re, una progresion geométrica creciente cuyo exponente puede ser la unidad mas una fraccion tan pequeña como se quiera : se determina la fuerza elástica correspondiente á cada uno de aquellos volúmenes, y despues de una série de consideraciones se halla la fórmula

$$T = v \times f \times (1 + 2'303 \log. n)$$

que representa el trabajo producido por un volúmen v de vapor obrando con toda su fuerza y por expansion. El volúmen v de vapor se expresa en metros cúbicos; f es su fuerza elástica en kilógramos por metro cuadrado de superficie; n el número de veces que el volúmen primitivo del vapor se halla contenido en el que ha adquirido despues de la expansion, y T el trabajo producido en kilográmetros.

Si cuando el émbolo ha recorrido la mitad de su curso se intercepta la entrada del vapor, se dice que la expansion es á la $1/2$, y en este caso se tiene $n=2$ y por la misma razon log. n=log. 2=0'30103. Si la marcha del vapor es interceptada á la tercera parte del curso del émbolo se dice que la expansion es al $1/3$ resultando $n=3$ y log. n=log. 3=0'47712. Si el vapor se intercepta á la cuarta parte del curso, la expansion será al $1/4$ y se tendrá $n=4$, por lo que log. n=log. 4=0'60206. Siguiendo estas consideraciones se tendrán los valores correspondientes á log. n para sustituirlos en la fórmula propuesta que efectuando las operaciones indicadas se transformará en las siguientes :

Si la expansion es á la $1/2$. . . $T=1'6933 \times v \times f$
Si la expansion es al $1/3$. . . $T=2'0988 \times v \times f$
Si la expansion es al $1/4$. . . $T=2'3865 \times v \times f$.

Ejemplo : Hallar el trabajo producido por 12'72 litros

de vapor á la tension efectiva de 4 atmósferas verificándose la espansion al $1/4$.

Segun la fórmula se tiene $T=2'3865 \times 0,01272 \times 41340 = 1254'93$ kilográmetros próximamente, que si este trabajo se hace en un segundo, resulta una fuerza de $1254'93 \setminus 75 = 16'7$ caballos.

Estas mismas fórmulas sirven para cuando la expansion tiene lugar por medio de otro cilindro, pero en este caso n equivaldrá á la relacion entre los volúmenes de los dos cilindros, la cual se hallará partiendo el cuadrado del diámetro mayor por el cuadrado del diámetro menor.

Para simplificar en lo posible los cálculos relativos al trabajo producido por la expansion del vapor á diferentes tensiones se puede hacer uso de la siguiente tabla que formó Mr. Poncelet, tomando por base de sus cálculos el trabajo desarrollado por un metro cúbico de vapor á la presion de una atmósfera y sin expansion, sobre un émbolo de un metro cuadrado de superficie.

En la primera columna de la tabla se designa el grado de la expansion, esto es, las veces que el volúmen del vapor despues de la expansion contiene el volúmen correspondiente al mismo mientras obra con toda su fuerza. Así cuando la expansion es á la mitad, en la primera columna se halla el número 2 porque el volúmen despues de la expansion es doble del que tiene el vapor mientras obra con toda su fuerza. Las demás columnas expresan el trabajo en kilográmetros producido por un metro cúbico de vapor á la tension y grado de expansion que se señala.

TABLA DE LAS CANTIDADES DE TRABAJO QUE PRODUCE UN METRO CÚBICO DE VAPOR Á DIFERENTES TENSIONES Y BAJO DISTINTOS GRADOS DE EXPANSION.

Volúmen despues de la expansion.	TRABAJO CORRESPONDIENTE Á LAS TENSIONES DE 3 atmósf.	4 atmósf.	4 ½ atmósf.	5 atmósf.	5 ½ atmósf.	6 atmósf.
	Kilógr.	Kilógr.	Kilógr.	Kilógr.	Kilógr.	Kilógr.
1	31000	41333	46500	51666	56833	62000
1 ¼	37917	50556	56875	63195	69514	75834
1 ½	43569	58092	65303	72615	79876	87438
1 ¾	48348	64464	72522	80580	88638	96696
2	52488	69984	78732	87480	96228	104976
2 ¼	56139	74852	83208	93565	102921	112278
2 ½	59406	79208	89109	99010	108911	118812
2 ¾	62361	83148	93541	103935	114328	124722
3	65058	86744	97587	108430	119273	130116
3 ¼	67539	90052	101308	112565	123821	135078
3 ½	69837	93116	104755	116395	128034	139674
3 ¾	71976	95968	107964	119960	131956	143952
4	73974	98632	110961	125290	135619	147948
4 ½	77625	103500	116437	129375	142312	155250
5	80892	107856	121338	134820	148302	161784

