste en un generador cuyo primotor está formado por una turbina. Bajo consideración la potencia eléctrica entregada por el generador cambia a medida que se modifica la potencia mecánica entregada por la turbina.
- La frecuencia eléctrica originada por el estator está sincronizada en la velocidad mecánica de rotación del generador.
- La operación adecuada de un sistema eléctrico de potencia requiere mantener de una forma continua un equilibrio entre la generación eléctrica y la demanda variable de la carga, conservando la frecuencia, el nivel de voltaje y las condiciones de seguridad del sistema.
- El control de frecuencia se basa en la intervención manual de retroalimentación y de la acción de control o programación de generación.
- La velocidad de los generadores determina la frecuencia del sistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] STEPHEN J. CHAPMAN, "MAQUINAS ELECTRICAS", McGraw Hill, Inc, México 1987.
- [2] Contreras M.A, González L.E, Hernández E.G, "ESTUDIO TEORICO DE LAS CURVAS DE OPERACION DE LAS MAQUINAS GENERADORAS SINCRONAS", Tesis, UCA, El Salvador, 1990.

# CAPITULO II

## MODELOS MATEMATICOS DE GOBERNADORES DE VELOCIDAD

### INTRODUCCION.

El gobernador de velocidad tiene como función mantener la velocidad constante para condiciones de estados estables, el cual regula la posición de las válvulas de admisión a la turbina logrando un equilibrio entre potencia mecánica y eléctrica.

En este capítulo, se inicia con el desarrollo de los gobernadores de velocidad, luego se presentan los tipos de modelos matemáticos de gobernadores. En la sección 2.2., se muestra un diagrama simplificado del gobernador de velocidad, dentro de este diagrama se presenta los siguientes bloques: sensor de velocidad; el controlador, que está formado por seis tipos de control; después se muestra el gobernador, el servomotor y la turbina. En las secciones finales se consideran los dos tipos de control de velocidad para sistemas de turbinas hidráulicas que son el control mecánico-hidráulico y el control electro-hidráulico.

### 2.0. REGULADOR DE VELOCIDAD.

Un regulador de velocidad está constituido por tres elementos:

- Un elemento sensible a la velocidad de rotación.
- Servomotor (abre o cierra el distribuidor del primotor).
- Dispositivo de accionamiento al servomotor, hasta encontrar el nuevo punto de equilibrio.

Este esquema elemental se muestra en la fig. 2.1.

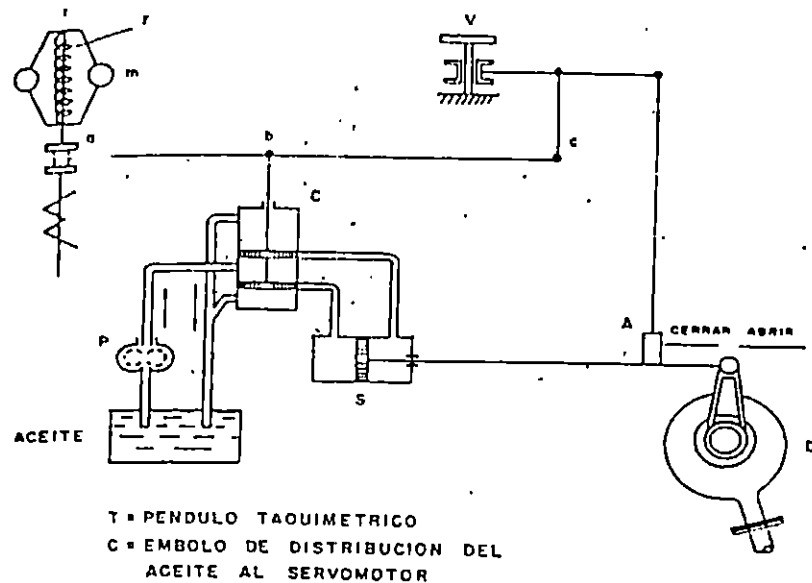


Figura 2.1. Regulador de velocidad-control de frecuencia potencia. S = servomotor, P = bomba de aceite, A = dispositivo de ajuste, V = variador de velocidad, D = distribuidor de turbina.

## 2.1. HISTORIA.

Con la utilización de las máquinas de vapor en la industria se inicia la era de los reguladores de velocidad, basándose en el regulador de Watt; que es aplicado para controlar el flujo de vapor de dicha máquina.

El regulador de watt utilizó tres elementos fundamentales:

- a. El sensor de velocidad tipo péndulo.
- b. Mecanismo de transmisión posicional.
- c. Mecanismo de acción sobre el flujo de aceite.

Este esquema elemental se muestra en la fig. 2.2.

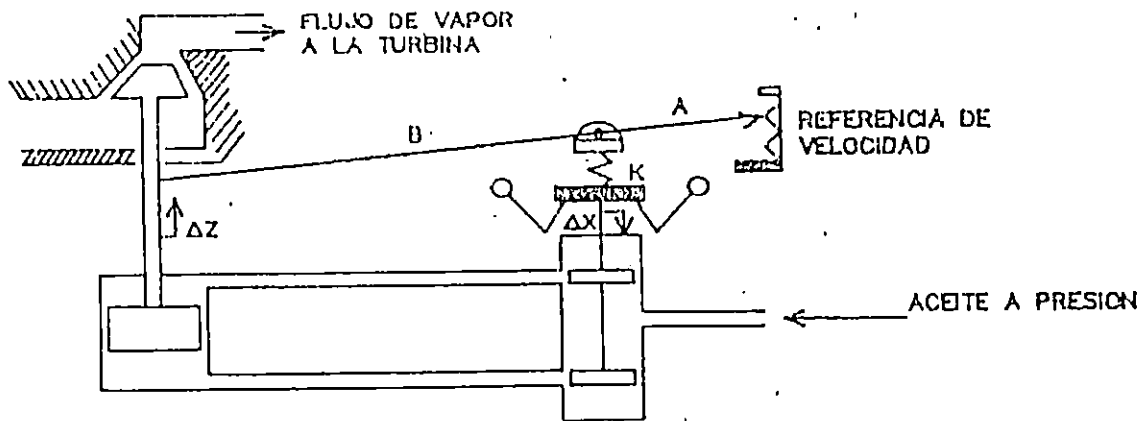


Figura 2.2. Gobernador de Watt.

El gobernador de watt posee dos pesos que se mueven radialmente alejándose del eje, cuando su velocidad de rotación aumenta y así actúan moviendo un manguito sobre un vástago central. Este movimiento se transmite, mediante un mecanismo de palanca, al pistón de una válvula piloto y mediante esto se hace funcionar el servomotor. El servomotor provoca el cierre o apertura de la turbina: a cada posición del brazo del servomotor corresponde un determinado grado de apertura y, por lo tanto, un valor de potencia suministrada por la máquina. Una característica importante del sistema de regulación es el mecanismo mediante el cual la posición de la válvula principal puede variarse y ajustarse independiente de su actuación, debido a la variación de la velocidad.

Este tipo de gobernador era el que se utilizaba para una máquina térmica, después aparecieron las turbinas hidráulicas, en este tipo de gobernador, se modificaron las secciones de amplificación, mejorando los esquemas de válvulas y servomotores, con el propósito de evitar cambios de potencias por pequeñas variaciones de velocidad. A este gobernador se le instaló un sistema de estabilización tipo hidráulico, que dio origen al gobernador mecánico-hidráulico. Y por último se inicia la era de la electrónica, que permite un desarrollo en los gobernadores de velocidad, sustituyendo las partes mecánicas por circuitos electrónicos, el cual dio origen al gobernador electro-hidráulico.

Entonces, el gobernador de velocidad tiene como función principal mantener constante la velocidad de la máquina para condiciones de estado estable o perturbación. Para ello, regula la entrada de energía a la turbina de modo que se mantenga un equilibrio electromecánico.

## 2.2. CARACTERISTICAS DEL MODELADO MATEMATICO.

El modelo matemático es la descripción matemática de las características de un sistema. El primer paso en el análisis de un sistema dinámico, es elaborar su modelo.

Para desarrollar el modelo matemático de un gobernador es importante considerar cuales son los elementos a modelar, por ejemplo, puede decirse que en el modelo matemático se incluyen aquellos componentes que están ligados directamente a los lazos de control y no los que actúan en forma ocasional como el limitador de carga, protecciones, control manual, etc.

Los elementos que deben estar incluidos en el modelo matemático son:

- a. control de velocidad.
- b. control de potencia.
- c. detector de velocidad y potencia.
- d. referencia de velocidad y potencia.
- e. mecanismos de accionamiento.

Es importante desarrollar un diagrama de bloques en donde se represente cada elemento, luego cada uno de los elementos mencionados debe ser descrito detalladamente de acuerdo a sus componentes ya sean mecánicos, hidráulicos, eléctricos o combinaciones, posteriormente deber ser obtenidas las ecuaciones de comportamiento respectivas.

## 2.3. TIPOS DE MODELOS MATEMATICOS DE GOBERNADORES.

A continuación se presentan las diferentes formas de representaciones matemáticas de los sistemas de Gobernación de velocidad, utilizadas de gobernadores de velocidad de hidroturbinas. La fig. 2.3, representa un diagrama general de un gobernador de velocidad y su ubicación dentro del sistema de generación.

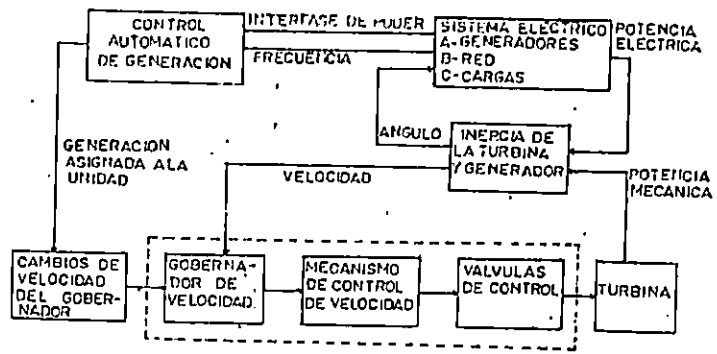


Figura 2.3. Diagrama de bloques funcional mostrando la ubicación del sistema de gobernación de velocidad y la turbina en relación con el sistema completo.

Es necesario visualizar la interacción entre los diferentes bloques que componen el sistema, para mayor simplicidad reduciremos el diagrama de la fig. 2.3, al mostrado en la fig. 2.4.

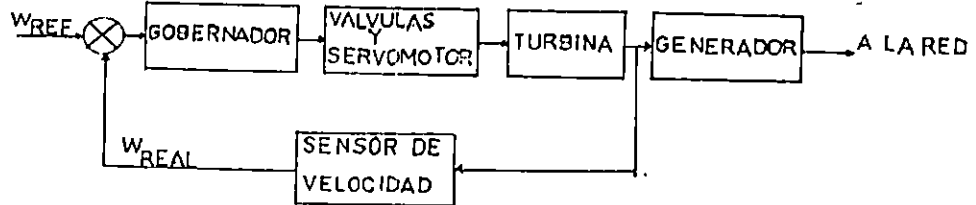


Figura 2.4. Diagrama simplificado del lazo de control principal de un generador.

Ahora, definiremos los bloques básicos, del sistema y su interrelación, lo cual es fundamental, para pasar posteriormente a la representación matemática de los mismos.

### 2.3.1. SENSOR DE VELOCIDAD.

Es un transductor o acondicionador de señales, el primero recibe señales de un tipo y las transforma en otras (ejemplo,



señal de entrada mecánico, señal de salida eléctrico), el último recibe una señal de un tipo y las entrega del mismo tipo pero con características diferentes, la señal de entrada podría ser mecánico o mejor dependiendo de donde se tome la señal. Pero la señal de salida depende del tipo de gobernador que se esté usando. En la tabla 2.1, se muestra, el tipo de sensor, su señal de entrada y salida.

Tabla 2.1. Tipos de sensores de velocidad más usadas en turbinas.

TIPO DE SENSOR	SEÑAL	
	ENTRADA	SALIDA
Engranajes	vel. de giro	vel. de giro
Bombas	vel. de giro	Presión hidráulica
Generador de imanes permanentes	vel. de giro	voltaje
Inducción magnética	vel. de giro	pulsos*

### 2.3.2. GOBERNADOR.

Es la parte más importante de sistema, "La parte pensante del mismo, debido a que compara los valores actuales de las variables que controla, contra los valores de referencia, de lo cual puede deducirse que el gobernador incluya el circuito de control y además decide sobre las acciones a tomar.

El gobernador, para lograr esto cuenta con varios componentes que realizan funciones específicas y estos son:

- Transductores con filtrado de señal de entrada proporcional a la velocidad de giro del rotor.
- Ajustador de señal de referencia.
- Comparador de señal de entrada y referencia.
- Compensación para mejorar la respuesta dinámica del gobernador y del sistema.
- Controlador.

- Caída de velocidad, que es una retroalimentación de salida del gobernador, o de la carga eléctrica de éste.
- Amplificador de potencia.

La tabla 2.2, presenta los tipos de gobernador usado en turbina en lo que respecta al tipo de energía que maneja y el tipo de controlador que tiene.

Tabla 2.2. Tipos de gobernadores usados en turbinas.

	TIPO DE GOBERNADOR	SEÑAL		CONTROLADO
		ENTRADA	SALIDA	
M E  C A N  I C O	mecánico	velocidad de giro	posición lineal o rotor	P
	mecánico hidráulico	velocidad de giro	posición lineal o rotor	PI
	hidráulico-hidráulico	presión hidráulica	presión hidráulica	PI
E L C T  R I C O	electro-hidráulico	velocidad de giro	posición lineal	PID
	electrónico	voltaje	corriente eléctrica.	PID

### 2.3.2.1. Controlador.

Es la parte del gobernador que produce las señales de mando de apertura o cierre del distribuidor.

Es el bloque donde se encuentran los indicadores del funcionamiento de la unidad, así como algunos elementos de control. Este dispositivo recibe su señal de entrada del sensor e velocidad y la compara con una señal de referencia, la señal de salida presentará características especiales dependiendo de la forma de control utilizada por estas unidades, usualmente estas acciones de control pueden ser de las siguientes formas:

### 2.3.2.1.1. Control proporcional:

En el modo de control proporcional, el dispositivo corrector final no es forzado a tomar toda o ninguna posición en lugar de esto, tiene un rango continuo de posiciones posibles, la posición exacta que toma es proporcional a la señal de error en otras palabras, la salida del bloque de control es proporcional a su entrada, es decir:

$$m(t) = K_p * e(t) \quad (2.1)$$

donde:

$m(t)$  = señal de salida.

$e(t)$  = señal de error.

$K_p$  = sensibilidad proporcional o ganancia.

En magnitudes transformadas de Laplace

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.2)$$

El diagrama de bloques del control proporcional se muestra en la fig. 2.5.

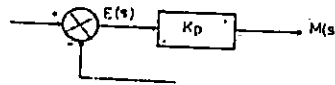


Figura 2.5. Diagrama de bloques del control proporcional.

### 2.3.2.1.2. Acción de control integral.

En un control con acción integral, el valor de la salida del controlador  $m(t)$  varía proporcionalmente a la señal de error actuante  $e(t)$  es decir.

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i * e(t) \quad (2.3)$$

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.4)$$

donde:  $K_i$  es una constante regulable. La función de transferencia de control integral es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.5)$$

Si se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $m(t)$  varía dos veces más rápido. Para un error actuante igual a cero el valor de  $m(t)$  se mantiene estacionario. La acción de control integral recibe a veces el nombre de control de reposición, y se muestra un diagrama de bloques en la fig. 2.6.

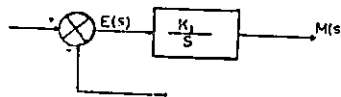


Figura 2.6. Diagrama de bloques de un control integral.

### 2.3.2.1.3. Acción de control proporcional integral.

La acción de control proporcional e integral queda definida por la ecuación siguiente:

$$m(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.6)$$

donde:

$K_p$  = ganancia proporcional.

$T_i$  = tiempo integral.

Tanto  $K_p$  como  $T_i$  son regulables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras una modificación en  $K_p$  afecta tanto a la parte integral como a la proporcional de la acción de control. A la inversa del tiempo integral  $T_i$  se le llama frecuencia de reposición. La frecuencia de reposición es el número de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control, se mide en repeticiones por minuto. La fig. 2.7a, presenta un diagrama de bloques de un control proporcional integral. Si la entrada actuante,  $e(t)$  es una función rampa unitaria, como se ve en la fig. 2.7b. La salida de control  $m(t)$ , es la que se muestra en la fig. 2.7c.

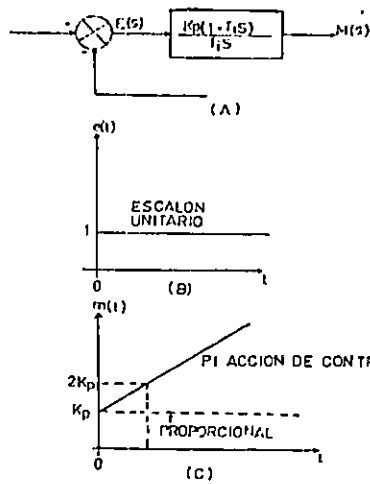


Figura 2.7. a) Diagrama de bloques de un control proporcional e integral; b) entrada escalón unitario; c) salida.

#### 2.3.2.1.4. Acción de control proporcional derivativo.

La acción de control proporcional y derivativo queda definida por la siguiente ecuación:

$$m(t) = K_p * e(t) + K_p * T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.7)$$

y la función de transferencia es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (2.8)$$

donde

$K_p$ : es la sensibilidad proporcional,

$T_d$ : es el tiempo derivativo.

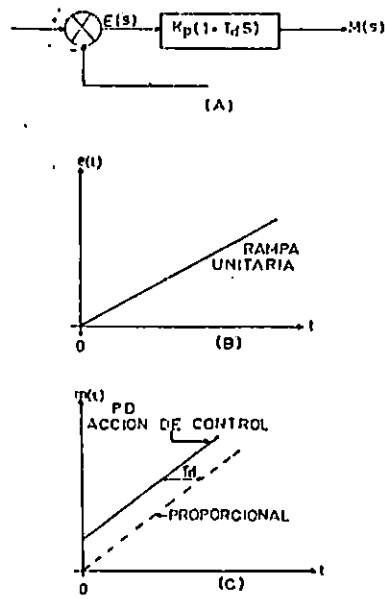


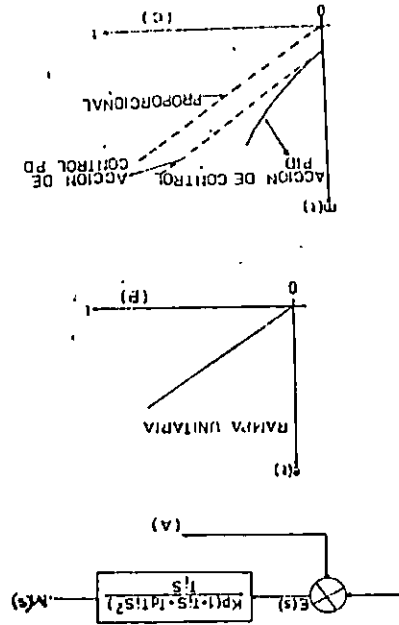
Figura 2.8. a) Diagrama de un bloque de control proporcional y derivativo; b) entrada rampa unitaria; c) salida de control.

Tanto  $K_p$  como  $T_d$  son regulables. La acción de control derivativo a veces denominado control de velocidad, es cuando el valor de salida del control es proporcional a la velocidad de variación de la señal error actuante. El tiempo  $T_d$  es el intervalo de tiempo en que la acción de velocidad se adelanta al efecto de la acción proporcional. La fig. 2.8a. presenta un diagrama de bloques de un control proporcional y derivativo. Si la señal error actuante  $e(t)$  es una función rampa unitaria como se ve en la fig. 2.8b. la salida de control  $m(t)$  es la de la fig. 2.8c. La función de control derivativo tiene carácter derivativa nunca puede anticiparse a una acción que aún no ha tenido lugar.

Mientras la acción de control derivativo tiene la ventaja de ser anticipativo tiene la desventaja de que amplifica la señal de ruido y puede producir efecto de saturación en el accionador.

Hay que notar que nunca se puede tener una acción de control derivativo sola, porque este control es efectivo únicamente durante periodos transitorios.

