
MOTORES DE VIENTO

FUNCIÓN DE LOS CONTRAPESOS APLICADOS EN LA VARILLA

SUMARIO. — 1. Propósitos. — 2. Los contrapesos en un motor de viento, aplicados en la varilla. — 3. Un método racional para estimar la utilidad de los contrapesos. — 4. Resistencia vertical de cargas y fuerzas de inercia alternativas, con contrapesos. — 5. Resistencia tangencial de cargas e inercia con contrapesos. — 6. Trabajo motor y trabajo resistente tangencial, con contrapesos. — 7. Resistencias y trabajos, sin contrapesos. — 8. Los contrapesos facilitan el arranque. Advertencia. — 9. Los contrapesos, para los pozos de gran profundidad. — 10. Los contrapesos, disminuyen las resistencias pasivas. — 11. Los contrapesos, reguladores del movimiento. — 12. Los contrapesos para la conservación de los motores y para los motores muy usados. — 13. Sobre experiencias realizadas.

1. Propósitos. — La colocación de los contrapesos aplicados en la varilla de un motor de viento, es un invento útil del señor Jacobo Berchadsky, joven estudiante de la Facultad de Agronomía de La Plata, a cuyo gentil pedido extendo el presente informe, que por el interés y calidad del asunto, constituye un pequeño estudio racional elemental.

Explico aquí, en breves frases, en que consisten los susodichos contrapesos y cuales deben ser las proporciones de las masas que los forman; pongo en duda su utilidad en todos los casos, señalando la influencia que ejercen las nuevas masas en la variación de las velocidades y en el origen de nuevas fuerzas de inercia; represento gráficamente los trabajos del motor ordinario, poniendo así en evidencia su irregularidad, y muestro cómo se corrige esta grave falla mediante los contrapesos,

logrando un trabajo más regular y un movimiento más uniforme.

Gráfica y analíticamente explico, cómo facilitan los contrapesos el arranque, haciendo aptos a los motores para elevar una columna mayor de agua, y cómo disminuyen los choques, frotamientos y vibraciones, asegurando la conservación de los motores y aumentando su rendimiento; señalo y fundo el caso típico, de mayor utilidad de los contrapesos, y, deduzco el método racional para valorar numéricamente el grado de utilidad de los contrapesos en un motor, en sustitución a los métodos imprecisos o incompletos.

Siquiera sea con aproximación, y como etapa para un estudio más completo, en este esbozo, pretendo, establecer por el raciocinio las conclusiones que la experiencia debe confirmar o corregir; analizar una cuestión útil de mecánica aplicada, muy compleja a pesar de su aparente sencillez, en la que se descubre una variedad de aspectos distintos, todos interesantes, que vistos cada uno, permiten conocer mejor aquella; ofrecer un ejemplo del método racional para el estudio de las máquinas agrícolas, destinado a mejor concepto por su claridad, concisión y generalidad, y, por último, prestigiar la cultura técnica, demostrando, cómo ella puede guiar y acompañar eficazmente las observaciones e investigaciones en problemas de índole rural.

2. Los contrapesos en un motor de viento, aplicados en la varilla. — El motor de viento del cual representa la (fig. 1), el esquema de algunos de sus órganos principales, funciona transformando el movimiento circular de la rueda motriz en rectilíneo alternativo, sencillamente, mediante un sistema manivela y biela. Podría ser también como ocurre en los mejores motores, mediante un sistema reductor de engranajes.

Pasando la manivela del punto muerto inferior al superior en la carrera ascendente, el motor realiza su trabajo elevando la varilla de peso V y la columna de agua

de peso *A*; del punto muerto superior al inferior, en la carrera descendente, no se opone la varilla al movi-