Para hallar la cantidad de trabajo desarrollada por un volúmen dado de vapor, por medio de esta tabla, se multiplicará dicho volúmen expresado en metros cúbicos por la cantidad correspondiente á la tension efectiva y al grado de expansion que da la tabla. En efecto, si se quiere determinar el trabajo producido por el volúmen de vapor propuesto en el problema anterior, se tomará de la tabla el número 98632 correspondiente á la tension efectiva de 4 atmósferas y á la expansion al $^1/_4$, y se tendrá : T = 0'01272×98632=1254'60 kilográmetros, que es un resultado igual al obtenido por las fórmulas.

Efecto útil de las máquinas de vapor. Para obtener

el efecto útil de estas máquinas se hallará primero el efecto teórico, y luego se multiplicará por un coeficiente medio entre 0'35 y 0'60 en las de baja y mediana presion, y entre 0'54 y 0'85 para las de alta presion, segun la fuerza de la máquina en caballos y el estado de conservacion en que se halla. Los valores del coeficiente serán como sigue :

Fuerza en caballos.	En buen estado de conservacion.	En estado ordinario de conservacion.	
De 4 á 8	0'50	0'42	Baja presion con condensacion.
10 á 20	0'56	0'47	
30 á 50	0'60	0'54	
60 á 100	0'65	0'60	
De 4 á 8	0'38	0'35	Mediana presion con expansion y condensacion.
10 á 20	0'44	0'39	
20 á 40	0'50	0'45	
60 á 100	0'60	0'55	
De 4 á 8	0'61	0'54	Alta presion sin expansion ni condensacion.
10 á 20	0'70	0'64	
30 á 50	0'79	0'75	
60 á 100	0'85	0'81	

Para calcular la fuerza de una máquina de vapor se procederá como sigue: *hállese la superficie del émbolo en centímetros cuadrados; multiplíquese el resultado por la presion efectiva en kilógramos sobre un centímetro cuadrado, y por la velocidad del émbolo expresada en metros; divídase el producto por 75 y se tendrá el efecto teórico en* *caballos. Este resultado multiplicado por el coeficiente respectivo dará el efecto útil á la fuerza efectiva de la máquina.*

Ejemplos: 1.° Hallar la fuerza de una máquina de baja presion con condensacion, cuyo émbolo tiene 40 centímetros de diámetro y el vapor trabaja á la tension de 1 ½ atmósferas; el curso del émbolo es de 1'06 y la velocidad de 0'95. Se supone la máquina en buen estado de conservacion.

Superficie del émbolo=0'7854×(40)²=1256'64 centímetros cuadrados.

Presion por centímetro cuadrado=1'0335×1½=. . 1'55025 kilógramos.

La resistencia del vapor condensado por cada centímetro cuadrado de superficie se estima en 0,15, y la presion efectiva será, 1'55025—0'15=1'40025 kg. tambien por centímetro.

Efecto teórico=1256'64×1'40025×0'95∖75=..... 22'288 caballos.

Como la mitad del efecto teórico es 11 próximamente, y la máquina se halla en buen estado, se tomará el coeficiente 0'56 que corresponde entre 10 y 20 caballos; y el efecto útil será:

Fuerza efectiva de la máquina=22'288×0'56=12'48 caballos, ó cerca de 12 ½ caballos de fuerza.

2.° Determinar la fuerza de una máquina de vapor de alta presion sin expansion ni condensacion, siendo de 40 centímetros el diámetro del émbolo y su velocidad de 1'40 metros; la tension del vapor se supone de 6 atmósferas, por lo que la presion efectiva será de 5, ó de 5'1675 kilógramos por centímetro cuadrado de superficie.

