

## 8

VOLANTES Y REGULADORESGeneralidades

Son máquinas o dispositivos que se utilizan para mantener una determinada relación entre el movimiento de rotación del eje de una máquina con la potencia que la misma entrega, si bien con funciones distintas y diferenciadas entre sí.

Los volantes tienen por finalidad, en virtud de su masa e inercia, uniformar dentro de ciertos límites, las velocidades en los ejes de las máquinas motrices expuestas a variaciones debido al trabajo motor variable que le es entregado y al momento resistente de la carga. Así por ejemplo, en una máquina de émbolo alternativa el par motor es variable, y si bien se puede lograr con mayor cantidad de cilindros una mayor uniformidad, lo mismo sigue siendo irregular y presenta la velocidad del eje oscilaciones que el volante tiene la misión de limitar hasta un grado determinado.

El regulador, en cambio, trabaja respondiendo a la variación del trabajo resistente, actuando sobre los órganos de distribución o admisión del vapor o combustible, aumentando su suministro cuando el trabajo resistente aumenta y, disminuyéndolo si éste disminuye. Si bien existen distintos principios de trabajo para los reguladores, nos referiremos únicamente a los que trabajan según el principio de las masas rotantes y mantienen uniforme el número de revoluciones del motor cuando varía su potencia.

Volantes

**Energía almacenada por el volante:** Si se considera una máquina a vapor o de combustión interna monocilíndrica, provista de un mecanismo de biela manivela, cuyo esquema se indica en la figura (Fig.8.1), según lo estudiado anteriormente, la fuerza tangencial  $T$  que le imprimía el movimiento de rotación a la manivela, estaba dada por la expresión:

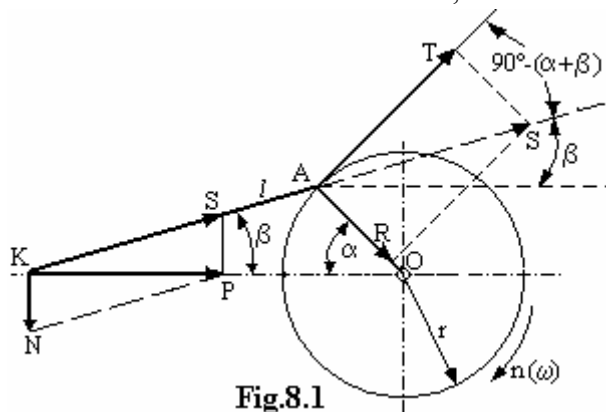


Fig.8.1

$$T = \frac{P}{\cos \beta \operatorname{sen}(\alpha + \beta)} \quad (8.1)$$

Como  $T$  depende de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ , y estos se modifican continuamente,  $T$  modifica su intensidad a medida que el botón  $A$  de la manivela realiza una vuelta completa. Por tal motivo, su momento de rotación, dado por la expresión:

$$M_m = T \cdot r \quad (8.2)$$

(8.2)

también oscilará, pudiendo representarse estas oscilaciones en un diagrama de ejes coordenados como se muestra en la figura (Fig.8.2), con los esfuerzos tangenciales en el eje de ordenadas y

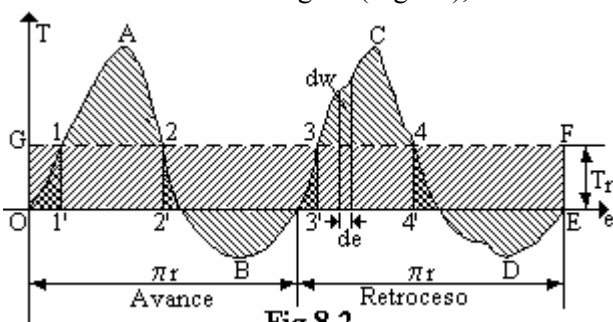


Fig.8.2

en el eje de abscisas del desarrollo de la circunferencia descrita por el botón  $A$  de la manivela. La superficie comprendida entre la curva de los esfuerzos tangenciales  $OABCDEO$ , y la línea de abscisas  $e$ , corresponde al trabajo transmitido o motor  $W_m$  realizado por la manivela en una revolución alrededor del eje  $O$ . Este trabajo es posible conocerlo a través del diagrama que realiza un aparato llamado

indicador, el cual se confecciona con los esfuerzos sobre el émbolo y el recorrido del mismo, motivo por el cual también se lo denomina *trabajo indicado*, pudiendo escribirse:

$$W_m = \int_0^{2\pi r} T.de = \text{área } OABCDEO \tag{8.3}$$

Si se supone que el trabajo resistente  $W_r$ , el cual se opone al trabajo  $W_m$  desarrollado por el motor, es producido por un *esfuerzo resistente medio*  $T_r$ , se lo podrá representar como una superficie rectangular  $OEFGO$  de base  $2\pi r$  sobre el eje de abscisas  $e$ , y altura  $T_r$  sobre el eje de ordenadas, por lo que se puede escribir:

$$W_r = T_r \cdot 2\pi r = \text{area } OEFGO \tag{8.4}$$

Estos trabajos deben ser iguales, ya que el trabajo que debe entregar el motor debe ser el necesario para vencer el resistente:

$$W_m = W_r \tag{8.5}$$

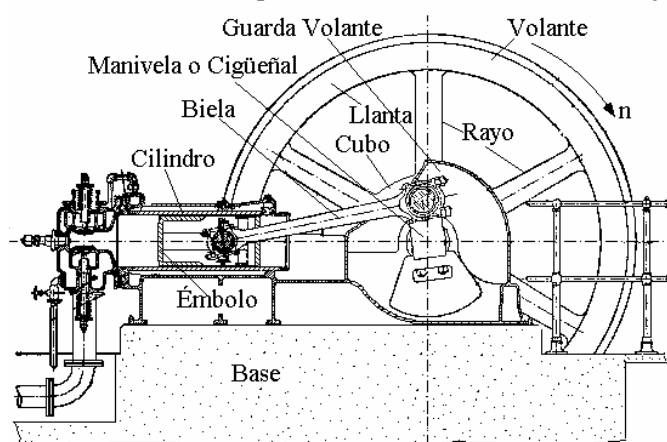
Por lo tanto, ambas superficies también deberán ser iguales, por lo que se puede escribir:

$$\text{Área } OABCDEO = \text{Área } OEFGO \tag{8.6}$$

Es decir que se puede obtener el valor de  $T_r$  igualando el segundo miembro de la (8.4) con el primer miembro de la (8.6) y haciendo pasajes de términos, resultando:

$$T_r = \frac{\text{área } OABCDEO}{2\pi r} \tag{8.7}$$

Obtenido el valor de  $T_r$  se lo traza sobre los mismos ejes coordenados del diagrama del trabajo indicado, con lo que se tiene el área del trabajo resistente en la misma escala. Analizando las distintas zonas de los diagramas, en el recorrido  $e = 2\pi r$  del botón de la manivela, que dan los trabajos  $W_m$  y  $W_r$  se observa en la figura (Fig.8.2), que es: 1- Para la zona  $GO11'$  es  $W_r > W_m$ ; 2- Para la zona  $1'122'$  es  $W_m > W_r$ ; 3- Para la zona  $2'2B3'3$  es  $W_r > W_m$ ; 4- Para la zona  $3'3C44'$  es  $W_m > W_r$ ; 5- Para  $4'4DEF$  es  $W_r > W_m$ . Es decir que la máquina acelera en 2 y 4 y desacelera en 1, 3 y 5. Durante el recorrido en el cual es  $W_m > W_r$ , el excedente de energía lo almacena el volante que se encuentra enclavado en el eje, y lo entrega cuando es  $W_r > W_m$ .



**Fig.8.3**

El almacenamiento de la energía que entrega el motor lo realiza, según se mencionara, debido a la inercia que posee la gran masa rotante del volante, y que fijamente unido al eje de la manivela de la máquina, como se observa en la figura (Fig.8.3) en la cual se muestra esquemáticamente un motor monocilíndrico con su volante, gira a la misma velocidad  $n$  que éste.

Durante la carrera resistente, el volante entrega la energía almacenada, lo que produce una reducción de la velocidad del eje de

la máquina. Cuando ingresa el vapor o se produce la combustión o explosión, es decir cuando el

motor entrega potencia, o cuando no se realiza trabajo, la velocidad del eje aumenta. Se producen por este motivo, dos velocidades extremas, una  $\omega_{max}$  máxima y una  $\omega_{min}$  mínima. Se tendrá por lo tanto que el máximo trabajo transmitido o resistente, será igual al aumento o disminución de la energía de la masa del volante, lo que produce una variación de la energía cinética del mismo. Si es  $I$  el momento de inercia del volante, la variación de la energía  $\Delta W$  que experimenta el volante, en función de las velocidades máximas y mínima, será:

$$\Delta W = \frac{1}{2} I (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$

(8.8)

Si la velocidad angular media es:

$$\omega = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2}$$

(8.9)

Desarrollando la diferencia de cuadrados, la (8.8) se puede escribir:

$$\Delta W = \frac{1}{2} (\omega_{max} + \omega_{min}) (\omega_{max} - \omega_{min})$$

(8.10)

Teniendo en cuenta la (8.9), la (8.10) resulta:

$$\Delta W = I \omega (\omega_{max} - \omega_{min})$$

(8.11)

La expresión (8.11) da la energía almacenada por el volante.