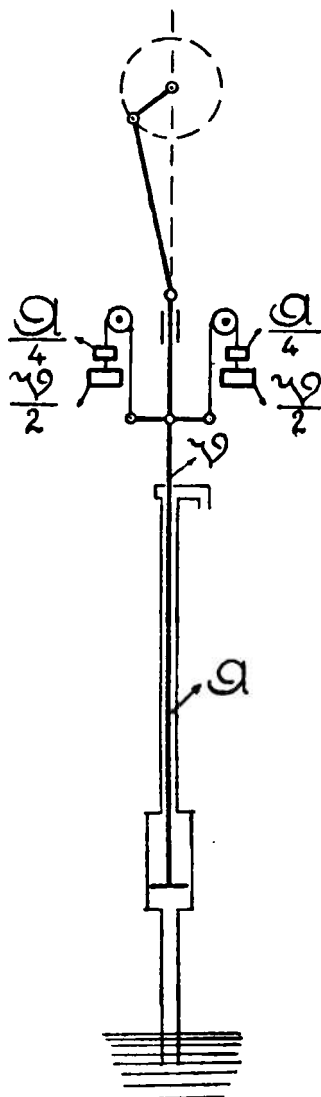


Fig. 1

miento, sino que ayuda a éste, aumentando su velocidad; en marcha normal, la velocidad aumenta en la

carrera descendente justamente lo que pierde inmediatamente después en la ascendente.

El joven Berchadsky, ha observado y estudiado prácticamente el trabajo y la marcha de estos motores, y ha pensado en las ventajas que reportaría la colocación de dos contrapesos en la forma que ilustra la figura.

Se ha dicho él: siendo V el peso de la varilla, un peso $\frac{V}{2}$ en cada lado, aplicado en ella y tirando hacia arriba, puede servir para sostenerla en cualquier posición de ambas carreras, y ahorrar en el motor el trabajo necesario para elevarla.

Más aún; como en la carrera descendente el motor marcha vacío y en la ascendente con toda la carga líquida ¿qué sucedería si se aumentase el peso total de los contrapesos en $\frac{A}{2}$ agregando a cada uno $\frac{A}{4}$? Que el motor, sólo tendría que vencer en la carrera ascendente una resistencia de $\frac{A}{2}$, y en el descenso otra igual de $\frac{A}{2}$ consistente en el peso adicional, haciendo, en las dos carreras el mismo trabajo.

3. Un método racional para estimar la utilidad de los contrapesos.— Sabido es que la presión del viento sobre un m^2 . varía proporcionalmente al cuadrado de la velocidad: $P = k_1 v^2$. Si el viento incide sobre las paletas de la rueda formando un ángulo α (fig. 2), la presión por m^2 . que imprime la rotación es $P' = k_1 \text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha \cdot v^2$. Siendo S la superficie de la rueda, la fuerza que la mueve es $k_1 \text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha \cdot S v^2 = k S v^2$; y si es $v' = k' v$ la velocidad del punto de la rueda donde podemos suponer aplicada esta fuerza, la potencia, o trabajo teórico del motor es: $k S v^2 \cdot k' v = K S v^3$. Según Coulomb $K = 0,066$. Entonces

$$T_i = 0,066 S v^3. \quad (1)$$

A un peso V de la varilla, agreguemos el A de una columna de agua; obtenido con estos pesos un arranque

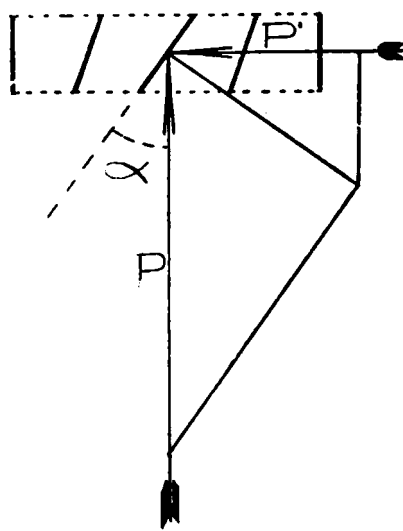


Fig. 3

y una marcha normal, sea n el número de vueltas que da la manivela por minuto y $2r$ la carrera de la varilla igual al doble de la longitud r de la manivela (fig. 3). El trabajo que gasta el motor para elevar la columna líquida, o sea el trabajo útil, viene dado por la fórmula

