

INTRODUCCION A LA TEORIA AERODINAMICA DE LAS BOMBAS DE ALTO VACIO A CHORRO DE VAPOR

por ENRIQUE GAVIOLA *Cristalerías Rigolleau* (*)

(Recibido el 13 de Set. 1950)

ABSTRACT. - *Introduction to the Aerodynamical Theory of the Vapor Jet high Vacuum Pump.* - Results obtained with three glass pumps of 2 and 3 stages, two of them used with mercury and with oil, allow to dis-entangle the factors governing their functioning. It is found that the lesser efficiency of mercury at low pressures is due to a higher Gaede's flow and that its reported higher efficiency at relatively high pressures is due mainly to the fact that the same Watt input develops larger boiler pressures with mercury. A valve and a compressor effects can be conceptually separated. A quantitative first approximation aerodynamical theory of the first is developed. It shows that supersonic speeds of vapor jets are common and that Mach's number is larger for mercury. Backing pressures of the order of millimeters can be obtained with oil as well as with mercury. With increasing gas flux the speed decreases at first and grows later to a "secondary" maximum. The reason for this is found in the behavior of Gaede's flow. The volume swept by the main vapor current is several times larger than the speed at low pressures, but it builds up the main resistance at higher pressures under dynamical conditions. The "second diffusion" limits the speed at higher pressures under static conditions. The factor of Sears constitutes the main resistance at the low pressure end of the velocity curve.

A general formula for the speed of a pump is written, taking account of six terms: Sears', Gaede's, throat, swept volume, second diffusion and tube resistances. The resistance of Gaede dominates the field under average working conditions.

Rules for desing of pumps are set down and it is shown that a single stage pump does not compare favorably with two- and three- stage pumps. In a multi-stage pump each stage performs a specific job, the first as compressor, the last as valve, the fore-last as helper of the last, etc.; the vapor density in each can and must be kept just right in order to hold the resistance of Gaede within bounds.

(*) (Ahora en Laprida 854, Córdoba).

INTRODUCCION

En la parte I de este trabajo (*) ensayos han sido descritos con «difusores» de uno y de dos escalones, con refrigeración a aire y a agua, funcionando con aceite. Ellos han permitido establecer que:

1. - Un difusor desempeña 2 funciones: válvula y compresor. Puede ser una buena válvula y no servir como compresor (velocidad cero).

2. - Conviene distinguir el comportamiento «estático», cuando la bomba funciona únicamente como válvula, del comportamiento *dinámico*, cuando trabaja también como compresor.

3. - La corriente Gaedeana de vapor que parte de la garganta de chupada y se mueve hacia el alto vacío limita la velocidad de la bomba como compresor, pudiendo reducirla a cero.

4. - La condensación del excedente de vapor en la zona cercana, a ambos lados, de la garganta de chupada (Langmuir) evita que la corriente de Gaede sea, en ciertos diseños, excesiva.

5. - Un borde de aceite visible por debajo de un escalón, cuando la presión preliminar crece, indica el lugar del torbellino del cual parte la segunda difusión a lo largo de la pared.

6. - La segunda difusión fija el límite a la presión preliminar que un difusor aguanta.

7. - El flujo de gas que chupa y comprime la bomba en condiciones dinámicas tiene diversos efectos sobre su funcionamiento: a) perturba al chorro de vapor reduciendo su velocidad y modificando su trayectoria; b) influye sobre la velocidad de la corriente de Gaede, pudiendo llegar a anularla; c) eleva la presión preliminar, acercando el *borde de aceite* a la garganta de chupada, con lo que crece la segunda difusión.

En esta segunda parte se hace un estudio comparado del comportamiento de tres bombas, dos de ellas con mercurio y con aceite, lo que permite terminar de limpiar el camino de prejuicios y desarrollar una introducción fenomenológica a una futura teoría aerodinámica; se plantea una fórmula general aproximada para la velocidad, y al final se discuten algunos puntos fundamentales sobre diseño de bombas.

(*) E. GAVIOLA, Rev. Unión Mat. Arg. 14, p. 444 (1950) citado en adelante como (I).

El Mercurio en las Bombas a Chorro de Vapor.

Desde que Gaede construyó el primer difusor en 1915 hasta que Burch comenzó a usar con éxito aceites de baja tensión de vapor en 1928, el mercurio reinó indiscutido en las bombas a chorro de vapor para alto vacío. El inconveniente del mercurio es su presión de vapor de 1,2 micrones a la temperatura de 20°C. Esa presión es tolerable en algunas aplicaciones, pero excesiva en otras. Su propiedad de alearse con muchos metales y su toxicidad hacen al mercurio indeseable en ciertos casos. Para mantener la presión de vapor de mercurio por debajo de 10^{-4} hace falta una trampa fría a una temperatura de unos 10° bajo cero; para hacerla bajar de 10^{-5} hay que llegar a 25° bajo cero.

Los aceites minerales y sintéticos usados a partir de Burch tienen menores tensiones de vapor a temperatura ambiente y, si bien requieren también el uso de trampas frías si se quiere evitar su presencia en los recipientes de alto vacío, basta, en general, la circulación de agua de la canilla por la trampa fría para mantener la presión por debajo de 10^{-4} . Los aceites tienen, en cambio, 3 desventajas con respecto al mercurio: 1) al calentarse se descomponen parcialmente dando origen a sustancias volátiles que limitan el valor del vacío final y a parafinas o breas que ensucian la bomba; 2) su menor tensión de vapor obliga a elevar la temperatura para alcanzar la misma presión de caldera, gastando más energía, a pesar de su menor calor de vaporización; 3) la elevación de temperatura está limitada por la creciente descomposición del aceite; ello limita la presión preliminar tolerable.

