

TEMA 5 : CONCEPTOS FÍSICOS FUNDAMENTALES SOBRE MÁQUINAS

1. TRABAJO .

1.1. DEFINICIÓN

El trabajo producido por una fuerza es el producto escalar de la fuerza por el desplazamiento de su punto de aplicación.

$$W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{x} = F \cdot x \cdot \cos \alpha$$

1.2. TRABAJO REALIZADO POR UNA FUERZA VARIABLE.

Es la integral de la fuerza instantánea por el diferencial de distancia que se desplaza su punto de aplicación, y coincide con el area bajo la curva que representa la fuerza en función del desplazamiento de su punto de aplicación. En el caso particular de un muelle (fuerza proporcional al alargamiento del muelle, es decir, la gráfica es una recta que pasa por el origen) el trabajo es el area del triángulo, un medio de la constante del muelle por el alargamiento al cuadrado

$$F = -k \cdot x \quad W = \int_x^0 -k \cdot x \cdot dx = \frac{1}{2} k \cdot x^2$$

1.3. TRABAJO DE ROTACIÓN

Es el producto del momento de giro (par) por el angulo girado.

$$W_r = M \cdot \theta \quad \vec{M} = \vec{r} \otimes \vec{F} \quad |\vec{M}| = F \cdot r \cdot \sin \theta$$

1.4. TRABAJO DE EXPANSIÓN/COMPRESIÓN EN UN CILINDRO

Es el producto de la presión por la variación de volumen que experimenta el cilindro

$$p = \frac{F}{S} \Rightarrow F = p \cdot S \quad W = F \cdot \Delta x = p \cdot S \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V \Rightarrow W = p \cdot \Delta V$$

1.5. TRABAJO ELÉCTRICO

Curiosamente, el trabajo en electricidad se define a partir de la potencia como producto de la potencia ($P=V \cdot I$) por el tiempo (ya que la potencia se expresa directamente por magnitudes eléctricas fundamentales. La unidad típica es el Kw.h

2. POTENCIA .

2.1. DEFINICIÓN

Es el trabajo realizado en la unidad de tiempo

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot x}{t} = F \cdot v \Rightarrow P = F \cdot v$$

2.2. POTENCIA DE ROTACIÓN .

$$P = M \cdot \omega = M \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n$$

2.3. POTENCIA DE UN FLUIDO EN UNA CONDUCCIÓN .

$$P = p \cdot Q \quad P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot x}{t} = \frac{F \cdot x \cdot S}{t \cdot S} = \frac{F}{S} \cdot \frac{x \cdot S}{t} = p \cdot \frac{V}{t} = p \cdot Q$$

2.4. POTENCIA ELÉCTRICA .

$$P = V \cdot I \quad P = \frac{W}{t} = \frac{W}{q} \cdot \frac{q}{t} = V \cdot I$$

3. FORMAS DE ENERGÍA. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA. ENERGÍA ÚTIL .

3.1. ENERGÍA CINÉTICA .

La que posee es cuerpo por su estado de movimiento.

De traslación : es un medio de la masa por la velocidad al cuadrado

$$E_c = \frac{1}{2} m.v^2$$

De rotación : Es un medio del momento de inercia por la velocidad angular al cuadrado.

El momento de inercia es la integral extendida al cuerpo de los elementos diferenciales de masa por el cuadrado de la distancia de cada uno de ellos al eje o al punto de giro.

$$E_{cr} = \frac{1}{2} I.\omega^2 \Rightarrow I = \int r^2 .dm \quad ; \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{cilindro } I = \frac{1}{2} m.R^2 \quad \text{eje simetría} \\ \text{esfera } I = \frac{2}{5} m.R^2 \\ \text{paralelepipedo } I = \frac{1}{12} m.(a^2 + b^2) \quad \text{eje paralelo } c \end{array} \right.$$

3.2. ENERGÍA POTENCIAL .

La que posee un cuerpo por su posición en un campo de fuerzas. En el caso de la mecánica, por su posición en el campo gravitatorio o por el alargamiento de un muelle:

$$\Delta E_p = m.g.\Delta h \quad (\text{gravitatorio})$$

3.3. PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA .

La suma de la energía potencial y la energía cinética (de rotación y de traslación) de un sistema permanece constante en cualquier proceso :

$$mgh + \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I.\omega^2 = \text{constante}$$

3.4. TRABAJOS PASIVOS: ROZAMIENTO .

El principio de conservación de la energía mecánica que cumple en todos los procesos ideales en los que no se produzca disipación de energía (que se transforma en calor y ya no es utilizable) . Todos los trabajos no útiles que producen disipación de energía se denominan trabajos pasivos : Rozamiento, resistencia aerodinámica, viscosidad, rigidez a la deformación, vibraciones, etc.....

De entre ellos destacaremos el rozamiento que es el efecto que se produce entre dos superficies en contacto que se mueven la una con relación a la otra y que se opone a dicho movimiento. Depende de la naturaleza y rugosidad de dichas superficies (a través de un coeficiente de rozamiento) y a la fuerza normal a las mismas, pero no depende de la velocidad de dicho movimiento relativo. El coeficiente, para dos superficies dadas, es mayor cuando deslizan que cuando una rueda sobre la otra.

$$F_r = \mu.N$$

3.5. RENDIMIENTO .

El rendimiento es la relación entre el trabajo útil que se obtiene en un proceso, y el trabajo que se absorbe para realizar la transformación (o entre las potencias o las energías). Como el trabajo que se obtiene, según el principio de conservación de la energía es igual al que se le comunica menos el que se pierde por los trabajos pasivos (pérdidas) , el rendimiento de los procesos reales es siempre MENOR QUE LA UNIDAD. Solo sería 1 si la transformación fuera ideal, es decir, sin pérdidas.

$$\eta = \frac{W_u}{W_a} = \frac{W_a - W_p}{W_a} = 1 - \frac{W_p}{W_a}$$

TEMA 6 TERMODINÁMICA

1. CONCEPTO DE TERMODINÁMICA

La termodinámica es la parte de la física que estudia los fenómenos en los que interviene el calor, estudiando las transformaciones físicas que produce y el estado de los cuerpos afectados.

En todo análisis termodinámico debemos dividir el universo en dos partes :

- **El sistema** : es la región del espacio en la que vamos a estudiar los cambios energéticos, que se encuentra separada de cuanto le rodea por unas superficies reales y/o imaginarias que se denominan fronteras r.
- **El exterior** o los alrededores que es la region que está fuera del sistema y con la que este interactúa.

2. PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA :

Calor (Q) : El concepto tradicionalmente conocido como calor, utilizado aún antes de conocerse su naturaleza y cuya existencia se manifiesta por los cambios de temperatura en los cuerpos, no es otra cosa que una forma energía que poseen los cuerpos debido al estado de agitación que tienen los átomos y moléculas que los constituyen respecto de sus posiciones de equilibrio y que produce un movimiento medio nulo, imposible de conocer "*a priori*", ya que solo se manifiesta cuando se transfiere de un cuerpo a otro. El nivel energético o estado de agitación medio de los átomos es lo que conocemos por **temperatura**, magnitud intensiva que en una escala arbitraria nos representa la energía calorífica media que tiene cada átomo, que dependerá del tipo de átomos, de la cantidad total de ellos (masa) y de la cantidad total de energía calorífica (calor).

Energía interna (U) : es la energía total que posee un cuerpo o sistema independientemente de cual sea su naturaleza . Por lo tanto, es imposible de determinar en valor absoluto, pero si se pueden conocer sus variaciones. Esta magnitud es una función de estado, es decir, que depende únicamente del estado inicial y del final en una transformación termodinámica, y no de la forma en que se pase de uno a otro.

Adelanto, sin demostración, que en la variación de energía interna de un cuerpo viene dada por la siguiente expresión

$$\Delta U = m \cdot C_V \cdot (T_f - T_i)$$

Donde m es la masa y C_V el calor específico a volumen constante, que es función de la presión y la temperatura, expresados en las unidades adecuadas.

Equivalente mecánico del calor : Joule demostró que se puede transformar calor en trabajo (lógico, ya que el calor es una forma de energía) de forma que la relación entre las unidades de una y otro son :

$$1 \text{ caloría} = 4,18 \text{ Julios}$$

$$1 \text{ Julio} = 0,24 \text{ calorías}$$

Primer principio de la termodinámica : es una formulación del principio universal de la conservación de la energía aplicada a los procesos en los que se intercambia calor y trabajo, y lo podríamos enunciar como :

"La variación de la energía interna de un sistema es igual al calor comunicado al sistema desde el exterior menos el trabajo que el sistema efectúa sobre el exterior."

$$\Delta U = Q - W$$

Para aplicar esta fórmula es importante tener en cuenta que calor y trabajo se consideran positivos cuando llevan el sentido del enunciado y negativos cuando van a la inversa (es decir el calor comunicado por el sistema al exterior y el trabajo comunicado por el exterior al sistema son negativos), y que deben de ser expresados ambos en las mismas unidades, en calorías o en julios teniendo en cuenta el equivalente mecánico del calor.

Entalpía (H): Es una magnitud termodinámica que carece de significado físico y que se define de forma arbitraria como $H = U + P \cdot V$. Su origen e importancia histórica está ligada al hecho de que la variación de esta magnitud nos da el trabajo producido en los procesos a presión constante (isóbaros) que son los principales en las máquinas de vapor

$$H = U + P \cdot V$$

TIPOS DE TRANSFORMACIONES. CICLOS TERMODINÁMICOS. RENDIMIENTO DE UNA MÁQUINA TÉRMICA

2.1. CICLO TERMODINÁMICO.

Se denomina ciclo termodinámico a un proceso en el que un determinado fluido pasa por una sucesión de estados caracterizados por sus variables de estado : Presión, Volumen específico (inverso de la densidad) y temperatura. Cuando el estado final coincide con el inicial se dice que el ciclo es **cerrado**.

En toda transformación de energía térmica en mecánica se utiliza un fluido intermedio que va pasando por diferentes estados describiendo un ciclo termodinámico. Si debe producir trabajo de forma continua, el ciclo deberá ser cerrado.

2.2. TIPOS DE PROCESOS.

Cualquier proceso termodinámico entre dos estados diferentes, caracterizados por sus tres variables de estado, p, v y T, puede realizarse de una de las formas siguientes :

- **Isoterma** : A temperatura constante .

- a) Todo el calor comunicado se convierte en trabajo .
- b) En el diagrama P-V viene representada por una hipérbola equilátera
- c) En el diagrama T-S por una línea recta paralela al eje de ordenadas

(a) Aplicando el primer principio resulta que si $T = \text{cte} \Rightarrow \Delta U = m \cdot C_V \cdot \Delta T = 0$ luego

$$Q = W ;$$

(b) $p \cdot V = nRT = \text{Cte}$

$$(c) W = \int p \cdot dV = nRT \int \frac{dV}{V} = nRT \{ \ln V \}_1^2 = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

- **Isobara** : A presión constante

- a) Todo el calor comunicado se invierte en incrementar la entalpía
 - b) En el diagrama P-V se representa por una recta paralela al eje de abscisas
 - c) En el diagrama T-S se representa por una logarítmica de eje el de ordenadas
- El incremento de entalpía resultará :

$$\Delta H = \Delta (U + P \cdot V) = \Delta U + \Delta (P \cdot V) = \Delta U + p \cdot \Delta V + V \cdot \Delta p = \Delta U + \Delta W$$

y aplicando el primer principio resulta :

$$Q = \Delta H$$

- **Isócara** : A volumen constante

- a) Todo el calor comunicado se invierte en aumentar la energía interna .
- b) En el diagrama P-V se representa por una recta paralela al eje de ordenadas.
- c) En el diagrama T-S se representa por una logarítmica paralela al eje de ordenadas de mayor pendiente que la correspondiente isóbara.

