

VIBRADOR MECANICO PARA OPERACIONES  
UNITARIAS

Por el Dr. JOSE PIAZZA

## S U M A R I O

Se analizan los efectos provocados por la vibración sobre sólidos, fluidos y sobre ejes con centro de gravedad desplazable.

Sometiendo a la vibración a una esfera dentro de una caja cilíndrica de mayor diámetro, se observa que aquélla gira dentro de esta última con movimiento sincronizado y manteniendo en todo momento, una posición opuesta al excéntrico del vibrador. Llamaremos fuerza de acción a la correspondiente a la pared de la caja que encierra la esfera y reacción la fuerza centrífuga de la esfera sobre la pared, siendo ambas iguales y opuestas.

Reemplazando la esfera por un líquido, éste gira alrededor de la pared de la caja o tubo que lo contiene, cuyo eje describe la órbita de vibración. De esta manera, el fluido forma un paraboloides de rotación excéntrico respecto al eje del tubo.

A elevadas frecuencias, el paraboloides toma el aspecto de una película que gira excéntricamente respecto al eje y cuyo espesor varía entre un valor mínimo y otro máximo. Hay dos tipos de películas de acuerdo a la tensión superficial del fluido que las integra: las que mojan la pared, caso del agua, y las que no lo hacen, caso del mercurio. En el primer caso, el film gira sobre una capa del mismo líquido adherida a la pared, lo que puede influir en la transmisión de masa, en el contacto líquido-vapor en contracorriente.

Seguidamente se estudian los efectos de la acción sobre el eje del vibrador, en el cual se disponen excéntricos sobre cojinetes, notándose que las masas de éstos se reparten, con respecto a la del vibrador, en posiciones tendientes a un sistema de acción y reacción, con estabilidad máxima. Lo mismo sucede con dos ejes paralelos acoplados sobre un mismo plano, siendo el primero un eje motor que representa al vibrador, y el otro que descansa sobre cojinetes y lleva masas excéntricas

fijas. Estas permanecen indiferentes al estímulo de la vibración, pero cebándose su eje mediante motor auxiliar, para llevarlo a la misma frecuencia, dicho eje después conserva indefinidamente su movimiento.

Se comprueba que es posible transformar directamente el movimiento vibratorio armónico en rotación de igual frecuencia si el eje solicitado reúne las condiciones de rueda y excentricidad libres.

Posteriormente, se estudia el comportamiento energético general de un vibrador, deduciéndose ventajas para su empleo en Operaciones Unitarias, siempre que el plano vibratorio no entre en contacto directo con sistemas fijos.

Además:

1º) Se describe la construcción y ensayo de modelos para absorción de humos mediante tubos con extremidad elástica, que al describir un cono de vibración dentro de un líquido, permite que éste retenga el aerosol.

2º) Se describe una bomba de vacío con tubo elástico horizontal que vibra dentro de un líquido y que desplaza hasta 1.500 lts./hora de aire. Esta bomba aplicada a un sistema hermético, alcanza a realizar vacíos superiores a 450 mm. de mercurio.

3º) Se describe la construcción y funcionamiento de un pulsómetro formado por un perno, alrededor del cual se envuelve en espiral un tubo de goma y que se fija en posición normal sobre un plano vibratorio. Se cubre el helicoide de goma con una masa cilíndrica de bronce de igual diámetro interior. Bajo el estímulo del perno vibratorio se crea de este modo en dicho helicoide un movimiento de tipo peristáltico, funcionamiento por lo tanto el dispositivo como bomba de líquido. Esta se caracteriza por tener una superficie de contacto y un volumen sumamente reducido en comparación con el volumen de fluido bombeado. Utilizando un tubo de goma de 5 mm. de diámetro interior, se alcanzaron en el modelo diferencias de presión de 500 mm. de mercurio y caudales superiores a 500 cm<sup>3</sup> por minuto.

## S U M M A R Y

The effects provoked by vibrations in solids and fluids across an axis with displaced gravity centre, are analysed.

If a sphere is placed in a cylindrical body with a larger diameter and subjected to vibration, it is observed that the former spins within the latter, with synchronised movements and maintaining, at all moments, a position opposite to the eccentric of the vibrator. Calling the force corresponding to that on the walls locking in the sphere, as that of the action and the centrifugal force of sphere on the walls, as that of reaction, both are equal and opposite to each other.

When the said sphere is substituted by a liquid, the latter revolves about the walls of the body or the tube containing it, the axis of which defines the vibrational orbit. In this manner the fluid forms a paraboloid of rotation eccentric with respect to the axis of tube.

At elevated frequencies, the paraboloid assumes the aspect of a film rotating eccentrically with respect to the axis and its thickness varies between a minimum and a maximum value. There are two types of films according to the value of superficial tension of the liquid concerned: film formed by water which moistens the walls and that formed by mercury which does not. In the former case, the film revolves on a layer of the very liquid in contact with walls, an effect which could influence the transfer of the mass in liquid-vapour counter-current contact.

Further, the effects of the action on the axis of the vibrator are studied for which purpose some eccentric masses are mounted on ball-bearings; the experiments show that the masses distribute themselves in relation to that of vibrator in positions corresponding to an action-reaction system with ma-

ximum stability. The same happens with two parallel axes coupled together on a common place, the first being a motor axis representing the vibrator, the other resting on bearings and carrying fixed eccentric masses. These remain indifferent to the stimulus of the vibrations, but, if its axis is carried over, by means of an auxiliary motor, until it reaches the same frequency, this axis conserves afterwards its motion indefinitely.

However, it is possible to transform directly a vibratory harmonic motion into a rotational motion of the same frequency, if the axis concerned fulfills the condition of free-whirl and free-eccentricity.

Afterwards the general energy behaviour of the vibrator is studied and it is found that the same offers advantages for its use in unit operations with the condition that the vibratory plane does not enter in contact with a fixed system.

Further, the following applications are described:

1°) The construction and the test of a model for smoke absorption by means of tubes with an elastic extremity are described; the elastic end, when forming a vibrating cone in a liquid, allows the retention of the aerosol.

2°) A vacuum pump, with an elastic horizontal tube vibrating into a liquid, and possessing the capacity of displacing 1.500 l/hr of air, is described. This pump when applied to an hermetically closed system, serves to attain a vacuum higher than 450 mm. Hg.

3°) Is described the construction and working manner of a pulsometer formed by a pin surrounded with a rubber tube coil and fixed perpendicularly to the vibratory plane. The rubber helicoid is surrounded by means of a bronze cylinder with the same internal diameter. With the stimulus of the vibratory cylindrical mass and pin a pulsatory motion of the helix is generated, this functioning like a pump. This pump is characterised by possessing a contact surface in extremely reduced size in comparison with the volume of fluid, which is able to be moved. Using a rubber tube with an internal diameter of 5 mm, pressure differences up to 500 mm Hg and volume-rate of more than 500 cm<sup>3</sup>. per min. are attained.

## INTRODUCCION.—

En nuestros trabajos anteriores 1.), 2.), 3.), hemos informado sobre el principio, funcionamiento y resultados de laboratorio de un vibrador mecánico con excéntrico de eje virtual que modificando automáticamente su órbita de acuerdo con las exigencias experimentales se caracteriza por su sencillez y estabilidad. A continuación, informamos sobre los nuevos trabajos que hemos realizado en el laboratorio y taller relativos a este dispositivo y principios de su forma de actuar (\*).

## ACCION Y REACCION:

1º) *Entre una esfera metálica y el cilindro que la contiene.* Una esfera de acero de 31,8 mm de diámetro se introduce en una abertura cilíndrica de 35 mm de diámetro y de 32 mm de profundidad en una madera dura que se adapta sobre el plano horizontal de nuestro vibrador giroscópico. Dentro de un amplio margen de revoluciones que oscila alrededor de 2.000 rpm, la bolilla gira dentro de la abertura en forma perfectamente sincronizada con la frecuencia del vibrador y la excentricidad de la esfera respecto al centro del cilindro que la contiene, representada sobre la línea que une el centro con el punto periférico de contacto, desfasada a 180° respecto a las pesas excéntricas del vibrador. Estas pesas paralelas, fijadas en las extremidades axiales obligan a cualquier punto del vibrador a describir una órbita circular en el plano normal al eje. En la fig. 1 indica esquemáticamente el dispositivo experimental, —1— es la bolilla de acero, —3— el eje del vibrador, —3— y —3'— son las masas excéntricas, —4— la caja cilíndrica asegurada

(\*) Asistido en los trabajos por el señor Rolando Pérez.

al plano del vibrador normal al eje del motor. La fig. 2 es un corte que representa las cuatro posiciones sucesivas de los puntos de contacto con los dos elementos, o sea, la caja y su contenido durante una revolución. Llamaremos a esta fuerza centrífuga radial *reacción* y acción la fuerza ejercida por efecto de las pesas axiales del motor que tiene que ser opuesta e igual a aquélla.