Figura 2.9. a) Diagrama de bloques de un PID; b) entrada rampa unitaria; c) salida de control.



donde:  
 Kp = sensibilidad proporcional.  
 Td = tiempo derivativo.  
 Ti = tiempo integral.

$$M(s) = \frac{E(s)}{Kp ( 1 + Td s + 1/Ti s^2 )} \quad (2.10)$$

o la función de transferencia es:

$$m(t) = Kp * e(t) + Kp Td \dot{e}(t) + Kp \int_0^t e(t) dt \quad (2.9)$$

La combinación de los efectos de acción de control proporcional, acción de control derivativa y acción de control integral, se llama acción de control proporcional, derivativa e integral. Esta acción combinada tienen las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de control con esta acción combinada está dada por:

2.3.2.1.5. Acción control de tres términos (PID).

En la fig. 2.9a, puede verse el diagrama de bloques de un PID, si  $e(t)$  es una función rampa unitaria como la fig. 2.9b, la salida  $m(t)$  es la que puede verse en la fig. 2.9c.

### 2.3.2.1.6. Acción de control acelerométrico.

La característica principal de este tipo de control es que además de sensar la velocidad de la unidad, también se monitorea su aceleración, permitiendo la acción rápida de control. En la fig. 2.10, se muestra el esquema y el modelo del control acelerométrico.

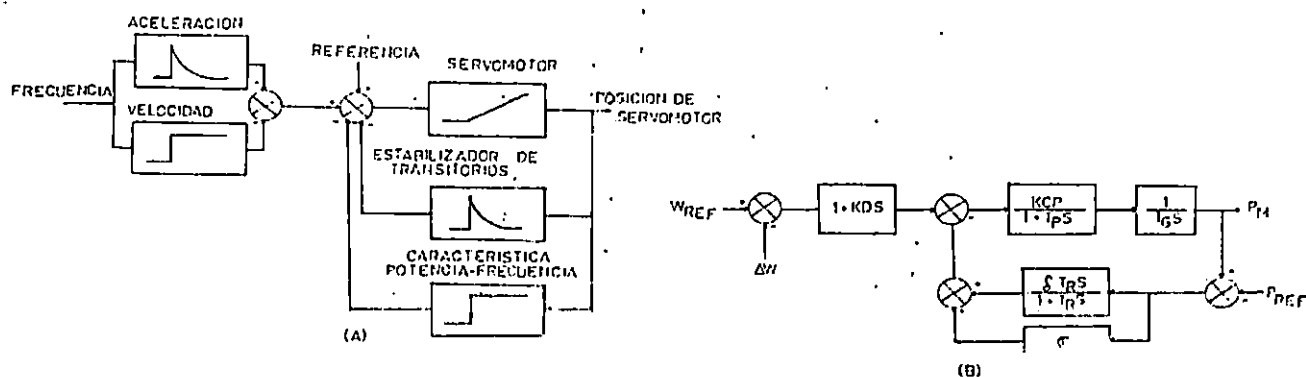


Figura 2.10. Control acelerométrico, para un sistema hidráulico. a) Esquema; b) modelo de control.

### 2.3.2.2. Tipos de gobernadores.

Los gobernadores hidráulicos pueden dividirse en 2 tipos básicos:

- El gobernador mecánico hidráulico.
- El gobernador electro hidráulico.

Los sistemas de gobernación electro-hidráulico tienen la ventaja de responder en menor tiempo y es más fácil modificar su ajuste.

No obstante la parte hidráulica (sobre la base de aceite a presión) es imprescindible por la potencia requerida para



accionar las válvulas de admisión de vapor a las compuertas, en el caso de turbinas térmicas o hidráulicas respectivamente.

### 2.3.3. SERVOMECANISMOS (ARREGLO SERVOMOTOR - VALVULA).

Los servomecanismos deben generar las fuerzas requeridas para ejercer el control sobre la posición de los álabes de acuerdo a las características de control, dictados por el sistema de control de velocidad y potencia en general son de tipo electro-hidráulico. La información eléctrica de las características de control, es proporcionado al mecanismo de accionamiento a través de una electroválvula, la cual modifica la posición del embolo de una válvula piloto, de acuerdo a las señales eléctricas. Esta válvula piloto, puede considerarse como el origen del mecanismo de accionamiento, ya que en ella es donde se definen las características de movimiento (dirección de flujo de aceite en válvulas y servomotores) de los servo mecanismos. En el caso de sistemas electro-hidráulicos esta válvula esta constituida por una bobina móvil que constituye la interface entre los mecanismos de control eléctricos y la etapa de alta potencia, (válvulas y servomotores).

### 2.3.4. TURBINAS.

#### 2.3.4.1. Turbinas hidráulicas.

Los parámetros a considerar en este tipo de turbinas, en el comportamiento del velocidad de la máquina, son la inercia del generador y la inercia del agua y son éstos los que en ciertas condiciones y configuraciones del sistema pueden provocar un problema de inestabilidad, el ajuste de los parámetros de un sistema de gobernación debe realizarse con base a las características de la unidad.

Puede mencionarse que un sistema con gran inercia, la constante de inercia de un sistema es el tiempo necesario para que el grupo alcance la velocidad normal y viene dado por:

$$H = \frac{\text{Energía cinética a la velocidad sincrona}}{\text{Potencia nominal}} = \frac{1}{2} I W_o^2 / S_n \quad (2.11)$$

donde

- I = inercia del eje del generador.
- W<sub>o</sub> = frecuencia de resonancia.
- S<sub>n</sub> = potencia nominal del generador.

Presenta una frecuencia que tiende a ser más constantes que un sistema de baja inercia, esto puede deducirse de la ecuación de oscilación de la máquina.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{p_m - p_e}{2H} = \frac{p_m - p_e}{T_m} \quad (2.12)$$

$$H = 2.31 * 10^{-10} W_n^2 \Omega^2 / S_n \quad (2.13)$$

donde:

- Pe = Potencia eléctrica.
- Pm = Potencia mecánica.
- H = Constante de inercia.
- Wn<sup>2</sup> = Inercia del generador.
- Sn = Potencia nominal del generador.

El esfuerzo económico para lograr una constante de inercia elevada es considerable y en general, las nuevas unidades tienden a poseer una constante de inercia de menor magnitud que las unidades antiguas, por lo general se debe tratar de lograr el efecto de alta inercia a través del ajuste de los parámetros del gobernador.

Con respecto a la constante de aceleración del agua Tw, utilizada para representar las características de la turbina hidráulica, se puede mencionar que conforme el Tw crece, se pierde la capacidad de regulación de la unidad por problemas en el sistema hidráulico. Esta condición se puede apreciar de la ecuación :

$$T_w = \frac{Q}{gh} \epsilon (L/A) \quad (2.14)$$

donde:

- g = aceleración de la gravedad.
- h = caída neta.
- Q = flujo de agua de la turbina.
- L, A = longitud y área transversal de la tubería de presión.

El aumento en Tw puede obtenerse al aumentar la longitud de la tubería principal, lo que reduce las propiedades de regulación de la unidad, por problemas de velocidad de respuesta y sobrepresión en la tubería y la turbina.

## 2.4. MODELOS DE SISTEMAS DE GOBERNACION DE VELOCIDAD.

Los modelos básicos para los sistemas de gobiernos en estudios de estabilidad de sistemas de potencia para centrales hidroeléctricas, los podemos clasificar en:

- Control mecánico-hidráulico.
- Control electro-hidráulico.

### 2.4.1. CONTROL MECANICO - HIDRAULICO.

El sistema de gobernanación de velocidad mecánico hidráulico consiste de un gobernador de velocidad, una válvula piloto con servomotor, una válvula distribuidor con servomotor de entrada y una entrada controlada por el gobernador, el cual están relacionadas funcionalmente como se muestra en la fig. 2.11a.

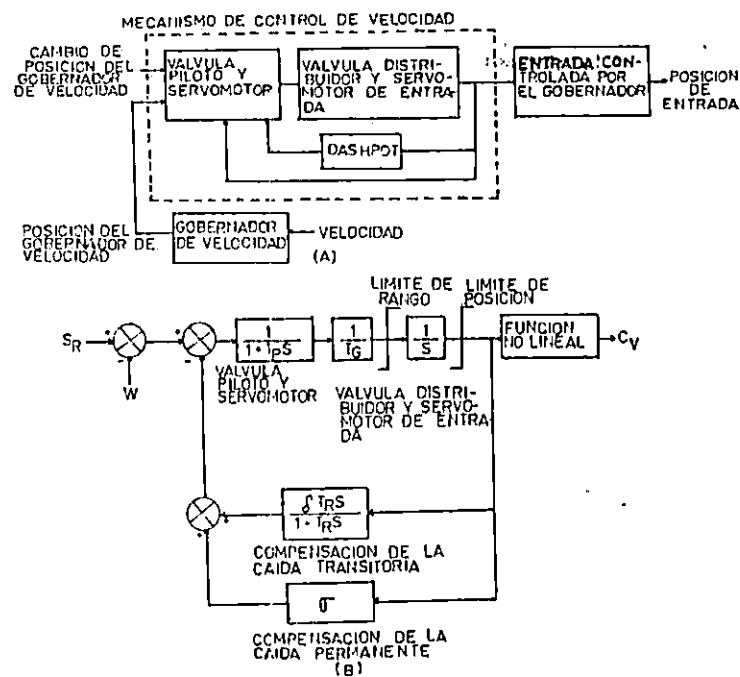


Figura 2.11. Sistema de control mecánico-hidráulico para hidroturbina, a) Diagrama de bloques funcional b) aproximación matemática.

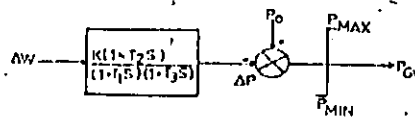


Figura 2.12. Sistema general de gobernador de velocidad para turbinas hidráulicas.

Los requerimientos de la gobernación de velocidad para la turbina hidráulica son frecuentemente influenciadas por los efectos de la inercia del agua y la regeneración del dashpot\*, como se muestra en la fig. (2.11a), requerida para realizar un funcionamiento estable. El diagrama del bloque de la fig. 2.11, es un modelo no lineal aproximado para este sistema de gobernación de velocidad.

Se puede observar que el servomotor puede tener un límite de rango que responda a las desviaciones rápidas de velocidad, sin embargo la regeneración de la caída transitoria reduce el límite de rango en el análisis de estabilidad.

El límite de posición se muestra en el extremo de la válvula abierta. El modelo simplificado de la fig 2.12, es muchas veces el más utilizado para sistemas grandes de gobernación de velocidad de turbinas hidráulicas. Este modelo proviene de la fig. 2.11b, es decir si eliminamos la constante de tiempo  $T_p$  y el límite del servomotor de entrada y además asumimos también que la posición del servomotor de entrada y la posición de la válvula efectiva son iguales, entonces el límite de posición de entrada está afuera del lazo de regeneración. Con estas consideraciones que se ha hecho al modelo de la fig. 2.11b, se obtiene el modelo de la fig. 2.12.

La tabla 2.3, contiene expresiones para los parámetros de la fig. 2.12, en términos de los parámetros de la fig. 2.11b.

\* dashpot: elemento de amortiguamiento.

Tabla 2.3. Valores típicos de parámetros para hidroturbina.

PARAMETRO	VALOR TÍPICO	RANGO
$T_n$	5.0	2.5 - 25.0
$T_0$	0.2	0.2 - 0.4
$T_p$	0.01	0.03 - 0.05
$S$	0.3	0.2 - 1.0
$\sigma$	0.05	0.03 - 0.06

Donde

$T_n$  = constante de tiempo de la compensación transitoria.

$T_0$  = constante de tiempo del gobernador.

$T_p$  = constante de tiempo de la válvula piloto.

$S$  = estatismo transitorio.

$\sigma$  = estatismo permanente.

$$T_n = (\text{típico}) = 5 T_w \quad (2.15)$$

$$S = 2.5 T_w / 2H. \quad (2.16)$$

Donde  $H$  es la constante de inercia de la turbina-generador en MVA base de la máquina.

$$T_n = (1/\sigma) T_n T_0 \quad (2.17)$$

$$T_0 = (1/\sigma) [(\sigma + S) T_n + T_0] \quad (2.18)$$

Donde  $T_1$  y  $T_2$  de la figura 2.15 son aproximadamente

$$T_1, T_2 = T_0/2 \pm \sqrt{[(T_n^2/2) - T_n]}; \quad (2.19)$$

también en la fig. 2.11:

$$K = 1/\sigma \quad (2.20)$$

#### 2.4.2. CONTROL ELECTRO-HIDRAULICO.

El sistema de gobernación de velocidad moderna para la turbina hidráulica tiene circuitos electrónicos complicados para ejecutar las funciones asociadas de bajas potencias, con velocidad sensada y compensación de caída. Los circuitos electrónicos proveen gran flexibilidad y mejoran la ejecución en ambas bandas muertas; sin embargo para la operación del

sistema interconectado, la ejecución dinámica del gobernador eléctrico es necesariamente ajustado para que funcione como un gobernador mecánico, y por lo tanto no hay necesidad de mostrar el modelo.

## 2.5. CALCULO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO DE AGUA (Tw).

La constante de tiempo del agua Tw es asociada con el tiempo de la aceleración de agua en la tubería entre la turbina y la superficie como se muestra en la fig. 2.13 o entre la turbina y el oleaje, si este existe. La ecuación básica para la constante de agua es:

$$T_w = \frac{L \cdot V}{H_r \cdot g} \quad (2.21)$$

Donde, "L" es la longitud de la tubería en pie; "V" es la velocidad del agua en pies/seg; "Hr" es la altura total en pie; y "g" es la aceleración de la gravedad en pies/segundo, es conveniente expresar la velocidad del agua en términos de potencia generada por la planta.

$$P = \frac{v \cdot H_r \cdot A \cdot e}{11.8} \quad (2.22)$$

Donde:

P = es la potencia eléctrica generada en kilowatts;

A = es el promedio del área de la tubería en pie cuadrado, y

e = es el producto de la eficiencia de la turbina y la eficiencia del generador así:

$$T_w = \Sigma \frac{Q}{g \cdot h} \frac{L}{A} \quad (2.23)$$

$$T_w = \frac{11.8 \cdot P \cdot L}{H_r^2 \cdot A \cdot e \cdot g}$$

$$T_w = \frac{0.366 \cdot P \cdot L}{H_r^2 \cdot A \cdot e}$$

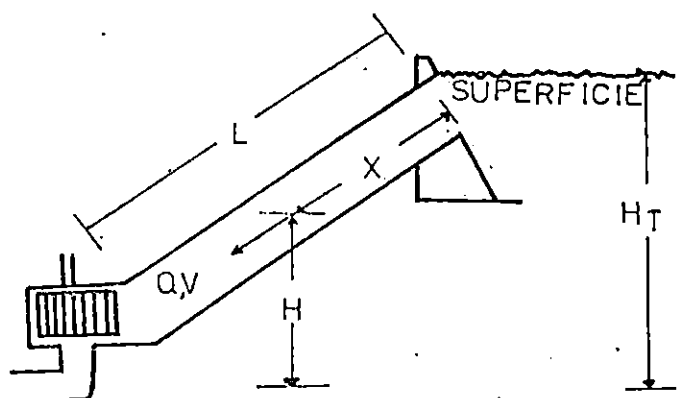


Figura 2.13. Turbina.

## 2.6. CONCLUSIONES.

- La función de un regulador de velocidad es sensar la velocidad del eje y generar la señal de corrección necesaria para mantener la velocidad de giro del eje en el nivel establecido.
- El regulador de velocidad básicamente está constituido por los siguientes elementos: un elemento sensible a la velocidad de rotación, el servomotor y el dispositivo de accionamiento al servomotor.
- El primer regulador de velocidad utilizado con fines prácticos fue el desarrollado por R. Watt, y constaba de tres elementos fundamentales tales como sensor de velocidad tipo péndulo, mecanismo de transmisión posicional y el mecanismo de acción sobre el flujo de vapor.
- El gobernador electro-hidráulico surge de la conversión de las partes mecánicas de baja potencia a partes eléctricas.
- Los gobernadores electro-hidráulicos presentan muchas ventajas respecto a los controladores puramente mecánicos, principalmente en cuanto a la velocidad de respuesta.

- El sistema de gobernación de velocidad mecánico hidráulico básicamente consiste en un gobernador de velocidad, una válvula piloto y servomotor y de una válvula de distribuidor y servomotor de entrada.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] K. OGATA, "INGENIERIA DE CONTROL MODERNA", Prentice Hall Inc. N.J. México 1989.
- [2] A. VASQUEZ, "PRUEBAS PARA LA DETERMINACION EXPERIMENTAL DE PARAMETROS DE REGULADORES DE VELOCIDAD Y VALIDACION DEL MODELO DE REGULACION". LAPEM, México, 1991.
- [3] IEEE, "RECOMMENDED PRACTICE FOR PREPARACION OF EQUIPMENT SPECIFICATIONS FOR SPEED-GOVERNING OF HYDRAULIC TURBINES INTENDES TO DRIVE ELECTRIC GENERATORS", IEEE STD, New York, 1977.
- [4] Quezada T., R.A. "SEMINARIO/TALLER SOBRE DETERMINACION DE PARAMETROS DE REGULADORES DE VOLTAJE Y VELOCIDAD", PARSEICA, CEPAL, 1990.
- [5] Bylerly, R.T. and Kimbard, E.W., EDS., "STABILITY OF LARGE ELECTRIC POWER SYSTEMS", IEEE PRESS, New York, 1974.
- [6] INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS. "CURSO CORTO DE SISTEMA DE CONTROL DE TURBINAS HIDRAULICAS", División de equipos, México, 1990.



# CAPITULO III

## METODOS DE PRUEBA

### INTRODUCCION.

La obtención práctica de los parámetros que constituyen las ecuaciones de transferencia de los elementos que forman el sistema de gobernación de velocidad de una central generadora, exigen la ejecución de métodos adecuados para la realización de las pruebas que los determinen.

En el presente capítulo se describen estos métodos de prueba, definiendo las pruebas de comportamiento que se realizan a los reguladores de velocidad tipo electrohidráulico de unidades generadoras en centrales hidroeléctricas, para determinar sus parámetros de control y validación del modelo matemático para este equipo.

### 3.0. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.

#### 3.0.1. PRUEBAS DE VALIDACION.

Son aquellas que permiten evaluar los parámetros del modelo del sistema de regulación de velocidad y cuyos resultados confirman su aceptación o rechazo.

#### 3.0.2. VELOCIDAD.

Es la velocidad de rotación de la turbina (rpm).

#### 3.0.3. ERROR DE VELOCIDAD ( $n$ ).

La diferencia entre velocidad de rotación real y una velocidad de referencia.

### 3.0.4. REGULACION PERMANENTE DE VELOCIDAD.

Pendiente de la gráfica de regulación de velocidad en un punto específico de operación. (Ver fig. 3.1).

$$e_p = dn / dp \quad (3.1)$$

donde  $n$ : velocidad relativa.  
 $p$ : potencia relativa.

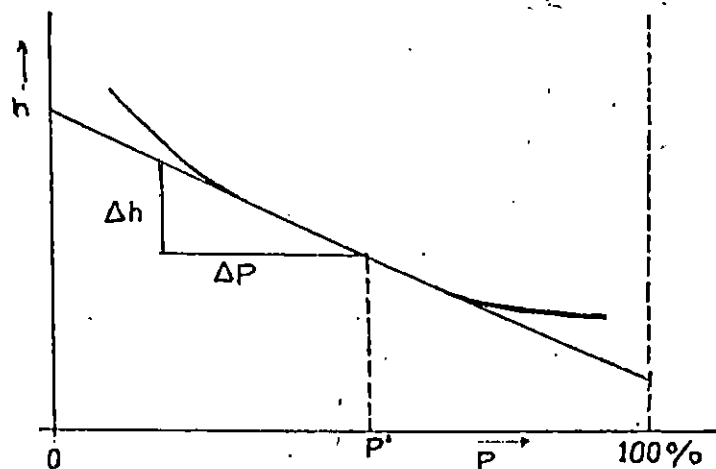


Figura 3.1. Gráfica de regulación de velocidad.

### 3.0.5. CAIDA DE VELOCIDAD.

La gráfica de caída de velocidad describe la relación entre la velocidad instantánea, expresada en porcentaje y la posición del brazo del servomotor de la turbina, y, expresado en porcentaje de la carrera del servomotor.

### 3.0.6. CARRERA DEL SERVOMOTOR.

El desplazamiento del servomotor principal desde la posición de cierre del mecanismo de control de la turbina hasta cualquier posición intermedia. La máxima carrera del servomotor ( $y_u$ ) es el desplazamiento entre la posición de cierre y la apertura total del mecanismo de control de la turbina ( $w$ ).