En efecto, en este caso el trabajo realizado es nulo, y por el primer principio ;

$$Q = \Delta U$$

- **Adiabática** : Sin intercambio de calor con el exterior. Si el proceso fuese ideal, sin degradación de energía, la transformación adiabática coincide con la **isentrópica**

- a) El trabajo comunicado se invierte en aumentar la energía interna del sistema .
- b) En el diagrama P-V se representa por una curva parecida a la hipérbola pero de mayor pendiente que la de la correspondiente isoterma.
- c) En el diagrama T-S se representan por rectas verticales (paralelas al eje de ordenadas).

$$\Delta U = W$$

$$p \cdot V^\gamma = \text{cte} \quad \text{siendo} \quad \gamma = \frac{C_p}{C_V} \approx 1,4 \text{ (aire)} \quad 1,33 \text{ (mezcla combustible)}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^\gamma \quad \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

2.3. REVERSIBILIDAD DE LAS TRANSFORMACIONES TERMODINÁMICAS.

Si no existiese degradación de la energía, los procesos termodinámicos podrían producirse espontáneamente en cualquiera de los dos sentidos, en cuyo caso se habla de procesos ideales reversibles. Los procesos reales son irreversibles, pues parte de la energía se degrada en la transformación y no es posible recuperarla para pasar de nuevo del estado final al inicial. Para que un proceso sea reversible, los procesos infinitesimales que lo constituyen deben de serlo, por lo que en realidad representa una sucesión de estados de equilibrio del sistema. Un proceso reversible debe cumplir las siguientes características :

- Cualquier modificación infinitesimal de las condiciones debe implicar un cambio de sentido del proceso.
- Debe ser infinitamente lento
- Su rendimiento es superior a la de cualquier otro proceso irreversible.
- Es imposible de realizar en la práctica

3. ENTROPÍA. DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS

Los procesos de transformación reales ocurren de forma espontánea en un solo sentido, mientras que el inverso es imposible que se realice de forma espontánea, luego son todos irreversibles. Por su naturaleza, el sentido de la transformación es espontáneamente en la dirección que nos lleve a un estado final de mayor desorden.

3.1. ENTROPÍA

- Es una magnitud importantísima que representa el estado de desorden que presenta un sistema (en griego "entropía" significa confusión, vergüenza), y por lo tanto, la "calidad" de la energía que posee, ya que cuanto mas orden haya, más fácil es desordenarlo, es decir, que es mas fácil obtener el trabajo que esa energía representa. Es una función de estado cuyas variaciones sólo se pueden medir en las transformaciones reversibles. Clausius demostró que en los procesos a temperatura constante la variación de entropía es el calor absorbido por el sistema dividido por su temperatura.
- En un sistema aislado (que no intercambia ni calor ni trabajo con el exterior) las transformaciones reversibles conservan la entropía y las irreversibles la aumentan, siendo imposible en tales sistemas la existencia de procesos que produzcan una disminución de entropía.
- Es por eso que si consideramos el universo entero como un sistema aislado, como las transformaciones reales son irreversibles, la entropía del universo aumenta continuamente, por lo que la energía "se va degradando" y llegará un momento en que toda sea inutilizable. Es la denominada "muerte térmica del universo".
- En los procesos a temperatura constante se verifica que la variación de entropía viene dada por el cociente del calor intercambiado y la temperatura. Si el proceso no es isoterma, podemos considerarlo como una suma de infinitos procesos isotérmicos diferenciales, de forma que :

$$\text{isotermos } \Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad \text{en general } S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad ; \quad \text{aplicando el 1er principio}$$

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dU + dW}{T} = \int_1^2 \left(\frac{C_v dT}{T} + \frac{pdV}{T} \right) = C_v \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + \int_1^2 \frac{RT}{v} \frac{dv}{T} = C_v \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$$

3.2. SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

De los estudios del físico francés Nicolas Leonard Sadi Carnot (1820) Se dedujo que si bien el trabajo puede transformarse íntegramente en calor, no es posible transformar totalmente el calor en trabajo. Estas conclusiones se materializan en el Segundo Principio de la termodinámica, que posee muchos enunciados equivalentes (el de Clausius, el de Carnot,) pero el más popular es el de Kelvin-Planck "**No es posible la existencia de una máquina térmica que produzca un trabajo intercambiando calor con una única fuente a temperatura constante**"

3.3. PRINCIPIOS DE CARNOT. CICLO DE CARNOT.

Sadi Carnot, ingeniero francés enunció los siguientes principios

1. Primer Principio de Carnot : Toda máquina reversible de Carnot tiene mayor rendimiento que cualquier máquina irreversible de Carnot que funcione entre las mismas temperaturas
2. Segundo Principio de Carnot : Todas las máquinas reversibles de Carnot que funcionen entre las mismas temperaturas tienen el mismo rendimiento.

El Ciclo de Carnot es un ciclo teórico, imposible de llevar a la práctica y que consta de 4 transformaciones termodinámicas :

1-2 Adición de Calor a temperatura constante de forma reversible.

2-3 Expansión reversible adiabática

3-4 Cesión de Calor a temperatura constante de forma reversible

4-1 Compresión reversible adiabática

El rendimiento termodinámico del ciclo de Carnot, que es el máximo que se puede obtener trabajando entre 2 determinadas temperaturas es :

$$\eta = \frac{W}{Q_A} = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A} = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} \quad ; \quad S_2 - S_1 = \frac{Q_A}{T_A} \quad \text{y} \quad S_3 - S_4 = \frac{Q_B}{T_B} \quad \text{Como } S_2 - S_1 = S_3 - S_4$$

$$\frac{Q_A}{T_A} = \frac{Q_B}{T_B} \Rightarrow \frac{Q_B}{Q_A} = \frac{T_B}{T_A} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

$$\boxed{\eta_T = 1 - \frac{T_B}{T_A}}$$

3.4. DIAGRAMA PV Y TS (DIAGRAMA ENTRÓPICO)

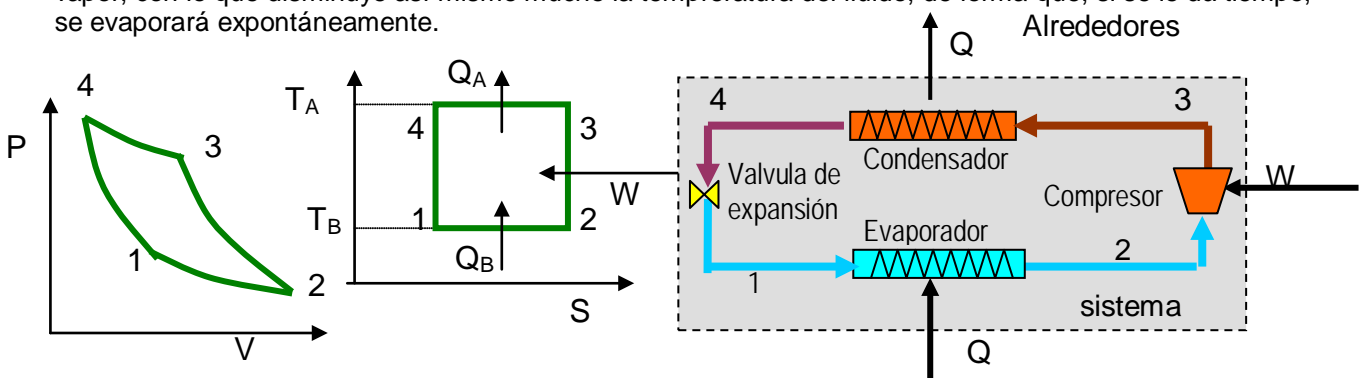
4. MÁQUINAS FRIGORÍFICAS.

Las máquinas frigoríficas son máquinas térmicas que funcionan de forma inversa a los motores térmicos, utilizando el trabajo comunicado para sacar calor de un foco frío y llevarlo a un foco caliente.

Hay 2 ciclos termodinámicos básicos :

CICLO DE VAPOR : Ciclo de Carnot Invertido :

- 1-2 Adición de calor a temperatura constante (baja): El fluido a una presión muy baja llega al evaporador, donde se produce su la evaporación a baja temperatura, absorbiendo calor del ambiente para al producirse el cambio de estado, por lo que se enfría aún más el aire contenido en el interior del frigorífico
- 2-3 Compresión adiabática en fase gaseosa, aumentándose notablemente la presión y la temperatura. Para ello es preciso comunicarle un trabajo procedente del exterior.
- 3-4 Cesión de calor a temperatura constante (alta). El gas muy caliente y a una presión muy elevada, superior a la ambiente, circula en el condensador por fuera de la máquina, con lo que se cede calor a la atmósfera y se produce la condensación del vapor que llega a alta presión sin cambio de temperatura.
- 4-1 Expansión adiabática del líquido, en una válvula de expansión, hasta una presión inferior a la de vapor, con lo que disminuye así mismo mucho la temperatura del fluido, de forma que, si se le dá tiempo, se evaporará espontáneamente.



CICLO DE GAS : Ciclo de Brayton Invertido

1-2 Adición de calor a presión constante. El gas a baja presión y temperatura llega al interior de la cámara, donde, al estar muy frío, espontáneamente toma calor del ambiente, enfriándolo, aumentando su temperatura pero no su presión.

2-3 Compresión adiabática, con lo que se aumenta mucho tanto la temperatura como la presión del gas. Para ello es preciso comunicar un trabajo desde el exterior.

3-4 Cesión de calor a presión constante. Cuando el gas a alta presión y temperatura, superior a la ambiente, pasa por un circuito intercambiador de calor en el exterior de la máquina, cede calor a la atmósfera a presión constante, y bajando su temperatura,

4-1 Expansión adiabática en fase gaseosa en una turbina, produciendo un trabajo que se comunica al compresor, disminuyendo el trabajo exterior necesario en esa fase. Al expandirse, además de bajar la presión, baja mucho la temperatura del gas.

BOMBA DE CALOR

TEMA 7 : MOTORES TÉRMICOS

1. DEFINICIÓN

Un motor térmico es una máquina que tiene por finalidad transformar la energía térmica en energía mecánica de forma que sea directamente utilizable para producir un trabajo útil.