#### Grado de irregularidad o coeficiente de fluctuación $\delta$

El grado de irregularidad  $\delta$  se lo obtiene dividiendo la diferencia entre la velocidad angular máxima y la velocidad angular mínima por la velocidad angular media, siendo por lo tanto:

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega}$$

(8.12)

El grado de irregularidad  $\delta$  da valores que indican la amplitud con que varía la velocidad angular respecto a la velocidad angular media. Cuanto mayor es este coeficiente, más irregular es el funcionamiento de la máquina. Para cada tipo de máquina, según su prestación, se adopta un coeficiente de fluctuación, siendo éste de suma importancia para el dimensionamiento del volante. Según Dubbel, se tienen los siguientes valores:

Hélices de buques (por medio de motores).....	1 : 20
Máquinas de corte, bombas.....	1 : 25
Mecanismos de transmisión de talleres.....	1 : 35
Telares, máquinas de fábricas papeleras.....	1 : 40
Molinos de moliendas.....	1 : 50
Máquinas de hilar para números de hilos bajos.....	1 : 60
Máquinas de hilar para números de hilos altos.....	1 : 100
Generadores de corriente continua para alumbrado.....	1 : 100 a 1 : 120
Generadores de corriente alterna para conexión en paralelo en redes de turbinas.....	1 : 300

De la expresión (8.12) se obtiene:

$$\delta \cdot \omega = \omega_{max} - \omega_{min} \tag{8.13}$$

Reemplazando el valor de  $\omega_{max} - \omega_{min}$  dado por la (8.13) en la (8.11), se tiene la expresión:

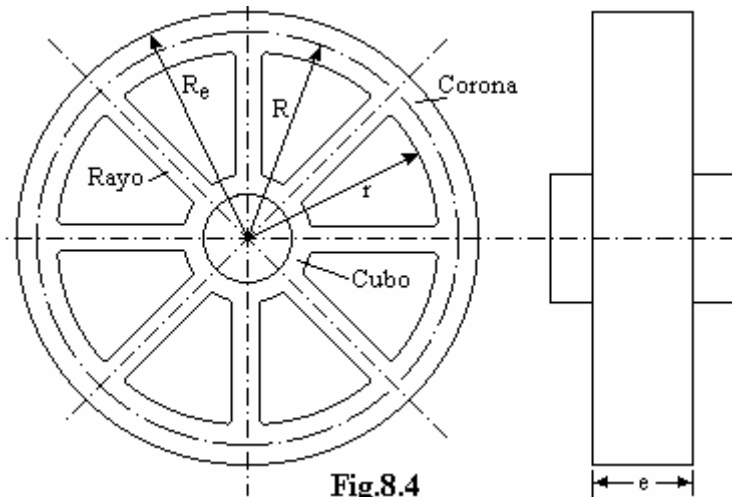
$$\Delta W = I \omega^2 \delta \tag{8.14}$$

La expresión (8.14) se utiliza para el cálculo del volante, pudiéndose observar en la misma que cuanto mayor es el momento de inercia  $I$ , para una variación determinada del trabajo  $\Delta W$ , menor es el grado de irregularidad  $\delta$ , obteniéndose un funcionamiento más uniforme, ya que  $\omega_{max} - \omega_{min}$  se hace pequeño.

Dimensionamiento del volante

Una vez fijado el grado de irregularidad  $\delta$  según el tipo de máquina para el cual se dimensionará el volante, se debe calcular el momento de inercia  $I$  del mismo. Este momento de inercia  $I$  dependerá de su forma constructiva, es decir si será un cilindro macizo o con llanta, radios y cubo. Para todos los casos se debe tener en cuenta el diámetro o radio de inercia o de giro, es decir aquel en el cual se considera concentrada la masa.

Considerando un volante cuya masa se halla concentrada en la llanta, figura (Fig.8.4), su momento de inercia es:



**Fig.8.4**

$$I = m.R^2 \tag{8.15}$$

En la (8.15) es  $R$  el radio medio de la llanta del volante y  $m$  la masa del volante, la que en función de su peso es:

$$m = \frac{G}{g}$$

(8.16)

Por lo tanto, la (8.15), según la (8.16) se puede escribir:

$$I = \frac{G}{g} R^2$$

(8.17)

Si se reemplaza en la expresión (8.14) el valor de  $I$  dado por la (8.17), se obtiene:

$$\Delta W = \frac{G}{g} R^2 \omega^2 \delta \tag{8.18}$$

(8.18)

Por ser la velocidad tangencial:

$$\omega.R = v \tag{8.19}$$

(8.19)

Por lo que la (8.18), en función de la velocidad tangencial  $v$ , de acuerdo a la (8.19), resulta:

$$\Delta W = \frac{G}{g} v^2 \delta$$

(8.20)

De la (8.20) se obtiene el peso del volante:

$$G = \frac{\Delta W \cdot g}{v^2 \cdot \delta}$$

(8.21)

Una vez obtenido el peso  $G$  del volante, como éste es igual a su peso específico  $\gamma$  por su volumen  $V$ , el cual está dado por la expresión:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot e$$

(8.22)

Por lo que resulta para el peso  $G$ :

$$\text{a) } G = \gamma \cdot V = \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \cdot e \quad \text{o también} \quad \text{b) } \frac{G}{\gamma} = V = \pi \cdot R^2 \cdot e$$

(8.23)

Las expresiones dadas por la (8.21) y (8.23) permiten dimensionar el volante conociendo  $\Delta W$  a partir del diagrama de los esfuerzos tangenciales, adoptando ya sea  $R$  o  $e$ , según las condiciones de fabricación de la máquina.Para su dimensionamiento, sin recurrir al diagrama de los esfuerzos tangenciales, en forma aproximada, se puede considerar a  $\Delta W$  como una fracción  $k$  del trabajo motor  $W_m$  efectuado en una vuelta, el cual se puede obtener en función de la potencia  $N$  del motor y del número  $n$  de vueltas por minuto de su eje. El procedimiento es el siguiente:

$$\text{a) } N_e = \frac{W_m \cdot n}{60} \quad \Rightarrow \quad \text{b) } W_m = \frac{60 N_e}{n}$$

(8.24)

Como es  $\Delta W$  una fracción  $k$  de  $W_m$ , y teniendo en cuenta la (8.24b), se puede escribir:

$$\Delta W = k \cdot W_m = k \frac{60 N_e}{n}$$

(8.25)

El factor  $k$  depende de las características del motor, del número de cilindros, grados de admisión, etc. Las expresiones (8.20) y (8.25) tienen iguales sus primeros miembros, por lo tanto se pueden igualar sus segundo y tercer miembros respectivamente:

$$\text{a) } \frac{G}{g} v^2 \delta = k \frac{60 N_e}{n} \quad \Rightarrow \quad \text{b) } G = k \frac{60 \cdot g}{\delta} \frac{N_e}{n v^2}$$

(8.26)

La velocidad tangencial  $v$  en función de  $n$  se puede escribir como:

$$v = \omega r = \omega \frac{D}{2} = 2\pi n \frac{D}{2} = \pi \cdot n \cdot D$$

(8.27)

Reemplazando el valor de  $v$  dado por la (8.27) en la (8.26), se obtiene:

$$G = \frac{k \cdot 60 \cdot g}{\delta} \frac{N_e}{\pi^2 n^3 D^2}$$

(8.28)

Haciendo:

$$K = \frac{k \cdot 60 \cdot g}{\pi^2}$$

(8.29)

La (8.28) se puede escribir como:

$$G = \frac{K}{\delta} \frac{N_e}{n^3 D^2}$$

(8.30)

La expresión (8.30) juntamente con la (8.23) permite dimensionar el volante.

El valor de  $K$  se halla tabulado en función del tipo de motor, ciclos, tiempos, número de cilindros, etc.

Dubbel da la expresión:

$$GD^2 = \frac{K}{\delta_s} \frac{N_e}{n^3} \quad \text{kgm}^2$$

(8.31)

en la cual es  $D$  el diámetro de inercia.  $GD^2$  recibe el nombre de *factor de inercia*.

Algunos de los valores medios de  $K$  dados por Dubbel son los siguientes: máquina a vapor de una sola manivela  $K = 2,5 \cdot 10^6$ ; motores ciclo Otto cuatro tiempos, de 4 cilindros  $K = 1,12$  a  $1,76 \cdot 10^6$ , de 6 cilindros  $K = 0,72 \cdot 10^6$ ; motores ciclo Diesel cuatro tiempos, simple efecto, 4 cilindros  $K = 2,7 \cdot 10^6$ , de 6 cilindros  $K = 1,6 \cdot 10^6$ .