Una desventaja del mercurio no ha sido, hasta ahora, satisfactoriamente explicada: una misma bomba tiene, para presiones finas inferiores a 10^{-3} (flujos pequeños) menos velocidad (cerca de la mitad) con mercurio que con aceite (Figura 1). Esta desventaja ha sido exagerada en la literatura. En el excelente libro de Strong⁽¹⁾ puede leerse en p. 112: «Con aceite se tienen usualmente velocidades de decenas o centenas de litros por segundo mientras que con mercurio las velocidades son generalmente de una fracción de litro por segundo hasta algunos litros por segundo». Esta afirmación sugiere que la eficiencia del acei-

(1) J. STRONG, *Procedures in Experimental Physics*, N. Y., 1938.

te es unas 100 veces mayor que la del mercurio. Sin embargo, en el mismo libro puede leerse en página 97: «Un buen aceite para difusor tiene una eficiencia de alrededor de 0,5 o 0,6. La

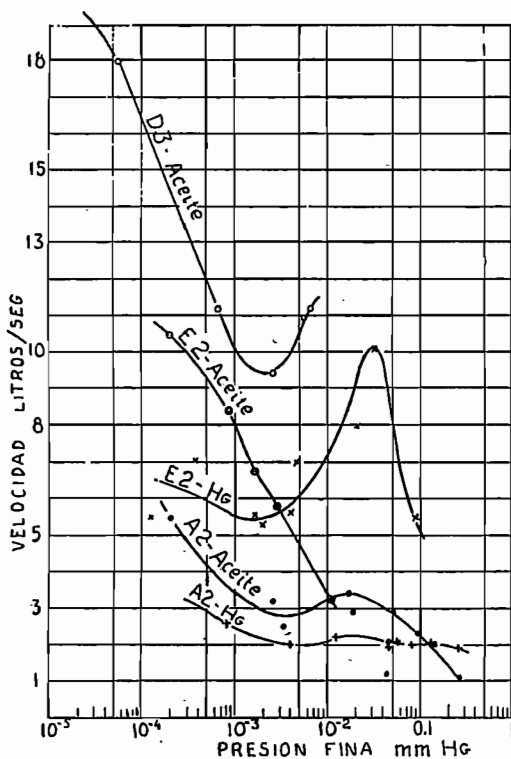


FIG. 1

Curvas dinámicas de velocidad volumétrica en función de la presión fina para las tres bombas A-2, E-2 y D-3; las dos primeras con aceite y con mercurio.

eficiencia de difusores a mercurio varía de 0,1 a 0,3». De acuerdo a esto la eficiencia del mercurio es solamente la mitad de la del aceite y no 100 veces menor como se sugiere en p. 112.

Otra diferencia es exagerada en la literatura: Alexander⁽²⁾ p. ej., afirma que «...bombas a vapor de aceite que tienen una alta eficiencia a presiones por debajo de 10⁻⁴ mm de mercurio son mucho menos eficientes a presiones por arriba de 10⁻³ mm que bombas a vapor de mercurio». ¿Cómo se explica este cu-

(²) P. ALEXANDER, *J. Scient. Inst.* 25, p. 313 (Sept., 1948).

rioso hecho? Alexander trata de explicar la mayor eficiencia del aceite a bajas presiones, en parte, por su menor tensión de vapor, lo que aseguraría «una más completa condensación del mismo», sin indicar si esto reduce la contracorriente Gaedeana o

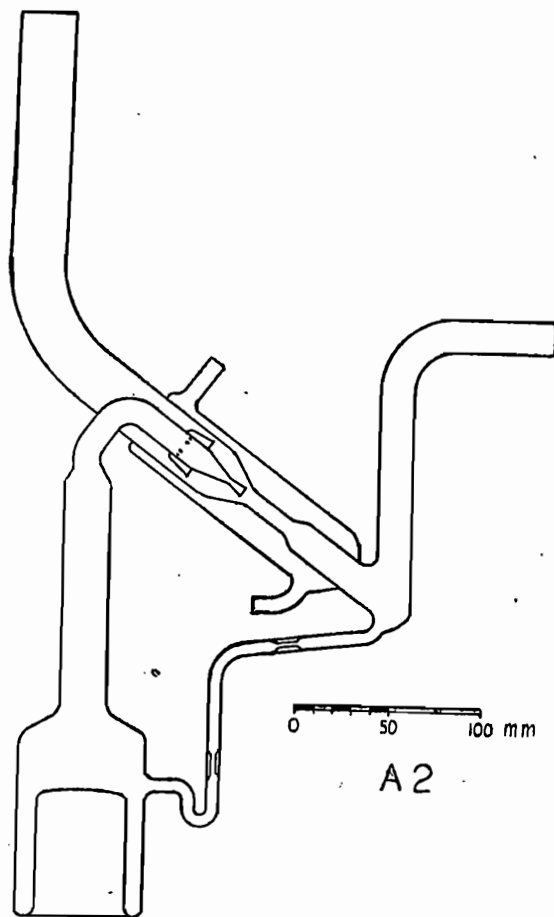


FIG. 2
Difusor amplificador (“Booster”) A-2 de 2 escalones, soplado con vidrio Pyrex

la presión en la zona de vacío preliminar. Es de creer que supone lo segundo, pues, en un trabajo anterior⁽³⁾ trató de demostrar teórica y experimentalmente que la contracorriente de Gaede o

(3) ALEXANDER, *J. Scient. Inst.* 23, p. 11 (1946).

no existe o es despreciable. Supone, por otra parte, que el mayor diámetro de las moléculas de aceite es probablemente un «factor importante» para la velocidad de la bomba a bajas presiones.

