

olade

Organización Latinoamericana de Energía
Latin American Energy Organization
Organisation Latino-Américaine d'Énergie
Organização Latino-Americana de Energia



Contactos

 Av. Mariscal Antonio José de Sucre
N58-63 y Fernandez Salvador
Casilla: 17-11-6413CCNU
Quito - Ecuador

 Tel. (+593 2) 2598-122 / 2598-280
2597-995 / 2599-489

 centro.documentacion@olade.org
 www.olade.org

 [@oladeorg](https://twitter.com/oladeorg)
 [//oladeorg](https://www.facebook.com/oladeorg)



olade

OLADE
969
(01594)

OLADE
Organización Latinoamericana de Energía
CENTRO DE INFORMACION

CDD OLADE



001689

REGULADORES DE

VELOCIDAD

DE TURBINAS HIDRAULICAS

QUITO , SEPTIEMBRE DE 1981

I N D I C E

1. GENERALIDADES
2. CARACTERISTICAS DE LOS REGULADORES.
 - 2.1. Grado de Irregularidad
 - 2.2. Grado de irregularidad del sistema regulador
 - 2.3. Grado de insensibilidad del regulador.
3. ELEMENTOS DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD.
4. TIPOS DE REGULADORES DE VELOCIDAD.
5. PARAMETRO BASICO DE SELECCION DEL REGULADOR.
6. DETERMINACION DE LA GARANTIA DE LA REGULACION.
7. ANALISIS DEL GOLPE DE ARIETE Y DE LA SOBREVELOCIDAD.
8. CONSIDERACIONES GENERALES DE SELECCION DEL REGULADOR.
9. BIBLIOGRAFIA.

REGULADOR DE VELOCIDAD DE TURBINAS HIDRAULICAS

1. Generalidades

Cuando se produce una variación de carga en la turbina sucede la variación del par resistente que actúa sobre ella sea en aumento o disminución del mencionado par, sucediéndose una variación de la velocidad de rotación del grupo turbina-generador. En el caso del aumento del par resistente la velocidad de rotación disminuirá (n_2), en el caso de disminución la velocidad aumentará (n_1). Esta variación de velocidad se podrá evitar graduando el caudal (aumentando o disminuyendo el caudal utilizado, en cada instante) de tal forma que la velocidad se mantenga constante; lo que significa una potencia adecuada a la requerida por la variación de carga. Esta operación puede ser realizada manual o automáticamente. El objeto de nuestro tema es tratar de conocer en líneas generales la problemática de la regulación automática de la velocidad de turbinas hidráulicas para pequeñas centrales hidroeléctricas y obtener los criterios necesarios para seleccionar un adecuado regulador de velocidad. En síntesis la función del regulador de velocidad consiste en mantener, luego de una variación de carga, la velocidad de rotación en su valor nominal (frecuencia normal de la red), así como lograr que la turbina entregue la potencia requerida por la carga.

2. Características de los reguladores

2.1 Grado de irregularidad

Es la relación que existe entre la diferencia de la velocidad más alta que alcanza la turbina, antes de iniciar la regulación (n_1) y la velocidad más baja (n_2) que alcanza la turbina, también antes del inicio de la regulación, (el primer caso implica una disminución de carga y, el segundo, un aumento de carga), con la suma media de dichas velocidades.

$$\delta = \frac{n_1 - n_2}{\frac{n_1 + n_2}{2}}$$

2.2 Grado de irregularidad del sistema regulador

Es la relación de la diferencia de las velocidades en vacío y plena carga con la suma media de ambas velocidades (n_v y n_c).

$$\delta_R = \frac{n_v - n_c}{\frac{(n_v + n_c)}{2}}$$

Para obtener un buen funcionamiento del regulador se debe cumplir lo siguiente:

$$\delta \geq \delta_R$$

2.3 Grado de insensibilidad del regulador

Es la relación que existe entre la diferencia de la velocidad de equilibrio y la velocidad en que la señal perturbará es sensada (n_e y n_s), con la suma media de ambas velocidades.

$$E = \frac{n_s - n_e}{\frac{n_s + n_e}{2}}$$

3. Elementos componentes de un regulador de velocidad

El regulador de velocidad está compuesto por los siguientes elementos:

1. Transmisión de la señal al elemento sensor
2. Elemento sensor de la variación de la velocidad o de la frecuencia
3. Transmisión del sensor al sistema de distribución
4. Sistema de distribución (amplificador)
5. Sistema de fuerza (servomotor)
6. Transmisión de la señal del elemento regulador al sensor (enlace contrario)
7. Mecanismo de dirección del regulador

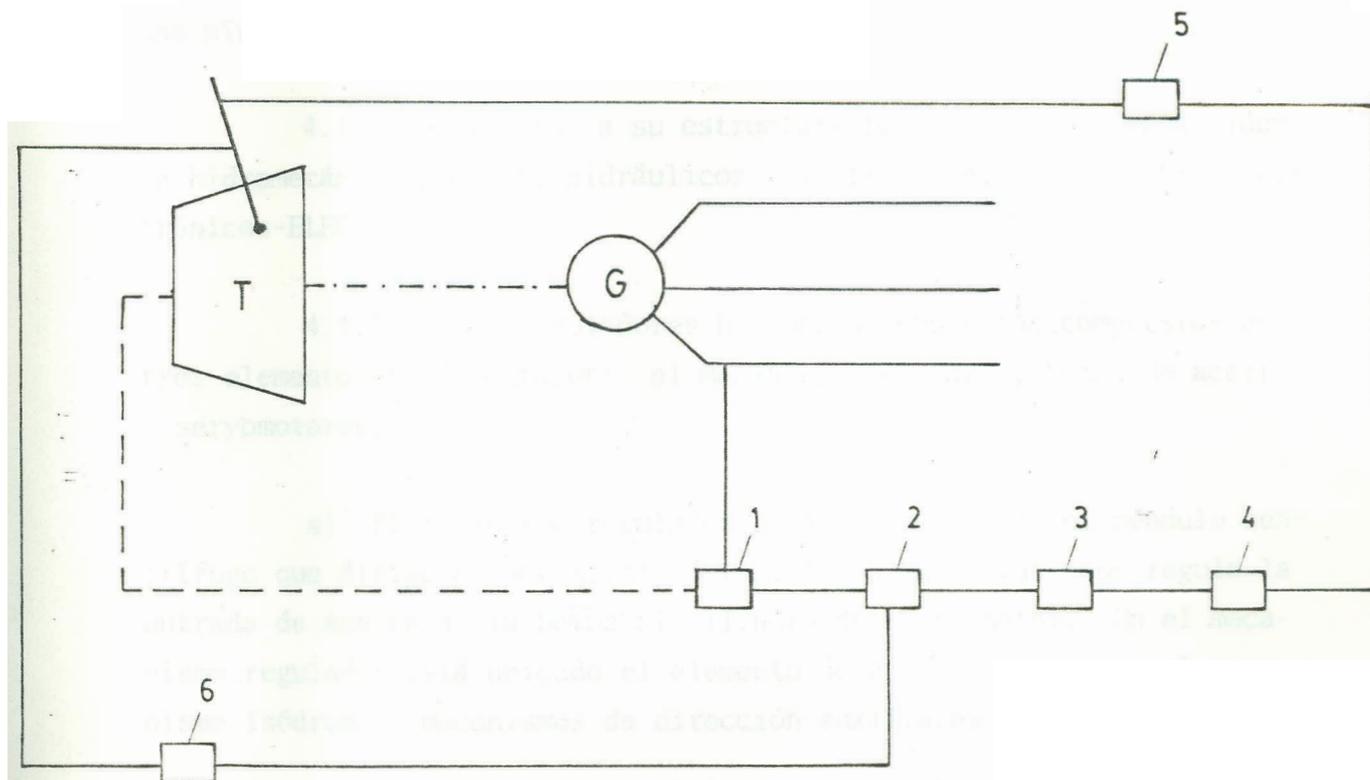


Fig. 1.-

4. Tipos de reguladores de velocidad

4.1 Los reguladores de velocidad están divididos por su principio de funcionamiento y por su estructura.

4.1.1 Por su principio de funcionamiento se sub-dividen en reguladores estáticos y reguladores astáticos o isódromos.

Los primeros no pueden abastecer la exactitud requerida para el trabajo del sistema debido a que tienen un grado de irregularidad muy elevado, es decir, una fuerte dependencia de la velocidad a la carga. (Por ello en la actualidad sólo se utilizan reguladores isódromos). Los reguladores astáticos o isódromos se caracterizan porque en ellos se puede reducir el grado de irregularidad a cero o a una mínima magnitud.

