



## ASIGNATURA: MÁQUINAS TÉRMICAS –AÑO 2019

CODIGO: 95-0030

NIVEL: 4° AÑO

MODALIDAD DE CURSADO: ANUAL

PROFESOR A CARGO: ING. RUIZ MARCOS ANDRES

AUXILIAR JTP: ESP. ING. RUIZ DAVID

### PROGRAMA ANALITICO

#### UNIDAD TEMÁTICA N° 1

*Introducción general. Máquinas térmicas, historia, evolución. Clasificación general de las máquinas térmicas. Ciclos. Aplicaciones.*

### 1. CONCEPTOS GENERALES

#### 1.1. ENERGIA:

De acuerdo a lo estudiado TERMODINAMICA, la ENERGIA es algo inherente o propio de la materia, es decir algo característico de la misma. Las teorías modernas que estudian su constitución, establecen que ENERGIA y MATERIA no son entidades distintas, y que es posible convertir la masa en energía y a la inversa. La ley que rige esta transformación fue enunciada con EINSTEIN y se expresa por:  $E = m * C^2$  donde: E= energía, m=masa y c= velocidad de la luz.

Al ser *algo* característico de la materia, la ENERGIA existe en la naturaleza en diversas formas. Así por ejemplo denominamos ENERGIA HIDRAULICA a la obtenida de dos niveles de agua. ENERGIA EÓLICA a la energía obtenida por la acción de los vientos. ENERGIA QUIMICA: a la obtenida al combustionar (quemar) un combustible industrial. ENERGIA NUCLEAR: a la liberada por fisión o fusión de los combustibles nucleares. Utilizando cualesquiera de ellas, podemos obtener, a través de una máquina (dispositivo transformador de energía), energía eléctrica. Es decir, la ENERGIA puede transformarse y/o transferirse.

RESUMINEDO: LA ENERGIA, es algo característico de la materia, existe en la naturaleza en diversas formas y puede transferirse y/o transformarse.

#### 1.2. MAQUINAS DE FLUIDOS O FLUIDODINAMICAS: CLASIFICACIÓN.

Técnicamente se denomina MAQUINA, a todo dispositivo capaz de transformar y/

O transferir energía, por ejemplo un electromotor recibe un tipo de energía que por su características se las denomina ELECTRICA (lamina N° 1) y entrega al medio, a través de su eje otro tipo de energía que se denomina MECANICA. Si al motor lo utilizamos para accionar una bomba centrifuga, la energía mecánica se transforma en esta última, en energía de fluido, que permite su desplazamiento de un punto a otro, es decir realiza un trabajo, que es otro tipo de energía. Si lo utilizamos para accionar una máquina herramienta, la energía mecánica suministrada se manifiesta por un momento motor en el eje principal o husillo de la misma, que permite mecanizar un determinado material, es decir realizar también un trabajo.



Ahora bien, en el caso de una bomba centrífuga, nuestros sentidos pueden apreciar la existencia de una sustancia de trabajo. En la máquina herramienta, si bien técnicamente conocemos el origen y designación de las energías transformadas y/o transferidas, ello no ocurre. Esta situación ha

Llevado a designar a todas aquellas máquinas en las que interviene como sustancia de trabajo un fluido (líquido o gaseoso) como MAQUINA DE FLUIDOS O FLUIDODINAMICAS.

El fluido en su paso a través de la maquina puede conservar o variar sus características. Para clarificar este concepto vamos a analizar lo que ocurre en dos maquinas de igual principio de y designación, que trabajan con distintas sustancias de trabajo, como seria el caso de una TURBINA HIDRÁULICA, que trabaja con agua tal cual se encuentra en la naturaleza y una TURBINA DE VAPOR, que emplea vapor de agua. En la turbina hidráulica lo que se transforma es la energía gravitatoria o geodésica existente entre dos niveles de agua, que se expresa como salto hidráulico (lamina N° 2). La misma se transforma primero en energía de velocidad y luego en energía mecánica a través del eje de la turbina. En la turbina de vapor, también tenemos dos niveles de energía, dado por la diferencia de contenido calórico (ENTALPIA) del vapor entre la entrada y salida de la turbina. En efecto a la entrada el vapor tiene una determinada presión, temperatura y contenido calorífico, mayor que a la salida. La diferencia de contenido calórico (entalpia), es la que se utiliza para obtener trabajo mecánico, que se entrega al medio exterior a través del eje de la turbina. Es decir en la TURBINA HIDRÁULICA, la sustancia de trabajo (agua), NO varia sus características en su paso a través de la máquina. En la TURBINA DE VAPOR, SI varia. Esta situación ha llevado a denominar como MAQUINA HIDRÁULICA, a la primera y como MAQUINA TERMICA, a la segunda. Debemos aclarar que es esta asignatura la denominada maquina térmica está limitada a la máquina transformadora, a diferencia de lo estudiado en termodinámica, donde el concepto de maquina térmica comprende el conjunto de elementos a través de los cuales la sustancia de trabajo describe un ciclo.