2º) *Entre un tubo cilíndrico y un líquido.* Se fijan sobre el plato vibratorio dos tubos de ensayo de vidrio reforzado, de unos 30 cm de largo y con sendos y leves estrechamientos en la abertura del borde superior. En uno se introduce agua hasta alcanzar una altura de aproximadamente 3 cm y en el otro igual altura de mercurio. Se hace vibrar. Aparentemente, el agua forma un film que va subiendo a medida que aumentamos la frecuencia de la vibración. El mercurio parece como si se mezclara desordenadamente, o intensificando la frecuencia se observa la formación de un espejo que se extiende en el tubo. Observando el comportamiento con el estroboscopio notamos, a medida que se van sintonizando la oscilación luminosa con

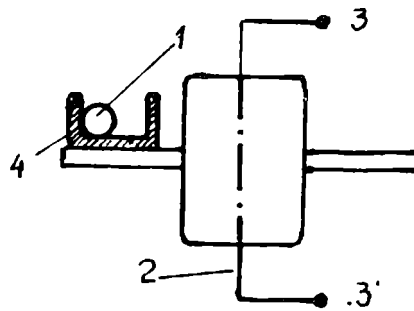


FIG. 1

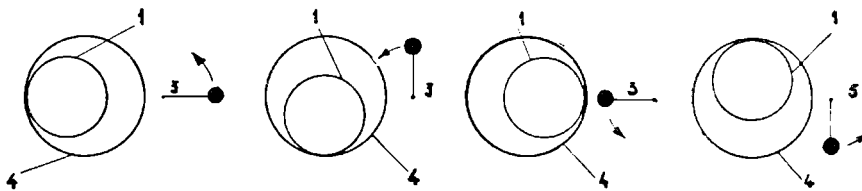


FIG. 2

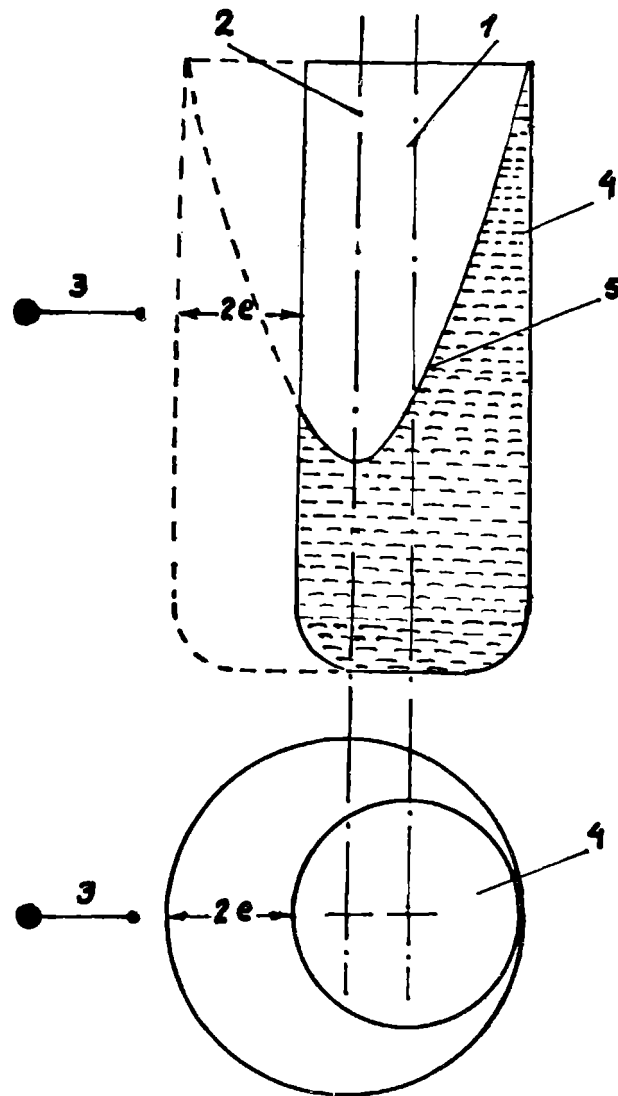
la frecuencia del vibrador: 1°) en el tubo de agua, una neta diferencia de espesor axial del film en dos posiciones diametralmente opuestas, se establece que giran en el mismo sentido del eje motor y en dirección opuesta a las pesas. A medida que observamos el tubo, subiendo la linterna del estroboscopio, el espesor máximo disminuye. Para el tubo con mercurio, el efecto es mucho más evidente. A baja frecuencia se observa como un mecanismo giratorio inclinado, opuesto a las pesas axiales. A medida que crece la frecuencia, aumenta la inclinación del menisco. Modificando la excentricidad de las pesas axiales, para reducir el diámetro de la órbita de vibración, a frecuencia elevada el mercurio alcanza a ocupar sin discontinuidad una zona mucho mayor de su nivel primitivo. Esta zona es en parte un espejo continuo que más arriba se transforma en parcial y el conjunto aparece como un paraboloides con el eje de rotación excéntrico respecto del tubo. Interpretamos a continuación, lo observado para el agua y para el mercurio como efectos idénticos. Lo que no coincide es la tensión superficial de los dos fluidos, pues uno moja la pared, mientras que el otro no se adhiere.

Sea  $\omega$  la velocidad angular en radianes,  $e$  el radio de la órbita; la velocidad absoluta del líquido dentro del tubo de radio  $r$  será  $(r + e) \cdot \omega$ . El lugar geométrico de fuerza centrífuga constante en cada sección normal es un círculo concéntrico que tiene su centro ubicado sobre el eje virtual del tubo. La superficie del líquido forma teóricamente, un paraboloides de rotación, cuyo diámetro máximo es  $2(r + e)$  donde  $e$  es el radio del cilindro que el eje del tubo describe alrededor del eje virtual.

La parte real de este paraboloides es la rayada en la fig. 3, o sea, la parte contenida en el tubo.

El efecto observado es análogo al de la fig. 2. Las paredes del caño proporcionan la *acción* y el líquido libre la *reacción*. La formación del film, que en realidad es una fracción de un paraboloides de rotación con un diámetro  $2(e + r)$  y con su eje virtual fijo alrededor del cual el eje del tubo describe una vibración armónica. El film es desfasado a  $180^\circ$  respecto de las masas axiales. Como en el caso de la esfera, el envase proporciona la energía para mover el líquido que gira *excéntrica-mente* con la velocidad  $\omega \cdot r$  sobre la pared. Este efecto puede utilizarse para hacer circular un líquido en contracorriente con un gas, para fines de bombeo, intercambio de masas, intercambio de calor y otras operaciones unitarias como destilación simple y fraccionada, extracción, etc.

3°) *Sobre el eje motor.* La fig. 4 representa esquemáticamente las posiciones que ocupan las masas axiales aplicadas a un motor, algunas fijas al eje, que se podrían interpretar como de acción y otras aplicadas al eje como ruedas libres que representan la reacción.



*fig.3*

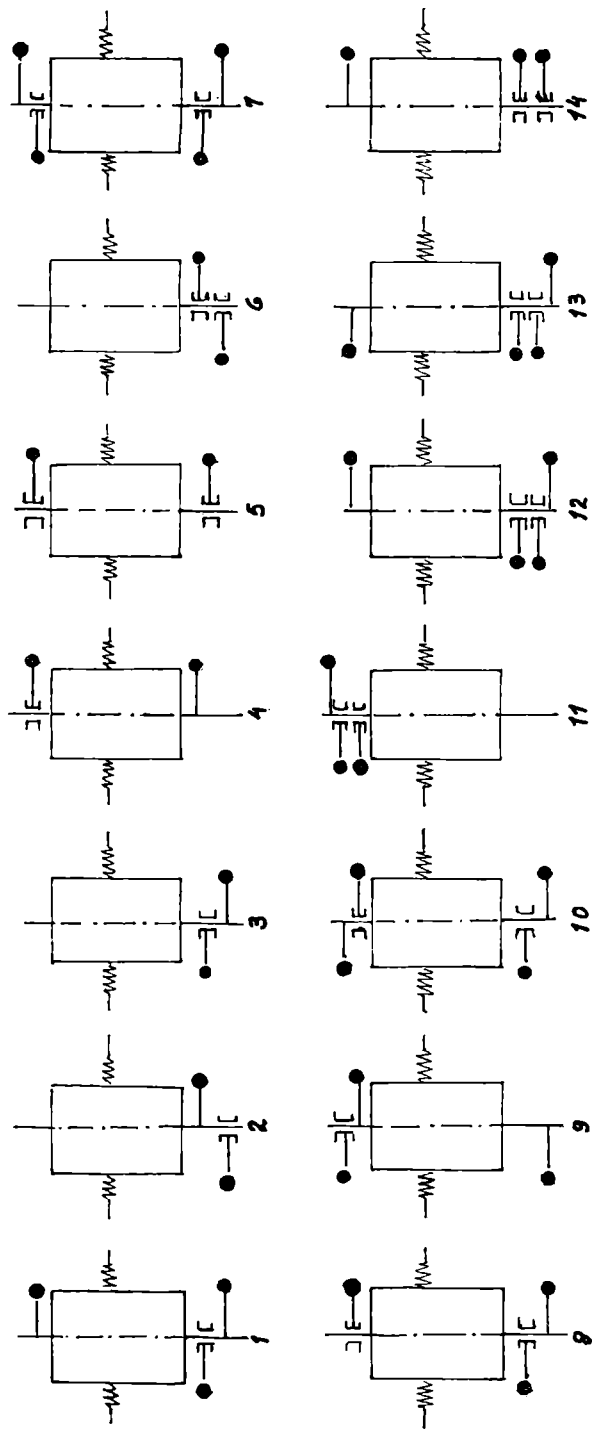


fig. 4

Se utilizó un motor común de máquina de coser, al que se le prolongó el eje para adaptarlo a estas exigencias. El motor se suspendió elásticamente mediante tres tiras de gomas sobre tres varillas fijas. Las contrapesas fijas son discos de bronce con centro desplazable, cuya excentricidad se puede graduar según las exigencias del experimento. Las contrapesas a rueda libre son platillos de bronce con cojinetes a munición.