Obtenido  $K$ ,  $N_e$ ,  $n$  y  $\delta_s$  se obtiene  $GD^2$ . Por lo general, el 90% de  $GD^2$  se encuentra en la llanta o corona del volante, estando el 10% restante distribuidos entre los rayos y cubo. Para la corona, Dubbel da el siguiente valor del factor de inercia:

$$GD^2 = 2 G ( R_e^2 + r^2 )$$

(8.32)

Siendo en la (8.32)  $R_e$  el radio exterior de la corona y  $r$  su radio interior. Dubbel aconseja para volantes de fundición velocidades tangenciales  $v \leq 30$  a  $35$  m/s; para mayores velocidades aconseja volantes de acero.

Reguladores de velocidad. Regulador pendular cónico o regulador de Watt

Como ya se mencionara, el regulador de velocidad es un mecanismo que actúa sobre los dispositivos de distribución o de admisión del motor, cuando el trabajo resistente que debe vencer el mismo aumenta o disminuye, haciendo variar el suministro de vapor o combustible de tal modo que la velocidad de rotación de la máquina permanezca constante dentro de los límites impuestos.

Según el tipo constructivo, se distinguen los *reguladores de manguito* o *pendulares cónicos*, y los *reguladores axiales* o *reguladores*

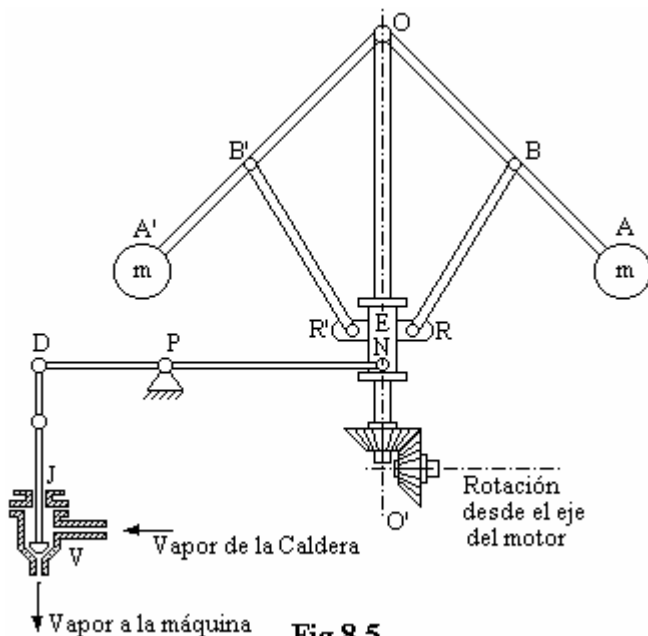


Fig.8.5

planos. En la figura (8.5) se muestra el esquema de un regulador pendular cónico o regulador de Watt, el cual posee un eje vertical  $OO'$  que recibe el movimiento de rotación desde el eje del motor a través de un sistema de engranajes, teniendo por lo tanto la misma velocidad que éste o proporcional a la misma. Los brazos  $OA$  y  $OA'$ , de igual longitud entre sí, en cuyos extremos se encuentran las masas esféricas metálicas  $m$ , están articulados en  $O$  al eje  $OO'$  por lo que giran con su misma velocidad angular. Los brazos mencionados se hallan unidos al manguito  $E$  por medio de las barras  $BR$  y  $B'R'$  mediante articulaciones que le permiten elevarse o descender, según la fuerza centrífuga que actúa sobre las masas aumente o disminuya, respectivamente. Estas barras, en su movimiento arrastran al manguito  $E$ , estando este último unido a la palanca articulada  $NPD$ , que tiene su punto de apoyo en  $P$ , la cual al ser arrastrada por el manguito transmite el movimiento al vástago  $DJ$  que cierra, disminuye o amplía en la válvula  $V$ , el paso del vapor a la máquina, con lo cual la máquina se detiene, disminuye su número de vueltas o la aumenta.

### Cálculo del desplazamiento vertical $h$ del manguito

Si se analizan las fuerzas que actúan sobre las masas cuando giran con una velocidad angular  $\omega$  según se indica en el diagrama de la figura (Fig.8.6), al variar dicha velocidad variará también la altura  $h$  del manguito.

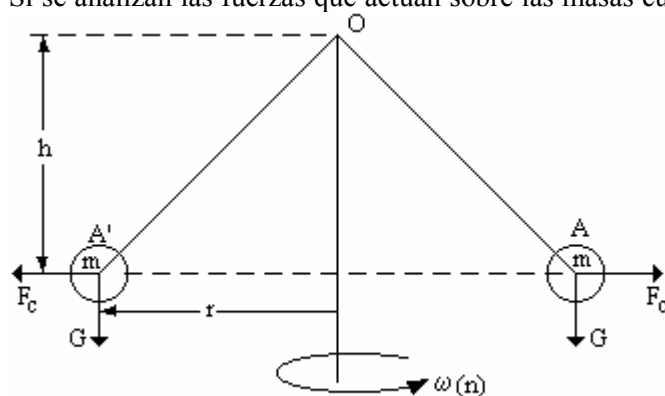


Fig.8.6

Una vez hallada la posición de equilibrio para una determinada velocidad, existe un equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan, siendo éstas el peso propio  $G$  de las masas esféricas  $m$  y la fuerza centrífuga  $F_c$ , dada por la expresión:

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

(8.33)

$$m = \frac{G}{g} \quad (8.34)$$

Pero es:

Por lo tanto, reemplazando en la (8.33) el valor de  $m$  dado por la (8.34), se obtiene:

$$F_c = \frac{G}{g} \omega^2 \cdot r$$

(8.35)

Tomando los momentos de estas fuerzas respecto del centro  $O$ , e igualando los mismos por estar en equilibrio dinámico el sistema:

$$a) F_c \cdot h = G \cdot r \quad \text{o por la (8.35)} \Rightarrow \quad b) \frac{G}{g} \omega^2 \cdot r \cdot h = G \cdot r$$

(8.36)

Operando matemáticamente en la (8.36), se obtiene:

$$h = \frac{g}{\omega^2}$$

(8.37)

Pero es:

$$(8.38) \quad \text{a) } \omega = \frac{\pi n}{30} \Rightarrow \omega^2 = \frac{\pi^2 n^2}{900} ; \quad \text{b) } g = 9,806 \text{ m/s}^2$$

Por la (8.38) la (8.37) resulta:

$$(8.39) \quad h = \frac{894,2}{n^2}$$

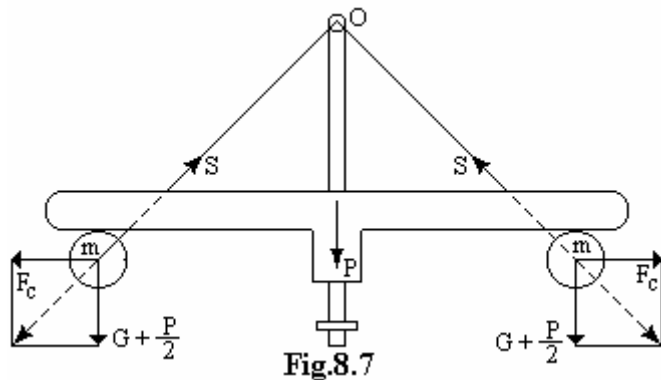
De la expresión (8.39) se puede notar que  $h$  es independiente del peso de las esferas, dependiendo únicamente de la velocidad angular  $\omega$  o de rotación  $n$ . Además se observa de la misma, que para pequeños cambios de  $n$  se obtienen variaciones apreciables de  $h$  para bajas velocidades, en tanto que para altas velocidades un gran cambio de éstas se traduce solo en pequeñas variaciones de  $h$ , o sea que disminuye la sensibilidad al aumentar el número de vueltas por minuto.

Se puede, a modo de ejemplo, confeccionar un cuadro para distintos valores de  $n$  y los correspondientes de  $h$ , obtenidos de aplicar la (8.39):

$n$	20	50	100	150	200	300	400	Vueltas por minuto
$h$	2,24	0,36	0,09	0,04	0,022	0,01	0,005	metros

#### Regulador de Watt sobrecargado

Con este regulador se logra una mayor sensibilidad. Se introduce un peso adicional que es soportado por las esferas, según se muestra en la figura (Fig.8.7). Por lo tanto, además de la fuerza centrífuga  $F_c$  y del peso  $G$  de las masas, interviene el peso adicional  $P$ , el cual es soportado por partes iguales por cada una de las esferas, es decir, cada una soporta  $P/2$ .



Por lo tanto, en el equilibrio dinámico, la suma de los momentos respecto al punto  $O$  de las fuerzas actuantes, resultan:

$$(8.40) \quad \left(G + \frac{P}{2}\right)r = \frac{G}{g}r.\omega^2.h$$

Despejando  $h$  de la (8.40), y teniendo en cuenta la (8.38), se obtiene:

$$(8.41) \quad h = \frac{G + \frac{P}{2}}{G} \frac{g}{\omega^2} = \left(1 + \frac{P}{2G}\right) \frac{894,2}{n^2}$$

Como en la (8.41) es  $1 + \frac{P}{2G} > 1$ , con este regulador se logra un mayor incremento de  $h$ , aumentando la sensibilidad del mismo.