$$T_u = A \frac{n r}{30}. \quad (2)$$

Equilibrando V con los contrapesos y agregando en éstos $\frac{A'}{2}$, o en cada uno $\frac{A'}{4}$, obténgase como antes el arranque y la marcha normal; si el arranque lo permite aumentese A' ; con un número n' de vueltas por minuto, se obtiene ahora

$$T'_u = A' \frac{n' r}{30}. \quad (3)$$

Los cocientes

$$\eta = \frac{T_u}{T_t}, \quad \eta' = \frac{T'_u}{T_t} \quad (4)$$

son los rendimientos correspondientes al motor sin con-

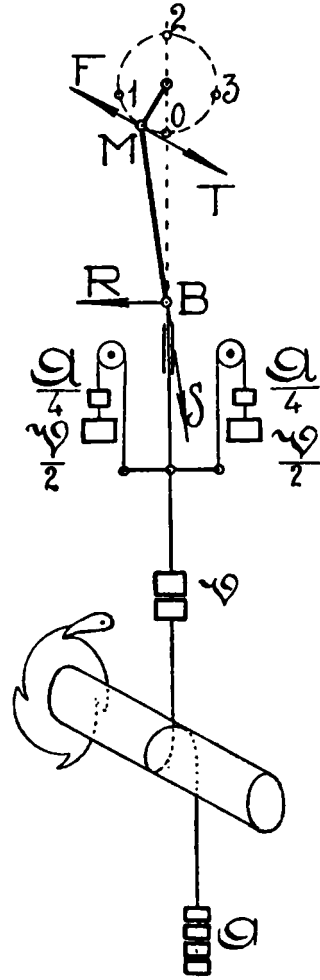


Fig. 3

trapesos y al motor con éstos. La comparación de η y η' , resuelve y estima la superioridad en las condiciones del ensayo.

Tal es el método racional que creo de posible y conveniente aplicación. El señor Berchadsky no ha ultimado sus ensayos en forma tan precisa, pero, así mismo, también consiguió resolver la cuestión principal de una manera bien práctica y clara.

4. Resistencia vertical de cargas y fuerzas de inercia alternativas, con contrapesos.— En la carrera ascendente el extremo inferior de la biela, eleva la varilla de peso V y la columna de agua de peso A . Con los contrapesos de peso total $V + \frac{A}{2}$, el peso resultante que el motor debe levantar en dicha carrera es la diferencia $\frac{A}{2}$. En la carrera descendente, en el extremo inferior de la biela solo actúa la varilla de peso V . Con los contrapesos de peso $V + \frac{A}{2}$, el peso resultante que el motor debe vencer, es, bajando, $\frac{A}{2}$. La resistencia vertical debida a los pesos en ambas carreras, es entonces, $\frac{V}{2}$. Está representada por las ordenadas de una paralela al eje de abscisas trazadas a la distancia $\frac{V}{2}$, en una extensión $2r$ (fig. 4).

Pero la mitad del peso de la columna líquida, no es la única resistencia que hay que vencer. Las fuerzas de inercia alternativas, pueden tener una influencia importante, y sin conocer cual es ésta, no es prudente despreciarlas. Estas fuerzas de inercia son debidas a las masas que se ponen en movimiento o cuyo movimiento cambia de sentido y a las variaciones de velocidad. Las masas en movimiento en la carrera ascendente son de peso: $V + A + V + \frac{A}{2} = \frac{4V + 3A}{2}$. Las variaciones que experimenta la velocidad, dependen de la aceleración normal del movimiento uniforme de la manivela, y de

la relación $\frac{r}{l}$ de la longitud de la manivela a la longitud de la biela. Las fuerzas de inercia máxima y mínima en la carrera ascendente, resultan ser:

$$\frac{4V + 3A}{2g} \cdot \frac{v^2}{r} \left(1 \pm \frac{r}{l} \right). \quad (5)$$

La primera se suma a la carga al empezar la carrera ascendente; la segunda se resta al terminarla.

