Es siempre preciso contar con deficencias eventuales en la calefacción, y por tanto no limitar demasiado la superficie de caldeo, la cual conviene que exceda en algo a lo determinado por el cálculo.

Máquinas de vapor

345. Partes de que constan.—Sólo nos ocuparemos de la máquina de vapor desde el punto de vista de la aplicación de los principios y consideraciones que acabamos de exponer.

El vapor producido en el generador es un flúido elástico, capaz de ejercer alternativamente presiones más o menos enérgicas sobre las caras de un émbolo o pistón que ajusta en el interior de un cilindro. Esta acción imprime al émbolo un movimiento de vaivén. El cilindro puede ser horizontal, vertical, inclinado, oscilante o giratorio.

En algunos motores de vapor el émbolo posee un movimiento de rotación y lo comunica directamente a una polea.

Generalmente, el pistón recorre de un extremo a otro su cilindro, comunicando el esfuerzo del vapor a una barra llamada *varilla* o *vástago del pistón,* cuyo movimiento rectilíneo está asegurado por unas *guías* entre las cuales se mueve el extremo o *cabeza* del vástago. Esta última está articulada con la *cabeza menor* de la *biela,* y a su vez la biela, por su *cabeza mayor,* se articula con la *manivela* o manubrio.

El *árbol motor,* en el cual está sólidamente montada la manivela, sirve de eje, ya sea a un *volante dentado,* ya a un *volante-polea,* que son los órganos encargados

de imprimir la rotación conveniente al *árbol de transmisión* de la fábrica.

En páginas anteriores hemos estudiado el movimiento de la biela.

El movimiento alternativo del émbolo se obtiene dejando actuar el vapor, ora sobre una cara, ora sobre la cara opuesta de dicho émbolo, resultado que se consigue por medio de una válvula *corredera, D,* que se mueve en el interior de una *caja de distribución.* La simple inspección de las figuras 152 y 153 permite comprender el funcionamiento de esta válvula.

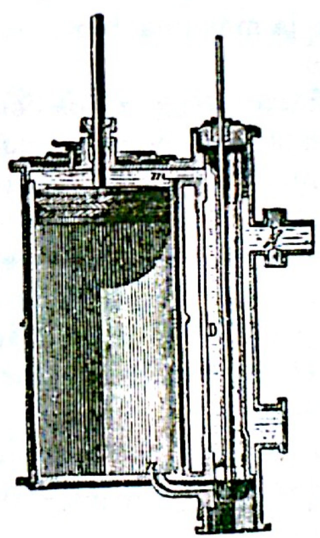

Fig. 152

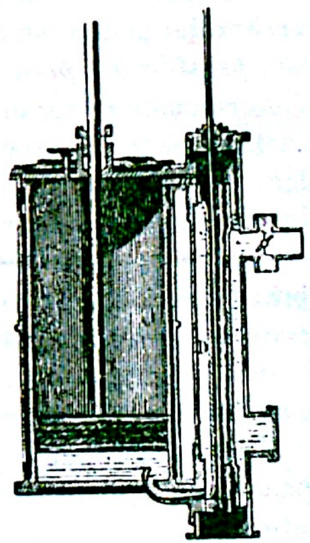

Fig. 153

Después de haber producido su efecto mecánico, el vapor se escapa hacia la atmósfera, o va a condensarse en el agua fría contenida en un órgano llamado *condensador.* El agua, absorbiendo rápidamente el vapor, produce en el cilindro un vacío parcial, una especie de succión que contribuye a poner en movimiento el émbolo. El condensador fué inventado por Watt en 1760.

Cuando el vapor sale al aire libre por un tubo, ha de vencer la presión atmosférica, la cual reacciona sobre el pistón y entorpece su movimiento. Ya sabemos que cada centímetro cuadrado de superficie expuesta al aire experimenta, por parte de la atmósfera, una presión de $1^{Kg}033$. De ello resulta que, en la máquina supuesta, el pistón es empujado hacia un lado por el vapor a una presión de 6 atmósferas, por ejemplo, y hacia el lado opuesto por vapor a 1 atmósfera cuando menos. Funciona, pues, dicho motor bajo la acción de una presión de 5 atmósferas aproximadamente.