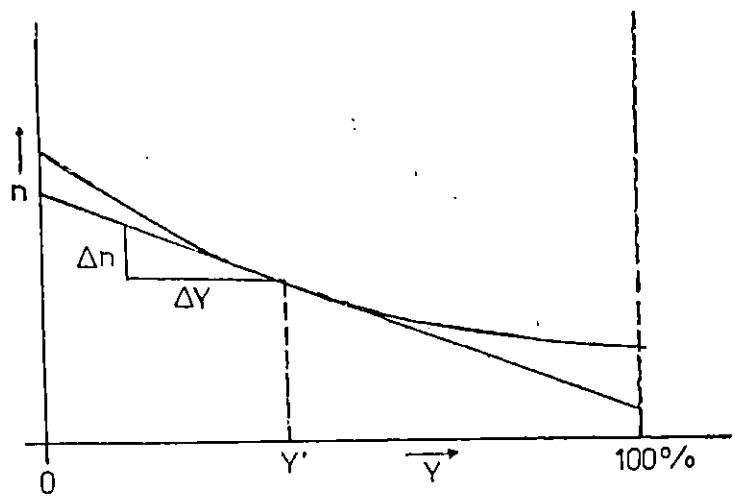


Figura 3.2. Gráfica de caída de velocidad.

### 3.0.7. CAVITACION.

Cuando un líquido fluye por una región donde la presión es mayor que su presión de vapor, el líquido hierve y forma burbujas de vapor. Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, "aplastándose" bruscamente las burbujas. Este fenómeno se llama cavitación. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando cambian de estado, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida. El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión que se trata de grava que golpea en las diferentes partes de la máquina.

### 3.0.8. ESTADISTISMO PERMANENTE ( $\sigma$ ).

La caída de velocidad que permanece en estado estable después del decaimiento completo, de la acción del mecanismo de amortiguamiento, DASHPOT. El cálculo del estadistismo permanente se realiza en base a la gráfica, frecuencia-tiempo, obtenida de la prueba de rechazo de carga. Para el cálculo del estadistismo permanente,  $\sigma$ , se emplea la siguiente expresión:

$$\sigma = F / E_n * P_n / P_n * 100 \quad (\%) \quad (3.2)$$

dónde:

- $P_n$ : potencia rechazada (MW).
- $P_n$ : potencia nominal (MW).
- F: frecuencia final-frecuencia inicial (Hz).
- $F_n$ : frecuencia nominal (Hz).

### 3.0.9. ESTADISMO TRANSITORIO (S).

La caída de velocidad de estado estable ocurrirá si la acción del decaimiento del mecanismo de amortiguamiento, DASHPOT, sería bloqueada y la caída de velocidad permanente estuviera inactivo ( $\sigma = 0$ ). El estadismo transitorio puede calcularse por medio de la ecuación:

$$S = 2.5. T_w / 2H \quad (3.3)$$

$$S = \frac{2.5 (Q_o L / H_n.A.g)}{2 (60.P_n / 2.\alpha_i.P_n)} \quad (3.4)$$

donde:

- Q: caudal de agua.
- L: distancia entre la entrada al tubo de succión y las aspas del rodete de la turbina.
- A: área transversal del tubo de succión.
- g: gravedad.
- $P_n$ : potencia rechazada .
- $\alpha_i$ : pendiente de la curva f-t del rechazo de carga.
- $P_n$ : potencia nominal.

## 3.1. PRUEBAS.

### 3.1.1. GENERALIDADES.

Las pruebas se llevarán a cabo con equipo y personal calificado. Con anticipación, se deberá contar con los datos de diseños, especificaciones, normas y datos de garantía. Y al mismo tiempo se deberá disponer del modelo matemático del regulador y de la turbina, así como las tablas de ajustes de todos los diales que intervengan en las modificaciones de los parámetros de la función de transferencia del regulador.

El nivel de agua en la presa deberá ser tal que no exceda al límite del factor de cavitación.

Las condiciones del aceite de control serán las de presión y temperatura de operación especificada.

Las variaciones de voltaje de servicio propios no deberán ser mayores del 5% del nominal.

A continuación se describen los métodos de prueba utilizados para determinar de manera experimental los parámetros de los reguladores de velocidad.

### 3.1.2. PRUEBA DE RESPUESTA AL ESCALON Y CALCULO DE RESULTADOS.

El objetivo de esta prueba es de llegar a conocer cuál función de transferencia corresponde en base al análisis de la gráfica que se obtenga de la variable de salida.

Este método consiste en aplicar a un sistema, o parte del sistema una señal escalón unitario, para conocer la función de transferencia correspondiente del circuito bajo prueba, en base al análisis de gráficos que se obtenga de la variable de salida que resulta ante la entrada escalón.

#### 3.1.2.1. Respuesta al escalón unitario en un sistema de primer orden.

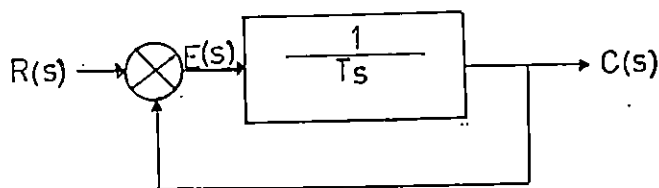


Figura 3.3. Diagrama de bloques de un sistema de primer orden.

Considere el diagrama de bloques para un sistema de primer orden el mostrado en la fig. 3.3, donde la función de transferencia en dominio de la frecuencia viene dada por

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{E(s)}{E(s) + C(s)} \quad (3.5)$$

$$= \frac{E(s)}{C(s) Ts + C(s)}$$

Entonces

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1}$$

despejando C(s)

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} R(s) \quad (3.6)$$

Como la transformada de Laplace de la función escalón unitario es  $R(s) = 1/s$ . La relación de entrada y salida está dada por:

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \frac{1}{s}$$

Desarrollando C(s) en fracciones parciales da

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} \quad (3.7)$$

Tomando la transformada inversa de Laplace de la eq. (3.7), se obtiene

$$c(t) = 1 - e^{-t/T} \quad (3.8)$$

La ec. (3.8) establece que inicialmente la salida  $c(t)$  es cero y finalmente se convierte en la unidad. Una de las características importantes de una curva de respuesta exponencial como ésta,  $c(t)$  es que en  $t = T$  el valor de  $c(t)$  es 0.632, o sea que la respuesta  $c(t)$  ha alcanzado el 63.2% de su variación total. Se puede ver esto fácilmente sustituyendo  $t = T$  en  $c(t)$ . Es decir,

$$c(T) = 1 - e^{-1} = 0.632$$

Es bien conocido que  $T$  es la constante de tiempo del sistema. Cuanto más pequeña la constante de tiempo, más rápida la respuesta del sistema. Otra característica importante de la curva de respuesta exponencial, es que la pendiente de la tangente en  $t = 0$  es  $1/T$  pues

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T} e^{-t/T} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (3.9)$$

La salida alcanzaría el valor final en  $t = T$  si mantuviera su velocidad inicial de respuesta. De la ec. (3.8), se ve que la pendiente de la curva respuesta  $c(t)$  decrece monótonamente desde  $1/T$  en  $t = 0$  a cero en  $t = \infty$ .

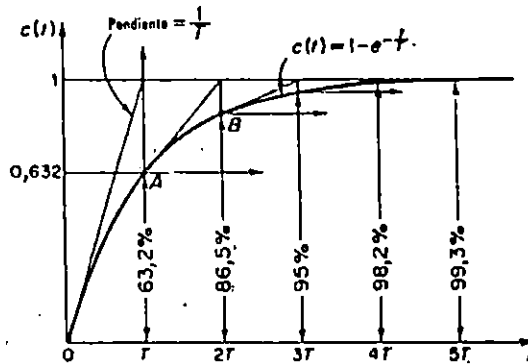


Figura 3.4. Curva de respuesta exponencial.

La curva de respuesta exponencial  $c(t)$ , dada por la ec. (3.8), es la de la fig. 3.4. En una constante de tiempo, la curva de respuesta exponencial ha ido desde 0 hasta el 63.2% del valor final. En dos constantes de tiempo, la respuesta alcanza el 86.5% del valor final. En  $t = 3T, 4T$  y  $5T$ , la respuesta alcanza el 95, 98.2 y 99.3% respectivamente, del valor final. Entonces para  $t > 4T$ , la respuesta queda dentro del 2% del valor final. Como se ve en la ec. (3.9), se alcanza matemáticamente el estado estacionario sólo tras un tiempo infinito. Sin embargo, en la práctica, una estimación razonable de la respuesta temporal es el tiempo que necesita la curva de respuesta par alcanzar la línea del 2% del valor final, o sea cuatro constantes de tiempo.

Sea el sistema de la fig. 3.5. Para determinar experimentalmente si el sistema es o no de primer orden, se traza la curva  $\log|c(t=0) - c(\infty)|$ , donde  $c(t)$  es la salida del sistema como función de  $t$ . Si la curva resulta ser una línea recta, el sistema es de primer orden. Se puede determinar la constante de tiempo  $T$  directamente del gráfico, como el tiempo  $T$  que satisface la siguiente ecuación:

$$c(T) - c(\infty) = 0.368[c(t=0) - c(\infty)] \quad (3.10)$$

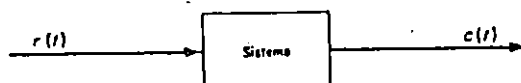


Figura 3.5. Un sistema general.

Se hace notar que en lugar de representar  $\log|c(t) - c(\infty)|$  en función de  $t$ , es conveniente representar  $|c(t) - c(\infty)|$  en función de  $t$  en papel semilogarítmico.

Se aplicará esta prueba a los diferentes bloques que conforman al regulador de velocidad, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Las respuestas obtenidas corresponderán a un sistema de primer orden.

### 3.1.3. PRUEBA DE RESPUESTA A LA FRECUENCIA.

Este método consiste en aplicar a un sistema o parte del sistema, una señal senoidal de amplitud fija y frecuencia variable. Es común determinar experimentalmente las funciones de transferencia de componentes complicados con este método.

La respuesta de una función de transferencia a una entrada senoidal se puede representar por dos diagramas distintos. Uno que da la amplitud en función de la frecuencia, y el otro que da el ángulo de fase en función de la frecuencia.



### 3.1.4. PRUEBA DE RECHAZO DE POTENCIA ACTIVA.

Básicamente, a partir de esta prueba se puede obtener información de la constante de inercia (H) de las partes rotativas, así como el valor del estatismo permanente ( $\sigma$ ).

Los procedimientos para realizar esta prueba se mencionan en la sección 4.6.

### 3.2. VALIDACION DEL MODELO DE REGULACION.

#### 3.2.1. GENERALIDADES.

La validación de un modelo matemático, básicamente consiste en la verificación del comportamiento del modelo respecto al comportamiento del sistema real tanto en estado estable como en estado transitorio, el cual deberá de cumplir con los rangos de tolerancia que se especifican para las variables principales así como las variables auxiliares. Cuando el modelo representa al sistema real en todo su rango de operación se denomina modelo de alcance total.

Actualmente una de las teorías de validación, es la simulación de los sistemas de control mediante paquetes de programación que utilizan como herramientas de trabajo una PC los cuales permiten al usuario configurar de acuerdo a sus necesidades el sistema de control requerido y someterlos a señales de pruebas típicas como son; el escalón, la rãmpa y senoidal y obtener las grãficas de respuesta que serã necesario compararlas con las respuestas reales del sistema.

### 3.3. CONCLUSIONES

- La prueba de respuesta al escalón, nos permite determinar las constantes de tiempo de sistemas de primer y segundo orden, en una forma sencilla y prãctica.
- La prueba de respuesta a la frecuencia, nos permite determinar las constantes de tiempo y las ganancias de sistemas mãs complejos, su realizaci3n implica un m3todo mãs trabajoso y el anãlisis de resultados implica la aplicaci3n de diagramas de Bode.

- La división de un sistema en partes más pequeñas y simples, implica durante el modelaje matemático, la generación, y por ende la realización de más pruebas, sin embargo esto se compensa con el hecho que la respuesta de estos bloques es más sencilla y por tanto, facilite sus análisis.
- Experimentalmente resulta más sencillo de analizar dos bloques caracterizados por funciones de transferencia de primer orden, que uno solo, caracterizado por una función de segundo orden.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] A. VASQUEZ. A. SAUNDERS, "PRUEBAS PARA LA DETERMINACION EXPERIMENTAL DE PARAMETROS DE REGULADORES DE VELOCIDAD Y VALIDACION DEL MODELO DE REGULACION", LAPEM, México, 1991.
- [2] IEEE, "RECOMMENDED PRACTICE FOR PREPARACION OF EQUIPMENT SPECIFICATIONS FOR SPEED-GOVERNING OF HYDRAULIC TURBINES INTENDES TO DRIVE ELECTRIC GENERATORS", IEEE STD, New York, 1977.
- [3] B. KUO, "SISTEMAS AUTOMATICOS DE CONTROL", CECSA, PRENTICE HALL, INC. MEXICO, 1987.
- [4] K. OGATA, "INGENIERIA DE CONTROL MODERNA", Prentice Hall Inc. N.J. México 1989.

# CAPITULO IV

## ALGORITMOS PARA LA DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS PARAMETROS DE LA C.H. 15 DE SEPTIEMBRE.

### INTRODUCCION.

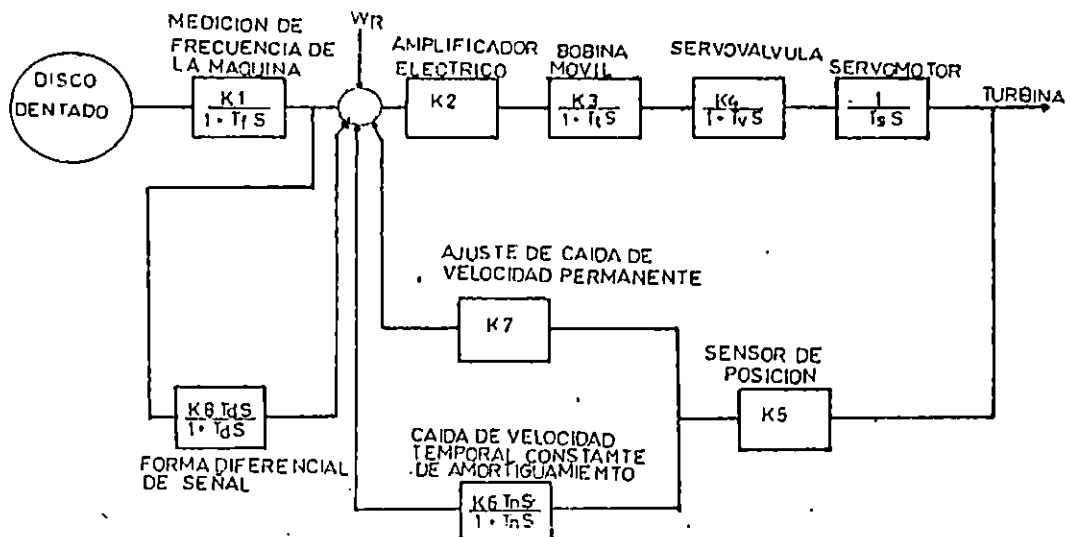
En el presente capítulo se presenta el caso específico de análisis del gobernador de velocidad de la C.H. 15 de Septiembre. Describiéndose de una forma ordenada la serie de pruebas y mediciones, en puntos específicos que permiten obtener la información necesaria para obtener los valores de ganancias y constantes de tiempo que caracterizan al sistema regulador de velocidad de la unidad 1.

### 4.0. MODELO MATEMATICO DE LA C.H. 15 DE SEPTIEMBRE.

Para la realización de un estudio de estabilidad confiable en el que consideramos el comportamiento del turbo grupo, es conveniente disponer de un modelo adecuado de este sistema.

Con el fin de ilustrar el proceso de la determinación de los parámetros de interés, a continuación nos permitimos presentar el modelo matemático de la C.H. 15 de septiembre, para el sistema de control de velocidad.

La determinación de los parámetros en general, se puede lograr mediante diferentes métodos de pruebas como la aplicación de escalones de velocidad ó respuestas en frecuencia a bloques o grupos de bloques de transferencia.



donde:

- TF = constante de tiempo de frecuencia medida.
- Td = constante de tiempo de la componente diferencial.
- Tt = constante de tiempo de la bobina móvil.
- Tv = constante de tiempo de la válvula de control.
- Ts = constante de tiempo del servomotor.
- K7 =  $\sigma$  : estatismo permanente.
- K6 =  $\delta$  : estatismo transitorio.
- K1, K2, K3, K4, K5, y K8 : ganancias.
- WR = velocidad de referencia.

Figura 4.1. Sistema de control de velocidad de unidades de la C.H. 15 de septiembre.

#### 4.1. DETERMINACION DE LA GANANCIA Y CONSTANTE DE TIEMPO DEL BLOQUE INTEGRADOR (K1 Y $t_f$ ).

1. Determinar en el panel de control la tarjeta 6, (medidor de error de velocidad), y revisar sus conexiones. (ver anexos, gráfico de tarjeta 6 ).

2. Ubicar el integrado 1, (este es un arreglo de 4 amplificadores operacionales) y señalar la posición del amplificador operacional 3, auxiliarse para esto de las copias de tarjetas de conexiones y de circuitos impresos, Karte 29/5. Dicho integrado se ubica en la posición mostrada en la tarjeta impresa Karte 29/5.
3. Alambrear, en los puntos de entrada y salida del integrador tal como se muestra en la fig. 4.2.
4. Aplicar el método de respuesta al escalón.
5. Determinar la constante de tiempo teórica del integrador dado por:  $(C4 * R27)$ .
6. Comparar el valor obtenido experimentalmente, literal 4, con el teórico, literal 5, en caso de absorber un error apreciable, se recomienda repetir la prueba.

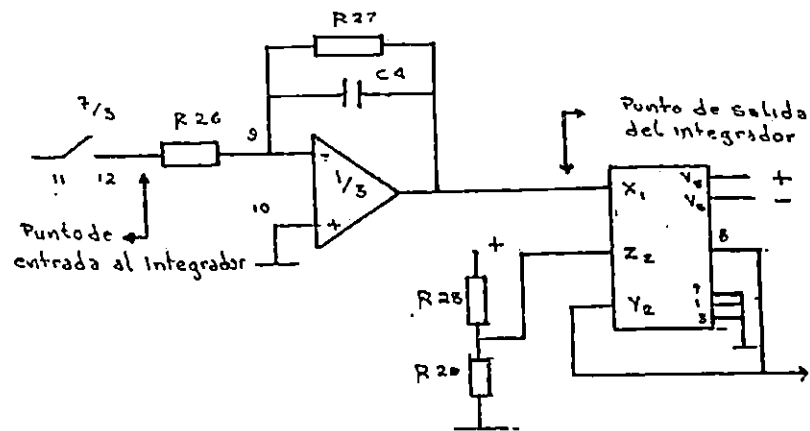


Figura 4.2. Ubicación de los puntos de entrada y salida del integrador de la tarjeta (6).

#### 4.2. DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE TIEMPO Y LA GANANCIA DEL BLOQUE DERIVADOR: ( $t_d$ y $K_B$ ).

1. Son los mismos procedimientos utilizados en la determinación de  $t_f$  y  $K$ , en el bloque integrador.
2. Ubicar la referencia derivadora, formada por el amplificador operacional 3/3 y los componentes R41, R42 y C14, auxiliarse para esto de las copias de tarjetas de

conexiones y de circuitos impresos, Karte 29/5. Dicho arreglo se ubica en la posición mostrada en la tarjeta impresa.

3. A. Verificar el estado de las alimentaciones y tierras del integrado 5.  
B. Alamberrar, a través de conectores o utilizando soldadura, los puntos de entrada y salida del bloque derivador, tal como se muestra en la fig. 4.3.
4. Aplicar el método de respuesta en escalón, el punto de entrada de las señales de prueba será el punto A12 y el lugar de salida, el punto B19 (MS2/22).
5. Determinar la constante de tiempo teórica del derivador dado por  $t_1 = (C14 * R42)$ .
6. Comparar el valor obtenido experimentalmente, literal 4, con el teórico, literal 5, en caso de observar un error apreciable se recomienda repetir la prueba.