El desplazamiento del centro de gravedad se realiza mediante un bulón que se fija en una perforación periférica del plato. Este último tiene 56 mm de diámetro, 3 mm de espesor y pesa con el cojinete y bulón 72 gr. Las contrapesas fijas transmiten los efectos de acción y las poleas libres giran bajo el estímulo de estos efectos y sus contrapesas toman una posición firme frente a las contrapesas fijas acopladas sobre el mismo eje. Se observan las posiciones relativas por medio de un estroboscopio. Los platillos libres, a pesar de tener un cojinete a bolillas, son arrastrados parcialmente al iniciarse el movimiento por los bujes fijos y en pocos segundos, entran en órbita, quiere decir, que han alcanzado la velocidad angular axial. Desde este momento, mantienen frente a los otros platillos una posición constante y que se repite, si se mantienen constantes las demás condiciones experimentales. La posición no depende de la velocidad angular.

La fig. 4 resume los resultados experimentales obtenidos. Estos se explican fácilmente interpretando el estado de equilibrio entre las fuerzas de acción y de reacción. La masa del motor se considera el elemento principal de la reacción y las masas axiales *fijas*, las que provocan la reacción. Las masas axiales *libres*, cuando son paralelas a las masas axiales fijas, contribuyen a forzar la acción, cuando son desfasadas a  $180^\circ$  respecto a las masas libres, actúan como elementos de reacción. De acuerdo a su comportamiento se modifica la órbita de vibración. En los casos 4, 5, 14 se observa paralelismo entre las masas axiales fijas y libres. Se puede interpretar este comportamiento en forma sucesiva, diciendo que la masa axial fija en una extremidad, provoca la reacción sobre la masa del estator del motor. Este a su vez se comporta como elemento de acción frente a la masa axial libre en la extremidad opuesta. El caso 5 se interpreta como un efecto en cadena, admitiendo excitaciones previas debidas al rozamiento de los cojinetes de los elementos axiales y además, a que la suspensión elástica del motor recibe la sollicitación de la masa axial débilmente arrastrada.

Analizando los esquemas en su totalidad, se deduce también que en las masas excéntricas, libres y fijas, se reparten en su posición axial en forma de proporcionar al sistema una *estabilidad máxima*. Esto explica el comportamiento de los experimentos 3 y 5 en los que intervienen únicamente ruedas excéntricas libres. El eje tiende a mantenerse en posición vertical, describiendo durante su vibración armónica un cilindro. Resulta interesante la comparación entre el experimento 11 y 12, por el hecho que la posición de equilibrio, usando en los dos casos los mismos elementos, se alcanza mucho más rápidamente en disposición correspondiente al ensayo 12 que en el anterior.

De estos resultados, se puede deducir que la observación estroboscópica es sumamente cómoda y sensible. La adaptación de una polea excéntrica a un eje o a un motor que gira descentrado, con trepidaciones, sugiere la posibilidad de un método para descubrir eventualmente la posición de una falla axial.

4°) *Entre dos y más vibradores sobre un plano de vibración común.*--

Los resultados obtenidos anteriormente sobre un eje de vibración mediante poleas descentradas, fijas y libres, vuelven a repetirse usando un eje con motor, y otro sin motor, paralelos y acoplados rígidamente sobre un mismo plano vibratorio, llevando dichos ejes masas excéntricas fijas y paralelas. El esquema de la fig. 5 representa el acoplamiento entre estos dos ejes y la posición resultante de las masas excéntricas, correspondientes a las posiciones *a* y *b*, que giran sincrónicamente desplazadas a 180°, e nel mismo sentido. Existe sin embargo una diferencia fundamental entre los ensayos con un solo eje y los ensayos con dos ejes. En el primero las ruedas libres se ponen espontáneamente en marcha y alcanzan inmediatamente o en pocos segundos su posición definitiva, girando con la misma velocidad angular. En el segundo caso, el vibrador sin motor no se pone espontáneamente en movimiento de rotación, no hay estímulo axial, debido a la fricción parcial como en el caso anterior de poleas libres dispuestas sobre un eje vibratorio. Para provocar la rotación, habrá que cebar el eje libre, acoplándolo a un motor portátil mediante una unión flexible. El eje se pondrá en órbita, manteniéndose indefinidamente una vez desconectado del motor auxiliar. Observando el estro-

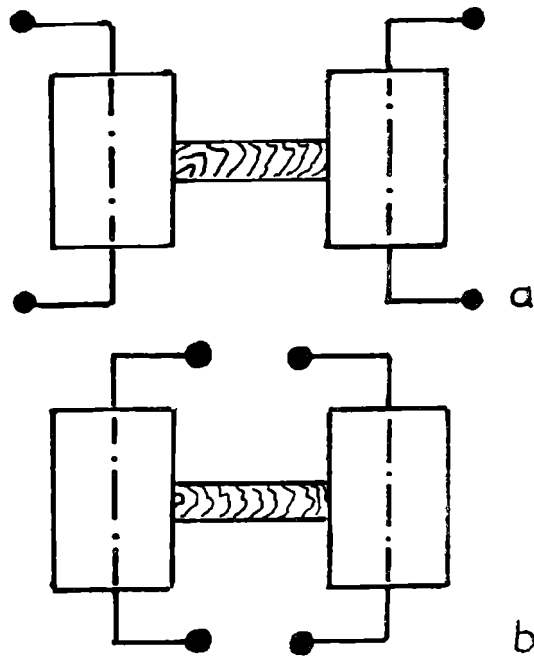


FIG. 5

boscopio, los dos ejes giran sincrónicamente en el mismo sentido y desfasados a  $180^\circ$ .

Se repitió el experimento con tres ejes sobre el mismo plano, uno como generador de vibraciones y los otros como satélites, observándose que éstos giraban perfectamente sincronizados entre sí, en posición paralela y en dirección opuesta al vibrador motor.

En trabajos anteriores (—3—) 1.c., hemos informado que no se puede acelerar la marcha de los satélites aunque se agregue energía de rotación a los mismos, la que separadamente llevaría al eje a velocidades angulares mucho mayores que las correspondientes al vibrador central. (En este caso, se utilizó como satélite, un motor eléctrico con masas axiales excéntricas).

Hemos realizado también ensayos de vibración con 4 ejes acoplados sobre un mismo plano. Como satélites hemos usado, como se verá más adelante, ejes que se ceban automáticamente, transformando el movimiento vibratorio en rotativo, habiéndose repetido sin excepción el efecto observado anteriormente.

4°) *Comportamiento energético:*

Llamaremos:

$c$  el radio de la órbita de vibración.

$r$  el brazo de la masa excéntrica.

$\omega$  la velocidad angular.

$M$  la masa del equipo sin volantes.

$m$  la masa de un volante.

$I$  el momento de inercia.

$L$  la energía cinética.

$P$  la potencia transmisible.

$G$  el peso de equipo.

$t$  el tiempo.

Estableceremos primeramente las ecuaciones dimensionales: se alcanza una posición de equilibrio en el vibrador cuando la fuerza centrífuga del volante y la de la órbita del equipo se igualan. Como la velocidad angular es la misma, podemos escribir:

$$M.c = 2m (r - c) \quad (1)$$

Multiplicando cada miembro por su correspondiente radio de excentricidad, se obtienen sus respectivos momentos de inercia:

$$M.c^2 = I_M \quad \text{relativo al equipo, y}$$

$$2m (r - c)^2 = I_{2m}$$

Generalmente  $r$  es mayor que  $c$ , resultando entonces:

$$M.c^2 < 2m (r - c)^2 \quad \text{ó} \quad I_M < I_{2m} \quad (2)$$

pues en momento de inercia del oscilador es la suma de los momentos de inercia de sus masas elementales en que cada una conserva constante el radio de inercia que corresponde a su radio de órbita y que no depende de la posición de las masas axiales.

La energía cinética del vibrador y del volante, serán respectivamente:

$$L_M = \frac{M.c^2 \cdot \omega^2}{2} \quad (3)$$

$$L_{2m} = 2m (r - c) \frac{2 \omega^2}{2} \quad (4)$$

La potencia del vibrador:

$$P = \frac{M \cdot c^2 \cdot \omega^2}{2 \cdot t} = \frac{M \cdot c^2 \cdot \omega^3}{2} \quad (5)$$

De acuerdo a la ecuación (1) la relación entre la energía del volante y la del oscilar será:

$$\frac{L_M}{L_{2m}} = \frac{c}{r - c} = \frac{2 \cdot m}{M} \quad (6)$$

El funcionamiento del vibrador consiste en que el eje motor es un eje libre que transmite la energía de inercia del volante a su propio estator.