TABLA I: A-2 CON ACEITE

Valores promediados por flujo

Nº	Wattos	P_c	P_a	P_1	Flujo lú/s	V (l/s)	F	Estát. o dinámico	Observaciones
1	138	80	$2 \cdot 10^{-3}$	0,10	—	—	$5 \cdot 10^4$	Dinám.	
2	138	77	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,12	1,1	5,5	550	»	
3	138	70	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,26	8,0	2,5	81	»	
4	138	15	$2,45 \cdot 10^{-3}$	0,32	8,0	3,2	130	»	Aumento de V y de F con reducción de P_c
5	138	60	$1,85 \cdot 10^{-3}$	0,67	53	2,9	36	»	} Caída de V y de F con reduc. de P_c
6	138	30	$4,30 \cdot 10^{-3}$	0,69	53	1,2	16	»	
7	138	65	$1,75 \cdot 10^{-3}$	0,72	60	3,4	41	»	
8	138	65	$4,5 \cdot 10^{-3}$	1,02	95	2,1	23	»	¿ P_c insuficiente?
9	138	70	$5,0 \cdot 10^{-3}$	1,15	146	2,9	23	»	P_c suficiente
10	138	70	$9,0 \cdot 10^{-3}$	1,34	204	2,3	15	»	
11	210	70	$13,0 \cdot 10^{-3}$	1,53	256	2,0	12	»	
12	210	70	$27,5 \cdot 10^{-3}$	1,73	307	1,1	6,2	»	¿Calefacción insufic.?
13			10^{-4}		0,72	7,2			Extrapolado

NOTAS: Los valores estáticos y los anteriores sin promediar, se encuentran en la tabla de la primera parte de este trabajo (I).

— P_c está indicada en milímetros de flalato de butilo, las demás presiones en milímetros de mercurio.

Si el menor diámetro de las moléculas de mercurio las hace menos eficientes a baja presión, ¿cómo se explica su mayor eficiencia a presiones mayores? Para salvar esta dificultad Alexander recurre al hecho de que es fácil producir con mercurio chorros de vapor de mayor densidad, debido a su mayor tensión de vapor y su estabilidad. Pero para que una comparación de eficiencia tenga sentido es necesario hacerla a *igual presión de*

caldera o a igual densidad. La eficiencia de una bomba con aceite también crece para presiones finas superiores a 10^{-3} si se aumenta la presión de caldera: véase, por ejemplo, la curva D-3 aceite de la figura 1.

TABLA II: A-2 CON MERCURIO

Valores promediados por flujo

Nº	Wattios	P _c	P ₂	P ₁	Flujo l/v/s	V (l/s)	F	Estát. o dinámico	Observaciones
1	138	8	10^{-3}	0,15	—	—	$1,5 \cdot 10^6$	Din.	Mercurio sucio
2	180	11	10^{-3}	0,11	—	—	$1,1 \cdot 10^6$	»	Mercurio casi limpio
3	138	8	$7,8 \cdot 10^{-4}$	0,14	2,0	2,6	180	»	
4	138	8	$4 \cdot 10^{-3}$	0,26	7,9	2,0	65	»	
5	138	8	$12 \cdot 10^{-3}$	0,44	26	2,2	37	»	
6	138	7	$4,5 \cdot 10^{-3}$	0,93	87	1,9	21	»	
7	138	8	$5,5 \cdot 10^{-3}$	1,08	114	2,1	20	»	
8	138	8	$8,0 \cdot 10^{-3}$	1,28	160	2,0	13	»	
9	138	8	$1,25 \cdot 10^{-2}$	1,66	160	2,1	13	»	
10	138	7	1,5	2,5	470	0,3	1,7	»	P ₂ sube y fluctúa
11	180	12	$2,45 \cdot 10^{-1}$	2,445	470	1,9	10	»	Aumento calefacción y refrigeración
12	138	8	$8 \cdot 10^{-4}$	0,20	2,0	2,5	250	Est.	
13	138	8	$8 \cdot 10^{-4}$	0,40	2,0	2,5	500	»	
14	138	8	$9 \cdot 10^{-4}$	0,80	2,0	2,2	890	»	
15	138	8	$9 \cdot 10^{-4}$	1,10	2,0	2,2	1225	»	
16	210	10	$10 \cdot 10^{-4}$	1,40	2,0	2,0	1400	»	
17	210	12	$9 \cdot 10^{-4}$	1,60	2,0	2,2	1780	»	
18	210	13	$10 \cdot 10^{-4}$	1,80	2,0	2,0	1800	»	
19	210	14,5	$11 \cdot 10^{-4}$	2,00	2,0	1,8	1820	»	
20	210	15,5	$11 \cdot 10^{-4}$	2,35	2,0	1,8	2135	»	
21	210	15,5	$9 \cdot 10^{-4}$	2,60	2,0	2,2	2900	»	
22	210	16	$12 \cdot 10^{-4}$	3,60	2,0	1,7	3000	»	
23	210	16	$16 \cdot 10^{-4}$	3,80	2,0	1,2	2370	»	
24	210	16	$20 \cdot 10^{-4}$	4,02	2,0	0,1	201	»	Algodón algo seco
25	210	16	$20 \cdot 10^{-4}$	4,20	2,0	1,0	2100	»	Alg. mojado de nuevo
26	210	16	$10 \cdot 10^{-4}$	4,40	2,0	2,0	4400	»	Alg. mojado de nuevo
27	210	16	$60 \cdot 10^{-3}$	4,90	2,0	0,003	8	»	Cierro capilar y aumento calefacción
28	270	21	$6,5 \cdot 10^{-5}$	5,00	—	—	$8,3 \cdot 10^4$	»	
29			10^{-4}		0,33	3,3			Extrapolado

Conviene recordar que una bomba a chorro desempeña 2 funciones hasta cierto punto independientes: la de compresor y la de válvula. Hay que distinguir, pues, entre la eficiencia como compresor y la eficiencia como válvula. Alexander se refiere seguramente a la primera. Veremos que como compresor el aceite tiene mayor y como válvula casi igual eficiencia que el mercurio. Veremos, también, por qué.

Aparatos y Resultados Experimentales.