2. CLASIFICACIÓN.

La energía térmica puede proceder de muy distintas fuentes (nuclear, solar, eléctrica...), pero la más importante hasta el momento es la que se produce por combustión de ciertas sustancias, básicamente de origen fósil : El carbón y los derivados del petróleo (gas, queroseno, gasolina y gasoil), por lo que a los motores que obtienen la energía térmica en esta forma se denominan **motores de combustión**, que son los estudiados en éste tema.

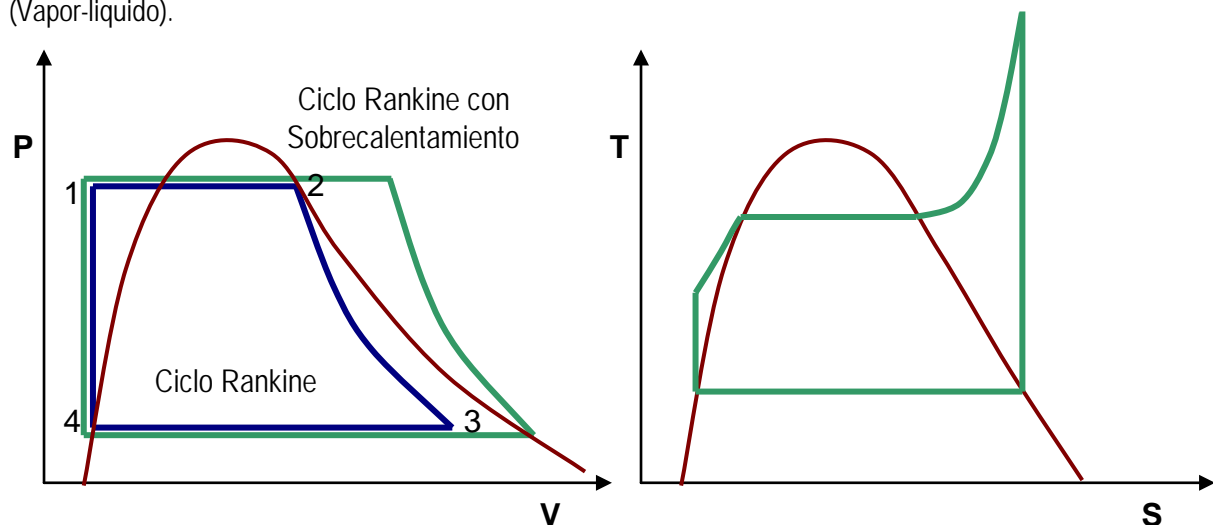
Se clasifican habitualmente atendiendo a dos criterios :

- En función del **lugar** donde se produce la combustión :
 - Motores de combustión externa (MCE)
 - Motores de combustión interna (MCI)
 - Motores de encendido provocado (MEP), o motores de explosión.
 - Motores de encendido por compresión (MEC) o de autoencendido
- En función de la **forma** en que entregan la energía mecánica;
 - Motores alternativos
 - Motores rotativos

3. MAQUINAS MOTRICES DE VAPOR

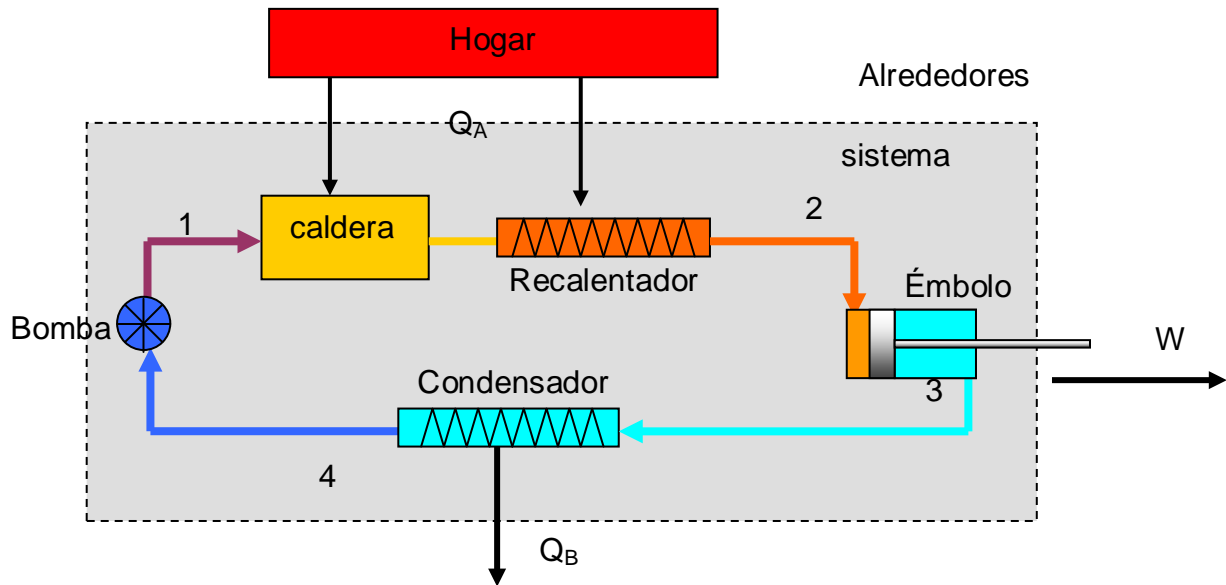
La máquina de vapor, aunque totalmente obsoleta hoy en día, tuvo una importancia histórica de primer orden, ya que fue el motor de la la Revolución Industrial, y como se desarrolló antes, la principal impulsora del desarrollo de la termodinámica.

Funcionan según el ciclo de Rankine, que es el ciclo óptimo de los sistemas heterogéneos (en los que el componente tiene más de una fase), ya que en estos casos no se puede seguir el ciclo de carnot debido a los cambios de estado (Vapor-liquido).

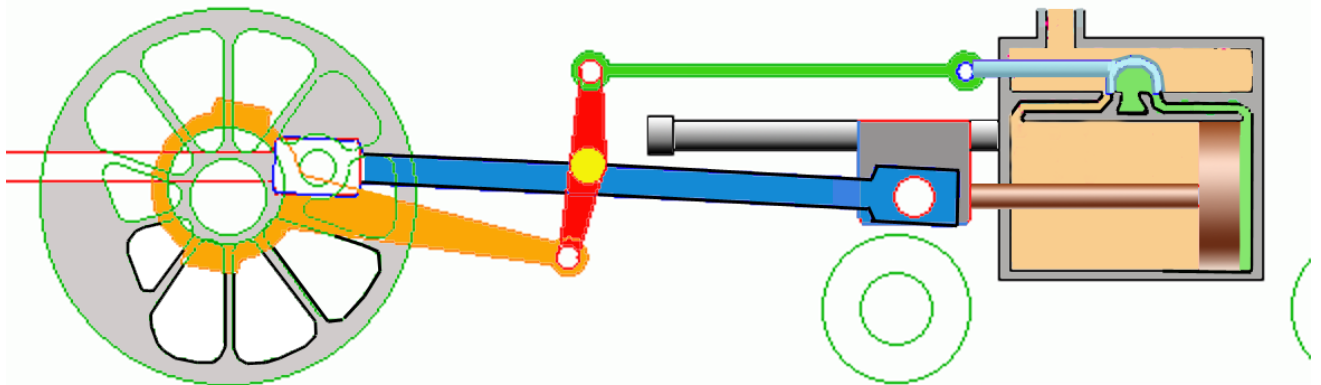


El ciclo de Rankine consta de 4 fases :

- a) 1-2 Absorción de calor a presión constante a partir de fase líquida, lo que lo lleva a fase gaseosa de vapor saturado. Ocurre en la caldera donde el agua se calienta con una fuente de calor externa (hogar) .
- b) 2-3 Expansión adiabática que produce un trabajo y una condensación parcial o total del vapor. Ocurre en el cilindro. Para evitar que parte se condense se aplica el recalentamiento de manera que al terminar la expansión obtengamos vapor saturado, pero en fase gaseosa.
- c) 3-4 Cesión de calor a presión constante que lo lleva a fase líquida de nuevo y a temperatura ambiente, que al producir un cambio de estado también sucede a temperatura constante, Ocurre en el condensador
- d) 4-1 Compresión adiabática en fase líquida, por lo que se necesita muy poco trabajo. Ocurre en la bomba que hace circular el agua del condensador a la caldera.



El dispositivo que produce el trabajo está formado por un émbolo en cuyo interior se desliza un pistón unido a un vástago que sale del cilindro y en cuyo extremo se une una biela mediante una articulación, denominada cruceta. El otro extremo de la biela se articula con una manivela, transformando el movimiento alternativo de vaivén del pistón en un movimiento rotativo del eje al que se une el otro extremo de la manivela. Este eje mueve solidariamente una excéntrica que mediante una varilla, desplaza hacia adelante y hacia atrás una corredera situada dentro de la caja de admisión de vapor al cilindro, dirigiendo la entrada de vapor alternativamente hacia la cámara del émbolo situada delante del pistón durante el movimiento de salida del vástago, y hacia la situada detrás durante el movimiento de entrada, comunicando en cada caso la otra cámara con el condensador, permitiendo el vaciado del vapor ya expandido.



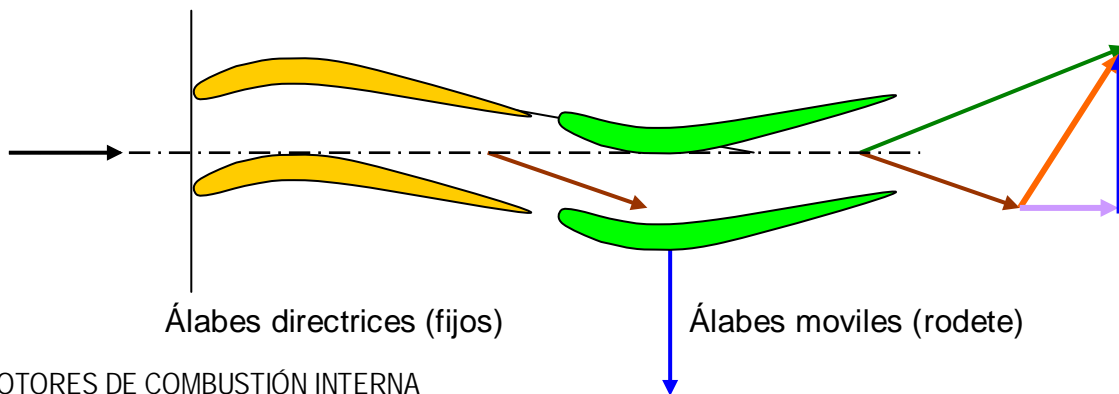
TURBINAS DE VAPOR

Funcionan con el mismo ciclo termodinámico de Rankine que las máquinas de vapor, y a diferencia de éstas, son muy usadas en la actualidad en las centrales térmicas para la producción de energía eléctrica y para la propulsión de buques, ya que al tener menos partes móviles, tienen muchas menos pérdidas mecánicas y una mayor eficiencia. Existen dos tipos básicos de turbinas de vapor.

Turbinas de acción : Constan de una parte fija, que es un difusor donde el vapor se expande, pierde presión y gana velocidad (teorema de Bernoulli) al estrecharse el conducto. El chorro incide a la salida sobre los álabes de un rodete móvil, a los que comunican su energía cinética por choque.