### 1.3. MAQUINAS TERMICAS CLASIFICACION:

De acuerdo a como el fluido circula a través de la máquina, las máquinas térmicas se clasifican en

#### a. TURBOMAQUINAS TERMICAS:

En la cual la sustancia de trabajo es IMPULSADA, a través de un rotor provisto de paletas o alabes, y cuyo principio de funcionamiento es la Ecuación de Euler (lamina N° 3) y.

#### b. MAQUINAS TERMICAS DE DESLAZAMIENTO POSITIVO:

Donde la sustancia de trabajo es DESPLAZADA, por reducción de volumen de la cavidad o celda que encierra el fluido, y cuyo funcionamiento se basa precisamente en el PRINCIPIO DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO. Las turbo máquinas son giratorias y por tal motivo se las denomina también roto dinámicas o cinéticas. Que la única condición que debe cumplir es que la sustancia de trabajo sea desplazada. Las de desplazamiento positivo pueden ser de movimiento rectilíneo alternativo o de movimiento giratorio, ya que la única condición que debe cumplir es que la sustancia de trabajo sea desplazada. A las giratorias se las denominadas también roto estáticas, para diferenciarlas de las roto dinámicas.



En su paso a través de la máquina térmica, la sustancia de trabajo puede absorber o ceder energía. En el primer caso se las denomina GENERADORAS y en el segundo MOTORAS (lamia N° 4). Esta condición se cumple tanto en las turbo máquinas como en las de desplazamiento positivo (cuadro hoja N° 3 siguiente). Dentro de las turbo maquinas motoras, tenemos a su vez:

a. **TURBINAS DE VAPOR:**

Donde la sustancia de trabajo es vapor de agua sobrecalentado, que también se las considera como motor de combustión externa, ya que la sustancia de trabajo es producida fuera de la misma.

b. **TURBINA DE GAS:**

Donde la sustancia de trabajo es una mezcla de gases de combustión y aire no quemado. Si bien en este caso la sustancia de trabajo se produce también exteriormente (CICLO BRAYTON), sus características responde a la de los motores Otto y Diesel, donde se las produce interiormente. Por tal motivo a la turbina de gas se la considera como de combustión interna. Dentro de las turbo máquinas generadoras, tenemos los TURBOCOMPRESORES, donde la sustancia de trabajo es un gas (generalmente aire).

En las maquinas térmicas de desplazamiento positivo alternativas tenemos:

a. **MAQUINAS DE VAPOR DE EMBOLO:** donde la sustancia de trabajo es vapor de agua, que en este caso puede ser húmedo, y

b. Los motores Otto y Diesel: que trabajan con gases de combustión y aire no quemado. En las generadoras tenemos los compresores de embolo que trabajan con gases o líquidos de cierta viscosidad. Dentro de las giratoria motora, el motor WANKEL, que es de combustión interna y en generadoras giratorias los compresores rotativos.

#### 1.4. APLICACIÓN DE LAS MAQUINAS TÉRMICAS:

Sin que ello sea limitativo, la utilización actual de las maquinas térmicas son las siguientes.

##### 1.4.1. **TURBOMAQUINAS TERMICAS**

a. Turbinas de vapor: como motor primario para la producción de energía eléctrica, como motor de propulsión de barcos, como de accionamiento de turbocompresores y bombas centrifugas de gran caudal.

b. Turbina de Gas: su principal aplicación es en la aeronáutica como motor de propulsión en los turborreactores, estos reactores y turbo hélices. También se lo utiliza, aunque con menor rendimiento, como motor en grupos electrógenos.

c. Turbocompresores: se utilizan donde se necesitan grandes caudales de aire o gas a presiones moderadas. En gasoductos, licuefacción de gases, plantas de refrigeración, otros.