La figura 1 muestra las curvas dinámicas de velocidad volumétrica en función de la presión fina obtenidas con los difusores A-2 (figura 2), E-2 (figura 3) y D-3 (figura 4). Las tablas I, II, III, IV y V, indican los valores numéricos correspondientes, promediados por flujo, es decir, escribiendo los promedios de varias medidas (1 a 5) efectuadas para cada flujo, en condiciones comparables de presión de caldera. La figura 5 muestra las curvas de flujo o «velocidad molecular» en función de la presión fina y también las curvas de la bomba mecánica preliminar en función de la presión preliminar. Para esta se indican dos curvas: una corresponde al comportamiento con aceite recién puesto y la otra con aceite «usado», emulsionado con agua. La velocidad se reduce considerablemente en el segundo caso.

Las curvas de la figura 1 muestran elocuentemente la inconstancia de la velocidad (I). Cabe observar que las presiones finas han sido medidas con un Macleod (I), de modo que no se leen ni la presión de vapor de mercurio ni la del aceite condensable por presión a temperatura ambiente. Estas medidas corresponden, en cierto modo, a las presiones absolutas que se tendrían si se usaran trampas frías que no redujeran la velocidad, como el refrigerante superior de D-3 (figura 4), mantenidas a una temperatura inferior a -25° para mercurio y a 0° para aceite. Si se hubiera medido la presión absoluta, por otros métodos, sin el uso de trampas frías, las curvas descenderían a la izquierda rápidamente a cero al acercarse a la presión de vapor del líquido usado, o a la de los productos volátiles de su descomposición, a la temperatura ambiente.

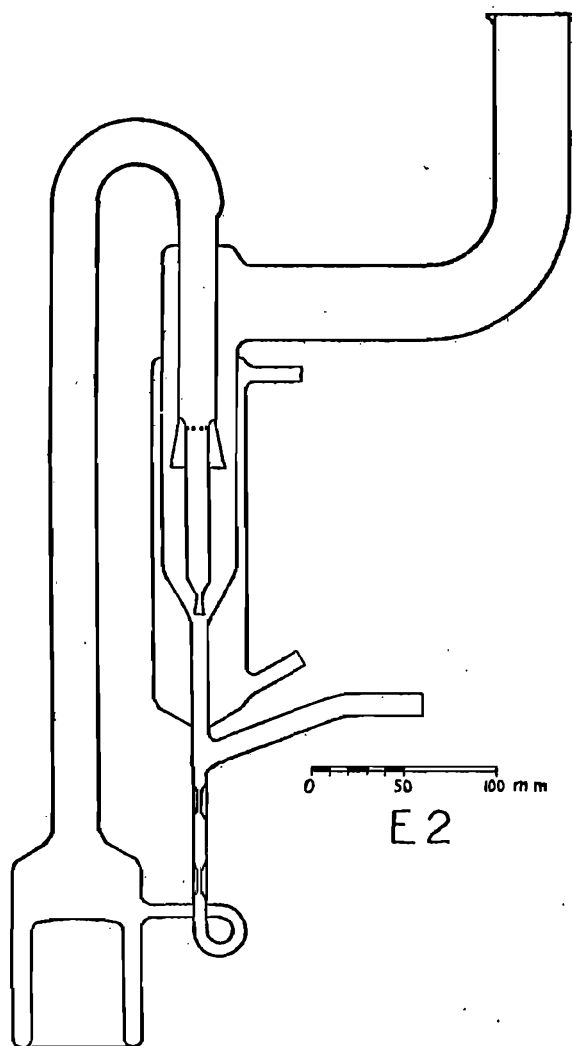


Fig. 3

Difusor de Ensayo E-2 de 2 escalones de vidrio Pyrex. El desnivel entre caldera y tubo de presión preliminar ha sido aumentado en el diseño con respecto al que tiene el modelo usado, al que se refieren las tablas III y IV y figuras 1, 5, 6 y 7.

El Cruce de las Curvas de Velocidad.

Tanto para la bomba E-2 como para la A-2 se obtienen velocidades menores con mercurio que con aceite para presiones

finas bajas. Aumentando el flujo, y con ello la presión fina, se alcanza un punto en el que las curvas se cruzan, siendo la eficiencia aparente del mercurio superior a la del aceite para presiones finas mayores que las del punto de cruce. Esto parece justificar la aseveración de Alexander.

TABLA III: E-2 CON ACEITE

Valores promediados por flujo

Nº	Wattos	P_c	P_s	P_f	Flujo lú/s	V (l/s)	F	Estát. ρ dinámico	Observaciones
1	278	44	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,063	2,1	10,5	315	Din.	Casi no se ven bordes
2	278	39	$8,5 \cdot 10^{-4}$	0,116	7,1	8,4	136	»	Borde a 30mm. en escalón fino, a 22mm. en tobera.
3	278	39	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,145	10	6,7	97	»	Borde de aceite a 20mm. de escalón fino.
4	278	38	$10,4 \cdot 10^{-3}$	0,27	34	3,3	26	»	Se ven bordes en ambos escalones.
5	278	44	$2,95 \cdot 10^{-3}$	0,183	17	5,8	62	»	Se ven bordes en ambos escalones.
6	278	36	$2 \cdot 10^{-3}$	0,05	—	—	$2,5 \cdot 10^4$	»	
7	278	45	$8 \cdot 10^{-5}$	0,55	—	—	$6,9 \cdot 10^3$	Est.	
8	278	45	$3 \cdot 10^{-4}$	0,60	—	—	$2 \cdot 10^3$	»	
9	278	45	$7 \cdot 10^{-3}$	0,667	—	—	95	»	ρP_c insuficiente?
10	278	45	$1,9 \cdot 10^{-2}$	0,679	—	—	36	»	P_c insuficiente
11	278	45	$5 \cdot 10^{-2}$	0,72	—	—	14	»	P_c insuficiente
12	278	45	$11 \cdot 10^{-2}$	0,78	—	—	7	»	P_c insuficiente
13	278	45	$27 \cdot 10^{-2}$	0,77	—	—	2,8	»	P_c insuficiente
14	278	45	$15 \cdot 10^{-2}$	0,80	—	—	5,3	»	P_c insuficiente

NOTA: P_c está indicado en milímetros de ftalato de butilo; las demás presiones en milímetros de mercurio.