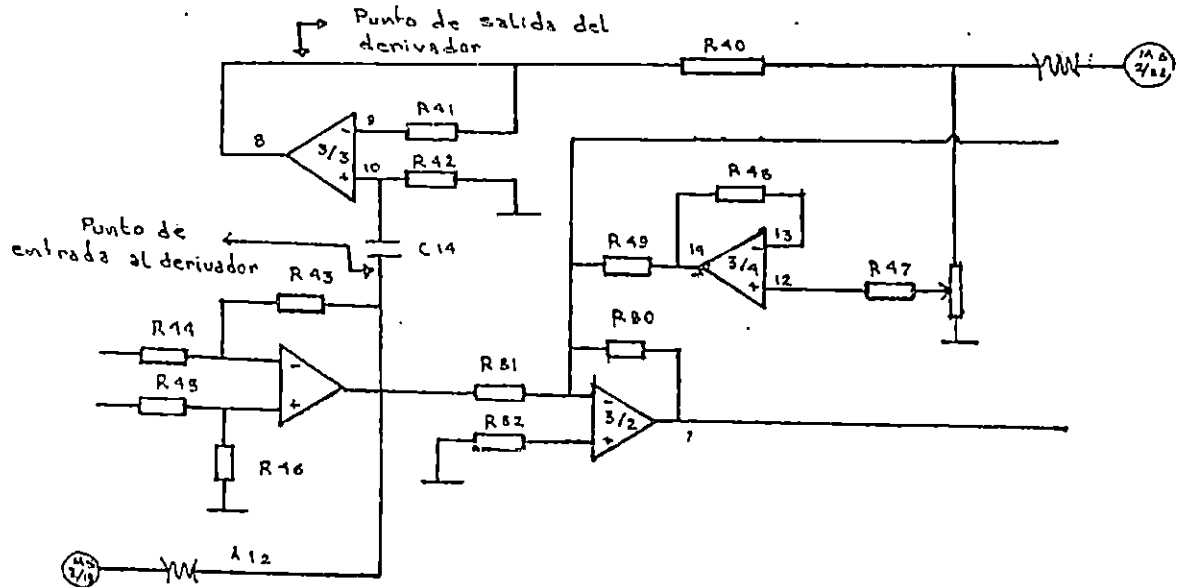


Figura 4.3. Ubicación de los puntos de prueba de entrada y salida del bloque derivador.

#### 4.3. DETERMINACION DE LA GANANCIA DEL BLOQUE AMPLIFICADOR ELECTRIC (K2).

1. Determinar en le panel de control la tarjeta 5, amplificador eléctrico, revisar sus conexiones.

2. Ubicar el integrado 5. (arreglo de 4 Amp. Op) y señalar la posición del amp. Op. 5/1, auxiliares para esto las copias de tarjetas de conexiones y circuitos impresos, Karte 25/4 y 25/5 respectivamente.
3. Aplicar un nivel de tensión de 1 vol DC  $V_i$  a la entrada B6, y sensar la salida  $V_o$  en el punto MS 1/15 de la tarjeta 2, ver fig. 4.4.
4. Determinar la ganancia eléctrica dado por:  $K_2 = V_o/V_i$ .

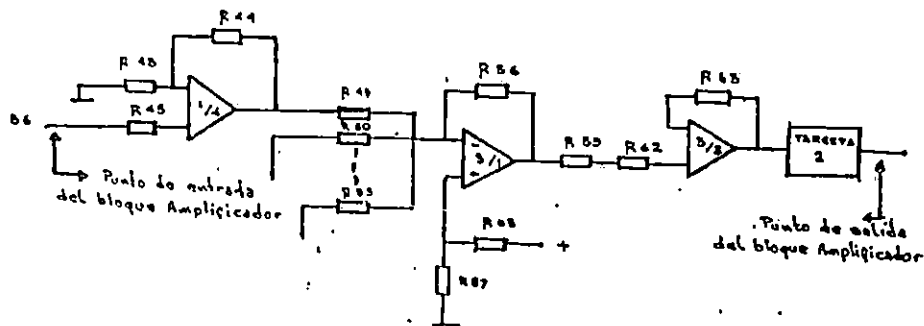


Figura 4.4. Puntos de prueba de entrada y salida para el bloque amplificador.

#### 4.4. DETERMINACION DE LAS GANANCIAS Y CONSTANTES DE TIEMPO DE LA BOBINA MOVIL ( $K_3$ , $T_t$ ) Y LA SERVOVALVULA Y EL SERVOMOTOR ( $k_4$ , $t_v$ y $t_s$ ).

Para la realización de esta prueba se descompone el bloque de amplificación hidráulica en dos secciones, la válvula piloto y el servomotor, que constituyen, junto al herrillaje de retroalimentación, la parte mecánica del control de velocidad, (sección de alta potencia), a continuación se presenta un cuadro que muestra cada uno de estos bloques, sus tipos de señales entrada-salida, y el tipo de transductor a utilizar.

Tabla 4.1. Bloques de la amplificación hidráulica.

FUNCION DE TRASF.	BLOQUE	TIPO DE SENAL		TRANSDUTOR.	CTE. A DETER.
		ENTRADA	SALIDA		
$G3 = \frac{K3}{1+STt}$	bobina movil	eléct. voltaje	desplz mec.	posición-voltaje	K3 y Tt
$Gt = \frac{K4}{1+STv}$	válvula piloto	desplz. mec.	presión de aceite	presión-voltaje	K4 y Tv
$G4 = \frac{1}{STs}$	servomotor	presión de aceite	desplz. mec.	posición-voltaje	Ts
$G6 = K5$	sensor de posición	desplz. mec.	eléct. voltaje	posición-voltaje	K5

#### 4.4.1. ALGORITMO.

1. Determinar en el panel de control la tarjeta 2 que forma el amplificador de salida, que alimenta la bobina movil, y por tanto la sección mecánica del sistema.
2. Instalar los transductores correspondientes, señalados en la tabla I, alambrarlos tal como se muestra en el arreglo de bloques de la fig. 4.5.

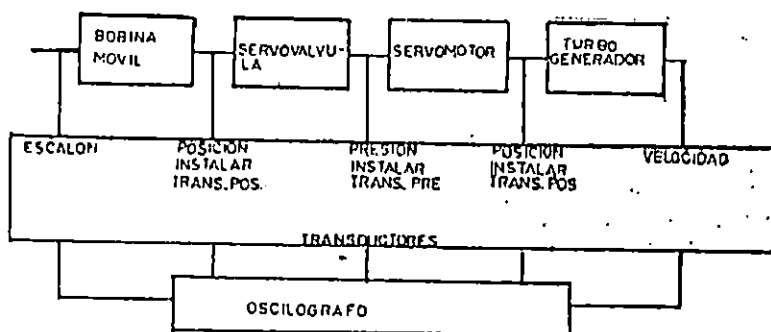


Figura 4.5. Circuito de prueba.



3. Introducir un escalón en el punto de entrada A5 del amplificador de salida (tarjeta 2) para la servoválvula, el punto común es B6.
4. Registrar la salida de esta tarjeta; punto A17 y común B6, esta es la señal de entrada a la bobina móvil, Vi.
5. Detectar y registrar el desplazamiento del vástago de la bobina móvil, utilizando para esto el transductor de posición. Registrar adecuadamente la presión de salida de la válvula piloto y el desplazamiento de la barrilla de retroalimentación, entre el servomotor y el sensor de posición, utilizando para ello sensores de presión y posición respectivamente.
6. Ver la posibilidad de detectar la velocidad de la turbina utilizando para ello el transductor de velocidad, montado en la tarjeta 6.
7. Con los datos obtenidos de los literales 5 y 6 determinar las ganancias y constantes de tiempo de cada bloque, utilizando técnicas de control automático.

#### 4.5. DETERMINACION DE LA GANANCIA DEL SENSOR DE POSICION (Ks).

1. Determinar en el panel de control la tarjeta 5, control de error de velocidad y revisar sus conexiones.
2. Instalar un transductor de posición sobre el barillaje de retroalimentación.
3. Introducir un pulso en el punto de entrada A5 de la tarjeta 2, amplificador de salida.
4. Registrar el desplazamiento del brazo del servomotor utilizando el transductor de posición, la señal eléctrica del transductor puede ser guardada en la memoria de un osciloscopio, para, que posteriormente, sea analizado el desplazamiento del servomotor.
5. Registrar el nivel de corriente, de salida, del transductor de movimiento, de capacitor variable, incluido en el mecanismo de control de la máquina, esta corriente puede medirse en el punto 32 de la tarjeta 5 (control de error de velocidad).
6. Con los datos obtenidos en los literales 5 y 4 determinar la ganancia del sensor de posición.

4.6. PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA PARA DETERMINAR EL ESTADISTMO PERMANENTE ( $\sigma$ ) Y LA CONSTANTE DE INERCIA (H).

1. Poner la unidad en sincronismo al sistema, con la carga de rechazo de carga, y el limitador de carga al 100% ajustar la potencia reactiva a 0 MVars/
2. Cancelar la referencia de velocidad nominal, para que la unidad después del rechazo de carga quede con su velocidad de estatismo.
3. Verificar el ajuste del estatismo, y las condiciones previas al rechazo.
4. Coordinar con las demás centrales y con la unidad de despacho de carga antes y durante el desarrollo de la prueba.
5. El rechazo de carga se deberá hacer con un 25% de la carga nominal de la máquina.
6. El rechazo de carga se efectuará abriendo el interruptor de máquina verificar que los auxiliares de la máquina no estén conectados a la misma.
7. Colocar un convertidor frecuencia-voltaje en el punto A17 (m5/2/11) de la tarjeta 6, para registrar la salida y a la vez graficar su señal a través de un registrador gráfico (plooter) ó bien un oscilógrafo.
8. Registrar los valores de velocidad ocurrido, antes, durante y final del rechazo de carga, con el objeto de apoyar la instrumentación instalada en la sala de turbina.
9. Con la gráfica obtenida del literal (7), hacer una gráfica de la velocidad de la turbina contra el tiempo, tal como se muestra en la fig. 4.6.
10. Para encontrar el estatismo permanente ( $\sigma$ ) y la constante de inercia (H) se utiliza el gráfico del literal (9) y las ecuaciones siguientes:

$$H = 60/2\alpha_i * P_r/P_n \quad (4.1)$$

$$\sigma = \Delta F/F_n * P_n/P_r * 100 \% \quad (4.2)$$

donde:

- $P_n$  = potencia rechazada MW.
- $P_n$  = potencia nominal MW.
- $\Delta F$  = frecuencia inicial - frecuencia final Hz.
- $F_n$  = frecuencia nominal Hz.
- $\alpha_i$  = Aceleración inicial del turbo grupo Hz/seg.  
Este se determina a partir del cálculo de la pendiente  $m$  de la recta tangente de la gráfica obtenida del literal (9).

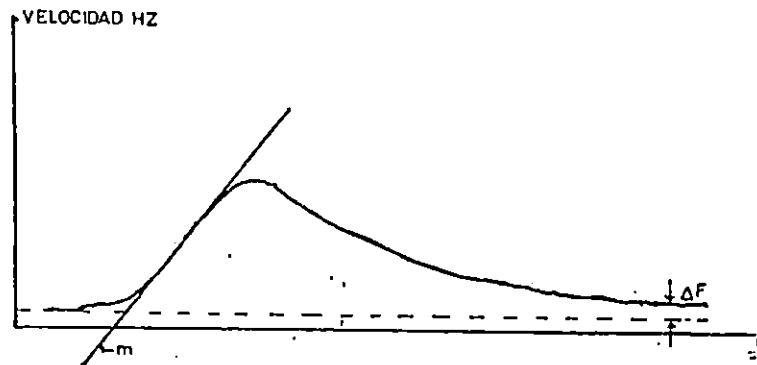


Figura 4.6. Gráfica frecuencia-tiempo, típica de un rechazo de carga.

4.7. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LAS CONSTANTES DE TIEMPO DEL AGUA ( $T_w$ ), DASHPOT ( $T_N$ ), EL ESTATISMO TRANSITORIO ( $S$ ) E INERCIA DE LA UNIDAD ( $H$ ).

1. Verificar la inercia de la unidad, determinada en el literal 10 de la prueba de rechazo de carga.
2. Determinar diferentes caudales, para diferentes potencias activas producidas y a diferentes caídas de agua, de acuerdo a la ecuación:

$$0 = 2.532 - \frac{(172.8 - (15820/H_n))}{H_n} - \frac{(1.837 - \frac{(230 - 2319/H_n)}{H_n}) P}{H_n} + \frac{(0.08246 - \frac{(4.809 - 71.72/H_n)}{H_n}) P^2}{H_n} \quad (4.3)$$

donde:

Q = caudal en m<sup>3</sup>/seg.  
P = potencia activa MW.  
Hn = caída de agua.

El rango de altura H, varía entre un máximo de 32 y un mínimo de 13 mts., tal como se muestra en la figura .

Se entiende por caída de agua, la diferencia de alturas entre la superficie del embalse y el nivel de agua abajo.

3. Determinar los caudales máximos y mínimos que nos permitan operar dentro de los límites de cavitación, estos caudales se determinan a través de las ecuaciones:

Límite máximo de cavitación:

$$Q = 182 + (4.95) P - (0.033) P^2 \quad (4.5)$$

Límite mínimo de cavitación:

$$Q = 149 - (1.48) P + (0.031) P^2 \quad (4.6)$$

4. Hacer una gráfica caudal contra potencia activa, utilizando los datos encontrados en el literal 2.
5. Sobreponer sobre la gráfica del literal 4 los límites máximos y mínimos de cavitación, obtenidos en el literal 3, con esto se generará una gráfica como la mostrada en la figura (h).
6. Para distintos caudales y para diferentes potencias generadas o columnas de agua, que se ubiquen dentro del área de trabajo de la curva Q-P de la figura 1 (ver anexo D) y utilizando las ecuaciones siguientes, encontrar la constante de tiempo del agua; DASHPOT y el estatismo transitorio.

$$TW = Q.L / Hn.gA \quad (4.6)$$

$$TN = 5TW \quad (4.7)$$

$$s = 2.5 TW / 2H \quad (4.8)$$

donde:

Q = caudal  $\text{m}^3/\text{seg}$ .  
P = potencia activa MW.  
H = caída de altura.  
 $\xi$  = estatismo transitorio.  
L = longitud de tubería.  
Hn= altura neta.  
g = gravedad.

7. Hacer una tabla de datos que contenga potencia activa, caída de agua, caudal, constantes de tiempo del agua, DASHPOT y estatismo transitorio.

#### 4.8. METODOS DE ANALISIS DE RESPUESTA.

##### 4.8.1. PROCEDIMIENTO DE RESPUESTA AL ESCALON:

1. Revisar previamente el diagrama electrónico del EHC, localizar los puntos de prueba.
2. Reunir todo el equipo requerido.
3. Preparar el cableado de interconexión entre los módulos y el equipo de pruebas.
4. Separar la interacción entre los diferentes módulos del EHC. lazo abierto.
5. Para los bloques integrador y derivador, es recomendable trabajar con la tarjeta 6, aislada del sistema, ya que las respuestas eléctricas de estos bloques, pondrían a trabajar las protecciones del sistema mecánico.
6. Para el resto de bloques, asegurarse que la máquina se encuentra en vacío y a velocidad nominal.
7. Aplicar una señal de escalón de aproximadamente 1 volt. al punto B5 de la tarjeta 5.
8. Graficar la señal de salida de cada uno de los bloques y determinar las constantes de tiempo correspondiente, para esto se grafican las señales de desplazamiento de la bobina móvil, la válvula piloto y el servomotor, utilizando transductores de desplazamiento a voltaje o corriente.

#### 4.8.2. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE LA RESPUESTA A LA FRECUENCIA.

1. Definir la separación del circuito de prueba con los demás circuitos del regulador de velocidad.
2. Reunir el equipo necesario para la prueba.
3. Aplicar una señal senoidal de amplitud constante, variando un rango de frecuencia adecuada, tomando como base la frecuencia de corte y tabular los valores de amplitud y fase para cada valor de frecuencia.
4. De la tabla obtenida del literal (3) graficar en papel semilogarítmico la ganancia (relación de Amplitud de señal de entrada) contra frecuencia y el ángulo de fase (diferencia de ángulo entre salida y entrada) contra frecuencia.  
De la gráfica ganancia contra frecuencia se encuentra la función de transferencia.
5. Una vez encontrada la función de transferencia del literal (4) se gráfica la curva de ángulo de fase (teórica) contra frecuencia para compararla con la curva de ángulo de fase experimental.
6. Si la curva de ángulo de fase teórica coincide con la curva de ángulo de fase experimental, es un sistema de fase mínima. Pero en caso contrario no coincide las dos curvas, entonces es un sistema de fase no mínima, y se va a suponer que la función de transferencia calculada en el literal (7) es de la forma  $G(s) = e^{-Ts}$ , donde T es el retardo de transporte y se calcula de la siguiente manera:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d}{d\omega} \frac{G(j\omega) e^{-j\omega T}}{\omega} = -T \quad (4.9)$$

#### 4.9. EQUIPO UTILIZADO:

Para la debida realización de las pruebas descritas en las secciones anteriores el equipo que se recomienda utilizar es el siguiente.

1. Oscilógrafo.
1. Fuente de calibración.
1. Fuente de cc de  $\pm 15$  V
1. Transductor de presión de 10 Kg/CM<sup>2</sup>
1. Fuente acondicionadora de señal de presión.
1. Transductor de posición.
6. Multímetros digitales.

Además se contara con cable coaxial blindado para envío de señales, pines de conexión, balanza de pesos muertos, y demás accesorios.

#### 4.10. CONCLUSIONES.

- La respuesta de las secciones : integradora, derivadora y amplificadora, se aproximan en mayor o menor grado a los valores teóricos obtenidos, dependiendo de la precisión de los componentes eléctricos utilizados en las tarjetas.
- La respuesta de las secciones hidráulicas del sistema dependerá en gran forma de la calibración del equipo y de la calidad de los transductores utilizados.
- La prueba de rechazo de carga, nos permiten determinar en forma simple, la constante de tiempo del agua,  $t_w$ , dicho parámetro también puede obtenerse en forma teórica utilizando datos de caudal y potencia generada, se espera que dichos valores sean iguales y de haber una diferencia, se espera que esta no sea significativa.
- El método de respuesta en escalón es el más conveniente a utilizar, pues además de su simplicidad solo implica la utilización de un generador de escalones un graficador de amplitud, contra tiempo y el juego de transductores, correspondientes.
- Algunos de los puntos de aplicación de señales de entrada pudieran variar, dependiendo de los criterios del personal que diseñe la prueba sin embargo se considera que los puntos expuestos en esta sección, nos permiten una forma de acceso directo a los bloques probados.
- La utilización de conectores en los puntos de las tarjetas las cuales no se tenga acceso directo.

- La realización de las pruebas eléctricas pueden realizarse en tarjetas de respuesta.
- Las pruebas se deben realizar durante el período en el cual se les da mantenimiento a las máquinas.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] A. VASQUEZ, A. SAUNDERS, "PRUEBAS PARA LA DETERMINACION EXPERIMENTAL DE PARAMETROS DE REGULADORES DE VELOCIDAD Y VALIDACION DEL MODELO DE REGULACION", LAPEM, México, 1991.
- [2] MANUALES BBC, "MANUAL VOITH EHR", 1981.
- [3] J.M. VOITH GMBH, "GOVERNOR-ACCEPTANCE TEST C.H. SAN LORENZO", 1981.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.

- La actualización de los parámetros de los gobernadores de velocidad de las centrales generadoras del país, es necesario para evitar problemas futuros, cuando se realiza la interconexión eléctrica centroamericana.
- Hasta el momento los estudios de estabilidad, si es que se han realizado, no han recibido la atención que realmente ameritan.
- La central Hidroeléctrica 15 de Septiembre, es capaz de generar 160 MVA, con sus dos unidades generadoras trabajando a plena carga.
- El sistema de regulación de velocidad de las unidades generadoras de la C.H. 15 de Septiembre esta constituida por unidades EHR 78 de fabricación alemana.
- La interfase entre la sección eléctrica, del EHR 78 y la mecánica hidráulica, lo constituye una bobina móvil, cuyo desplazamiento es amplificado por una serie de pistones o válvulas piloto, que actúan sobre el servomotor.
- La retroalimentación en el diagrama de bloques del EHR 78 es provisto físicamente, por una serie de barrillajes que actúan sobre un capacitor eléctrico de retroalimentación.
- Las señales de control producidas por el gobernador de velocidad, actúan modificando la posición de las paletas tanto del distribuidor como del rodete de la turbina (turbina Pelton).

# ANEXOS

ANEXO A

RECOMENDACIONES PRACTICAS DE LA IEEE  
PARA ESPECIFICACION DE EQUIPOS PARA  
EL MANEJO DE GOBERNADORES DE  
VELOCIDAD Y TURBINAS HIDRAULICAS.

## ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO.

Todos los términos y definiciones utilizados están en concordancia con lo descrito en la sección de especificaciones.

## CONSTRUCCION Y OPERACION.

El constructor del gobernador debería cooperar en lo más posible con el constructor de la turbina y el generador con miras a la compra y equipamiento que permita un funcionamiento capaz de regular la velocidad y la carga de la turbina.

## EQUIPO DE GOBERNACION.

El gobernador debe de equipar bajo especificaciones que deberían sensar la velocidad de rotación de la turbina que genere una señal proporcional a la diferencia entre la velocidad de la turbina y la velocidad de referencia del gobernador y desde allí desarrolle una señal hidráulica de control, con suficiente poder regular el control hidráulico del servomotor principal de la turbina de acuerdo con los requerimientos especificados. El control del gobernador debe actuar en un rango de operación adecuado al control del servomotor de la turbina en el mínimo tiempo especificado por el comprador, de acuerdo a dentro de la caída de presión en la tubería externa del actuador. El gobernador deberá incluir los elementos que sensan la velocidad y el control gobernador del actuador, la fuente del sistema de presión hidráulico y todas las partes y accesorios requeridos para el control de velocidad y carga, o ambos en la unidad generadora aplicada (muchas veces se usa un mecanismo que se describe en la práctica y únicamente es aplicable a instalaciones particulares, las cuales se incluyen en las especificaciones del gobernador, el control principal del servomotor puede ser suplido por el constructor).

## CONSTRUCCION DEL GABINETE DEL GOBERNADOR.

El control del actuador del gobernador y los accesorios relacionados deberán alojarse en una cabina revestida de acero, tal que provea protección física a los componentes (las especificaciones pueden incluir requerimientos relacionados con la cabina, tales como número, cableado de acero, tierras). En los gobernadores electrohidráulicos los mecanismos eléctricos deben montarse en alojamientos separados del gabinete del gobernador o se montan insertados en el panel o alejados de la cabina del gobernador.

ANEXO B  
RESULTADOS

## PRESENTACION DE RESULTADOS.

La aplicación de la prueba de escalón, a los diferentes arreglos que constituyen los bloques del modelo matemático de la C.H. 15 de Septiembre nos permiten obtener información, a través de la cual es posible obtener las ganancias y constantes de tiempo que modelan cada bloque. A continuación se presentan los resultados esperados de cada una de las pruebas expuestas en el capítulo cuatro, para la determinación de ganancias y constantes de tiempo.

### RESULTADOS TEORICOS DE LAS PRUEBAS AL BLOQUE INTEGRADOR.

Del análisis eléctrico del circuito integrador mostrado en la fig. 1, se obtiene una función de transferencia dada por:

$$Gf = -(R_{27}/R_{26}) [1/(1 + R_{27}C_4s)]$$

$$Gf = K_1/(1+T_f s)$$

Donde:

$$K_1 = - R_{27}/R_{26}, \quad T_f = R_{27}C_4$$

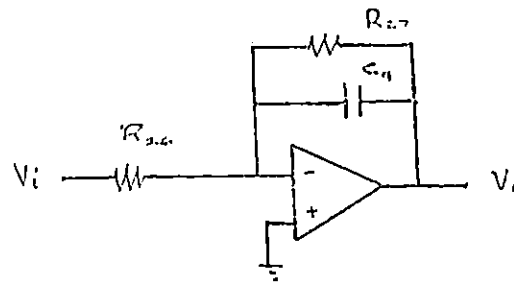


Figura 1. Circuito integrador.

Al aplicar la prueba al escalón se obtendrá una respuesta semejante a la de la figura 2.

Ya que  $R_{26} = R_{22} = 200 \text{ K}\Omega$  de donde  $K_1$  es unitaria.  
 $C_4 = 0.68 \mu\text{f}$

$$\begin{aligned} T_f &= C_4 R_{27} \\ &= (0.68)(200) \\ &= 0.136 \text{ seg.} \end{aligned}$$

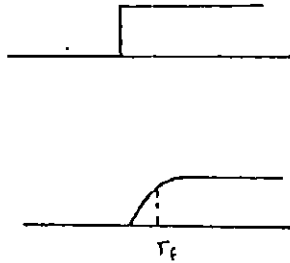
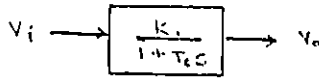


Figura 2. Respuesta de la prueba escalón.

RESULTADOS TEORICOS DE LAS PRUEBAS AL BLOQUE DERIVADOR.

Del análisis eléctrico del circuito integrador mostrado en la fig. 3, se obtiene una función de transferencia dada por:

$$G_d = \frac{R_4 2C_1 4S}{1 + R_4 2C_1 4S}$$

$$G_d = \frac{K_8 T_d S}{1 + T_d S}$$

donde  $K_8 = 1$  ;  $T_d = R_4 2C_1 4$

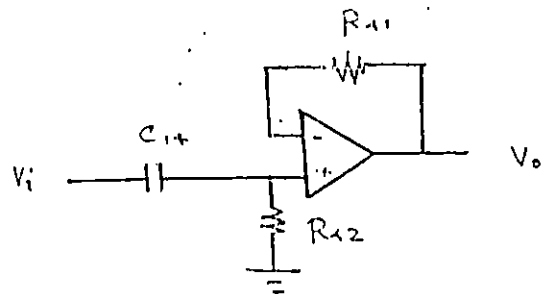


Figura 3. Circuito derivador.



Al aplicar la prueba del escalón se obtendrá una respuesta semejante a la de la figura 4.

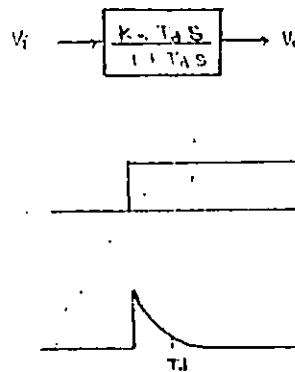


Figura 4. Respuesta al escalón.

donde  $R42 = 100K\Omega$

$C14 = 6.8 \mu F$

$Td = R42 * C14 = (100)(6.8) = 0.68 \text{ seg.}$

**RESULTADOS TEORICOS DE LAS RESPUESTAS DE LOS BLOQUES DE LA BOBINA MOVIL, LA VALVULA PILOTO Y EL SERVOMOTOR.**

El análisis utilizado para determinar la respuesta del bloque integrador es el mismo que el utilizado en las secciones de bobina móvil, válvula piloto, y servomotor ya que dichos bloques responden a la señal escalón en la misma forma, pues sus funciones de transferencia son semejantes a los del bloque integrador, sin embargo en los tres casos, las señales de salida no son eléctricas (en la bobina móvil y la servoválvula, las salidas son desplazamientos mecánicos y en el servomotor, variaciones de presión). Por lo tanto es necesario utilizar transductores a la salida de los 3 bloques, para obtener respuestas eléctricas, que puedan ser graficadas y analizadas por medio de las técnicas de control automático, para sistemas de primer orden.

## RESULTADOS TEORICOS DE LAS RESPUESTAS DE LOS BLOQUES, AMPLIFICADOR ELECTRICO Y SENSOR DE POSICION.

Para ambos bloques, las funciones de transferencia están dadas por constantes de tal forma que sus ganancias se obtendrán directamente de la diferencia entre la señal de salida y la señal de entrada de tal forma que

$$K_2 = V_{o2}/V_{i2}$$

y

$$K_5 = V_{o5}/S_5$$

donde:

$V_{o2}$  = tensión de salida del bloque amplificador.

$V_{i2}$  = tensión de entrada .

$i_5$  = corriente de salida del sensor de posición.

$S_5$  = desplazamiento del varillaje de retroalimentación del control de velocidad.

A continuación se presenta un listado de las ganancias y constantes de tiempo proporcionadas por el fabricante.

W	=	rango de ajuste.	-10 a +10	
w	=	puntos de ajuste: velocidad (frecuencia).	105.9, 60Hz,	K2 K3 K4=K
x	=	valores actuales: velocidad (frecuencia), nivel de agua y salida.	49M92.4MW (TURBINA) Hn=30.	K5 K7/k1=bp
h	=	carerera de la bobina móvil.	5.4MM-4.8MM	K5 K6/K1=bf
s	=	carrera del servomotor principal.	CIERR-APERT 751.5 MM	
u	=	voltajes.	MAXIMO: =19v	$\frac{1}{K1} = bb$
G1-G8	=	ecuación respuesta en frecuencia de bloques individuales.		
K1-K2	=	factor de amplificación de los bloques individuales.		
bb	=	caída de velocidad de medición de frec.	0.3% A 0.5%	
bp	=	caída de velocidad permanente.	5%	
bt	=	caída de velocidad temporal.	84%, POS.70	
TF	=	constante de tiempo de medición de frec.	20 ms	
Tt	=	constante de tiempo de amplificador de bobina móvil.	2.3 S Y 2.5	
Tv	=	constante de tiempo de válvula de control	CIERR.APERT. 2.3 A 4.4 S	
Tn	=	constante de tiempo de dispositivo amortiguador.	0.5 A 20 S	
Td	=	constantes de tiempo de componente diferencial.	1 S	
Ts	=	constante de tiempo de válvula de control y servomotor.	12 S	
W	=	frecuencia del circuito.	60 Hz	

ANEXO C  
TRANSDUCTORES

## TRANSDUCTORES

Un transductor es un elemento que acondiciono una señal de un tipo a otro. Para poder sensar y graficar las señales de estudio durante el desarrollo de las pruebas de determinación de parámetros, es necesario el uso de estos transductores, para sensar la señal de frecuencia es necesario un convertidor F/V, durante la prueba de rechazo de carga y para sensar los desplazamientos de los brazos de los servomotores y las barrillas de retroalimentación es necesario transductor de desplazamiento/voltaje. En este apéndice se presentan algunos de los componentes o arreglos de estos, como propuestas de transductores aplicables a las necesidades impuestas por el estudio, acordes a las limitaciones del medio.

## CONSIDERACIONES DE LA FUENTE DE POTENCIA.

La relación de rechazo de la fuente es de 0.02% de FSR\*\* para mantener el  $\pm 0.02\%$  de conversión, las fuentes de potencia con  $\pm 1\%$  de estabilidad son recomendados.

Estas fuentes deben ser acopladas con capacitores de 0.01  $\mu\text{F}$  componentes adicionales de R3, R4 y R5 anulan el voltaje de offset del amplificador de entrada. Esta debe tener una serie de resistencias entre 10 K $\Omega$  y 100 K $\Omega$  y un coeficiente de temperatura de menos de 100 RPM/ $^{\circ}\text{C}$ , R4 debe tener una tolerancia de 20% y un valor de 10 M $\Omega$ , R3 anula los errores de ganancia del convertidor y compensa las tolerancias de R1 y Ct, su resistencia debe ser por lo menos 20% de Rt, si R1 es seleccionado 10% abajo (ver ecuación de R1), su coeficiente de temperatura no debe exceder 5 veces el valor de R1 para mantener baja la combinación serie de R3 y R1.

## AJUSTE DE OFFSET Y GANANCIA.

- 1- Aplique un voltaje de entrada que produzca una frecuencia de 0.001 x plena escala.
- 2- Ajuste R5 para una salida apropiada.
- 3- Aplique un voltio de entrada de plena escala.
- 4- Ajuste R5 para la salida apropiada.
- 5- Repita pasos de 1 - 4.

A continuación se presentan una serie de datos técnicos.

El VFC, convertidor

## CONVERTIDOR DE VOLTAJE A FRECUENCIA FRECUENCIA/VOLTAJE.

El VFC, convertidor monolítico, provee un método simple y de bajo costo para convertir señales analógicas en pulsos digitales, la salida digital es de tipo colector abierto, es decir el transistor de salida se satura y se pone a cero voltios, o se corta y se pone al valor de la fuente de alimentación. La relación de repetición del tren de pulsos es proporcional a la amplitud del voltaje analógico de entrada, los pulsos de salida son compatibles con TTL, DTL y CMOS. El convertidor requiere 4 componentes: 2 resistencias y 2 capacitancias.

El VFC 32 como convertidor F/V.

Para operar el VFC 32 como convertidor F/V, debe conectarse la unidad como se muestra en la figura (9) de la pág. 6-373 del instrucciones de instalación y operación, para la interfase con lógica TTL, la entrada al pin 10 también, para rizada de cerca de más de 2.5 volts, el convertidor detecta los bordes de caída del tren de pulsos de entrada, como el voltaje en el PIN 10, cruzando cero (0), escoger C3 para hacer que  $t < 0.1 t_p$ , siendo  $t_p$  la frecuencia del pulso, para señales de entrada con amplitudes menores que 5 voltios. El Pin 10 debe ser polarizado con un valor cercano a cero para asegurarse que la señal de entrada en el PIN 10 cruce el umbral.

Los errores son anulados usando el 0.001 por la escala completa de frecuencia para anular el offset, y frecuencia en escala completa para anular el error de ganancia. La verificación entre el voltaje analógico de salida y el tren de pulsos de entrada esta dado por:

$$V_o = 7.5 R_1 C_1 F_{in}$$

donde

$V_o$  = voltaje de salida

$F_{in}$  = frecuencia de entrada

$$C_1(\text{PF}) = (33 \times 10^6) / f_{\text{máx}} - 30$$

$$R_1(\text{k}\Omega) = (90\% - \% \text{ tolerancia } C_1) \times \frac{V_i \text{ máx}}{0.25 \text{ mA}}$$

$$R_3(\text{k}\Omega) = \frac{V_i \text{ máx}}{0.25 \text{ mA}} - R_1$$

$C_2 = 10^{-2} f_{\text{máx}}$  arriba de 100 KHz y 0.001  $\mu\text{F}$  abajo.

## POTENCIOMETROS

El potenciómetro es el transductor eléctrico más común. Los potenciómetros pueden utilizarse solos, o pueden unirse a un sensor mecánico en una variación eléctrica. Desde el punto de vista de concepción un potenciómetro es bastante simple. Está formado por un elemento resistivo y un contacto móvil que puede posicionarse en cualquier punto a lo largo del elemento resistivo. Este contacto móvil se denomina de varias maneras, incluyendo toma, contacto, y deslizador. Usaremos indistintamente los tres términos.

La figura B1, muestra dos representaciones esquemáticas de un potenciómetro. En la fig. B1a, el elemento resistivo se ha dibujado en forma circular; esta representación hace referencia a la construcción física de la mayoría de los potenciómetros, en los cuales el elemento resistivo realmente es circular y barre un ángulo del orden de 300°. Entonces la posición del contacto es circular y barre un ángulo del orden de 300°. Entonces el eje al cual se encuentra unido. El eje puede girarse con el mango o con un destornillador dependiendo de si tiene una perilla o una ranura de tornillo en su extremo.

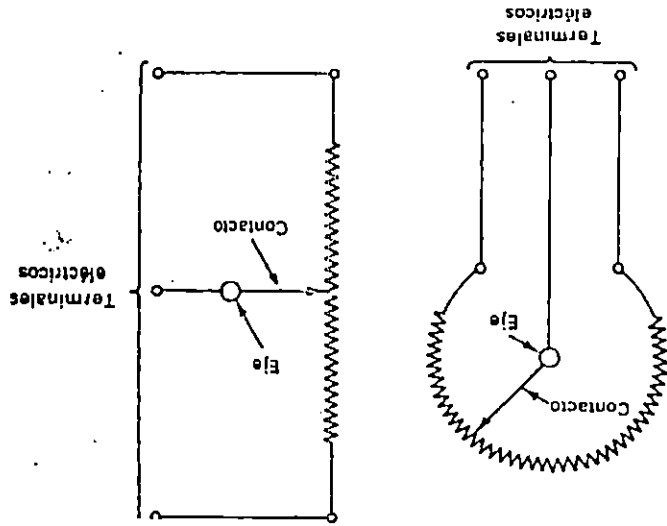


Figura B1. a) Símbolos esquemáticos de potenciómetros a) Símbolo circular el cual hace referencia a la apariencia física de los pot. b) símbolo rectilíneo.



La representación esquemática más popular es la mostrada en la fig. B1b. Es la más fácil de dibujar.

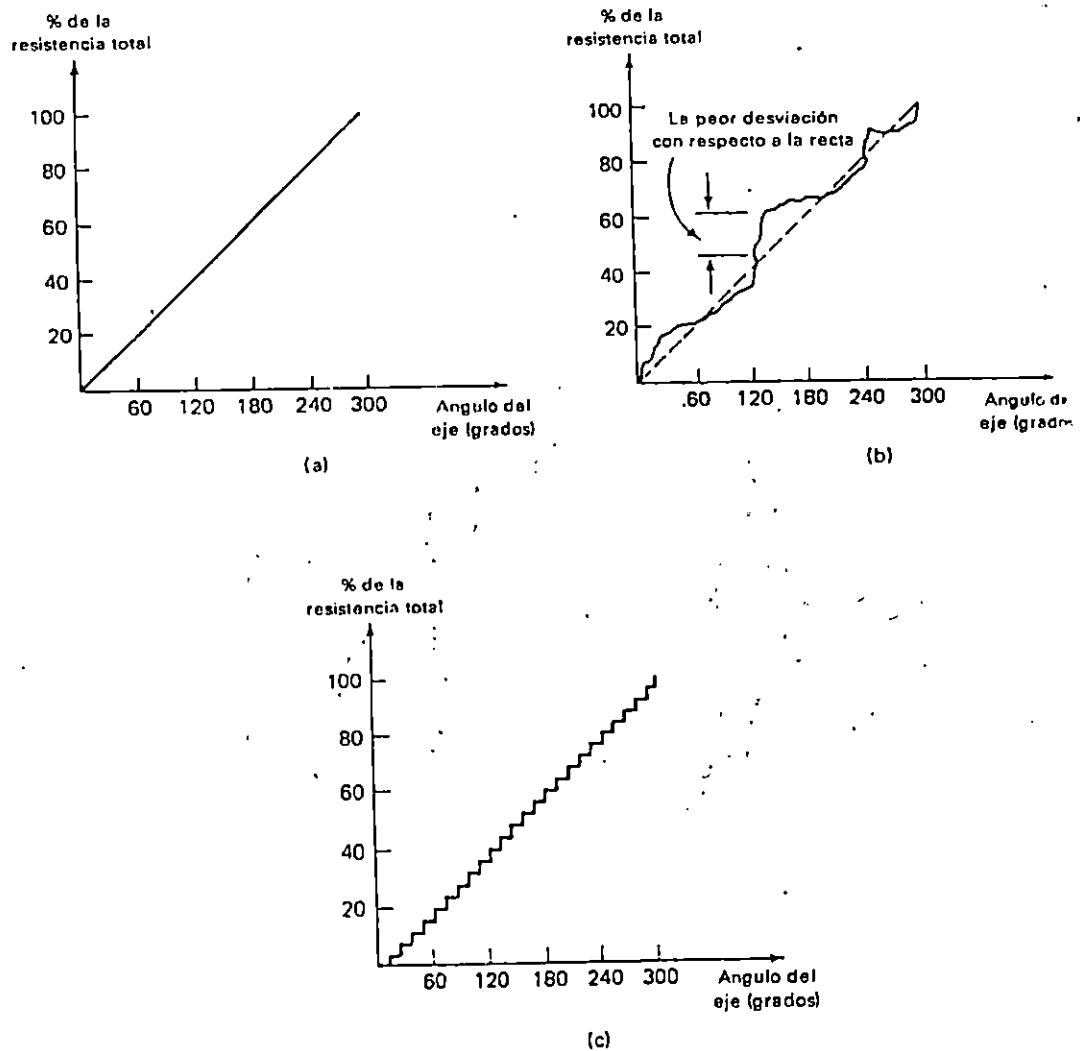


Figura B2. Gráficas de resistencia versus ángulo del eje para un potenciómetro a) perfectamente lineal; b) real, con la resistencia desviándose de la línea recta; c) contacto a pasos o variación no continua de la resistencia.

#### Linealidad de un potenciómetro.

La gran mayoría de los potenciómetros lineales. El término lineal significa que un movimiento mecánico dado el contacto produce un cambio dado en la resistencia, sin importar dónde se encuentre el contacto. En otras palabras, la resistencia del elemento está igualmente distribuida a lo largo de la longitud de éste. El grado preciso de linealidad

de un potenciómetro es muy importante en algunas aplicaciones. Por tanto los fabricantes especifican un porcentaje de linealidad en los potenciómetros que fabrican. El significado de porcentaje de linealidad; o simplemente linealidad, puede entenderse refiriéndose a la figura B2.

