
ANALES DEL INSTITUTO DE INGENIEROS

CONFERENCIA DADA EN EL INSTITUTO DE INGENIEROS

POR

ENRIQUE LABATUT (INJENIERO MECÁNICO)

Sobre el cálculo y la manera de funcionar de las máquinas á vapor de múltiple expansión.

La máquina á vapor que es hasta ahora uno de nuestros principales motores, no es sino un motor térmico, es decir una máquina que convierte en trabajo mecánico el calor producido por la combustión. Ser económica es en este caso un punto capital. El objeto que se persigue en el empleo de una máquina y en su construcción es pues obtener lo más económicamente posible la unidad de trabajo, es decir el caballo efectivo por hora.

Según que la máquina sea de expansión y condensación ó sin condensación, el gasto de vapor por caballo util por hora es variable.

Así hay máquinas que gastan solamente 7 kilogramos y otras que gastan 30 kilogramos.

Se creería entonces que hay ventaja en emplear máquinas que consumen la menor cantidad de vapor, pues en realidad no hay nada de cierto en esto.

Es que en efecto no es preciso confundir la economía de vapor con la economía de plata.

Lo que importa al industrial es de pagarse el caballo vapor lo menos caro posible traducido en pesos y centavos.

En el precio del caballo vapor, ó de la unidad de trabajo, intervienen los cuatro términos siguientes:

1.º El precio (pesos y centavos) del peso de vapor por caballo y por hora.

2.º Los gastos de grasamiento y de entretención de la máquina.

3.º Hay también los gastos que resultan del salario del personal, la conducción, etc.

4.º En fin, los gastos de amortización é intereses de la máquina y de su instalación.

Todo esto con relación al caballo hora.

Considerando estos distintos elementos se puede decir que la máquina más económica es esa para la cual la suma de los cuatro términos indicados es la más pequeña posible.

Una máquina pidiendo algunas veces menos entretenimiento es menos onerosa que otra consumiendo menos vapor pero llevándosela sobre los otros factores.

Tomemos ejemplos:

En la marina se emplean máquinas que cuestan mucho y muy complicadas, pero consumiendo la menor cantidad de vapor posible.

¿Por qué, es acaso con el objeto de disminuir los gastos que hay que hacer para obtener un caballo?

Reduciendo el número de kilogramos de vapor se disminuye el número de metros cuadrados de superficie de calentamiento, por consiguiente las dimensiones de las calderas.

Se disminuye también el peso de carbón que es necesario transportar, y de esta manera se gana en espacio y en peso.

En un transporte esto permitirá aumentar la velocidad, es pues una doble economía.

Otro caso.—Consideremos una industria en un país alejado de los grandes centros de talleres de construcción.

El carbón únicamente no es escaso.

¿Qué máquina se empleará?

¿Empleará una máquina que consuma lo menos de vapor posible?

El primer término en este caso es secundario.

El industrial debe antes de todo disminuir los gastos de entretenimiento, evitar la paralización del trabajo.

Mientras mas simple y robusta será la máquina más será económica.

Hay casos en los cuales la paralización debe tratar de evitarse absolutamente.

Tal por ejemplo, es el caso de los ventiladores que alimentan los altos hornos.

Un accidente de los hornos daría lugar á grandes pérdidas y superiores á las que se harían sobre una máquina poco costosa.

En resumen la economía de vapor no es el único elemento de apreciación, pero á menudo es el principal.

CIRCUNSTANCIAS DE LAS CUALES DEPENDE LA ECONOMÍA DE VAPOR EN UNA MÁQUINA.

El agua siendo tomada á la temperatura de 0° , es preciso para calentarla hasta una cierta temperatura t° , y para evaporarla á una presión correspondiente á esta temperatura, una cantidad de calor llamada *calor total*, dada por la fórmula de Regnault:

$$C = 606,5 + 0,305 t.$$

t , temperatura en centígrados.

Si se introduce en esta fórmula la temperatura correspondiente á varias presiones, se verá que la cantidad de calor varía poco con la presión.

						Calorias
Así para	2	atmósferas	se	necesitan		643,1
"	"	4	"	"	"	652,6
"	"	6	"	"	"	655,0
"	"	10	"	"	"	661,4

Por consiguiente de 2 atmósferas a 10 atmósferas la cantidad de calor no cambia sino de 2,6%

Este aumento de calor es sumamente reducido. Así pues, diremos que en los límites que se presentan en la práctica, la producción de 1 kilogramo de vapor cuesta lo mismo en combustible, cualquiera que sea su presión.

Es además lo que confirma la experiencia,

TRABAJO QUE PUEDE EJECUTAR UNA CANTIDAD DE VAPOR OPERANDO CON EXPANSIÓN

Se supone que la expansión del vapor se efectúa según la ley de Mariotte, y que no hay ninguna pérdida por escape ni por irradiación.

Trasemos un sistema de dos ejes rectangulares, fig. (1).

El eje vertical es el de las presiones.

Y el horizontal, de los volúmenes.

P_0 , es la presión inicial.

P_1 es la contra-presión.

P_2 presión al fin de la carrera.

Sea V el volumen engendrado por el pistón en una carrera.

V_0 volumen engendrado durante la admisión.

Entonces $\frac{V}{V_0} = n$ es el grado de expansión.

La cantidad inversa $\frac{1}{n}$ es el grado de admisión.

Los volúmenes son expresados en metros cúbicos y admitimos que una atmósfera vale 10,200 kpm².

Y tendremos el diagrama ABCDEA que representa el trabajo durante un golpe de pistón.

Y este trabajo será espresado por

$$T = 10,000 P_0 V_0 \left(1 + \log.\text{hyp.n.} - \frac{P_1 n}{P_0} \right)$$

Vamos á aplicar esta fórmula suponiendo sucesivamente que el vapor trabaja á 2, 4, 6 y 10 atmósferas.

Y admitiendo que para cada uno de estos casos tendremos

$$P_1 = 0, 2 \text{ atmósferas.}$$

$$P_2 = 0, 7 \text{ atmósferas.}$$

Esto en el caso de máquinas á condensación.

Comenzemos por calcular el volumen de un kilogramo de vapor á la tensión de 2 atmósferas.

El peso del m³ de vapor á esta tensión es 1^k 122.

Volumen por 1^k $\frac{1,000}{1,122} = 0,891$.

$$\text{Grado de expansión } n = \frac{V}{V_0} = \frac{P_0}{P_2} = \frac{2}{0,7} = 2,85.$$

Podemos entonces construir un tablero para las distintas tensiones.

Suponemos que el volumen de admision V_0 es igual al volumen de 1^k de vapor, es la cantidad de vapor que se nos da para que trabaje en la máquina, y así tendremos el trabajo en kilogrametros desarrollado ó ejecutado por 1^k de vapor.

Aplicando la fórmula establecida más arriba, llegamos á obtener el tablero siguiente:

P _o	Vol. de 1 k.	n	Tr. desarrollado por 1 k. de vapor.
			Kilógramos.
2	0,3891	2,85	31399
4	0,458	5,71	45012
6	0,326	8,55	55981
10	0,305	14,28	96551

CONCLUSIONES DE LA EXPERIENCIA

Una máquina trabajando en las mejores condiciones posibles, consume rara vez menos de 7 kilogramos de vapor seco por caballo y por hora, es decir para producir 270.000 kilográmetros.

Por consiguiente

$$1^k \text{ de vapor rinde } \frac{270000}{7} = 38571 \text{ kgm.}$$

En lugar de 55981 por ejemplo, dado por el tablero.

Esto es un primer punto que es preciso tomar en consideración.

En segundo lugar se ve por el tablero que el trabajo aumenta mucho cuando la presión se eleva.

Así el trabajo desarrollado por 1 kilogramo de vapor á 10 atmósferas es triple del trabajo rendido á 2 atmósferas.

El trabajo gana de 200%

Si comparando este trabajo con el que hemos visto más arriba, que la cantidad de calor necesario para producir 1 kilográ-

mo de vapor a 2, ó bien á diez atmósferas no es sino muy insignificante, concluimos pues, que se debe emplear altas presiones y grandes expansiones y que son favorables á la economía del vapor.

Pero la experiencia no confirma este hecho de una manera absoluta, la verdad es que para cada clase de máquina existe una tension inicial y un grado de expansión que corresponde á un trabajo máximo.

Así, en el caso de máquinas de un cilindro y de condensación, consumiendo vapor saturado, hay muy poca ventaja en sobrepasar á 5 veces el volumen primitivo para la expansión con una presión inicial de 5 á 6 atmósferas en la caldera.

Si se emplea una envoltura de vapor, ó bien el vapor recalentado, entonces sí se puede trabajar con presiones más elevadas y expansiones más prolongadas.

Pero si en lugar de ejecutar la expansión en un cilindro, la hacemos en varios cilindros sucesivos, por ejemplo en una máquina de triple expansión, se encuentra mucha ventaja en sobrepasar a 10 atm. como presión inicial y prolongar la expansión de 20 á 25 veces el volumen primitivo de admisión.

Así, pues, la experiencia demuestra:

1.º Que un kilogramo de vapor rinde menos que lo que indica la teoría elemental.