Si el vapor penetra en el cilindro durante toda la carrera del pistón, se dice que la máquina funciona *a toda presión o a plena presión.*

Pero como el vapor es un flúido elástico, los constructores han aprovechado esta circunstancia para idear motores en los cuales el flúido sólo penetra en el cilindro durante una fracción de la carrera del pistón, por ejemplo, la mitad. El vapor continúa después obrando por expansión como lo haría un muelle, y su acción va amortiguándose más y más hasta que, llegado el émbolo al fin de su carrera, el vapor se escapa hacia la atmósfera o hacia un condensador.

Cuando el vapor no penetra en el cilindro más que durante una parte de la carrera, *la máquina es de expansión.*

Es un motor de *expansión sin condensación* cuando el flúido que ha obrado sobre el émbolo pasa inmediatamente a la atmósfera.

Se tiene una *máquina de expansión y con condensación* si el vapor, una vez ha efectuado su trabajo, va a parar a un condensador.

Como veremos luego, la expansión representa una economía de combustible, razón por la cual se la prefiere a la plena presión.

346. Máquinas a plena presión, sin expansión ni condensador.—El vapor obra sobre el émbolo durante toda la carrera de éste, y sale después a la atmósfera. Por consiguiente, una atmósfera de la presión del vapor se emplea en equilibrar la presión del aire, que se llama por esto *contra-presión.*

Sea N la presión del vapor en el cilindro. Este número N es inferior en un 1 a 25 por 100 al que expresa la presión en la caldera.

Siendo 1 la presión atmosférica, el pistón experimentará sobre cada centímetro cuadrado una presión p dada por:

$$p = 1^{Kg}0334\,(N-1).$$

Si la superficie del pistón, *en centímetros cuadrados*, es S, la presión total P que experimente será:

$$P = 1^{Kg}0334\,(N-1)\,S.$$

En un minuto, el pistón recorre un cierto número de veces n, ida y vuelta, la longitud l del cilindro. En un segundo recorrerá, pues,

$$V = \frac{2nl}{60}.$$

El trabajo efectuado por segundo será:

$$P \times V,$$

o

$$PV = 1{,}0334 \times (N-1) \times S \times V, \qquad (1)$$

en kilográmetros.

La potencia C en caballos será igual a este número de kilográmetros dividido por 75:

$$C = \frac{1{,}0334 \times (N-1) \times S \times V}{75}. \qquad (2)$$

Las máquinas de vapor industriales no dan más que una fracción del trabajo que consumen; por esto, en la práctica hay que multiplicar el resultado (2) por un coeficiente de rendimiento K, que varía con la potencia del motor.

347. Valores del coeficiente K. — *Cuadro núm. 5.*

POTENCIA DE LA MÁQUINA *(Sin expansión ni condensador)*	Valores de K
4 a 8 caballos.	0,60
10 a 20 caballos.	0,70
30 a 50 caballos.	0,79
60 a 100 caballos.	0,85

La velocidad del pistón varía generalmente entre $0^{m}80$ y $1^{m}25$.

La expresión (2) puede ponerse en otra forma. Representemos por p la presión por centímetro cuadrado de superficie del pistón: $p=1{,}0334\ (N-1)$; por V su velocidad en metros por segundo y por S su superficie en centímetros cuadrados.

La potencia en caballos será, según la expresión (2),

$$C=\frac{p\times S\times V}{75}; \qquad (3)$$

o mejor, teniendo en cuenta el rendimiento K, cuyos valores se indican en el cuadro núm. 5,

$$C'=K\times\frac{p\times S\times V}{75}. \qquad (4)$$

PROBLEMA. — ¿Cuál es, en caballos, la potencia de una máquina cuyo pistón tiene $0^{m}40$ de diámetro y

$0^{m}50$ de carrera, siendo de 6 atmósferas la presión en el cilindro y 50 los movimientos completos de vaivén por minuto?

Cada movimiento completo del pistón comprende la ida y la vuelta, es decir, corresponde a una vuelta entera de la manivela.