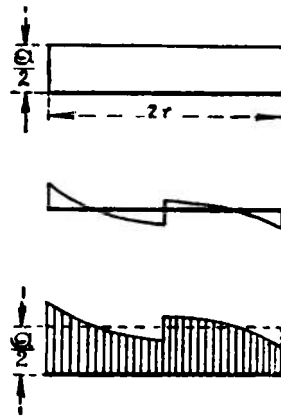


Fig. 4, 5 y 6

En la carrera descendente las masas puestas en movimiento son de peso $V + V + \frac{A}{2} = \frac{4V + A}{2}$; las aceleraciones pasan por los valores de la carrera anterior; la inercia es máxima al salir del punto muerto superior; nula en los puntos de efecto máximo, y mínima al volver al punto más bajo. Las fuerzas de inercia máxima y mínima son:

$$\frac{4V + A}{2g} \cdot \frac{v^2}{r} \left(1 \mp \frac{r}{l} \right). \quad (6)$$

Muestra la variación que sufre la inercia en ambas carreras la (fig. 5). Hemos llamado positivas las fuer-

zas de inercia que se agregan a la carga, y negativas las que la disminuyen. Compuestas las cargas con las fuerzas de inercia, resulta el diagrama de la (fig. 6). La superficie de éste, representa el trabajo que en una vuelta de la manivela, realiza el extremo de la biela.

Falta aún considerar las resistencias pasivas que, en forma de choques, frotamientos y vibraciones se suman a las anteriores. Serán tratadas más adelante.

5. Resistencia tangencial de cargas e inercia, con contrapesos.— Con el diagrama de la (fig. 6) podemos construir el del trabajo resistente de la manivela. Para esto, en una posición cualquiera de la manivela, se descompone la suma del peso aplicado en el extremo B inferior de la biela con la fuerza de inercia, dada por la ordenada correspondiente en el diagrama, según la dirección de la biela y de la normal a la corredera en B : se obtiene S y R (fig. 3). A R se opone la reacción de la corredera produciendo un frotamiento que ahora no consideraremos, y queda S ; S , aplicada en el botón de la manivela, se descompone según el radio MO y la tangente a la circunferencia que describe M ; la componente radial es destruída por la reacción del eje, y queda la que llamamos *resistencia tangencial* T . Repitiendo estas operaciones de descomposición en todas las posiciones que se quiera de la manivela, y, tomando como abscisas los arcos recorridos por su botón y como ordenadas los valores encontrados, puede construirse una gráfica que da idea clara de las variaciones que sufre la resistencia tangencial en el botón de la manivela: estas resistencias son nulas en los puntos muertos y máximas en los puntos vivos (fig. 7).

Construyendo este diagrama se observa que las fuerzas de inercia de valor absoluto máximo en los puntos muertos, no modifican la forma general de la curva. Sin considerar las fuerzas de inercia, choques y frotamientos, sería regular y simétrica; si además, en vez de formar la biela un ángulo variable con la vertical, se mo-

viera paralelamente a sí misma, es decir, si fuera $r = \infty$, la curva estaría formada por dos semi-ondas sinusoidales de igual amplitud.

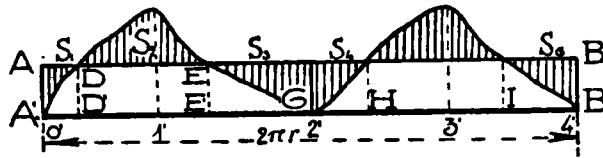


Fig. 7

La superficie limitada por esta curva y el eje de las abscisas representa el trabajo resistente de la manivela.

No obstante la utilidad que prestará en lo que sigue el diagrama que acabamos de construir y el análogo que construiremos en el núm. 7, hacemos notar, que no sacamos de ellos todo el partido que pueden dar, a causa de la falta de un dato experimental: la duración de una vuelta de la manivela para un valor conocido de V y de A .

6. Trabajo motor y trabajo resistente, tangencial, con contrapesos.— El trabajo T_t suministrado por el viento, es equivalente al que transmite la manivela con una fuerza motriz tangencial que designamos por F , y cuyo valor se deduce de

$$T_t = F \cdot \frac{2\pi r n}{60}$$

que es:

$$F = \frac{60}{2\pi r} \cdot \frac{T_t}{n}. \quad (7)$$

Esta fuerza motriz, la supondremos constante. Su punto de aplicación en una vuelta de la manivela recorre la longitud $2\pi r$; su trabajo, el trabajo motor estará representado por un rectángulo con lados $AA' = F$ y $AB = 2\pi r$ (fig. 7).