4.1.2 De acuerdo a su estructura los reguladores se dividen en hidromecánicos, electrohidráulicos, electromecánicos y electro-electrónicos-ELEC.

4.1.2.1 Los reguladores hidromecánicos están compuestos de tres elementos fundamentales: el mecanismo regulador, bomba de aceite y servomotores.

a) El mecanismo regulador está compuesto por el péndulo centrífugo que dirige el movimiento del pistón distribuidor que regula la entrada de aceite de la bomba al cilindro del servomotor. En el mecanismo regulador está ubicado el elemento de enlace contrario, el mecanismo isódromo y mecanismos de dirección auxiliares.

b) Las bombas de aceite están compuestas por sistemas de engranajes. El movimiento se transmite a través de la polea que sirve para la transmisión del movimiento giratorio y va conectado al eje de la turbina por una banda (faja), que es movida por motores asincronos.

- c) El servomotor está formado por un cilindro de pistón de movimiento doble (elemento de desplazamiento positivo)

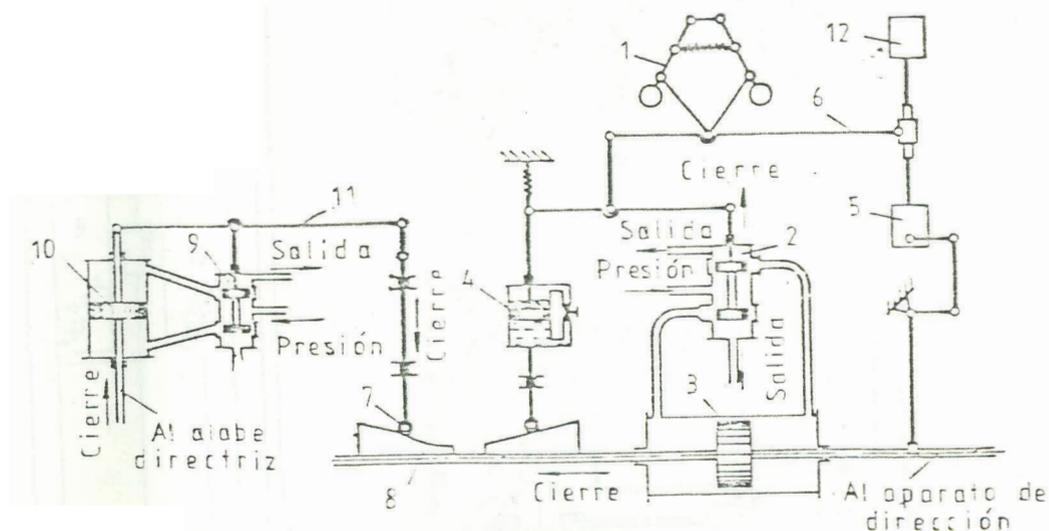


Fig. 2.- Esquema de un regulador hidromecánico

- Donde:
- 1 - Sensor
 - 2 - Válvula distribuidora
 - 3 - Servomotor
 - 4 - Mecanismo isódromo (amortiguador) de enlace contrario
 - 5 - Brazo derecho de palanca
 - 6 - Palanca
 - 7 - Rueda
 - 8 - Base
 - 9 - Válvula distribuidora
 - 10 Servomotor (accionamiento lento)
 - 11 Palanca de enlace contrario

4.1.2.2 Los reguladores electromecánicos, electrohidráulicos son sistemas eléctricos que actúan sensando la frecuencia de la corriente del generador y ponen en movimiento un servomotor hidráulico o eléctrico. Comúnmente se usan para turbinas de baja potencia debido a que su costo es elevado.