Turbinas de reacción : (en realidad de acción-reacción) Constan de anillos sucesivos de álabes fijos o directrices (estator) y álabes móviles (rodete) de forma que una parte de la expansión se produce en los fijos y otra en los móviles. En los fijos se gana velocidad como en las de acción, y se dirige el flujo convenientemente hacia los móviles. Este flujo sufre una nueva expansión en los rodetes, con lo que aumenta su velocidad aún más, y un cambio de dirección que por el principio de acción y reacción induce una velocidad igual y de sentido opuesto en los álabes del

rodete, cuya componente normal al álabe lo hace girar, como se ve en la figura. El inconveniente es la componente axial, que empuja la turbina hacia adelante, sometiendo a los cojinetes a grandes esfuerzos.



4. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

CONSTITUCIÓN DE LOS MCI

➤ SISTEMA PRINCIPAL

El sistema principal está constituido por :

- El bloque, la culata y el cárter, que constituyen el sistema estructural fundamental, que sirve de soporte para los demás elementos que se alojan en su interior.
- El cilindro, que es el sistema en el que se produce la transformación de la energía térmica de la combustión en energía mecánica en forma de movimiento alternativo, y que consta a su vez de : La camisa, el pistón, los segmentos y la cámara de combustión
- La biela, el cigüeñal y el volante de inercia que transforman el movimiento alternativo en circular en le eje.
- La distribución, que se encarga de regular la entrada y salida de los gases en el cilindro y que consta del arbol de levas y de las válvulas de admisión y escape con sus taqués, empujadores balancines y muelles

➤ SISTEMAS AUXILIARES

- Refrigeración
- Lubricación
- Encendido (Motores de explosión)
- Entrada de aire y combustible :
- Carburador (solo motores de explosión antiguos)
- Inyección (Motores Diesel y motores de explosión modernos)
- La transmisión

VOCABULARIO

- Carrera : Distancia existente entre el PMS y el PMI, o lo que es lo mismo, amplitud máxima del movimiento alternativo que realiza el pistón
- Relación de compresión : Relación entre el volumen de la cámara de combustión cuando el pistón está en el PMI (máxima) y cuando está en el PMS (mínima)
- PMS : Posición más alejada del cigüeñal que ocupa el pistón en su movimiento alternativo
- PMI : Posición mas cercana al cigüeñal que ocupa el pistón en su movimiento alternativo
- Volumen residual : El volumen de la cámara de combustión cuando el pistón está en el PMS

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La transformación de la energía térmica en mecánica se realiza siempre a través de un fluido operativo que sigue una evolución cíclica entre diferentes estados, teóricamente cerrada. Según que este ciclo se realice en cuatro o dos carreras del pistón se distinguen : :

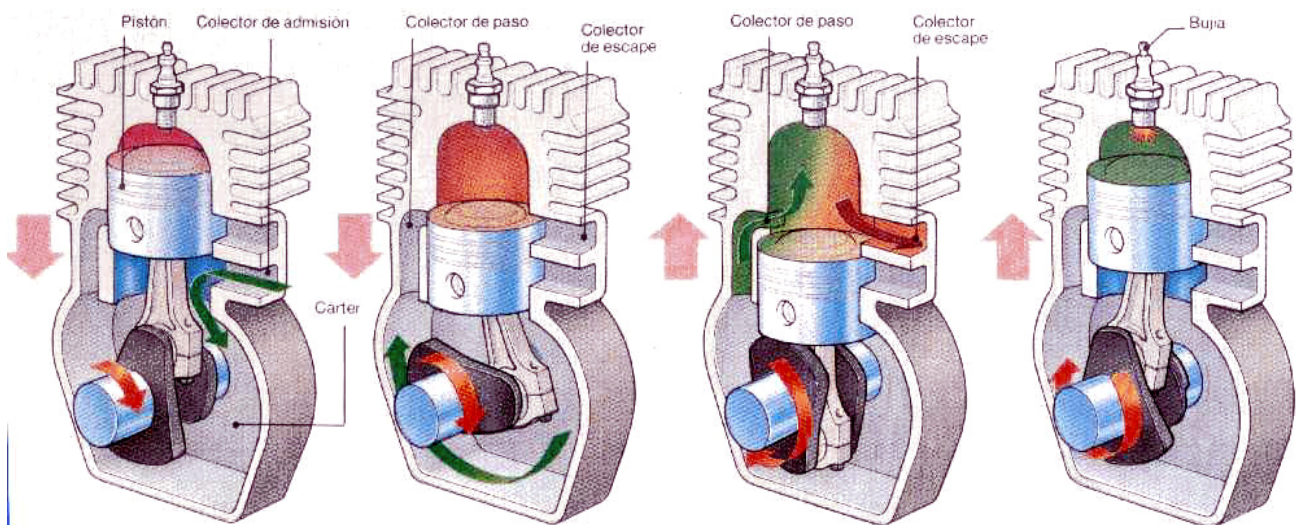
CICLO DE CUATRO TIEMPOS

1. **Admisión** : Con el pistón en el PMS, se abre la válvula de admisión y el pistón desciende hasta el PMI aspirando mezcla fresca (Otto) o aire puro (Diesel) que llena el cilindro. Como el volumen aumenta, se produce un pequeño trabajo positivo.
2. **Compresión** : Se cierra la válvula de admisión y el pistón es arrastrado hacia arriba desde el PMI al PMS, disminuyendo el volumen de la cámara y comprimiendo la mezcla fresca, que aumenta su temperatura.
3. **Combustión-Expansión** (trabajo) . Cuando alcanza el PMS, con las 2 válvulas cerradas :
 - **Ciclo Otto**, la bujía hace saltar una chispa que provoca el encendido de la mezcla. La combustión es rapidísima, casi instantánea (por eso se llama explosión), por lo que se considera a volumen constante,
 - **Ciclo Diesel**, se inyecta a alta presión y finamente pulverizado el combustible, que al entrar en contacto con el aire muy caliente se inflama espontáneamente, produciendo su combustión, que no es instantánea, dura un cierto tiempo, aumentando fuertemente la temperatura y presión del gas, que se expande y empuja hacia abajo al pistón, hasta el PMI, produciendo un trabajo positivo. En el Diesel, mientras dura la combustión (una fracción de la la carrera de expansión), la presión en la cámara es constante, aunque baje el pistón.
4. **Escape**. Se abre la válvula de escape, con lo que, debido a la sobrepresión, parte escapa hacia la atmósfera. El pistón es ahora obligado a realizar una carrera ascendente (del PMI al PMS) que empuja al resto de los gases quemados hacia el exterior a través de la válvula de escape. Cuando llega al PMS se cierra esta válvula y se repite el ciclo a partir del primer tiempo. Como el volumen disminuye, absorbe un trabajo, que coincide con el producido en la admisión.

Como se vé el pistón realiza 4 carreras en el ciclo, 2 descendentes y 2 ascendentes, y como el cigüeñal describe una semivuelta en cada carrera, el eje dará dos vueltas completas por ciclo.

CICLO DE DOS TIEMPOS

1. **Admisión-Compresión** : El pistón asciende desde el PMI hacia el PMS. Cerrando simultáneamente la lumbrera (o colector) de carga y abriendo la de admisión, de manera que al subir, succiona mezcla fresca (o aire si es Diesel) que entra por la lumbrera de admisión y llena el carter. Poco despues, siguiendo su carrera ascendente, cierra la lumbrera de escape, con lo que aún siguiendo con la admisión, comprime la mezcla fresca que llena la cámara de combustión.
2. **Combustión-Expansión-Escape**. Cuando el pistón se encuentra en el PMS se produce la combustión, que produce un notable incremento de temperatura y de presión (o sólo de temperatura si es ciclo Diesel) lo que hace que los gases quemados se expandan, empujando al pistón hacia abajo. Poco antes de llegar al PMI abre en primer lugar la lumbrera de escape, por la que escapan instantáneamente (a volumen constante) los gases quemados debido a que se encuentran a una presión superior a la atmosférica. Luego cierra la lumbrera de admisión y abre la de carga, por la que la mezcla fresca del carter irrumpe en la cámara de combustión, empujada (precomprimida) por el mismo pistón en carrera descendente, expulsando fuera los gases quemados a través de la lumbrera de escape, a la presión atmosférica, y ocupando su lugar en la cámara. La cabeza del pistón incluye un deflector que dirige los gases entrantes hacia arriba, para evitar que salgan por la lumbrera de escape que está abierta, y en frente de la de carga. En este momento el pistón llega a su PMI y empieza la carrera ascendente..



Ventajas del ciclo de 2 tiempos

Inconvenientes del ciclo de 2 tiempos.

Más contaminante, ya que quema aceite junto con la gasolina

5. TURBINAS DE GAS DE CICLO ABIERTO

Las turbinas de gas funcionan según el ciclo de **Bryton**, que se caracteriza porque tanto la adición de calor como la cesión del mismo se producen a presión constante. Tiene las siguientes fases :

1º.- Compresión adiabática hasta una determinada presión, con aumento de la temperatura.

2º.- Adición de calor a presión constante hasta una temperatura T_2 .

3º.- Expansión adiabática hasta la presión inicial

4º.- Cesión de calor a presión constante hasta alcanzar la temperatura inicial

La expresión matemática del rendimiento es similar a la del ciclo de Carnot pero con temperaturas de remanso (la que alcanzaría el flujo al detenerse).

Las turbinas de gas son, a pesar de la similitud aparente con las de vapor, funcionan de manera muy distinta :

1. Son máquinas de combustión interna (las de vapor externa)
2. El fluido de trabajo permanece siempre en fase gaseosa, mientras que las de vapor el fluido es líquido en parte I ciclo y gaseoso en el resto
3. Utilizan el ciclo Bryton (las de vapor el de Rankine)
4. Obtienen mayores potencias por unidad de peso de la máquina, por lo que se usan exclusivamente para la propulsión de vehículo (terrestres, pero sobre todo, aéreos), mientras que las de vapor son mucho más pesadas, pero pueden obtener mayores potencias totales, por lo que se usan para producir energía eléctrica o la propulsión de buques.

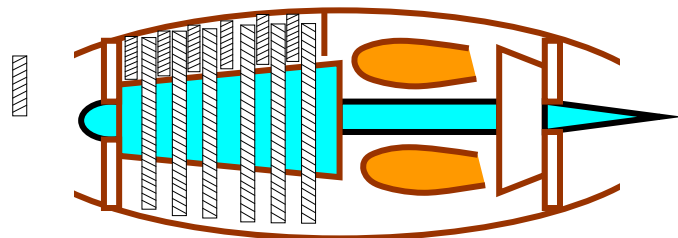
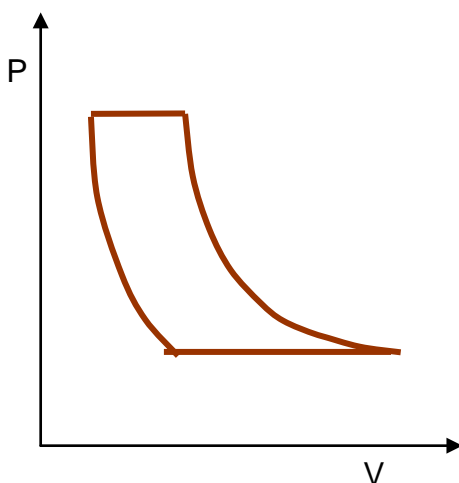
Las turbinas de gas tienen 3 partes :

1.- Compresor. Puede ser axial o centrífugo, pero siempre rotativo, en ambos casos su misión es la de admitir un cierto caudal de aire puro y comprimirlo adiabáticamente aumentando su presión y temperatura.