Vamos a calcular la potencia transmisible por unidad de peso de un equipo vibrador. Como equipo vibrador consideramos el motor sin volante con todo el dispositivo sujeto a la vibración. Si el motor está fijo y actúa por flexible o unión cardánica, la masa de éste no se tomará en cuenta.

En la fórmula dimensional (4), sustituyendo la velocidad angular por el número de revoluciones por minuto  $n$  y expresándola en miles, el valor  $c$  en milímetros, la potencia en Mp y llamando  $P$  a la potencia correspondiente a un kilogramo de peso del equipo, resulta:

$$P/G = 1,55 \frac{n^3 \cdot c^2}{2} \cdot 10^{-3}$$

Tomando por ejemplo una excentricidad de 5 mm de órbita ( $c$  5) y 3.000 rpm ( $n$  3), un Kg de equipo transmite alrededor de 0,5 Hp como máximo. Este valor nos parece muy aceptable para operaciones unitarias, teniéndose además, posibilidades de modificar con relativa facilidad la excentricidad y la frecuencia.

*Energía absorbida por la vibración:* El equipo vibrador, actúa sobre la sustancia que se quiere elaborar con una fuerza que llamaremos de *acción*, provocando sobre dicha sustancia la fuerza de *reacción* correspondiente, idéntica y opuesta a la

acción, en condiciones de producir un cierto trabajo. Por ejemplo, en el caso de la fig. 1 en que se hace girar la esfera metálica en una caja, la reacción será la fuerza antagónica a la fuerza centrífuga provocada por la masa giratoria. Obtendremos trabajo haciendo funcionar el sistema como molino. Podemos poner un líquido dentro del recipiente para formar un film. Si el recipiente está rayado interiormente como helicoide, el líquido se transporta. Este, por rotación genera una fuerza centrífuga, motivo de su comportamiento. Disponiendo sobre el plano del vibrador un perno fijo dentro de un arco libre, que apoya sobre el plano de vibración, el espacio anular entre los dos elementos representa una zona activa que se puede utilizar introduciendo el material que se quiere elaborar entre los dos elementos.

El perno genera la fuerza de acción y el aro la de reacción; ésta será el producto de la masa del aro por la aceleración que recibe en cada momento. Es la reacción la que decide el resultado de la operación. Si sobre el perno que vibra se fija un cojinete con una masa axial excéntrica, aparentemente no sucede nada, pero si iniciamos sobre el excéntrico un movimiento de rotación, aumentándolo hasta alcanzar la frecuencia del oscilador, el eje seguirá girando, conservando indefinidamente dicho movimiento, actuando éste como eje motor.

De este experimento se deduce que para transformar un movimiento vibratorio en rotativo, se necesita cebar el eje que lleva la masa excéntrica.

Si en lugar de un aro libre, como en el caso anterior, se utiliza un aro fijo en la zona anular, la fuerza de reacción podría alcanzar valores demasiado elevados, lo que daría lugar a fuertes trepidaciones de todo el equipo. El conjunto perdería rápidamente su estabilidad, destruyéndose a sí mismo.

Durante el funcionamiento de un equipo vibratorio, es imprescindible que la fuerza de reacción no exceda del valor máximo prefijado, por esta razón, el plano vibratorio nunca deberá entrar en contacto con un sistema fijo.

#### 4º) *Transformación directa del movimiento vibratorio en rotación.*—

Para realizar esta operación, existen ciertas dificultades explicables teóricamente, si se analiza la fórmula (2) relativa al comportamiento energético, que dice:  $I^M < I_{2m}$ .

El motor como fuente de energía pone en rotación sus masas excéntricas. Si sobre su plano de vibración se fija otro eje libre vertical con masas excéntricas, éste no se pondrá espontáneamente en movimiento de rotación.

Para conseguirlo, de acuerdo a nuestros resultados experimentales, es necesario crear inicialmente sobre este eje un momento de inercia de sus masas, que sea inferior a  $M.c^2$  correspondiente al momento del plano vibratorio. Estas consideraciones nos han llevado a la idea de crear un dispositivo en condiciones de excentricidad variable y naturalmente, con rueda libre, de manera que el momento inicial sea casi nulo, y aumente automáticamente a medida que el volante se descentre, hasta que súbitamente dispare el excéntrico para alcanzar su posición límite, poniendo en órbita al volante. A pesar de ello, es difícil reunir la condición inicial de dar a las masas axiales el impulso necesario que proporcione la velocidad angular del motor.

Hemos experimentado con un resorte helicoidal de paso cerrado de alambre de acero, formando un eje elástico cuyas espiras se tocan, como lo indica la fig. 6. Se utilizó alambre de acero de 1 mm de espesor, y el eje así formado (1) de 10 mm de diámetro se fijó simétricamente en un cojinete a munición

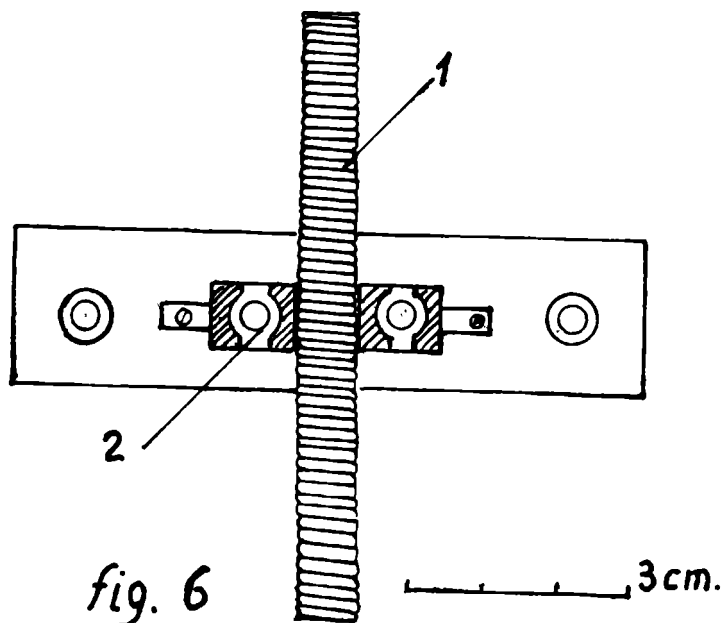
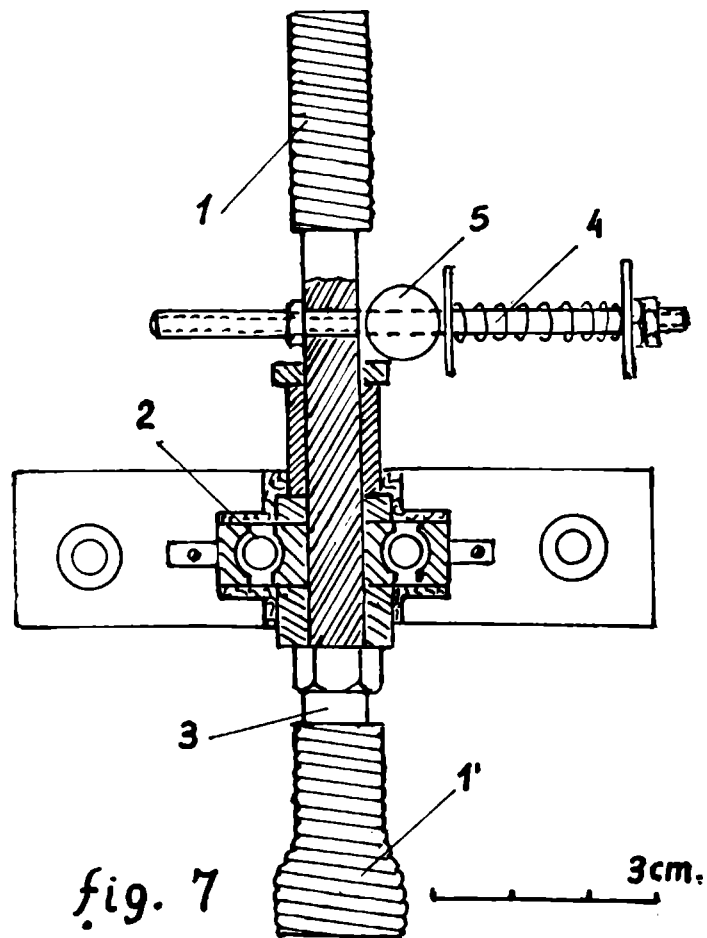