2.º Que no es exacto decir de una manera jeneral, que el consumo de vapor disminuye cuando la tensión inicial aumenta y que la expansión aumenta.

CAUSAS DE ESTE DESACUERDO ENTRE LA TEORÍA Y LA EXPERIENCIA

Estas causas son numerosas:

1.º Es debido á la influencia del espacio muerto.

2.º Debido á los escapes de vapor.

3.º Á causa de las condensaciones que se producen en el cilindro, principalmente durante la admisión, y al enfriamiento de las paredes metálicas.

4.º Á causa de los cambios de vapor que se producen en la caja de distribución y tubos que conducen el vapor.

5.º En fin, las pérdidas por irradiación.

EXAMINEMOS RÁPIDAMENTE CADA UNA DE ESTAS CAUSAS

I. *Espacio muerto*.—Representemos primeramente el diagrama de una máquina que no tuviera espacio muerto (fig. 2).

En una máquina de esta clase el gasto de vapor será V_0 .

El trabajo desarrollado es proporcional al área A B C D E.

Si la máquina tiene un espacio muerto, en este caso podemos representarlo por una distancia AA'

Si V es el volumen de este espacio muerto, tendremos:

$$v = \frac{V}{m}$$

Es decir que el volumen del espacio muerto es una fracción del volumen total del cilindro.

I tambien tenemos: $V_0 = \frac{V}{n}$

En este caso el gasto de vapor será:

$$V_0 + v = \frac{V}{n} + \frac{V}{m} = V \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)$$

El gasto de vapor ha aumentado por consiguiente, pero por otra parte el trabajo habrá también aumentado, puesto que el volumen de vapor que toma expansión es $V_0 + v$, por lo tanto la curva de expansión es ahora BC' que pasará encima de la primera.

El grado de expansión no es n , pero será

$$\frac{V+v}{V_0+v} = \frac{1+\frac{1}{m}}{\frac{1}{m}+\frac{1}{n}}$$

Si se avalúa por una parte el aumento del gasto de vapor debido al espacio muerto, y por otra el aumento de trabajo, se encuentra que el aumento del gasto de vapor crece mucho más, y por consiguiente la influencia del espacio muerto se traduce por una pérdida de trabajo y tanto más grande cuanto la tensión inicial es más elevada.

II. *Escapes*.—Son causas de pérdida de importancia variable. Dependen principalmente del perfecto ajuste del piston. En las máquinas nuevas y bien construídas los escapes son considerados como insignificantes, y podemos no tomarlos en consideración.

Pero en las máquinas viejas y mal dirigidas los escapes de vapor constituyen la mayor parte del consumo.

Los escapes de vapor aumentan con la diferencia de presión en los dos lados del piston.

III. *Condensación en el cilindro*.—El vapor llegando de la caldera y entrando en el cilindro encuentra paredes que han sido enfriadas en la carrera precedente cuando la comunicación estuvo establecida entre el cilindro y el condensador.

El vapor ha cedido calor á esas paredes, y resulta una condensación.

Así, pues, una parte del vapor se condensa á su llegada al cilindro, y esta condensación se manifiesta por gotas de agua depositadas contra las paredes.

Durante la expansión la presión baja y entonces son las paredes las que se encuentran á una temperatura superior á la del vapor.

Las paredes restituyen este calor y lo hacen evaporando una parte de las gotas que se habían depositado anteriormente.

Estas gotas que se evaporan producen el efecto de aumentar la cantidad de vapor para el cilindro y de aumentar también el trabajo rendido.

Es, pues, una circunstancia favorable que tiene por objeto de disminuir la circunstancia desfavorable de la condensación.

Pero siempre una cierta cantidad de vapor existe al estado líquido cuando la luz de descarga se abre, es decir, cuando la emisión comienza.

Resulta, pues, que cuando la comunicación está establecida con el condensador ó el aire exterior, hay una disminución considerable de presión y de la temperatura del vapor, es decir, que hay de nuevo abandono de una cierta cantidad de calor por las paredes, la que tiene por objeto de aumentar la reevaporación.

Esta reevaporación es sin efecto bajo el punto de vista del rendimiento de la máquina. Ese enfriamiento que resulta para las paredes, Hirn lo llama *el enfriamiento al condensador*.

Es una pérdida que se debe reducir á un minimum.

El enfriamiento al condensador sería el más pequeño posible si al momento de abrirse la luz de descarga el cilindro no contuviese sino únicamente vapor seco.

Estos fenómenos sucesivos de cambios de calor son tanto más grandes y por consiguiente más perjudiciales sobre el rendimiento térmico de la máquina, cuanto la diferencia de las temperaturas extremas es mayor.

De aquí resulta la contradicción entre los valores dados por la experiencia y el cálculo sobre el empleo de las altas presiones.

El problema de las máquinas á vapor bajo el punto de vista económico, consiste, pues, en reducir el enfriamiento al condensador.

IV. *Cambios de calor al través de las paredes del cajón y de*

los conductos.—Ciertos conductos sirviendo el uno á la admisión y el otro á la descarga están separados por una simple pared metálica.

V. En fin, hay que tener en cuenta las pérdidas de calor por irradiación.

Esta pérdida es tanto más grande cuanto la temperatura empleada es mayor.

MEDIOS QUE SE PUEDEN EMPLEAR PARA DISMINUIR ESTAS CAUSAS DE PÉRDIDA

I. *Espacio muerto.*—Zeuner ha buscado el medio de disminuir el efecto dañoso del espacio muerto y ha propuesto el teorema siguiente:

«Cuando la expansión es suficientemente prolongada para
« que la presión final del vapor sea igual á la presión durante el
« escape, se anula la influencia del espacio muerto suprimiendo
« el escape en un instante tal que la compresión que resulta lle-
« ve la presión en el cilindro al fin de la carrera de regreso al
« valor de la presión de admisión.»

En este caso tendremos el diagrama aquí indicado (fig. 3.)

En cuanto al trabajo que cuesta la compresión de este vapor se demuestra que es igual al aumento del trabajo de la expansión, debido á que durante esta expansión el volumen de vapor llenando el espacio muerto se añade al volumen del vapor verdaderamente admitido.

Suponiendo aún que este teorema fuese verdadero, no es posible, sin embargo, anular la influencia del espacio muerto por la compresión

Primeramente, no se puede prolongar la expansión de manera que ésta sea completa. No se recoje entonces el trabajo que

se ha necesitado emplear para comprimir el vapor en el espacio muerto, este trabajo no es restituído sino en el caso en que la expansión fuese completa. Además es fácil reconocer que si el espacio muerto es un poco grande, si al mismo tiempo la presión del vapor es elevada y si la máquina es de condensación, entonces la compresión es insuficiente para llevar la presión al valor de la presión inicial al fin de la carrera de regreso.

El mejor medio es reducir el espacio muerto á su más pequeño valor posible, por consiguiente será necesario tener ciertos cuidados en la construcción de la distribución.

Para un grado de expansión igual á 6 y por un espacio muerto $m = 20$, se encuentra que la pérdida debida á este espacio es de 9%.

Se ve, pues, la necesidad y la ventaja de reducirlo.

En las máquinas de válvulas de Corliss, el espacio muerto baja á $1/66$, es decir, á 0,5%.

El espacio muerto depende principalmente de la superficie del pistón, pero es independiente de la carrera.

Las grandes carreras son, sin embargo, preferibles á las pequeñas.

II. *Escapes*.—Los escapes dependen en gran parte de la contracción y del entretenimiento de las máquinas.

Por lo tanto se debe emplear buenos sistemas de armaduras herméticas, y se reducirán de una manera jeneral los escapes.

III. *Condensaciones en el cilindro*.—La pérdida al condensador es tanto más grande cuanto la diferencia de las temperaturas extremas es tanto más elevada.

Diferentes medios han sido empleados para reducir el enfriamiento al condensador.

En primer lugar tenemos la

ENVOLTURA DE VAPOR,

Una parte de las gotas de agua depositadas en las paredes del cilindro se evaporan durante la expansión y aumentan el trabajo al mismo tiempo, y las otras constituyen una pura pérdida.

Esta envoltura de vapor ha dado lugar á muchas discusiones.

Para que sea enteramente eficaz es preciso que sea completa, es decir calentar todo el cilindro y las tapas.

Es menester todavía que la envoltura contenga vapor y no agua.

Tiene que estar provista de los medios necesarios para retirar constantemente el agua á medida que el vapor se condensa, y para este efecto se emplearán pequeños tubos dispuestos en lugares convenientes,

Otras veces se agrega una pequeña bomba que aspira el agua y un poco de vapor y que manda el todo a la caldera.

Una última consideración es el sistema de calentar la envoltura.

Esto se puede hacer de dos maneras.

Primeramente haciendo pasar en ésta todo el vapor destinado á alimentar el cilindro.

Este sistema ha sido criticado, se ha pretendido que era más racional hacer circular el vapor fresco en el cilindro primeramente.

En Inglaterra se calienta la envoltura de una manera distinta.

Se calienta con vapor enviado por medio de un pequeño tubo, y que no va al cilindro.