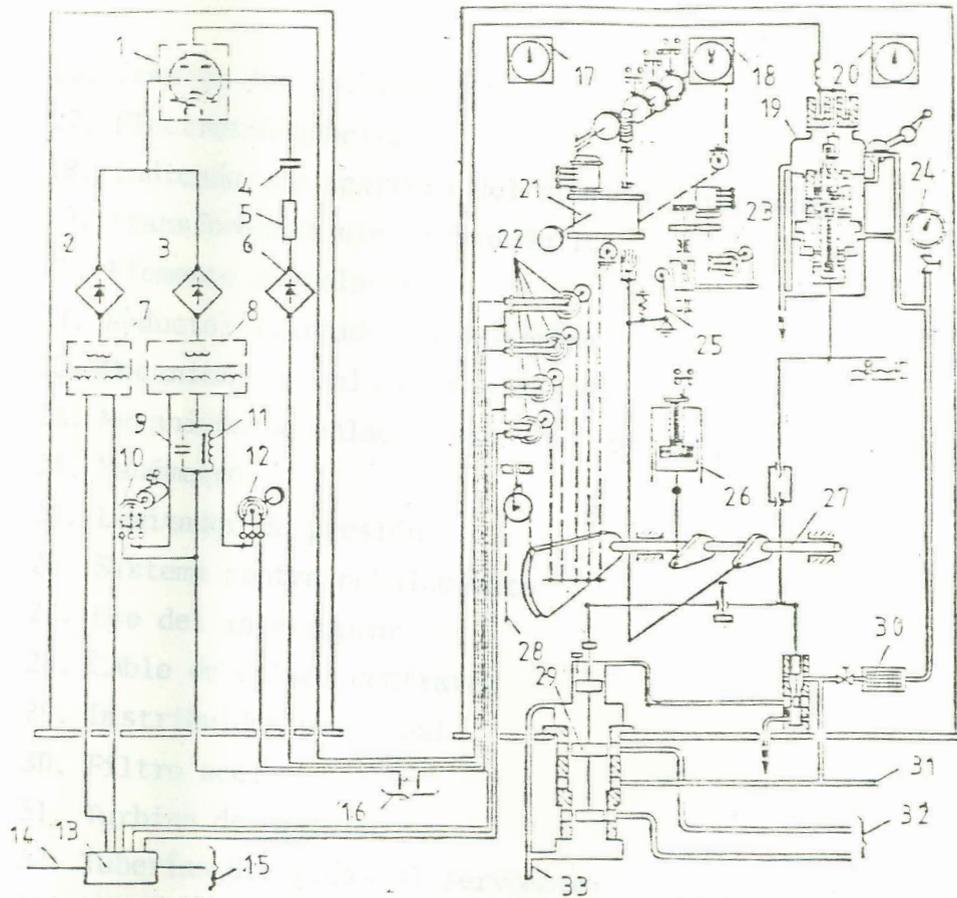


Fig. 3.- Regulador electrohidráulico

1. Amplificador de la señal perturbadora
2. Diodo de regulación en grupo
3. Diodo de regulación individual
4. Condensador isódromo
5. Resistencia isódroma
6. Diodo isódromo
7. Sumador de regulación en grupo
8. Sumador de regulación individual
9. Condensador de medición de frecuencia
10. Mecanismo variacional de la velocidad
11. Inductancia para medir la frecuencia
12. Mecanismo regulador de la irregularidad
13. Sensor de potencia de los grupos
14. Señales de dirección de otros grupos

16. Tensión del tacogenerador
17. Electrotacogenerador
18. Indicador de apertura del aparato direccional
19. Transformador electrohidráulico
20. Elemento de balance
21. Reductor limitador de apertura
22. Mecanismo de enlaces contrarios
23. Mecanismo de enlace contrario por altura
24. Manómetro
25. Limitador de presión
26. Sistema contra embalamiento
27. Eje del interruptor
28. CAble de enlace contrario
29. Distribuidor principal
30. Filtro aceite
31. Turbina de presión
32. Tuberías dirigidas al servomotor
33. Tubería de vaciado

4.1.2.3. Los reguladores electro-electrónicos están compuestos por un sistema sensor de frecuencia electrónica y el servomotor que es un motor eléctrico (asincrónico trifásico o de corriente constante), adaptan a las pequeñas centrales hidroeléctricas.