La presión que obra sobre el pistón es de $6-1=5$ atmósferas, o sea para cada centímetro cuadrado, según la segunda columna de la tabla núm. 3,

$$p=5^{Kg}167. \qquad (5)$$

La superficie del pistón en centímetros cuadrados será:

$$S=\frac{\pi\cdot\overline{40}^{2}}{4}=1256{,}64\,, \qquad (6)$$

y la velocidad del pistón en metros por segundo

$$V=\frac{2\times 50\times 0^{m}50}{60}=0^{m}833\,. \qquad (7)$$

En la fórmula (3), substituyamos las letras por sus valores (5), (6), (7); se tendrá:

$$C=\frac{5{,}167\times 1256{,}64\times 0{,}833}{75}\,,$$

o, después de efectuar los cálculos,

$$C=72{,}11 \text{ caballos de vapor.}$$

Como esta máquina es de más de 50 caballos, se tendrá, según la tabla 5, $K=0{,}85$, y la expresión (4) dará:

$$C'=0{,}85\times 72{,}11\,.$$

Es decir, que prácticamente la potencia de esta máquina será:

$$C'=60 \text{ caballos de vapor.}$$

Problema. — ¿Qué diámetro debe tener el cilindro de una máquina de vapor de 70 caballos, siendo de 1m20 la velocidad del pistón y 4 atmósferas la presión del vapor en el cilindro?

La tabla núm. 3 da, para $p = 4 - 1 = 3$ atmósferas,

$$p = 3^{Kg}1002.$$

Si llamamos D al diámetro del cilindro en centímetros, su superficie será:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}.$$

Se tiene, además:

$$V = 1^m 20.$$

La expresión (4) da:

$$70 = 0{,}85 \times \frac{3{,}1002 \times \frac{\pi D^2}{4} \times 1{,}20}{75},$$

puesto que $C' = 70$ y que $K = 0{,}85$ según la tabla n.º 5

Pero

$$\frac{\pi}{4} = 0{,}785.$$

Se tendrá, pues,

$$70 = 0{,}85 \times \frac{3{,}1002 \times 0{,}785 \times D^2 \times 1{,}20}{75},$$

de donde sale, simplificando,

$$70 = 0{,}85 \times 3{,}1002 \times 0{,}157 \times 0{,}08 \times D^2,$$

y despejando D^2,

$$D^2 = \frac{70}{0{,}85 \times 3{,}1002 \times 0{,}157 \times 0{,}08},$$

$$D^2 = \frac{7}{0{,}17 \times 3{,}1002 \times 0{,}157 \times 0{,}04}.$$

Efectuando las operaciones indicadas,

$$D^2 = 2121,$$

y extrayendo la raíz cuadrada,

$$D = 46 \text{ centímetros.}$$

El cilindro deberá tener, pues, 46 centímetros de diámetro.

348. Máquinas de vapor con expansión.—En unas el vapor, después de la expansión, se escapa hacia la atmósfera, llamándose éstas, *máquinas de expansión sin condensación;* en otras el vapor, después de dilatarse, va a parar a un refrigerante llamado condensador; por esto se las llama *máquinas de expansión y condensación.*

En las máquinas de la primera clase tiene efecto, por parte del aire, una resistencia o *contra-presión* de una atmósfera.

La *contra-presión,* en las máquinas de la segunda clase, es inferior a una atmósfera. Con objeto de que el vapor venza esta contra-presión, se procura que tenga todavía, al terminar el pistón su carrera, una fuerza elástica de $\frac{1}{2}$ atmósfera.

349. Máquinas de vapor con expansión y sin condensación. — Son éstas siempre máquinas de alta presión y sólo funcionan en buenas condiciones a presiones de 6, 7 y 8 atmósferas. Es preciso envolver el cilindro con una substancia aisladora para evitar su enfriamiento. Como la fuerza elástica del vapor ha de ser suficiente para empujar el émbolo durante toda la carrera de éste, los constructores procuran que dicha fuerza elástica no sea inferior a 1,5 atmósferas al terminar la expansión.

Esta condición permite calcular la *expansión media* con la cual pueden funcionar estas máquinas.

