

Fig. 4.6

- ① entrada del vapor.
- ② rotor.
- ③ carcasa.
- ④ escape.
- ⑤ toberas fijas.
- ⑥ álabes móviles.

vapor entra en la carcasa a una presión más baja que la que se hubiere obtenido con un único "escalonamiento RATEAU".

Además, en los "escalonamientos CURTIS" no se producen fugas de vapor por cuanto la presión es constante y baja.

En las "turbinas de reacción o turbinas PARSONS" (28) el vapor atraviesa primero un grupo de álabes fijos (el "estator o distribuidor") produciéndose una primera caída de presión y consecuentemente un aumento de la velocidad de circulación del vapor. Luego el vapor pasa a través de un grupo de álabes móviles (el "rotor"), donde se produce una nueva caída de presión y un aumento de la velocidad relativa. Es decir, en este tipo de turbina hay una importante caída de presión al pasar el vapor a través de los álabes del rotor, los que vienen así a actuar tanto como toberas que transforman la energía calorífica del vapor en energía cinética, como elementos para la transformación de la energía cinética del vapor en trabajo mecánico. En otras palabras, el espacio entre los álabes del rotor ya no es constante como en el caso de la "turbina de acción", sino que varía como en las toberas, disminuyendo la presión y aumentando la velocidad relativa del vapor en el sentido de la circulación.

El esquema de la Fig. 4.7 representa una "turbina PARSONS" con tres escalonamientos, donde se puede apreciar el descenso continuo de la presión del vapor tanto en los álabes fijos como en los álabes móviles.

(28) Sir Charles Algernon PARSONS (1854-1931), ingeniero inglés inventor de la turbina de vapor a reacción.

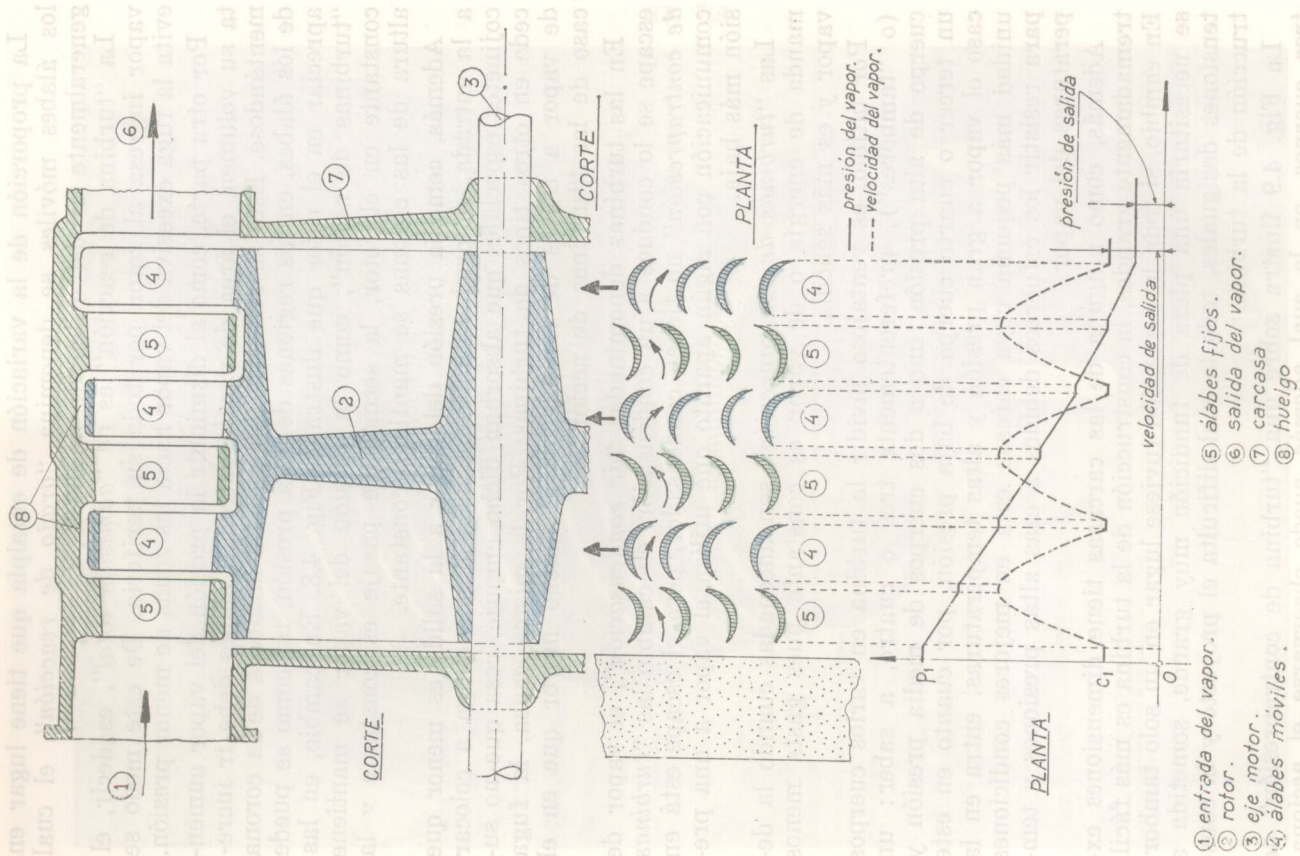


Fig. 4.7

- ① entrada del vapor.
- ② rotor.
- ③ eje motor.
- ④ álabes móviles.
- ⑤ álabes fijos.
- ⑥ salida del vapor.
- ⑦ carcasa.
- ⑧ hueigo.

La proporción de la variación de entalpía que tiene lugar en los álabes móviles se denomina "*grado de reacción*", el cual generalmente es del orden de un 50 %.

La "*turbina de reacción*" es de "*admisión total*", es decir, el vapor ingresa al rotor por toda su periferia. De este modo se evita la fuga excesiva del vapor hacia las zonas de menor presión.

Por otra parte, como al disminuir la presión del vapor aumenta su volumen, el área de pasaje entre los álabes debe ir incrementándose. Esto se resuelve aumentando la altura de la corona de los álabes, en las regiones de baja presión, tal como se puede apreciar en el rotor que ilustra la Fig. 4.8. En cambio, en las "*turbinas de acción*", como la presión del vapor se mantiene constante en el rotor, la sección de pasaje es constante y la altura de las coronas se mantiene constante.

Además, como la presión del vapor a la salida es menor que a la entrada, se produce un empuje axial que obliga a colocar cojinetes especiales que absorban dicho empuje, cosa que no sucede en otros tipos de turbinas. Por la misma causa, la fuga de vapor a través de los huelgos es mucho mayor que en el caso de las "*turbinas de acción*".