Este sistema parece mejor.

En todo caso el oficio de la envoltura depende naturalmente de la manera de emplear el vapor en el cilindro.

Si la máquina es de expansión, ó si la expansión es suficientemente prolongada, entonces sí, el oficio de la envoltura será más eficaz.

En fin, todos los resultados dados por los ingenieros sobre este sistema de calentar el cilindro, han sido siempre mui contradictorios.

Según Hirn es bueno en ciertos casos y malo en otros,

El segundo modo para reducir el enfriamiento al condensador es de emplear el

VAPOR RECALENTADO.

Es un vapor que se encuentra á una temperatura más elevada que la que corresponde á su presión.

El vapor recalentado ha sido empleado con éxito.

El medio jeneralmente adoptado para recalentar el vapor, consiste en interponer entre la caldera y la máquina un tubo en espiral establecido en una cámara que atraviesan los gases que pasan de los canales á la chimenea. Con este sistema se recalienta rara vez á más de 200°.

Este sistema es, sin embargo, complicado.

Se ha imaginado ciertos aparatos llamados de expansión (détendeurs), en los cuales el vapor pasa de la caldera sin efectuar ningun trabajo, á un medio en el cual la presión es menor.

Estos aparatos son análogos á las válvulas de estrangulación.

VEAMOS EL OFICIO DEL VAPOR RECALENTADO.

Si en lugar de vapor saturado se introduce vapor recalentado en un cilindro, este tambien depositará algún calor, pero en todo caso traerá la cantidad necesaria para evaporar las gotas de agua.

La cantidad de agua que queda, será pues más pequeña, y la cantidad evaporada durante la expansión es mayor, por consiguiente el vapor recalentado disminuye entonces el enfriamiento al condensador.

En consecuencia, la cantidad de agua presente en el cilindro al fin de la expansión se encontrará reducida, y esto explica la disminución del enfriamiento al condensador en las máquinas que usan vapor recalentado.

Nota.—El empleo del vapor recalentado es más eficaz que la envoltura.

En efecto, el primero trae directamente al cilindro, durante el período de introducción, una cantidad de calor mas fuerte que la que daría el vapor saturado, y además lo trae justo al momento que es necesario.

La envoltura en lugar de procurar directamente este aumento de calor, opera al través de las paredes metálicas con menos precisión.

Y además la envoltura opera menos en los momentos útiles, opera pues en ciertos instantes que no son necesarios ó que son más bien dañosos.

Se ha pretendido que el vapor recalentado quemaba las estopas y la grasa.

Pero esto no está sujeto á consideración.

Las máquinas de grande velocidad tienen la ventaja que a causa de la rapidéz de los fenómenos durante una carrera, los cambios son menos completos que en una máquina de marcha lenta.

Un tercer medio de disminuir el mismo efecto que consideramos, consiste en el empleo de las rotaciones rápidas.

Para las locomotoras y para las máquinas marinas esto ya hace mucho que es conocido.

Las esperiencias de Williams han puesto este principio en evidencia,

En fin, cuarto caso.

EMPLEAR LAS MÁQUINAS DE EXPANSIONES DE CASCADAS Ó DE MÚLTIPLE EXPANSIÓN.

Supongamos que se quiera emplear el vapor a una tensión total P_0 , fig. (4).

Y que se quiera hacer la expansión de este vapor hasta obtener 9 veces el volúmen primitivo de admisión.

El diagrama que se obtiene es el siguiente:

Las temperaturas extremas corresponden á las presiones extremas P_0 y P_1 .

Tomemos un cilindro de volumen V_0 más pequeño que V pero más grande que $\frac{V}{9}$.

En lugar de vaciar el volumen $\frac{V}{3}$ en la atmósfera, mandémoslo á un cilindro de mayor volumen.

El vapor entrará con la presión que tenía en ese instante.

En seguida tomará expansión también á 3.

De $\frac{V}{9}$ ha pasado á $\frac{V}{3}$ y sigue tomando expansión.

Se ha esparcido en todo de 3×3 .

—El vapor que ha sido introducido en el pequeño cilindro puede exparcirse en seguida en uno grande y se tiene de esta manera la máquina Wolf.

O bien el vapor en lugar de pasar directamente al gran cilindro, pasa a un receptor intermediario de volumen suficientemente grande para que la presión del vapor sea poco variable, entonces se tiene la máquina Compound.

En esta última figura, para la simplificación de la demostración hemos supuesto que no existía cabida de presión de un cilindro al otro, esto equivale á suponer que consideramos el receptor intermediario de volumen infinito.

En tal caso la presión del vapor permanece constante durante su pasaje de un cilindro al otro.

Así pues, si el receptor intermediario fuese infinito, tendríamos una presión constante, por consiguiente, le debemos dar un volumen tan grande como sea posible; pero mientras más grande es este volumen, mayor será la superficie espuesta á la irradiación, por lo tanto es preciso envolver el receptor con materias malas conductoras del calor.

Jeneralmente se le dá un volumen de 2 á 2,5 veces el volumen del pequeño cilindro.

En la máquina Woolf el pasaje del vapor de un cilindro al otro se hace pues lo más directamente posible.

En la Compound el vapor estaciona en el receptor antes de pasar al gran cilindro.

Se puede suponer que el vapor se esparce en 3 ó en 4 cilindros, y se tendrá en este caso las máquinas de triple o de cuádruple expansión.

Cualquiera que sea el número de cilindros y la manera como la expansión se encuentra fraccionada, si se supone que no hay ninguna caída de presión de un cilindro al otro, el trabajo total desarrollado por el vapor es el mismo que si este fuese introducido directamente en el último cilindro y que si fuese empleado en las mismas condiciones de presión y de expansión.

Por esto el volumen del pequeño cilindro no tiene ninguna influencia sobre el trabajo total, se le puede dar un volumen cualquiera poco mas pequeño que V.

La relación que existe entre los volúmenes de los cilindros no tiene tampoco ninguna influencia sobre el trabajo total.

LA POTENCIA DE LA MÁQUINA DEPENDE ÚNICAMENTE DEL VOLUMEN
DEL ÚLTIMO CILINDRO,

*Ventaja de las expansiones en cascadas sobre las economías
de vapor.*

En nuestro caso anterior las presiones iniciales y finales son respectivamente p_0 y p_1 .

Las temperaturas serán las correspondientes á estas presiones.

En el caso de una máquina Compound llamemos p_2 la presión al fin de la expansión en el pequeño cilindro.

Por consiguiente, el valor de las temperaturas, corresponden de p_0 á p_2

y de p_2 á p_1 .

Se encontrarán naturalmente los mismos fenómenos sobre los cambios de calor que en el caso de una máquina mono-cilíndrica.

Además el calor perdido durante el escape en el pequeño cilindro no es enviado al condensador, sino al cilindro siguiente, lo que contribuye á recalentar las paredes del pequeño cilindro aún durante la descarga.

Y como las variaciones de temperaturas en el gran cilindro son menos que lo que serían en una máquina mono-cilíndrica, la economía será naturalmente más grande.

Otra ventaja es la disminución de los escapes.

Se llega á este resultado en las máquinas á doble, triple y cuádruple expansión.

Los escapes que se producen en los distribuidores del pequeño cilindro no constituyen pérdidas secas, puesto que el gran cilindro las aprovecha.

No hay más que los escapes que se producen en el gran cilindro que pueden ser considerados como pérdidas secas.

En tercer lugar tenemos una disminución del espacio muerto.

Por un sistema de construcción dado, el volumen del espacio muerto es una fracción del volumen del cilindro.

En las máquinas que emplean la distribución Meyer el espacio muerto representa el 5% del volumen del cilindro.

Si, pues, designamos por $\frac{V}{m}$ la relación entre el volumen teórico del gran cilindro al espacio muerto, entonces el espacio muerto es $\frac{V}{m}$.

Si $\frac{V}{r}$ es el volumen del pequeño cilindro, en este caso el volumen del espacio muerto será $\frac{V}{r \cdot m}$.

Si por ejemplo $m=20$ i $r=3$,

tendremos $\frac{V}{3 \times 20} = \frac{V}{60}$

por consiguiente, etc.

El uso de las expansiones en cascadas permiten el empleo de la compresión para disminuir la influencia dañosa del espacio muerto.

En fin, puesto que las diferencias de presiones son menores, será entonces lo mismo para las temperaturas.

Por consiguiente, los cambios de calor serán también mucho menos.

Lo que acabamos de señalar sobre este sistema de máquinas, es unicamente para mostrar que el empleo de las expansiones en cascadas conviene para reducir el enfriamiento al condensador.

IV.—CAMBIOS DE CALOR AL TRAVES DE LAS PAREDES DE LA CAJA DE DISTRIBUCIÓN.

Se consigue atenuarlos separando los órganos de admisión de los de emisión,

Esto es muy bueno para obtener una máquina económica.

Pero se empleará dos distribuidores para la admisión y dos para la descarga.

Se puede así obtener independencia completa entre la regularización para la admisión y para la emisión.

Esta separación de los órganos distribuidores es menos importante para las máquinas Compound y de triple expansión que para las máquinas mono-cilíndricas.