Regulador de Porter

Es una modificación del regulador de Watt. Las masas esféricas, de peso  $G$  cada una, se encuentran en las articulaciones  $A$  y  $C$ , con una masa central de peso  $P$  de sobrecarga, según se indica en la figura (Fig.8.8a).

La fuerza centrífuga  $F_c$ , debido al movimiento de las masas, las que giran con una velocidad angular  $\omega$ , tiene la misma forma que la expresión (8.35). Las fuerzas actuantes generan momentos respecto al centro de rotación  $O$ , pudiendo realizarse para el estado de equilibrio dinámico del sistema, el siguiente análisis:

En la figura (Fig.8.8b) se construyó el diagrama del cuerpo libre, siendo  $F$  la fuerza actuante sobre cada uno de los brazos articulados del regulador, las que equilibran al peso  $P$  de la sobrecarga, según se muestra en la figura (Fig.8.8c), resultando ser:

$$F = \frac{P}{2 \cos \alpha}$$

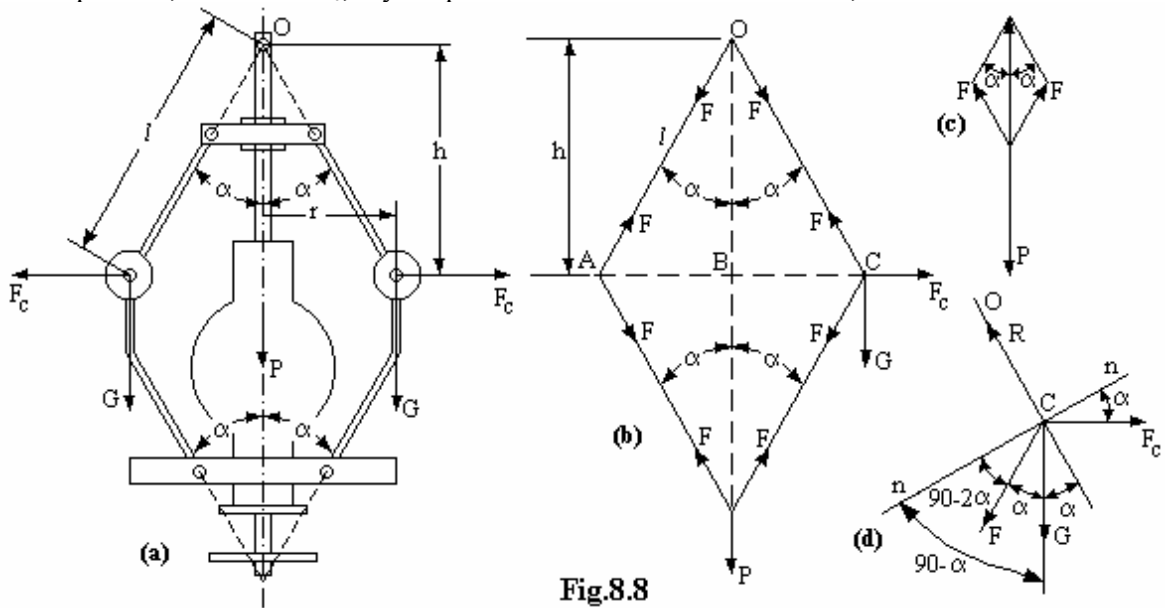
(8.42)

Por otra parte, la expresión que relaciona el radio  $r$  y la altura  $h$  con la longitud  $l$  del brazo superior es:

$$a) \quad r = l \cdot \text{sen} \alpha \quad \text{y} \quad b) \quad h = l \cdot \text{cos} \alpha$$

(8.43)

En el equilibrio, las fuerzas  $F_c$ ,  $F$  y  $G$  aplicadas en  $C$  dan una resultante  $R$ , en la dirección  $OC$ .



**Fig.8.8**

Trazando una recta normal  $n-n$  a  $OC$ , según muestra la figura (Fig.8.8d), proyectando  $F_c$ ,  $F$  y  $G$  sobre la misma y efectuando las sumatorias de las fuerzas proyectadas, teniendo en cuenta los valores de  $F_c$  y  $l$  dados por la (8.33) y la (8.43a) respectivamente:

$$F \cdot \cos(90^\circ - 2\alpha) + G \cdot \cos(90^\circ - \alpha) - \frac{G}{g} \omega^2 l \cdot \text{sen} \alpha \cdot \cos \alpha = 0$$

(8.44)

Reemplazando en la (8.44) los valores de  $F$  y de  $l \cdot \text{cos} \alpha$  dados por la (8.42) y (8.43b) respectivamente, siendo  $\cos(90^\circ - 2\alpha) = \text{sen} 2\alpha$ , se obtiene:

$$\frac{P}{2 \cos \alpha} \operatorname{sen} 2\alpha + G \cdot \omega^2 \cdot h \cdot \operatorname{sen} \alpha = 0 \quad (8.45)$$

Haciendo en la (8.45)  $\operatorname{sen} 2\alpha = 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha$ :

$$\frac{P}{2 \cos \alpha} \operatorname{sen} 2\alpha + G \operatorname{sen} \alpha - \frac{G}{g} \omega^2 h \operatorname{sen} \alpha = 0 \quad (8.46)$$

Simplificando, dividiendo por  $\operatorname{sen} \alpha$  ambos miembros y haciendo pasajes de términos en la (8.46), resulta:

$$\frac{G}{g} \omega^2 h = P + G \quad \Rightarrow \quad h = \frac{P + G}{G} \frac{g}{\omega^2} \quad (8.47)$$

La (8.47), sacando factor común  $G$  y teniendo en cuenta los valores de  $\omega$  y  $g$  dados por la (8.38), resulta finalmente:

$$h = \left(1 + \frac{P}{G}\right) \frac{894,2}{n^2} \quad (8.48)$$

Por ser  $\left(1 + \frac{P}{G}\right) > \left(1 + \frac{P}{2G}\right) > 1$  se obtiene una mayor sensibilidad para este regulador. De la expresión (8.35) se puede obtener el valor de  $\omega$ :

$$\omega^2 = \frac{F_c \cdot g}{G \cdot r} \quad \Rightarrow \quad \omega = \sqrt{\frac{F_c \cdot g}{r \cdot G}} \quad (8.49)$$

Como de la (8.38a) ya vista, se obtiene:

$$n = \frac{30}{\pi} \omega \quad (8.50)$$

Reemplazando  $\omega$  por su valor dado por la (8.49b) en la (8.50), esta última resulta:

$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{F_c \cdot g}{r \cdot G}} = \frac{30 \sqrt{g}}{\pi} \sqrt{\frac{F_c}{r \cdot G}} \quad (8.51)$$

Como es  $\sqrt{g} \approx \pi$ , se pueden simplificar en la (8.51), quedando finalmente:

$$n \cong 30 \sqrt{\frac{F_c}{r \cdot G}} \quad (8.52)$$

La expresión (8.52) da el valor que debe tener la velocidad de rotación para un determinado peso de las masas que rotan y de la fuerza centrífuga.

### Grado de irregularidad $\delta$

Al igual que en el Volante, también en el regulador de velocidad el grado de irregularidad  $\delta$  da la relación con la velocidad angular media  $\omega$  que tiene la amplitud, establecida por las velocidades angulares máxima  $\omega_{max}$  como límite superior, y mínima  $\omega_{min}$  como límite inferior, dentro de la cual oscila la velocidad del mismo. El grado de irregularidad  $\delta$  caracteriza a cada regulador de velocidad. Se tiene, por lo tanto:

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega} = \frac{n_{max} - n_{min}}{n}$$

(8.53)

Siendo en la (8.52):

$$\text{a) } \omega = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2} \quad \text{y} \quad \text{b) } n = \frac{n_{max} + n_{min}}{2}$$

(8.54)

El grado de irregularidad es factor preponderante en el buen funcionamiento de un regulador. Si  $\delta$  es muy pequeño, existen oscilaciones muy prolongadas con la variación de la carga, a veces sin llegar a la posición de equilibrio. Si es  $\delta$  muy grande, el tiempo en alcanzar la posición de equilibrio es muy elevado.