En las turbinas denominadas "*de condensación*", el vapor de escape se lo conduce a un condensador, en cambio las "*turbinas de contrapresión*" no tienen condensador, pero el escape está en comunicación con algún aparato que utiliza el vapor a una presión más baja.

Las "*turbinas de contrapresión*" son adecuadas cuando la demanda de energía o de vapor es constante pues gasta menos vapor y es más sencilla.

Por último, es ventajoso dividir la turbina en varios cuerpos (o "*tambores*"), preferentemente tres o cuatro, a saber: un cuerpo de alta presión, uno o dos cuerpos de media presión y un tercer o cuarto cuerpo de baja presión, por cuanto en este caso el vapor a gran presión y altas temperaturas, entra en la unidad más pequeña cuya carcasa está en mejores condiciones para resistir los esfuerzos debidos a esas altas presiones y temperaturas del vapor.

Además, como ninguna de las carcasas tiene dimensiones extremadamente grandes, la construcción de la turbina es más fácil. En cambio, si toda la expansión tuviese lugar en un solo tambor, se necesitaría una pieza de fundición muy grande, sometida a tensiones desiguales, todo lo cual dificulta el proyecto y la construcción de la turbina.

La Fig. 4.9 ilustra sobre una "*turbina de contrapresión*" de tres cuerpos, en la cual además puede observarse el accionamiento del alternador (máquina eléctrica) mediante un reductor de velocidad a engranaje.

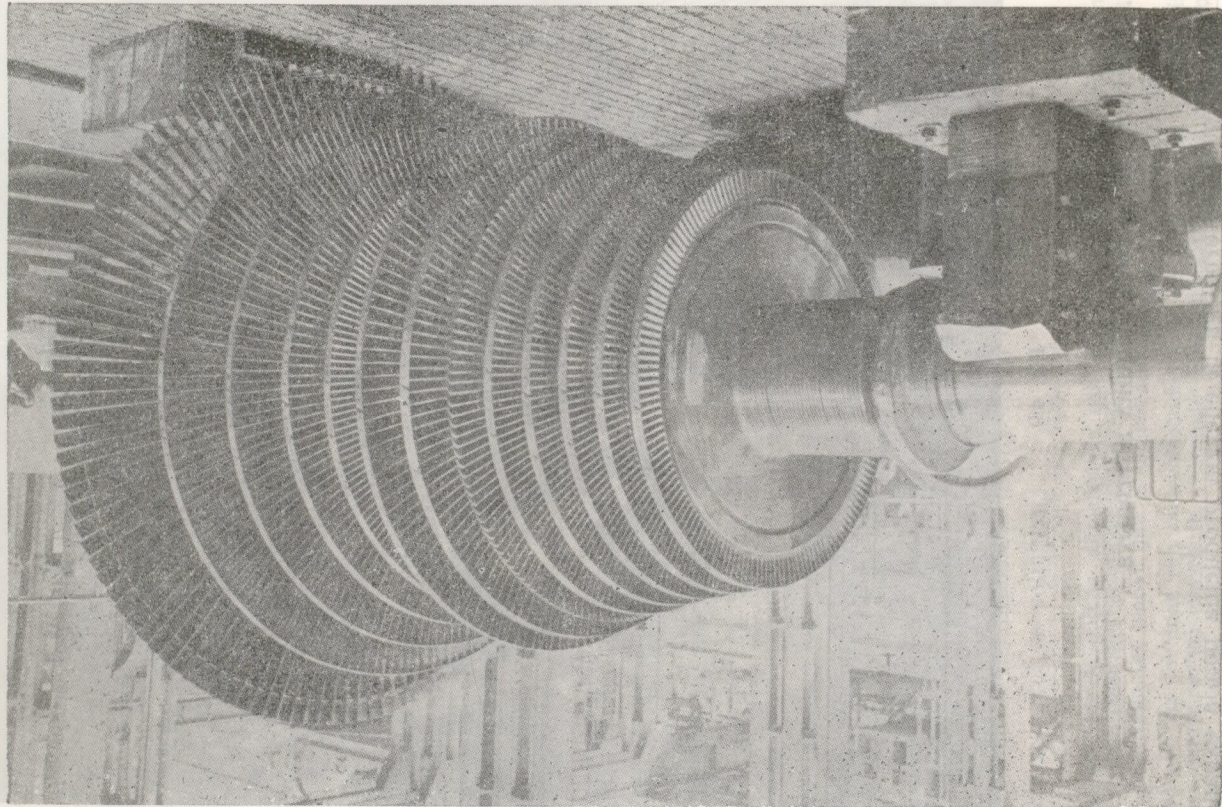
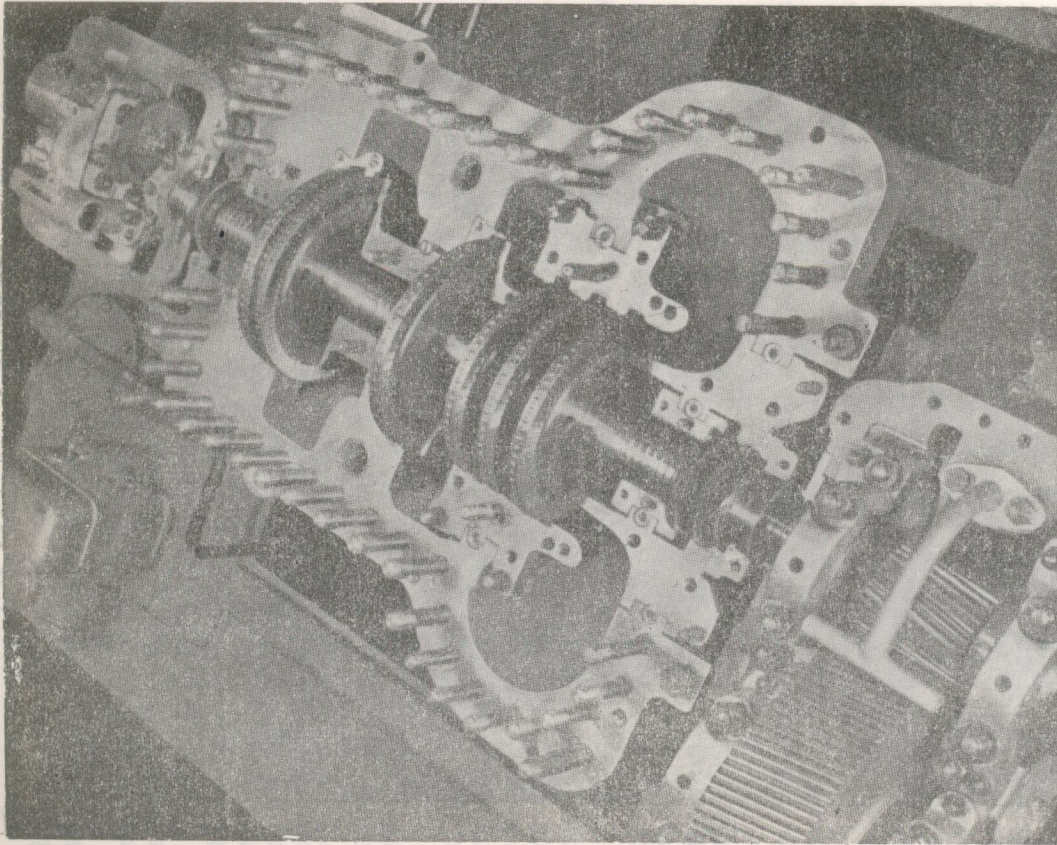


Fig. 4.8



4.4. — Diferencia entre la máquina alternativa y la turbina de vapor.