Observemos que el cruce se produce para el difusor E-2 a una presión fina de $3,5 \cdot 10^{-3}$ y una velocidad de 5,7 litros por segundo, lo que corresponde a un flujo de 20 litros micrón por

segundo. Pero la presión de caldera era en el caso del aceite de 44 mm de este líquido, lo que corresponde a 3,4 mm de mercurio, mientras que en el otro caso la presión de caldera era de 15 mm de mercurio, es decir, más de 4 veces mayor. Debemos

TABLA IV: E-2 CON MERCURIO

Nº	Wattios	cP	P_2	P_1	Flujo lwg/s	V (l/s)	F	Estát. o dinámico	Observaciones
1	278	15	$12 \cdot 10^{-5}$	0,014	0,65	5,5	123	Din.	
2	278	15	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,04	2,5	7,1	114	»	
3	278	15	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,09	9,0	5,6	56	»	
4	278	15	$1,9 \cdot 10^{-3}$	0,09	10	5,3	47	»	
5	278	15	$3,9 \cdot 10^{-3}$	0,12	22	5,6	32	»	
6	278	15	$4,5 \cdot 10^{-3}$	0,205	32	7,0	46	»	
7	278	15	$2,0 \cdot 10^{-2}$	0,62	160	8,0	31	»	
8	278	14	$3,2 \cdot 10^{-2}$	1,05	333	10,1	32	»	
9	278	14	$8,7 \cdot 10^{-2}$	1,37	440	5,4	17	»	¿ P_c insuficiente?

suponer que la impresionante caída de la curva para aceite, por encima de 10^{-3} mm, se debe a insuficiente presión de caldera para efectuar el trabajo de compresión $\int d(pV)$ y para mantener a raya la presión preliminar. A este supuesto conduce la observación de las curvas D-3 y A-2 con aceite, las que después de la caída inicial entre 10^{-5} y 10^{-3} , estabilizan su velocidad alrededor de $3 \cdot 10^{-3}$, con una presión de caldera de 70 mm (5,4 mm mercurio), para subir después a un máximo secundario por arriba de 10^{-2} . En la bomba E-2 ensayada no era posible aumentar la presión de caldera con aceite por encima del valor anotado por defecto de construcción. Este defecto está subsanado en figura 3.

El cruce no se debe, pues, a una mayor eficiencia del mercurio por encima de una presión fina $3 \cdot 10^{-3}$, sino a falta de presión de caldera con aceite.

Para el difusor amplificador A-2 el cruce se produce a una presión fina 36 veces mayor, $P_2 = 0,125$ mm de mercurio, y a

una velocidad de 2,0 litros por segundo para un flujo de 250 litros micrones por segundo. Observemos, también en este caso (Tablas I y II) que la presión de caldera en el caso del aceite

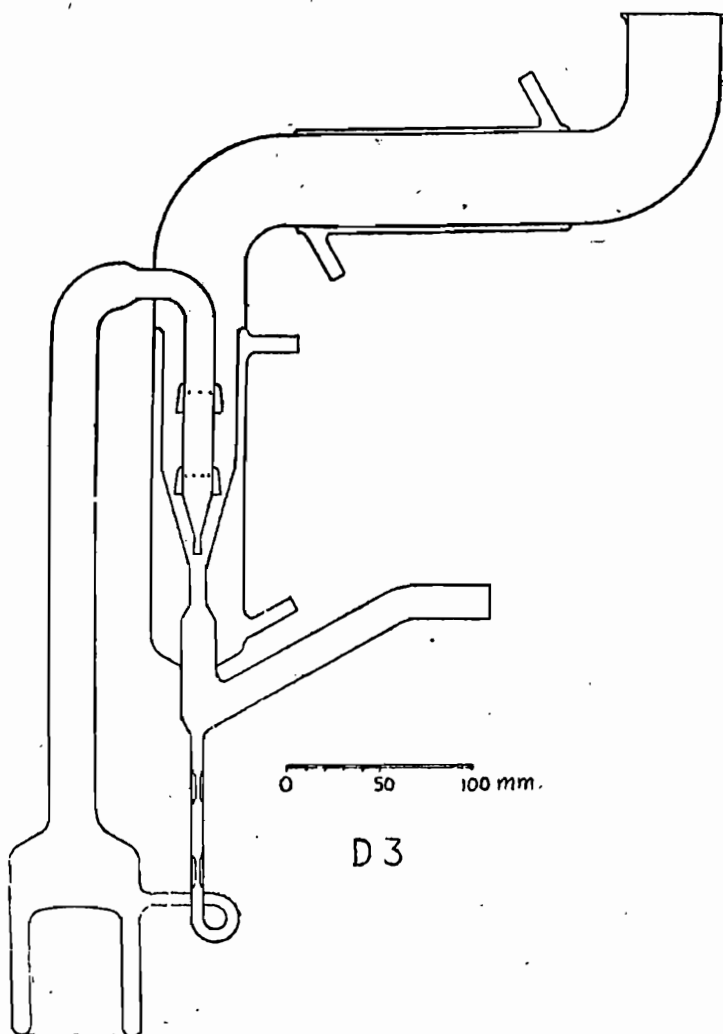


Fig. 4

Difusor de 3 escalones D-3 con vidrio Pyrex. El diámetro del tubo de chupada ha sido aumentado en el diseño a partir del manto refrigerante del cuerpo de la bomba y se han introducido 2 codos para aumentar el efecto del refrigerador adicional. En el modelo usado, al que se refieren la tabla V y figuras correspondientes, el tubo de chupada es recto y tiene 40 mm. de diámetro (37 mm. interior).