De acuerdo a Tolle, el grado de irregularidad óptimo puede conocerse mediante la fórmula:

$$\delta = 2 \sqrt[3]{\frac{S_r}{g.T^2}}$$

(8.55)

Analizando los valores de  $S_r$  y  $T$  en la (8.55): $S_r$  es la carrera reducida del manguito, siendo igual a:

$$S_r = \frac{\text{Sumatoria de todos los pesos centrífugos} \times \text{el cuadrado de sus recorridos}}{\text{Capacidad de trabajo}}$$

(8.56)

Donde es  $P$  la suma de todos los pesos centrífugos, es decir que se encuentran rotando,  $e$  al recorrido de los mismos y  $A$  a la capacidad de trabajo. Por lo tanto, la (8.56) se puede escribir como:

$$S_r = \frac{\sum P.e^2}{A}$$

(8.57)

Así también, la capacidad de trabajo  $A$  está dada por la expresión:

$$\text{a) } dA = E.ds \quad \Rightarrow \quad \text{b) } A = \int_0^s E.ds$$

(8.58)

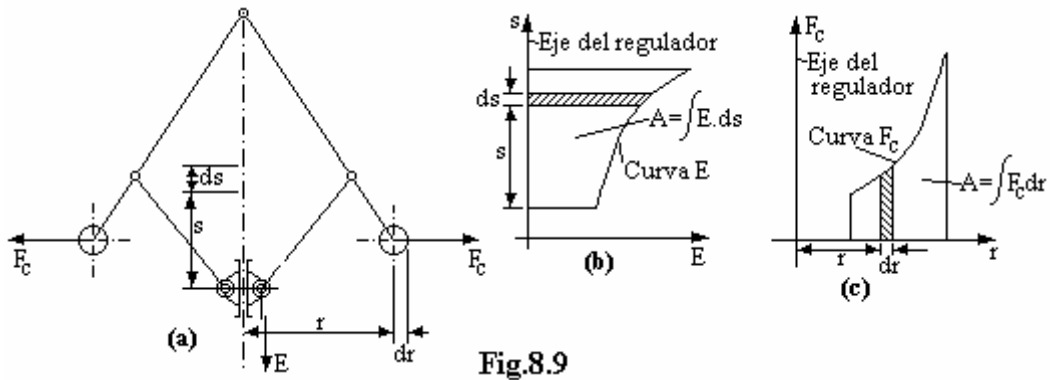


Fig.8.9

$E.ds$  es el trabajo elemental que realiza la fuerza  $E$ ;  $s$  es el recorrido del manguito. La fuerza  $E$  varía con cada posición del manguito y es denominada *energía del regulador* a pesar de ser una fuerza, y está aplicada, según se muestra en la figura (Fig.8.9a), en forma axial y hacia abajo, y equilibra a las fuerzas centrífugas. Conociendo las variaciones de  $E$  y de  $F_c$  con las posiciones  $s$  y  $r$  del manguito y de las masas en rotación respectivamente, se puede representar gráficamente la capacidad de trabajo  $A$ , como se indica en las figuras (Fig.8.9b) y (8.9c). En los casos que se equilibran  $E$  y  $F_c$ , los trabajos elementales en un deslizamiento  $ds$  del manguito y una variación  $dr$  de la posición de las masas deben ser iguales, por lo que teniendo en cuenta la (8.58) se puede escribir:

$$a) \quad dA = E.ds = F_c.dr \quad \Rightarrow \quad b) \quad A = \int E.ds = \int F_c.dr \quad (8.59)$$

$T$  es el tiempo en segundos, que tarda la máquina marchando en vacío con admisión máxima, para adquirir, partiendo del reposo, la velocidad de régimen normal, y se lo obtiene considerando la potencia  $N$  del motor, la masa  $M$  del volante y la velocidad circunferencial  $v$  del baricentro de la corona del volante.

Si se tiene la potencia  $N$  en CV, la masa  $M$  en  $kg.s^2/m$  y  $v$  en m/s, siendo  $\frac{1}{2} L$  la potencia media utilizada para la puesta en marcha del motor, en  $Kgm/s$ , será:

$$a) \quad \frac{1}{2} M.v^2 = \frac{1}{2} L.T \quad \Rightarrow \quad b) \quad T = \frac{M.v^2}{L} \quad (8.60)$$

Por ser:  
(8.61)

$$L = 75N$$

Reemplazando en la (8.60) el valor de  $L$  dada por la (8.61), se obtiene:

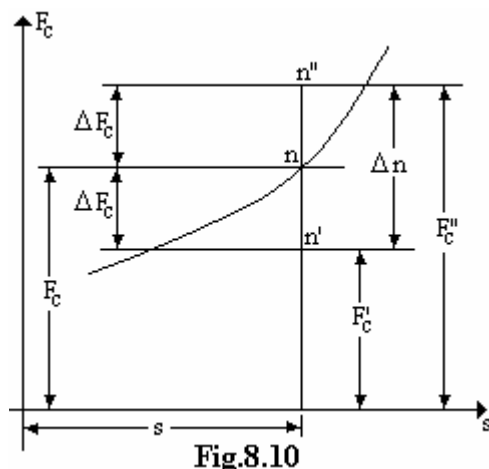
$$T = \frac{M.v^2}{75N} \quad (8.62)$$

Reemplazando los valores de  $S_r$  y de  $T$  en la (8.55), se obtiene:

$$\delta = 2 \sqrt[3]{\frac{75N \sum P.e^2}{g.M.v^2 \int_{r_1}^{r_2} F_c.dr}} \quad (8.63)$$

**Grado de insensibilidad  $\epsilon$**

Debido a las resistencias que oponen el rozamiento propio y el mecanismo de maniobra del regulador, el manguito del regulador permanece en reposo si la variación de la velocidad instantánea de rotación del eje a un nuevo valor  $n$  es tal, que la fuerza centrífuga  $F_c$  correspondiente a la misma, no es suficiente para vencerlas. Es decir que para que el manguito se mueva, deberá ejercerse una fuerza centrífuga superior o inferior a  $F_c$  en un  $\Delta F_c$ , ya sea que aumente o disminuya la velocidad de rotación del eje respectivamente, o en su defecto, hasta no llegar a la misma, el manguito permanecerá en reposo. En la figura (Fig.8.10) se observa que aumentando  $F_c$  en  $\Delta F_c$  se obtiene:



$$F_c'' = F_c + \Delta F_c \quad (8.64)$$

Disminuyendo a  $F_c$  un  $\Delta F_c$ , se obtiene:

$$F_c' = F_c - \Delta F_c \quad (8.65)$$

A la fuerza centrífuga  $F_c''$  le corresponde una velocidad de rotación  $n''$  y a  $F_c'$  le corresponde la velocidad  $n'$ .

Es decir, que en tanto no se alcancen las velocidades  $n''$  y  $n'$  el manguito no se desplazará de su posición anterior. Por lo tanto, existe un intervalo  $\Delta n$  en la variación de la velocidad de rotación del eje, dentro del cual el regulador no cambia de posición, no produciéndose el deslizamiento del manguito, siendo el mismo:

$$\Delta n = n'' - n' \quad (8.66)$$

El cociente entre el intervalo  $\Delta n$  durante el cual el regulador permanece insensible a las variaciones de velocidades, y la velocidad instantánea  $n$  a la cual tendría que producirse el movimiento del manguito, se denomina *grado de insensibilidad*  $\varepsilon$  del regulador, por lo que se puede escribir:

$$\varepsilon = \frac{n'' - n'}{n} = \frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta \omega}{\omega} \quad (8.67)$$

Por ser  $F_c = f(n^2)$ , se puede escribir:

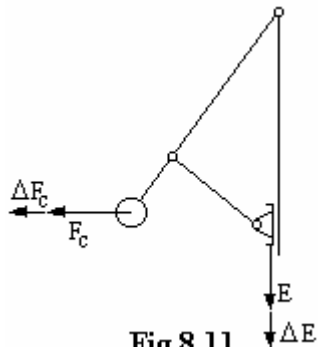
$$\varepsilon = \frac{F_c'' - F_c'}{F_c} = \frac{\Delta F_c}{F_c} \quad (8.68)$$

El grado de insensibilidad es el grado de respuesta del regulador a una variación de su velocidad para una posición dada.