2.- Cámara de combustión. En ella se produce la inyección del combustible (gas o queroseno vaporizado) donde se produce el autoencendido por la alta temperatura existente y se produce un fuerte calentamiento a presión constante, lo que produce un aumento de temperatura y volumen, que lo obliga a salir por la turbina a alta velocidad (no puede salir hacia delante porque lo impide el compresor) . Inicialmente es preciso encender la mezcla con una chispa, pero luego la combustión se automantiene.

3.- Turbina propiamente dicha. El gas se expande en la turbina, a la que comunica un cierto trabajo, como mínimo el necesario para mover el compresor. Según el diseño de la turbina, se puede o bien absorber la práctica totalidad de la energía del chorro, en cuyo caso la turbina transmite la potencia al eje, o si no, se usa el chorro para propulsar un vehículo por reacción (motores a reacción aeronáuticos)

En el primer caso se encuentran los turboejes (helicópteros, vehículos pesados) y turbopropulsores (aviones de hélice), en el segundo se encuentran los turbo reactores y turbofan (reactores de doble flujo)



TEMA 9 : MOTORES DE CORRIENTE CONTÍNUA

1. DEFINICIÓN :

Las máquinas eléctricas son convertidores electromecánicos de energía cuyo funcionamiento se basa en los fenómenos de la inducción y del par electromagnético.

Si la máquina transforma la energía mecánica en energía eléctrica se denomina **generador** y si transforma la energía eléctrica en mecánica **motor**. Tanto unos como otros pueden ser de corriente continua o de corriente alterna.

2. INTRODUCCIÓN AL ELECTROMAGNETISMO.

Desde la antigüedad se conoce el efecto de la atracción que experimentan los materiales féreos por parte de cierto mineral abundante en la región turca de Magnesia, al que se denominó por ello magnetita. A una porción individual de cualquier material que presente las propiedades de la magnetita se le denominó imán, y se observó que en ellos existen 2 zonas distintas, a las que se denominó POLOS, porque se observó que polos de distinto signo se atraen y del mismo se repelen. A una de ellas se denominó polo NORTE y a la otra polo SUR, ya que cuando el imán disponía de libertad de movimiento el polo "NORTE" se alineaba espontáneamente apuntando en dirección y sentido Norte, mientras que el otro lo hacía hacia el SUR. Se observó, así mismo, que, a diferencia de la electricidad con las cargas, los polos no podían aislarse, ya que cuando se dividía el imán, se generaba en las partes, un nuevo polo norte y polo sur.

Si a cada punto del espacio que rodea un imán se le asocia un vector que represente la fuerza que actuaría sobre una partícula magnética ahí situada, se podría representar el campo de fuerzas por unas líneas, tangentes en cada punto al vector fuerza local. Estas líneas se denominan líneas de fuerza o líneas de campo magnético, y como salen del polo norte para dirigirse al polo sur, y ser ambos polos inseparables, las líneas de campo son CERRADAS, a diferencia de las de campo eléctrico que son abiertas.

En 1819 el físico danés Oersted descubrió la existencia de una interacción entre los efectos magnéticos y eléctricos, al ver que el paso de una corriente eléctrica por un hilo conductor, hacía desviarse una aguja magnética de una brújula de su natural orientación Norte-Sur.

Hoy en día se sabe que los efectos magnéticos son debidos al movimiento de las cargas eléctricas. Los imanes naturales, tienen la característica de que los electrones de las órbitas de sus átomos giran todos en el mismo sentido en órbitas cuyos planos son paralelos, de manera que los efectos de cada átomo se suman entre sí para dar lugar a un efecto magnético a gran escala, mientras que en el resto las orientaciones de las órbitas no coinciden contrarrestandose los campos magnéticos de cada átomo y dando lugar a un campo magnético total inapreciable.

Para poder comparar campos magnéticos entre sí, se definió una magnitud característica del campo, denominada Campo o Inducción Magnética (según la literatura) representado por el vector B.

Como quiera que el efecto magnético consiste en la actuación de una fuerza sobre una carga en movimiento, la unidad de campo magnético, denominada TESLA, se define en el S.I. como la intensidad de un campo magnético uniforme que al actuar sobre una carga de un Coulombio que se mueve perpendicularmente a él a una velocidad de 1 m/sg ejerce sobre dicha carga una fuerza de un Newton.

Por lo tanto :

$$\vec{F} = q.(\vec{v} \otimes \vec{B})$$

Como quiera que los materiales tienen distinto comportamiento en presencia de un campo magnético se los divide en

- Ferromagnéticos
- Paramagnéticos
- Diamagnéticos

Luego para una misma causa generadora del campo, el valor del campo real depende también de las propiedades magnéticas del medio, se define una nueva magnitud, independiente del medio denominada Excitación Magnética H, que está relacionada con el campo resultante por la expresión :

$$B = \mu.H$$

Dónde μ representa la permeabilidad magnética del medio, y es una característica propia de él.

Campo magnético creado por una carga en movimiento :

3. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS :

– **Ley de la inducción o de Faraday :**

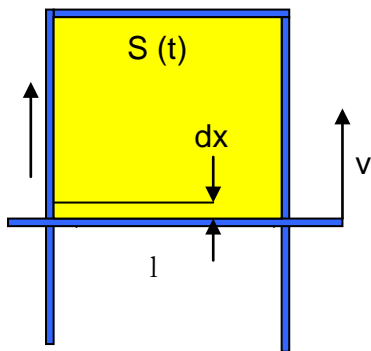
"Cuando un hilo conductor se somete a una variación de flujo magnético (bien porque varía el campo magnético o porque el conductor se mueve cortando las líneas de fuerza del campo), entonces se induce en dicho conductor una fuerza electromotriz (f.e.m.) igual a la derivada del flujo respecto al tiempo y en un sentido tal que se opone a la variación de dicho flujo " :

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}; \quad \text{para un conductor rectilíneo} \quad E = -B.l.v$$

ya que $d\Phi = B.dS = B.l.dx$

Si se cerrase el circuito, por el hilo conductor circularía una corriente cuyo sentido estaría relacionado con los del campo magnético y el del movimiento por la regla de Fleming o de la mano derecha (si el índice señala la dirección del campo y el pulgar la del movimiento, el dedo medio o corazón señalará la de la corriente)

Nota : Experimento de Faraday : $d\Phi = B.dS = B.l.dx \Rightarrow$



$$\left. \begin{aligned} d\Phi = B.dS = B.l.dx &\Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = B.l.\frac{dx}{dt} = B.l.v \\ E = \frac{W}{q} = \frac{F.l}{q} = \frac{q.v.B.l}{q} = B.l.v \end{aligned} \right\} E = -\frac{d\Phi}{dt}$$

– **1ª Ley de Laplace o del par electromagnético**

Cuando por un hilo conductor situado en un campo magnético circula una corriente eléctrica, se origina una fuerza sobre el conductor (Fuerza de Lorentz) cuyo sentido vendrá dado por la ley de la mano izquierda y cuyo valor vendrá dado por la siguiente expresión :

$$F = q.(v \times B) = q.\left(\frac{l}{t} \times B\right) = \frac{q}{t}(I \times B) = I.(I \times B) \quad \text{si } B \text{ es perpendicular a } I \Rightarrow F = B.I.l$$

4. CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

Todas las máquinas eléctricas rotativas están constituidas en general por los mismos elementos. Solo difieren en las características de cada uno de ellos, según se trate de máquinas de continua o de alterna. En el caso de las máquinas de continua dichos elementos son :

Estator : Parte fija de la máquina constituida a su vez por :

- Carcasa o yugo : Pieza de material ferromagnético en forma de cilindro hueco, en cuyo interior gira el rotor y en cuya cara interna se fijan los polos
- Piezas polares : Salientes de material ferromagnético constituidos por chapas de 0,5 mm de espesor de hierro dulce con Si apiladas y separadas entre sí por material aislante que sirven de núcleo de los electroimanes que constituyen los polos. El extremo opuesto a su anclaje a la carcasa suelen ser mas ancho, denominándose expansión polar, para que el campo magnético en el entrehierro sea lo más uniforme posible.
- Polos auxiliares de conmutación. Son unas piezas polares con su devanado correspondiente, situadas entre las piezas polares principales, que tienen por función mejorar la conmutación entre delgas
- Devanado estatórico. En las máquinas de continua es el inductor, mientras que en las de alterna es el inducido. Arrollamiento de hilo de cobre aislado, bobinado en torno a las piezas polares que actúan como núcleos, de forma que cuando por ellos circula una corriente crean el campo magnético inductor

NOTA : en las máquinas de alterna, el devanado inductor suele ser del tipo distribuido en lugar de polos salientes, para conseguir una forma de onda senoidal.

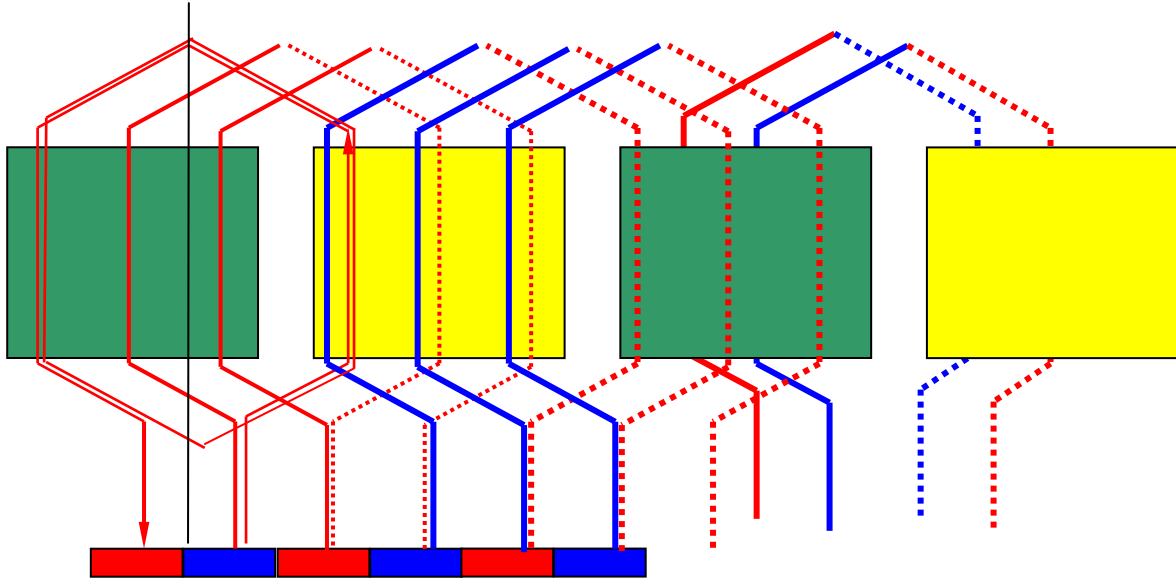
Rotor : Parte móvil de la máquina que puede girar libremente en el interior del estator. Tiene forma cilíndrica (puede ser hueco si es de gran tamaño) y está constituido por láminas de material ferromagnético con alto contenido de Si, apiladas juntas pero separadas por material aislante (para disminuir las pérdidas por corrientes de Foucault), en cuya periferia se practican unas ranuras dirigidas según las generatrices en las que se alojan los conductores activos de las bobinas del devanado inducido.