era de 70 mm de aceite (5,4 mm de mercurio), mientras que en el caso del mercurio era de alrededor de 8 mm, es decir, unas 1,5 veces mayor. Ahora bien, ya para un flujo de 53 litros micrones por segundo (tabla I, Nos. 5 y 6) el descenso de la presión de caldera de 60 a 30 mm de aceite produjo una caída de velocidad de 2,9 a 1,2 litros por segundo; un aumento posterior de la presión de caldera a 65 mm de aceite elevó, en cambio, la velocidad a 3,4 (tabla I, N^o. 7) a pesar de un ligero

TABLA V: D-3 CON ACEITE

Valores promediados por flujo

N ^o	W atios	P _c	P ₂	P ₁	Flujo l _v /s	V (l/s)	F	Estát. o dinámico	Observaciones
1	138	55	2.10 ⁻⁵	0,07	—	—	3,5.10 ⁴	Din.	
2	138	49	5,6.10 ⁻⁵	0,128	1,0	17,8	2,3.10 ³	»	
3	138	47	6,7.10 ⁻⁴	0,23	7,5	11,2	344	»	
4	210	70	2,45.10 ⁻⁵	0,40	23	9,4	163	»	
5	210	75	5,5.10 ⁻⁵	0,806	60	10,9	146	»	} Poca presión de aceite en escalón intermedio
6	210	78	6,5.10 ⁻⁵	0,922	73	11,2	142	»	
7	138	50	5,5.10 ⁻⁵	0,13	1,0	18,2	2,6.10 ³	Est.	
8	138	50	5,5.10 ⁻⁵	0,20	1,0	18,2	4.10 ³	»	
9	138	50	5,5.10 ⁻⁵	0,40	1,0	18,2	8.10 ³	»	
10	210	60	5,5.10 ⁻⁵	0,70	1,0	18,2	14.10 ³	»	
11	210	60	5,5.10 ⁻⁵	0,80	1,0	18,2	16.10 ³	»	
12	210	65	5,5.10 ⁻⁵	0,95	1,0	18,2	19.10 ³	»	Distancia de bordes de aceite en escalon.
13	210	65	6.10 ⁻⁵	1,20	1,0	16,7	20.10 ³	»	3 ^o 2 ^o 1 ^o
14	210	70	7.10 ⁻⁵	1,40	1,0	14,3	20.10 ³	»	5 mm. 25
15	210	70	7.10 ⁻⁵	1,50	1,0	14,3	21,4.10 ³	»	
16	210	70	12.10 ⁻⁵	1,70	1,0	8,3	14,15	»	
17	210	70	8.10 ⁻⁵	1,808	1,0	0,1	226	»	5 3 20
18	210	60	33.10 ⁻⁵	1,63	—	0,001	5	»	
19	210	65	26.10 ⁻⁵	1,76	—	0,001	7	»	
20	300	75	3.10 ⁻⁵	2,03	—	0,003	68	»	2 1 5

NOTA: P_c está indicada en milímetros de ftalato de butilo, las demás presiones en milímetros de mercurio.

aumento en el flujo. Si para presiones finas de 2 a 5 centésimas y flujos de 53 a 60 $l\mu/s$, una presión de caldera inferior a 65 mm de aceite era insuficiente para producir el trabajo de compresión y para contener la presión preliminar sin dejar caer la velocidad, es de suponer que para el punto de cruce, con una presión fina superior al doble, un flujo más de 4 veces mayor y una presión preliminar de un milímetro y medio, la presión de caldera de 70 mm de aceite también era insuficiente para mantener la velocidad.

Estamos, pues, en el mismo caso anterior. El cruce no se debe a mayor eficiencia del mercurio por encima de $P_2=0,125$ sino a insuficiente presión de la caldera de aceite.

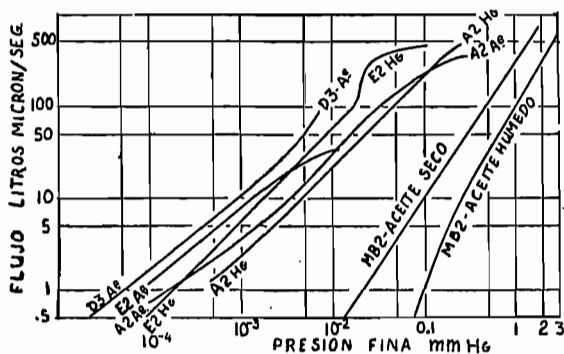


FIG. 5

Curvas de flujo ("velocidad molecular") en función de la presión fina para los difusores D-3, A-2 y E-2 y para la bomba mecánica preliminar "Micro-pal B2" con aceite seco y con aceite emulsionado por la humedad después de un tiempo de uso.

Conviene observar, de paso, que para flujos pequeños la velocidad aumenta al reducir la presión de caldera, lo contrario de lo que hemos visto para flujos mayores. Las medidas Nos. 4 y 3, de tabla I muestran que para un flujo de $8 l\mu/s$ la velocidad aumenta de 2,5 a 3,2 l/s si se reduce la presión de caldera de 70 a 15 mm de aceite. Este hecho puede observarse en cualquier bomba, para flujos pequeños. Es importante para explicar la caída de la velocidad entre 10^{-5} y 10^{-3} mm de presión fina. De ello nos ocuparemos más adelante.

Presión Preliminar y Efecto Válvula.

La potencia de caldera se usa, pues, para efectuar un tra-

bajo de compresión y para atajar la presión preliminar manteniendo el borde de aceite a suficiente distancia (I). Si deseamos separar experimentalmente estos dos efectos, con el fin de hacer un balance energético, podemos hacer tender el trabajo de compresión a valores muy pequeños, reduciendo el flujo suficientemente y manteniendo presiones preliminares elevadas (caso estático). En este caso la bomba trabaja casi únicamente como válvula. La presión preliminar máxima que soporta en condiciones dadas nos permitirá establecer un criterio relativo de eficiencia entre aceite y mercurio.