### Energía E del regulador

La si bien  $E$  es una fuerza, es denominada *energía del regulador*, siendo la equilibrante de las fuerzas centrífugas  $F_c$  que se producen a la velocidad de rotación de las masas del regulador. Está ocasionada en su mayor parte por la carga elástica de los resortes del

manguito, pudiendo obtenerse por peso del manguito o por cálculo. Por lo tanto  $E$  es proporcional a  $F_c$ , y también lo serán los incrementos  $\Delta E$  y  $\Delta F_c$  de ambas, las que se indican en la figura (Fig.8.11), por lo que se puede escribir:



$$(8.69) \quad \begin{aligned} \text{a) } \frac{E}{F_c} &= \frac{\Delta E}{\Delta F_c} & \Rightarrow & & \text{b) } \frac{\Delta F_c}{F_c} &= \frac{\Delta E}{E} \end{aligned}$$

Pero, teniendo en cuenta la expresión (8.68b), de la (8.69) se deduce:

$$(8.70) \quad \begin{aligned} \text{a) } \varepsilon &= \frac{\Delta E}{E} & \Rightarrow & & \text{b) } \Delta E &= \varepsilon E \end{aligned}$$

Como por la (8.67) se tiene el valor de  $\varepsilon$  igual al cociente de  $\Delta \omega$  y  $\omega$ , la (8.70b) resulta:

$$(8.71) \quad \Delta E = \frac{\Delta \omega}{\omega} E$$

$\Delta E$  es la fuerza que mueve el manguito o hace deslizar el manguito, por lo que deberá ser lo más grande que sea posible, pero el grado de sensibilidad  $\varepsilon$  debe ser tan pequeño como sea posible, por lo que deberá ser  $E$  grande, según se deduce de la (8.70b).  $\Delta E$  se emplea para vencer las resistencias  $W$  de los órganos que comandan el manguito y las fuerzas  $R$  de rozamiento del regulador, siendo:

$$(8.72) \quad \Delta E = W + R$$

Teniendo en cuenta la (8.70a), reemplazando el valor de  $\Delta E$  dado por la (8.72), resulta:

$$(8.73) \quad \varepsilon = \frac{W + R}{E}$$

$W$  es la fuerza útil para mover los mecanismos del regulador, por lo que las fuerzas  $R$  de rozamiento deben ser lo más pequeñas posibles, utilizándose los elementos que ofrezcan menores coeficientes de rozamiento entre las partes que deben deslizar entre sí, en los reguladores de acción directa. Pero se tiene que cuando  $\varepsilon$  es pequeña,  $W$  también es pequeña, motivo por el cual se intercala un servomotor cuando esta última no alcanza para accionar los mecanismos del regulador, resultando un regulador de *acción indirecta*, el que se describirá más adelante.

Una vez determinado el grado de insensibilidad  $\varepsilon$ , se define como grado de irregularidad total  $\delta_T$  del regulador, a la suma del grado de irregularidad  $\delta$  y al grado de insensibilidad  $\varepsilon$ :

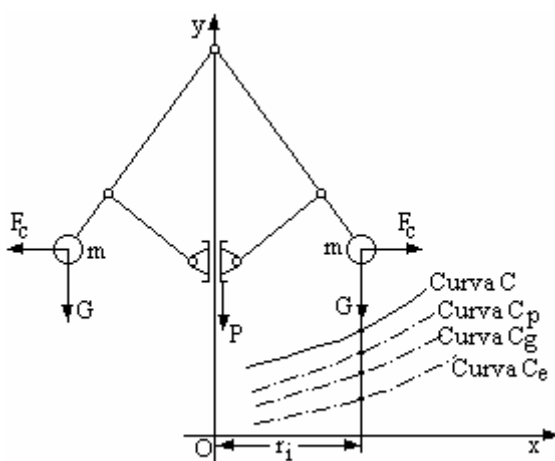


Fig.8.12

$$(8.74) \quad \delta_T = \delta + \varepsilon$$

**Estabilidad y estática**

**Equilibrio de Fuerzas en el regulador:**  
En el estudio de un regulador debe tenerse

en cuenta el comportamiento del mismo cuando aumenta o disminuye  $n$ , y por lo tanto  $F_c$ . Observando en la figura (Fig.8.12), las distintas posiciones de las masas esféricas  $m$ , y de las fuerzas actuantes debido al peso  $G$  de las mismas, del peso  $P$  del manguito y al rozamiento  $R$  de los órganos deslizantes, se tiene que la fuerza centrífuga que equilibra dinámicamente las fuerzas centrípetas resultantes de la acción de las fuerzas  $G$ ,  $P$  y  $R$ , es la suma de las fuerzas centrífugas parciales que equilibran cada una de las fuerzas mencionadas, y por lo tanto se tendrá:  $F_{cg}$  = fuerza centrífuga que equilibra  $G$ ;  $F_{cp}$  = fuerza centrífuga que equilibra  $P$ ;  $F_{ce}$  = fuerza centrífuga que equilibra  $R$ .

**Curvas C:** Para estudiar la influencia de las fuerzas centrípetas originadas por  $G$ ,  $P$  y  $R$ , sobre el funcionamiento del regulador, se toman ejes coordenados coincidentes la ordenada y con el eje del regulador y la abscisa  $x$  normal al mismo. Para cada posición de las masas esféricas y el manguito, es posible trazar una curva para cada una de las fuerzas centrífugas  $F_{cg}$ ,  $F_{cp}$  y  $F_{ce}$ , uniendo los puntos de intersección de las normales a  $Ox$  con las normales a  $Oy$ , correspondientes a cada uno de los valores de  $F_{cg}$ ,  $F_{cp}$  y  $F_{ce}$

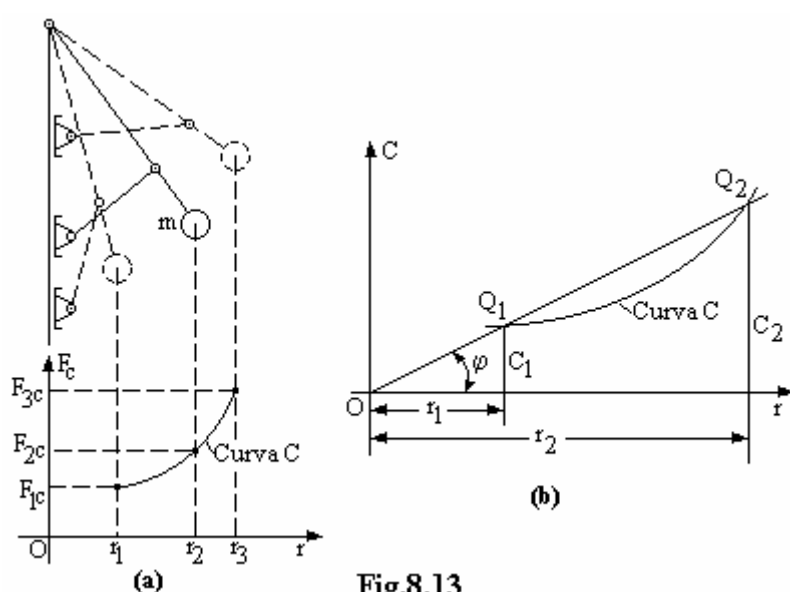


Fig.8.13

sobre el eje  $Oy$  y a cada valor de  $r_i$  sobre el eje  $Ox$ . En la figura (Fig.8.12) se observan estas curvas,  $C_p$ ,  $C_g$  y  $C_e$ , constituyendo una familia de curvas, denominadas curvas características del regulador o curvas  $C$ . La curva  $C$  que se observa en la misma figura, es la curva característica de la fuerza centrífuga total  $F_c$ , la que resulta de la sumatoria de las curvas

parciales  $C_p$ ,  $C_g$  y  $C_e$ .

En la figura (Fig.8.13a) se muestran tres posiciones de las masas esféricas, cuyas distancia de sus centros al eje de rotación, sobre el eje de abscisas, son  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$ , a las que les corresponden las fuerzas centrífugas  $F_{1c}$ ,  $F_{2c}$  y  $F_{3c}$ , respectivamente sobre el eje de ordenadas, lo que permite construir la curva  $C$  que pasa por los puntos de intersección de ambas coordenadas.

La figura (8.13b) muestra la curva  $C$  obtenida para el regulador entre las dos posiciones extremas de mínima y máxima velocidad de rotación de las masas cilíndricas  $m$ . Por el origen  $O$  se ha trazado un radio vector que corta a la curva  $C$  en los puntos  $Q_1$  y  $Q_2$ , y forma con el eje de abscisas  $Or$  el ángulo  $\varphi$ . Por lo tanto, se tiene de la figura:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{C_1}{r_1} = \frac{C_2}{r_2} = \frac{C}{r}$$

(8.75)

Por ser  $C$  la representación gráfica de  $F_c$ , por la (8.33) y la (8.75), se puede escribir:

$$(8.76) \quad \text{a) } C = F_c = m.r.\omega^2 \quad \Rightarrow \quad \text{b) } \operatorname{tg}\varphi = \frac{C}{r} = \frac{F_c}{r} = m.\omega^2$$

Por lo tanto, en la expresión (8.52), reemplazando  $F_c/r$  por su valor  $\operatorname{tg}\varphi$ , resulta:

$$(8.77) \quad n \approx 30 \sqrt{\frac{1}{G} \operatorname{tg}\varphi} = \frac{30}{\sqrt{G}} \sqrt{\operatorname{tg}\varphi}$$

Como el peso  $G$  es una constante, en la (8.77) se hace:

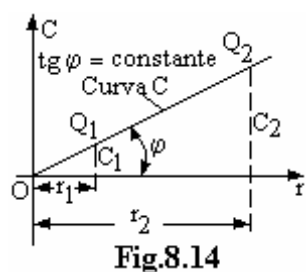
$$(8.78) \quad \frac{30}{G} = K$$

Por lo que la (8.77), reemplazando  $30/G$  por su valor  $K$ , resulta finalmente:

$$(8.79) \quad n = K \sqrt{\operatorname{tg}\varphi} = K (\operatorname{tg}\varphi)^{\frac{1}{2}}$$