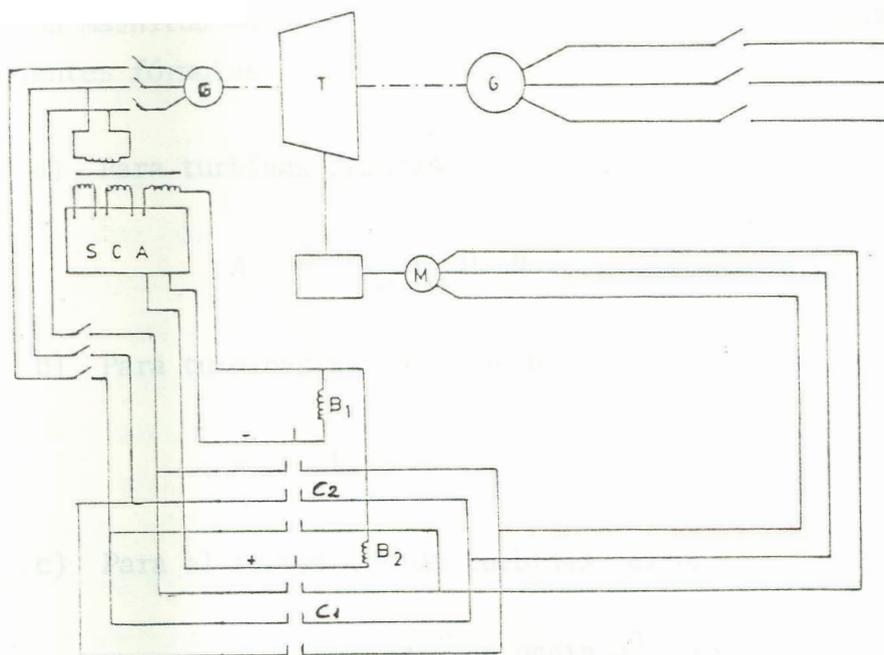


Fig. 4.- Regulador eléctrico - electrónico

En donde:

- g = generador del micro sistema
- M = servomotor
- B₁ y B₂ = bobinas de los relés
- SCA = sensor, comparador y amplificador
- C₁ y C₂ = contactos de los relés
- T = transformador de varios devanados

5. Parámetro básico de selección del regulador:

La selección de los reguladores de velocidad y sus componentes se realiza en función a su capacidad de trabajo.

Este dato se le proporciona al fabricante de turbinas para que entregue el regulador adecuado.

El coeficiente de capacidad de trabajo A (Kgm), se mide por el producto de la magnitud de máxima fuerza con el desplazamiento que se requiere para abrir o cerrar completamente el paso del agua en la turbina (válvula reguladora del caudal, álabes directrices).

Su magnitud puede ser determinada en forma aproximada por las siguientes fórmulas:

a) Para turbinas Francis

$$A_1 = K b_o \alpha_o H D$$

b) Para turbinas Kaplan y de bulbo (con álabes giratorios)

$$A = K_1 \alpha H D^3$$

c) Para el servomotor de turbinas Pelton

$$A = Z_o (d_o + 0.00017 d_o^3 H)$$

d) Para turbinas Michell

$$A = 31 D_e Q \sqrt{H}$$

donde:

H = Altura neta (m)

D = Diámetro nominal del rodete

b_o = Altura del aparato de dirección (brazo del elemento regulador)

α_o = Apertura máxima del aparato de dirección (m)

α = Angulo de vuelta de los alabes (grad.)

d_o = Diámetro de la salida del chorro (m)

Z_o = Número de toberas

K = Coeficiente igual a 400 para turbinas radiales y axiales que tienen un $D < 3$ m; para las demás turbinas $K = 300$

K_1 = Coeficiente igual a 0.8 si se tiene cuatro o cinco alabes

D_e = Diámetro exterior del rodete (m)

Q = Caudal máximo de la turbina ($m^3/seg.$)

6. Determinación de la garantía de la regulación

Sabemos que cualquier cambio desarrollado por la potencia de la turbina como consecuencia de la variación de frecuencia, en el momento de la regulación está acompañado por el cambio de la magnitud del flujo (caudal del agua) en la tubería como consecuencia de la oscilación de la presión a causa del fenómeno de golpe de ariete. La oscilación puede ser muy pequeña si tomamos un tiempo de regulación lo suficientemente amplio. Pero es necesario tomar en cuenta que el aumento de este tiempo va acompañado de un grado de irregularidad muy amplio. Asimismo la excesiva disminución del tiempo de regulación, trae consigo, desde el punto de vista de resistencia de la tubería y de la turbina, el aumento de la magnitud del módulo de golpe del ariete. Por ello en la práctica siempre se toma un tiempo de regulación tal que permita evitar la oscilación de la presión fuera de los límites permitidos, así como la oscilación de la velocidad de la turbina. El valor de este tiempo varía entre 5 y 8 seg.