Superficie del émbolo=0'7854×(40)²=1256'64 centímetros cuadrados.

Efecto teórico, 1256'64×5'1675×1'40∖75=121'21 caballos.

Como la mitad del efecto teórico es 60'6, el coeficiente segun la tabla anterior será 0'85 suponiendo la máquina en muy buen estado, y se tendrá:

Fuerza efectiva=121'21×0'85=103'0285 caballos; esto es, 103 caballos de fuerza.

3.° Hallar la fuerza desarrollada por una máquina de mediana presion, con expansion á la mitad en un solo cilindro cuyo diámetro es de 40 centímetros, el curso del émbolo de 1'20 metros, su velocidad de 1'25 metros y la tension del vapor de 4 atmósferas.

Superficie del émbolo=0'7854×(40)²=1256'64 centímetros cuadrados.

Número de golpes simples por minuto=60×1'25∖1'20 =62 ½.

Vapor gastado en un golpe ú oscilacion simple=. . . 0'125664×0'60=0'0753984 metros cúbicos.

El trabajo por cada golpe simple segun la tabla será= 0'0753984×52488=3957'5 kilográmetros.

Efecto teórico=(3957'5×62 ½)∖(60×75)=. . . . 54'965 caballos.

Como la mitad del efecto teórico es 27'4825, el coeficiente será 0'50 correspondiente á las máquinas que se hallan en buen estado, y el trabajo útil dará, 54'965×. . 0'50=27'48 caballos.

En las máquinas de Woolf con dos cilindros se calcula el efecto útil del mismo modo que en las de uno solo, y el grado de la expansion está expresado por la relacion que guardan las capacidades de dichos cilindros, pues, el vapor obra con toda la tension de la caldera durante el curso completo del menor émbolo y luego pasa al cilindro mayor en que ejerce su accion en virtud de la fuerza expansiva. Por esto los dos émbolos tienen igual curso y sus varillas corresponden al mismo vértice del paralelógramo, y el vapor que ha obrado con toda su fuerza en la parte superior del cilindro pequeño pasa inmediatamente á la inferior del mayor cilindro y obliga á subir el émbolo de este, por la expansion, al mismo tiempo que sube el del cilindro menor. Lo mismo sucede cuando el émbolo baja; pues, el vapor que ha obrado en la parte inferior del pequeño cilindro pasa á ejercer su fuerza expansiva en la superior del émbolo mayor haciéndole bajar al propio tiempo que el menor. De esto se sigue, que el trabajo de los dos émbolos se ejerce al mismo tiempo y en igual direccion, lo cual produce mayor potencia en la máquina con menos gasto de combustible.

Segun los principios sentados y en virtud de las aplicaciones que se acaban de hacer, puede expresarse la fuerza de una máquina por medio de las siguientes fórmulas generales.

Para las máquinas de baja presion de Watt con condensacion, se tendrá;

$$C = \frac{0'7854 \times D^2 \times c \times g}{60 \times 75} \times (P - p) \times c'.$$

Siendo C el número efectivo de caballos; D el diámetro del cilindro en metros; c el curso del émbolo tambien en metros; g el número de golpes ú oscilaciones simples por minuto; P la presion del vapor en kilógramos sobre un metro cuadrado de superficie; p la presion ó tension de la mezcla del condensador tambien sobre un metro cuadrado de superficie, y c' el coeficiente correspondiente á la fuerza de la máquina.

Para las máquinas con expansion y condensacion, será;

$$C = \frac{0'7854 \times D^2 \times c \times g \times P}{60 \times 75} \times \left(1 + 2'303 \log. n - \frac{np}{P}\right) \times c'$$

teniendo presente que n es el grado de la expansion ó el número de veces que el volúmen del vapor despues de la expansion contiene el volúmen primitivo; y que c' es el coeficiente numérico tomado en la tabla anterior segun la fuerza y el estado de conservacion de la máquina.