##### 1.4.2. **MAQUINAS TERMICAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.**

###### 1.4.2.1. **ALTERNATIVAS.**

a. Motoras: la utilización de las alternativas de vapor se ha reducido en la actualidad, por la necesidad de transformar el movimiento rectilíneo alternativo en circular, lo que exige mayor masa en movimiento, y en consecuencia mayor mantenimiento, lo que aumenta el costo de operación. En nuestro país todavía se utiliza en los ingenios azucareros e industrias



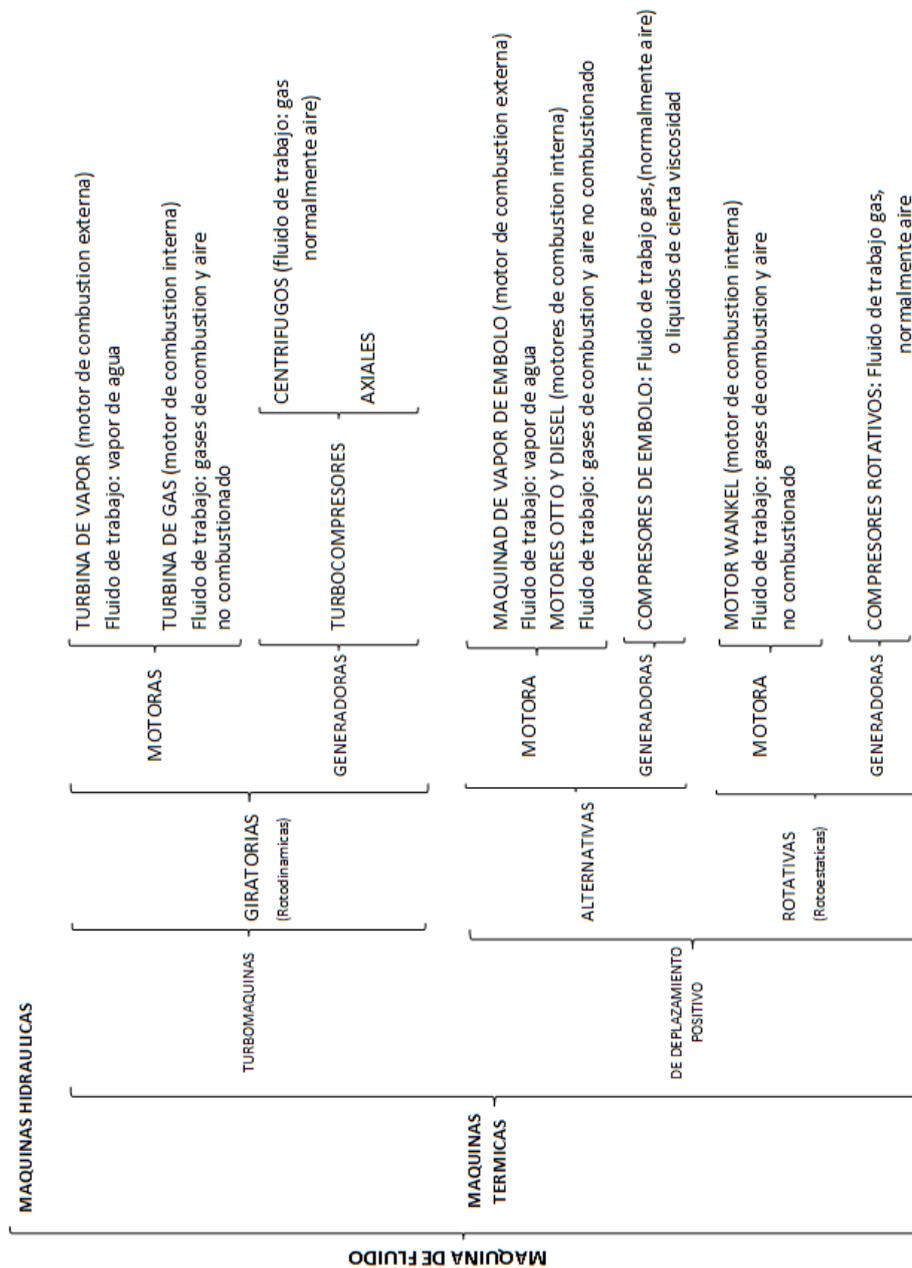
tabicas. En Brasil todavía la utilizan e inclusive la fabrican cuando la generacion de vapor necesario es de bajo costo y para pequeñas potencias.

b. Generadoras: Principalmente para la compresión de gases (normalmente aire) y para el transporte de fluidos de cierta viscosidad.