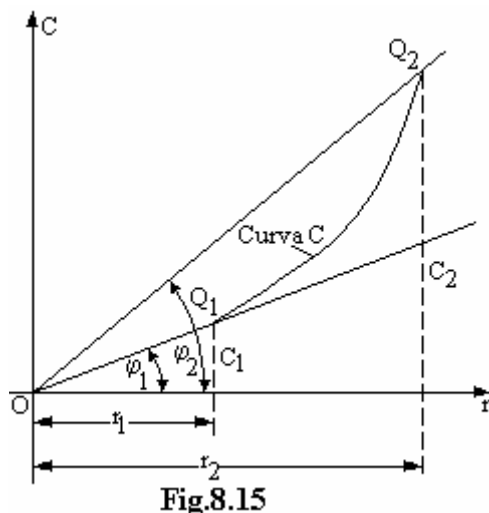
Es decir que la velocidad angular de un regulador de velocidad depende del ángulo  $\varphi$  que forma el radio vector trazado desde  $O$  a un punto de la curva  $C$  y el eje  $Or$ .  
Analizando las distintas posibilidades que presentan estas curvas, se observa:

1- Si el ángulo  $\varphi$  permanece constante para cualquier punto de la curva  $C$ , la velocidad



angular  $\omega$ , o el número  $n$  de vueltas por minuto, será también constante cualquiera sea la carga o par resistente; la curva  $C$  tiene la forma, para este caso, de una recta que pasa por  $O$ , según se indica en la figura (Fig.8.14). Es decir que para cualquier posición del manguito la velocidad angular es la misma, siendo la regulación *astática*, o también *isócrona* o *isodrómica*, por lo que el equilibrio solo se logra para un valor determinado de ésta. Para otros valores, la regulación es

inestable, ya que al experimentar la velocidad de rotación del eje del motor un pequeño aumento, el manguito se eleva hasta la posición más alta, descendiendo hasta su posición más baja cuando disminuye la misma, por lo que no se logra en ningún caso, la posición de equilibrio, siendo el regulador del sistema *todo o nada*. Este tipo de regulador es inservible para máquinas motrices, ya que no se obtiene una regulación gradual de la velocidad.



2- Para que un regulador pueda cumplir su cometido y obtener una regulación gradual, es preciso que a cada posición del manguito le corresponda una velocidad de rotación  $n$  distinta. Es decir, a medida que se separan las masas centrífugas  $m$ , aumenta el radio  $r$  de rotación de su baricentro, aumentando a su vez la fuerza centrífuga  $F_c$ . También el ángulo  $\varphi$  aumenta progresivamente, según se indica en la



figura (Fig.8.15), y por lo tanto su tangente, siendo la regulación *estática*. El funcionamiento del regulador es *estable* en cualquier posición del manguito, existiendo una regulación gradual que disminuye la alimentación del motor cuando su velocidad aumenta y aumentando la alimentación cuando la velocidad disminuye. De la figura (Fig.8.15), se observa que la condición de estabilidad del regulador se cumple para las siguientes relaciones:

$$(8.80) \quad \text{a) } r_2 > r_1; \quad \text{b) } \varphi_2 > \varphi_1, \quad \text{c) } \operatorname{tg} \varphi_2 > \operatorname{tg} \varphi_1$$

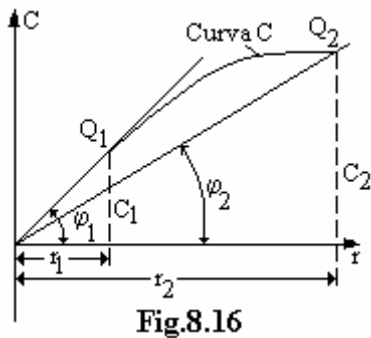


Fig.8.16

3- En la figura (Fig.8.16), se muestra una curva  $C$  convexa, en la que se puede observar, que cuando aumenta el radio  $r$  por efecto de la velocidad de rotación del motor, el ángulo  $\varphi$  disminuye, y por lo tanto disminuye su tangente. Por lo tanto, a medida que el manguito se desplaza a su posición más baja, la velocidad de rotación  $n$  aumenta y  $r$  disminuye, lo que corresponde a un regulador inestable, inservible para una regulación gradual. De la figura (Fig.8.16), se observa:

$$(8.81) \quad \text{a) } r_2 > r_1; \quad \text{b) } \varphi_1 > \varphi_2; \quad \text{c) } \operatorname{tg} \varphi_1 > \operatorname{tg} \varphi_2$$

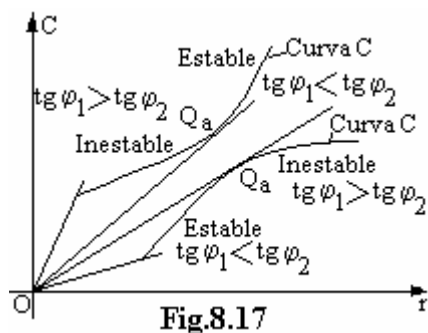


Fig.8.17

4- En la figura (Fig.8.17) las curvas  $C$  corresponden a un regulador, que para una cierta posición del manguito, se comporta en forma estable para una porción de la curva, y para otra, en forma inestable. El punto  $Q_a$ , punto de tangencia, es un punto astático; en las dos posiciones infinitamente próximas correspondientes a este punto, la velocidad angular  $\omega$  es constante cualquiera sea el par resistente.

Antes de  $Q_a$  en la curva superior, el regulador es inestable, siendo:

$$(8.82) \quad \text{a) } r_2 > r_1; \quad \text{b) } \varphi_1 > \varphi_2; \quad \text{c) } \operatorname{tg} \varphi_1 > \operatorname{tg} \varphi_2$$

Después del punto  $Q_a$ , es estable, siendo:

$$(8.83) \quad \text{a) } r_2 > r_1; \quad \text{b) } \varphi_1 < \varphi_2; \quad \text{c) } \operatorname{tg} \varphi_1 < \operatorname{tg} \varphi_2$$

En la curva inferior, antes del punto  $Q_a$ , el regulador es estable, siendo:

$$(8.84) \quad \text{a) } r_2 > r_1; \quad \text{b) } \varphi_1 < \varphi_2; \quad \text{c) } \operatorname{tg} \varphi_1 < \operatorname{tg} \varphi_2$$

Después del punto  $Q_a$  es inestable, siendo:

$$(8.82) \quad \text{a) } r_2 > r_1; \quad \text{b) } \varphi_1 > \varphi_2; \quad \text{c) } \operatorname{tg} \varphi_1 > \operatorname{tg} \varphi_2$$

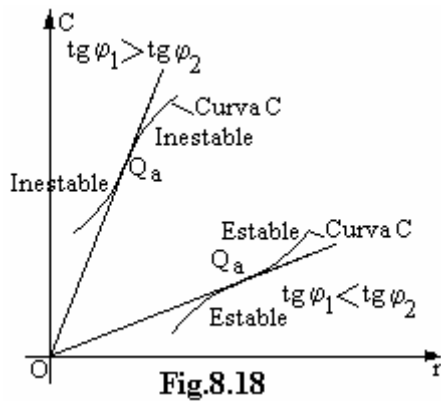


Fig.8.18

5- Si la curva  $C$  presenta un punto de inflexión en  $Q_a$ , como muestra la figura (Fig.8.18), el regulador, si es estable, seguirá siendo estable luego de dicho punto, y si es inestable, seguirá siendo inestable. Para la condición de inestabilidad, en la curva superior, en cualquier posición del manguito es:

$$\text{a) } r_2 > r_1; \quad \text{b) } \varphi_1 > \varphi_2; \quad \text{c) } \operatorname{tg} \varphi_1 > \operatorname{tg} \varphi_2 \quad (8.83)$$

En la curva inferior, para la condición de estabilidad, es para cualquier posición del

manguito:

$$\text{a) } r_2 > r_1; \quad \text{b) } \varphi_1 < \varphi_2; \quad \text{c) } \operatorname{tg} \varphi_1 < \operatorname{tg} \varphi_2 \quad (8.84)$$

En los reguladores de acción directa estudiados, debido a las masas, palancas, válvulas y resortes que actúan, las fuerzas que se deben realizar son grandes, por lo que se tiene un regulador voluminoso. Además el grado de insensibilidad debe ser pequeño para lograr una rápida respuesta ante cualquier variación de la velocidad. Pero por la gran inercia de este regulador, existe el peligro de *penduleo*, el cual es un fenómeno que aparece cuando la válvula de admisión sobrepasa en ambos sentidos, la posición asignada, oscilando alrededor de ella entre dos posiciones extremas, no llegando al equilibrio, resultando por lo tanto que un regulador de acción directa y pequeño grado de insensibilidad es inestable. Y si para contrarrestar esta situación se le aumenta el grado de insensibilidad, se afecta la precisión del regulador.