En la máquina alternativa la energía producida por la expansión del vapor se manifiesta primero en forma de un empuje sobre el émbolo, es decir, en un movimiento rectilíneo, que luego se transforma en giratorio mediante la biela y la manivela. Pero

en ella el par que actúa sobre el eje motor varía de una embolada a la siguiente, exigiendo el empleo de pesados volantes y técnicas de equilibrado para eliminar dichas fluctuaciones.

En cambio la turbina tiene la ventaja de que dicha energía del vapor es transferida directamente al eje motor y los empujes son regulares y continuos, de modo que el par motor es casi uniforme, no necesitando volante ni dispositivo alguno para regularizar el movimiento giratorio. Además, como la turbina no tiene piezas que se muevan con movimiento alternativo, es posible su equilibrado perfecto.

La conveniencia de obtener una máquina así, con par motor regular y continuo, y sin volante, obligó a los investigadores a desarrollar modelos de turbinas más eficientes y de más elevado rendimiento. De esta manera fueron superándose los problemas que se presentaron, en base al desarrollo de nuevas aleaciones metálicas capaces de resistir conjuntamente esfuerzos mecánicos y térmicos elevados, en base a la resolución de los problemas de transmisión del calor, de la regulación de la combustión y del derrame del vapor.

Por otra parte, la ausencia de piezas deslizantes reduce al mínimo las pérdidas por rozamiento, el engrase se simplifica y el consumo de lubricante se reduce apreciablemente. Todo esto hace que el vapor que escapa de la turbina salga más puro que el que escapa de la máquina alternativa, pudiendo pasar directamente al condensador sin necesidad de colocar un depurador de aceite.

Asimismo, la cimentación que requiere una turbina es menor y más sencilla que la necesaria para una máquina alternativa, para la cual se deben prever robustos basamentos con capacidad de absorber los esfuerzos alternativos y las trepidaciones, cosa que no sucede en las turbinas, en las que el movimiento giratorio es regular y donde no hay vibraciones.

En contraposición, las turbinas carecen de la elasticidad de marcha que poseen las máquinas alternativas, lo cual hace aumentar considerablemente el consumo de vapor. Además en las turbinas es imposible la inversión de la marcha.

En general se concluye:

- a) que las máquinas alternativas son adecuadas para pequeñas potencias (menores de 1.000 C.V.), por cuanto en estos casos el consumo de vapor es menor que el de las turbinas; y
- b) que las turbinas son más adecuadas para el caso de que la potencia requerida sea constante, viéndose la máquina tenga que girar en un solo sentido.

#### 4.5. — Detalles constructivos de los elementos constitutivos de las turbinas de vapor.

##### 4.5.1. — Materiales empleados.

Los elementos constitutivos de las turbinas de vapor están sometidos a esfuerzos mecánicos considerables que varían según la función de aquéllos, pero sobretodo están sometidos a temperaturas muy elevadas por espacio prolongado de tiempo, las que modifican las características mecánicas del metal. Así, por ejemplo, a partir de los 400°C aparece el fenómeno de fluencia en el acero, se modifica su resistencia y su capacidad para absorber los choques ("resiliencia") y disminuye el módulo de elasticidad, produciendo la modificación de las frecuencias propias de vibración de los álabes.

En general los materiales a emplearse en la construcción de los elementos constitutivos de toda turbina de vapor deben satisfacer las siguientes condiciones:

- a) presentar una buena estabilidad estructural a la acción de temperaturas elevadas actuando durante un espacio de tiempo muy prolongado;
- b) presentar buena resistencia a la oxidación y a la corrosión;
- c) presentar una dureza superficial suficiente (principalmente en los álabes) que permita resistir la erosión del vapor.

Si bien al describir cada elemento de la turbina se indicarán los materiales empleados, cabe señalar aquí que el material generalmente usado es el acero, pero aleado con otros metales, a saber: níquel, cromo, molibdeno, vanadio, wolframio, titanio, niobio y manganeso.

##### 4.5.2. — Elementos esenciales.

Toda turbina de vapor posee los siguientes elementos esenciales:

- a) el "armazón o carcasa", que encierra al estator y al rotor;
- b) el estator o distribuidor, solidario a la carcasa, constituido por "diagramas" o "discos" donde se insertan las toberas o los álabes fijos;
- c) el rotor, constituido por el eje motor y los discos donde se insertan los álabes móviles; puede ser una sola pieza maciza (eje-discos) o tener discos separados montados sobre el eje motor;
- d) los "prensa-estopas" y "juntas de estanqueidad" que tienen por objeto limitar las pérdidas de vapor por fugas que se producen al pasar los elementos móviles por las partes fijas de la máquina; y
- e) los "cojinetes" y "soportes" del eje motor.

