

EL MECANISMO DE LA BOMBA A CHORRO DIFUSOR PARA ALTO VACIO

por ENRIQUE GAVIOLA, CRISTALERÍAS RIGOLLEAU

(Recibido el 10 de junio de 1950)

ABSTRACT: An experimental study is made of the factors governing the working of a vapor jet (diffusion) pump. A simplified technique for measuring pump speeds is described.

Gaede's diffusion is not needed, it is present as a negative term and it has to be kept small. Langmuir's condensation is important under all conditions. The postulated maximum compression factor of 100 does not exist: values of up to 4.10^4 for a single stage and 9.10^4 for 2 stages have been measured. The behavior is different under "static" and under "dynamic" conditions: in the first case the jet pump works mainly as a vent, in the second also as a compressor.

A small "booster" pump is described which stands between 2 and 3 mm Hg forepressure working with butyl-phthalate and gives a speed of up to 6 lts/sec with an intake tube of 27 mm inside diameter.

The speed of a jet pump is not constant below a certain value of the forepressure: this is so according to experience and to theory.

The importance of the "border of oil" and of the "second diffusion" (independent from Gaede's) is shown.

A formula is given for the speed, taking into account the swept volume, outgassing and oil cracking, "clean up" and "getter" action, Gaede's and the Second Diffusion.

Introducción

La técnica de la construcción de bombas a chorro para alto vacío ha hecho notables progresos a partir de los primeros trabajos de Gaede⁽¹⁾, Langmuir⁽²⁾ y Crawford⁽³⁾. De la velocidad de 0,04 a 0,07 litros/seg obtenida originariamente por

(¹) W. GAEDE, Ann. Phys. 46, 357 (1915); Zs. techn. Physik 4, 337 (1923).

(²) I. LANGMUIR, Phys. Rev. 6, 48 (1916).

(³) W. W. CRAWFORD, Phys. Rev. 10, 557 (1917).

Gaede en su difusor a ranura de unas décimas de mm. de ancho, se ha llegado a más de mil lts/seg en caños de diámetros que se acercan al metro.

La teoría no ha progresado, sin embargo, al mismo paso, a pesar de las contribuciones efectuadas por Alexander⁽⁴⁾. Subsisten aún prejuicios provenientes de razonamientos hechos sobre modelos primitivos o especiales, razonamientos que no son aplicables a modelos posteriores diferentes, tales como:

a) el factor de compresión máximo por escalón es igual a 100⁽⁵⁾;

b) la velocidad no depende de la presión preliminar, por debajo de un cierto valor de esta;

c) una bomba a chorro de aceite soporta, cuando mucho, algunas décimas de milímetro de presión preliminar (Strong, l. c., p. 111).

Veremos que estas afirmaciones o son incorrectas o tienen validez únicamente bajo condiciones especiales.

Una vieja controversia entre las escuelas de Gaede y de Langmuir colorea, por otra parte, la literatura: Gaede pone énfasis sobre la difusión del gas proveniente del recipiente de alto vacío contra la corriente de vapor de retroceso que surge de la garganta de chupada; Langmuir pone énfasis sobre la condensación del chorro de vapor que arrastra al gas y lo deposita parcialmente sobre la pared fría.

El propósito de este trabajo fué inicialmente, estudiar diseños de bombas a chorro que, funcionando con aceite, soportaran presiones preliminares relativamente altas. A ello se le ha dado poca importancia en países donde una bomba mecánica que chupe 2 o más litros por segundo a 10^{-2} mm. es fácil de adquirir. Aquí tenemos que trabajar, a menudo, en condiciones menos favorables. Al perseguir este propósito, se ha conseguido, al mismo tiempo, aclarar algunos conceptos y precisar el modo de funcionamiento de las bombas a chorro.

(4) P. ALEXANDER, *J. Sc. Instruments* 23, 11 (1946).

(5) J. STRONG, *Procedures in Experimental Physics*, p. 112 (1938) repite la afirmación de Gaede.

Aparato de Pruebas

La velocidad de un equipo de bombas trabajando en condiciones estacionarias, se determina midiendo el flujo de aire que entra al aparato, en presión por volumen sobre tiempo, y dividiendo este flujo por la presión estacionaria dentro de la cámara de alto vacío. La velocidad medida incluye la conductancia de la tubería.

La figura 1 muestra, en forma esquemática, el dispositivo usado. Consta de un Macleod para medir la presión fina P_2 ; un manómetro a aceite (phthalato de butilo) que indica la dife-