**Estabilidad del regulador:** Con el fin de lograr estabilidad en este regulador, se utiliza un *amortiguador*, el que se indica en la figura (Fig.8.19), estando compuesto por un cilindro que contiene aceite u otro fluido de viscosidad elevada, el cual opone resistencia al movimiento de un émbolo que se desplaza dentro del mismo. La válvula  $V$  regula la abertura del orificio que deja escurrir el aceite fuera del cilindro, con lo que se logra una mayor o menor velocidad de escurrimiento, y por lo tanto en el desplazamiento del émbolo.

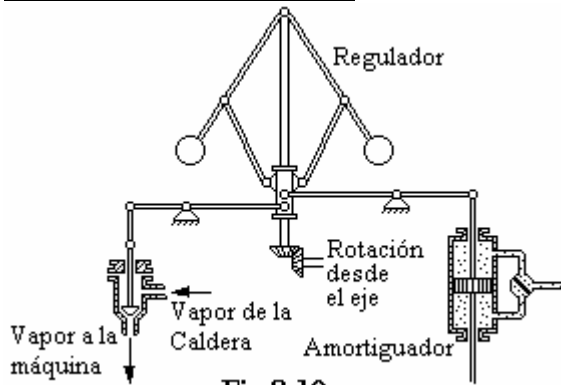
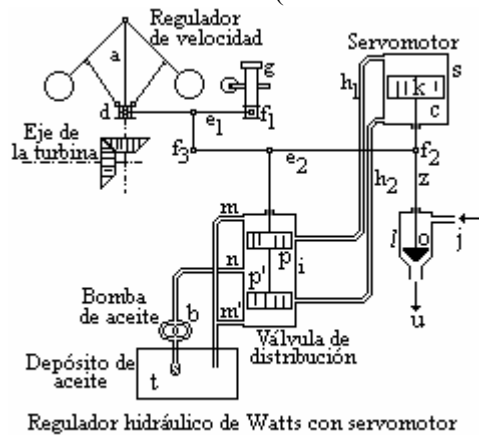


Fig.8.19

La resistencia del aceite al desplazamiento del pistón crece en relación directa con la velocidad de este último, por lo que si la magnitud del trabajo resistente varía apreciablemente, el amortiguador hace que el manguito se mueva lentamente, absorbiendo las pequeñas perturbaciones eventuales que puedan producirse, sin que intervenga el mecanismo de admisión de vapor.

**Regulador de acción indirecta:** A los efectos de evitar el inconveniente que se presentaban con los reguladores de acción directa, se han desarrollado reguladores denominados de acción indirecta, como ya se mencionara precedentemente, los cuales a los efectos de amplificar la acción del regulador, actúan sobre un elemento intermedio, por lo general un servomotor hidráulico, siendo este último el que actúa sobre el mecanismo de admisión, cuando percibe la variación de la velocidad de rotación que indica el regulador. A continuación, en el esquema de la figura (Fig.8.20), se indica como está constituido y como funciona un regulador de acción indirecta.

El regulador centrífugo *a* varía la posición del manguito *d* levantándolo si aumenta la velocidad de rotación del motor (disminución de la carga). Mientras el punto de apoyo  $f_1$  de la palanca  $e_1$  esté fijo, el punto  $f_3$  se levantará y con él, el pistón *p* de la válvula *i* de distribución del aceite que envía a presión la bomba *b* penetrando por el conducto *n* y puede retornar por el conducto *m* al depósito de aceite *t*. En estas condiciones el aceite que ingresa por *n* a la válvula *i*, pasará por el conducto  $h_1$  al cilindro *s* del servomotor, actuando sobre la cara superior del pistón *k*, el cual desplaza el vástago *z* cerrando parcialmente, con el obturador *o*, la válvula de regulación del vapor *l* disminuyendo el caudal de la cañería de llegada de vapor *j-u*. El aceite que se encuentra en la parte inferior *c* del cilindro *s* retorna por  $h_2$  y sale por *m'* al depósito *t* de la bomba. Como se suministra menos vapor, la potencia disminuye

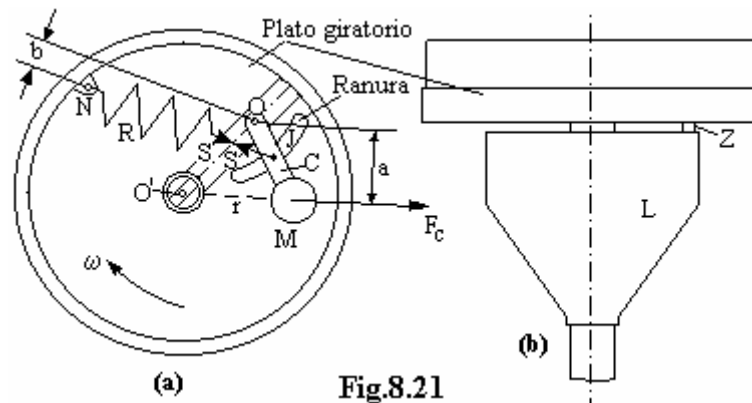


Regulador hidráulico de Watts con servomotor  
**Fig.8.20**

adecuándose a la carga, el número de revoluciones que aumentaba descendiendo nuevamente a su valor normal, pero como el manguito *d* del regulador de velocidad también descende, se volvería a abrir la válvula *l*, pero como el punto  $f_2$  ha descendido, la nueva posición del manguito *d* se ha ajustado a la nueva situación,  $f_3$  descenderá y el pistón *p* obturará nuevamente el conducto  $h_1$ , y luego de unas pocas oscilaciones amortiguadoras, queda el sistema en una nueva posición de equilibrio. Si la velocidad de rotación disminuye por el aumento de la cupla resistente, el proceso se repite pero en sentido contrario. Se puede notar que el esfuerzo de apertura de la válvula de ingreso de vapor lo hace la bomba *b* de aceite. Se puede variar la posición de  $f_1$  mediante un tornillo *g* fijando una nueva velocidad de la máquina, ya sea manualmente o desde el tablero incorporando un motor eléctrico al tornillo *g*.

### Regulador axial de fuerza centrífuga

El regulador axial de fuerza centrífuga, cuyo esquema simplificado se muestra en la figura (Fig.8.21), es un regulador plano, constituido por un plato giratorio, el cual rota, en equilibrio dinámico, a la velocidad angular  $\omega$  alrededor del eje  $O'$ , según se indica en la figura (Fig.8.21a); una masa esférica *M*, que se encuentra en el extremo de la varilla *C*, la cual está articulada en *O*, pudiendo rotar alrededor de este eje, el cual es paralelo al eje principal  $O'$  de rotación; un resorte *R*, cuya tensión se puede regular, se encuentra anclado en *N* y sujeta por el otro extremo a la varilla *C*, sobre la cual ejerce la tracción *S*. A la varilla *C* se encuentra fijado un vástago *Z* perpendicular a la misma, el cual se puede desplazar por la ranura *J* cuando se desplaza la varilla *C*.



**Fig.8.21**

Si la velocidad angular  $\omega$  aumenta, también aumentará la fuerza centrífuga  $F_c$ , la que está dada por la expresión:

$$F_c = M \cdot r \cdot \omega^2 = \frac{G}{g} \cdot r \cdot \omega^2$$

(8.85)

Esta fuerza hace desplazar a la masa *M*, venciendo la tensión *S* del resorte *R*. El vástago *Z*, el que se indica en la figura (Fig.8.21b), se desplaza actuando sobre el mecanismo *L*, el que a su

vez actúa sobre los órganos de admisión, disminuyendo la potencia del motor, con lo cual vuelve a disminuir la velocidad angular  $\omega$ , disminuyendo al mismo tiempo la fuerza centrífuga  $F_c$  hasta que su momento respecto a  $O$  es equilibrado por el correspondiente a la tensión  $S$  del resorte  $R$  según la expresión:

$$\frac{G}{g} r \cdot \omega^2 \cdot a = S \cdot b$$

(8.86)

con lo que se logra la regulación automática.

-----()-----

Apuntes de clases extractados de la siguiente bibliografía

TÍTULO	AUTOR	EDITORIAL
- Manual del Constructor de Máquinas	H. Dubbel	Labor
- Elementos de Máquinas	Dr. Ing. O. Fratschner	Gustavo Gili
- Proyecto de Elementos de Máquinas	M. F. Spotts	Reverté
- Manual del Ingeniero Hütte II A	Academia Hütte	Gustavo Gili
- Cálculo de Elementos de Máquinas	Vallance-Doughtie	Alsina
- Diseño de Máquinas	Hall-Holowenco-Lau	McGraw-Hill
- Manual del Ingeniero Mecánico de Marks	Baumeister y Marks	Uteha
- Diseño en Ingeniería Mecánica	J. Shigley	McGraw-Hill
- Elementos de Máquinas	Pezzano-Klein	El Ateneo
- Mecánica Técnica y Mecanismos	L.A. Facorro Ruiz	Melior
- Fundamentals of Mechanical Design	M. Phelan	McGraw-Hill
- Máquinas Motrices Generadores de Energía Eléctrica	Ramírez Vázquez	CEAC
- Teoría de los Motores Térmicos	Mario Ninci	Teuco