Es creencia generalizada que el mercurio es más «eficiente» para aguantar presiones preliminares elevadas. El hecho observado es que una misma bomba con una misma calefacción y aislación soporta mayores presiones preliminares «estáticas» con mercurio que con aceite. Pero, en esas condiciones, también la presión de caldera es mayor (a menudo varias veces mayor) con mercurio que con aceite. Ello se debe a que el mercurio es más volátil.

Para hacer una comparación en condiciones bien definidas habría que trabajar en ambos casos con igual presión de caldera a igual temperatura del chorro de vapor. Igualar las presiones de caldera es fácil; las temperaturas no tanto. Las curvas de presión de vapor de mercurio y de ftalato de butilo se cortan recién a cerca de 300°C y 247 mm de presión. Por debajo de ese punto la temperatura del vapor de mercurio es inferior a la del aceite a igualdad de presión. Para igualar las temperaturas habría que sobrecalentar el vapor de mercurio. Sin llegar a esto, podemos contentarnos con comparar aceite y mercurio a iguales presiones de caldera.

Sea una tobera como las del 2º. escalón de *E-2* y *A-2* y del 3er. escalón de *D-3*. Supongamos que las bombas trabajen con flujo tendiendo a cero, pero contra una presión preliminar estática del orden de 1 milímetro de mercurio. La velocidad de salida del chorro de vapor a la altura del cuello de la tobera, será, según la teoría aerodinámica, muy cercana a la del sonido. Sean T_d y P_d la temperatura y la presión del vapor saturado encima de la tobera. En el cuello de la tobera, la temperatura T_t , la presión P_t y la velocidad del sonido a_t serán menores, debido a la expansión. El vapor estará allí sobresaturado, pues la expansión es adiabática, no habiendo tiempo para que se produz-

ca condensación, y las curvas de tensión de vapor tienen una pendiente grande. Las densidades variarán menos rápidamente que las presiones, pues el cambio de temperatura compensa, en parte, el cambio de presión, con respecto a aquellas.

Después de pasar el cuello de la tobera y hasta llenar el tubo de impulsión, se produce una nueva y mayor expansión adiabática. Los nuevos valores de P, T, ρ y a dependerán de la relación b entre las secciones del cuello de la tobera y del tubo de impulsión, y del diseño de la tobera misma. Este tendrá influencia sobre el valor de la velocidad supersónica del chorro de vapor

$$v = N a \quad (1)$$

donde N es el número de Mach y $a = a_t (T/T_t)^{1/2}$ (2), y con ello sobre dichos valores de P, T y ρ . Si V_t es un elemento de volumen en el cuello de la tobera, donde suponemos que la velocidad del chorro es a_t y V es el mismo elemento en el tubo de impulsión, podemos escribir

$$\frac{V_t}{V} = \frac{b}{N} \left(\frac{T_t}{T} \right)^{1/2} \quad (3)$$

donde N es usado como un parámetro de valor a determinar. Como la relación de densidades es inversa a la de los volúmenes, que contienen igual masa (condición de continuidad)

$$\frac{\rho}{\rho_t} = \frac{V_t}{V} = \left(\frac{b}{N} \right)^{2/(\gamma+1)}; \quad \frac{P}{P_t} = \left(\frac{b}{N} \right)^{2\gamma/(\gamma+1)};$$

$$\frac{T}{T_t} = \left(\frac{b}{N} \right)^{2\frac{\gamma-1}{\gamma+1}}; \quad \left(\frac{a}{a_t} \right)^2 = \frac{T}{T_t}. \quad (4)$$

El chorro de vapor es frenado en el tubo de impulsión por el gas en relativo reposo a la presión preliminar P_1 y condensa sobre las paredes enfriadas. Para calcular el valor de P_1 apliquemos la ecuación de Bernoulli para fluidos compresibles en condiciones adiabáticas

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{const.} \quad (5)$$

al chorro en movimiento primero y en reposo después

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} a^2 N^2 = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_1}{\rho_1}. \quad (6)$$

Recordando que

$$a^2 = P \gamma / \rho \quad (7)$$

y que

$$\rho_1 / \rho = (P_1 / P)^{1/\gamma}$$

se llega a

$$P_1 = P \left(1 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) N^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (8)$$

Reemplazando P de (4): obtenemos

$$P_1 = P_t \left(\frac{b}{N} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma+1}} \left(1 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) N^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}. \quad (9)$$

Nos falta tener el valor de P_t en función de la presión de caldera $P_a + P_1$. A lo largo del tubo que lleva el vapor desde la caldera hasta la tobera se produce una caída de presión debida al frotamiento, al enfriamiento y a la condensación. El valor de la caída depende de la sección, del largo y de la aislación térmica del tubo. Si suponemos un tubo ancho, corto y bien aislado, podemos esperar una pequeña caída de presión. Postulemos

$$P_d = \frac{9}{10} (P_c + P_1) \quad (10)$$

donde P_d es la presión en la parte ancha del tubo pocos centímetros encima de la tobera.