- Devanado rotórico : En las máquinas de corriente continua suele ser el inducido mientras que en las de alterna el inductor, salvo en los motores de asíncronos de inducción)
- Entrehierro : Espacio de aire que separa la superficie interior del estator de la exterior del rotor, que permite el giro de este último, y a través del cual se cierra el circuito magnético, siendo el responsable de casi toda la reluctancia (resistencia magnética) de dicho circuito, por lo que en general debe de ser pequeño.
- Colector de delgas : EL colector es un dispositivo cilíndrico, montado sobre el eje del rotor en una de sus bases, que sirve para conectar el circuito eléctrico giratorio con el circuito eléctrico externo estático, y que en el caso de las máquinas de c.c. sirve además para rectificar (convertir en unidireccional lo más próxima a continua posible) la corriente alterna inducida en las espiras del devanado rotórico. Para ello se encuentra dividido en sectores circulares, denominados delgas, de material metálico de baja fricción, como el bronce o el latón, aislados entre sí y en un número igual al de las bobinas que haya en el rotor. En los de alterna en cambio, está constituido por cilindros iguales aislados, uno a continuación del otro conectados al principio y fin de cada bobina cerrando la espira.
- Collar portaescobillas y escobillas : Las escobillas son unos bloques cilíndricos o prismáticos, generalmente de grafito (que es un buen conductor de la electricidad y tiene buenas capacidades lubricantes en seco) que están fijadas en el espacio, sujetas a una pieza metálica que envuelve el colector (collar portaescobillas), que apoyan con cierta presión sobre el mismo, y a través de las cuales pasa la corriente del colector al circuito eléctrico externo. Deben ir situadas en las líneas neutras del campo inductor (ejes de los polos) ya que en esos puntos se invierte el sentido de la corriente en la espira del inducido. Debe haber tantas escobillas como polos tenga el inductor.
- Escudos laterales : Piezas circulares que cierran el estator por sus bases y al cual se unen, en cuyo interior se encuentran los cojinetes que sustentan el eje del rotor.

5. INDUCIDO E INDUCTOR :

Según la forma de conectar entre sí y con las delgas las bobinas del inducido se distinguen dos tipos principales de devanados :

- IMBRICADOS



-
-
- ONDULADOS

6. **CONMUTACIÓN.** El paso de la escobilla de una delga a la siguiente se denomina conmutación. Para que no se produzcan chispas es preciso que la tensión inducida en la delga saliente y en la entrante sean exactamente nulas en el momento de la conmutación, pues de otra forma, si existe una ddp entre las delgas, existirá esa misma ddp entre la escobilla y la delga siguiente, y dado que la distancia entre escobilla y delga no es nula en toda la superficie de la escobilla (aunque siempre debe haber contacto) se producirá un arco eléctrico (chispa). Por ello es preciso que la conmutación se produzca exactamente en la línea neutra de la máquina, sobre la cual deberán montarse las escobillas. Si la máquina está en vacío, no hay problema, pero si está en carga, la reacción del inducido adelanta la línea neutra respecto a la de vacío (en motores) o la retrasa (en generadores), por lo que la escobilla debería desplazarse exactamente el mismo valor lo cual no es posible (está fija). Para evitar este problema es por lo que las máquinas de cierta potencia montan polos auxiliares, que son unos pequeños polos montados entre medias de los polos del inductor

7. FORMULAS FUNDAMENTALES

➤ Fuerza electromotriz (o contraelectromotriz en motores) inducida.

$$E' = K \cdot \phi \cdot n \quad K = \frac{Z \cdot 2P}{60 \cdot 2a} \quad \text{siendo } \phi = \phi(I_e)$$

➤ Par

$$T = K_t \cdot \phi \cdot I_i \quad K_t = \frac{Z \cdot 2 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot 2a} \quad \text{siendo } \phi = \phi(I_e)$$

En las que

Z = número de conductores activos

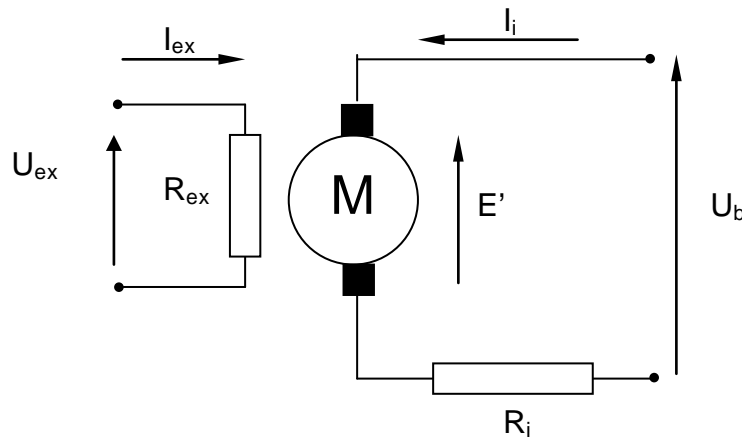
P = número de pares de polos

a = número de circuitos en paralelo

ϕ = Flujo inductor por polo (que es función de la intensidad del inductor o excitación)

➤ Segunda ley de Kirchoff aplicada al circuito equivalente :

El circuito eléctrico del motor se puede representar mediante el siguiente circuito



$$U_b = E' + R_i \cdot I_i$$

8. CURVAS CARACTERÍSTICAS.

El comportamiento de un motor en funcionamiento se representa mediante unas curvas características. Las más importantes son :

- **Característica mecánica o curva par-velocidad.** La más importante de todas. Indica como varía el par mecánico entregado en función de la velocidad de giro del motor.
- **Característica de par :** Variación del par en función de la intensidad de corriente en el inducido
- **Característica de velocidad :** como varía la velocidad de giro en función de la intensidad del inducido

9. PÉRDIDAS EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS. BALANCE DE POTENCIAS Y RENDIMIENTO.

El balance energético en una máquina de continua es como sigue :

- Potencia absorbida de la red : Tensión en bornes por intensidad de la línea
 $P_{abs} = U_b \cdot I_L$ (intensidad variable con la carga y el tipo de conexión)
- Potencia eléctrica interna, o potencia interna, es la potencia absorbida menos las pérdidas eléctricas debidas al efecto joule en las diferentes resistencias (devanados inductor e inducido, devanado de los polos auxiliares de conmutación si existe, escobillas y demás resistencias de regulación y arranque).

$$P_{ei} = P_{abs} - P_{cui} - P_{cue} - P_{es} - P_{paux} - P_{rre} - P_{arr}$$

- Potencia útil en el eje : es la que el eje comunica al sistema mecánico y se obtiene como la potencia eléctrica interna menos :
 - Las pérdidas en el hierro, debidas a las corrientes parásitas de Foucault y a la histéresis del materia
 - Las perdidas mecánicas por rozamiento del eje en los cojinetes y por la fricción aerodinámica del rotor y la absorbida por los ventiladores

$$P_u = P_{ei} - P_{FE} - P_m$$

- Rendimiento : Como siempre representa el cociente entre la potencia útil (obtenida en el eje) y la potencia absorbida (de la red eléctrica), y debe ser por lo tanto, menor que la unidad. Es frecuente expresarla en tanto por ciento

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{P_{abs} - P_{perdidas}}{P_{abs}}$$

10. MOTORES DE CORRIENTE CONTÍNUA

Tipos de motores de corriente continua :

a) Excitación Independiente

- El inductor y el inducido se alimentan de dos fuentes de c.c. independientes. Ventaja : la carga de la máquina no afecta a la corriente de excitación. Inconveniente : son necesarias dos fuentes distintas de CC.

Peculiaridad : El flujo de excitación es constante $\rightarrow K.\Phi = \text{constante}$

Carácterística de Velocidad . Es una recta practicamente horizontal, de pendiente negativa que disminuye un poco con la Intensidad (Ya que $R_i.I$ es como mucho el 6% de U)

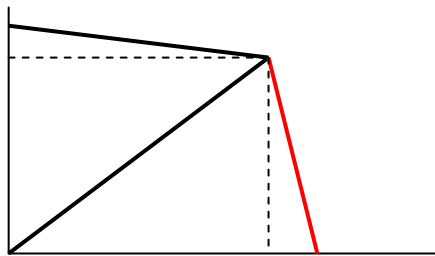
$$n = \frac{E'}{K.\Phi} = \frac{U - R_i.I}{K.\Phi} = \frac{U}{K.\Phi} - \frac{R_i}{K.\Phi}.I$$

Característica de Par . Es una recta que pasa por el origen. El par es proporcional a la intensidad y crece con ésta .

$$T = K.\Phi.I$$

Característica mecánica Es una recta practicamente vertical de pendiente negativa que corta al eje de absisas en la velocidad de vacio ($T=0$)

$$\left. \begin{array}{l} U - R_i.I = nK\Phi \Rightarrow I = \frac{U - nK\Phi}{R_i} \\ T = K\Phi.I \Rightarrow I = \frac{T}{K\Phi} \end{array} \right\} \Rightarrow T = \frac{(.K.\Phi)^2}{R_i} \left(\frac{U}{K\Phi} - n \right) \Rightarrow T = \frac{(.K.\Phi)^2}{R_i} (n_0 - n)$$



b) Autoexcitados :

- Excitación Shunt (Derivación) El devanado de excitación está en paralelo con el inducido, de forma que ambos están a la misma tensión. Su comportamiento es parecido a los de excitación independiente con la diferencia que la intensidad absorbida de la línea es la suma de la del inducido y la de la excitación (esta última es constante), ya que la intensidad de excitación, y por lo tanto el flujo son independientes de la carga (constantes). Suele existir una resistencia de regulación en serie con el devanado de excitación.

- Excitación Serie. El devanado de excitación se conecta en serie con el inducido, por lo que la corriente que circula por ambos es la misma, y coincide con la de la línea. Por ello, el devanado de excitación tiene pocas espiras y de gran sección. La intensidad de excitación depende de la carga, lo cual es un inconveniente, pero tienen un elevadísimo par de arranque y a baja velocidad.