fig. 6

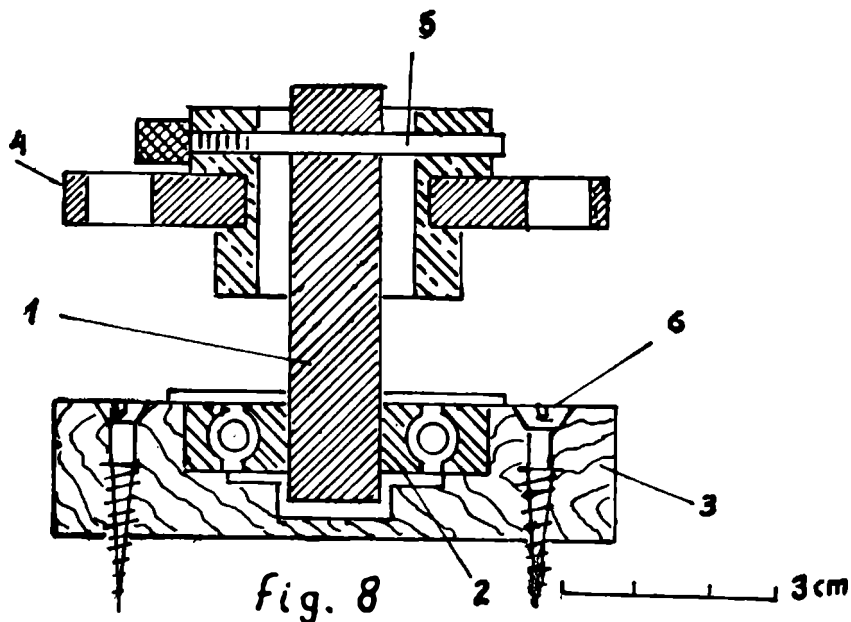
—2— de manera que sus extremidades elásticas queden libres para vibrar. Se fijó el dispositivo sobre un plano vibratorio. Al vibrar el eje elástico en estas condiciones, forma un doble cono, teniendo como vértice al cojinete. Observando al estroboscopio, se nota que la posición de las generatrices del cono, en la parte superior e inferior corresponden al eje elástico que converge en el vértice. Aumentando paulatinamente la frecuencia del vibrador, llega un momento en que la inercia del eje elástico adquiere un valor que le permite vencer la resistencia del cojinete y entonces se pone en órbita haciendo girar al rotor del cojinete. El eje toma la forma de una U horizontal que gira sincrónicamente con el motor y desfasada a  $180^\circ$ .

Comparando estos resultados con los correspondientes al



dispositivo de la fig. 4, cuyas masas axiales de excentricidad fija y rueda libre, se ponen espontáneamente en movimiento de rotación, atribuimos este comportamiento al estímulo inicial del eje motor, que por fricción hace entrar en órbita a los volantes. En el caso de la fig. 6 es la vibración del eje elástico la que vence la resistencia del cojinete. La fig. 7 representa un perfeccionamiento del dispositivo de la fig. 6 en el sentido que proporciona al eje un momento de inercia mucho mayor. Sobre el eje libre —3— introducido en el cojinete —2—, se fijan en sus extremidades los resortes vibratorios —1— y —1'—, el último de alambre más grueso y por ende más rígido, para que durante el funcionamiento pueda ser frenado con la mano. Sobre el eje vertical —3— hemos adaptado una varilla —4— con contrapeso deslizante —5— y con resorte de contención. Este último se cierra cuando la fuerza centrífuga de la masa —5— vence su resistencia. Como consecuencia, el sistema se pone automáticamente en órbita.

La fig. 8 representa ya un modelo de motor que funciona directamente por vibración. El cojinete —2—, que se adapta al plano vibratorio por medio del resorte —3— y los tornillos —6—, lleva el eje vertical —1— con el volante —4—. El vástago corredizo horizontal —5— asegura al volante —4— una excentricidad variable desde su posición céntrica hasta un lí-



mite máximo. Además, el volante puede bascular sobre su eje, lo que favorece su adaptabilidad a las condiciones de trabajo, pues la excentricidad varía también por inclinación del plano de la polea.

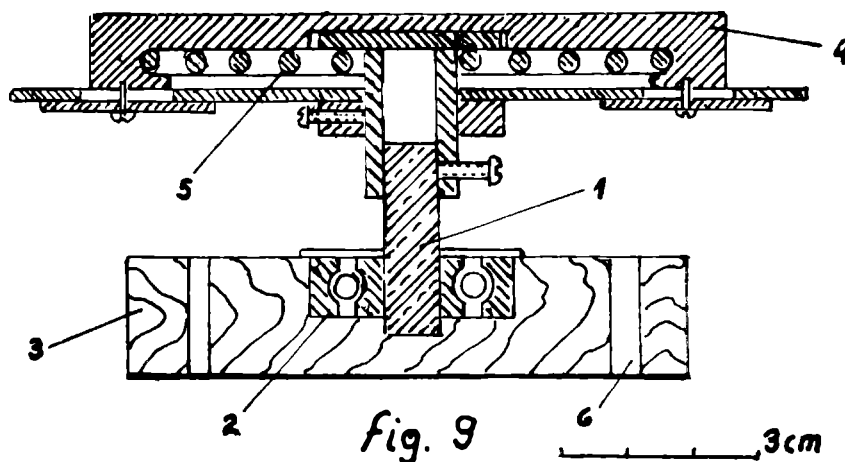
En la fig. 9 el eje lleva el volante —4— fijado al resorte —5— de alambre de forma de espiral plana, que juega libremente dentro de la caja —4— mediante un fondo solidario al eje pero deslizable sobre el borde del volante.

Las ventajas de estos motores satélites, que se pueden disponer en gran número sobre el mismo eje vibratorio, son evidentes:

1. La transmisión es rígida.
2. El motor satélite es un block firme con un cojinete, la parte articulada actúa únicamente para su puesta en marcha, operación que requiere un tiempo sumamente breve; en el caso de la fig. 8 fracciones de segundo.
3. La transmisión rígida permite crear alrededor de un eje un espacio hermético a presión distinta de la ambiente, que rodea al eje en toda su extensión, evitando de ese modo un eventual empleo de prensa estopas.

Podemos afirmar, para resumir, que las condiciones básicas para transformar directamente una vibración armónica en rotación, son las de *eje y excentricidad libres*.

Indirectamente se llega al mismo resultado cebando el eje de rotación con un motor auxiliar hasta que se alcanza la frecuencia del vibrador.



## CONSTRUCCION DE MODELOS APLICABLES A LAS OPERACIONES UNITARIAS

### 1º) *Aspiración y absorción simultánea de aerosoles.*

En nuestros trabajos anteriores (obtención de diferencia de presión en un fluido por vibración) 1. c., hemos estudiado las propiedades de un tubo metálico con una extremidad elástica sometido a la vibración armónica. Se ha sumergido el cono así formado, dentro de un líquido con la finalidad de estudiar los efectos de depresión y absorción del gas aspirado. La fig. 10 representa la realización experimental del dispositivo utilizado. El vibrador está formado por un motor de máquina de coser —1— con resistencia variable y con su extremidad axial —2— en la cual se halla una masa —3— con centro de gravedad desplazable.

Por esta disposición resulta que el motor trabaja con eje libre como giróscopo; la masa está formada por dos discos metálicos perforados de acuerdo al esquema —4—; por superposición, modificando la posición angular de estos dos discos, se puede modificar dentro de un margen relativamente amplio en centro de gravedad del conjunto y con esto el diámetro de la órbita, este último independiente de la velocidad. Se suspende el motor mediante el resorte —5— a un trípode —6— y se sujeta a los vástagos —7— mediante sendas tiras de goma como se indica en —8—; el motor lleva la chapa metálica —9— con mordaza, que sujeta rigidamente el tubo de bronce —10— el motor; este tubo tiene 8 mm de diámetro exterior con un espesor de 1 mm de pared. La extremidad de este tubo está formada por el helicoide —11— de alambre de acero de 1 mm de diámetro, recubierto a veces por el tubo de goma látex —12—. Se utiliza como recipiente un vaso —13— de vidrio transpa-

rente de un antiguo acumulador, que se presta por su forma cuadrada y por su perfil interior —14— para romper el torbellino (vórtex) de revolución que tiende a formarse durante la vibración.