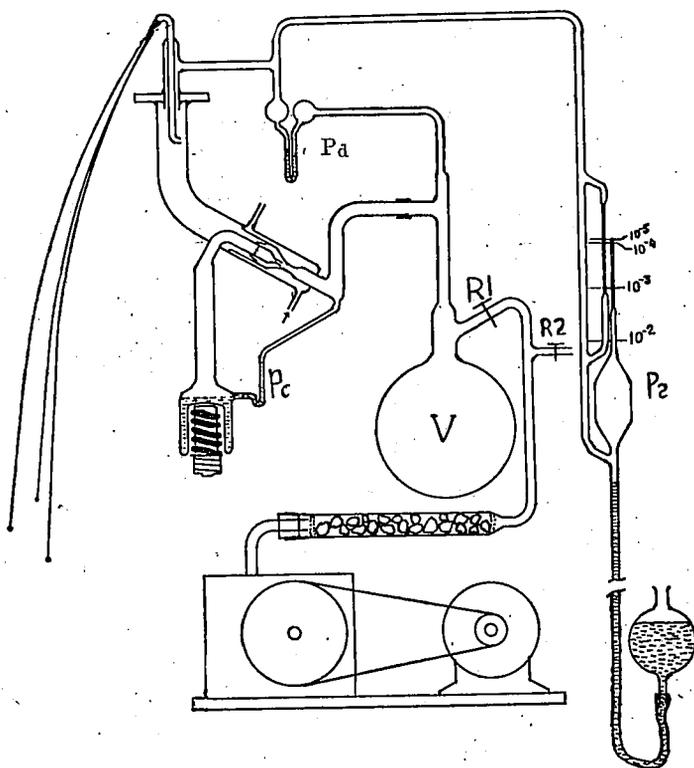


Fig. 1
Dispositivo para ensayo de bombas de vacío

rencia P_d , entre la presión fina y la presión preliminar; un grupo de capilares finos y largos que permiten la entrada continua de pequeñas cantidades de aire (flujo); un manómetro incor-

porado a la bomba para medir la presión P_c de «caldera»; un balón V que estabiliza la presión preliminar y sirve de trampa de protección; un tubo secador, robinetes y las bombas a chorro — difusor amplificador de 2 escalones (D. A. 2) — y mecánica preliminar (*).

Los capilares son hechos estirando rápidamente un tubo calentado al soplete. Para calibrarlos se procede del siguiente modo: se cierran los extremos libres de los capilares con una llamita; se desgasifica el aparato lo mejor posible, teniendo ambas bombas en funcionamiento durante algunas horas y calentando todas aquellas partes que soporten este tratamiento — especialmente el Macleod; se cierra el robinete R_1 y se toma, simultáneamente, una lectura de presión con el Macleod; se toma una segunda lectura algunos minutos después. El aumento de presión por el volumen del aparato desde el difusor hasta el robinete, sobre el tiempo transcurrido indica el flujo de gases y vapores que se desprenden de las paredes interiores del aparato y de los cuerpos que contiene. Si este flujo fuese grande (de juntas de goma²) es conveniente localizar su origen introduciendo, si es necesario, robinetes adicionales. Se supone que las pérdidas, o entradas de aire exterior, ya han sido eliminadas. Evacuado de nuevo el aparato, se efectúan simultáneamente 3 cosas: se cierra R_1 , se toma una lectura P_2 y se quiebra el extremo de uno de los capilares. Se toma una segunda lectura con el Macleod después de n segundos. Se funde el extremo del capilar. Se tiene así el flujo del capilar más el flujo de desgasamiento. Es importante que la descarga de aire se produzca contra una pared, y no en dirección a la garganta de chupada.

La producción de flujos conocidos y prácticamente constantes mediante el método descrito tiene ventajas sobre el procedimiento usual que requiere una válvula a aguja, un capilar calibrado y una gota de mercurio: es más fácil de construir; hay menos posibilidades de pérdidas incontroladas; se tiene en cuenta el desgasamiento (no despreciable) del aparato y la descomposición del aceite; el estado estacionario producido al abrir un capilar con una o ambas bombas funcionando no tiene límite de tiempo; con capilares de sección prácticamente constante, el flujo es inversamente proporcional a su longitud, de modo que puede

(*) Micropal B 2 de la "Compagnie Générale de Radiologie".

hacerse una serie de medidas acortando un capilar, con una sola calibración. El Macleod usado permite medir hasta una fracción de 10^{-5} mm Hg; el manómetro de aceite P_d permite leer el décimo de milímetro a simple vista y el centésimo con una lupa. Debe notarse que P_d es la diferencia entre la presión preliminar y la presión fina P_2 ; la presión preliminar es, pues, $P_d + P_2 = P_1$.

Ensayos sobre Condensación y Difusión

Crawford (l. c.) construyó ya en 1917 bombas a chorro sin circulación de agua. Ellas requerían una presión preliminar relativamente baja. Parecía interesante tratar de obtener una

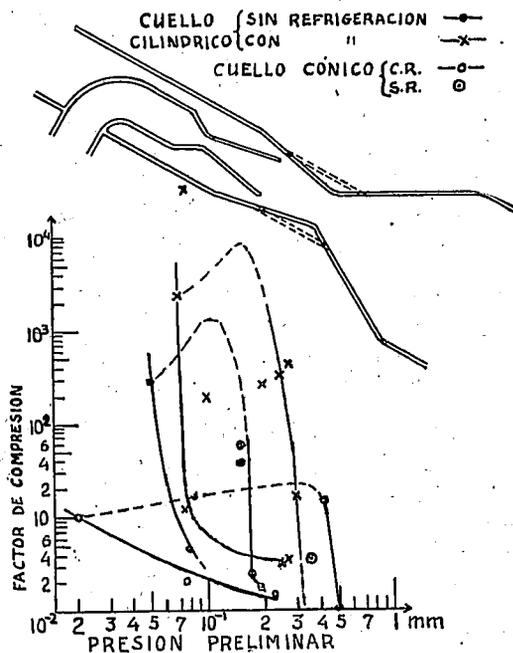


Fig. 2
Efecto de la refrigeración

bomba del mismo tipo que resistiera una presión preliminar relativamente alta. A tal efecto fué diseñada y construída la bomba cuya parte esencial se encuentra reproducida al tope de la

figura 2. El cuello era cónico y tenía un diámetro mínimo igual al del extremo de la tobera. Llamaremos a esta bomba 1b.

