

En el caso de las máquinas de vapor, como el fidele agente pasa por dispositivos diferentes y separados (generador de vapor, máquina, condensador y bomba alimentadora), se debe hacer un distincio entre "ciclo de vapor" y "máquina de vapor". En efecto, se es correcto decir que la máquina consume vapor de la caldera a su más alto nivel y produce trabajo mecánico, por cuanto la máquina produce vapor en condiciones.

4

TURBINAS DE VAPOR

Para analizar el trabajo mecánico producido en una máquina de vapor, se utiliza el "ciclo termodinámico" el cual se estudia en un diagrama de CLAPEYRON (Fig. 4.1).

El vapor que sale del generador de vapor llega a la turbina sin pérdidas y se expande hasta el estado 2 produciendo un trabajo mecánico W , y pasando luego al condensador refrigerante donde se condensa el vapor transformándose en un líquido saturado (estado 3) que es bombeado isentrópicamente para introducirlo de nuevo en el generador de vapor (estado 4) donde se calienta a una temperatura de saturación (estado 1).

4.1. — Definición. CAPÍTULO I

La "turbina de vapor" es el único motor primario rotativo que hasta el presente se ha patentado y construido para utilizar la energía térmica y de presión contenida en el vapor de agua.

Tal energía potencial producida por el generador es convertida por la turbina, primero en energía cinética y luego en energía mecánica, a expensas de una caída de la entalpía del vapor, función de la presión y de la temperatura del mismo.

Esta conversión se realiza mediante dos elementos esenciales, a saber:

- a) el "estator o distribuidor" (elemento fijo), en donde la energía potencial del vapor se transforma en energía cinética; y
- b) el "rotor o rodete" (elemento móvil), en donde esa energía cinética se transforma en energía mecánica, en base al principio de la variación de la cantidad de movimiento.

En síntesis, toda turbina es una máquina giratoria en la cual un fluido agente (en este caso el vapor de agua) sufre cambios de presión y de velocidad y, en consecuencia, variaciones de la cantidad de movimiento que se traducen en fuerzas tangenciales, las que al actuar sobre un rotor, producen el giro del eje motor.

4.2. — Trabajo mecánico producido. CAPITULO II

En el caso de las máquinas de vapor, como el fluido agente pasa por dispositivos diferentes y separados (generador de vapor, máquina, condensador y bomba alimentadora), se debe hacer un distinción entre "ciclo ideal" y "máquina ideal".

En efecto, no es correcto cargar a la máquina el consumo de vapor de la caldera a su más alta presión y más elevada temperatura, por cuanto la máquina nunca recibe el vapor en esas condiciones.

Para analizar el trabajo realizado por un ciclo de expansión completa se utiliza el "ciclo ideal de RANKINE" (24) estudiado en el curso de TERMODINAMICA, tanto en su representación mediante el diagrama de CLAPEYRON (25) como mediante el diagrama entrópico (Fig. 4.1).

El vapor que sale del generador en el estado 1 se supone que llega a la turbina sin pérdidas; allí se expansiona isentrópicamente hasta el estado 2 produciendo un trabajo mecánico W, y pasando luego al condensador (o a la atmósfera). El agua refrigerante condensa el vapor transformándolo en un líquido saturado (estado 3) que es bombeado isentrópicamente para introducirlo de nuevo en el generador de vapor (estado B) donde primero es calentado hasta la temperatura de saturación (estado 4) y luego transformado en vapor seco (estado 1), renovándose el ciclo.

Si el vapor es recalentado antes de salir del generador de vapor, el "ciclo RANKINE" correspondiente sería e-f-2-3-B-4-1-e.

Este ciclo también se lo puede estudiar considerando los elementos individuales de la planta, es decir separando los diferentes "sistemas termodinámicos" (Fig. 4.2).

La cantidad de calor que recibe el vapor en el generador vale:

$$Q_1 = I_0 - I_n = I_1 - I_B \quad (4.1)$$

y está representada por el área: m-3-B-4-1-2-n (Fig. 4.1 b), siendo I₁ la entalpía del vapor en el estado 1 e I_B la entalpía del agua a la salida de la bomba.