Peculiaridad : El flujo es proporcional a la intensidad, luego $K\Phi = K_1.I$

Característica de velocidad : Es casi una hipérbola, ya que el numerador varía muy poco con la intensidad (maximo un 6%), es decir es casi constante

$$n = \frac{E'}{K.\Phi} = \frac{U - (R_i + R_S).I}{K_1.I}$$

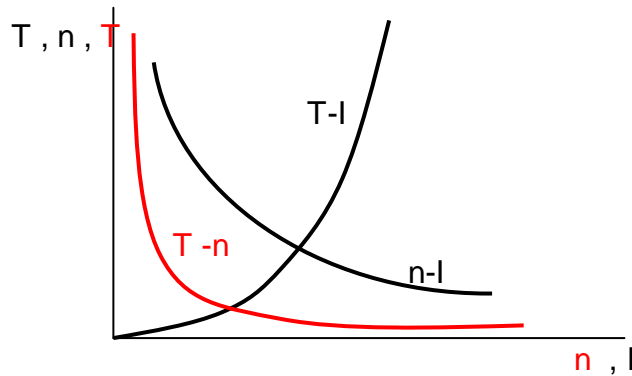
Carácterística de par. Es una parábola que pasa por el origen :

$$T = K.\Phi.I = K_1.I^2$$

Característica mecánica . El par es aproximadamente inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad, es decir, como una hipérbola pero más aguda.

$$I = \frac{U}{(K_1.n + (R_i + R_S))} = \sqrt{\frac{T}{K_1}} \Rightarrow T = \frac{K_1.U^2}{(K_1.n + (R_i + R_S))^2}$$

3º.- Excitación Compound (compuesta) : Parte del devanado de excitación está e serie con el inducido y parte en paralelo. De forma general, podemos decir que su comportamiento será



intermedio entre los dos anteriores, acercándose más al uno o al otro en función de si la mayor parte del devanado está en serie o en derivación. Puede ser :

- Compound Larga : Una parte del devanado de excitación está en serie con el inducido y la otra en paralelo. Por la parte de la excitación serie circula únicamente la intensidad del inducido. Se evita el riesgo de envalamamiento de los motores serie al disponer parte del devanado de excitación en paralelo.
- Compound corta una parte del devanado de excitación está en serie con la alimentación y otra en paralelo. Por la parte serie circula la corriente de la línea, esto es la del inducido mas la de la excitación paralelo

En uno y otro caso puede ser :

- Compound aditiva o hipercompound cuando el campo creado por las dos partes del devanado de excitación tienen el mismo sentido
- Compound diferencial cuando los campos tienen sentidos opuestos. Se usa poco debido a que agudiza el problema de envalamamiento (cuando se anulan ambos campos, es decir, antes de llegar al vacío)

Regulación de velocidad . De una forma general podemos decir que la velocidad de los motores de CC se regula variando la intensidad de excitación

1º Variando la tensión de alimentación, cuando se dispone de una fuente regulable

2º Poniendo una resistencia.

Arranque : Los motores de continua tienen par de arranque por lo que arrancan por sí solos al conectar la alimentación. No obstante, como en el arranque no hay f.c.e.m. la intensidad que circula por el inducido es muy alta, pues solo la limita la resistencia ohmica del devanado, que por ser de hilo conductor es muy baja. Por eso

TEMA 9 : MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA.

1. GENERALIDADES SOBRE CORRIENTE ALTERNA

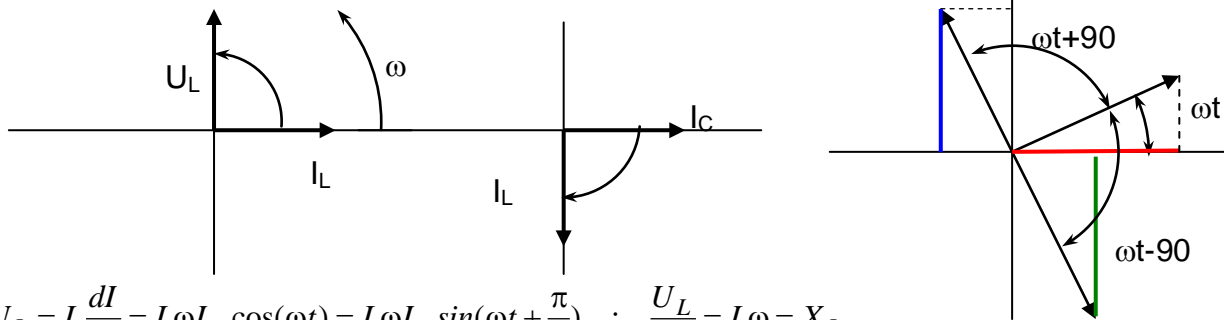
La **corriente alterna** es aquella cuyo sentido varía periódicamente en el tiempo. La corriente alterna industrial es de tipo senoidal, es decir, que sus magnitudes fundamentales (tensión e intensidad) varían periódicamente con el tiempo siguiendo una función de tipo seno de la siguiente forma : $E = E_0 \cdot \sin \omega \cdot t$ $I = I_0 \cdot \sin \omega \cdot t$

Dado que el módulo de la proyección de un vector giratorio sobre el eje de ordenadas varía igualmente de forma senoidal, se pueden representar estas magnitudes de la corriente alterna mediante un vector giratorio, denominado **fasor**, cuyo módulo coincide con el valor máximo E_0 o I_0 . De esta forma, el valor de la velocidad angular de giro del fasor ω , (pulsación) vendrá relacionado con la frecuencia y el periodo de la corriente alterna por la expresión $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Al ángulo girado por el fasor respecto al origen de tiempos se le denomina **fase**, y se considera como sentido positivo de giro el contrario a las agujas del reloj. Cuando se comparan magnitudes de la misma frecuencia, se consideran los fasores congelados en una determinada posición, de manera que los ángulos que forman los fasores que representan distintas magnitudes se denominan **desfases**.

Existen dos elementos pasivos cuyo comportamiento en alterna es de gran importancia :

- **La bobina o autoinducción** : La tensión de la corriente que lo atraviesa experimenta un adelanto de fase (respecto de la intensidad) de 90° . En continua se comporta como un conductor normal.
- **El condensador** : La tensión experimenta un retraso de 90° respecto de la corriente . Si se tratase de corriente continua, simplemente se cargaría a la tensión aplicada, creando una barrera de potencial que impide el paso de la corriente como si de un interruptor abierto se tratase.



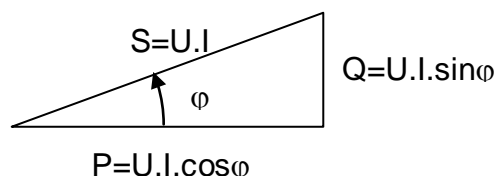
$$U_L = L \frac{dI}{dt} = L\omega I_0 \cdot \cos(\omega t) = L\omega I_0 \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad ; \quad \frac{U_L}{I_L} = L\omega = X_L$$

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{C \cdot dU}{dt} \Rightarrow U = \frac{1}{C} \int I \cdot dt \quad U_C = -\frac{I_0}{C\omega} \cdot \cos(\omega t) = \frac{I_0}{C\omega} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad ; \quad \frac{U_C}{I_C} = \frac{1}{C\omega} = X_C$$

Aplicando la ley de Ohm en alterna, la relación entre la tensión y la intensidad representará la oposición al paso de la corriente eléctrica del circuito, que como vemos, tanto en bobinas como en condensadores, depende de la frecuencia de la corriente. A éste tipo de resistencia es lo que llamamos reactancia. Cuando la reactancia introduce un avance de fase se denomina de tipo inductivo o inductancia, mientras que si produce un retraso de fase se denomina de tipo capacitativo o capacitancia. En general, la reactancia se compondrá de una parte inductiva y otra capacitativa. AL efecto conjunto de la resistencia y la reactancia se le denomina impedancia, que utilizando números complejos se puede expresar como :

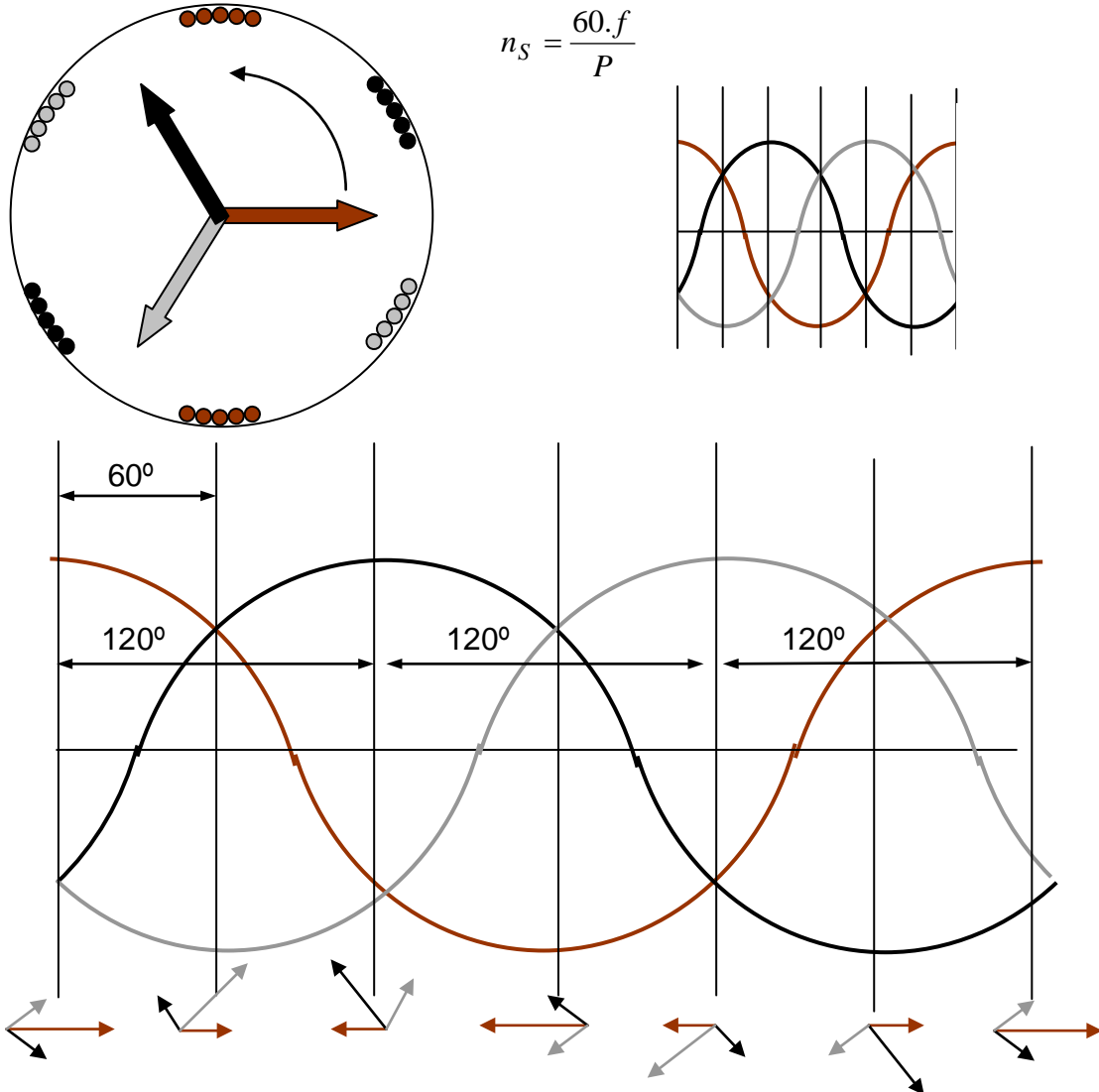
$$Z = R + jX = R + jL\omega - \frac{1}{C\omega} j$$