Por ello el objetivo del cálculo de la garantía de la regulación es la selección de los parámetros básicos del regulador y de la tubería, las variaciones de velocidad y presión en los límites permitidos.

El caso más peligroso y para el cual es necesario realizar el cálculo de la garantía de la regulación cuando sucede una avería en la red o en el mismo grupo generador, lo que significa el rompimiento de la red y una completa descarga. El segundo caso se presenta cuando paralelamente están trabajando varios grupos o una pequeña central que se encuentra interconectada a un sistema (de baja o media tensión) de desconexión. En este caso el grupo turbina-generador (grupos o centrales) se sobrecargan, tomando la carga del elemento desconectado en forma brusca. En este caso, debido al trabajo paralelo del sistema (o grupos), la presión del agua y la velocidad de la turbina en los demás grupos tienen oscilaciones pequeñas. En este momento se considerará tiempos de regulación intermedio. La situación más peligrosa se presenta en el grupo que se queda sin carga sucediendo un fenómeno similar al primer caso.

Los parámetros que se deben obtener son el tiempo óptimo de regulación (tiempo de cierre a la válvula reguladora de caudal) y la determinación aproximada del momento de inercia.

Decíamos que el aumentar el tiempo óptimo de regulación disminuye el efecto del golpe de ariete. Asimismo el efecto que causa el aumento o disminución excesiva del tiempo de regulación también se presenta al aumentar o disminuir el momento de inercia. (Si el aumento del momento de inercia no satisface las condiciones óptimas del proceso transitorio, entonces se recomienda aumentar el diámetro de la tubería o disminuir la longitud de la misma). La primera acción eleva los costos de la tubería y la segunda sugiere un replanteo del esquema de instalación de la tubería o cambiar el lugar y el sitio seleccionado para ubicar la casa de máquinas. En último caso, de no ser posible tomar estas medidas, se utilizan reguladores de presión, lo que permite disminuir el tiempo de regulación sin aumentar la presión a lo largo de la tubería (la presión aumenta sólo hasta el lugar donde se encuentra el regulador de la presión). Esta instalación también es costosa y, además, no disminuye la magnitud del golpe de ariete negativo. La utilización de estos elementos exigen la realización de obras e instalar elementos auxiliares para disipar la energía a la salida de los reguladores.

Por ello se recomienda tener un criterio que nos permita en el proceso del diseño preliminar determinar rápidamente para cada caso acciones para asegurar la garantía de la regulación. Para ello es necesario datos de la magnitud del momento de inercia del grupo turbina-alternador. Para ello y en base a la experiencia de la construcción de turbinas y generadores se determina mediante la siguiente fórmula empírica, en una primera aproximación, el momento de inercia.

- 13 -

$$GD^2 = F \frac{P^{1.2}}{n_o^2} \quad TM^2$$

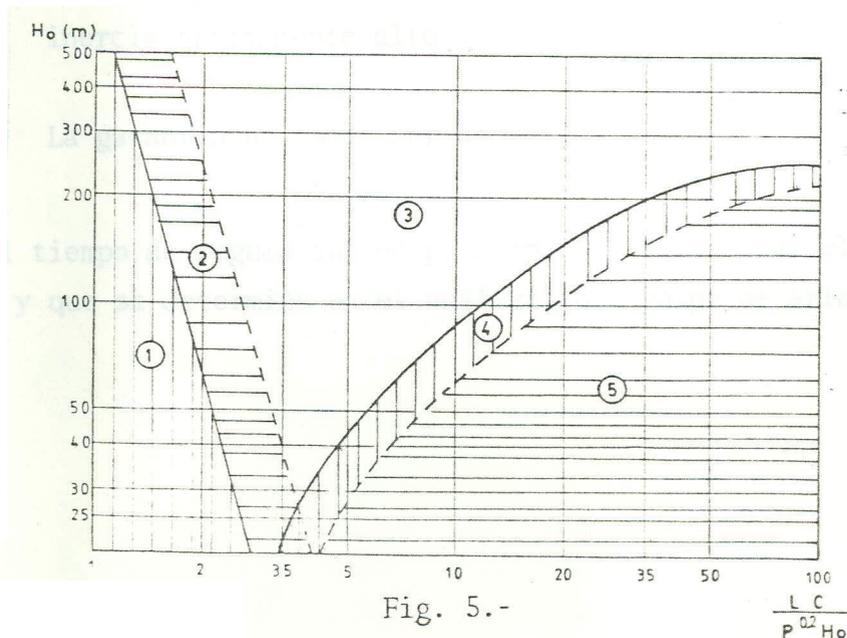
F = Coeficiente que varía entre 230 y 550, para máquinas normalmente fabricadas se puede tomar igual a 390