La cantidad de calor que devuelve el condensador vale:

$$Q_2 = I_2 - I_3 \quad (4.2)$$

y está representado por el área: n-2-3-m (Fig. 4.1 b), siendo I₂ e I₃ las entalpías a la entrada y a la salida del condensador, respectivamente.

(24) Guillermo Juan Macquorn RANKINE (1820-1872), ingeniero y físico inglés, considerado como uno de los fundadores de la Termodinámica.

(25) Benito Pablo Emilio CLAPEYRON (1799-1864), matemático e ingeniero francés.

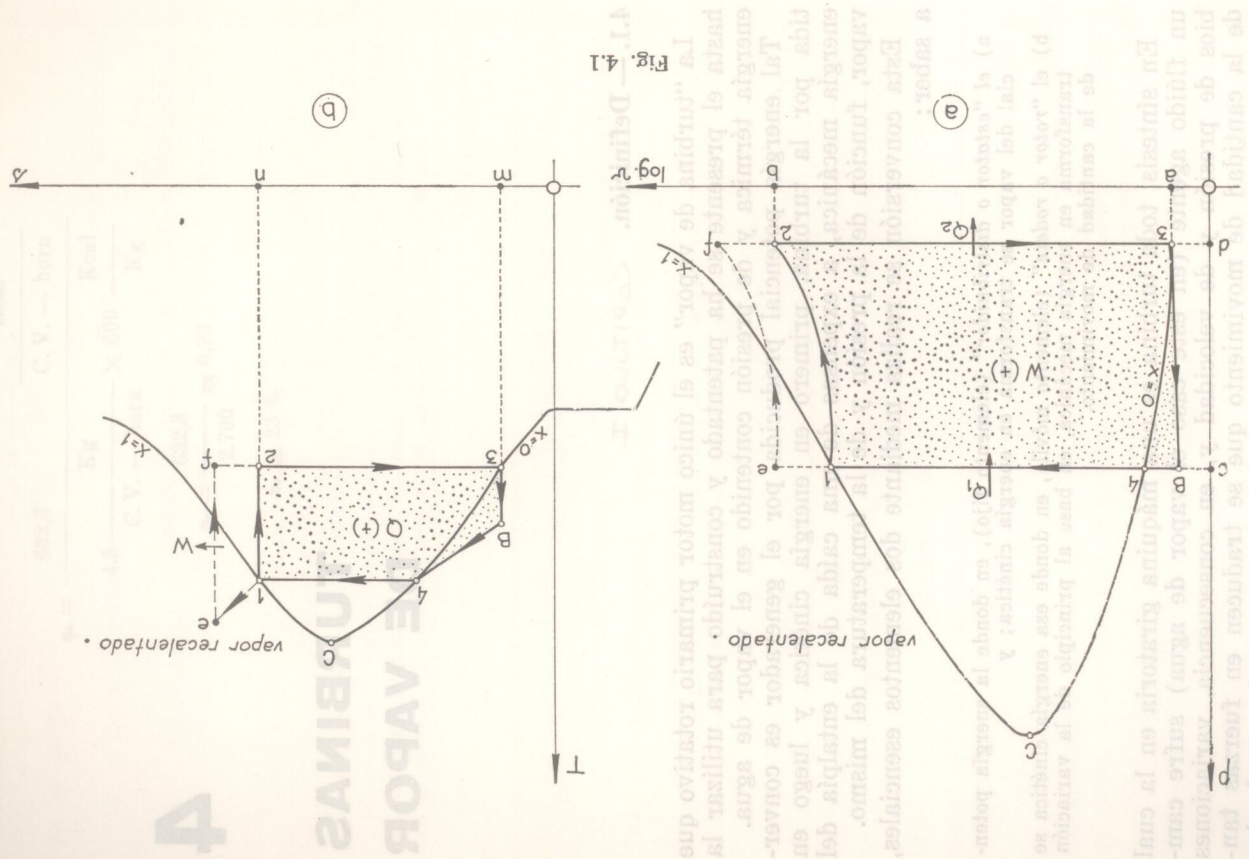


Fig. 4.1

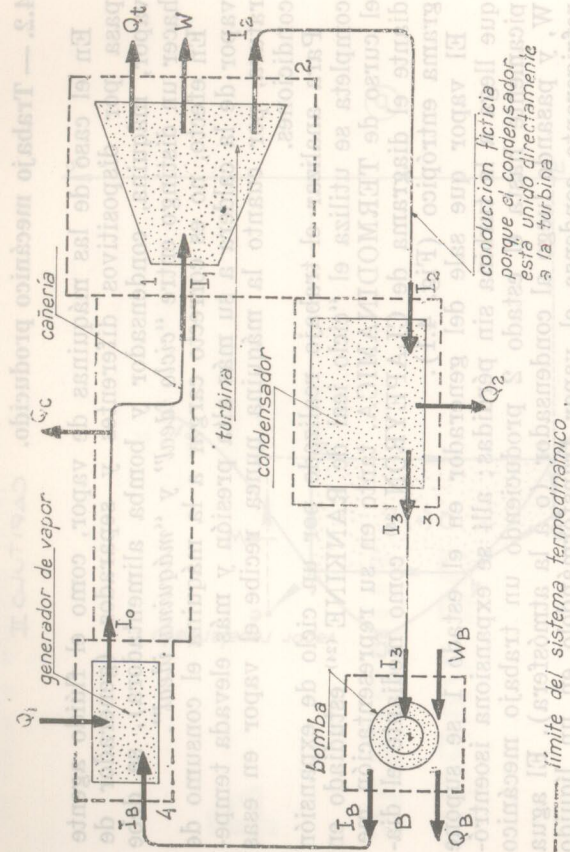


Fig. 4.2

En consecuencia, el equivalente calórico del trabajo neto del ciclo es:

$$A \cdot W = I_1 - I_B - (I_2 - I_3) = I_1 - I_2 + I_3 - I_B \quad (4.3)$$

representado por el área: 1-2-3-B-4.

En cambio, el equivalente calórico del trabajo de la expansión isoentrópica es:

$$A \cdot W = I_1 - I_2 = \Delta I \quad (4.4)$$

denominada "caída de entalpía" y representada por el área c-1-2-4 (Fig. 4.1a) y la vertical 1-2 (Fig. 4.1b).

En consecuencia el trabajo mecánico neto de la turbina será:

$$W_{\text{neto}} = W - W_B \quad (4.5)$$

y su equivalente calórico:

$$A \cdot W_{\text{neto}} = I_1 - I_2 - A \cdot W_B \quad (4.6)$$

siendo W_B el trabajo requerido por la bomba alimentadora.

De acuerdo a lo expuesto se observa que en el "ciclo ideal" el estado 1 corresponde al estado del vapor que sale del genera-