Sean:

p la presión inicial en el cilindro,

p' la presión al terminar la expansión,

v el volumen engendrado por el émbolo durante la admisión del vapor a plena presión,

v' el volumen ocupado por el vapor al terminar la expansión.

Aplicando la ley de Mariotte tendremos:

1.° Cuando la máquina funcione a 6 atmósferas:

$$v\,p = v'\,p'\,; \qquad 6\,v = 1{,}5\,v'\,.$$

De aquí resulta:

$$\frac{v}{v'} = \frac{1}{4}\,.$$

Por consiguiente, la expansión máxima podrá empezar cuando el émbolo haya recorrido la cuarta parte de su carrera.

2.° Cuando la máquina funcione a 7 atmósferas:

$$7\,v = 1{,}5\,v'\,; \qquad \frac{v}{v'} = \frac{1{,}5}{7} = \frac{1}{4{,}66}\,.$$

La expansión máxima empezará a $\frac{1}{4{,}66}$ de la carrera del pistón.

3.° Cuando la presión inicial sea de 8 atmósferas:

$$8\,v = 1{,}5\,v'\,; \qquad \frac{v}{v'} = \frac{1{,}5}{8} = \frac{3}{16}\,.$$

La admisión de vapor deberá efectuarse cuando menos durante los $\frac{3}{16}$ de la carrera del émbolo.

Generalmente la velocidad del émbolo es de 1 metro por segundo; a veces alcanza a $1^{m}20$ ó $1^{m}30$, no pasando de $1^{m}50$ si se quiere obtener una marcha regular. En las locomotoras y en las máquinas de los laminadores esta velocidad puede llegar a 3 metros por segundo.

350. Valores del coeficiente K.— *Tabla núm. 6.*

POTENCIA DE LA MÁQUINA *(Con expansión y sin condensador)*	Valores de *K*
4 a 8 caballos.	0,45
10 a 20 caballos.	0,58
30 a 50 caballos.	0,70
60 a 100 caballos.	0,80

351. Máquinas de expansión con condensación. — En ellas el vapor debe conservar, al terminar el émbolo su carrera, una fuerza elástica de 0,5 atmósferas.

Con estos datos es fácil calcular el límite de la expansión en cada caso.

1.° La máquina funciona a 4 atmósferas.

Se tiene, según la ley de Mariotte,

$$4\,v = 0{,}5\,v'\,,$$

de donde resulta:

$$\frac{v}{v'} = \frac{0{,}5}{4} = \frac{1}{8}\,.$$

La expansión máxima posible empezará a $\frac{1}{8}$ de la carrera del émbolo.

2.° La presión inicial es de 5 atmósferas.

$$5v = 0{,}5\,v',$$

y

$$\frac{v}{v'} = \frac{0{,}5}{5} = \frac{1}{10}.$$

La expansión no puede empezar antes de $\frac{1}{10}$ de la carrera.

3.° La presión es de 6 atmósferas.

$$6v = 0{,}5\,v',$$

y

$$\frac{v}{v'} = \frac{0{,}5}{6} = \frac{1}{12}.$$

La expansión podrá comenzar al $\frac{1}{12}$ de la carrera.

4.° La presión es de 7 atmósferas.

$$7v = 0{,}5\,v',$$

y

$$\frac{v}{v'} = \frac{0{,}5}{7} = \frac{1}{14}.$$

La expansión podrá empezar a $\frac{1}{14}$ de la carrera.

5.° La máquina funciona a 8 atmósferas.

$$8v = 0{,}5\,v',$$

de donde:

$$\frac{v}{v'} = \frac{0{,}5}{8} = \frac{1}{16}.$$

La máxima expansión posible empezará al $\frac{1}{16}$ de la carrera del émbolo.

Estas máquinas trabajan en condiciones tanto más económicas cuanto mayor es la presión del vapor.

La cantidad de hulla quemada por hora y por caballo de fuerza varía de 1Kg540 para 4 atmósferas a 1Kg390 para 8 atmósferas. En algunos casos se consigue un consumo todavía menor.