Llenada con aceite, colocada en el aparato de pruebas y desgasada, la bomba a chorro no funcionaba: P_d era igual a cero y P_2 era igual a la presión que se obtenía con la bomba mecánica sola. Podía observarse, a simple vista, que una parte del chorro de vapor emergente de la tobera retrocedía hacia el lado del alto vacío. Estábamos, pues, en el caso Gaedeano: los gases debían difundir a través de la contracorriente de vapor proveniente de la garganta de chupada; pero no difundían en cantidad suficiente para modificar las lecturas manométricas, a pesar de la teoría de Gaede. Abriendo un capilar fino, de flujo 0,0025 litros mm/seg, la bomba a chorro funcionaba, *si se permitía que la presión preliminar aumentase hasta 0,35 mm. Hg.* En este caso con $P_c = 60$ mm. de aceite se obtenía $P_2 = 0,1$ y $P_d = 0,25$ mm Hg. Teníamos así un factor de compresión $F = P_1/P_2 = 3,5$ y una velocidad $V = 0,0025/0,1 = 0,025$ lts/seg.

Este resultado es importante para la teoría. Mientras en el sistema reinaba la presión de 0,02 mm. producida por la bomba mecánica, la contracorriente Gaedeana no permitía, prácticamente, la llegada de gas a la garganta de chupada; su velocidad era tal que la difusión del gas era, prácticamente, nula. Gaede mantenía baja la velocidad de la contracorriente de vapor usando capilares o ranuras finos, de décimas de milímetros de ancho o de diámetro. La garganta de chupada tenía en nuestro caso 2 mm. de ancho. La experiencia muestra que esta velocidad puede ser reducida, también, aumentando la presión del lado del alto vacío (por la abertura del capilar) y reduciendo la velocidad de la bomba a chorro por el aumento de la presión preliminar. Esto último se consigue obturando parcialmente la conexión a la bomba mecánica.

La observación anterior sugiere agregar al escalón a tobera un escalón a sombrilla, del lado del alto vacío, que pudiera trabajar a una presión preliminar (intermedia entre ambos escalones) de 0,1 mm. El escalón a tobera funcionaría como válvula capaz de soportar 0,35 mm de presión preliminar y el escalón a sombrilla como compresor.

La contracorriente no es, pues, indispensable para el funcionamiento de la bomba a chorro como Gaede lo creía, sino un inconveniente que hay que tratar de reducir a un mínimo.

Ello se consigue de varios modos. Uno de ellos es la condensación de Langmuir.

Envuelto el cuello con un algodón mojado, el comportamiento de la bomba cambió radicalmente. El mismo está descrito por la curva inferior, en forma de arpa acostada de la figura 2. Para interpretarla conviene aclarar algunos conceptos.

Válvula y Compresor; Sistemas Estático y Dinámico

Desde que se generalizó el uso de bombas a chorro de grandes velocidades los autores separaron los sistemas de vacío en «estáticos» y «cinéticos». En los primeros se suponía que la parte de alto vacío era hermética y tan bien desgasada que la bomba, después de un corto tiempo, trabajaba esencialmente como válvula; en los segundos se suponía que la parte de alto vacío o no había sido desgasada o poseía juntas de goma o de lacre que no permiten un buen desgasamiento o tenía pequeñas pérdidas de magnitud tolerable. Sears⁽⁶⁾ ha llamado recientemente la atención sobre el hecho de que esta separación es artificiosa. Todos los sistemas son cinéticos, en ese sentido, pues el desgasamiento nunca es completo y siempre existen en el alto vacío vapores del líquido que se usa en la bomba, descompuesto o no. La diferencia es pues, cuantitativa y no cualitativa.

En otro sentido, sin embargo, conviene distinguir dos tipos de funcionamiento. 1) Si en el aparato de figura 1, con los capilares sellados, después de un tiempo de funcionamiento de ambas bombas, se cierra el robinete R_1 , la presión en el «reservoir» V aumentará lentamente debido al desgasamiento y a la descomposición del aceite. El factor de compresión $F = P_1/P_2$ recorrerá una cierta curva en función de la presión preliminar P_1 . Lo mismo ocurrirá con la velocidad; ésta puede calcularse únicamente si se conoce el flujo proveniente de la parte de alto vacío; 2) Si el robinete R_1 está abierto —ambas bombas funcionando— se quiebra el extremo de uno de los capilares y progresivamente se acorta su longitud (aumentando el flujo) el factor F y la velocidad V recorren ahora en función de la presión preliminar una curva distinta de la anterior (véase figuras 2 y 3).

(⁶) G. W. SEARS, Rev. Sci Inst. 20, 458 (1949).

En el primer caso la cantidad de gas que la bomba comprime es tan pequeña que no perturba casi el o los chorros de vapor. Estos conservan (casi) todo su impulso para impedir la difusión de gas de la zona de presión preliminar al alto vacío (2ª. difusión). La bomba trabaja como válvula que sostiene una presión preliminar «estática».