dor; y en la "máquina ideal", al estado del vapor que entra en la turbina. En cambio, en ambos casos el estado 2 está situado sobre una línea de entropía constante a partir del estado 1.

En otras palabras, el trabajo mecánico que puede producir la "máquina ideal" se lo debe valorar en base al vapor que se le entrega, en cambio el trabajo del "ciclo ideal" responderá a las condiciones del vapor entregado por el generador de vapor.

Además, en el trabajo mecánico del "ciclo ideal" interviene el trabajo necesario para bombear el agua de alimentación, para introducir la caldera, mientras que el trabajo mecánico de la "máquina ideal" se considera independiente de la bomba.

Una idea sobre la magnitud del trabajo mecánico que puede generarse mediante una turbina a vapor, se puede tener con el siguiente razonamiento:

Suponiendo que 1 Kg de vapor sobrecalentado con una temperatura 500°C y una presión de 10 atmósferas sufra una transformación isoentrópica descendiendo la presión a 1 atmósfera (y la temperatura a unos 180°C), del diagrama de MOLLIER

Kcal se deduce que la "caída de entalpía" es del orden de los 131 $\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$, es decir, se ha desarrollado un trabajo mecánico igual a:

$$W = \frac{(i_1 - i_2) G}{A} = \frac{427}{A} \times 131 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \times 1 \text{ Kg}$$

$$W \approx 56.000 \text{ Kgm}$$

el cual equivale a una caída de agua de 56 metros de altura.