La fig. B2a, muestra una gráfica de resistencia versus ángulo de eje para un potenciómetro perfectamente lineal. La resistencia marcada en el eje vertical puede considerarse como la resistencia entre el contacto y uno de los terminales laterales de la fig. B1. El ángulo del eje dibujado en el eje horizontal es el ángulo a través del cual ha sido rotado, comenzando con cero grados como la posición en la cual el deslizador están en contacto directo con el terminal lateral. Como puede verse, un potenciómetro perfectamente lineal da una cierta cantidad de cambio en la resistencia para un número dado de grados de rotación del eje, sin importar en qué punto se encontraba el eje. Es decir, un movimiento del eje desde  $0^\circ$  hasta  $60^\circ$  produce un cambio de resistencia del 20% de la resistencia total; así mismo, un movimiento del eje desde  $180^\circ$  a  $240^\circ$ ,  $60^\circ$  de rotación, produce un cambio en la resistencia que va desde el 60% al 80% de la resistencia total, es decir un cambio del 20%.

Es, desde luego, imposible fabricar potenciómetros que tengan una linealidad perfecta. La situación real se muestra en la fig. B2b, en la cual la resistencia se desvía de la recta ideal. El punto de la peor desviación con respecto a la recta ideal determina el porcentaje de linealidad del potenciómetro. Por ejemplo, en la gráfica de la fig. B2b, en el peor punto, la resistencia real se desvía de la recta ideal en un 10%. Esto significa que la resistencia real difiere de la resistencia esperada en una cantidad que es el 10% de la resistencia total. Por tanto la linealidad de este potenciómetro es del 10%.

Cuando un fabricante especifica un 10% de linealidad para su potenciómetro, está garantizando que la resistencia se desviará de la línea recta de resistencia por no más del 10% de la resistencia total. De este modo, un potenciómetro de  $500 \Omega$  con una linealidad del 10% tendría una gráfica de de resistencia versus ángulo del eje en la cual la resistencia real se desvía de una línea recta ideal en no más de  $50 \Omega$ .

Mientras que un 10% de linealidad podría ser adecuado para la mayoría de las aplicaciones industriales de los potenciómetros, es casi seguro que no sería adecuado para una aplicación de medición. Generalmente, los potenciómetros, utilizados como transductores tienen linealidades menores que el 1% y en algunos casos tan bajas como el 0.1%. En un potenciómetro de  $500\Omega$  con un 0.1% de linealidad, la resistencia real se desviaría de la resistencia separada por la línea recta en no más de  $0.5\Omega$ .

### Resolución del potenciómetro.

Muchos potenciómetros son del tipo bobinado. En un potenciómetro bobinado, una cierta cantidad de cable delgado es enrollado alrededor de un núcleo aislante. Entonces el contacto se mueve de una vuelta de alambre a la próxima a medida que se ajusta el pot. El resultado es que la resistencia del contacto no varía de manera uniforme, sino que varía a pasos. Este fenómeno se muestra, bastante exagerado, en el fig.B2c.

El hecho importante aquí es que hay un límite en el cambio mínimo posible de resistencia. El cambio en resistencia más pequeño posible es igual a la resistencia de una vuelta de alambre (para un contacto que no hace puente entre vueltas). Por ejemplo, un pot bobinado de  $500\Omega$  que tenga 200 vueltas tendrá una resistencia por vuelta de  $500\Omega/200 = 2.5\Omega$ . El más pequeño ajuste posible del potenciómetro movería el contacto de una vuelta a la inmediatamente siguiente, de modo que el cambio en resistencia más pequeño posible sería de  $2.5\Omega$ . Este cambio más pequeño posible en la resistencia determina la resolución del potenciómetro.

La resolución de un potenciómetro puede considerarse como la mínima variación posible de resistencia, expresada como un porcentaje de la resistencia total. Para el potenciómetro descrito en el párrafo anterior, la resolución ser de  $2.5\Omega/500\Omega = 0.5\%$ .

Como regla general, los potenciómetros que inherentemente tienen buena resolución inherentemente tienen baja linealidad y viceversa. Desde luego, tomando precauciones especiales en el proceso de fabricación, es posible hacer potenciómetros que tengan buena resolución y buena linealidad. Los potenciómetros utilizados para efectos de medición son generalmente de este tipo. Tiene buena resolución, buena linealidad, y buenas características respecto al ambiente (la temperatura y la humedad no los afecta). Son algo costosos, costando alrededor de 20 veces lo que cuesta un simple pot de control.

## TRANSFORMADORES DIFERENCIALES DE VARIACION LINEAL (LVDTs).

Un transformador diferencial de variación lineal entrega una señal de voltaje de salida ac que es proporcional a un desplazamiento físico. La fig. B3, muestra la construcción, el símbolo esquemático, y las formas de onda de salida de un LVDT.

La fig. B3a, muestra que un LVDT tiene un devanado primario y dos devanados secundarios arrollados sobre el mismo soporte. El soporte mismo es hueco y contiene un núcleo magnético que es libre para deslizarse dentro del soporte. Siempre y cuando el núcleo magnético esté perfectamente centrado en el soporte, el flujo magnético de enlace será el mismo para el devanado secundario 1 y para el devanado secundario 2. Por tanto ambos voltajes secundarios serán iguales. Si el núcleo se mueve hacia la izquierda en la fig. B3a, el enlace magnético será más grande en el devanado secundario 1 debido a que hay más núcleo dentro de dicho devanado que dentro del devanado 2. Por tanto el voltaje del devanado 1 será más grande que el voltaje del devanado 2. Por otro lado, si el núcleo se mueve a la derecha en la fig. B3a, el voltaje del devanado 2 será más grande que el voltaje del devanado 1, porque el devanado secundario 2 tendrá más núcleo dentro de él. El LVDT se construye de tal manera que la diferencia entre los voltajes de los dos devanados secundarios es proporcional al desplazamiento del núcleo.

### Transformadores diferenciales de variación lineal (LVDTs) / 431

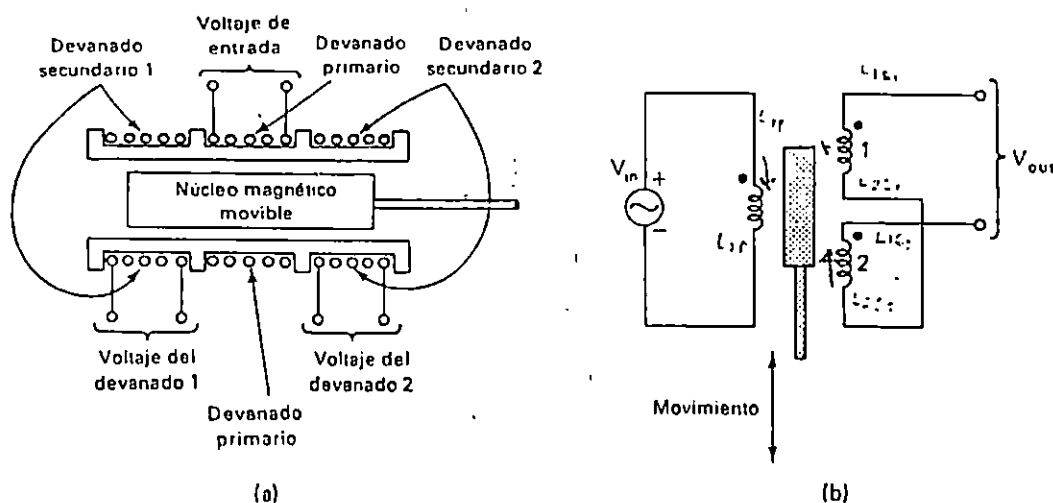


Figura B3. a) Construcción de un LVDT, b) Dibujo esquemático.

## TRANSDUCTORES DE PRESION.

Son numerosas las diferentes técnicas para medir presión industrialmente. Concentraremos nuestra atención en solamente dos tipos comunes de dispositivos sensores de presión, los tubos Bourdon y los fuelles. Estos dispositivos detectan la presión medida y la convierten en un movimiento mecánico. El movimiento mecánico es entonces traducido a una señal eléctrica por un potenciómetro o un LVDT.

### Tubos de Bourdon

Es un tubo deformable de metal con una sección ovalada. Es abierto en uno de sus extremos y cerrado en el otro. El tubo hueco es elástico debido a la elasticidad del metal utilizado en su construcción.

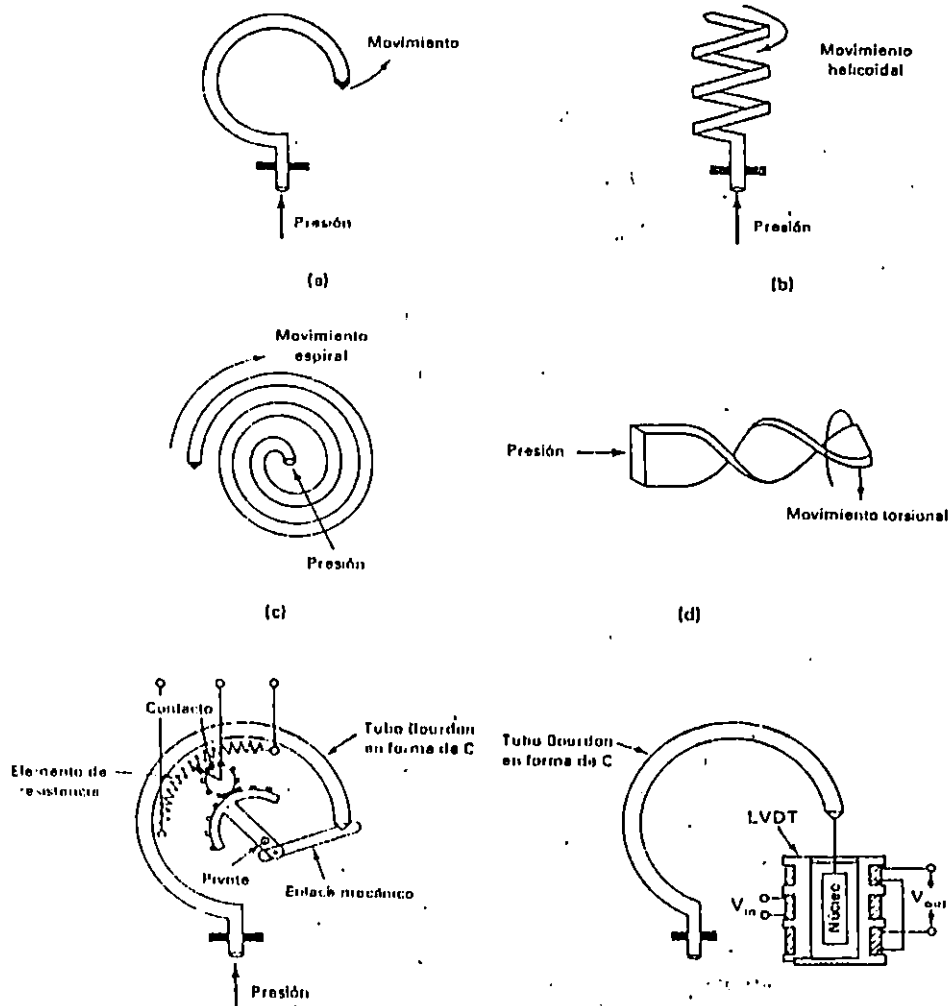


Figura B4. Tubos de Bourdon a) en forma de C, el tipo más común; b) en forma de hélice; c) en forma espiral; d) de torsión; e) en forma de C unido a un potenciómetro; f) en forma de C acoplado a un LVDT.

El fluido cuya presión se quiere medir es admitido al interior del tubo por su extremo abierto, el cual está mecánicamente asegurado. El tubo entonces deflecta en una cantidad proporcional a la magnitud de la presión. Esta deflexión es transmitida mecánicamente al contacto de un potenciómetro o al núcleo de un LVDT para proporcionar una señal eléctrica. Las figs. B4(a) a (d) muestran las diferentes formas de los tubos Bourdon y los movimientos que ellos producen.

La fig. B4e, muestra como un tubo Bourdon en forma de C podría acoplarse a un potenciómetro. La fig. B4f, muestra como un tubo en forma de C podría acoplarse a un LVDT. Los tubos Bourdon en espiral y helicoidales con frecuencia se prefieren a los tubos Bourdon en forma de C debido a que producen un movimiento más grande de su extremo sellado debido a que producen un movimiento más grande de su extremo sellado por cantidad de presión.

Los tubos Bourdon son más frecuentemente utilizados para medir presiones en el rango de 10 a 300 psi.

#### Fuelles

Es esencialmente una serie de diafragmas metálicos conectados entre sí. Cuando se soldan varios diafragmas en serie, el movimiento total del último diafragma puede ser considerable. La fig. B5a, muestra un corte de un fuelle. Con la puerta de entrada de presión asegurada, el fuelle se expandirá a medida que aumente la presión del fluido, y el espigo de salida se moverá a la derecha. A medida que la presión de fluido cae, el fuelle se contrae, el espigo de salida se mueve a la izquierda. La fuerza de contracción puede proporcionarse por el resortaje mismo de los diafragmas del fuelle o por una combinación de diafragma con un resorte externo.

Las figuras B5(b) y (c) muestran dos arreglos comunes de los fuelles. EN la fig. B5b, la presión es aplicada al interior del fuelle y tiende a expandirlo contra la oposición del resorte de tensión. A medida que el fuelle se expande, acciona un enlace mecánico que mueve el contacto de un potenciómetro para entregar una señal de salida eléctrica.

En la fig. B5c, la presión medida se aplica a la parte externa del fuelle, forzándolo a contraerse en contra de la compresión del resorte. A medida que se mueve, acciona un enlace mecánico que mueve el núcleo de un LVDT para entregar una señal eléctrica de salida. Estos transductores de presión se calibran ajustando la tensión o la compresión inicial del resorte de retorno. Una tuerca de ajuste, la cual no se muestra en la fig. B5, se proporciona para este efecto.

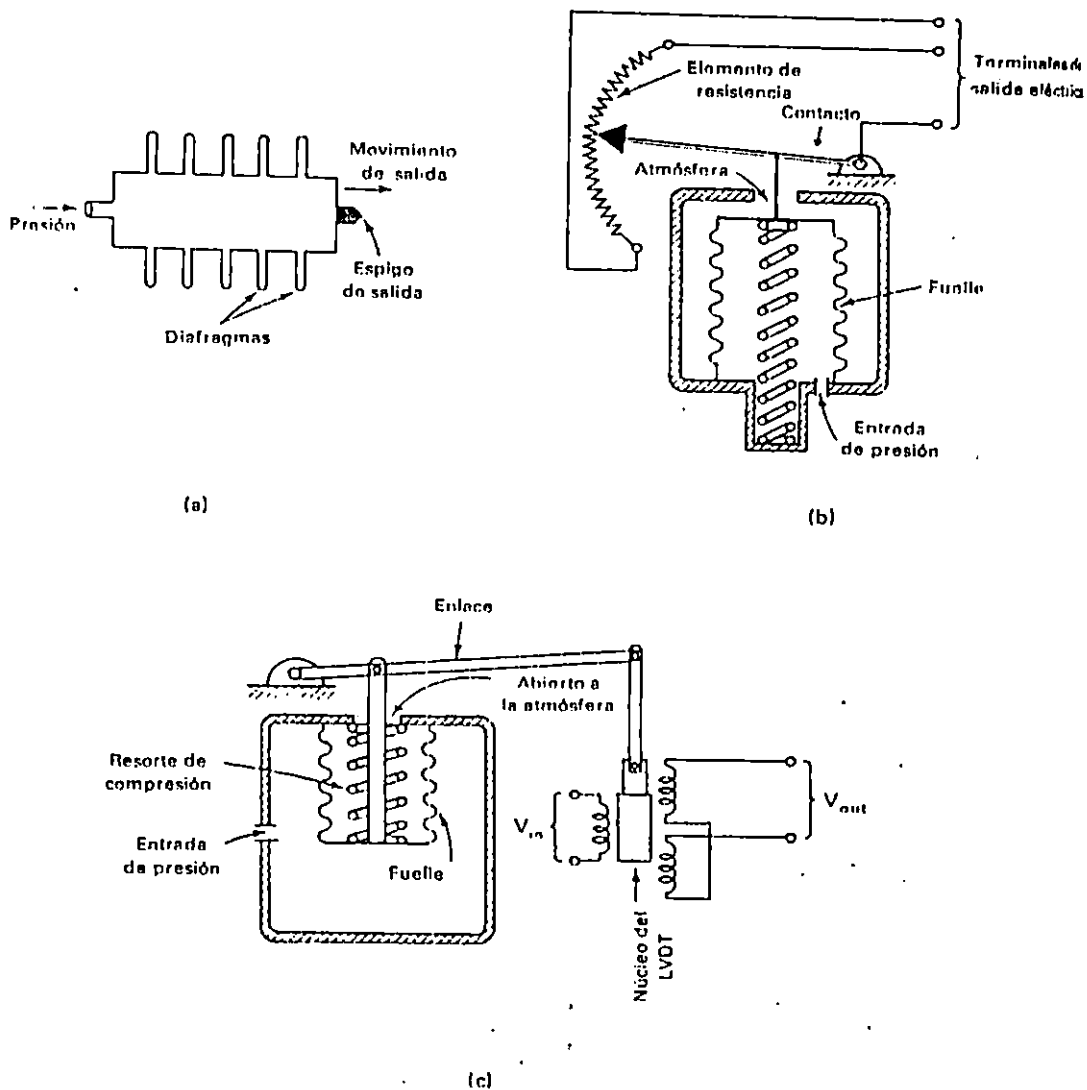


Figura B5. a) Construcción básica de un fuelle; b) Disposición de un fuelle en el cual la presión de entrada se aplica al interior del fuelle; c) Disposición de un fuelle en la cual la presión de entrada se aplica al exterior del fuelle.

Los transductores de presión tipo fuelle encuentran sus usos principales en la medida de presiones en el rango de 0.5 a 20 psi.

CONVERTIDOR DE VOLTAJE A FRECUENCIA  
FRECUENCIA/VOLTAJE.  
VFC 32

**DISCUSSION OF SPECIFICATIONS**

**LINEARITY**

Linearity is the maximum deviation of the actual transfer function from a straight line drawn between the end points (90% of full scale input or frequency and 0.1% of full scale called zero). Linearity is the true measure of voltage-to-frequency converter's performance, and is a function of the full scale frequency. Refer to Figure 1 to determine typical linearity error for your application. For a given full scale frequency, the linearity error decreases with decreasing operating frequency as shown in Figure 2. Also, best linearity is achieved at lower gains ( $\Delta F_{FULL}/\Delta V_{IN}$ ) with operation as close to the chosen full scale frequency as possible.

The high linearity of the VFC32 makes the device an excellent choice for use as the front end of A/D converters with 8- to 12-bit resolution, and for highly accurate transfer of analog data over long lines in noisy environments (2-wire serial data transmission).

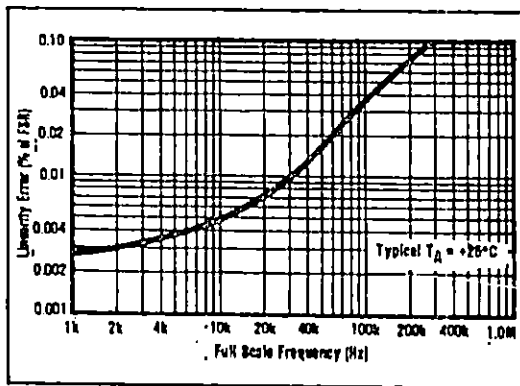


FIGURE 1. Linearity Error vs Full Scale Frequency. (25% Duty Cycle)

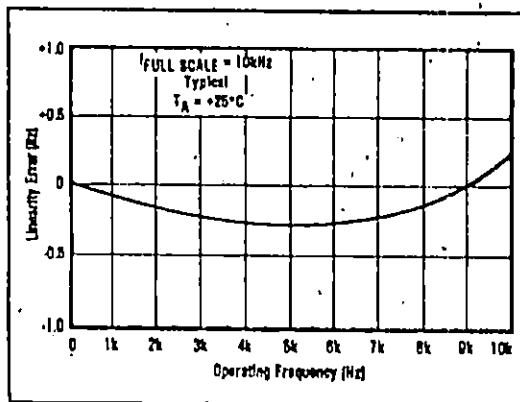


FIGURE 2. Linearity Error vs Operating Frequency. (25% Duty Cycle)

**FREQUENCY STABILITY vs TEMPERATURE**

The full scale frequency drift of the VFC32 versus temperature is expressed as parts per million of full scale range per °C. As shown in Figure 3, the drift increases above 100kHz, and this should be taken into account for specific applications. To determine the total accuracy drift over temperature, the drift coefficients of external components (especially  $R_1$  and  $C_1$ ) must be added to the drift of the VFC32. Above 200kHz, it is recommended all grades be operated below +85°C with higher duty cycle (up to 50%) and higher output transistor collector current (up to 15mA). Linearity will, however, be degraded.