Cuando se aplica una tensión entre los extremos de la impedancia y se cierra el circuito, circula una corriente y la impedancia absorbe una cierta potencia. La parte real de la impedancia dará lugar a una potencia de naturaleza resistiva que se denomina potencia activa y cuya expresión es $P_{activa} = U \cdot I \cdot \cos \phi$, Mientras que la parte imaginaria dará lugar a una potencia de tipo reactivo que irá dirigida hacia arriba o hacia abajo según que predomine la inductancia o la capacitancia respectivamente, que se denomina potencia reactiva y que se mide en VA_r (Voltamperios reactivos) y se expresa como $Q = U \cdot I \cdot \sin \phi$, Siendo la potencia aparente $S = U \cdot I$ y se mide en VA (Voltamperios). Con las 3 potencias se construye el siguiente TRIÁNGULO DE POTENCIAS :



2. CAMPOS MAGNÉTICOS GIRATORIOS.

Cuando se aplican corrientes alternas desfasadas entre sí ciertos ángulos (eléctricos) sobre bobinas dispuestas en la cara interior del estator separadas entre sí ángulos (geométricos) iguales a los desfases, entonces se crea en el interior un campo magnético giratorio, a pesar de que las bobinas estén fijas. La velocidad con que gira dicho campo depende de la frecuencia de la señal aplicada y del número de pares de polos, y se denomina velocidad de sincronismo :



3. MOTORES SÍNCRONOS :

Cuando un conductor del inducido por el que circula una corriente pasa bajo un polo del inductor aparece sobre el mismo una fuerza cuyo sentido viene dado por la ley de la mano izquierda, y que le impulsa a girar. Cuando pase por el polo contiguo (que es de polaridad opuesta) aparecerá una fuerza en sentido contrario que lo hará retroceder hasta una posición de equilibrio intermedia. Pero si el conductor se alimenta con una corriente alterna de frecuencia igual a la de sincronismo, al llegar al polo contiguo el sentido de circulación de la corriente se habrá invertido, de forma que la fuerza que sobre el eje ejerce el polo será del mismo sentido que la primera, con lo que le impulsa de nuevo a seguir girando en el mismo sentido, y así al pasar bajo cada polo del estator, produciéndose un giro continuo del rotor a una velocidad constante e igual a la de sincronismo. Este tipo de motor carece de par de arranque, ya que para que el movimiento se mantenga es preciso hacer girar inicialmente el rotor a la velocidad de sincronismo .

4. MOTORES ASÍNCRONOS O DE INDUCCIÓN.

Estos motores son los más usados de todos debido a su sencillez y a que poseen un elevado par de arranque. Si el devanado inducido se cierra sobre sí mismo, al crear el campo magnético giratorio mediante corrientes polifásicas en el inductor, el flujo variable que corta los conductores del rotor induce en los mismos una corriente eléctrica, exactamente igual que en un transformador, que circulará por un circuito de muy baja impedancia. Esta corriente produce a su vez un campo magnético que al interactuar con el giratorio del estator da lugar a un par que pone en movimiento el rotor en el mismo sentido que el campo giratorio. La velocidad del rotor sigue aumentando aproximándose a la velocidad del campo giratorio (velocidad de sincronismo), pero sin llegar a alcanzarla nunca, pues si la alcanzase, el flujo que atravesaría los conductores del rotor sería constante y desaparecería la corriente inducida que crea el campo magnético del inducido, y por lo tanto, el rotor se frenaría. Como se vé, estos motores no necesitan colector, ya que no es necesario suministrar energía eléctrica al inducido.

Se denomina deslizamiento a la diferencia relativa entre la velocidad de sincronismo y la velocidad real de giro del motor, de forma que conocido éste y la velocidad de sincronismo se obtiene la velocidad de giro de la siguiente expresión

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \Rightarrow n = n_s(1 - s)$$

En cuanto a la frecuencia de la corriente inducida, en el arranque será la misma que la del inductor, y nula si la velocidad es la de sincronismo. El campo magnético inducido gira a la misma velocidad que el inductor (n_s), y como el rotor gira a una velocidad menor (n), entonces el campo magnético inducido gira respecto al rotor a una velocidad que será la diferencia de ambas velocidades, esto es, a la velocidad de deslizamiento absoluta ($n_r = n_s - n = s \cdot n_s$ $2\pi \cdot f_r = s \cdot 2\pi \cdot f_s$) y por lo tanto:

$$f_r = s \cdot f_e$$

ROTOR EN JAULA DE ARDILLA : Debido a su principio de funcionamiento, los motores de inducción no tienen por qué tener un rotor bobinado. Por eso es muy frecuente que tengan rotores "en jaula de ardilla", que están constituidos por una serie de conductores colocados según las generatrices de un tambor (como los barros de una jaula) que se interconectan por sus extremos mediante sendos anillos conductores colocados en las bases del tambor, de forma que constituyan un circuito cerrado de conductores paralelos. Este tipo de rotor se caracteriza por tener muy baja resistencia eléctrica, lo que lleva a intensidades de arranque muy grandes (por eso los conductores tienen una sección relativamente grande) y unos pares de arranque relativamente bajos.

5. RENDIMIENTO Y BALANCE DE POTENCIA

El rendimiento es, como siempre, el cociente entre la potencia útil entregada en el eje de giro y la potencia absorbida de la red (si es trifásico $P_{\text{activa}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$)

Potencia generadora del campo : es la potencia absorbida de la red menos las pérdidas en el cobre del estator :

Potencia transmitida al rotor : Es la potencia en el entrehierro menos las pérdidas magnéticas debidas al flujo de dispersión y a las corrientes de Foucault en el estator.

Potencia eléctrica interna : Es la potencia recibida en el rotor menos las pérdidas en el cobre del rotor y las del hierro del rotor (éstas últimas se suelen despreciar, ya que la frecuencia de las corrientes del rotor suele ser muy baja)

Potencia útil o potencia en el eje: es la potencia eléctrica interna menos las pérdidas mecánicas (por rozamiento en los cojinetes de apoyo del eje del rotor, y las debidas a la energía que consumen los ventiladores que refrigeran el interior de la máquina)

6. CURVAS CARACTERÍSTICAS.

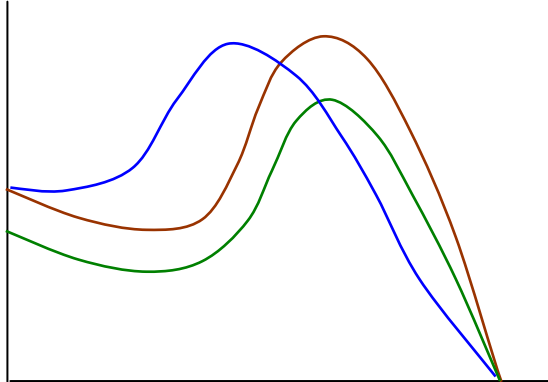
La curva característica mecánica de los motores de inducción presenta un valor máximo de par para una determinada velocidad. En el arranque presentan un cierto valor no nulo del par que va creciendo hasta el máximo en una zona de funcionamiento inestable (el par aumenta con la velocidad) y a partir de ahí, disminuye hasta anularse al alcanzar la velocidad de sincronismo, en una zona de funcionamiento estable (aumenta el par al disminuir la velocidad).

Influencia de :

La resistencia del rotor : El valor del par máximo no varía, pero se presenta cada vez a velocidades más bajas, hasta un cierto valor en el que coincide con el par de arranque.

La tensión de alimentación. El valor del par es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación

La frecuencia de la tensión de alimentación . El par es inversamente proporcional a la frecuencia de la tensión de alimentación.



$$T = \frac{K \cdot \Phi \cdot E_r \cdot n_s (n_s - n)}{n_s^2 R_r^2 + (n_s - n)^2 X_r^2} \cong \frac{K \cdot \Phi \cdot E_r (n_s - n)}{n_s R_r^2}$$

7. COMPORTAMIENTO DEL MOTOR SEGÚN LA CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD

8. ESTUDIO DE LAS CONEXIONES DE UN MOTOR TRIFÁSICO

9. ARRANQUE.

Como en el arranque no existe fuerza contraelectromotriz y la reactancia del rotor es muy baja, la intensidad que circula por el rotor (inducido) es muy alta, lo cual es indeseable, pues disminuye la intensidad suministrada a otros receptores, y puede dar lugar a que se quemen los conductores del inducido. El valor de la intensidad de arranque determina el tipo de motor de inducción (A,B, C y D jaula de ardilla, E y F rotor bobinado), pero en todos los casos nos interesa reducir ésta intensidad, para lo cual se pueden seguir varios métodos :

- Arranque en Estrella-Triángulo
- Arranque por autotransformador
- Arranque por reactancias
- Arranque con interruptor centrífugo

10. REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Como la velocidad asíncrona depende de la velocidad síncrona (del número de polos y de la frecuencia) y del deslizamiento, podremos variar la velocidad del motor modificando cualquiera de éstos tres factores :

- Cambio del número de polos
- Cambio de frecuencia
- Cambio de la tensión de alimentación.

11. MOTORES FRACCIONALES :

11.1. MOTORES MONOFÁSICOS

Cuando colocamos un rotor cerrado en el campo magnético creado por una bobina alimentada por corriente alterna, se induce en el mismo una corriente pulsatoria, que crea un campo magnético alineado con el inductor, y por lo tanto no aparece ningún par de giro. Pero si nosotros forzamos a girar al rotor, entonces el campo inducido tiene una componente tangencial, dirigida según el sentido de giro, que al interactuar con el campo inductor fijo, da lugar a un par en el sentido de giro, de valor tal que es capaz de mantener el giro. Por lo tanto, lo único que se necesita es crear un par de arranque que inicie el giro, ya que luego se automantendrá. Para ello destacaremos 2 procedimientos básicos :

Por espira en sombra o cortocircuito

De fase partida

De fase partida con condensador.

11.2. MOTORES UNIVERSALES

Un motor universal es un motor serie de C.C. que se alimenta con corriente alterna. Como tanto inductor como inducido se alimentan con corrientes en fase, se consigue que el par generado actúe siempre en el mismo sentido, manteniendo el movimiento de giro. Al saltar las escobillas de delga se vuelve a repetir el ciclo, por lo que el campo en el inducido es de doble frecuencia que la del estator, y el motor gira aproximadamente al doble de la velocidad de sincronismo.

Como quiera que la reactancia de los devanados en alterna es mayor que su resistencia en continua, y como la corriente alterna produce mayores pérdidas en el hierro (ya que aparecen corrientes de Foucault), los motores universales tienen menor rendimiento y par funcionando en alterna que en continua.