Para las máquinas con expansion pero sin condensacion, se tiene;

$$C = \frac{0'7854 \times D^2 \times c \times g \times P}{60 \times 75} \times \left(1 + 2'303 \log. n - \frac{10335 \times n}{P}\right) \times c'$$

Para las máquinas de alta ó mediana presion sin expansion ni condensacion, resulta;

$$C = \frac{0'7854 \times D^2 \times c \times g}{60 \times 75} \times (P - 10335) \times c'$$

De estas fórmulas se puede deducir el diámetro del cilindro para cada caso, cuando se conoce la fuerza en caballos, la tension P del vapor en kilógramos sobre un metro cuadrado, el curso del émbolo c, el número g de golpes simples y c' el coeficiente respectivo.

Para simplificar los cálculos y evitar complicaciones puede hacerse uso de las siguientes tablas que tomamos del ya citado Mr. Armengaud jeune.

TABLA DE LOS DIÁMETROS, VELOCIDAD Y CURSO PARA LOS ÉMBOLOS DE LAS MÁQUINAS DE VAPOR CON EXPANSION VARIABLE EN UN SOLO CILINDRO, SIN CONDENSACION, SUPONIENDO LA PRESION DEL VAPOR Á CINCO ATMÓSFERAS.

Fuerza en caballos.	Curso del émbolo.	Número de vueltas del eje por minuto.	Velocidad del émbolo por segundo.	Diámetro del émbolo en centímetros para la expansion de $1/5$	$1/4$	$1/3$	$1/2$
	Centím.		Centím.	Centím.	Centím.	Centím.	Centím.
1	40	52'5	70	14'6	13'7	13	10'9
2	50	45	75	19'8	18'5	17'5	15
4	60	40	80	26'8	25'1	23'8	20
6	70	36'43	85	32'9	30'8	29	24'4
8	80	33'75	90	35'1	32'8	31	26
10	90	31'67	95	37'9	35'5	33'7	28
12	100	30	100	40	37'5	35'6	29'7
16	110	28'63	105	44'9	42	39'9	33'3
20	120	27'50	110	48'4	45'3	43	35'9
25	130	26'53	115	52'6	49'2	46'7	39
30	140	25'71	120	56	52'4	49'7	41'6
35	150	25	125	58'8	55	52	43'6
40	160	24'32	130	61	57	54	45'2
50	170	23'42	135	66	61'9	58'8	49
60	180	23'33	140	70'9	66'3	63	52'7
75	190	22'89	145	77'3	72'3	68'7	57'3
100	200	22'50	150	89'8	84	80	66'4

Debe tenerse presente que cuando se dice que la expansion es al $1/5$, al $1/4$, al $1/3$ ó á la $1/2$ significa que el vapor obra con toda su fuerza durante el $1/5$, el $1/4$, el $1/3$, ó la $1/2$ del curso del émbolo.

TABLA DE LAS DIMENSIONES PRINCIPALES PARA LAS MÁQUINAS DE VAPOR CON EXPANSION VARIABLE EN DOS CILINDROS, CON CONDENSACION Y SUPONIENDO EL CURSO DE LOS ÉMBOLOS ENTERAMENTE IGUAL Y QUE EL VAPOR OBRA EN EL CILINDRO PEQUEÑO Á LA TENSION DE CUATRO ATMÓSFERAS.

Fuerza en caballos.	Diámetro del émbolo menor, en centímetros.	Superficie del menor émbolo, en centímetros cuadrados.	Diámetro del émbolo mayor, en centímetros.	Superficie del mayor émbolo, en centímetros cuadrados.	Curso de los dos émbolos en metros.	Número de vueltas del árbol principal por minuto.	Volúmen engendrado por el menor émbolo á cada golpe en metros cúbicos.	Peso del vapor consumido en minuto, por su admision completa en el cilindro menor.
4	13'5	143	28'6	642	0'75	36	0'011	1'66 kg.
5	15	177	32	804	0'75	36	0'013	1'96 »
6	16'4	211	35	962	0'75	36	0'016	2'41 »
8	18'1	257	38'2	1146	0'90	$33 1/3$	0'023	3'21 »
10	20	314	42'3	1405	0'90	$33 1/3$	0'028	3'92 »
12	21'7	370	45'8	1647	0'90	$33 1/3$	0'033	4'61 »
16	24'2	460	51'8	2124	1'00	30	0'046	5'78 »
20	25'8	523	54'5	2333	1'10	30	0'057	7'17 »
30	29'8	697	43	3117	1'20	$28 3/4$	0'084	10'12 »
40	32'4	824	69'7	3707	1'30	28	0'107	12'56 »
50	35'5	990	75	4418	1'40	26'8	0'139	15'59 »
60	38'8	1182	82'1	5294	1'50	25	0'177	18'55 »
70	42'6	1425	90	6362	1'60	24'4	0'228	23'32 »
80	44	1520	93	6793	1'70	22'9	0'258	24'77 »
90	46'7	1713	98'6	7636	1'70	22'9	0'291	27'93 »
100	49'2	1901	104	8495	1'80	21'8	0'342	29'16 »