En el segundo caso el flujo de gas a temperatura ambiente reduce el impulso y perturba la dirección del o de los chorros

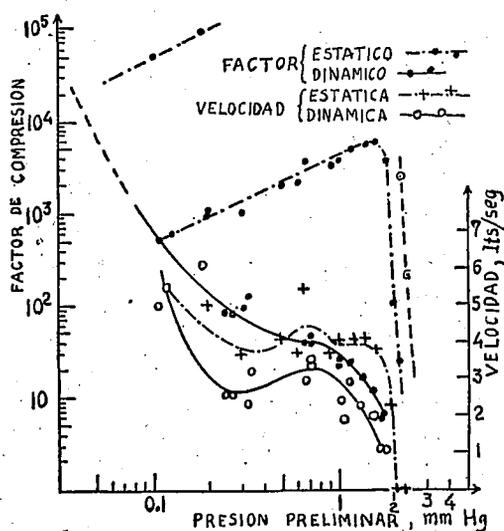


Fig. 3
Factor y velocidad

de vapor. Este efecto perturbador es tanto mayor cuanto mayor es el flujo. Ello reduce la eficiencia de la bomba a chorro como válvula y también su velocidad. La presión preliminar será ahora la que resulte del flujo y de la velocidad de la bomba mecánica. El factor de compresión y la velocidad tendrán, ahora, en función de la presión preliminar, valores menores que antes. Este caso puede ser llamado «dinámico»; la bomba trabaja como compresor y como válvula.

A partir de un punto cualquiera de la segunda curva se puede cerrar el robinete R_1 : F y V recorrerán curvas semejantes a la que se obtenía cerrando el robinete con el mínimo flujo. Sus valores serán siempre menores que los de esta última, de-

bido a la perturbación producida por el flujo mayor. La curva «estática» correspondiente al flujo mínimo encierra todas las otras curvas análogas.

Ensayos sobre Difusión y Condensación

La curva en forma de arpa acostada al pie de Fig. 2 muestra los resultados obtenidos con la bomba 1b refrigerada con un algodón mojado envuelto en la zona del cuello y proximidades. La rama superior corresponde al comportamiento «estático» (con R_1 cerrado) y la inferior al «dinámico» (R_1 abierto). La presión preliminar máxima que soporta es relativamente satisfactoria. El factor de compresión, en cambio, en condiciones dinámicas, con algunas décimas de mm de presión preliminar, es reducido. Para 2.10^{-2} de presión preliminar se obtiene tan sólo 2.10^{-3} en el vacío «fino», valor insuficiente. Estos hechos muestran que la bomba trabaja relativamente bien como válvula, pero deficientemente como compresor (velocidad pequeña). La refrigeración ha reducido la contracorriente Gaedeana permitiendo la condensación de una parte del exceso de vapor que no pasa por el cuello. La refrigeración empleada es deficiente, pues el algodón mojado no disipa rápidamente el calor. Un enfriamiento eficiente mejoraría, sin duda, el comportamiento de la bomba. Pero sacrificaríamos el propósito inicial de poder trabajar con refrigeración a aire.

Era de esperar que la contracorriente se redujese, si se transformaba el cuello cónico en uno cilíndrico, de diámetro igual al que tenía en la garganta de chupada (al nivel de la boca de la tobera). Esto fué hecho sin modificar el resto del aparato. La bomba transformada funcionaba, ahora, sin y con refrigeración a agua. Las otras 2 curvas de la figura 2 muestran los resultados obtenidos.

Con refrigeración a aire se obtuvo un factor de compresión de hasta 300, en condiciones dinámicas, para flujo pequeño, con una presión preliminar de 5.10^{-2} . Ello da un vacío fino del orden de 10^{-4} . Pero la presión preliminar máxima que soporta es, ahora, reducida. Con el robinete cerrado se ha obtenido una velocidad de 0,44 lts/seg para $P_1=0,15$ y flujo=0,0011.

Con un algodón mojado envuelto al cuello, el factor au-

menta hasta 2330 (*) y la presión preliminar máxima hasta unas 3 décimas de mm. La velocidad alcanza ahora 2,2 lts/seg para flujo = 0,001 y $P_1 = 0,10$ mm Hg. Una refrigeración eficiente mejoraría, seguramente, los resultados.

Observemos, de paso, que el «factor máximo» 100 por escalón no existe: aún sin refrigeración a agua hemos obtenido $F = 300$ y con una refrigeración rudimentaria cerca de 8 veces más.

Estos ensayos muestran que uno de los efectos de la refrigeración es eliminar, en gran parte, por condensación, el exceso de vapor que de otro modo generaría la contracorriente Gaedeana. Se podría pensar en diseñar el cuello cilíndrico y la tobera de modo tal que no hubiera exceso de vapor ni contracorriente. Ello no puede ser realizado sino para flujo cero o para un flujo préfijado, pues el gas frío que se mezcla con el chorro de vapor cambia las trayectorias de las moléculas de éste, produciendo un ensanchamiento del chorro. Este ensanchamiento varía con el flujo. Si para un cierto flujo el diámetro del cilindro es correcto, para uno mayor habrá exceso de vapor, y para uno menor el chorro no llenará el cilindro y no servirá de válvula.

Con refrigeración a aire el cuello necesita tener diámetros amplios para mantener dentro de límites la contracorriente (diseños de Crawford l. c.), pero la presión preliminar tolerada se hace exigua. Con refrigeración a agua corriente se puede reducir el diámetro del cuello y aumentar con ello la presión preliminar tolerada sin producir una contracorriente peligrosa; pero se reduce la velocidad de chupada.

Es interesante observar que para un mismo cuello cilíndrico la refrigeración aumenta el valor de la presión preliminar tolerada (figura 2); ello muestra que el exceso de vapor, además de producir la contracorriente, reduce el impulso hacia adelante del chorro. Se producen, seguramente, torbellinos de vapor no condensado a lo largo de las paredes, los que absorben parte del impulso del chorro y lo transmiten a las paredes laterales, restándolo al necesario para contener la presión preliminar.

(*) En una medición posterior se ha llegado hasta $F = 4.10^4$ para $P_1 = 0,09$.

Para obtener presión preliminar y velocidad altas parece conveniente usar 2 escalones, uno diseñado como válvula de retención y el otro como compresor de velocidad razonable.