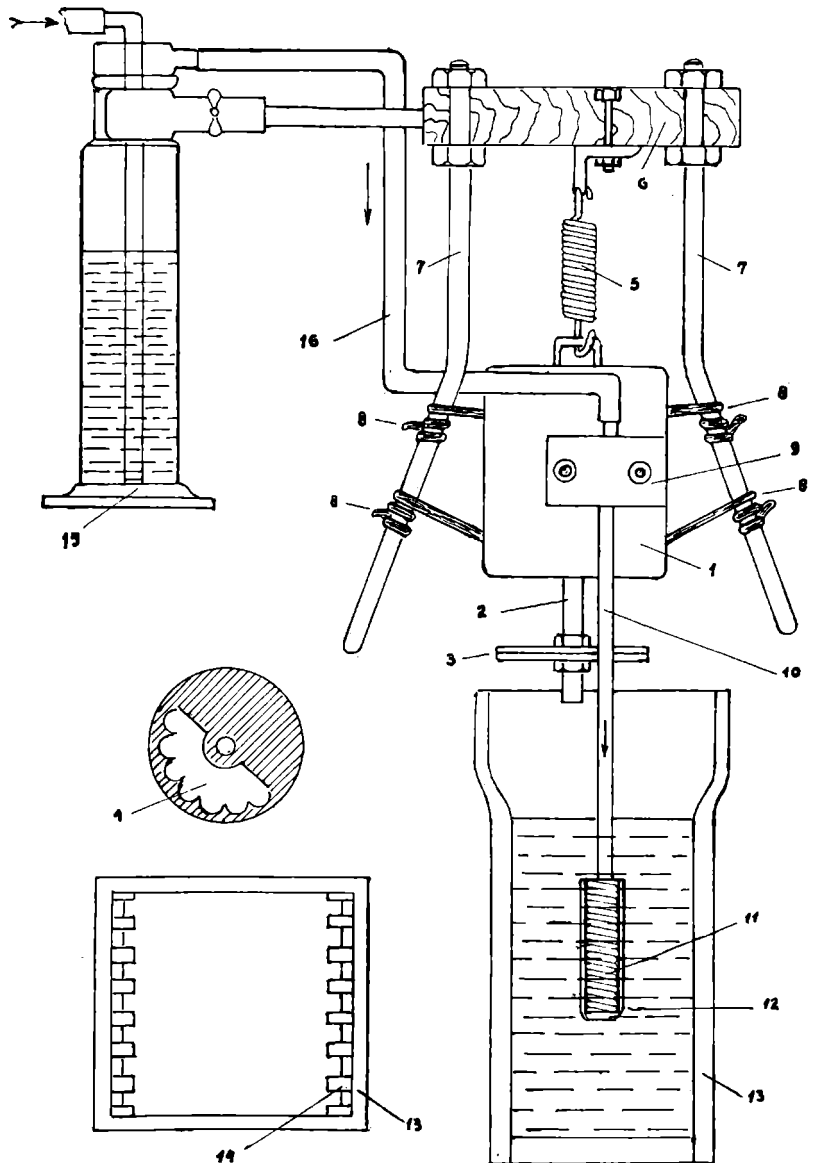


fig 10

El tubo de bronce —10— comunica por la otra extremidad a su vez por medio del tubo de goma —16— con un frasco lavador —15— que indica y controla la corriente de gas aspirado. Se ha experimentado cualitativamente con este dispositivo precipitando humo de tabaco. Por medio de una boquilla conectada con un tubo de goma, se adapta un cigarrillo. Se pone en marcha el motor y se regula hasta que se produzca un burbuqueo intenso en el frasco lavador —15—, se enciende el cigarrillo y se observa como el humo circula en el frasco lavador y se introduce en el líquido por efecto de la aspiración provocada por el tubo elástico. Se nota que la emulsión formada por el aire aspirado en finas burbujas, se vuelve más opalina, adquiriendo un color blanco amarillento, sin observarse en la superficie del líquido la presencia de humo, aunque sí se percibe el olor característico de los alquitranes en combustión en el aire aspirado. A 2.150 revoluciones, un cigarrillo fue quemado en 41 seg. La absorción del aerosol parece que se produce en una proporción apreciable antes y en el interior mismo del helicoide de alambre, debido al aspecto que presenta su superficie interior a la que se adhieren compuestos gomosos, que a veces tienden a obstruir parcialmente el conducto.

La velocidad de precipitación y la frecuencia óptima dependen en parte de las características de la extremidad elástica sumergida en el líquido. Investigando su cono de vibración en medio transparente, a la luz de un estroboscopio, se comporta como un péndulo cuya abertura va aumentando con la frecuencia de la vibración. La abertura del cono, sin embargo, crece hasta un máximo para cerrarse luego nuevamente hasta que la extremidad quede sin moverse, el dispositivo ya no aspira, a pesar de que el vástago rígido sigue vibrando. El flexible trabaja como si en su extremidad libre, formara un nodo de vibración. En efecto, modificando la longitud del flexible se influye sobre sus constantes físicas en lo que se refiere a la longitud de onda.

Como datos explicativos, damos el comportamiento de la extremidad elástica:

— En vacío, a 2.150 rpm, el diámetro exterior del cono de vibración es de 47,5 mm.

— En el agua, a 1875 rpm el diámetro es de 20 mm y a 2.250 rpm es de 47 mm.

Modificando convenientemente la longitud, hemos alcanzado una abertura máxima de 60 mm, que posteriormente aumentando la velocidad, se iba reduciendo. El dispositivo de la

fig. —10— es utilizable también como medio muy efectivo de agitación, con o sin aire. En efecto, introduciendo en el vaso —13— partículas sólidas de distinto tamaño y densidad, se observan sus trayectorias y se modifican fácilmente las mismas, variando la frecuencia, el diámetro de la órbita, la posición de la sonda elástica y además, practicando una abertura en la extremidad rígida del caño —10—; con esto se produce un efecto de bombeo interior del líquido dentro de la espiral elástica de alambre —11—.

Como es evidente, se presta para inyectar dentro de un líquido, gases o vapores.

Las aplicaciones previsibles de este dispositivo en las operaciones unitarias, consistirían en su uso como aparato de precipitación de aerosoles, dispositivo de agitación y de transmisión de masa. Utilizando dos líquidos no miscibles, la extremidad elástica funcionaría como extractor.

## 2º) *Construcción de una bomba horizontal de vacío y de presión.*

En nuestro trabajo anterior (1. c. 173), hemos desarrollado la construcción de una bomba húmeda de gas, para vacío y para presión, basada en el principio del tubo vibratorio con extremidad elástica, que trabajaba con tubo vertical excéntrico dentro de una cuba con agua.

Este dispositivo presentó algunos inconvenientes, entre los cuales el principal era debido a la fracción del caño no elástico transportador de la sonda, que vibrando forma en la superficie del líquido un vórtice que sigue axialmente al tubo, introduciendo exteriormente al caño, aire en el líquido, formando un hueco en las cercanías de la zona de trabajo.

Hemos pensado evitar este inconveniente, construyendo el dispositivo con eje horizontal, mediante introducción lateral de la sonda de succión en el recipiente.

La fig. 11 indica el vibrador de este tipo con el motor de licuadora fijo —1—; su eje comunica mediante el flexible —2— al vibrador formado por el plato doble —9— y —9'—, cuyos detalles de construcción ya han sido explicados. —5— y —5'— son las pesas excéntricas, —13— indica el tubo horizontal que comunica con un recipiente de bronce vertical prismático y de sección cuadrangular transformada en circular en el borde superior. La pared opuesta al caño es ligeramente convexa, para

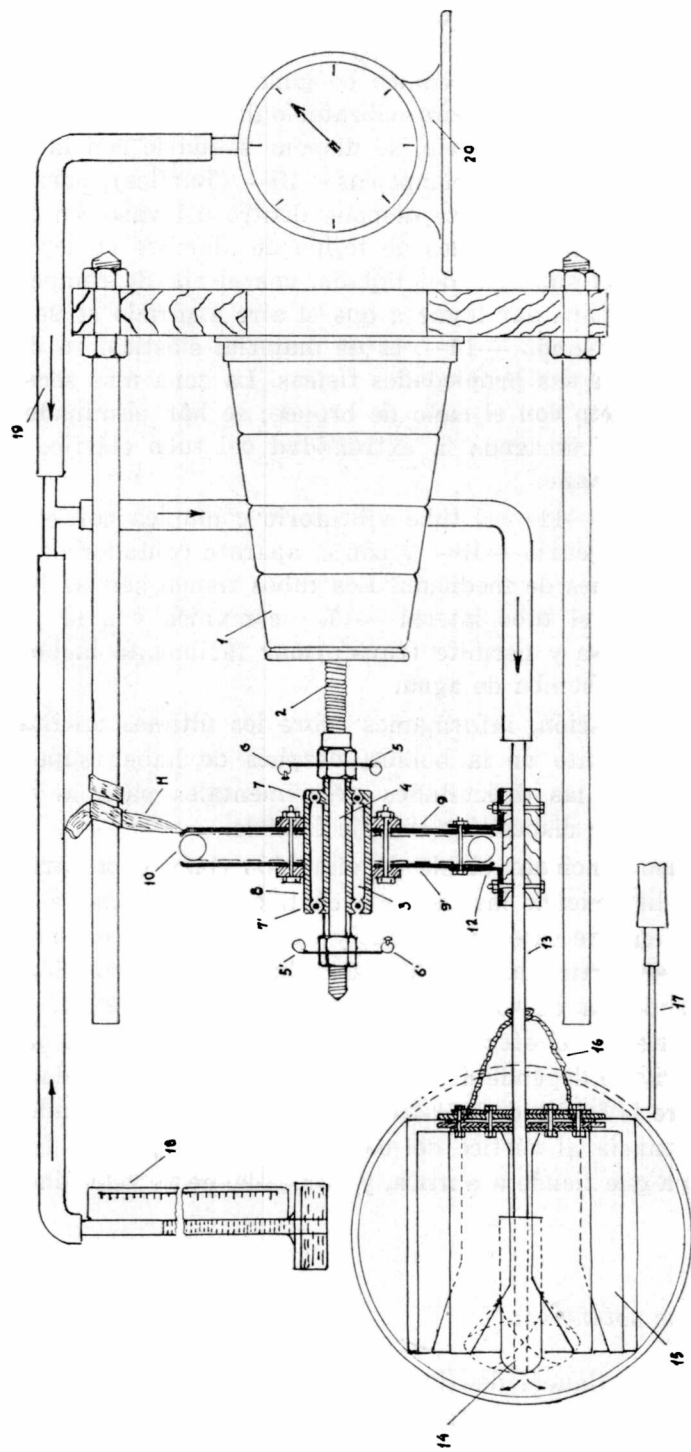


Fig. 11

0 10 cm

facilitar la formación del cono de vibración. La comunicación entre el tubo vibratorio —13— y el recipiente de bronce se realiza mediante el fuelle cónico de goma —16— que permite la transmisión del movimiento vibratorio dentro de la caja fija. Axialmente al eje vibratorio, se dispone solidario con la caja fija, un sistema radial de rompeolas —15— (Baffles), para evitar remolinos, y además, se dispone dentro del vaso, en el líquido, bandejas horizontales de tejido de alambre en las cercanías del nivel superior del líquido, con el fin de romper la turbulencia y para dar lugar a que el aire aspirado se separe del líquido. La sonda —14—, es de material elástico, su duración depende de sus propiedades físicas. La zona más sensible es la de contacto con el caño de bronce; se han eliminado inconvenientes recubriendo la extremidad del tubo elástico con una oliva de estaño.