Cuando la máquina deba marchar á una presion mayor ó menor de las cuatro atmósferas que indica la tabla, se deberá multiplicar la superficie del émbolo tomada en la tabla por la relacion inversa de las presiones, y el resultado será la superficie del émbolo correspondiente á la presion propuesta, por cuyo medio se hallará el diámetro respectivo.

Ejemplo: Hállese el diámetro correspondiente á una máquina de 30 caballos que debe trabajar á la tension de 3 atmósferas.

La superficie del émbolo á la presion de 4 atmósferas segun la tabla es 697 centímetros cuadrados, y multiplicada por la razon inversa de las presiones dará $697 \times {}^4/_3$ $=929'33$ cent. cuad. para la superficie del émbolo que se busca; y el diámetro será, $d=\sqrt{929'33 \diagdown 0'7854}=34'4$ centímetros.

Regulador de fuerza centrífuga ó péndulo cónico de Watt. El regulador ó moderador sirve para regular la introduccion del vapor en la caja de distribucion para que la velocidad de la máquina aumente ó disminuya segun sea menor ó mayor que la del régimen bajo cuyo supuesto se ha calculado. Esta parte tan importante de la máquina recibe el movimiento del árbol principal por una combinacion de engranajes ó por un par de poleas y una correa ó cuerda, y la separacion ó encogimiento de las esferas produce la mayor ó menor abertura de la válvula de introduccion del vapor.

El regulador de fuerza centrífuga, que puede considerarse como un regulador universal porque se aplica á los principales motores sin consumir cási nada del trabajo producido por la máquina, se compone de un eje vertical *an* (fig. 88) en cuyo extremo *a* tiene sujetas dos piezas ó tirantes *ac, ac* á articulacion por medio de un perno horizontal que atraviesa á estas y al eje. Otros dos tirantes *bd, bd* se hallan fijados del mismo modo por un extremo en los primeros y por el otro en una pieza *ebb,* que abrazando el eje sube ó baja por él, segun el ángulo *cac* sea mayor ó menor. La pieza *e* arrastra con ella el extremo *f* de una palanca cuyo extremo opuesto directa ó indirectamente abre ó cierra la válvula de introduccion del vapor. Así, cuando la velocidad de la máquina es mayor que la

de régimen, la fuerza centrífuga de las esferas *cc* hace que se separen mas y que elevando la pieza *e* se cierre en parte la llave ó válvula de introduccion del vapor. Lo contrario sucede cuando la velocidad disminuye, pues, encogiéndose ó acercándose las esferas, baja la pieza *e* y haciendo subir el otro extremo *g* de la palanca abre la válvula por donde entra el vapor en la caja de distribucion y aumenta la fuerza y la velocidad de la máquina.

La relacion entre las partes componentes del regulador debe ser tal, que para cuando la máquina adquiere una velocidad de que nunca debe pasar, la válvula quede enteramente cerrada, y para la velocidad mínima quede enteramente abierta. Tambien se aplica este regulador á las ruedas hidráulicas haciendo que obre sobre una paradera que intercepta mas ó menos el paso del agua que hace marchar la rueda.