Aplicando de nuevo la ecuación de Bernoulli para la salida, a velocidad del sonido, del vapor por el cuello de la tobera, tenemos

$$\frac{P_t}{P_d} = \left(\frac{1 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) N_d^2}{1 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) N_t^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (11)$$

donde supondremos $N_t^2=1$ y el número de Mach en el tubo de vapor $N_d=1/16$. Substituyendo (11) y (10) en (9) resulta finalmente

$$P_1 = \frac{9}{10} (P_c + P_1) \left(\frac{1 + \frac{1}{2}(\gamma-1)N_d^2}{1 + \frac{1}{2}(\gamma-1)N_t^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\left(\frac{b}{N} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma+1}} \left(1 + \frac{1}{2}(\gamma-1)N^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}. \quad (12)$$

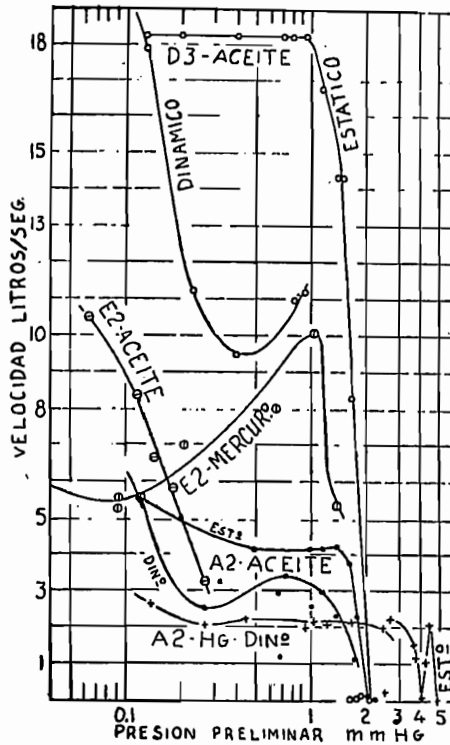


Fig. 6

Velocidades estáticas y dinámicas para D-3 con aceite, para A-2 con aceite y con mercurio y dinámicas para E-2 con aceite y con mercurio en función de la presión preliminar.

El valor de la constante adiabática para mercurio es conocido $\gamma=1,67$; para ftalato de butilo no he encontrado valor en las tablas. A juzgar por el valor para moléculas de semejante complejidad podemos suponer $\gamma=1,08$ como valor provisorio.

En la bomba A-2 es $b=0,184$. Este difusor soporta, en condiciones estáticas, una presión preliminar $P_1=2,2$ mm con una presión diferencial de caldera $P_c=5,0$ mm, trabajando con aceite. Con estos datos y los indicados anteriormente, podemos calcular un valor de N que satisfaga (12). Resulta el número de Mach $N=1,95$. Es decir que la velocidad «efectiva» del chorro de vapor de aceite en el tubo de impulsión es cerca de dos veces la velocidad del sonido y

$$P_1 = 0,306 (P_c + P_1). \quad (13)$$

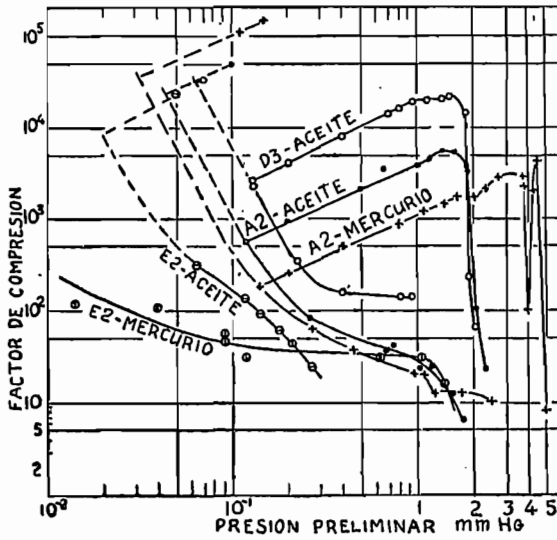


Fig. 7

Curvas estáticas y dinámicas de factor de compresión para D-3 con aceite, A-2 con aceite y con mercurio y dinámicas para E-2 con aceite y con mercurio en función de la presión preliminar.

Repetamos el cálculo para el caso de la misma bomba A-2 operando con mercurio. No se han hecho mediciones a igual presión de caldera. Con $P_c=16$ mm soporta $P_1=4,9$ mm. De (12) resulta, con $\gamma=1,67$ y $N=2,0$: $P_1=0,187 (P_c+P_1)=3,9$ mm. Como la presión preliminar observada es mayor que la calculada para $N=2$, quiere decir que en el caso del mercurio la velocidad relativa al sonido es mayor, lo que no significa que la velocidad en cm/seg. del chorro de vapor sea mayor, pues T y α son menores para mercurio. Se alcanza el valor observado con

$N = 2,18$. Resulta ahora

$$P_1 = 0,234 (P_c + P_1) \quad (14)$$

para mercurio.

En los números escritos más arriba no debe atribuirse significado a la tercera cifra significativa: se la escribe para no aumentar los errores, innecesariamente, al redondear el cálculo numérico.

Podemos encarar ahora la cuestión de la eficiencia relativa de aceite y mercurio en cuanto a sostener presión preliminar. De la comparación de (13) y (14) resulta una mayor eficiencia para el aceite, contrario a la creencia generalizada. Ello se debe al menor valor de la constante adiabática para aceite. El número de Mach es, en cambio, mayor para el mercurio que para aceite. Esto puede deberse a que el mercurio no moja el vidrio y el aceite si, por lo que en el chorro de mercurio que sale de la tobera las velocidades son probablemente más uniformes que en el de aceite, donde el promedio es rebajado por una mayor fricción contra la pared.

La comparación puede hacerse, también, para igual presión en el cuello de la tobera. Como $P_t = 0,53 (P_c + P_1)$ para aceite y $0,437 (P_c + P_1)$ para mercurio, resulta $P_1 = 0,577 P_t$ para aceite y $0,536 P_t$ para mercurio. El coeficiente del mercurio es todavía menor, pero, mientras con respecto a la presión de caldera la relación entre las eficiencias es 1,31, con respecto a la presión en el cuello de la tobera ésta se reduce a 1,075.

Cabe recordar que la refrigeración de A-2 resultó insuficiente para calefacción superior a 138 watios, con mercurio, y que fué suplementada con algodón mojado alrededor del tubo que conduce a la bomba preliminar. Este tipo de refrigeración es ineficiente. Con refrigeración adecuada N podría resultar mayor aún para mercurio (*).

Continuará

(*) En la figura 2 la superficie de refrigeración ha sido aumentada.