La velocidad del émbolo está comprendida entre 1 metro y 2m50. La velocidad de 1 metro es conveniente para máquinas pequeñas, mientras que en los grandes motores puede oscilar entre 1m30 y 1m50.

El volante da ordinariamente de 38,5 a 24,5 vueltas por minuto, desde las máquinas menores hasta las más potentes. En las máquinas de balancín las vueltas son de 30 a 15,9 por minuto.

352. Valores del coeficiente K.—*Tabla núm. 7.*

POTENCIA DE LA MÁQUINA *(Con expansión y condensación)*	Valores de K
4 a 8 caballos.	0,41
10 a 20 caballos.	0,52
30 a 50 caballos.	0,63
60 a 100 caballos.	0,74

353. Potencia de las máquinas de expansión.—La expresión (3), en la cual p representa la presión en kilogramos por centímetro cuadrado del émbolo, puede todavía aplicarse reemplazando a p por *la presión media, en kilogramos, que se ejerce sobre el émbolo* *por centímetro cuadrado.* Designemos por p_m esta presión media; la fórmula (3) será ahora:

$$C = \frac{p_m \times S \times V}{75}. \qquad (8)$$

Para el cálculo de p_m sirve la fórmula:

$$p_m = k \times p - p'. \qquad (9)$$

En estas fórmulas representan:

k un coeficiente variable con el grado de la expansión y la clase de la máquina;

p la presión absoluta del vapor, contada a partir del vacío, en kilogramos por centímetro cuadrado;

p' la contra-presión que obra sobre el émbolo, en kilogramos por centímetro cuadrado;

S la superficie del émbolo en centímetros cuadrados;

V la velocidad del émbolo en metros por segundo.

Designemos por d el grado de la expansión; los valores de k que han de entrar en la expresión (9) para calcular p_m serán los que da la siguiente tabla.

354. Valores del coeficiente de la fórmula (9). — *Tabla núm. 8.*

d	*k*	*d*	*k*	*d*	*k*	*d*	*k*
9/10	0,9951	6/10	0,9117	1/4	0,6258	1/9	0,4131
8/10	0,9796	1/2	0,8556	1/5	0,5588	1/10	0,3919
3/4	0,9675	4/10	0,7813	1/6	0,5086	1/11	0,3739
7/10	0,9523	1/3	0,7196	1/7	0,4697	1/12	0,3585
2/3	0,9404	3/10	0,6845	1/8	0,4386	1/15	0,3230

En realidad, la presión de la caldera es en la práctica superior a la presión inicial p, de 1 a 25 por 100.

El valor de p', *contra-presión* en las *máquinas sin condensación*, que en los cálculos precedentes se ha supuesto igual a 1Kg550, es de 1Kg05 a 1Kg09 si el escape está bien dispuesto, y de 1Kg1 a 1Kg2 si se efectúa con dificultad.

En las locomotoras, p' oscila entre 1Kg100 y 1Kg300.

El valor de p', *contra presión en las máquinas con condensación,* que se ha supuesto igual a 0Kg517 para los cálculos de las expansiones, oscila en realidad entre 0Kg150 y 0Kg330, siendo ordinariamente igual a 0Kg280.

PROBLEMAS.—1.° ¿Cuál es, en caballos, la potencia de una máquina de vapor *de expansión y sin condensación* cuyo cilindro mide 405 milímetros de diámetro, y cuyo émbolo lleva una velocidad de 1m20 por segundo, siendo 6 atmósferas la presión inicial en el cilindro y $\frac{1}{2}$ la expansión?

Tenemos, según (8),

$$C = \frac{p_m \times S \times V}{75};$$

en cuya fórmula p_m es la presión media (9):

$$p_m = k \times p - p'.$$

En este caso, la tabla núm. 8 nos dice que $k = 0,6258$; p, o sean 6 atmósferas, equivale a 6,2004 kilogramos, y en cuanto a p' ya hemos dicho que podríamos aceptar $p' = 1,10$ kilogramos.

Por consiguiente,

$$p_m = 0,6258 \times 6,2004 - 1,10$$

o bien

$$p_m = 2,78 \text{ kilogramos.} \qquad (a)$$