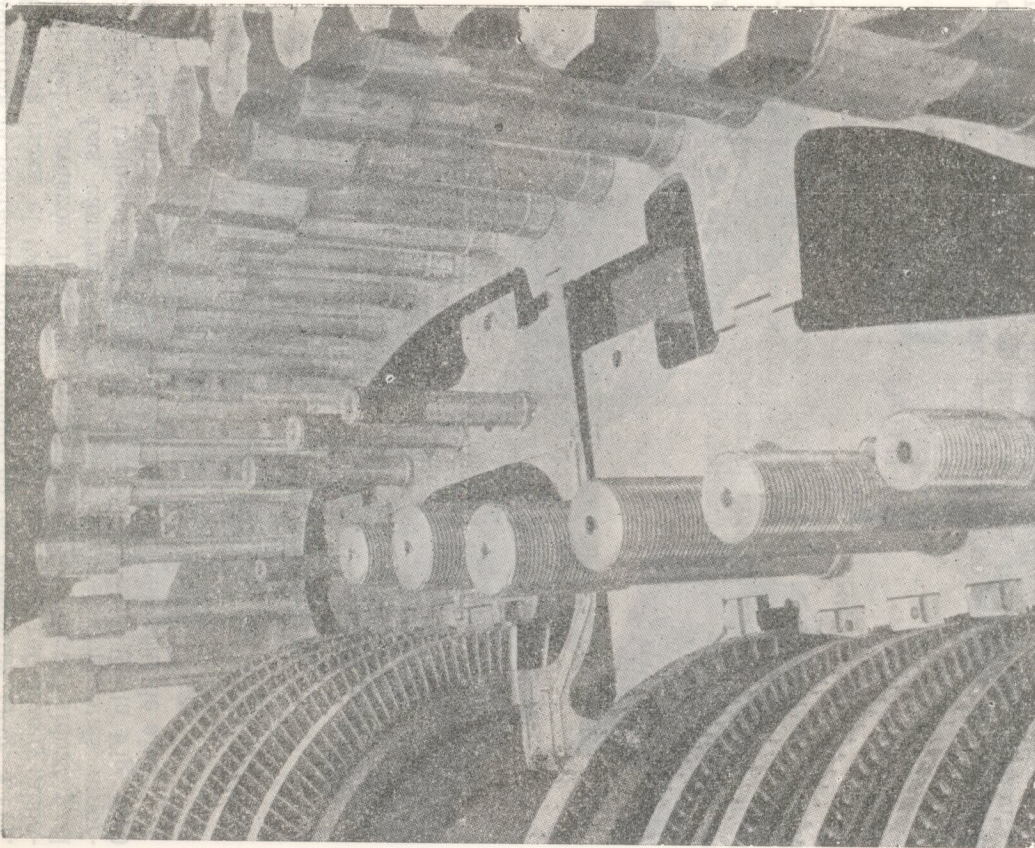


Fig. 4.10

El armazón de una turbina a vapor está cortado horizontalmente a la altura de su eje, teniendo un "cuerpo inferior" que se apoya y empuja en el basamento de la máquina, y un "cuerpo superior" que va sujetado al anterior mediante numerosos y robustos bulones, como puede apreciarse en la Fig. 4.10. En las turbinas grandes, que funcionan con vapor sobrecalentado a grandes presiones y temperaturas muy elevadas, se recurre a un doble armazón con las disposiciones necesarias para

asegurar la perfecta concentricidad de los elementos (Fig. 4.11). En tales casos el "armazón externo" sirve de refuerzo y aislación del "armazón interno", que contiene el "distribuidor" y el "rotor". Las cámaras de aire entre ambos armazones amortiguan la transmisión del calor hacia el exterior. En la Fig. 4.10 se pueden apreciar los dos armazones y las cámaras de aire.

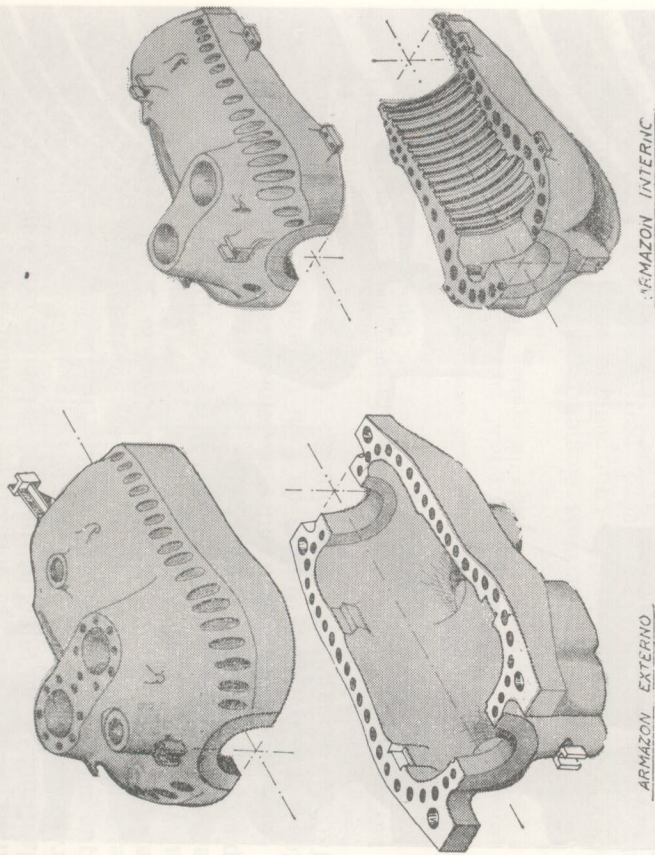


Fig. 4.11

En la Fig. 4.12 se representa el cuerpo interior de la zona de baja presión correspondiente a una turbina de recalentamiento, donde se pueden apreciar los orificios de las toberas.

Algunas turbinas tienen además una junta vertical que separa la parte de "alta presión" de la zona de "baja presión". Por lo general la parte de "alta presión" es de acero al molibdeno, acero ordinario o fundición perlítica (\*). En cambio la parte de "baja presión" ("fondo de escape") es de fundición ordinaria, aunque ésta va siendo sustituida por palastro soldado, que ofrece la ventaja de obtener un armazón de mayor rigidez, más liviano, que puede ser unido perfectamente al condensador y con la posibilidad de modificar las piezas para que el armazón

(\*) Es decir, con gran porcentaje de perlita.

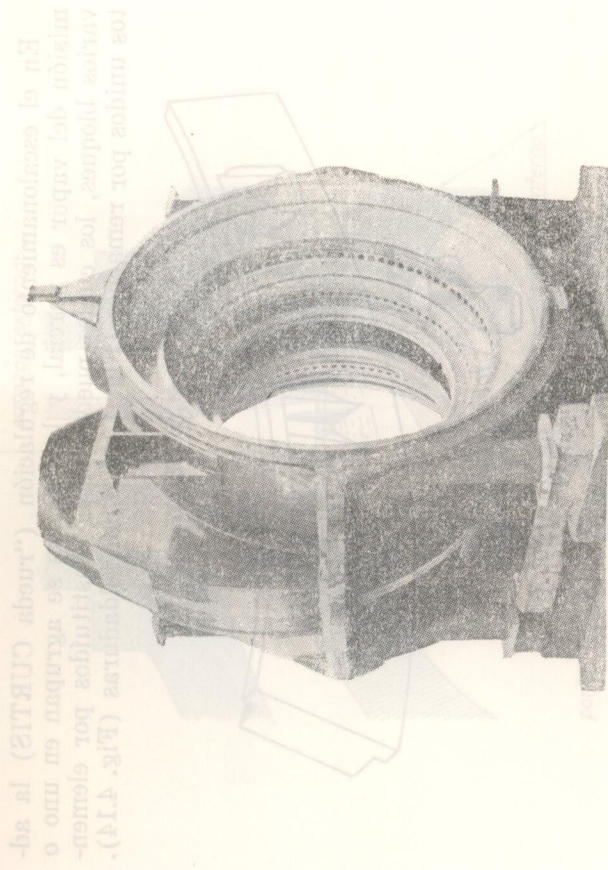


Fig. 4.12

se adapte mejor a las circunstancias, refuerzos y accesorios a fijar después de construída la pieza.