Bomba a Chorro de 2 Escalones

El diseño de esta bomba está indicado, esquemáticamente, en figura 1; los resultados de su prueba en figura 3. Tiene refrigeración a agua corriente. El tubo de conexión al alto vacío tiene un diámetro interior de 27 mm y el que va a la bomba preliminar de 15 mm. Los resultados de su prueba están indicados gráficamente en figura 3 y numéricamente en Tabla I. Los puntos llenos corresponden al valor del factor de compresión (la rama superior en condiciones estáticas y la inferior dinámicas), con escala a la izquierda. Las pequeñas circunferencias, a la velocidad, en condiciones dinámicas y las cruces en condiciones estáticas, cuya escala está a la derecha.

La presión preliminar que la bomba soporta en condiciones estáticas depende de la presión de caldera. La curva llena fué tomada con una presión de caldera de unos 65 a 70 mm de aceite o sea 5,0 a 5,4 mm de mercurio; la de puntos y rayas, con 85 mm de aceite, o sea 6,5 mm de mercurio. Este aumento hace crecer la presión preliminar máxima estática de 2,3 a cerca de 2,7 mm Hg.

La rama estática de la curva factor de compresión arranca del punto $P_1 = 0,11$, $P_2 = 2,2 \cdot 10^{-4}$, flujo 0,0011 (medida N^o. 6 de tabla I) de la curva dinámica; esto es, toda ella está tomada con el capilar N^o. 2 abierto y el robinete R_1 cerrado. Lo mismo vale para la rama estática de la curva de velocidad. Si las curvas estáticas arrancasen de puntos de menor flujo de la curva dinámica, su recorrido sería análogo pero sus valores podrían ser considerablemente superiores. Los dos puntos al tope, por ejemplo (mediciones 1 y 5 de tabla I), indican valores $F = 5 \cdot 10^4$ y $9 \cdot 10^4$ para una curva «estática» cuyo flujo, formado por el desgasamiento y la descomposición del aceite, no se conoce, pues los capilares estaban cerrados. No es posible, sin el valor del flujo, calcular una velocidad correspondiente a los mismos.

Se dice arriba que esos puntos corresponden a la rama estática porque, si bien el robinete estaba abierto, la presión preli-

minar de 0,10 y 0,18 no era debida al flujo proveniente del alto vacío sino a la humedad y vapores del aceite de la bomba mecánica preliminar. La presencia de estos vapores reduce prácticamente a cero, para flujo de alto vacío despreciable, la velocidad de la bomba mecánica, lo que es equivalente, en cierto sentido, a cerrar el robinete.

La reducción de P_1 de 0,18 a 0,10 se debió a una limpieza del tubo secador después de la medición N^o. 4.

La curva dinámica se interrumpe con un cierto flujo máximo, cuyo valor puede ser aumentado si se aumenta la presión de caldera; para un valor de la presión preliminar algo inferior al que se alcanza en condiciones estáticas.

Conviene observar que para mantener la presión de caldera P_c constante al llegar a presiones preliminares elevadas, es necesario aumentar la calefacción. Ello se debe a que P_c es la diferencia entre la presión de caldera y la presión preliminar, de modo que la presión total de caldera es $P_c + P_1$. Al aumentar P_1 se reduce la corriente de evaporación si no se aumenta simultáneamente la temperatura. En las mediciones N^o. 32 y 33, por ejemplo, fué necesario aumentar la calefacción de 138 a 210 watios para mantener $P_c = 70$ mm aceite. Si se permitía bajar a la presión de ese valor, la bomba no podía contener el empuje de la presión preliminar y fallaba.

Podría pensarse en aumentar aún más la presión de caldera a fin de tolerar mayores presiones preliminares. Hay dos límites: uno es la diferencia de nivel entre la superficie líquida en caldera y el punto de arranque del tubo que conduce a la bomba preliminar; el otro es el hecho de que al aumentar la cantidad de vapor circulante más allá de cierto límite, disminuyen la velocidad y el factor de compresión de la bomba. En las mediciones 3 y 4 de tabla I, por ejemplo, funcionó la bomba en condiciones dinámicas, con un capilar de flujo 0,0079 lts./mm/seg abierto, el que producía una presión preliminar de 0,32, con 15 mm aceite (1,15 mm Hg) de presión de caldera, se obtuvieron $V = 3,2$ lts/seg y $F = 130$; aumentando la presión de caldera a 80 mm aceite (6,15 mm Hg) los valores se redujeron a $V = 2,4$ y $F = 95$. Hay un aumento de 34 % en la velocidad al reducir P_c .

Este efecto se debe, seguramente, a que con la cantidad de vapor circulante aumenta la densidad de la contracorriente Gae-

deana, principal obstáculo a la llegada del gas a la garganta de chupada. Si el líquido hierve en forma irregular, con explosiones, en el momento de una de éstas bajan la velocidad y el factor por la misma razón. Esto introduce fluctuaciones en las medidas. Pueden evitarse desconectando la calefacción unos cuantos segundos antes de medir. Conviene observar, también, que, con frecuencia, al aumentar el flujo aumenta V pero se reduce F . Véase mediciones N^o. 7 y 8, 24 y 25, 28 y 29. Esto muestra las limitaciones del concepto de velocidad, medido en volumen sobre tiempo, para la descripción del funcionamiento de una bomba a chorro.