#### 1.4.2.2. ROTATIVAS

a. Motoras: en la industria automotriz

b. Generadoras: en la compresión de gases





### 1.5. ECUACION DE EULER EN LAS TURBOMÁQUINAS

1.5.1. Triángulo de velocidades: la circulación de un fluido en una turbo-máquina es compleja, como consecuencia que el mismo es impulsado a través de un motor provisto de álabes, en movimiento giratorio. Su estudio debido a que los resultados que se obtienen, principalmente en los que se refieren al trazado de los álabes, son concordantes con lo que ocurre en la práctica, se realiza aplicando la "teoría del flujo unidimensional", que considera que la circulación del fluido a través del rotor varia solamente a lo largo de una línea es decir un hilo de corriente (en realidad varia en tres dimensiones, pero se acepta esta simplificación por los resultados que se obtiene con la misma), mientras que perpendicularmente al hilo, el estado de la corriente permanece invariable.

Con esta condición, la velocidad del fluido en su paso por el rodete tiene distinto significado para un observador situado exteriormente y para otro que acompaña el movimiento del fluido. En el primer caso la velocidad es referida a la carcasa o envoltura del rotor y se la denomina absoluta ( $c$ ). En el segundo referida al rotor y constituye la relativa ( $w$ ). Por el movimiento giratorio del rotor se manifiesta además una componente tangencial (lamina N° 5). La composición vectorial de estas tres velocidades dan lugar al llamado "triángulo de velocidades" ( $c = u + w$ ). Este triángulo se lo puede trazar en cualquier punto de la trayectoria de los álabes, pero normalmente se lo considera a la entrada y la salida, es decir tendremos un "triángulo de velocidades de entrada y otro de salida". Por convención se ha adoptado indicar con:

El su índice "0": todo punto situado inmediatamente antes de la entrada del álab

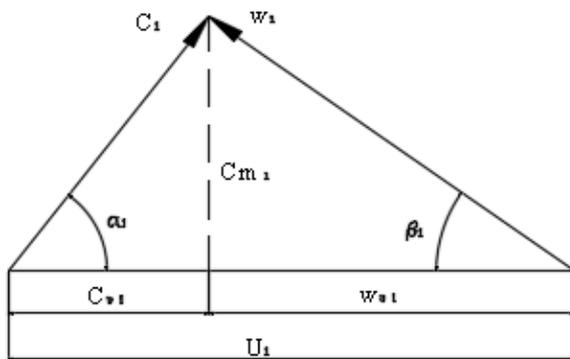
El sub índice "1": todo punto situado inmediatamente después de la entrada del álab.

El su índice "2": todo punto situado inmediatamente antes de la salida del álab

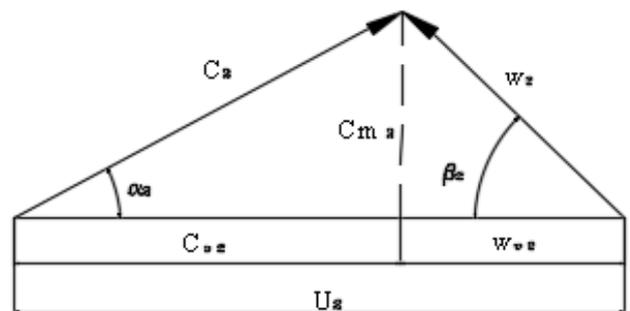
El sub índice "3": todo punto situado inmediatamente después de la salida del rodete.

Con esta nomenclatura los triángulos de velocidades serán:

Dibujo 1 y 2



De entrada



De salida



Se estableció también en designar con:

$c_m$  a la componente meridional o radial

$c_{u1}$  o  $c_{1u}$  a la componente tangencial de la velocidad absoluta

$w_{u1}$  o  $w_{1u}$  a la componente tangencial de la velocidad relativa (el sub índice 1 para la entrada y el sub índice 2 para la salida)