4.3. — Tipos de turbinas.

La magnitud y la manera como se producen esos cambios de presión y de temperatura determinan el tipo de turbina y el principio de su funcionamiento. Es decir, aún manteniéndose constante la diferencia de presión y de temperatura entre el "foco caliente" y el "foco frío" de la máquina y, en consecuencia, constante el valor de la caída de entalpía, la conversión de ésta en energía cinética a medida que el vapor circula dentro de la turbina, varía según la manera como se van realizando los cambios de estado del vapor.

En primer lugar cuando la expansión del vapor se efectúa solamente en el distribuidor y, en consecuencia, solo allí se efectúa toda la transformación de la caída de entalpía en energía cinética, se trata de una "turbina de acción". En cambio, en el caso

hipotético de que dicha expansión se efectuare solamente en el rotor, se trataría de una "turbina de reacción pura" (aún irrealizable en la práctica); y cuando la expansión del vapor se hace, parte en el distribuidor y parte en el rotor (caso más común) se tienen las "turbinas de acción - reacción" o simplemente "turbinas de reacción".

Por otra parte, si toda la caída de entalpía se usa en una sola etapa, la energía cinética que adquiere el vapor imprimiría al rotor velocidades circunferenciales enormes, obligando a dotar a la máquina de desproporcionados reductores de la velocidad (engranajes, etc.). Para obviar este inconveniente se opta por establecer dos o más elementos fijos y móviles de manera a ir "escalonando" la velocidad o la presión del vapor. De esta manera se tienen:

- a) turbinas con escalonamiento de la presión o "escalonamiento de RATEAU"⁽²⁶⁾; y
- b) turbinas con escalonamiento de la velocidad (a presión constante) o de "escalonamiento de CURTIS"⁽²⁷⁾.

También se construyen "turbinas mixtas", divididas en varias secciones, funcionando las secciones de presión alta y media como turbinas de acción, mientras que las secciones de baja presión actúan como turbinas de reacción.

En las "turbinas de acción" el vapor ingresa a una cámara y de ésta pasa a una serie de toberas tipo Laval, o a álabes-guía en forma de tobera. En el primer caso la admisión del vapor es parcial, y en el segundo se considera que es una "admisión total". Pero, en ambos casos toda la expansión del vapor se realiza dentro de las toberas o de los álabes-guía, transformándose su energía calorífica en energía cinética, de manera que la pequeña velocidad c_1 del vapor en la cámara, se incrementa hasta un valor c_2 generalmente muy grande (Fig. 4.3 a); y consecuentemente la presión desciende desde p_1 hasta p_2 (Fig. 4.3 b).

En los álabes del rotor no hay expansión, la presión del vapor se mantiene constante pero la velocidad varía (en dirección y/o en magnitud) originándose una variación de la cantidad de movimiento que produce un empuje hidrodinámico sobre cada álabe del rotor, que lo hace girar.

Suponiendo que la velocidad absoluta de ingreso al rotor sea c_2 , y éste gire con una velocidad tangencial u , la velocidad relativa de ingreso al rotor será v_1 . Si la sección de pasaje entre dos álabes permanece constante, y se desprecian los rozamientos, la velocidad relativa del vapor a la salida del rotor será $v_2 \cong v_1$,

que compuesta con la velocidad tangencial u , da la velocidad absoluta del vapor a la salida del rotor, c_3 , cuya magnitud y dirección dependerá de la forma de los álabes.