P = Potencia del grupo (KW)

n_o = Velocidad de rotación de la turbina (r.p.m.)

Asimismo para determinar el caso, en que debe usarse una baja o elevada magnitud del momento de inercia tal que pueda abastecer la garantía de regulación y obviar calculos; se puede usar el siguiente gráfico

LIMITES PARA ASEGURAR LA REGULACION



donde:

L = Longitud de la tubería en (m)

C = Velocidad del agua en tubería (m/seg)

P = Potencia del grupo turbina alternador (KW)

H_o = Altura neta (m)

- ① Se asegura la garantía de la regulación con un grupo con momento de inercia óptimamente bajo.
- ② Lo mismo pero con un grupo con momento de inercia óptimamente alto.
- ③ Lo mismo pero se deberá utilizar un regulador de presión.
- ④ Lo mismo pero usando un regulador de presión y un momento de inercia óptimamente alto.
- ⑤ La garantía no puede ser asegurada.

El tiempo de regulación en principio se toma igual al tiempo de cierre y que se determina en el análisis del golpe de ariete

7. Análisis del golpe de ariete y de la de sobrevelocidad:

7.1 El análisis del golpe de ariete se realiza con el objeto de determinar el tiempo de cierre de la valvula (álabas directrices) reguladora de caudal así como para definir la magnitud del momento de inercia, y el análisis de la sobrevelocidad, para definir la velocidad máxima que alcanzará la turbina en el lapso del tiempo de cierre.

En el análisis del golpe de ariete, se considera la longitud de la tubería de presión, ya que constituye el parámetro básico, que también determina la magnitud del módulo del golpe de ariete.

7.2 Determinación de la velocidad de la onda de sobrepresión:

Para hallar la velocidad de la onda de sobrepresión se considera los parámetros de la tubería de presión y se la determina mediante la siguiente fórmula:

$$a = \frac{c}{1 + \frac{E}{E_1} \frac{d_i}{e}}$$

donde:

- c - Velocidad de propagación del sonido en el agua 1420 m/seg a una temperatura de 15° C
- E_1 - módulo de elasticidad a la tensión del material de la tubería en Kg/m^2 .
- E - Módulo de elasticidad del agua a la compresión $2 \times 10^{12} \text{kg/m}^2$
- d_i - diámetro interior de la tubería (cm)
- e - espesor de la pared de la tubería (cm)

$$E_1 = 1.2 \times 10^8 \text{ Kg/m}^2 \quad \text{- Para tubería de polietileno}$$

$$E_1 = 2.25 \times 10^8 \text{ Kg/m}^2 \quad \text{- Para tubería de P.V.C.}$$

$$E_1 = 210 \times 10^8 \text{ Kg/m}^2 \quad \text{- Para tubería de fierro.}$$

- 16 -

7.2.2 En función a la magnitud obtenida se determina la sobrepresión y a los coeficientes K y N en base a los que se puede hallar la sobrepresión (golpe de ariete positivo y negativo)

$$K = \frac{a v}{2 g H} ; \quad N = \frac{a \cdot T_c}{2L}$$

T_c - El tiempo de cierre para una primera aproximación se toma entre 10 y 15 segundos

7.2.2.1 Sobrepresión en el caso de golpe de ariete positivo:

$$h = \frac{a v}{g} \quad \text{si } K < 1 \text{ y } N < 1$$

$$h = \frac{a v}{g(N + K(N-1))} \quad \text{si } K < 1 \text{ y } N > 1$$

$$h = \frac{a v}{g(2N - K)} \quad \text{si } K > 1 \text{ y } N > 1$$

donde:

H - salto máximo (m)

L - longitud equivalente de la tubería de presión (m)

v - velocidad del agua en la tubería de presión (m/seg)

g - aceleración de la gravedad (m/seg²)

7.2.3 Golpe de ariete negativo:

$$h = \frac{a v}{g} \cdot \frac{(-K + \sqrt{K^2 + N^2})}{N^2}$$

7.3 Determinación de la sobrevelocidad:

Para definir la sobrevelocidad de rotación máxima que alcanzará el grupo turbina-generador utilizamos los datos anteriormente definidos tales como GD^2 y T_c .