$\alpha$  al ángulo formado por la velocidad absoluta y tangencial y

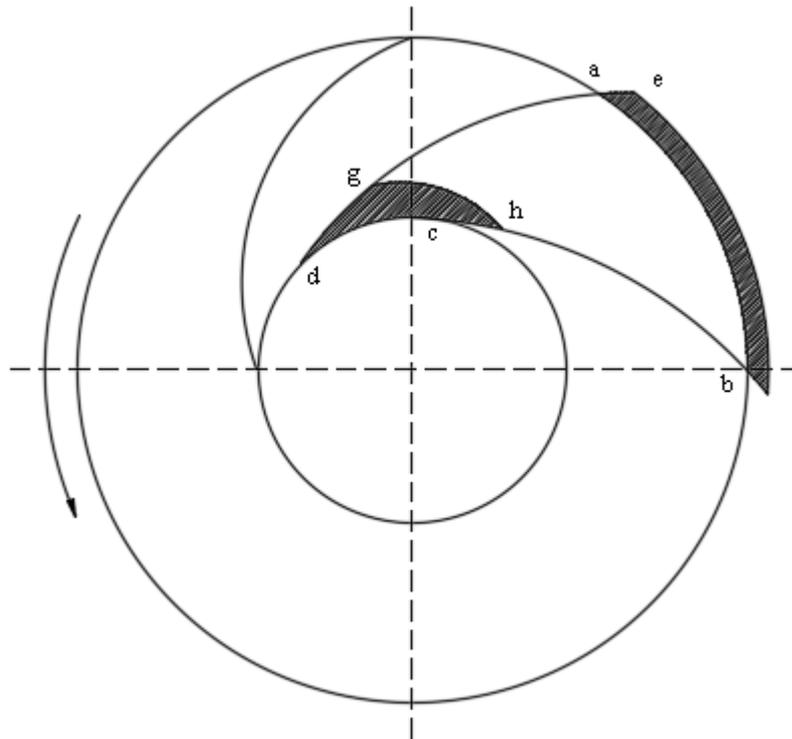
$\beta$  al dado por  $u$  y  $w$ .

La Teoría unidimensional considera también que cada hilo de corriente tiene como guía una pared. Por tal motivo se indica que las deducciones teóricas están referidas a un número infinito de álabes.

### 1.5.2. DEDUCCION DE LA ECUACIÓN DE EULER:

La ecuación de Euler expresa la energía intercambiada por el rodete de la turbo máquina y la sustancia de trabajo. Un corte transversal del rotor indica lo siguiente.

Consideramos la sustancia de trabajo en un instante "t" ocupa totalmente la cavidad existente entre dos álabes consecutivos (posición abcd), y que para un instante posterior "t + dt", su posición varia a la indicada por efgh. Como el caudal que pasa a través del rotor debe ser constante, la cantidad de líquido que entra debe ser igual a la que sale ( $aefb = ghcd$ ). Con esta condición la cantidad de fluido indicada por abhg es siempre la misma, que la podemos considerar un "volumen de control". La expresión de la Ecuación General de Euler, se deduce aplicando a dicha masa de fluido el "teorema de la cantidad de movimiento", que indica:



$$F = G \cdot (C_2 - C_1)$$



Donde

F= resultante de todas las fuerzas ejercidas sobre la masa de fluido considerado

G= caudal másico

$C_2-C_1$ = velocidades absolutas a la entrada y a la salida del rotor tomando momentos con relación al eje de giro de la turbo máquina, es decir aplicando el teorema del momento cinético será (lamina N° 6)

$$M=G*(l_2* C_2- l_1* C_1) \quad (1)$$

Donde:

M = momento resultante de todas las fuerzas ejercidas sobre el fluido que se considera aislado con respecto al eje de la turbo máquina.

$l_1$  y  $l_2$  = brazos de los momentos a distancia al centro (eje), de los vectores representativos de las velocidades absolutas  $C_1$  y  $C_2$  respectivamente.

A se vez (ver figura lamina N° 6)

$$l_1 = r_1 \text{sen} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) = r_1 \text{cos.} \alpha_1$$

$$l_2 = r_2 \text{sen} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_2 \right) = r_2 \text{cos.} \alpha_2$$

Reemplazando en la ecuación (1) anterior:

$$M = G. (r_2 \text{cos.} \alpha_2. c_2 - r_1 \text{cos.} \alpha_1. c_1)$$

Si afectamos la anterior ecuación por la velocidad angular  $w$ , será:

$$M. w = G. w (r_2. c_2 \text{cos.} \alpha_2 - r_1. c_1 \text{cos.} \alpha_1) \quad (2)$$