EN FIN: V.—PÉRDIDAS POR IRRADIACIÓN

Se envolverá con materias malas conductoras del calor todas las paredes de los órganos que conducen el vapor, así mismo como los cilindros.

CÁLCULO DE LAS MÁQUINAS DE MÚLTIPLE EXPANSIÓN.

Vamos á indicar la manera rápida de calcular una máquina á vapor, y tomaremos como ejemplo una máquina marina de doble expansión, para un buque de hélice, es decir del sistema Compound con receptor intermediario.

El principio sobre el cual se basa la construcción de estas máquinas es el siguiente;

«El vapor á alta presión ($4\frac{1}{2}$ a $6\frac{1}{2}$ atm.) después de haber
« operado sobre el pistón de un cilindro de pequeño diámetro,

«pasa al receptor que lo rodea para esparcirse en un cilindro de mayor diámetro y ser transformado en seguida en agua de alimentación.»

Se comienza por calcular el gran cilindro como si el pequeño no existiese.

Se le calcula como el cilindro de una máquina mono-cilíndrica debiendo esta desarrollar el mismo trabajo con la presión inicial y expansión total de la máquina Compound.

En cuanto al pequeño cilindro se calculará colocándose en las mejores condiciones posibles para obtener las más pequeñas caídas de presiones y de temperaturas.

Pero generalmente se trata de obtener igualdad de presiones ó sea igualdad de trabajos sobre los dos pistones, este es el caso que se adopta para las máquinas de buques de hélice.

Ó bien, obtener igualdad de los esfuerzos iniciales sobre los dos pistones, caso de las máquinas de vapores de ruedas.

En cuanto á desear obtener igualdad de caídas de presiones o caídas de temperaturas, eso no constituye sino una especulación teórica.

Pero el ideal sería naturalmente tratar de obtener estas tres condiciones al mismo tiempo.

Aunque difícil, se debe hacer lo posible para realizarlo.

Adoptando, pues, una de esas condiciones señaladas se construirán los mismos órganos para las dos máquinas, puesto que estos se encontrarán sometidos á los mismos esfuerzos, es decir tendremos la misma barra para los pistones, la misma biela, etc.

Por consiguiente, economía de trabajo en la construcción de la máquina y gran regularidad en los movimientos.

Este es debido á que en las máquinas Compound las manivelas están caladas á 90°.

Sin embargo, no es este calado el que constituye el carácter distintivo de esta máquina, sino el receptor intermediario, que se ha introducido para obtener el calado á 90°.

Este no es solo el objeto del receptor, sino que su objeto principal, dándole un volúmen suficientemente grande, es de poder regularizar libremente la presión media que domina, modificando el tiempo que dura la admisión en el cilindro grande.

El peso de vapor gastado por carrera penetra en este cilindro con un volúmen tanto más pequeño, y por consiguiente, con una presión tanto más elevada, cuanto que el tiempo de la admisión es más reducido, y se puede sin modificar notablemente el trabajo desarrollado por la máquina, regularizar y, sobre todo, igualar los esfuerzos totales á los cuales los pistones están sometidos al principio de cada carrera.

El arreglo de la distribución del cilindro grande exige que sea hecho con precaución por el ingeniero.

El maquinista no debe jamás modificarlo sin el consentimiento de aquel.

Un arreglo defectuoso podría, en efecto, determinar sobre los órganos del mecanismo, una distribución peligrosa de los esfuerzos, la cual podría ocasionar la fractura de ciertas piezas ó al menos calentar los guías y los *turillones*.

Supongamos que los datos que se nos han impuesto para la construcción de una máquina sean los siguientes:

Máquina Compound de 250 caballos indicados para buque de hélice:

Condensación por superficie.

Presión absoluta en las calderas 6 atmósferas.

Grado de expansión total (normal) 1: 10.

Número de evoluciones por minuto 90.

Velocidad mediana de los pistones 1^m 75 por segundo.

—De estos datos determinamos la carrera común de los pistones, por medio de la relación siguiente que existe entre la carrera y la velocidad:

$$V = \frac{2 N C}{60} = \frac{N C}{30}$$

En la cual $\begin{cases} V = 1^m 75, & C = \text{la carrera.} \\ N = 90 \end{cases}$

y reemplazando obtenemos $C = 0^m.585$

CÁLCULO DE LOS CILINDROS.

Debemos trazar el diagrama de la máquina de un cilindro fig. (5), y el diámetro del gran cilindro de la máquina Compound será pues el mismo que el que se obtiene en el caso de la máquina de un solo cilindro, trabajando ésta en las mismas condiciones que aquélla, como ya lo hemos dicho mas arriba.

Sea V_0 , volúmen enjendrado durante la admisión.

V " " en una carrera de pistón.

p_0 presión inicial y

p_1 contra presión.

El trabajo de la máquina es proporcional al área O A B C F O.

Tenemos pues 3 trabajos que avaluar:

1.º El trabajo durante la admisión, $+T_0$, representado por el área O A B G.

2.º El trabajo durante la expansión, $+T_1$, representado por el área B C F G.

3.º El trabajo durante la contra presión— T_2 , representado por el área D E F O.

El trabajo total será pues:

$$T_i = T_0 + T_1 - T_2$$

Esto es el trabajo indicado.

El grado de expansión es $n = \frac{V}{V_0}$

Suponemos que la expansión sigue la ley de Mariotte, es la hipótesis que tenemos que hacer para avaluar el trabajo durante la expansión.

Y llegamos así al resultado siguiente como expresión del trabajo total.

$$T_1 = 10,000 p_0 \frac{V}{n} \left(1 + \log \text{hyp. } n - \frac{p_{1n}}{p_0} \right) \text{ trabajo en kgm. por carrera.}$$

Pero si en lugar de considerar el volúmen engendrado por el piston en una carrera, consideramos el volúmen V' engendrado en un segundo i si dividimos por 75 para obtener el trabajo en caballos vapor, tendremos finalmente:

$$T_1 = 133.3 + p_0 + \frac{V'}{n} \left(1 \times \log \text{hyp. } n - \frac{p_{1n}}{p_0} \right)$$

Pero se nos ha impuesto que el trabajo indicado de la máquina tiene que ser de 250 caballos, y reemplazando las demas letras por sus valores, i adoptando para la contra presión un valor que es generalmente $p_1 = 0.20K p.c_2$ encontraremos:

$$250 = 799.8 \frac{V'}{10} \left(3.30258 - \frac{1}{3} \right)$$

i en fin

$$V' = 1^{m^3}, 053075 \text{ volúmen enjendrado en 1 segundo.}$$

Dividiendo este volúmen por la velocidad recorrida por el pistón en un segundo, obtendremos una superficie,

$$\text{es decir } S = \frac{V'}{v}$$

$$\text{o sea } S = 9^{m^2}, 6017$$

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

$$\text{i obtenemos finalmente } D = 875^{m}/_{m}$$

este es, el diámetro del gran cilindro.

DIÁMETRO DEL PEQUEÑO CILINDRO.

En el cálculo de una máquina, en jeneral, la manera mas recomendable para llegar á un buen resultado es proceder por el sistema de comparación.

Así para el caso que nos ocupa, se busca la relación, en una máquina semejante á la que deseamos construir, y que trabaje en las mismas condiciones, que existe entre los volúmenes de los cilindros.

En máquinas marinas, de este sistema considerado, y funcionando en las mejores condiciones hemos encontrado que la relación entre los volúmenes de los cilindros era de 2,62.

Adoptando esta relación veamos á que resultado nos conduce para el diámetro de nuestro pequeño cilindro.

Llamemos V_1 el vol. del pequeño cilindro

V vol. del grande,

$$\text{y tendremos } \frac{V_1}{V} = \frac{1}{2,62}$$

Teniendo la misma carrera los dos cilindros, podemos escribir.

$$\frac{S_1}{S} = \frac{1}{2,62} \quad \text{ó bien} \quad \frac{\pi d^2}{4} = \frac{1}{2,62} \frac{\pi D^2}{4}$$

$$\text{de lo cual } \frac{d^2}{D^2} = \frac{1}{2,62} \quad \text{y } d = \frac{D}{\sqrt{2,62}} = 0,62 D$$

Pero hemos encontrado $D=875^{\text{m}}/\text{m}$ por consiguiente $d=542^{\text{m}}/\text{m}$.

Pero generalmente en los talleres de construccion se adopta como diámetro del pequeño cilindro los 0,6 del grande.

Entonces $r = 2,78$, esto corresponde á un grado de expansión igual a 8, y lo que exige una admisión de $\frac{1}{3}$ en el pequeño cilindro.

Son pues reglas de precisión que la experiencia ha encontrado despues de reconocer que unas 6 atm. como presión absoluta de las calderas era lo mas conveniente para esta clase de máquinas, asimismo que una expansión total de 8 á 10 convenía bien.

Además el exámen de un gran número de diagramas, sacados de máquinas marinas, y construidas en estas condiciones, han permitido de constatar que los trabajos sobre los pistones son muy sensiblemente iguales, la presión en los calderos siendo de 5 á 6 atmósferas.