En la fig. —11— el tubo vibratorio comunica con el manómetro de mercurio —18— y con el aparato contador de aire —20— para fines de medición. Los tubos tienen sendas llaves de regulación; el tubo lateral —17— comunica con la parte inferior del vaso y permite transformar fácilmente la bomba de aire en una bomba de agua.

A continuación, informamos sobre los últimos resultados de funcionamiento de la bomba, después de haber superado gran parte de las dificultades experimentales para la construcción de este dispositivo con eje flexible.

Se hizo funcionar el eje de vibración como generatriz de un cono, disponiendo las masas excéntricas desfasadas a  $180^\circ$ . La órbita en este caso es circular y su diámetro depende de la distancia al vértice del cono de vibración. Para la posición extrema, la órbita de vibración alcanza su máximo abriéndose mayormente por el efecto de la extremidad elástica. La órbita del caño rígido depende de la posición y no de la velocidad angular, pero la órbita de la extremidad elástica, depende además de su distancia al vértice del cono de vibración, de la fuerza centrífuga que tiende a abrirla, y por ende, de la velocidad angular.

#### *Resultados obtenidos:*

Tabla I: Caudal de aire aspirado en función del número de revoluciones por minuto.

2.450 rpm — 1010 lts/hora  
 2.525 rpm — 1190 lts/hora  
 2.575 rpm — 1370 lts/hora  
 2.625 rpm — 1370 lts/hora  
 2.700 rpm — 1390 lts/hora  
 3.100 rpm — 1640 lts/hora

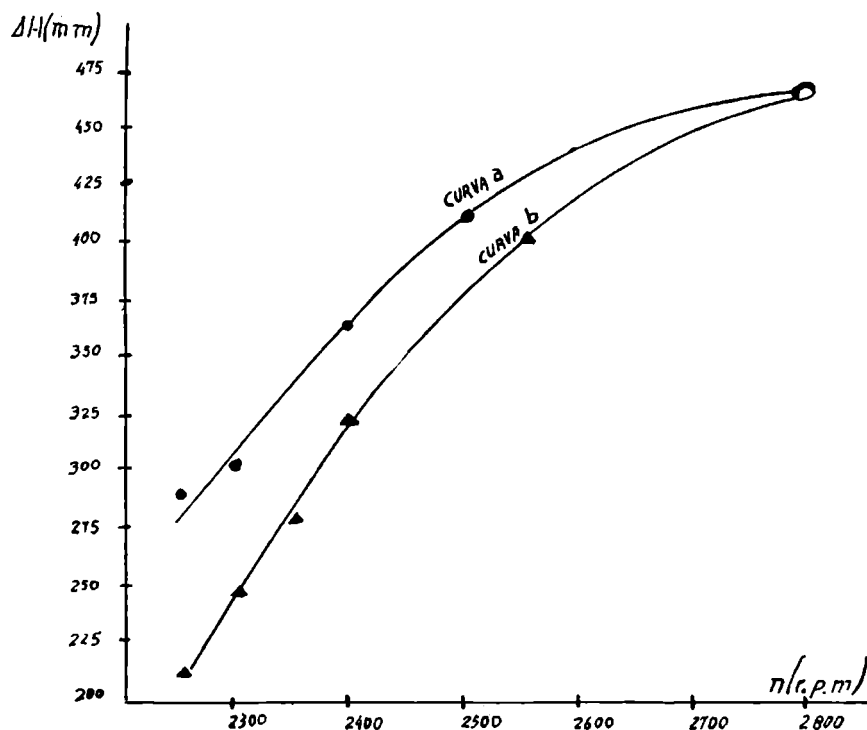
Para la utilización de la bomba como posible dispositivo de filtración, es interesante conocer la relación entre la depresión y el caudal que bombea. La depresión en este caso, significa la resistencia total del filtro. En esta serie de ensayos se ha mantenido constante el número de revoluciones. Para una depresión de 132 mm, el caudal absorbido es de 109 lts/hora, lo que coincidiría con el volumen de líquido desplazado y filtrado. Para una resistencia menor, correspondiente a 102 mm de mercurio, la filtración es mucho más rápida y corresponde a 170 lts/hora, y para una resistencia de 87 mm de mercurio, la cantidad filtrada es de 240 lts/hora.

Seguidamente hemos estudiado la relación entre la altura alcanzada por la columna de mercurio en función del número de revoluciones, sin entrada de aire. En general, se ha observado que el dispositivo tiende a un vacío máximo, que depende de las constantes del aparato, y que actualmente no estamos en condiciones de establecer con seguridad. Hemos observado a veces vacíos de 500 mm y más, que en otros casos nos hemos podido volver a obtener. Los valores de la tabla siguiente, corresponden a un dispositivo que funciona desde hace tiempo con regularidad; se representa la altura máxima en la columna, excluyendo toda entrada de aire en el dispositivo. Además, se midió el voltaje y amperaje del motor.

I amp.	E volt	a rpm.10 <sup>-3</sup>	H mm	
		2.260	211	
1,4	90	2.300	247	
1,5	95	2.350	278	Curva (a)
1,6	100	2.400	323	
1,9	110	2.550	399	
2,1	120	2.800	466-475	
1,9	110	2.500	409	
1,7	105	2.400	363	
1,5	100	2.300	303	Curva (b)
1,4	95	2.250	290	

Estos resultados están representados por las curvas (a) y (b). Al llegar a un vacío de 475 mm de mercurio, hemos disminuido progresivamente el número de revoluciones, observando los puntos indicados en la curva (b). Esto se explica fácilmente por el hecho de que, a una velocidad determinada, la curva (a) indica el valor inicial y la curva (b) el valor final. La diferencia entre los valores de estos dos puntos, se puede reproducir fácilmente introduciendo oportunamente agua en la cañería —19— la que es inmediatamente bombeada por el vibrador —14— al recipiente con rompeolas. El bombeo del líquido es casi instantáneo. Este líquido arrastra los gases aumentando el vacío de acuerdo a la curva (b).

Para interpretar esta curva que se acerca más al equilibrio que la curva (a), hemos ensayado de calcular la velocidad periférica  $v$  del vibrador, que es proporcional al producto del radio del cono por el número de revoluciones. Ahora bien, de acuerdo al análisis dimensional, entre los valores de  $a$ ,  $h$  y  $r$ , existe la siguiente relación:



$$\frac{n^2 \cdot v}{h} = a$$

expresión que tiene las dimensiones de una aceleración.

Admitiendo un  $r$  constante, se calculó la aceleración mediante la fórmula anterior, obteniéndose como resultados valores no constantes para la aceleración. Por estas razones deducimos que el radio y por ende la velocidad no pueden ser constantes.

Es lógico pensar que así asuceda por efecto centrífugo sobre la masa elástica. Sin embargo, hemos comprobado, haciendo vibrar la extremidad elástica —14—, dentro de un recipiente de vidrio de sección cuadrangular, como en el caso de absorción de aerosoles, que el diámetro del cono aumenta con la frecuencia, pero llegando a un cierto límite, se produce el fenómeno contrario. Observando al estroboscopio, se ve que se forma un vientre en la mitad del tubo elástico, actuando la extremidad inferior como nodo. El efecto de succión en este punto, disminuye grandemente a pesar de haberse aumentado la frecuencia. Este efecto que en realidad se comporta como si fuera de resonancia del tubo elástico, puede modificarse variando la longitud de este último.

La circulación del aire por succión forma en el recipiente colector una descarga del aire aspirado en forma de burbujas muy finas, cuyo diámetro depende del vacío con que se trabaja, indicado por el manómetro —18—. De los experimentos realizados, deducimos que este dispositivo puede prestarse con ventaja en todas las operaciones unitarias en las que no es recomendable la bomba a pistón, debido a su adaptabilidad y sencillez por carecer de órganos de rotación, siendo únicamente la sonda la parte vulnerable.

### 3º) *Pulsómetro.*

El funcionamiento del dispositivo de la figura 12, se basa en el principio de crear sobre un plano vibratorio de órbita circular, una fuerza de reacción entre un perno fijo al plano y una masa libre deslizable sobre el mismo.

Esta masa deslizable está sujeta al plano vibratorio mediante riendas elásticas que le permiten recibir el impacto de la vibración sobre el perno sin girar alrededor del mismo. El es-

pacio anular entre el perno y la masa deslizable, está ocupado por un tubo de goma arrollado sobre el perno. Este tubo recibe como reacción, el impacto de la masa metálica libre que lo rodea, provocando en su interior un movimiento del tipo peristáltico que produce una diferencia de presión entre las extremidades de la espiral de goma, resultando de este movimiento un bombeo del líquido. En la fig. —12— el perno de madera —1— tiene una base que permite atornillarlo al plano vibrador por medio de los orificios —10—. Lleva la espiga —2— que lo sujeta mediante una tuerca al casquete de madera —4—, cuya función es de retener la masa de bronce —3— evitando su salida del perno.