Esta potencia será también la que dispone el fluido a la salida del rodete, para su desplazamiento e igual:

$$N_u = G. E \quad (3)$$

Igualando las ecuaciones (2) y (3)

$$G. E = G. (u_2. c_2 \text{cos.} \alpha_2 - u_1. c_1 \text{cos.} \alpha_1)$$

Eliminando G de ambos miembros de la igualdad, resultará:

$$E = (u_2. c_2 \text{cos.} \alpha_2 - u_1. c_1 \text{cos.} \alpha_1)$$

Que para un número infinito de álabes se indica por:

$$E_{t\alpha} = \pm (u_2. c_2 \text{cos.} \alpha_2 - u_1. c_1 \text{cos.} \alpha_1)$$

El signo (+) para turbo máquinas generadoras y,

El signo (-) para turbo máquinas motoras.

En la expresión anterior  $c. \text{cos.} \alpha$ , representa la componente tangencial de la velocidad absoluta por lo cual la misma también se indica por

$$E_{t\alpha} = \pm (u_2. c_{2u} - u_1. c_{1u}) \quad (4)$$

Que se denomina ecuación reducida de Euler:

Si a los triángulos de velocidades de entrada y de salida aplicamos el teorema del cos, tendremos:



---

$$w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2 \cdot u_1 \cdot c_1 \cdot \cos \alpha_1 = u_1^2 + c_1^2 - 2 \cdot u_1 \cdot c_{1u} \Rightarrow$$
$$u_1 \cdot c_1 = \frac{u_1^2 + c_1^2 + w_1^2}{2} \quad (5)$$

$$w_2^2 = u_2^2 + c_2^2 - 2 \cdot u_2 \cdot c_2 \cdot \cos \alpha_2 = u_2^2 + c_2^2 - 2 \cdot u_2 \cdot c_{2u}$$

$$u_2 \cdot c_2 = \frac{u_2^2 + c_2^2 + w_2^2}{2} \quad (6)$$

Reemplazando (5) y (6) en (4) y operando tendremos:

$$E_{t\alpha} = \pm(u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u})$$

Que constituye la segunda ecuación de EULER. En la misma:

$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2}$  Indica el aumento de presión entre la entrada y la salida del rodete, generada por efecto centrífugo.

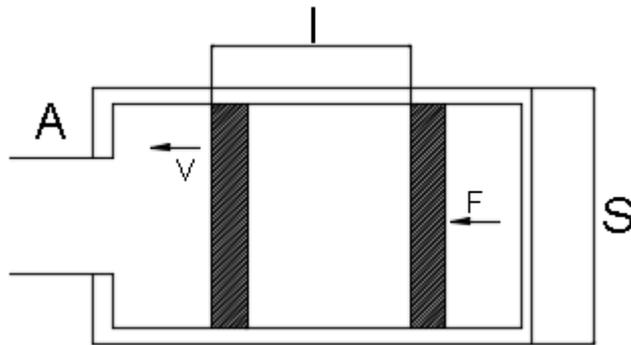
$\frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$  Indica la disminución de la presión, consecuencia de la variación de la velocidad relativa entre la entrada y la salida, por efecto de rozamientos torbellinos, separación de la vena de fluido de las paredes, etc.

$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$  Representa la variación de la velocidad absoluta de fluido en su paso por el rodete.



### 1.6. PRINCIPIO DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.

Consideremos un cilindro como el indicado en la figura, en cuyo interior se desplaza un émbolo con movimiento uniforme a velocidad  $V$ , y que contiene un fluido a cierta presión " $p$ " que se supone incompresible. Se supondrá además que las paredes del cilindro son rígidas e indeformables. El movimiento del émbolo se logra por la aplicación de una cierta fuerza " $F$ " y provocará el desplazamiento del fluido a través del orificio. Al desplazarse el émbolo una cierta distancia " $l$ " saldrá por el orificio A una cantidad de fluido igual a  $S * l$  ( $S$  sección del émbolo), debido a que se ha considerado al mismo incompresible. Si " $t$ " es el tiempo empleado en desplazarse la distancia " $l$ ", el caudal desplazado será:



$$Q = \frac{S * l}{t} = S * V \text{ (Caudal desplazado)}$$

Considerando que no existiera el fenómeno de fricción, la potencia comunicada con el fluido será:

$$N_U = F * V \text{ Pero } F = p * S, \text{ resulta entonces:}$$

$$N_U = p * S * V = p * Q$$

La relación anterior indica que la máquina de desplazamiento positivo puede ceder a absorber energía. En cualquiera de los dos casos es evidente que el "PRINCIPIO DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO", consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cavidad o cámara, que contiene al mismo. Como consecuencia de ello en una máquina de desplazamiento positivo, el elemento que origina el intercambio de energía, no tiene necesariamente que tener movimiento alternativo, sino que puede tener movimiento rotatorio. Puede tener así mismo distinta forma si cumple que el desplazamiento del fluido se produce disminución del volumen, de la cavidad que encierra el mismo.