La disposición de las toberas o de los álambes fijos del distribuidor varía según el tipo de turbina y según el "escalonamiento".

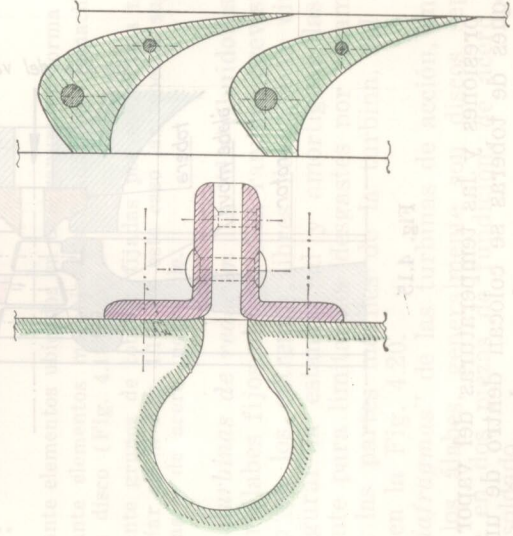


Fig. 4.13

En el escalonamiento de regulación ("rueda CURTIS") la admisión del vapor es parcial, y las toberas se agrupan en uno o varios bloques, los cuales pueden estar constituidos por elementos unidos por remaches (Fig. 4.13) o por soldaduras (Fig. 4.14).

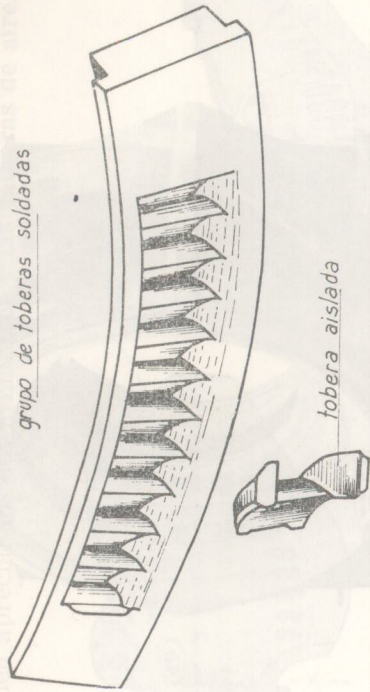


Fig. 4.14

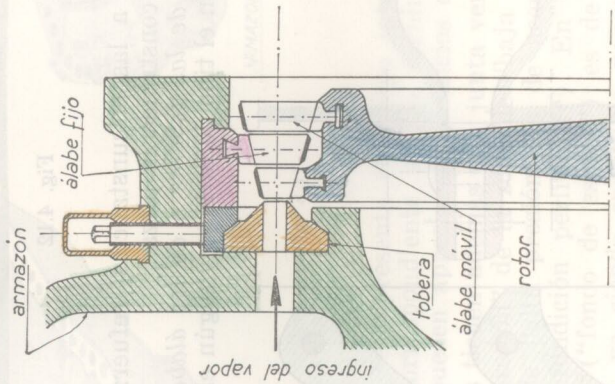


Fig. 4.15

Cuando las presiones y las temperaturas del vapor son moderadas los bloques de toberas se colocan dentro de un canal del armazón (Fig. 4.15), pero para el caso de presiones y tempe-

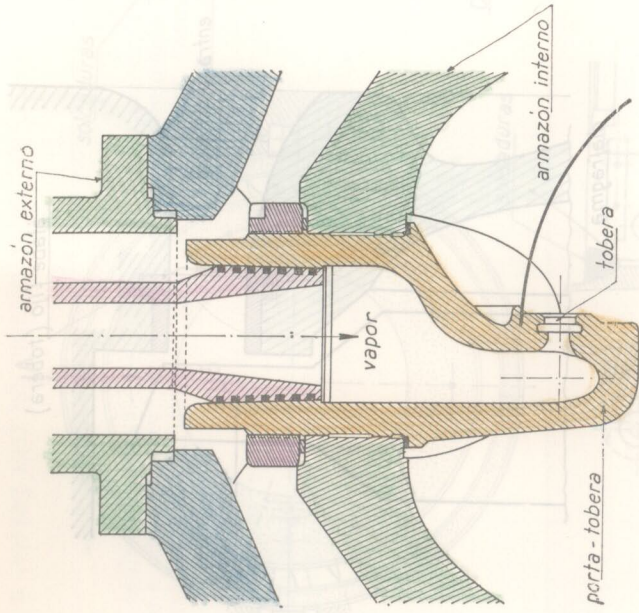


Fig. 4.16

raturas elevadas se los sitúan en "portatoberas" especiales como la indicada en la Fig. 4.16.

Para los escalonamientos siguientes de las turbinas de acción los álabes se fijan sobre los "diafragmas" en diversas formas, como ser:

- mediante elementos ubicados en una ranura en forma de T (Fig. 4.17);
- mediante elementos mecanizados fijados con remaches a la periferie de un disco (Fig. 4.18); o
- mediante grupos de toberas fijadas por soldaduras tal como se puede apreciar en la Fig. 4.19; en este caso las toberas suelen ser fresadas, pulidas y de acero inoxidable.

En las turbinas de reacción los "distribuidores" están constituidos por álabes fijos ubicados en ranuras previstas en el armazón, pero en los extremos libres llevan una cinta remachada para asegurar la estanquidad y amortiguar las vibraciones o simplemente para limitar los desgastes por rozamientos accidentales con las partes móviles de la turbina, tal como se puede apreciar en la Fig. 4.20.

Los "diafragmas" de las turbinas de acción, en cuya periferie se fijan los álabes, generalmente son discos separados diametralmente en dos piezas de fundición, de acero moldeado o de palastro soldado.