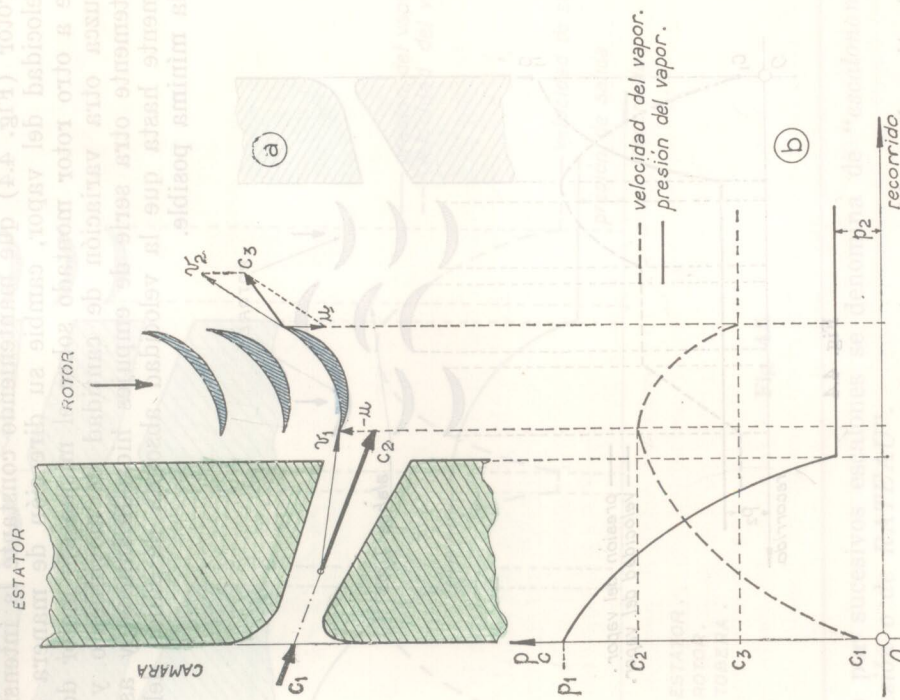


Fig. 4.3

Para que la turbina sea eficiente es necesario que dicha velocidad c_3 sea la menor posible, de modo a conseguir el máximo aprovechamiento de la energía cinética del vapor que ingresa al rotor.

Observando la Fig. 4.3 a se deduce que c_3 será tanto menor a medida que v_2 se dirija en sentido opuesto a la dirección de la velocidad tangencial u . Pero aún así siempre resulta c_3 bastante mayor que c_1 , de modo que el vapor que sale del rotor hacia el

(26) Augusto RATEAU (1863-1930), ingeniero francés inventor de dife, entes tipos de turbinas.
(27) Charles Gordon CURTIS, ingeniero norteamericano.

condensador o hacia la atmósfera lleva aun una apreciable energía cinética que no es aprovechada por la turbina.

Esta energía cinética remanente se la puede aprovechar introduciendo otro conjunto de toberas o álabes fijos a continuación del rotor (Fig. 4.4) que manteniendo constante la intensidad de la velocidad del vapor, cambie su dirección de manera que ingrese a otro rotor montado sobre el mismo eje motor donde se produzca otra variación de cantidad de movimiento y consecuentemente otra serie de empujes hidrodinámicos, y así sucesivamente hasta que la velocidad absoluta de salida del vapor sea la mínima posible.

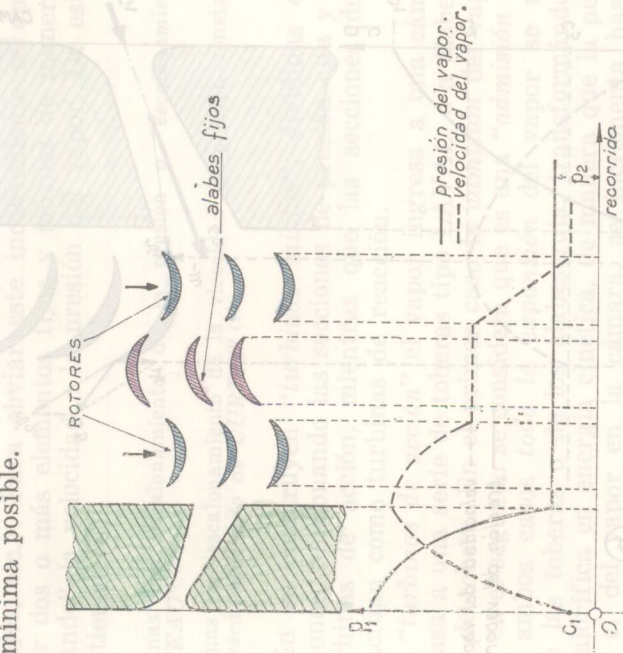


Fig. 4.4

Este tipo de turbina en la cual la presión del vapor permanece constante en los rotores y en las toberas o álabes fijos y, en cambio, la velocidad absoluta va decreciendo dentro de los rotores, se la denomina de "escalonamiento de la velocidad o de CURTIS".