### 1.7. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA CENTRAL CON TURBINA DE VAPOR.

El objetivo de una instalación o "central" con turbina de vapor es convertir la energía en forma de calor liberada por un combustible industrial o nuclear (posteriormente definiremos a los mismos), en energía en forma de trabajo mecánico, que comúnmente se denomina fuerza motriz. Esta última puede ser utilizada para generar únicamente electricidad, en cuyo caso la instalación se la denomina "CENTRAL ELECTRICA", o bien para producir simultáneamente energía eléctrica y ser utilizada para un proceso industrial. La instalación se denomina en este caso "CENTRAL TERMOELECTRICA, COMBINADA O MIXTA". En términos generales una central con turbina de vapor está formada por los siguientes elementos físicos (Lámina N° 7)

#### a). CALDERA DE VAPOR:

Es el elemento donde se produce vapor de agua húmedo, a una presión mayor que la atmosférica, utilizando la energía en forma de calor que se obtiene por un proceso químico de combustión o un proceso físico de fisión o fusión.

#### b). SOBRECALENTADOR:

El vapor que sale de la caldera tiene un título menor que  $x = 1$ , lo que indica la presencia de humedad. Si el vapor se utiliza en estas condiciones en la turbina, la expansión se realiza en la zona de vapor húmedo y a medida que se produce la misma, se originan gotas de agua por implosión, que golpea los álabes del rotor de la turbina, produciendo un efecto abrasivo, que lleva a su deterioro. El sobrecalentador que se coloca a continuación de la caldera y que trabaja a su misma presión, tiene por finalidad "secar" el vapor a un valor de temperatura que permita su expansión en la turbina se produzca en la zona de vapor sobrecalentado. El sobrecalentador trabaja con los gases de combustión luego de su pasaje por la caldera, aprovechando calor que de otra manera se perdería a la atmosfera.

#### c). TURBINA DE VAPOR:

Constituye la maquina transformadora de energía en forma de calor en energía en forma de trabajo mecánico.

#### d). CONDENSADOR:

A fin de recuperar el vapor como agua líquida (agua destilada), se coloca a continuación de la turbina otro intercambiador de calor que por trabajar con vapor de agua y agua líquida como refrigerante se la denomina condensador.

#### e). BOMBA DE ALIMENTACION:

Es la que le confiere energía al agua líquida para vencer la presión de trabajo en la caldera y de esta manera lograr su alimentación.

#### f). ECONOMIZADOR:

De agua, para precalentar el agua de alimentación de la caldera a la temperatura de saturación aprovechando el calor remanente que aún tienen los gases de combustión después de su pasaje del sobrecalentador, con lo cual se ahorra combustible, que habría que quemar para dicho fin en la caldera: de aire, para sobrecalentar e aire que se inyecta en el hogar que de otra manera debe utilizar calor producido en la combustión.

En las centrales donde se emplea un combustible NUCLEAR, lógicamente no existe recuperación de calor de gases de combustión, por el carácter radioactivo del combustible utilizado. Por tal motivo en las centrales nucleares, la energía en forma de calor que se