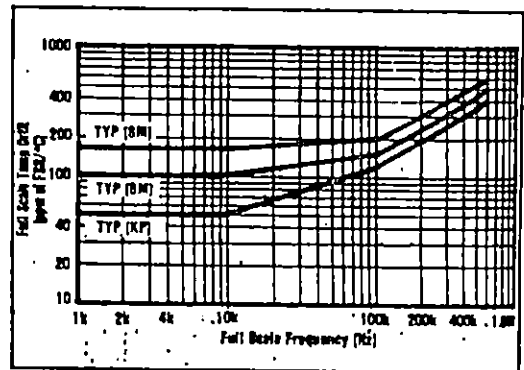


FIGURE 3. Full Scale Drift vs Full Scale Frequency. (25% Duty Cycle)

**RESPONSE**

Response of the VFC32 to changes in input signal level is specified for a full scale step, and is 1 microsecond plus 1 pulse of the new frequency. For a 10 volt input signal step with the VFC32 operating at 100kHz full scale, the settling time to within  $\pm 0.01\%$  of full scale is 40 microseconds.

**THEORY OF OPERATION**

The VFC32 monolithic voltage-to-frequency converter provides a digital pulse train output whose repetition rate is directly proportional to the analog input voltage in Figure 4.

Essentially, the input amplifier acts as an integrator that produces a 2-part ramp. The first part is a function of the input voltage, and the second part dependent on the current sink. When a positive input voltage is applied at  $V_{IN}$ , a constant current will flow through the input resistor, causing the voltage at  $V_{IN}$  to ramp down toward zero, according to  $dV/dt = V_{IN}/R_1C_1$ . During this time, the constant current sink is disabled by the switch. Note, this period is only dependent on  $V_{IN}$  and integrating components. When the ramp reaches a voltage close to zero, the comparator will cause the one-shot to fire. The one-shot period is determined by an internal 7.5V reference and  $C_1$ . The four signal will then change logic



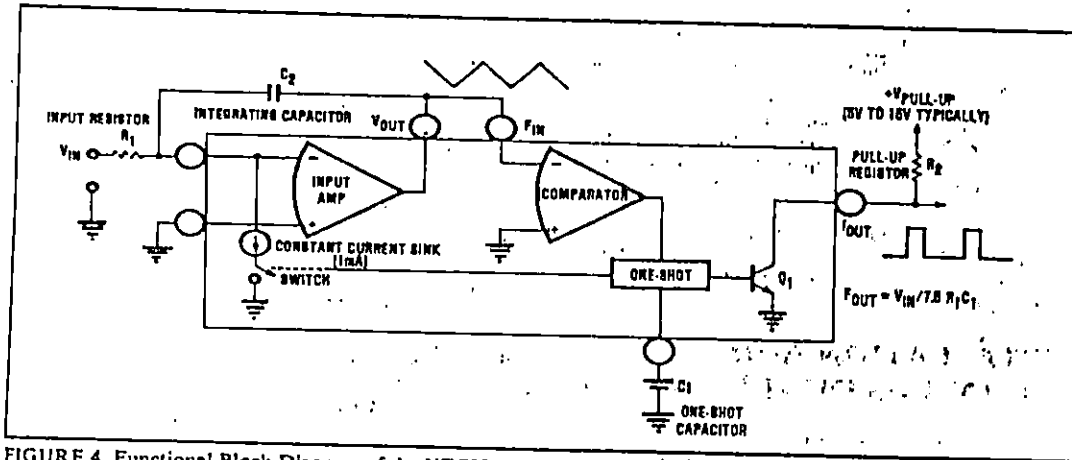


FIGURE 4. Functional Block Diagram of the VFC32.

states, going from a "0" to a "1", and the switch will close, enabling the constant current sink. The ramp voltage will then change direction and begin to ramp up. Since  $V_{IN} / R_1$  is always set up to be less than 1mA, the current in the integrating capacitor will flow toward the summing junction, and the ramp voltage rate of change will be:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_{IN} / R_1 - 1mA}{C_1}$$

Before the ramp voltage can saturate the input amplifier, the one-shot will reset, disabling the current sink, changing the output state back to logic "0", and restarting the cycle. Since the integrating capacitor  $C_2$  affects both the rising and falling segments of the ramp voltage, its tolerance and temperature coefficient do not affect the output frequency. It should, however, have a leakage current that is small compared to  $V_{IN} / R_1$ , since this parameter will add directly to the gain error of the VFC.  $C_1$ , which controls the one-shot period, should be very precise since its tolerance and temperature coefficient add directly to the errors in the transfer function.

To operate the VFC32 as a highly linear frequency-to-voltage converter, open the connection between  $V_{OUT}$  and  $f_{IN}$ , and connect  $V_{IN}$  to  $V_{OUT}$ . The input frequency should be coupled through a capacitor to  $f_{IN}$ , and a positive output voltage proportional to  $f_{IN}$  will be generated at the  $V_{OUT}$  connection. For details see Installation and Operating Instructions.

The total VFC period is determined by the following equations, which is shown graphically in Figure 5.

$$f_o = \frac{1}{T}$$

$$T = t_1 + t_2 \text{ and } i = c \, dv/dt$$

$$t = \Delta V_{OUT} t_1 \frac{C_2}{V_{IN}/(R_1)} + \Delta V_{OUT} t_2 \frac{C_2}{V_{IN}/(R_1) - 1mA}$$

and:

$$-\Delta V_{OUT} t_1 = +\Delta V_{OUT} t_2$$

$$t_2 = C_1 \frac{7.5V}{1mA}$$

The equations reduce to:

$$f_o = \frac{V_{IN}}{7.5(R_1) C_1}$$

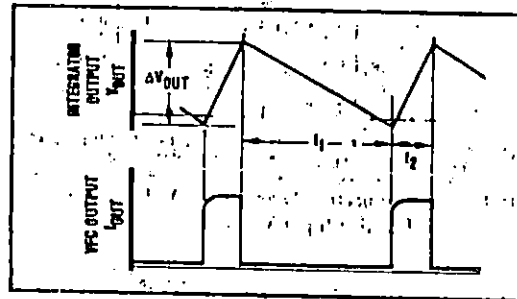


FIGURE 5. Integrator and VFC Output Timing.

### DUTY CYCLE

The duty cycle (D) of the VFC is the ratio of the one-shot period ( $t_2$ ) or pulse width, PW, to the total VFC period ( $t_1 + t_2$ ). It is measured at the full scale input voltage, which gives the full scale output frequency,  $F_{FS}$ .

$$D = \frac{t_2}{t_1 + t_2} = PW \cdot F_{FS}$$

$$PW = \frac{D}{F_{FS}}$$

Duty cycle is related to the maximum input current and the 1mA (nominal) current sink. By reducing the equations for  $t_2$  and  $f_o$ :

- Verificación y ajuste de la limitación de apertura y del aparato de bobina móvil.

Interruptor manual/automático ubicado en el regulador en posición "manual".

Interruptor servicio/verificación en posición "servicio".

Simular la disponibilidad para arranque colocando un puente de alambre entre los bornes externos 85 y 89. Oprimiendo el pulsador que arranque se apaga la lámpara de parada y el indicador 1 del regulador sitio de medición 11 salta de - 15 V a + 18 V. Por no existir ninguna señal del número de revoluciones ( $n = 0$ ) es activa la limitación de la apertura activa" está encendido.

Los potenciómetros de ajuste dentro del regulador Pe5 y Pe8 son ajustados, normalmente, en nuestra fábrica de modo que el distribuidor puede ser gobernado ya con el potenciómetro (el valor teórico "limitación de la apertura" ubicado en el tablero frontal del regulador).

En el estado de régimen de la regulación debería existir en la bobina móvil una tensión comprendida entre -3 hasta - 4 V. Dicha tensión puede ser medida con el indicador 1 del regulador sitio de medición 15. Esta tensión puede ser ajustada girando el tornillo de ajuste superior ubicado en el aparato de bobina móvil en el estado de régimen el aparato de bobina móvil en el estado de régimen de la regulación. En la bobina móvil misma debería existir una vibración bien perceptible con el dedo (aprox. 130 Hz). Normalmente, el aparato de bobina móvil sale ya preajustado de nuestro taller.

Hay que comprobar que el distribuidor pasa a la posición final cerrada después de desenchufar el enchufe en el aparato de bobina móvil.

Si las verificaciones realizadas insta ahora no indican ninguna irregularidad puede procederse al ajuste fino de la limitación de apertura. Llevar para este fin el potenciómetro del valor teórico "limitación de la apertura" a la posición final "0" y verificar si existe una concordancia entre el tope mecánico y la posición 0 en la escala. Ajustar luego el potenciómetro del valor teórico a la división final "0" y verificar si existe una concordancia entre el tope mecánico y la posición 0 en la escala. Ajustar luego el potenciómetro del valor teórico a la división 5 - 10. El potenciómetro de ajuste Pe5 dentro del regulador es ajustado ahora de modo tal que el distribuidor abandona justamente la posición cerrada y/o empieza a abrir. Ajustar a

continuación el potenciómetro del valor teórico a la división "100" y ajustar el potenciómetro de ajuste Pe8 dentro del regulador de modo tal que el distribuidor alcanza justamente la posición plenamente abierta.

En el indicador I del regulador sitio de medición 16 puede ser comprobada la señal del valor teórico eléctrica. En la posición del potenciómetro del valor teórico "limitación de la apertura" "0" deben existir 0 V y en la posición "100" + 12, 8 V.

En el indicador II del regulador sitio de medición 16 es indicada la posición del distribuidor.

- Verificación y ajuste de las aperturas de arranque I y II (la frecuencia de comparación indicada en el apartado 9 debe ser existentes).

Ajustar el interruptor servicio/verificación a la posición "verificación" y alterar por medio del potenciómetro de verificación en el regulador la frecuencia y/o el número de revoluciones simulados de aprox. 15% a aprox. 170%. Al sobrepasar las sobrerrevoluciones ajustadas es dada una orden de parada al regulador y cuando la frecuencia está nuevamente ajustada a un valor inferior al valor de reacción de sobrerrevoluciones debe oprimirse el pulsador de arranque. La conmutación de apertura de arranque I a apertura de arranque II es realizada en función del número de revoluciones y puede ser ajustada con el potenciómetro de ajuste Pe22. Normalmente, el punto de conmutación es ajustado a un valor comprendido entre el 75 y el 90%. Al sobrepasar el punto de conmutación se apaga el diodo luminoso de apertura de arranque I y el diodo de apertura de arranque II se enciende. El distribuidor va con este motivo a la posición de arranque I) y/o Pe14 al valor provisional.

- Verificación y ajuste de los interruptores en función del número de revoluciones.

Las posiciones excitadas y/o desexcitadas de los relés en función del número de revoluciones ubicados dentro del regulador son indicadas por medio de diodos luminosos en el tablero frontal del regulador y en la parte trasera del regulador respectivamente. A cada relé corresponde un potenciómetro de ajuste en el regulador.

Para el ajuste debe llevarse el interruptor servicio/verificación a la posición "verificación". Y con el potenciómetro de verificación debe ajustarse

en el indicador de revoluciones el número de revoluciones de conexión deseado en cada caso. Con el correspondiente potenciómetro de ajuste puede ajustarse luego el punto de conmutación.

Para la comprobación del interruptor de parada debe conmutarse el interruptor servicio/verificación a la posición "servicio" al cabo de un tiempo de retardo de > 1 min. debe encenderse el diodo luminoso "parada".

La comprobación de los contactos de conexión conducidos a la regleta de bornes externa debe ser efectuada en base el esquema de conexión del regulador (los enchufes II a IV deben estar enchufados para este fin).

- Verificación y ajuste de los interruptores de posición.

Las posiciones excitadas y/o desexcitadas de los relés en función de la posición ubicados dentro del regulador (para el distribuidor, potenciómetro del valor teórico de apertura, etc.) son indicadas por medio de diodos luminosos en la parte trasera del regulador con excepción del relé de posición del distribuidor para "marcha en vacío" cuyo diodo luminoso es indicado en el tablero frontal del regulador. Los puntos de conmutación se ajustan a través de los respectivos potenciómetros de ajuste en el regulador.

La comprobación de los contactos de conexión conducidos a la regleta de bornes externa debe ser efectuada en base al esquema e conexión del regulador (los enchufes II a IV deben estar enchufados para este fin).

- Verificación de la vigilancias ubicadas dentro del regulador.

Las posiciones excitadas y/o desexcitadas de los réles de vigilancia ubicados dentro del regulador son indicadas por medio de diodos luminosos instalados en el tablero frontal del regulador. Una vez oprimido el pulsador de reposición en el tablero frontal del regulador se enciende el diodo luminoso "tensión auxiliar del regulador existente".

Verificación de

"frecuencia de comparación de la red fallada"

"transmisor de revoluciones fallado"

"posicionador fallado"

Tensión auxiliar del regulador

-tras una corta interrupción de la tensión auxiliar borne 1 es apagado el diodo "tensión auxiliar del regulador de fallada" y el contacto entre los bornes 102 y 134 se abre. Una vez oprimido el pulsador de reposición se enciende el diodo luminoso, el contacto está nuevamente cerrado.

Frecuencia de comparación

-tras una corta interrupción de la línea de señalización borne 42 debe encenderse el diodo luminoso "frecuencia de comparación fallada" y el contacto entre los bornes 103 y 135 debe cerrarse. Una vez oprimido el pulsador de reposición el diodo luminoso está desconectado y el contacto se abre.

Transmisor del número de revoluciones

-el fallo e este transmisor es comprobado estando funcionando la unidad (ver 2.10) por la corta interrupción de la respectiva línea de impulsos borne 39 y/o 40, encendiéndose el diodo luminoso "transmisor del número de revoluciones fallado" y debiéndose cerrar el contacto entre el borne 104 y el borne 136. Una vez oprimido el pulsador de reposición el diodo luminoso se apaga nuevamente y el contacto se abre.

Posicionador

-tras una corta interrupción de la línea de señalización borne 52 (4 a 20 mA) debe encenderse el diodo luminoso "posicionador fallado" y el contacto entre los bornes 105 y 137 debe cerrarse. Una vez oprimido el pulsador de reposición el diodo luminoso se apaga nuevamente y el contacto se abre.

- Verificación y ajuste de la regulación del número de revoluciones.

El interruptor manual/automático se encuentra en la posición "manual", el interruptor servicio/verificación se encuentra en la posición "verificación". Existe la orden "arranque". Ajustar la potencia simulado con el potenciómetro de verificación aprox. el 15% de revoluciones y el potenciómetro del valor teórico "limitación de apertura" a "100".

El distribuidor es abierto plenamente con ello cuando existe la orden de arranque. Ajustar el potenciómetro del valor teórico "número de revoluciones" a "50" e incrementar con el potenciómetro de verificación la frecuencia simulada hasta que el distribuidor comience a cerrarse. Realizar unos movimientos de posicionamiento por medio del potenciómetro de verificación y luego con el potenciómetro del valor teórico "número de revoluciones". En consecuencia de la amortiguación ajustada en los potenciómetros Pe12 y Pe15 los movimientos de posicionamiento del distribuidor están correspondientemente lentos (amortiguados). Por el ajuste, p.e. del potenciómetro 15 (tiempo de acción integral) a cero, la amortiguación va a ser sólo muy pequeña y los movimientos de posicionamiento están correspondientemente más acelerados (no amortiguados).

La señal del valor teórico de revoluciones puede ser medida con el indicador II del regulador, sitio de medición 23. En la posición "0" del potenciómetro del valor teórico "número de revoluciones" deben existir 0V, y en posición "100" + 12 V.

El potenciómetro Pe6 para el ajuste de valor teórico (revoluciones) es ajustado, normalmente, en nuestra fábrica de modo tal que resulta con una estática permanente del 6%, ajustada con el potenciómetro Pe9 potenciómetro del valor teórico "revoluciones" a "50" que corresponde aproximadamente a la posición de marcha en vacío.

Ahora bien, si el potenciómetro del valor teórico "limitación de la apertura" se ajusta por ejemplo a "50", el distribuidor está limitado hasta dicha posición, es decir, incluso con la regulación del número de revoluciones no puede conseguirse ninguna apertura mayor. Los diodos luminosos ubicados en el tablero frontal del regulador "limitación de apertura activa" y "regulación del número de revoluciones activa" indican si el distribuidor está limitado por el momento o si no está limitado y está plenamente bajo la acción de la regulación del número de revoluciones.

- Verificación y ajuste del ajuste de frecuencia.

Debe existir la frecuencia de comparación. El interruptor manual/automático se encuentra en la posición "automático", el interruptor servicio/verificación se halla en la posición "verificación". Existe la orden de "arranque".

Ajustar el número de revoluciones simulado al 15%.

El distribuidor se abre hasta alcanzar la posición ajustada con el potenciómetro Pe11 para la apertura de arranque AOI. Incrementar el número de revoluciones simulado produciéndose la conmutación a la apertura de arranque II al sobrepasar las revoluciones ajustadas con el potenciómetro Pe22. El distribuidor se abre ahora hasta alcanzar la apertura de arranque AOII ajustada con el potenciómetro Pe14. Si el número de revoluciones simulado y/o la frecuencia es mayor que la frecuencia de la red, el distribuidor se cierra.

- Verificación de las conmutaciones "ajuste de frecuencia", "servicio a la red" y "servicio aislado".

El interruptor manual/automático se encuentra en la posición "automático". El interruptor servicio/verificación se halla en la posición "verificación". Existe la orden de "arranque". El número de revoluciones simulado está en un 100%.

El potenciómetro de ajuste Pe19 para +  $\Delta n$  está ajustado a un valor comprendido entre 60 y 100.

El potenciómetro de ajuste Pe20 para -  $\Delta n$  está ajustado a un valor comprendido entre 0 y 40.

El potenciómetro del valor teórico "limitación de la apertura" se encuentra en la posición 100.

El contacto de conectar interruptor de potencia es simulado colocando un puente de alambre entre los bornes externos 84 y 89 siendo desconectado con ello el ajuste de frecuencia.

Si el número de revoluciones simulado se encuentra con este motivo dentro de la banda de revoluciones  $\Delta n$  (o sea  $n$  aprox. el 100%) es conectado a la vez el "servicio a la red". El diodo luminoso "servicio a la red" se enciende y el diodo luminoso apertura de arranque II está apagado. Por estar el potenciómetro del valor teórico "limitación de la apertura" a la posición 100 es activa ahora la regulación del número de revoluciones pudiendo gobernarse el distribuidor por su plena carrera con el potenciómetro del valor teórico de revoluciones. Los movimientos de

posicionamiento son realizados de una forma rápida por ser muy pequeña la amortiguación en el "servicio a la red". Por el ajuste del potenciómetro del valor teórico "limitación de apertura" la posición del distribuidor puede ser limitada correspondientemente. Si el número de revoluciones simulado es ajustado a un valor que se halla por encima o por debajo de la banda de revoluciones ajustada con los Pe19 y Pe20 se produce automáticamente la conmutación al "servicio aislado". Con ello es activa la amortiguación grande quedando inactiva la limitación de apertura de modo que ya no puede ser limitado el distribuidor.

Sin embargo, se desea que la limitación de apertura sea activa también en el "servicio aislado" debe colocarse un puente de alambre del borne externo 84 al borne 86.

La conmutación de "servicio a la red" a "servicio aislado" puede provocarse también a través del correspondiente pulsador ubicado en el regulador o bien por medio de una orden de telegobierno, pero el número de revoluciones debe encontrarse dentro de la banda de revoluciones  $\Delta n$  ajustada al efectuarse estas maniobras.

La comprobación de los contactos de teleaviso conducidos a la regleta de bornes externa y de la órdenes de telegobierno que llegan desde el exterior debe ser efectuada en base al esquema de conexión del regulador.

- Verificación de la conmutación "valor teórico de revoluciones ajustado" y "valor teórico de revoluciones máximo".

El interruptor servicio/verificación se encuentra en la posición "verificación". Existe la orden "arranque" y "servicio a la red". El número de revoluciones simulado se encuentra en un 100%.