Por lo tanto adoptaremos esta regla, y entonces

$$d = 0,6 \times 875 = 525^{\text{m}}/\text{m}$$

será el diámetro del pequeño cilindro.

RELACIÓN ENTRE LOS VOLÚMENES DE LOS CILINDROS.

Volúmen del gran cilindro es $V = SC$
remplazando las letras por sus valores encontramos

$$V = 0^{\text{mc}},351994$$

Vol. del pequeño cilindro $V_1 = S_1 C$

$$\text{pero } S = \frac{\pi d^2}{4} = 0,^{\text{mq}}216365$$

$$\text{y entonces } V_1 = 0,^{\text{mc}}126573$$

$$\text{y enfin } r = \frac{V}{V_1} = 2,78$$

evidentemente.

Habiendo determinado de esta manera el diámetro de cada uno de los cilindros, debemos calcular el diagrama probable, es decir el diagrama que nos daría la máquina si ya estuviese terminada.

El exámen atento de este diagrama, trazado en las condiciones que nos imponemos, es decir de obtener igualdad de trabajo sobre los dos pistones, nos mostrará si los volúmenes obtenidos por el cálculo son convenientes.

Ademas este diagrama totalizado de los dos cilindros, puesto que debemos reducir el volumen de cada uno de los cilindros á una misma superficie de pistón, nos servirá para calcular los órganos de la máquina.

Tracemos pues el diagrama de la máquina mono-cilíndrica, fig. (6).

Sea:

p_0 , presión inicial, $p_0 = 6 \text{ Kp.c}^2$.

p_1 , presión al fin de la expansión en el P. C.

p_2 , presión en el receptor intermediario.

p_3 , presión á la entrada en el G. C.

p_4 , contra presión en el G. C.

V_0 , volumen de introducción en el P. C.

V_1 , volúmenes del P. C.

V'_0 , vol. de introducción en el G. C.

V , vol. del G. C.

δ , grado de expansión parcial del P. C.

δ' , " " " " " G. C.

r , relación entre los volúmenes de los cilindros.

S , superficie del pequeño pistón.

S' , " " gran "

Hemos supuesto más grande el volumen de introducción en el gran cilindro que el volumen que ocupa el vapor en el pequeño cilindro al fin de la expansión.

Esto es á causa que existe una caída de presión del pequeño cilindro al receptor intermediario i de este al gran cilindro.

Si se constata que la caída de presión es mui considerable, se podrá reglar experimentalmente la admisión en el gran cilindro, de manera que esto no tenga lugar.

Esto es ya una ventaja de adoptar un receptor.

—Según la ley de Mariotte tenemos:

$$p_0 V_0 = p_1 V_1$$

$$\text{entonces } p_1 = p_0 \frac{V_0}{V_1}$$

$$\text{pero } \frac{V_0}{V_1} = \frac{1}{\delta}$$

$$\text{i } p_1 = \frac{p_0}{\delta} = \frac{6}{\delta}$$

Pero el grado de expansión total es $n = r\delta$.

En efecto, n siendo el grado de expansión, que es igual á la relación del volúmen final del vapor (gran cilindro) al volúmen inicial V_0 ocupado al fin de la admisión, tendremos:

$$n = \frac{V}{V_0} \quad \text{pero } V = V_1 r$$

$$\text{así pues } n = r \frac{V_1}{V_0}$$

El grado de expansión parcial en el P. C. es $\frac{V_1}{V_0} = \delta$

y en fin $n = r\delta$.

$$\text{de lo cual } \delta = \frac{n}{r} = \frac{10}{2,78} = 3,60$$

$$\text{por consiguiente } p_1 = \frac{6}{3,60} = 1^k,66$$

En cuanto á p_4 , la contra presión es muy exacto tomarla

$$p_4 = 0,2 \text{ k pc}^2.$$

V'_0 es el volumen de introducción en el G. C.

Podemos adoptar por razones prácticas $V'_0 = 1,2 V_0 \delta$

$$\text{pero } V_1 = V_0 \delta.$$

Así pues $V'_0 = 1,2 V_1 = 1,2 \times 0,^{mc} 12657$

$$\text{ó bien } V'_0 = 0^{mo} 151884.$$

Se puede escribir una relación entre δ y δ' ,

$$\text{es decir } \delta' = \frac{V}{1,2 \delta V_0} = \frac{V}{V_0} = 2,31.$$

Este es el grado de expansión del G. C.

Entre p_2 y p_3 se tiene en término medio

$$p_2 = p_3 + 0,2 \text{ kp. c}^2.$$

$$\text{y de lo cual } p_3 = p_2 - 0,2.$$

Calculemos p_2 .

Sea S la superficie del pequeño pistón, tenemos:

$$S = (p_0 - p_2) \frac{1}{\delta} + \frac{p_0}{\delta} \log \text{hyp. } \delta$$

$$\text{ó bien } S = \frac{p_0}{\delta} (1 + \log \text{hyp. } \delta) - p_2$$

Sea S' la superficie del gran pistón,

$$S' = p_3 \frac{r}{\delta} + p_3 \frac{r}{\delta} \log \text{hyp. } \delta' - p_4 r$$

$$\text{ó bien } S' = \frac{r}{\delta} (p_2 - 0,2) (1 + \log \text{hyp. } \delta') - p_4 r.$$

Así se calculan las superficies en función de las presiones y de las condiciones del trabajo del vapor.

Nos hemos impuesto de obtener igualdad de trabajo sobre los pistones, por consiguiente debemos igualar las dos superficies, es decir, hacer $S=S'$.

ó sea

$$\frac{p_0}{\delta}(1 + \log \text{hyp. } \delta) - p_2 = \frac{r}{\delta}(p_2 - 0,2)(1 + \log \text{hyp. } \delta') - p_4 r.$$

ó bien transformando la ecuación para obtener p_2 , tendremos:

$$p_2 \left(1 + \frac{r}{\delta} + \frac{r}{\delta} \log \text{hyp. } \delta'\right) = \frac{p_0}{\delta}(1 + \log \text{hyp. } \delta) + p_4 r + 0,2 \frac{r}{\delta} (1 + \log \text{hyp. } \delta').$$

Se reemplazarán las letras por sus valores y se obtendrá finalmente $p_2 = 1,5 \text{ kpc}^2$.

$$\text{entonces } p_3 = p_2 - 0,20 = 1,50 - 0,20$$

$$\text{ó bien } p_3 = 1 \text{ k, } 30 \text{ p.c}^2.$$

Todas estas presiones y volúmenes habiendo sido determinados, podemos entonces construir el diagrama probable, teniendo cuenta de los espacios muertos y comprensiones de cada cilindro, y se podrá examinar si presenta un aspecto conveniente.

En seguida, habiendo obtenido este diagrama, se calculará muy fácilmente los esfuerzos iniciales en kilogramos sobre cada uno de los pistones.

Se toma el término medio entre los dos y tendremos el esfuerzo inicial, total que servirá para calcular la barra de los pistones, el árbol motor que manda á la hélice, i todos los órganos de la máquina sometidos á este esfuerzo.

Se deberá en seguida completar el diagrama teniendo cuenta de la compresión en cada uno de los cilindros.

PROPIEDADES DE LAS MÁQUINAS COMPOUND

1.^a Aquí no es preciso calar las manivelas á 0° ó á 180°, es decir, hacer de manera que los pistones lleguen al mismo tiempo á las extremidades de las carreras, como en la máquina Woolf, etc.

Se puede adoptar un calado cualquiera y el vapor del pequeño cilindro esperará en el receptor antes de pasar al grande.

Segunda propiedad.—Es permitir sin efectuar trastorno en la potencia desarrollada hacer variar en una cierta medida el grado de admisión en el gran cilindro.

Es preciso que el receptor intermediario tenga el mayor volumen posible, más ó menos dos veces el volumen del pequeño cilindro.

El receptor tiene que estar dotado de una disposición tal que el vapor pueda penetrar en éste al momento de poner la máquina en acción.

Además, es prudente colocarle una válvula de seguridad, de suerte que la presión al principio no llegue á un valor muy elevado.

Mientras más grande será el receptor, mayor será la superficie sometida á la irradiación, y puede haber una caída de temperatura de un cilindro al otro.

Es menester, pues, envolver el receptor con materias malas conductoras del calor.

Ciertos constructores recalientan aún este receptor, pero la experiencia ha probado, sin embargo, que no es muy ventajoso recalentarlo.

En la disposición de las máquinas Compound, es lo más general calar las dos manivelas en ángulo recto.

Cuando se adopta esta disposición, hay dos variantes que se pueden admitir.

Es decir, colocar adelante la manivela del pequeño cilindro y atrás la del grande, (figura 7) ó bien lo contrario.

Pero generalmente el pequeño cilindro colocado adelante es el que conduce al mejor resultado.

Otra disposición muy cómoda es la que llaman en «Tandem» (figura 8).

Los dos cilindros están á continuación el uno del otro. Esta disposición es naturalmente la más económica. Se encuentra únicamente en los motores industriales.

Las máquinas Compound pueden comportar más de dos cilindros.

Existen cruceros de la marina francesa con máquinas de este sistema que poseen ocho cilindros.