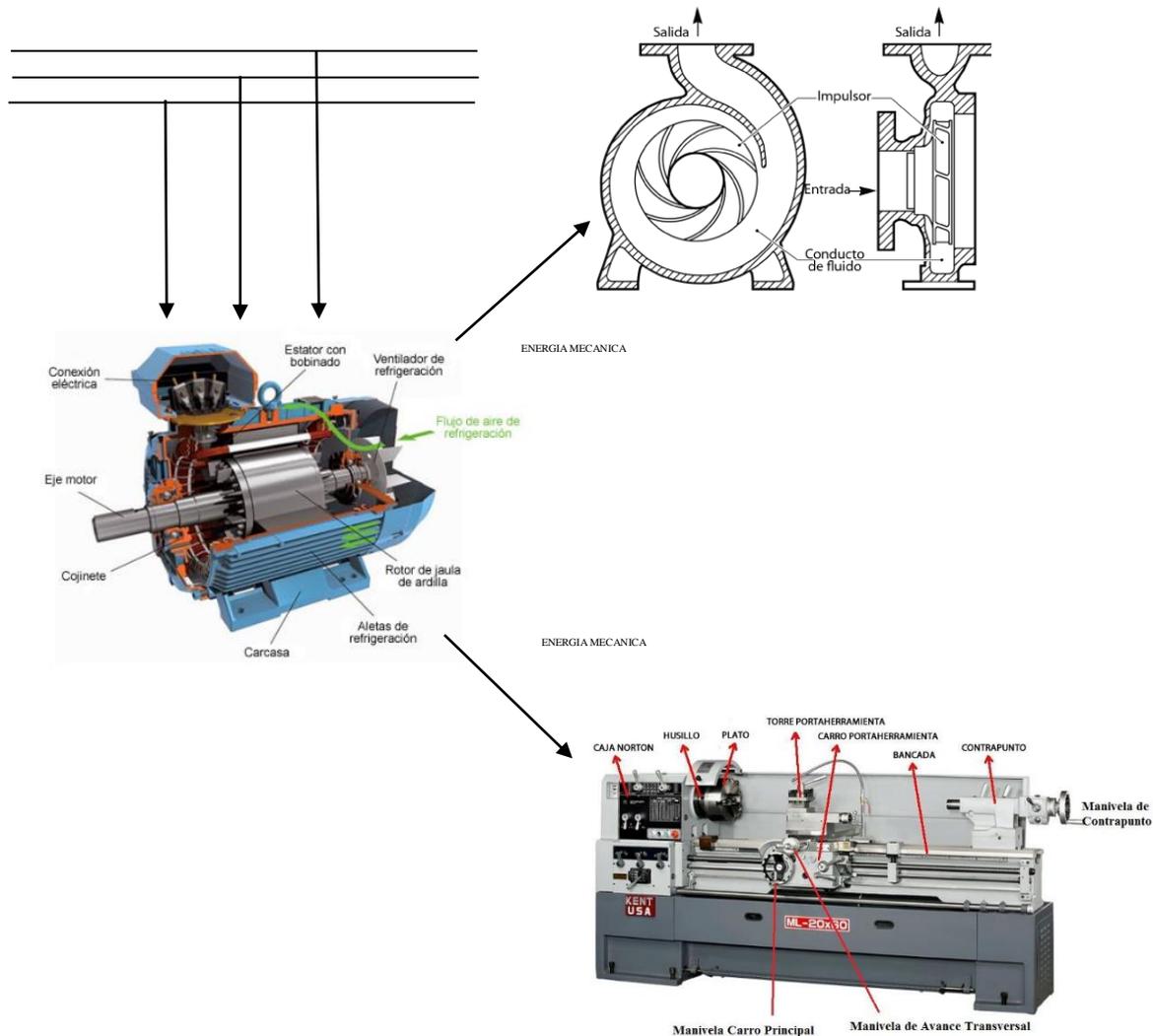


---

suministra en los sobre calentadores proviene de otra fuente. Tampoco existen economizadores.

### 1.8. CICLOS DE TRABAJO

El funcionamiento en conjunto de los distintos dispositivos mencionados se estudia considerando los denominados Ciclos de Trabajo estudiados en TERMODINAMICA. Así por ejemplo para estudiar el funcionamiento de una turbina de vapor, debemos referirnos al ciclo de RANKINE, para una turbina de gas el ciclo BRAYTON. A los mismos nos referiremos con más detalles al desarrollar los temas correspondientes.



**MAQUINA:** todo dispositivo capaz de transformar y/o transmitir energía.

El motor recibe ENERGIA ELECTRICA y la transforma en ENERGIA MECANICA en el eje acoplado a una bomba centrífuga, esta última la transforma en ENERGIA del fluido que le permite al mismo desplazarse de un punto a otro, es decir realizar un trabajo, que es otra forma de energía.

Acoplado a una máquina herramienta, origina un momento motor en el eje principal, que permite mecanizar un material, es decir realizar un trabajo.

En el primer caso existe una sustancia, visible (sustancia de trabajo). En el segundo no. Por tal motivo a todas aquellas máquinas donde el intercambio de energía se realiza con un fluido (líquido o gaseoso), se la denomina MAQUINA DE FLUIDO O FLUIDODINAMICA.