No consideramos la fuerza de inercia centrífuga de la rueda motriz, de valor $m\omega^2\rho$, pues suponemos a ésta en marcha normal.

Ahora, comparemos el trabajo motor de la manivela con el trabajo resistente. Para ello superpongamos sus respectivos diagramas. En el recorrido AD del botón de la manivela (fig. 7) la fuerza motriz es superior a la resistente; el exceso del trabajo de la primera sobre el trabajo de la segunda se manifiesta exclusivamente en la producción de potencia viva, según se traduce de:

$$A'ADD' - D'AD \equiv A'AB.$$

$$T_m - T_r = \frac{1}{2} \Sigma m (v^2 - v'^2) + \frac{1}{2} \Sigma I (\omega^2 - \omega'^2). \quad (8)$$

Análogamente en el recorrido EG final de la carrera ascendente.

En las proximidades de los puntos vivos (intervalos DE , HI), donde la resistencia es superior a la potencia, el trabajo resistente supera al motor, siendo el exceso realizado, gracias a la potencia viva producida en otras fases.

7. Resistencias y trabajos, sin contrapesos.— Con el mismo criterio, podemos construir las gráficas correspondientes al motor sin contrapesos. El trabajo teórico o motor T_t , determina la misma fuerza motriz tangencial F (7) cuyo trabajo en una vuelta de la manivela o longitud $2\pi r$, hemos representado por un rectángulo (fig. 8).

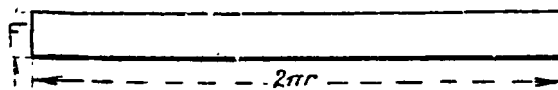


Fig. 8

El peso que sostiene el extremo inferior de la biela en la carrera ascendente, es la suma de la varilla con la columna de agua; en la descendente, sólo la varilla. Como resistencias, la primera es positiva y la segunda

negativa, estando representadas cada una en la figura sobre una longitud $2\pi r$ del eje de abscisas (fig. 9).

Las fuerzas de inercia

$$\frac{V+A}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \left(1 \pm \frac{r}{l} \right), \quad (9)$$

máxima y mínima en la carrera ascendente, modifican la gráfica del peso, aumentando sus ordenadas de manera decreciente desde el punto muerto inferior hasta el de efecto máximo, y disminuyéndolo desde este punto hasta el punto muerto superior.

Las fuerzas de inercia, cuyos valores máximo y mínimo son:

$$\frac{V}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \left(1 \mp \frac{r}{l} \right), \quad (10)$$

modifican también la línea representante de la resistencia en la carrera descendente (fig. 9).

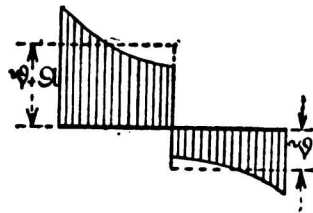


Fig. 9

Ahora, con este diagrama fácilmente se construye el de las resistencias tangenciales aplicadas en el botón de la manivela, en la forma que hemos explicado en el caso anterior. En los puntos muertos la resistencia tangencial es nula; en la carrera ascendente la máxima resistencia que debe vencer la manivela se halla cerca de la mitad de la carrera; en la carrera descendente la manivela en vez de vencer una resistencia positiva como en la anterior es solicitada por el peso de la varilla (fig. 10).

Superpongamos a este diagrama el del trabajo motor. La superficie rayada s_2 de la figura nos hace ver en cuánto relativamente supera el trabajo resistente al motor en la carrera ascendente; muestra la misma figura, que ese exceso se produce una sola vez en una vuelta entera de la manivela, y, nos sugiere otras reflexiones que vamos a exponer en las conclusiones siguientes.