Con esta bomba se ha conseguido el propósito inicial de construir una «amplificadora» («booster») que soportase presiones preliminares del orden del milímetro, fácilmente obtenibles aún con bombas preliminares más, y tuviese una velocidad de varios litros por segundo (4,1 lts/seg a 1 mm de presión preliminar «estática» y 2,4 a 2,9 lts/seg en condiciones dinámicas con flujo del orden de 0,1 lts mm/seg) y presión fina inferior a 10^{-3} mm en el primer caso y de $4 \cdot 10^{-2}$ en el segundo. Ella *amplifica* el poder de una bomba preliminar chica, de 0,1 lts/seg, 24 a 29 veces en condiciones dinámicas y 41 veces en condiciones estáticas, en cuanto a velocidad.

La combinación bomba mecánica chica y bomba amplificadora a chorro puede substituir a una bomba mecánica grande como equipo completo o como preliminar de una bomba a chorro de gran velocidad. No permite reducir el tiempo necesario para llegar de presión atmosférica a un par de milímetros. Pero elimina, en cambio, el tiempo necesario para pasar de un par de milímetros a 10^{-2} , presión a la que comienzan a funcionar la mayoría de las bombas a chorro grandes. Ambos tiempos son del mismo orden de magnitud para bombas mecánicas de 2 escalones, con aceite de baja tensión de vapor y no emulsionado con agua y con un secador en buenas condiciones; en otras condiciones, el tiempo necesario para pasar de 2 a 0,01 mm suele ser muchas veces mayor que el que se emplea para llegar a 2 mm desde presión atmosférica.

La Inconstancia de la Velocidad

La idea de que la velocidad, medida en volumen sobre tiempo, de una bomba a chorro es constante, por debajo de una cierta

presión preliminar, es tan antigua como las bombas mismas. Es curioso que se haya mantenido tanto tiempo. Ella implica sostener que una bomba a chorro trabaja como una bomba a cilindro y pistón sin espacio nocivo o residual. Esto es, que el volumen barrido por un «frente» del chorro es independiente de la cantidad de gas frío que se le mezcla. Ello es absurdo, desde el punto de vista de la aerodinámica. La velocidad del chorro de vapor en una bomba moderna es, según Alexander, en el caso de Hg, de 1, 2 a 3,4 veces mayor que la velocidad más probable de los átomos del mismo a la temperatura del vapor y su energía es mayor por cierto que la de las moléculas del gas a la temperatura ambiente. El mismo Alexander (l. c.) anota que el aumento del flujo (mayor número de choques) retarda, («slows down») el chorro que sale de la boquilla y acorta su alcance efectivo. Ello significa reducir el volumen barrido y con ello forzosamente la velocidad.

La perturbación producida por el flujo de gas ensancha el chorro una vez salido de la boquilla o tobera y aumenta con ello la contracorriente Gaedeana. Ello reduce también la velocidad.

La corriente del mismo flujo, en cambio, reduce el valor de la contracorriente y con ello aumenta la velocidad. Un ejemplo de esto último lo tuvimos en la bombita 1b sin refrigeración.

Se tienen, pues, hasta ahora, 3 efectos, 2 de los cuales reducen la velocidad y 1 la aumenta. Hay un 4º efecto ligado al 1º y al «borde de aceite» que se verá enseguida. La influencia cuantitativa de estos 4 efectos deberá calcularla la teoría dinámica de la bomba a chorro.

Las curvas empíricas muestran que no existe tal constancia ni en condiciones estáticas, ni en el caso dinámico (Fig. 3). El máximo intermedio, para $P_1=0,6$ a $0,75$ es sin duda real en el caso dinámico; en el caso estático es probable que sea real también. Su explicación habrá que buscarla, en parte, en el tercer efecto, la neutralización de la contracorriente.

La forma y el valor de las curvas de velocidad de la bomba a chorro dependen también de la curva de velocidad de la bomba mecánica que se use y de las tuberías que las conectan: para un mismo flujo, diversas bombas mecánicas o tuberías de distinto diámetro y largo producen distintos valores de la presión

preliminar, lo que modifica el factor de compresión y la velocidad.

Con mercurio se obtienen variaciones aún mayores de la velocidad en función de la presión preliminar. Ello será descrito en una próxima publicación.

Sin embargo, una buena cantidad de curvas de velocidad publicadas (¿o todas ellas?) presentan la zona de constancia postulada por Gaede desde una cierta presión preliminar hasta llegar cerca de la presión mínima, límite del alto vacío. Sears (I. c.) ha eliminado el límite inferior de la postulada constancia, mostrando que el descenso de la velocidad para flujos tendiendo a cero es aparente y debido al desgasamiento del aparato y a la descomposición del aceite.

¿Por qué se han publicado tantas curvas así?

El problema es en parte físico, en otra psicológico. Únicamente a la primera parte se puede hacer referencia aquí. La velocidad medida tiende a ser constante si ésta se acerca a la conductancia de cualquier parte de las conexiones y gargantas del alto o bajo vacío, o a la de su conjunto. Si éste es el caso, lo que se mide es la conductancia de tuberías y gargantas y no la velocidad de la bomba. Es $1/V_m = 1/V + 1/C$ donde V_m es la velocidad medida. V la de la bomba a chorro y C la conductancia del aparato; si $V > C$, la velocidad medida V_m depende más de C que de V .