Las riendas —7— con el anillo de goma —8—, impiden a la mesa de reacción —3—, girar sobre sí misma. El tubo de goma ocupa el espacio anular formando las espiras —9— con las extremidades —5—, y —6—. La extremidad —5—, perfora el casquete y la extremidad —6— la base del perno. Es muy importante evitar cantos vivos en todo el espacio ocupado por la goma, pues la vibración produciría efectos de abrasión sobre el material elástico. Para facilitar el movimiento de la masa de bronce sobre su base, se le da al apoyo un perfil acanalado. El peso de la masa de bronce es de 0,311 Kg.

El tubo elástico es de goma látex, tiene un diámetro interior de 5 mm y exterior de 8 mm. Se conecta en —6— mediante otra goma a un embudo vertical alimentado por un caudal

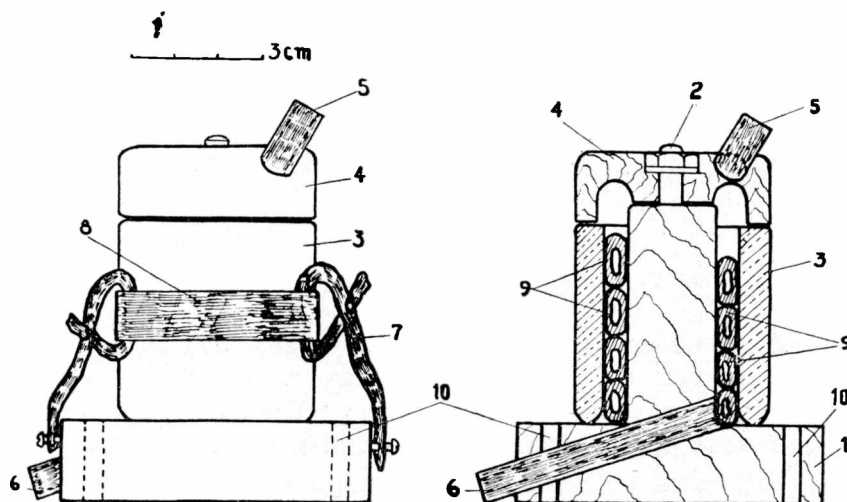


FIG. 12

controlado de agua; en —5— se conecta otro tubo de goma al que se le da altura de descarga variable. Mediante una pinza de Mohr se puede modificar la sección del caño, permitiendo de este modo realizar lecturas a mayores presiones. Para medir la presión en este caso, se aplica al tubo de goma una *T* para conectarlo a un manómetro de mercurio.

*Resultados experimentales:*

A continuación se indican los resultados obtenidos después de haber superado gran parte de los inconvenientes que se presentan en todo dispositivo experimental en su comienzo, modificando las condiciones experimentales para estabilizar el funcionamiento del aparato.

cm <sup>3</sup>	seg.	mm Hg	lts/m				
Volumen	Tiempo	r.p.m.	Altura de col.	caudal	voltios	amperes	watios
100	20	1.900	167	0,30			
100	16	1.900	186	0,37			
100	16	2.000	212	0,37			
100	10,5	2.000	262	0,57			
100	10	2.000	262	0,60			
100	9	2.150	332	0,67			
200	17	2.150	332	0,70			
200	19	2.150	377	0,63			
200	17	2.150	417	0,65			
200	15	2.150	417	0,75			
200	27	2.000	353	0,44	0,75	0,90	67,5
200	30	1.800	272	0,40	70	0,85	59,5
200	54	1.600	179	0,22	63	0,78	49,2

Por estos resultados se deduce que el pulsómetro durante su funcionamiento aprieta alternativamente la espiral de goma modificando su sección hasta un valor mínimo, sin alcanzar a cerrarla completamente, y sin que por ello se produzca el retroceso de líquido, pues la velocidad de circulación de este en el pulsómetro resulta ser aproximadamente la décima parte de la velocidad virtual del contacto del sistema vibratorio.

Se puede prever la aplicación de este tipo de pulsómetro en ciertas operaciones unitarias como bomba de alimentación y también en aquellos casos en que es imprescindible que el con-

tacto del fluido con la bomba se reduzca únicamente a la superficie interna del tubo de goma, y donde hay que reciclar a menudo un líquido.

Si llamamos:

$V_t$  al volumen total que hay que bombear,

$V_e$  al volumen del líquido en la bomba,

$v$  al caudal volumétrico por minuto,

$t$  al tiempo total de la operación en minutos,

$t'$  al tiempo de permanencia del líquido en la bomba (contacto) y

$a$  al número de revoluciones por minuto,

resulta la siguiente igualdad:

$$V_t = n.V_e = n.v.t' = v.t$$

De donde:

$$t' = \frac{t}{n} = \frac{V_t}{V} = \frac{V_e}{n.v}$$

De estas ecuaciones se deduce que el tiempo de retención del líquido en la bomba puede reducirse notablemente, lo que es de importancia en el bombeo de líquidos fisiológicos.

BIBLIOGRAFIA DEL AUTOR RELACIONADA CON LOS  
TEMAS TRATADOS

- 1) *Estudio experimental de las oscilaciones circulares y su posible aplicación en las operaciones unitarias. II*, Rev. Fac. Ing. Quím. Vol. XXIV, pág. 7-26, Santa Fe, 1955.
- 2) *Estudio experimental de las oscilaciones circulares y su posible aplicación en las operaciones unitarias. II*, Rev. Fac. Ing. Quím. Vol. XXV, pág. 7-17, Santa Fe, 1956.
- 3) *Trabajos realizados y nuevas posibilidades en el empleo de la vibración mecánica en las operaciones unitarias*. Rev. Fac. Ing. Quím. Vol. XXVIII, pág. 160-180, Santa Fe, 1959.

## BIBLIOGRAFIA GENERAL

A continuación, citamos algunos trabajos de otros autores que se refieren a temas semejantes. No se han encontrado publicaciones vinculadas estrechamente con nuestras investigaciones, especialmente en lo que se refiere a la forma de vibración y a sus órbitas.

- AUERBACH. (1952). — *Flow and separation processes in vibrating supports*. Kolloid Z. 129. 82-4.
- AUERBACH. (1952). — *Mechanical vibration in process Engineering*. Chem. Eng. Tech. 24.259-61.
- BARLOW SMITH. (1951). — *Device for vibrating fluidized catalyst masses within the reactor in hydrocarbon conversion processes*. U. S. Z 542.287.
- BILLERBECK y otros. (1956). — *Performance of pulsed spray column*. Ind. Eng. chem. 48.183.
- DAMERELL. (1956). — *Formation of organophilic montmorillonite-oil gels by use of magnetostrictive oscillator*. Ind. Eng. Chem. 48.321.
- DAUSER H. W. y NEUMANN E. (1959). — *Industrial sonic agglomeration and collection systems*. Ind. Eng. Chem. 41.2439.
- GROSH y OWING. (1955). — *Igniting pulverised coal*. Ind. Eng. Chem. 47.117.
- HICKMAN. (1957). — *Centrifugal Boiler compression still*. Ind. Eng. Cham. 49.786.
- JEAMPROST. (1950). — *Chemical and thermal control of certain reactions by means of concomitant auxiliary reactions*. Chimis Ind. 65.801.
- LAMBOSSY. (1952). — *Forced oscillations of viscous incompressible liquid in a rigid horizontal tube*. Helv. Phys. Acta 25.371-86.
- MESSER. (1951). — *Process and apparatus for dehydrating lime slurry from acetylene generators by means of vibrator*. P. Ger. 809.573.
- NIXON A. and SMITH M. (1949). — *Mass transfer in liquid-liquid agitation systems*. Ind. Eng. Chem. 41.972.

- RAEL y FANSKE. (1955). — *Effects of agitation in gas fluidization of solids.* Ind. Eng. Chem. 47.475.
- RUDHOLP y FAVEENER. (1948). — *The application of small-amplitude high-frequency vibratory motion to certain types of ore dressing equipment.* J. Chem. Mat. Mining. Soc. S. Africa 48.343.
- “SIMPOSIUM” (1955). — *about pulsatory and vibrational phenomena.* Ind. Eng. Chem. 47.1152.
- STELLING y ELEUND. (1953). — *Eceleration en chemical reacticas by vibration.* P. Swed 138.857.
- ST. CLAIR H. W. (1949). — *Agglomeration of smoke for or dust particles by sonic waves.* Ind. Eng. Chem. 41.2434.
- WIEDGANT y BERG. (1954). — *Pulsaticas in extraction L-L.* Chem. Eng. 61 N° 7 183-8.

Patentes:

- Alemana: 938.011, enero, 1956.  
U. R. S. S.: 105.082, abril, 1957.  
U. S. S. R.: 104.039, octubre, 1956.  
U. S.: 2.812.063, noviembre, 1957.  
Suiza: 289.372, 1954.  
U. S.: 2.746.561, mayo, 1956.  
U. S.: 2.742.158, abril, 1956.  
Be'ga: 471.196, 1947.