El acorazado *Italia* tiene doce.

MÁQUINAS DE TRIPLE Y CUADRUPLE EXPANSIÓN

Principios del funcionamiento.—En las máquinas de triple expansión, el vapor de las calderas es admitido en un primer cilindro, llamado cilindro de *alta presión*, en el cual la introducción tiene lugar durante un período que puede variar entre los 0.4 y 0.7 de la carrera del pistón.

De ahí el vapor pasa á un cilindro de mediana presión y cuyo volúmen es mayor que el del primer cilindro, y se esparce como en el gran cilindro de una máquina Compound ordinaria.

En seguida el vapor es enviado á un tercer cilindro de mayor capacidad, y llamado cilindro de *baja presión*, y en el cual se efectúa la expansión final.

Y en fin, de éste el vapor pasa al condensador.

Si hubiera cuatro cilindros, es decir, si se tratase de una máquina de cuádruple expansión, el vapor que sale del tercer cilindro seguiría tomando expansión en un cuarto cilindro.

El número de cilindros no es forzosamente igual al número de cascadas, así hay máquinas de triple expansión que tienen cuatro cilindros, el vapor se esparce simultáneamente en los dos últimos.

Algunas de estas máquinas tienen cinco cilindros: dos de alta presión, uno de mediana presión y dos de baja presión.

En fin, se encuentran también de seis cilindros. El número de éstos puede ser variable, pero el principio del funcionamiento es siempre el mismo.

En cuanto al número de manivelas, tampoco depende invariablemente del número de cilindros.

El pequeño cilindro puede ser colocado en tandem, entonces no habrá sino dos manivelas (figura 9).

Esta disposición se encuentra cuando se ha transformado máquinas del sistema Compound en máquinas de triple expansión, añadiendo pues, un cilindro más.

Las máquinas de triple expansión de un transatlántico francés, la *Gascogne* aunque son de seis cilindros, no tienen sino 3 manivelas.

Son tres grupos de dos cilindros cada uno.

En fin, la disposición más generalmente adoptada, cuando en una máquina de triple expansión se emplean tres cilindros, es colocarlos uno al lado del otro, atacando tres manivelas con calaje de 120° . Es el ángulo más favorable (figura 10 y figura 10 a).

Esta cuestión sobre el calaje de las manivelas no es indiferente bajo el punto de vista de las variaciones de los esfuerzos tangenciales, es decir, de las variaciones de las parejas de rotación.

Resultará que los frotamientos serán mucho menos considerables, y se obtiene un mayor rendimiento mecánico.

La seguridad de la línea de árbol es más grande y la rotación se efectúa con más regularidad.

Las máquinas de triple expansión con tres manivelas satisfacen estas condiciones al más alto grado.

Lo mismo que decir para el caso de máquinas de cuádruple expansión. La disposición más simple es emplear cuatro cilindros y dos manivelas con calado de 90° (figura 11).

Habrà un cilindro de alta presión, dos de mediana presión y uno de baja presión.

La máquina se llamará «Tandem á cuádruple expansión». En fin, existen máquinas de esta clase que tienen ó sea cinco cilindros ó sea seis cilindros, y en cada uno de estos casos no tienen sino tres manivelas.

Cuando un buque posee dos hélices, entonces cada árbol es mandado por una máquina independiente la una de la otra.

Generalmente en este caso las máquinas son de triple expansión y cada uno de los tres cilindros ataca un número igual de manivelas.

• Es la disposición más ventajosa.

Una disposición semejante á la que acabamos de indicar ha sido adoptada en un acorazado chileno, que pronto será el rey de la armada nacional.

Puesto que ya hablamos de buques dotados de dos hélices, indiquemos en unas cuantas palabras las ventajas del doble propulsor.

1.º Seguridad casi absoluta bajo el punto de vista de las averías de las máquinas.

2.º Facilidad más grande de evolucionar rápidamente y posibilidad de evitar más fácilmente una avería en el timón.

3.º Reducción posible de los mástiles, de lo cual se obtiene una superficie menos expuesta á la resistencia del aire, y una disminución notable de la fatiga del buque en caso de mar grueso.

4.º División de la potencia, que es considerable, en dos máquinas, lo que evita las dificultades de construcción de las piezas grandes y los peligros que ofrecen la poca experiencia que se posee sobre la manera como ellas se conducen.

CÁLCULO DE LAS MÁQUINAS DE TRIPLE EXPANSIÓN

El cilindro grande de una máquina de triple expansión se calculará como el cilindro de la máquina mono-cilíndrica, funcionando en las mismas condiciones de vapor, de expansión total y de contra presión que la máquina de triple expansión.

Hay que tener en cuenta que los frotamientos son aquí más grandes.

Se trazará pues el diagrama probable totalizado de la máquina mono-cilíndrica, tratando de obtener igualdad de trabajos sobre cada uno de los pistones é igualar también tanto como sea posible las diferencias de temperaturas en los distintos cilindros.

Este diagrama se trazará adoptando las admisiones más convenientes y presión inicial correspondientes á la máquina considerada.

Se dividirá el diagrama en tantas porciones de áreas equivalentes é iguales al número de cilindros, por medio de horizon-

tales que se cuentan desde el eje de las presiones hasta la curva de expansión.

Estas horizontales se obtienen fácilmente por el cálculo ó por el planímetro, y se verificará en seguida si se obtiene de esta manera una repartición igual de la potencia.

La última horizontal comprendida entre el eje de las presiones y la ordenada de la presión final, será proporcional al volumen del gran C.

Estando calculado el diagrama del cilindro grande se ha visto llegar á muy buenos resultados para la igual repartición de los trabajos, tomando para el diámetro del cilindro mediano los 0,6 del grande, y para el cilindro pequeño los 0,6 del mediano.

Siendo el grado de expansión total y la presión absoluta de las calderas, lo que corresponde á la máquina de triple expansión.

CONSIDERACIONES SOBRE LAS MÁQUINAS DE MÚLTIPLE EXPANSIÓN.

Representemos por A el rendimiento térmico de una máquina á vapor.

t , temperatura del vapor á la entrada en el cilindro.

t_0 , temperatura final, que es la del condensador.

El rendimiento de una máquina es tanto más grande cuanto las diferencias de las temperaturas extremas son tanto más elevadas.

Por consiguiente, A es proporcional a $t - t_0$ y podemos escribir $A = t - t_0$.

Para aumentar A debiéramos disminuir t_0 , pero t_0 es más ó menos igual en todas las máquinas bien construidas, por consiguiente debemos aumentar t , lo más que se pueda, ó lo que equivale á lo mismo, aumentar la presión absoluta de las calderas.

Pero a la presión inicial que conviene más emplear en las máquinas de triple expansión le corresponde un grado de ex-

pansión determinada que adoptándolo, conducirá á la máquina más económica.

En una máquina Compound el rendimiento término será más grande que en una mono-cilíndrica, y en la de triple expansión mayor que en la Compound, la razón es, pues, que la máquina de tres cilindros utilizará en mucho mejores condiciones el poder calorífico del vapor, visto que este antes de llegar al condensador ha sido obligado á trabajar en tres cilindros, entonces la máquina ha aprovechado durante un tiempo más largo el calor del vapor que si hubiese pasado inmediatamente de un cilindro al condensador.

Por la misma razón la máquina de cuádruple expansión es más ventajosa y más económica que la de triple expansión.

En fin si se adoptase la quintuple y sextuple expansión, puesto que en estas aumentaríamos todavía la presión inicial, mejor se utilizaría la potencia calorífica del vapor, pero la complicación mecánica que resultaría en la máquina de sextuple expansión sería muy considerable y esto hace que hasta ahora no hayan sido adoptadas.

Las máquinas de triple expansión tienen otra ventaja que consiste en la disminución de la influencia de las paredes.

El vapor condensado en el cilindro pequeño opera, después de su reevaporación, en el cilindro de mediana presión durante toda la carrera, y el que se condensa en este operará a su turno en el tercer cilindro, con una expansión que le es propia, puesto que la introducción está limitada á una fracción de la carrera.

En una máquina de un cilindro esto no puede suceder.

No es preciso atribuir una importancia excesiva á las caídas de presiones en los receptores, vale mas tratar de descuidar la influencia i asegurar la repartición más igual de potencia que sea posible.

Estas caídas de presiones no constituyen en efecto sino una

pérdida relativa en la superficie del diagrama, y no trate ningún desperdicio de calor.

Hay solamente una transformación de energía, la disminución de presión poniendo en libertad un cierto número de calorías que son empleadas en reevaporar el agua que proviene de la condensación del vapor en el cilindro precedente ó en el receptor considerado.

Tracemos el diagrama teórico de la máquina de triple expansión, (fig. 12).

Si se trata de utilizar la mayor superficie posible del diagrama teórico, entonces sería preciso efectuar una admisión muy pequeña en el cilindro de alta presión, lo que conduciría a caídas de temperaturas muy considerables y sobre todo en el cilindro grande, y además no se llegaría tan fácilmente á una igual repartición de los trabajos.

En fin, á pesar de todo se dirá que no existe una regla precisa para determinar la relación entre los volúmenes de los cilindros y que estos varían en gran parte segun las apreciaciones de los ingenieros.