El regulador obra en virtud del peso de las esferas y de la fuerza centrífuga que adquieren por la rotacion, y por esto se ha de combinar el peso de ellas y su velocidad con las diversas resistencias que hayan de vencer; como son, el peso de la corona *e* y de la válvula ó llave de introduccion del vapor, así como el roce y peso de las palancas y demás piezas que deben mover. Este aparato puede considerarse como un péndulo simple cuya longitud es la distancia *am* del punto de suspension *a* al plano que pasa por el centro de las esferas, y la oscilacion está expresada por la mitad de la revolucion completa de las mismas.

La velocidad de las esferas debe estar comprendida entre 25 y 60 vueltas por minuto, y como la polea *n* comunica directamente con otra fijada en el árbol del volante, la regla establecida para las poleas determinará el diámetro por medio de la rotacion convenida, y la rotacion cuando se conozca el diámetro.

La altura vertical *am* está expresada en general por la fórmula $\dfrac{gt^2}{4\pi^2}$ tomando *mc* por unidad; siendo *t* el tiempo de una revolucion del regulador y g=9'8 metros. El ángulo *mac* se hace de 30° para la velocidad de régimen, y el peso de cada esfera se halla por la fórmula $P = 3'175 \times p$ representando por *p* la resistencia en kilógramos que ofrece la corona *e* con todo lo que pone en movimiento, y siendo la distancia *ad* los dos tercios de *ac*. Cuando la resistencia *p* es muy considerable se coloca la corona *e* en la parte superior y el regulador toma la forma indicada en la (fig. 89).

Tambien pueden calcularse estos elementos por medio de las siguientes reglas prácticas que encontramos en algunas obras y cuyos resultados no se separan de los que da la teoría.

1.ª *La longitud* ac *de los brazos del regulador, tomada desde el eje al centro de las esferas, se hallará partiendo el número constante* 103320 *por el cuadrado del número de revoluciones que da el regulador por minuto. El cociente será la longitud del brazo en centímetros.*

2.ª *La altura* am *se hallará dividiendo el número* 89478 *por el cuadrado del mismo número de revoluciones del regulador en un minuto. El resultado será la altura en centímetros.*

3.ª *El rádio* mc *del círculo descrito por el centro de las esferas se determinará extrayendo la raíz cuadrada de la diferencia entre los cuadrados de* ac *y* am.

4.ª *Para hallar el peso que deben tener las esferas se multiplicará el peso* p *que ofrecen las resistencias que hayan de vencer por el número constante* 1789, *y esto será el dividendo: multiplíquese el cuadrado del número de re-*

voluciones que da el regulador en un minuto por el cuadrado del diámetro cc, *y el producto será el divisor. El cociente de la division dará el peso reunido de las dos esferas, y la mitad será el que debe tener cada una.*

Ejemplo: Hallar las dimensiones de un regulador que debe dar 45 revoluciones por minuto, teniendo de equilibrar una resistencia de 5 kilógramos.

1.ª Longitud $ac = 103320 \setminus (45)^2 = 51'02$ centím.
2.ª La altura $am = 89478 \setminus (45)^2 = 44'18$ centím.
3.ª El rádio $mc = \sqrt{(51'02)^2 - (44'18)^2} = 25'518$ cent.
El diámetro $cc = 2 \times 25'518 = 51'036$ cent. $= 0'51$ met.

4.ª El peso de las esferas $= \dfrac{5 \times 1789}{45^2 \times (0'51)^2} = 16'98$ kil.

Cada esfera pesará 8'49 kilógramos, y quedarán llenadas las condiciones del problema.

Debemos advertir que algunos constructores modernos no dan á los cuerpos *c*, *c* la forma enteramente esférica como se habia hecho antes, sino que les dan la figura de una lenteja uniendo por sus bases dos segmentos esféricos de poca altura; y con esto se reduce mucho la resistencia del aire durante la revolucion.

Volante. El movimiento de los motores es generalmente irregular, y por esto Fitz-Gerard trató de regularizarlo en las máquinas de vapor por medio del volante. De manera, que el objeto principal del volante es regularizar el movimiento de la máquina haciendo que el émbolo no se detenga ni disminuya su velocidad cada vez que llega á las extremidades de su curso. El volante es indispensable en las máquinas de vapor y en la mayor parte de otras máquinas motrices, pues, adquiriendo fuerza de impulsion en virtud de la velocidad que recibe de la potencia,