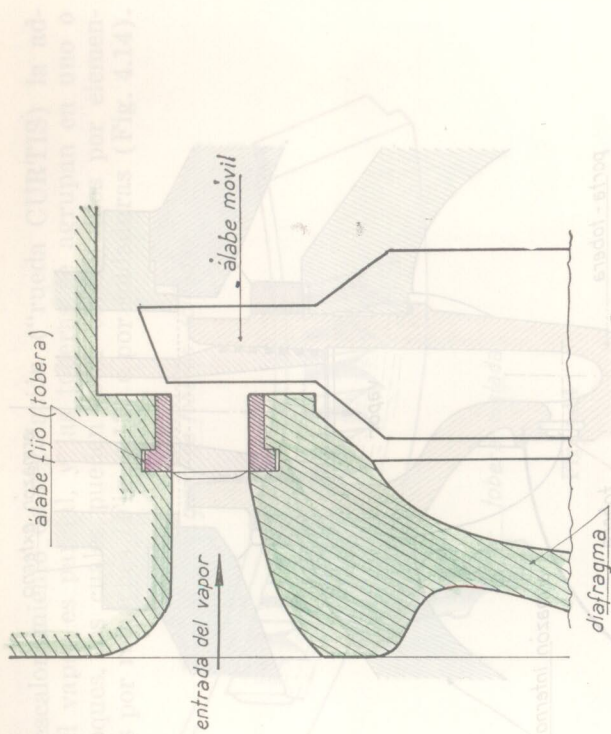


Fig. 4.17

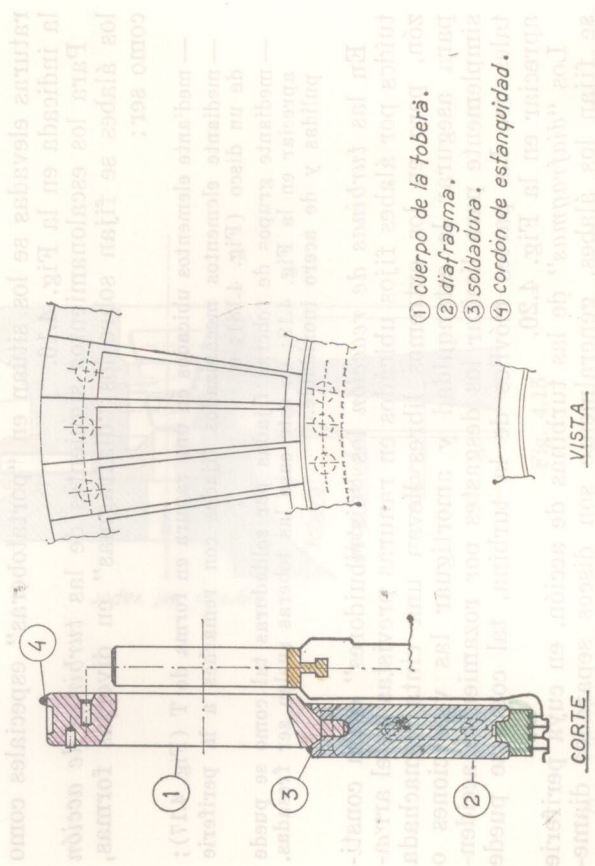


Fig. 4.18

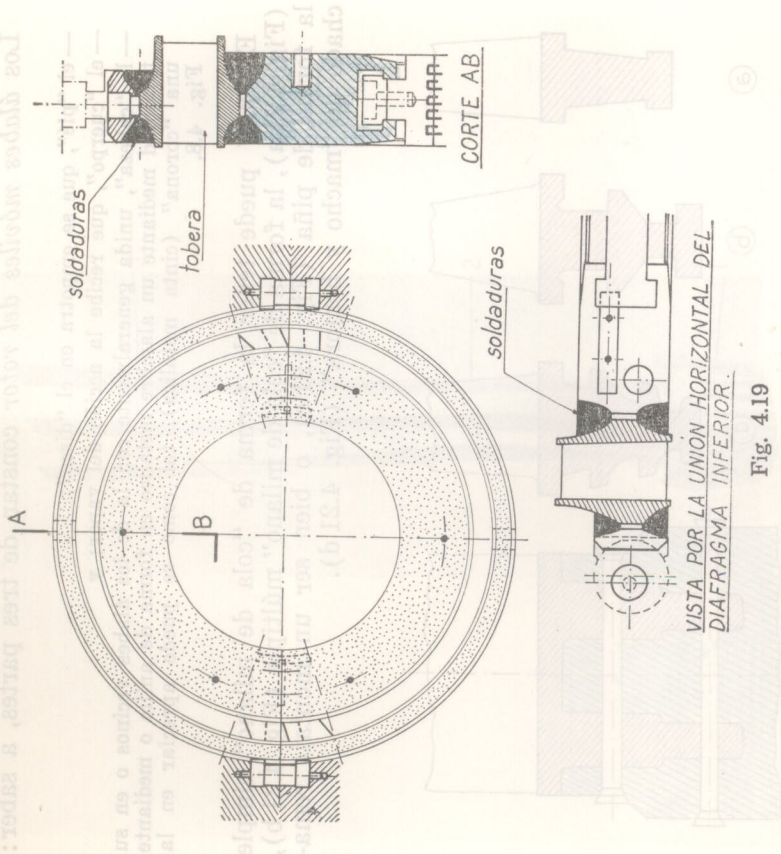


Fig. 4.19

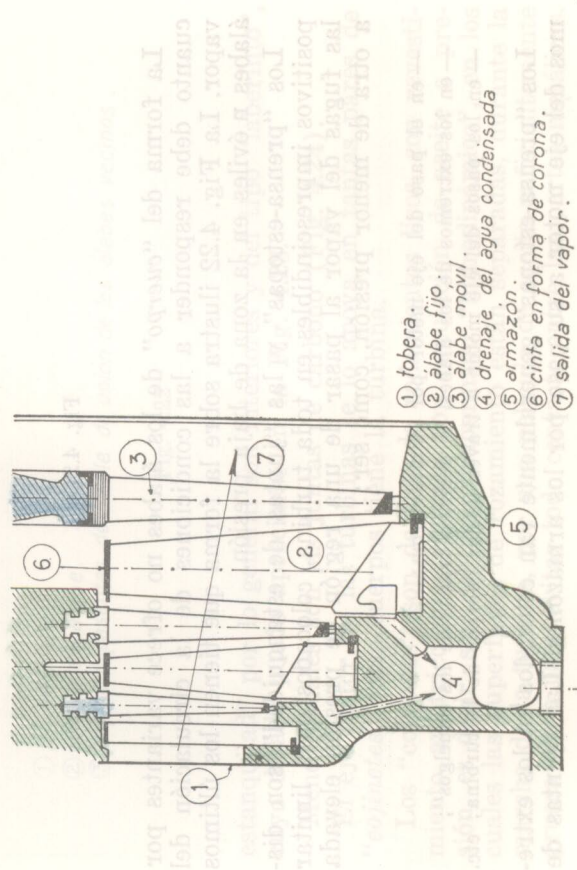


Fig. 4.20

Los álabes móviles del rotor constan de tres partes, a saber:

- el “pié”, que se empotra en el “disco”;
- el “cuerpo”, que recibe la acción del vapor; y
- la “cabeza”, unida generalmente con la de los álabes vecinos o en su totalidad mediante un alambre metálico en forma de anillo o mediante una “corona” (cinta metálica), tal como se puede apreciar en la Fig. 4.8.