Examinando un gran número de máquinas marinas se nota que para las máquinas de los buques de guerra la relación entre los volúmenes de los cilindros es más pequeña que para las máquinas de los trasportes y buques del comercio.

Se sacrifica, en efecto, en los primeros, una pequeña parte de la economía debida á una gran expansión, á la ventaja que presentan un peso y un espacio reducido.

Así, pues, en la elección de la relación total de los cilindros, no nos debe seducir el deseo de aumentar el grado de expansión, sacrificando las consideraciones de un orden mas práctico, como son el peso y el espacio disponible, que debemos tomar siempre en consideración.

Del mismo modo, para el funcionamiento normal, no se debe tratar de fijar las introducciones en el cilindro p en menos de

0,6 y de 0,7 según que se trate de máquinas de triple ó cuádruple expansión, por las razones expuestas más arriba.

COMPAREMOS LAS MÁQUINAS MONO-CILÍNDRICAS, COMPOUND Y DE TRIPLE EXPANSIÓN

Si se basa el consumo de vapor por caballo indicado, las máquinas mono-cilíndricas pueden consumir $7\frac{1}{2}$ á 8 kilogramos por caballo indicado y por hora.

Las buenas máquinas Compound $6\frac{1}{2}$ á 7 kilogramos.

Las máquinas de triple expansión $5\frac{1}{2}$ á 6 kilogramos, pero en el caso de ser bien contruídos.

Hemos hecho experiencias en máquinas de triple expansión y hemos encontrado que consumían solamente 5^k,525 por caballo indicado y por hora.

Si comparamos con el número de caballos-útiles, lo que es la verdadera medida de los motores industriales, se encuentra en este caso que las diferencias son menores que en nuestra comparación precedente.

Si ahora hacemos intervenir en el precio del caballo vapor los gastos de amortización é intereses, se encuentra que la ventaja de las máquinas de varios cilindros disminuye, puesto que cuestan más caro.

Sin embargo, la ventaja está en preferir las máquinas Compound á las máquinas mono-cilíndricas.

En cuanto á la {máquina de triple expansión no se generalizará como máquina fija para la industria, no pensamos que pueda ser ventajosa, nada más para la marina.

La influencia de los espacios muertos y la importancia de los cambios de calor al traves de las paredes son tanto menores cuando la expansión está fraccionada en un mayor número de cilindros.

Resulta, pues, que la separación de los órganos de admisión y de descarga y el empleo de cuatro órganos distribuidores que es indispensable para las máquinas mono-cilíndricas es mucho menos importante que cuando se trata de máquinas de doble y de triple expansión.

Las máquinas de doble y de triple expansión tienen distribuidores muy simples, algunas veces un simple cajón, mientras tanto en la máquina mono-cilíndrica la distribución puede ser complicada y costar mucho.

La ventaja es, pues, que con estos distribuidores tan simples que usan las máquinas de múltiple expansión se puede obtener una grande expansión en los cilindros.

Sin embargo, para el cilindro pequeño se usa generalmente la distribución por pistón, á causa que la presión es elevada en este cilindro.

Pero para los otros dos se adopta, como distribuidores, cajones de doble orificio del sistema Trick.

Otra ventaja de las máquinas Compound es que cuando las manivelas están caladas en ángulo recto, la variación de las parejas de rotación es mucho menor, por consiguiente, es necesario un volante menos pesado que para las máquinas mono-cilíndricas.

Esto en el caso de motores industriales.

En las máquinas marinas particularmente, lo que importa mucho es reducir tanto como sea posible, los esfuerzos iniciales sobre los árboles, á fin de disminuir las probabilidades de fractura, los frotamientos de los *turillones* en sus coginetes y regularizar la rotación.

Las máquinas Compound ofrecen bajo este punto de vista una gran superioridad sobre las máquinas ordinarias.

Las máquinas de triple y cuádruple expansión, satisfacen mejor todavía estas condiciones.

Existen objeciones serias que hacer á las máquinas Com-

pound, que á pesar de los resultados ya vistos, pudiera conducir á excluirlas.

Hay lo que llaman la pereza de regularización, es decir que la máquina obedece menos ligero que el regulador.

En segundo lugar, en el caso que se quiera obtener una gran regularidad, y que se prevee á cada instante resistencias, las máquinas mono-cilíndricas son preferibles á las Compound.

Eso todavía en el caso de motores industriales.

El trabajo mayor que se puede obtener en una máquina Compound es el que corresponde á la mayor admisión en el cilindro pequeño.

Mientras tanto en la máquina de un cilindro se podría si se quisiera mandar una admisión de toda la carrera.

Las máquinas Compound no tienen esta gran elasticidad de potencia.

En las locomotoras en las cuales esta gran elasticidad es necesaria se ha obtenido buenos resultados poniendo los dos cilindros independientes.

Se manda vapor, al momento de ponerse en marcha, en los dos cilindros, y luego después la máquina funciona en Compound.

Esto no es sino un artificio.

En general no es preciso apasionarse por ninguno de estos sistemas, es menester escoger lo que conviene.

CONCLUSIONES.

Las máquinas de triple expansión se han jeneralizado tanto en la marina de guerra como en la mercante.

La economía de carbón que resulta de su adopción se encuentra utilizada en el primer caso para aumentar sea la potencia, sea el radio de acción, algunas veces las dos á la vez.

En el segundo caso es más precioso aún, puesto que el peso del combustible que es necesario trasportar se encuentra reduci-

do en mucho, y de esta manera se aprovechará para utilizar una parte del tonelaje del buque para recibir mayor mercaderías.

Podemos también decir que sin el empleo de las máquinas de expansión en cascadas hubiese sido imposible realizar en estas las potencias considerables á que se ha llegado.

Ni construir transatlánticos tales como los ingleses que llevan los nombres de «City of Paris» y de «City of New-York» que siendo de 170 metros de largo, 19^m.25 de ancho, poseen máquinas que pueden desarrollar 18,000 caballos de fuerza, imprimiendo al buque una velocidad de 19,5 nudos por hora.

Citaremos por curiosidad los dos buques más grandes que son muy justamente considerados como los reyes del océano, el *Magestic* y el *Teutonic*, los cuales tienen 175 metros de largo, ancho 17,^m40.

Las máquinas desarrollan 17,000 caballos vapor y su velocidad es de 19,5 nudos por hora.

Los calderos necesarios para alimentar estas máquinas son menos voluminosas y más resistentes de lo que se hubiera podido imaginar para construir hace algunos años.

Y sin que el peso del carbón necesario para un viaje dado sea exajerado.

Ahora no hay dificultades bajo el punto de vista del utillaje mecánico para construir los grandes órganos que emplean máquinas tan poderosas, y gracias á los conocimientos prácticos se han vencido todas las dificultades que sobrevenían al principio por el empleo de las altas presiones.

El uso de las presiones de 10 á 15 atmósferas con calderas tubulares ordinarias es de una aplicación corriente y práctica.

Como se debe buscar un término medio que concilie la teoría con la práctica para encontrar el motor más económico funcionando á alta presión con su número correspondiente de cascadas, se ha encontrado que ese motor es la máquina de triple expansión.

En cuanto á las máquinas de cuádruple expansión, parecen convenientes cuando se desea obtener antes de todo una gran economía de carbón.

Esto parece mostrar por qué esta máquina se ha propagado tan lentamente en la marina militar, desde que la economía de carbón es de importancia secundaria.

En fin; se puede decir que la generalización de las máquinas de múltiple expansión en la marina constituye uno de los más grandes progresos acontecidos en el último cuarto de este siglo.

EL TIRAJE FORZADO EN LA MARINA.

Expliquemos primeramente cual es su objeto principal, y lo que se desea obtener con esto.

Si para alimentar un motor de N caballos de fuerza es necesario emplear una caldera teniendo X metros cuadrados de superficie de calentamiento con tiraje natural, ahora bien, empleando el tiraje forzado, la caldera podrá producir la misma cantidad de vapor con una superficie de calentamiento más pequeño que X .

De lo cual resulta, pues, que tendremos una caldera cuyas dimensiones y peso son inferiores á la del primer caso, y si se adopta el tiraje forzado en un buque de comercio, tendremos la ventaja de emplear una parte más grande del tonelaje de éste para conducir mercaderías.

Por esto ya vemos que el tiraje forzado es más importante adoptarlo en los buques trasportes que en los buques de guerra.

En estos últimos, la ventaja equivaldría á obtener una producción más abundante de vapor, gastando menos carbón, puesto que el tiraje forzado quema todos los residuos de combustibles que se pierden con el tiraje natural.

Todo esto es verdadero hasta ciertos límites, puesto que si el tiraje forzado es conducido con mucha actividad, los gases se

escaparán a la chimenea mui calientes aún y los tubos de la caldera no podrán aprovechar del calor de los gases, y el rendimiento en lugar de aumentar disminuye.

Otra consideración que podemos hacer en favor del tiraje forzado, es que se puede, en este caso, emplear un combustible de calidad bastante inferior y de un precio bajo.

Consideración que en muchos casos no es nada despreciable.