El valor teórico de revoluciones máximo puede ser conectado a través del correspondiente pulsador existente en el regulador o por medio de una orden de telegobierno durante "servicio a la red", pero el número de revoluciones  $\Delta n$  ajustada al efectuarse estas maniobras. Con ello es incrementado el valor teórico de revoluciones pudiendo ser gobernado luego el distribuidor por su plena "limitación de la apertura" sin que se tenga que ajustar "más alto" el potenciómetro del valor teórico "revoluciones". Si se conmuta nuevamente al "valor teórico ajustado" queda nuevamente activo el valor teórico ajustado en el potenciómetro del valor teórico ajustado en el potenciómetro del valor teórico "revoluciones".



La conmutación a "servicio aislado" se produce también cuando no se alcance o se sobrepase la banda de revoluciones  $\Omega_n$  y puede ser comprobada alterando el número de revoluciones simulado.

Al conmutar al servicio aislado es desconectado el "valor teórico de revoluciones máximo" y queda activo "el valor teórico de revoluciones ajustado".

El paso al servicio a la red y/o al valor teórico de revoluciones máximo se efectúa a través de los pulsadores ubicados en el regulador o bien por medio de una orden de telegobierno.

La comprobación de los contactos de teleaviso conducidos a la regleta de bornes externa y de la órdenes de telegobierno que llegan desde el exterior debe ser realizada en base al esquema de conexión del regulador.

- Verificación y ajuste de la regulación del nivel de agua (si existe).

El interruptor servicio/verificación se encuentra en la posición "verificación", existe la orden "arranque", los pulsadores de "servicio a la red" y "valor teórico de revoluciones máximo" están oprimidos. El número de revoluciones anulado está a un 100%. El potenciómetro del valor teórico "limitación de la apertura" se halla en "100".

Comprobar con el amperímetro en el borne externo 38 si existen 4 mA con el nivel de agua mínimo establecido y 20 mA con el nivel de agua máximo establecido (debe existir externamente una limitación de corriente para que no se sobrepasen 25 mA).

Ajustar luego la corriente a 4 mA. Posicionar el potenciómetro de ajuste Pe7 (estática permanente) y Pe10 (tiempo de acción integral) a "0".

Conectar la regulación del nivel de agua oprimiendo el respectivo pulsador ubicado en el tablero frontal del regulador. El diodo luminoso "regulación del nivel de agua conectada" debe encenderse. El distribuidor pasa con este motivo bien a la posición final "cerrado" o bien "abierto" (por estar ajustada la estática 0).

Ajustar el potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" a "0". El potenciómetro Pe4 (ajuste del valor teórico) debe ser ajustado ahora de modo tal que al variar ligeramente (+) el valor ajustado del potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" el

distribuidor sea gobernado en ambas direcciones. Ajustar luego el potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" a "100" y conectar una corriente de 20 mA. Variando ligeramente (+) de la posición de 100 el potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" puede ser gobernado ahora el distribuidor en ambas direcciones.

La inversión del sentido de gobierno para los anteriores ajustes puede ser observada también mediante medición de la tensión de bobina móvil con el indicador I del regulador, sitio de medición 15. En cada inversión de gobierno del distribuidor cambia la polaridad. Por tanto, estos ajustes pueden ser realizados también al estar cerrado el distribuidor.

Ahora bien, si es ajustada una estática permanente ajustando el potenciómetro Pe7 por ejemplo a "10", el distribuidor ya no pasa de una posición final a la otra sino que resulta para cada posición del potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" una posición del distribuidor definida. Al estar el potenciómetro Pe7 a "100" resulta una estática (grande) de modo que resulta con una corriente de 4 mA una posición del distribuidor de aprox. el 0% y con 20mA una posición de un 100%.

Desplazando paralelamente la curva característica puede establecerse con el potenciómetro de ajuste Pe4 (ajuste del valor teórico) la gama de ajuste del potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" (el campo de trabajo respectivamente).

Si el potenciómetro de ajuste Pe10 (tiempo de acción integral) se gira tal que abandone "0" es nuevamente activa una amortiguación y los movimientos de posicionamiento del distribuidor resultan ser correspondientemente más lentos (amortiguados).

El ajuste definitivo de los potenciómetros de ajuste y/o la optimización puede ser realizado sólo durante el servicio de la unidad.

Si en algunos casos no existe ningún potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" en el tablero frontal del regulador el valor teórico establecido es ajustado por medio del potenciómetro Pe4 (ajuste del valor teórico). En este caso no es posible variar el valor teórico del nivel de agua durante el funcionamiento de la unidad.

En caso de una regulación del nivel de agua siempre es activa la limitación de apertura pudiendo, por tanto, ser limitado correspondientemente el distribuidor.

La desconexión de la regulación del nivel de agua se

lleva acabo mediante le correspondiente pulsador ubicado en el regulador a través de una orden de telegobierno o bien se produce al no alcanzar el número de revoluciones la banda de revoluciones n o bien al sobrepasar la misma.

La comprobación de los contactos de teleaviso conducidos a la regleta de bornes externa y de las órdenes telegobierno que llegan desde el exterior debe ser efectuada en base al esquema de conexión del regulador.

- Verificación y ajuste de la regulación de potencia (si existe).

El interruptor servicio/verificación se encuentra en la posición "verificación", existe la orden "arranque" los pulsadores de "servicio a la red" y "valor teórico de revoluciones máximo" están oprimidos.

Posicionar el potenciómetro de ajuste (influencia de frecuencia) a "0". Para la regulación de potencia es preciso un convertidor de medición de potencia cuya salida de señales está conectada a los bornes externos 38(+) y 17 y que suministra con una potencia "0" una corriente de 20 mA y con la potencia máxima una corriente de 20mA. Debido a que durante la parada no hay ninguna potencia y, por consiguiente, no es suministrada ninguna corriente por parte del convertidor de medición, ha de conectarse una fuente de alimentación a los bornes mencionados con la cual pueden ser ajustados 4 a 20 mA (no deben ser sobrepasados con este motivo los 25 mA, limitación de corriente externa).

Ajuste de la corriente a 4 mA y del potenciómetro de ajuste Pe 10 (tiempo de acción integral) a "0".

Conectar la regulación de potencia oprimiendo el correspondiente pulsador en el tablero frontal del regulador.

El diodo luminoso "regulación de potencia conectada" debe estar encendido. Posicionar el potenciómetro del valor teórico "potencia" ubicado en el tablero frontal del regulador a "0". El potenciómetro Pe4 (ajuste del valor teórico) debe ajustarse ahora de modo tal que al variar ligeramente ( $\pm$ ) el potenciómetro del valor teórico "potencia" de la posición "100" puede gobernarse ahora el distribuidor en ambas direcciones.

Esta inversión del sentido de gobierno para los anteriores ajustes puede ser observada también mediante medición de la tensión de bobina móvil con el indicador I del regulador, sitio de medición 15. En cada inversión de gobierno del distribuidor cambia la polaridad. Por

tanto, estos ajustes pueden ser realizados también al estar cerrado el distribuidor.

Si el potenciómetro de ajuste Pe 10 (tiempo de acción integral) se gira tal que abandone "0" es nuevamente activa una amortiguación y los movimientos de posicionamiento del distribuidor son correspondientemente amortiguados.

En caso de una regulación de potencia siempre es activa la limitación de apertura pudiendo, por tanto, ser limitado correspondientemente el distribuidor. La desconexión de la regulación de potencia se efectúa por medio del correspondiente pulsador ubicado en el regulador al no alcanzar el número de revoluciones la banda de revoluciones  $\Delta n$  o bien al sobrepasar la misma y en el servicio aislado respectivamente.

La comprobación de los contactos de teleaviso conducidos a la regleta de bornes externa y de las órdenes de telegobierno que llegan desde el exterior debe ser efectuada en base al esquema de conexión del regulador.

- Verificación del sistema automático completo.

En base a los correspondientes antecedentes eléctricos y a los esquemas de secuencias de conexión para los procesos de arranque, de parada, etc. puede ser verificada la inclusión del regulador en el sistema automático completo. Durante la verificación, el interruptor servicio/verificación debe estar en la posición "verificación" a fin de poder simular el número de revoluciones par los distintos procesos.

- Verificación y ajuste del instrumento de teleindicación para número de revoluciones.

El interruptor servicio/verificación está en posición "servicio" (n=0). Ajustar mecánicamente el punto 0 en el indicador.

El interruptor servicio/verificación está en posición "verificación" y el número de revoluciones simulado está al 100%.

Ajustar el potenciómetro Pe 24 en el regulador de modo tal que la aguja en el instrumento de teleindicación se encuentra igualmente al 100%.

- Verificación y ajuste de los motores de regulación de los potenciómetros del valor teórico de "número de

revoluciones", "limitación de la apertura", "nivel de agua", ("potencia"). Si existe una orden de telegobierno a los siguientes bornes:

Valor teórico de revoluciones "más alto"	borne exte. 76
Valor teórico de revoluciones "más bajo"	borne exte. 77
Limitación de la apertura "más alta"	borne exte. 78
Limitación de la apertura "más baja"	borne exte. 79
Nivel de agua (potencia) "más alto"	borne exte. 80
Nivel de agua (potencia) "más bajo"	borne exte. 81

está encendido el correspondiente diodo luminoso en la parte trasera del regulador y pueden ser medidas las siguientes tensiones con el indicador I del regulador.

Orden número de revoluciones más alto o más bajo	-Indicador I sitio de medición 1 + 14 V con orden "más alto" - 14 V con orden "más bajo"
Orden limitación de la apertura más alta o más baja	-Indicador I sitio de medición 26 +14 V con orden "más alta" -14 V con orden "más baja"
Orden nivel de agua (potencia) más alto o más bajo.	-Indicador I sitio de medición 8 + 14 V con orden "más alto" - 14 V con orden "más bajo"

#### PROCESOS DE ARRANQUE Y PARADA Y VERIFICACIONES ESTANDO FUNCIONANDO LA UNIDAD.

Prerrequisitos:

Los preparativos de tipo mecánico-hidráulico están terminados (por ejemplo, órgano de cierre ubicado en la entrada a la turbina está abierto, presión de aceite del regulador existente, etc.).

Los preparativos de tipo eléctrico están terminados (por ejemplo la tensión auxiliar del regulador y las demás tensiones de mando y de aviso están interconectadas, no existe ningún disparo por peligro, etc.).

Eliminar los puentes de alambre en la regleta de bornes externa del regulador bornes 84/89 para la simulación del interruptor de potencia y de la disponibilidad para arranque, bornes 85/89. Verificar que el potenciómetro Pe12 y el potenciómetro Pe 15 no se encuentran en la posición "0".

Los valores de ajuste provisionales del regulador en los correspondientes potenciómetros están ajustados.

Existe la orden "parada" del regulador.

### ARRANQUE MANUAL DE LA UNIDAD:

Normalmente se realiza primero un arranque manual de la unidad, por lo tanto, el interruptor manual/automático ubicado en el regulador debe encontrarse en la posición "manual". El interruptor manual/automático externo para el sistema automático completo se encuentra igualmente en la posición "manual".

Ajustar los potenciómetros del valor teórico "limitación de la apertura" y "revoluciones", ubicados en el regulador, a "0".

Reajustar el cierre rápido (externamente).

Oprimir el pulsador "arranque" ubicado en el regulador. Girar lentamente el potenciómetro del valor teórico "limitación de apertura" de la posición "0". El distribuidor se cierra nuevamente. Los impulsos de revoluciones suministrados por los transmisores de revoluciones en el disco dentado deben quedar claramente visibles en el instrumento de revoluciones del regulador con revoluciones muy lentísimas  $n < 1\%$ . El instrumento de revoluciones indica constantemente con revoluciones  $n > 2\%$ .

Si después de este corto arranque de la unidad no se manifiesta ninguna irregularidad debe procederse a un nuevo arranque girando lentamente el potenciómetro del valor teórico "limitación de la apertura" hacia abrir. Mantener un número de revoluciones de  $n$  aprox. un 50 a 70% durante algún tiempo y observar las temperaturas existentes en los descansos.

Continuar abriendo el distribuidor a través del potenciómetro del valor teórico "limitación de las revoluciones y el diodo luminoso" regulación del número de revoluciones activa se enciende; el diodo luminoso "limitación de la apertura activa" está apagado. Aumentar aprox. 20 divisiones el potenciómetro del valor teórico "limitación de apertura".

Con el potenciómetro del valor teórico "revoluciones" pueden ser ajustadas ahora revoluciones comprendidas pueden ser ajustadas ahora revoluciones comprendidas pueden ser ajustadas ahora revoluciones comprendidas entre el 90 y 100%. Pasar lentamente por toda la gama del potenciómetro del valor teórico "revoluciones".

Comprobar mediante variaciones rápidas del potenciómetro "revoluciones" la estabilidad de la regulación, de no ser

asi, variar el ajuste bien del potenciómetro de ajuste Pe12 (estática transitoria) o bien del Pe15 (tiempo de acción integral) o bien de ambos potenciómetros.

#### SISTEMA AUTOMATICO DE ARRANQUE DEL REGULADOR:

- Si existe la frecuencia de comparación (de la red) puede conmutarse, al existir el número de revoluciones de aprox. el 100%, el interruptor manual/automático ubicado en el regulador a "automático". El diodo luminoso apertura de arranque II se enciende y la regulación del ajuste de frecuencia es activa. La unidad se regula de modo tal que el deslizamiento entre la frecuencia de la unidad y la frecuencia de la red llega a ser aproximadamente "0". Cabe observar que el diodo luminoso "limitación de la apertura activa" no está encendido con este motivo, de lo contrario debe ajustarse la apertura de arranque II y/o el potenciómetro Pe14 a un valor más alto, o sea, la apertura de arranque II debe ser algo mayor que la posición de marcha en vacío.
  
- Parada oprimiendo el pulsador "parada" en el regulador  
  
Lograda la parada, arrancar nuevamente oprimiendo el pulsador "arranque" en el regulador. El distribuidor se abre primero hasta la apertura de arranque I, la cual se ajusta normalmente de modo tal que la unidad acelera rápidamente. Con las revoluciones ajustadas (75 a 90%), es conmutada a la apertura de arranque II que está ajustada a un valor algo mayor que la apertura de marcha en vacío. El incremento del número de revoluciones es ahora correspondientemente más lento. Si el número de revoluciones (la frecuencia) de la unidad llega a ser > a la frecuencia de la red interviene la regulación de frecuencia e inicia un movimiento de cierre del distribuidor. El diodo luminoso apertura de arranque II es apagado siendo regulado un deslizamiento de aprox. "0".

#### UNIDAD CONECTADA A LA RED

- Normalmente, la unidad es sincronizada primero manualmente, el interruptor manual/automático ubicado en el regulador debe encontrarse, por lo tanto, en la posición "manual" y debe efectuarse un correspondiente ajuste del potenciómetro del valor teórico "revoluciones" en el regulador o bien mediante órdenes de telegobierno.

- Conseguido el sincronismo debe conectarse el interruptor de potencia. Con el potenciómetro del valor teórico "revoluciones" y con el potenciómetro "limitación de la apertura" puede cargarse ahora la máquina correspondientemente. Eventualmente es necesario corregir un poco los indicadores, de revoluciones con los potenciómetros de ajuste 21 y/o 24 de modo que estos indican exactamente el 100%. Verificar la conmutación a "valor teórico de revoluciones máximo" y reposición a "valor teórico de revoluciones ajustado".
- El potenciómetro del valor teórico "revoluciones" está aproximadamente en posición de marcha en vacío (aprox.50). El potenciómetro del valor teórico "limitación de la apertura" está igualmente en la posición de marcha en vacío aproximada. Con ello, la unidad está descargada, separarla entonces de la red. Conmutar el interruptor manual/automático en el regulador a la posición "automático" y conectar el aparato de conexión en paralelo autom. Al existir sincronismo, la unidad es conectada automáticamente a la red.
- Descargar y parar la unidad y realizar un nuevo arranque oprimiendo el pulsador "arranque". Ahora la unidad es arrancada y conectada a la red automáticamente.

#### VERIFICACIONES ESTANDO CONECTADA LA UNIDAD A LA RED.

- Comprobar las desconexiones de seguridad (temperaturas existentes en los descansos, presión de aceite, etc., no las sobrerrevoluciones); verificar el fallo del transmisor de frecuencia con la unidad en marcha interrumpiendo el borne 39 y a continuación el borne 40. Verificar las conmutaciones a "valor teórico de revoluciones máximo" y la reposición a "valor teórico de revoluciones ajustado" y a "servicio aislado" y la reposición a "servicio a la red". Al conmutar a "servicio aislado" es desconectado el "valor teórico de revoluciones máximo".
- Verificar las sobrerrevoluciones

Para este fin debe pararse la unidad. El interruptor manual/automático está en la posición "manual" y el potenciómetro del valor teórico "limitación de la apertura" está en la posición "0". Desembornar el transmisor de revoluciones (frecuencia) G1 para la



regulación (sacar en la regleta de bornes externa el alambre que va al transmisor desde el borne 39).

La regulación del número de revoluciones es ahora inactiva y la unidad es acelerada con la limitación de apertura hasta alcanzar las revoluciones de disparo de modo que el distribuidor se cierra.

Corregir eventualmente las revoluciones de disparo en el potenciómetro de ajuste Pe 28 y en el péndulo de seguridad mecánico si existe.

Embornar nuevamente el alambre en el borne 39 y conectar la unidad de nuevo a la red.

- Realizar las desconexiones de carga y, de ser necesario, corregir correspondientemente los valores preajustados en los potenciómetros de ajuste Pe 9 y 12.
- Verificar la regulación del nivel de agua (si existe)

Conectar el "servicio a la red" y el "valor teórico de revoluciones máximo".

El nivel de agua debe estar comprendido entre el nivel límite máximo y el límite mínimo; lo que corresponde a una corriente comprendida entre 4 y 20 mA.

A fin de evitar que en el momento de conmutar a la regulación del nivel de agua se produzca un gran movimiento de posicionamiento del distribuidor y/o un salto de potencia (si el valor teórico y el valor real no concuerdan más o menos) se ajusta primero el potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" a "0" y se limita correspondientemente la unidad con la limitación de apertura. Después de la conmutación la unidad permanece en dicha posición limitada y están encendidos entre otros los diodos luminosos "regulación del nivel de agua conectada" y "limitación de la apertura activa".

Si el potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" se ajusta a valores más altos interviene la regulación del nivel de agua y el distribuidor se cierra correspondientemente; el diodo luminoso "regulación del nivel de agua activa" está encendido y el diodo luminoso "limitación de la apertura activa" está apagado.

Ahora es regulado el valor teórico del nivel de agua ajustado. Variando rápidamente el potenciómetro del valor teórico "nivel de agua" puede optimarse la regulación variando el potenciómetro Pe 10 (estática transitoria) y el potenciómetro Pe 13 (tiempo de acción integral). En la mayoría de los casos la estática permanente (potenciómetro Pe 7) debe ajustarse a un valor muy pequeño a fin de mantener lo más pequeña posible la

variación del nivel de agua en caso de una alteración del caudal de agua. Si el potenciómetro Pe 7 se ajusta a la posición "0" no se produce ninguna variación del nivel de agua duradera. Al conmutar al servicio aislado es desconectada la regulación del nivel de agua.

- Verificar la regulación de potencia (si existe).

Conectar el "servicio a la red" y el "valor teórico de revoluciones máximo".

A fin de evitar que en el momento de la conmutación a la regulación de potencia resulta un salto de potencia (si no hay ninguna concordancia entre el valor teórico y el valor real), es ajustado primero el potenciómetro del valor teórico "potencia" a "100" y la unidad es limitada correspondientemente con la limitación de la apertura. Después de la conmutación la unidad es limitada correspondientemente con la limitación de la apertura. Después de la conmutación la unidad permanece en dicha posición limitada y están encendidos, entre otros, los diodos luminosos "regulación de potencia conectada" y "limitación de la apertura activa" está apagado.

Ahora es regulado el valor teórico de potencia ajustado. Variando rápidamente el potenciómetro del valor teórico "potencia" puede optimarse la regulación variando el potenciómetro de ajuste Pe 10 (estática transitoria) y el potenciómetro Pe 13 (tiempo de acción integral).

Con el potenciómetro Pe 7 es ajustada la influencia de frecuencia deseada.

Al conmutar al "servicio aislado" es desconectada la regulación de potencia.

#### SISTEMA AUTOMATICO COMPLETO

- En base a los esquemas de secuencias de conexión y los demás esquemas puede verificarse el sistema automático completo.