El “pié” puede tener la forma de “cola de milano” simple (Fig. 4.21 a), la forma de “cola de milano” múltiple (Fig. 4.21 b), la forma de piña (Fig. 4.21 c), o bien ser un montaje remachado de “macho y hembra” (Fig. 4.21 d).

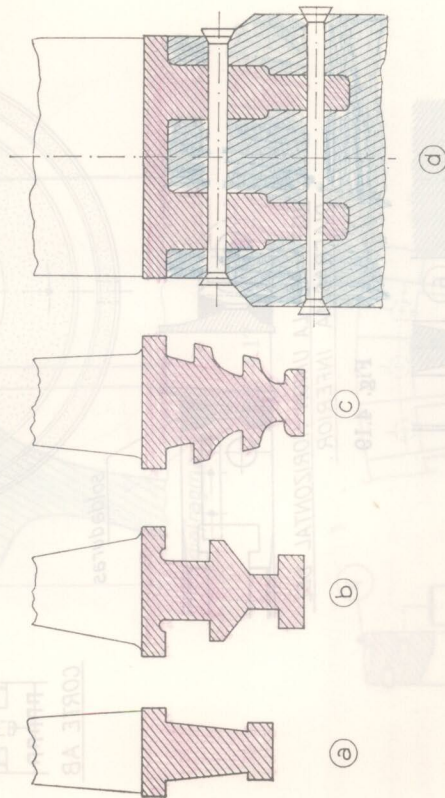


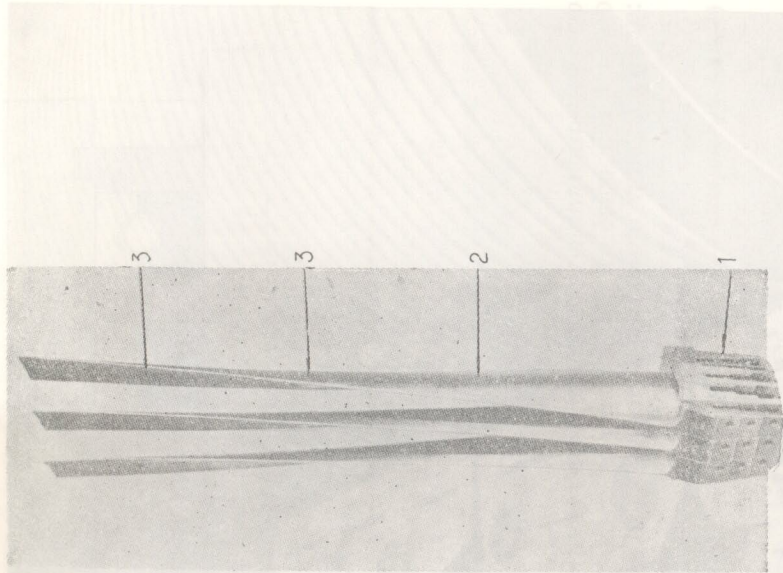
Fig. 4.21

La forma del “cuerpo” de los álabes no ofrece variantes por cuanto debe responder a las condiciones de la circulación del vapor. La Fig. 4.22 ilustra sobre la forma que tienen los últimos álabes n.º 1 en la zona de baja presión.

Los “prensa-estopas” y las “juntas de estanquidad” son dispositivos imprescindibles en toda turbina, colocados para limitar las fugas del vapor al pasar de una región de presión elevada a otra de menor presión, como ser:

- en el paso del eje motor por el diafragma;
- en los extremos de los álabes, es decir, a través de los “huelgos”;
- en los pasos del eje motor a través de los cuerpos de la turbina; etc.

Los “prensa-estopas” generalmente van colocados en los extremos del eje motor a su paso por los armazones. Las “juntas de



- ① pie del álabe.
- ② cuerpo del álabe.
- ③ orificios pasantes del cable de unión de los álabes vecinos.

Fig. 4.22

estanquidad” por lo general son interiores y del tipo “laberinto”, cuyo detalle puede apreciarse en la Fig. 4.23.

Menos usuales son las juntas de carbono (Fig. 4.24).

El eje motor de las turbinas se lo apoya en tantas pares de “cojinetes” como cuerpos tiene la turbina.

Los “cojinetes” son de tipo de rodamientos lisos, con revestimiento antifricción y engrase por circulación de aceite a presión, es decir, son del tipo denominado “hidrodinámico”, en los cuales las superficies de rozamiento están separadas, durante la marcha de la turbina, por una película de aceite suficientemente gruesa como para evitar todo contacto entre las partes metálicas.