8. Los contrapesos facilitan el arranque.— Comparando las gráficas de los motores, con y sin contrapesos (fig. 7 y 10), vemos que, la resistencia que la fuerza motriz del

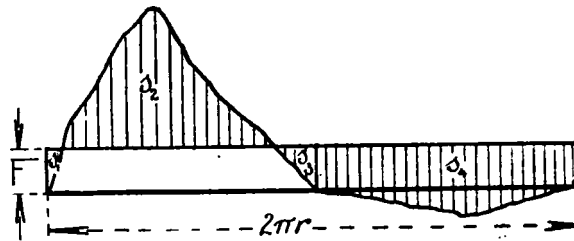


Fig. 10

viento debe vencer, en la carrera ascendente, es considerablemente mayor sin los contrapesos, que con ellos; más fácil es el arranque en la carrera descendente, sin contrapesos, pues en este caso no hay resistencias positivas que vencer, mientras que es lo mismo, con contrapesos; pero, como la ventaja o desventaja de éstos en el arranque del motor se determina comparando los arranques en la carrera más desfavorable (por ser igualmente probables los casos favorables y los desfavorables, despreciando la pequeña diferencia), podemos establecer, sin más razonamiento, esta sencilla pero importante tesis:

Los contrapesos equilibrando el peso de la varilla, facilitan el arranque en todos los motores de viento.

ADVERTENCIA.— Al decir que los contrapesos facilitan el arranque de todos los motores, no afirmo con la misma generalidad, que ellos aumentan el rendimiento (4).

9. Los contrapesos para los pozos de gran profundidad.— Para cada localidad todo motor, tiene un peso de varilla límite con el cual vacío puede funcionar, pero de ningún modo con un peso mayor; sea Q este máximo peso. Si al motor se le agregan los contrapesos de peso Q para equilibrar la varilla y el adicional $\frac{Q}{2}$, el mismo motor, sin la reducción causada por la inercia de las nuevas masas, sería capaz de funcionar con una carga de agua de peso Q , con una resultante $\frac{Q}{2}$ en la subida y una resistencia $\frac{Q}{2}$ en la bajada, siendo éste el caso más notable y señalado para demostrar la utilidad de los contrapesos.

Ilustra la (fig. 11). El rectángulo, indica el trabajo motor disponible que suponemos constante en una localidad para un motor dado en la media vuelta ascendente de la manivela; la curva de mayor amplitud, li-

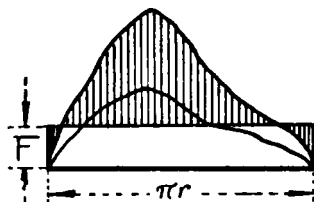


Fig. 11

mita el diagrama del trabajo en mover la varilla de máximo peso, y la curva de menor amplitud (menor resistencia), el diagrama del mismo trabajo, con los contrapesos.

Como el máximo peso de la varilla, corresponde a una profundidad también máxima de pozo, tenemos que:

Los contrapesos son especialmente recomendables para los motores que, a causa de la profundidad de los pozos, solo pueden funcionar en vacío o poco menos.

10. Los contrapesos disminuyen las resistencias pasivas.— Las gráficas correspondientes a las (fig. 7 y 10), muestran, que la diferencia entre las resistencias y la fuerza motriz en motores sin contrapesos, oscila entre valores de mayor valor absoluto, que con contrapesos (compárense las alturas de las superficies S_2 y s_2). En consecuencia los contrapesos disminuyen las presiones y con éstas los frotamientos. Veamos cómo.

La resistencia que se opone a la elevación de la varilla y columna de agua, no se debe únicamente al peso de estos elementos y a su inercia, sino también a las resistencias pasivas que determinan en los órganos que se mueven con frotamientos. Con la resistencia T , tangencial; R , radial; N , en la corredera y E en las ruedas de engranaje, y con los coeficientes respectivos f_1, f_2, f_3, f_4 , los frotamientos dan la suma

$$f_1 T + f_2 R + f_3 N + f_4 E. \quad (11)$$

Con contrapesos la suma

$$f_1 T' + f_2 R' + f_3 N' + f_4 E' \quad (12)$$

es menor, pues, por estar la varilla sostenida, es:

$$T' < T; R' < R; N' < N; E' < E$$

Entonces:

Los contrapesos disminuyen las resistencias pasivas de manera tanto más apreciable cuanto mayor es el peso de la varilla.