La magnitud hallada deberá encontrarse entre 25 y 35 %.

Por tanto la sobrevelocidad estará dada por:

$$\Delta n_{\max} = \frac{n_{\max} - n}{n} = \frac{1800 \times 102 \times g}{\pi^2} \times \frac{P_G T_c}{GD^2} \leq 25\% \text{ ó } 35\%$$

donde:

P_G - potencia o generar del grupo turbina-generador (KW)

T_c - tiempo de cierre (seg)

GD^2 - Momento de inercia del grupo

n_{\max} - Velocidad máxima que alcanza la turbina en el transcurso del tiempo de cierre T_c .

Si la magnitud obtenida es mayor a los límites propuestos, entonces se deberán tomar las medidas necesarias que garanticen la regulación óptima de la velocidad.

8. Consideraciones generales de selección del regulador:

8.1 Consideraciones técnicas:

- En función al parámetro de selección del regulador -A, identificar posibles proveedores del campo se deberá, fundamentalmente considerar a los fabricantes de turbinas, teniendo en cuenta que la turbina en la práctica, conforma un sistema muy interrelacionado con el regulador.

- 18 -

- Deberá analizarse la capacidad de fabricación, reparación y adquisición de componentes del regulador en el país (componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos).
- El mantenimiento y su operación deberán ser adecuados a las condiciones de su aplicación (sencillos).
- Facilidad de montaje y desmontaje de piezas y accesorios.
- Considerar el nivel de desarrollo tecnológico del país, para poder asegurar en caso de averías, una rápida reparación. Este paso es necesario para no estar obligados a la importación de piezas o partes que puedan producirse localmente y con materiales disponibles en el país.

8.2 Consideraciones económicas:

En este aspecto, se recomienda canalizar las actividades para obtener costos óptimos del regulador, sin que ésto signifique utilizar los de bajos costos.

Para lo cual se tendría en cuenta:

- La confiabilidad y buena eficiencia (alto grado de garantía)
- Facilidad de adaptación a la industria local, para la fabricación de repuestos.
- Alta durabilidad (vida útil)
- Tener en stock, (en caso de imposibilidad de fabricación de repuestos) repuestos de partes y piezas.

8.3 Adquisición del equipo:

Las consideraciones que se tendrán en cuenta para la adquisición del -

- 19 -

regulador constituyen asimismo criterios para definir su selección.

Al proveedor se le solicitará:

- Planos de ensamble del regulador, instrumentos de desmontaje y reparación.
- Indicaciones técnicas acerca de los materiales de los eslabones más delicados y que están sujetos a reparaciones.
- Lista de repuestos.
- Asistencia técnica para el personal local, para obtener un buen mantenimiento y operación.

9. BIBLIOGRAFIA

1. "Centrales hidroeléctricas: su estudio, montaje regulación y ensayo"
Zopetti Judes Gaudencio. Editorial Gile S.A. Barcelona 1979.
2. "Gidroelktrostansyi"
P.P. Argunov. Gosstroizdat USSR Kiev- 1980.
3. "Gidroenergetichescoe Oborudovanie Gidroelktrostansyi y evo Montazh"
A. N. Goncharov. Moskva "Energia" 1978.
4. "Teoria Avtomatichescovo Upravlenia"
Akad. A. A. Voronova. Moskva. "Visshaya Shkola" 1977.
5. "Osnovi Ispolsovania Vodnoyi Energii"
I. P. Denisov "Energia" Moskva 1974.
6. "Minicentrales Hidroelectricas" (Manual de toma de Decisiones)
ONUDI OLADE 1981.
7. "Documentos Tecnicos Elaborados por Expertos del Programa Regional de Pequeñas Centrales Hidroelectricas de OLADE"
OLADE - 1980.
8. "Manual del Ingeniero Mecánico"
Marxs - 1979