En cambio, si después de salir del primer rotor, al vapor se lo conduce a otra serie de toberas o álabes fijos donde se produzca una segunda expansión del vapor y consecuentemente otra transformación de la energía calorífica en energía cinética, se recupera la velocidad de circulación del vapor, mientras que la presión va decayendo escalonadamente, tal como se puede apreciar en la Fig. 4.5.

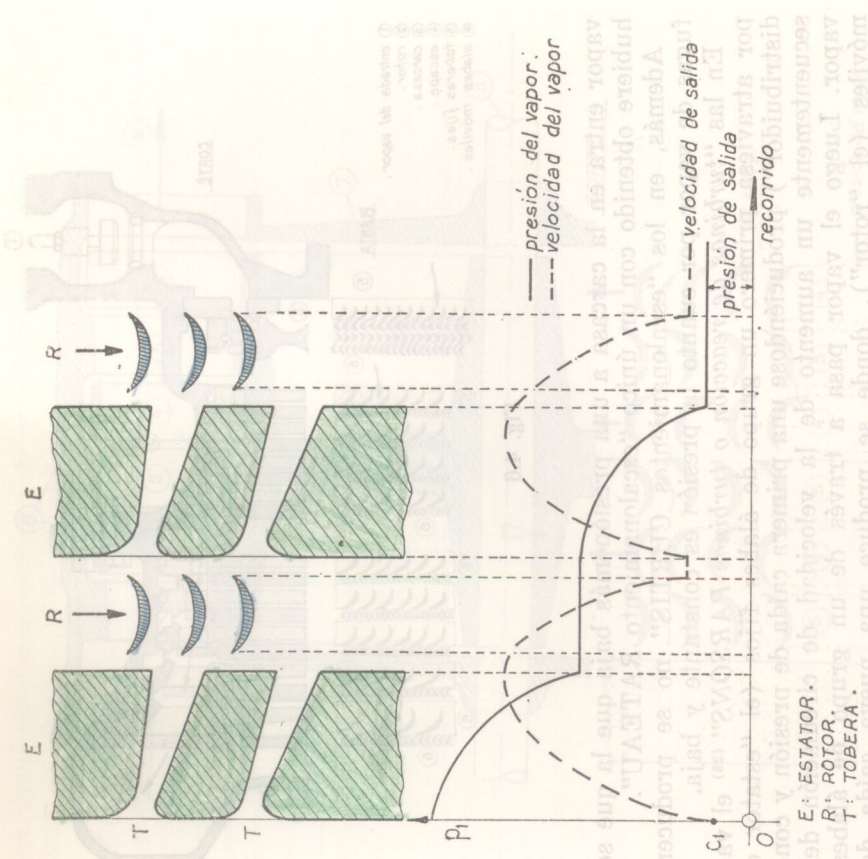


Fig. 4.5

diendo por sucesivos escalones se denomina de "escalonamiento de presión o de RATEAU".

La "turbina CURTIS" es más económica por cuanto requiere menos escalonamientos, pero la "turbina RATEAU" es más eficiente porque los escalonamientos de presión son de rendimiento más elevado. De manera que en la actualidad se opta por reunir ambos tipos en una sola máquina, tal como se puede apreciar en la Fig. 4.6, que representa una turbina de vapor con diez

escalonamientos de presión, de los cuales el primero tiene dos escalonamientos de velocidad y los nueve restantes solo tienen un escalonamiento de velocidad cada uno.

Esta turbina tiene la ventaja de que en el primer escalonamiento se produce una gran caída de presión, de manera que el