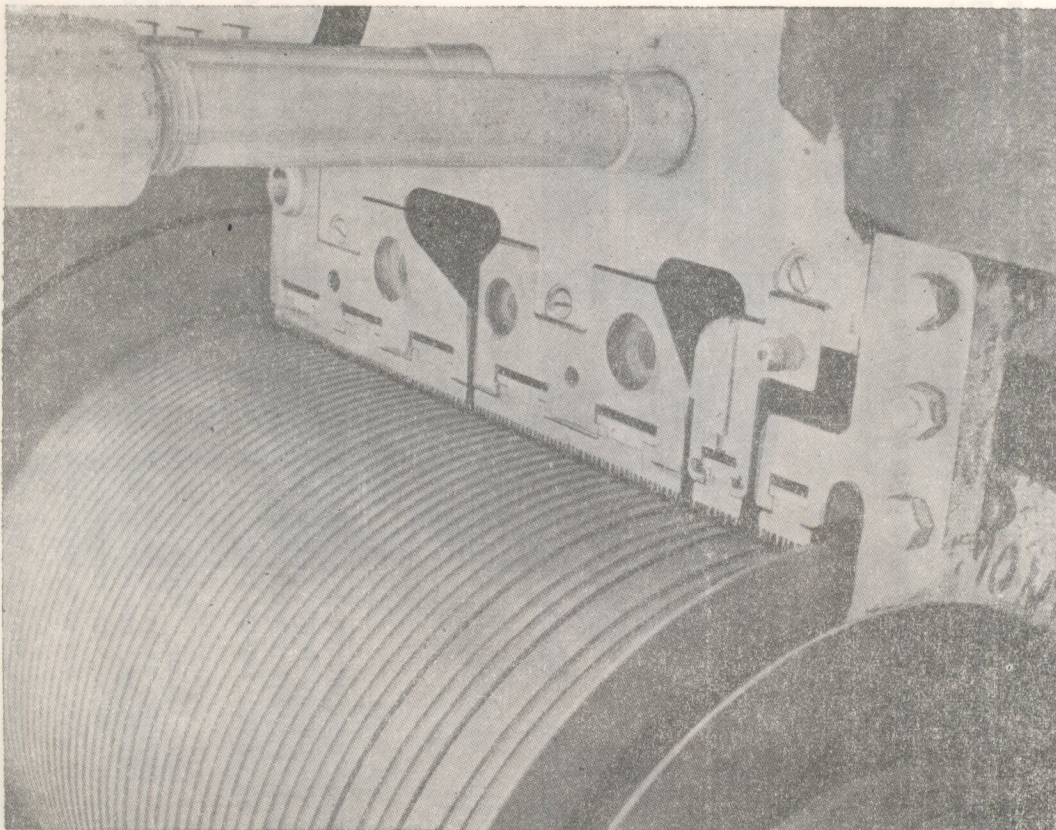


Fig. 4.23

La turbina también debe llevar uno o dos "cojinetes de empuje" a los efectos de contrarrestar los esfuerzos axiales que transmiten los rotores. Los cuerpos de los "cojinetes" constituyen los "soportes". Este apoyo se efectúa mediante cuatro "patines" situados a la altura del eje motor, dos de los cuales están unidos transversalmente a sus soportes por medio de chavetas, y los otros dos pueden deslizarse.

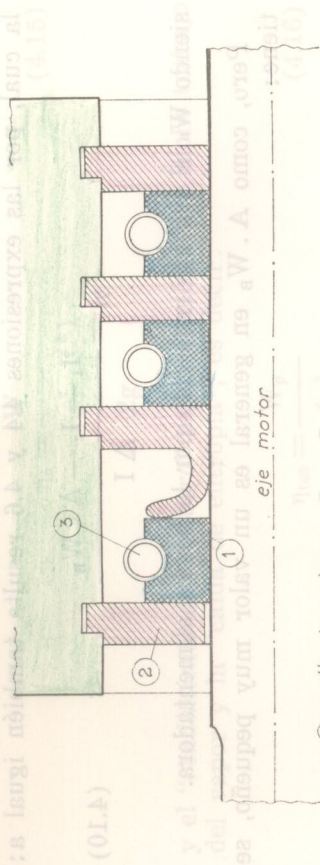


Fig. 4.24

4.6. — Rendimientos y consumos. De acuerdo a lo visto en el punto 4.2 el "rendimiento del ciclo ideal" es la relación entre el equivalente calórico del trabajo neto realizado por el ciclo y el calor entregado al vapor, es decir:

$$\eta = \frac{A \cdot W}{Q_1} \quad (4.7)$$

la cual, de acuerdo a las expresiones 4.3 y 4.1 resulta:

$$\eta = \frac{I_1 - I_2 + I_3 - I_B}{I_1 - I_B} \quad (4.8)$$

siendo:

- $I_1$  = entalpía del vapor en el estado inicial;
- $I_2$  = entalpía a la entrada del condensador;
- $I_3$  = entalpía a la salida del condensador;
- $I_B$  = entalpía del agua a la salida de la bomba.

En cambio, el "rendimiento térmico de la turbina" es la relación entre el equivalente calórico del trabajo neto que realiza la turbina y la "caída de entalía", es decir:

$$\eta_t = \frac{W_{neto}}{\Delta I} \quad (4.9)$$

la cual, por las expresiones 4.4 y 4.6 resulta también igual a:

$$\eta_t = \frac{I_1 - I_2 - A \cdot W_B}{\Delta I} \quad (4.10)$$

siendo  $W_B$  el trabajo requerido por la bomba alimentadora.

Pero, como  $A \cdot W_B$  en general es un valor muy pequeño, se tiene:

$$\eta_t \cong \frac{I_1 - I_2}{\Delta I} \quad (4.11)$$

Como en la turbina hay pérdidas de vapor (fugas) y hay rozamientos entre los elementos mecánicos, es necesario considerar, además:

— el “rendimiento volumétrico”, y:

$$\eta_v = \frac{V_v - V_f}{V} \quad (4.12)$$

— el “rendimiento mecánico”:

$$\eta_m = \frac{W_{\text{neto}} - W_m}{W_{\text{neto}}} \quad (4.13)$$

en las cuales:

$V_v$  = volumen de vapor que ingresa en la turbina;  
 $V_f$  = volumen de vapor que se escapa a través de los huecos y, en consecuencia, no produce trabajo;  
 $W_m$  = trabajo absorbido por los frotamientos.

De esta manera, el “rendimiento total de la turbina” será:

$$\eta_T = \eta_t \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (4.14)$$

Por otra parte, el “rendimiento del álabe” queda definido como la relación entre el trabajo mecánico que el vapor efectúa sobre el álabe y la energía cinética del chorro de vapor que sale de la tobera, es decir:

$$\eta_p = \frac{W}{\frac{c_2^2}{2g}} \quad (*) \quad (4.15)$$

y el “rendimiento de la tobera” es la relación entre dicho trabajo del vapor y la “caída de entropía”, es decir:

$$\eta_{\text{lob}} = \frac{W_p}{\Delta I} \quad (4.16)$$

Sabiendo que caballo-vapor por hora equivale a 270.000 Kgm y a 633 kilocalorías, el “consumo de vapor” queda definido así:

$$\omega = \frac{633}{\Delta I} \quad (4.17)$$

siendo  $\Delta I$  la caída de entalpía por kilogramo de vapor.

#### 5.1. — Consideraciones generales.

En los “motores a combustión interna” o “motores diésel” el combustible se quemó en una cámara que forma parte del motor y el calor desprendido se aprovecha al pasar la combustión, el cual al expandirse suministra energía mecánica a los órganos móviles.

Estos motores son más ligeros y más sencillos que las máquinas de vapor por cuanto no requieren el generador del fluido, en cambio hay que suministrarles un combustible gaseoso o líquido, pesado o volátil que siempre resulta más caro que el vapor. No obstante esto utilizan los motores a combustión interna son más económicos que los de vapor.

En la INTRODUCCION se dijo que los motores a combustión interna pueden ser “alternativos” o “rotativos” y que las primeras a su vez podían dividirse en:

el motor de explosión o a “escala de alta” y el motor DIESEL o “movido por compresión”.

En el presente CAPÍTULO II se estudiarán los motores alternativos a explosión, considerando especialmente por un sistema de cilindro-árbol en el cual una mezcla de aire y combustible previene la combustión.

(\*)  $c_2$  es la velocidad absoluta del vapor a su ingreso en el álabe del rotor (ver Fig. 4.3), cuyo valor se obtiene mediante la expresión:  $c_2 = 91,5 \sqrt{\Delta I}$  (ver texto: STEVENAZZI “Termodinámica”, 2a. Edición, pág. 313).