El Borde de Aceite y la Segunda Difusión

Es común observar en bombas de vidrio o vidrio-metal que funcionan a chorro de aceite, al final del período de calentamiento, algo después del comienzo de la circulación de vapor de aceite, la formación de un borde líquido sobre la pared de vidrio, casi al nivel del extremo de la sombrilla o tobera. Este borde presenta sectores circulares paralelos al canto de la sombrilla o tobera unidos por partes en Y donde puede observarse que el aceite corre hacia abajo (véase figura 4). El borde, cuya formación es rápida, se desplaza lentamente hacia abajo, paralelamente a sí mismo, reduciéndose al mismo su tiempo, su sección y, por lo tanto, su visibilidad. Desaparece cuando alcanza cierta distancia (30 mm en el caso de figura 4) del nivel del extremo de la sombrilla.

Se interpreta, generalmente, la presencia del borde de aceite como indicación de que la bomba no «tira» aún y que hay que esperar a que desaparezca para que «entre en régimen». Ello no es correcto. Es fácil demostrar, midiendo las presiones fina y preliminar, que la bomba ha comenzado a trabajar en el mismo instante en que aparecieron él o los bordes de aceite (puede haber uno en cada escalón). El borde de aceite demuestra que la bomba a chorro ya está trabajando.

$$P_1 + P_2 < 0.10 \quad = 0.15 \quad = 0.25 \text{ mm Hg}$$

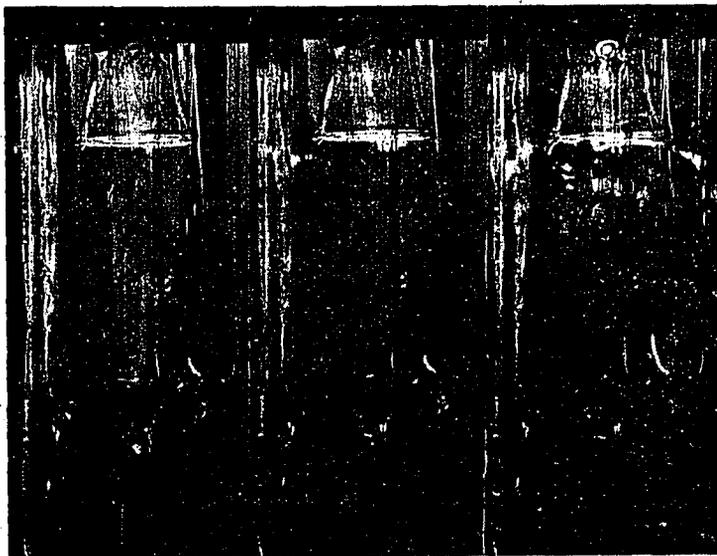


Fig. 4
El borde de aceite.

El borde de aceite aparece de nuevo con la bomba a chorro «ya en régimen» si la presión preliminar aumenta más allá de cierto límite. A partir de este punto, si la presión preliminar sigue aumentando, el borde hace el recorrido inverso al descrito anteriormente. Sube y engorda acercándose al nivel de la boca de la sombrilla o tobera. Si la presión aumenta más aún, el borde se *derrama* en un cierto instante, hacia arriba y hacia abajo, desapareciendo: La bomba ha dejado de tirar por exceso de presión preliminar. La figura 4 muestra 3 fotografías de una bomba de ensayo (É. 2) de 2 escalones, en pleno funcio-

namiento, tomadas en idénticas condiciones, salvo la variación de la presión preliminar. En ellas se distingue el tubo de chupada, la sombrilla del escalón fino, el tubo que conduce el vapor al escalón a tobera central, ésta y el tubo que condensa el chorro de la tobera y conduce a la conexión de la bomba preliminar (esquemáticamente en figura 5). En la fotografía de la izquierda, tomada con presión preliminar 0,07 mm no hay borde de aceite visible en el escalón superior y a duras penas puede distinguirse en el escalón a tobera. La fotografía del centro corresponde a 0,15 mm. Puede verse, algo borroso, el borde en la parte izquierda del tubo de chupada del escalón a sombrilla, unos 7 mm por debajo del extremo de ésta. A la derecha, su presencia perturba la sombra lineal negra inclinada. En estas condiciones el borde es difícil de fotografiar porque no se está quieto: se desplaza varios milímetros hacia arriba y hacia abajo al compás de la irregular ebullición de la caldera. En la vista de la derecha el borde se muestra claramente, con sus sectores circulares y sus «desagües» en Y.

¿A qué se debe y qué significa el borde de aceite?

Para que el borde no «caiga» y tenga que «desaguar» por lugares especiales, es necesario que sea sostenido por una corriente de gas hacia arriba. El borde está en el lugar en que esta corriente da la vuelta, formando un torbellino sobre la pared del tubo de chupada (véase esquema en figura 5). En el torbellino reina un máximo de presión de gas. Ya Alexander (l. c.) al describir el funcionamiento del chorro afirmaba que sobre la pared se forma, debido a la condensación, una región en la cual la densidad del gas alcanza un máximo. Esa es la región cuya presencia demuestra el borde de aceite.

El borde sirve, también, para controlar el centraje de toberas y sombrillas: donde el extremo de una de éstas se encuentra más cercano a la pared del tubo de chupada, el borde de aceite es soplado a mayor distancia*

La distancia media del borde de aceite al nivel del extremo de la sombrilla es linealmente proporcional al factor de compresión (figura 5). Ello muestra que por encima del borde de aceite y a lo largo de la pared difunde gas desde el torbellino

(*) La asimetría de los agujeros que suministran vapor al escalón en sombrilla produce el mismo efecto.

hacia el alto vacío. Llamo a ésta la 2ª. difusión, para distinguirla de la difusión Gaedeana. Ella es posible, a pesar de la alta velocidad del chorro de vapor, debido a que esta velocidad se reduce por frotamiento al acercarse a la pared; en el límite es cero.