Además, la actividad del fuego se puede conducir al grado que se desea, aumentando ó disminuyendo la cantidad de viento procurado por los ventiladores, y esta actividad será pues independiente del estado en que se encuentra el aire exterior y la dirección del viento.

Se han hecho muchas experiencias para saber de una manera exacta cuáles pueden ser los resultados á que conducen el empleo del tiraje forzado.

En estos últimos tiempos el almirantazgo inglés ordenó á varios ingenieros competentes que hiciesen experiencias sobre este objeto en los buques de la escuadra.

Y prescribió que la presión del aire en las cámaras de calentamiento no debía sobrepasar 12 á 13^m/m de agua. Esta prescripción se observó estrictamente, en cuanto que se ha reconocido que la presión del viento no debía ser mayor que la indicada en marcha normal; puede ser más elevada únicamente en casos excepcionales y por un corto período de tiempo.

Así por ejemplo, cuando el máximo de velocidad del buque, mantenida durante unas tres horas, presentaría ventajas mui importantes.

A pesar de todo, hay ingenieros que han sostenido que el tiraje forzado no debería ser empleado en ningún caso, ni en caso de guerra, á causa que la ventaja que se obtendría en aumentar la velocidad á un momento dado se contrabalancea por el peligro de poner las máquinas del buque fuera de servicio.

Si esto viniera á sucederle á un buque, por mui poderosos

que sean sus cañones, se le puede considerar en tiempo de guerra como irremediablemente perdido,

Sobre el empleo del tiraje forzado, se ha pretendido, pues, que el mal residía en la cerradura hermética de la cámara de calentamiento, el aire por la fuerza que posee al penetrar debajo de la parrilla gasta muy pronto los tubos de la caldera, el efecto a que dá lugar es de lo más dañoso.

Esta irrupción de aire fresco gasta también la plancha tubular del fondo de la caldera.

Se ha buscado entonces el modo de remediar á este inconveniente.

Y el remedio que se ha presentado es de establecer una capa de tierra refractaria en la plancha del fondo. Pero se ha tenido siempre mucha dificultad en fijar convenientemente esta capa de tierra.

Ya se ha comenzado una série de experiencias á este objeto.

En fin, se ha hecho observar que con el tiraje forzado se producían escapes de vapor en los tubos á la extremidad de la cámara de combustión, y que la causa de este defecto no es fácil determinarla.

Probablemente puede ser atribuída a la rigidez excesiva de la plancha tubular que impide seguir los tubos en los movimientos de dilatación y de contracción.

Dando menos espesor á la plancha tubular de adelante y empleando el cobre para la del fondo, se acercaría a las condiciones que realiza una locomotora y se remediaría quizás el mal.

Se ha criticado bastante el empleo del aire frío para activar el fuego, y se admite que el tiraje forzado puede ser únicamente económico cuando se usa de una manera moderada y calentando previamente el aire antes de mandarlo debajo de la parrilla.

Se calentará el aire comburante por medio de los gases perdidos que van á la chimenea.

También es menester que la cantidad de aire que se manda sea determinado en proporción del carbón que se consume.

Así se admite que se debe enviar al fogón, en peso, 20 kilogramos de aire por kilogramo de carbón.

Para esto se debe mantener sobre la parrilla un espesor constante de la capa de combustible y una presión invariable.

En los vapores del comercio no se adopta generalmente el sistema de recalentar el aire antes de enviarlo al fogón, se inyecta directamente bajo la parrilla, porque el recalentamiento necesita ciertos aparatos y resultan complicaciones que molestarían mucho para el servicio.

También en el caso de máquinas de gran velocidad, moviendo ellas mismas los ventiladores, pueden ser empleados únicamente en los buques de guerra, pero en los vapores del comercio son del mismo modo causa de grandes incomodidades.

En fin, á pesar de todo lo que se ha hecho hasta ahora podemos decir que quedan todavía muchos perfeccionamientos que realizar para que el empleo del tiraje forzado sea económico y prácticamente realizable.

Es lo que esperamos en un porvenir cercano.

En cuanto a lo que en fin deseamos es obtener sobre la parrilla una combustión tan completa como sea posible.

Tratar además de que esta combustión sea rápida sin tener que efectuar ningún cambio en el estado actual de las calderas que usan tiraje natural, y poder realizar todo esto sin procurar nuevas molestias á los fogoneros ni cansar demasiado los fogones ni las calderas.

Todo lo que venimos de decir sobre el tiraje forzado, se puede resumir de la manera siguiente:

Mas conveniente es emplearlo en los buques del comercio que en los buques de guerra, en estos primeros puede procurar una verdadera economía y permitirá quemar toda clase de combustible.

En los segundos es peligroso usarlo con frecuencia, lo aconsejaríamos solamente durante un corto espacio de tiempo y al momento de poner el fuego en las calderas si es urgente obtener inmediatamente la presión necesaria par poner las máquinas en acción.

Terminaremos este estudio indicando los deberes á los cuales se encuentran sometidos los mecánicos que manejan una máquina marina.

Todo buen mecánico debe ser ajustador, para poder corregir el mismo las irregularidades que se producen infaliblemente durante el viaje.

En los puertos después de una estadía prolongada debe hacer llenar la caldera abriendo por esta la llave de vidanje para la admisión del agua hasta que el nivel se establezca; en el caso que el buque se encuentra poco cargado, es natural que el agua en la caldera no puede subir más que hasta alcanzar el nivel de la rada.

Entonces se completa el nivel de la caldera por medio del caballo pequeño.

La altura del agua en el tubo no debe pasar sobre la marca que está trazada en el indicador, porque el agua dilatándose sube á medida que la vaporización se produce.

Es preciso tener cuidado de hacer salir el aire que está contenido en la caldera, sea levantando la válvula de seguridad ó abriendo las llaves del indicador.

Cuando el nivel ha llegado á la altura conveniente, ordena el cargamento y en seguida el alumbrado de los fuegos, teniendo cuidado de que no sea conducido con mucha actividad, por temor de provocar dilataciones desiguales muy bruscas.

Se asegura el mismo del nivel del agua, y de la indicación de la presión de los manómetros durante la vaporización.

Debe examinar si el indicador no está tapado abriendo las llaves y verificando las de medida, si las válvulas de seguridad están libres en sus cajas, y verificar según la necesidad la presión por la temperatura correspondiente.

Desde el momento que la presión del régimen ha sido obtenida y que todas las articulaciones han sido aceitadas, el condensador y el estanque revisados, abrirá un poco la válvula de inyección é introducirá vapor en los cilindros para hacer escapar el aire y el agua que contienen.

Esta salida se hace por las llaves y los tubos que desembocan en el condensador, y en el caso de gran cantidad de agua por las válvulas de seguridad. Cuando esta operación está terminada, las máquinas están listas para el viaje, á ménos que el condensador no esté muy recalentado por el vapor que ha servido para despejar de aire los cilindros, en tal caso se le enfria con el caballo pequeño ó por los medios de que se dispone.

Cuando se ordena poner la máquina en marcha no basta levantar, de la cantidad estrictamente necesaria, la válvula que aspira el agua del mar, sino que es menester abrir también la de descarga de la bomba de circulación y de la bomba de aire, y dar el golpe de vapor.

Si la máquina tiene dificultad para pasar el punto muerto, se hacen operar las llaves auxiliares y se observa la orden del puente.

Durante el viaje se debe vigilar:

- 1.º El nivel del agua;
- 2.º Los manómetros;
- 3.º El grado de saturación del agua en los calderos;
- 4.º Las extracciones de los depósitos que deja el agua;
- 5.º El grasamiento de todas las articulaciones;
- 6.º El vacío del condensador;
- 7.º El funcionamiento regular de todos los órganos;
- 8.º Vigilar las órdenes del puente.

A la llegada al puerto, después de haber limpiado el condensador con una solución de potasa, se debe asegurar de que todas las válvulas y llaves que se han usado, están bien cerradas, porque la negligencia á este respecto ha ocasionado vías de agua que casi han hecho hundirse el buque.

Se retiran todas las mechas de las crapodinas, se deja escapar el vapor de la caldera y se apagan gradualmente los fuegos para no provocar conmoción al interior del generador á causa de las contracciones bruscas.

Se procede á la verificación:

- 1.º De los pistones motores, para convencerse de que los pernos y golillas no tienen tendencia á aflojarse, que los resortes trabajan convenientemente;
- 2.º De los cajones de distribución;
- 3.º De las bombas y todos los detalles de estas;
- 4.º De los coginetes que han acusado un calentamiento;
- 5.º De la línea de árboles y de todas las articulaciones en general;
- 6.º De la posición exacta del último apoyo, el más cerca de la hélice;
- 7.º Del estado de perfecto ajuste de los tubos y planchas tubulares del condensador;
- 8.º Del estado de limpieza de la caldera, tanto al interior como del exterior;
- 9.º Del grado de limpieza de la quilla, porque la grasa que ataca el fierro, corroería á lo largo los fierros del apoyo de la máquina, y obstruiría los tubos de las bombas.

ENRIQUE LABATUT B.

Ingeniero Civil-Mecánico.