11. Los contrapesos, reguladores del movimiento.— Sin contrapesos, la cantidad de movimiento que se produce en la carrera descendente, como lo muestra la superficie s_4 (fig. 10) equivalente a potencia viva, es muy superior a cualquiera de las superficies parciales que representan lo mismo en el diagrama con contrapesos (fig. 7). Como hay dos fases en el primer caso y cuatro en el segundo, de una a otra la velocidad sin contrapesos oscila entre valores mayores que con contra-

pesos; es decir, con los contrapesos obtiéndose una velocidad más aproximada a la media: otra razón fundada, para que los choques, etc., que absorben no poca energía, disminuyan con el empleo de los contrapesos.

Mejor. Sin contrapesos, la velocidad baja de ω_2 en la carrera descendente a la ω_1 en la ascendente; la de régimen sea la media $\Omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$. Siendo ΔU la potencia viva que pierde la rueda motora en este pasaje gastándose en trabajo resistente, se tiene:

$$\frac{1}{2} I (\omega_2^2 - \omega_1^2) = \Delta U, \quad \omega_2 - \omega_1 = 2 \frac{\Delta U}{I}$$

$$\omega_2^2 - \omega_1^2 = (\omega_2 + \omega_1)(\omega_2 - \omega_1) = 2 \Omega (\omega_2 - \omega_1)$$

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{\Delta U}{I \Omega} \quad (12)$$

Pero, sin contrapesos es $\Delta U \equiv s_1 + s_3 + s_4$, y con contrapesos $\Delta U \equiv S_1 + S_3 \equiv S_4 + S_6$, menor; luego, la diferencia de las velocidades angulares $\omega_2 - \omega_1$, es menor con contrapesos que sin ellos. En otras palabras: con contrapesos la velocidad máxima y la mínima se aproxima más a la de régimen. Vale decir que:

Los contrapesos determinan un movimiento más uniforme y por lo tanto, un trabajo más regular.

12. Los contrapesos para la conservación de los motores y para los motores muy usados. — *Puesto que los contrapesos, determinan un funcionamiento más regular y disminuyen las resistencias pasivas, ellos aseguran la conservación de los motores.*

Como los choques, frotamientos y vibraciones, se producen especialmente en los motores de mucho uso, los contrapesos desempeñan en éstos, un papel muy importante aumentando su rendimiento.

13. Experiencias realizadas — La minuciosa lista de ensayos que ha preparado el señor Berchadsky, con el fin

de poner a la vista de todos, las mejores pruebas demostrativas de la eficacia de su feliz idea, es bastante elocuente para despertar la más viva confianza en el éxito de ésta.

Sin embargo, confío, en que otros ensayos más prolijos, con elementos materiales más adecuados, proporcionen datos mucho más satisfactorios en el sentido de la persuasión. Por ejemplo, si bien es cierto que los números acusan una diferencia notable y ya prevista en cuanto a la determinación del arranque, las proporciones asignadas a las masas de los contrapesos en los correspondientes estados de arranque y marcha, están lejos de lo esperado.

Hemos sostenido lógicamente desde el comienzo, que, el mejor arranque y marcha normal, corresponde a contrapesos de peso igual al de la varilla más un peso igual a la mitad del de la columna líquida, resultando que así el motor ejecuta el mismo trabajo resistente en ambas carreras con la misma velocidad, y, salvo que dudemos de ello, no podemos aceptar los primeros resultados experimentales obtenidos en contradicción muy manifiesta con dicha ley.

Mientras el joven Berchadsky, realice nuevamente sus experiencias con un motor de mejor construcción o conservación, doy por explicado el hecho desconcertante, atribuyéndolo a un error sistemático de gran escala, cuya causa podría ser, alguna deficiencia orgánica o de posición del motor que le sirvió para realizar los ensayos.

Diciembre de 1923.