El borde líquido no puede ser observado para mercurio, porque no moja a la pared de vidrio.

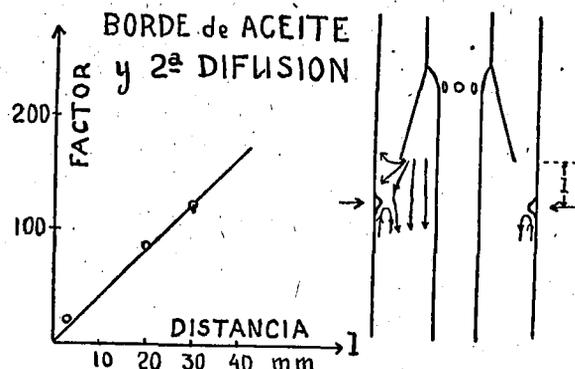


Fig. 5

La Fórmula de la Velocidad

Como resumen de este trabajo se puede escribir una fórmula para la velocidad de un escalón de una bomba a chorro. Ella puede orientar al que encare el cálculo aerodinámico completo.

$$V = S - D/P_2 + C - G - H (P_1/P_2)$$

S es el volumen barrido por un frente del chorro de vapor. D es la cantidad de gas generado por el desgasamiento de las paredes y por la descomposición del vapor de la bomba (Sears l. c.) medido en presión por volumen. P_2 es la presión fina y P_1 la preliminar. C es el volumen que se elimina por ad- y por absorción en la zona del vacío fino (efecto de «Cleanup» y de «Getter»). G es la reducción del volumen de gas que llega a la garganta de chupada debido a la contracorriente de Gaede; ella depende del diseño de la bomba y de las condiciones en que trabaja; para calcularla hay que tener muy en cuenta la pre-

sión lateral de Bernoulli para chorros a velocidades supersónicas. H es la 2ª. difusión, la que se produce lamiendo la pared, a partir del torbellino que señala el borde de aceite. Todo en la unidad de tiempo. S , G y H son funciones del flujo y de las presiones de caldera, preliminar y fina.

Deseo expresar mi agradecimiento al señor Angel De Francesco por haber hecho posible la construcción de los diversos modelos de bombas a chorro utilizados; al señor Atilio Colautti, por haberme prestado una bomba mecánica de su construcción, por haberme obsequiado phthalato de butylo y otras cosas y por haberme cambiado mercurio sucio por mercurio tridestilado; a los señores Heyn y Heguilor de *Fadet* por haber manufacturado esmeradamente las bombas de acuerdo a mis diseños.

TABLA I
BOMBA A CHORRO A-2

Número de orden	Capilar abierto	mm P_c aceite	P_s 10 ⁴ mm Hg	P_d	$P_d + P_s$	Flujo	Velocidad	Factor	Estático o Dinámico	Observac.
1	no	80	0,02	0,18	0,18	—	—	90000	dinám.	
2	2	80	1,8	0,19	0,19	0,0011	6,1	1050	»	
3	1	80	32,5	0,31	0,31	0,0079	2,4	95	»	aumento de F y V
4	1	15	24,5	0,32	0,32	»	3,2	130	»	con reducción de P_c
5	no	80	0,02	0,10	0,10	—	—	50000	»	secador limpio
6	2	70	2,2	0,11	0,11	0,0011	5,0	500	»	aumento de V con-
7	1	60	30	0,25	0,25	0,0079	2,6	33	»	flujo pero reducción
8	3	60	185	0,65	0,67	0,053	2,9	36	»	de F
9	3	30	430	0,65	0,69	»	1,2	16	»	reducción de F y V
10	2	80	2,2	0,20	0,20	0,0011	5,0	910	estát.	con P_c
11	»	75	2,7	0,50	0,50	»	4,1	1850	»	
12	»	75	2,0	0,65	0,65	»	5,5	3250	»	
13	»	70	2,7	1,00	1,00	»	4,1	3700	»	
14	»	70	2,7	1,20	1,20	»	4,1	4450	»	
15	»	70	2,7	1,40	1,40	»	4,1	5200	»	
16	»	65	3,0	1,60	1,60	»	3,7	5340	»	
17	»	65	5,0	1,80	1,80	»	2,2	3600	»	
18	»	70	200	2,00	2,02	»	0,06	101	»	
19	»	65	1000	2,10	2,20	»	0,01	22	»	comienza a fallar
20	»	65	3,0	0,30	0,30	»	3,7	1000	»	
21	»	65	3,0	0,60	0,60	»	3,7	2000	»	
22	»	65	3,0	0,90	0,90	»	3,7	3000	»	
23	2	70	2,0	0,12	0,12	»	5,5	600	dinám.	
24	1	70	33	0,26	0,26	0,0081	2,5	79	»	aumento de V con el
25	3	65	170	0,70	0,72	0,060	3,5	42	»	flujo y reducción F
26	3	65	180	0,70	0,72	»	3,3	40	»	
27	4	65	500	0,98	1,03	0,095	1,9	21	»	
28	5	65	400	0,97	1,01	»	2,4	25	»	aumento de V y red.
29	6	70	500	1,10	1,15	0,146	2,9	23	»	F
30	7	70	900	1,25	1,34	0,204	2,3	15	»	
31	8	70	1300	1,40	1,53	0,256	2,0	12	»	
32	9	70	2800	1,40	1,68	0,307	1,1	6,0	»	
33	9	70	2700	1,50	1,77	»	1,1	6,5	»	aumento calefacción