



***DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES***

***Apuntes de la asignatura:  
MÁQUINAS Y EQUIPOS  
(transmisiones – lubricación)***

***Ingeniería civil Plan '97***

***Ing. Humberto Preziosi***

## TRANSMISIONES – PROPULSIÓN

### Generalidades:

Para cualquier sistema de transformación de la energía inherente a los combustibles, ha de ser primordial obtener de la cantidad de energía calórica utilizada la máxima cantidad de trabajo mecánico.

Los tres métodos de propulsión (Diesel – Eléctrico – Vapor) tienen motivos de pérdidas esencialmente diferentes.

El efecto útil, esto es la relación entre la energía en la periferia de la rueda y la potencia energética obtenida de la fuente térmica, varía según sea el carbón, fuel o carburante diesel. Entre todas las máquinas térmicas, el motor Diesel (ver ciclo) es sin duda el que tiene el máximo rendimiento térmico, del orden del 40 – 45%.

Los órganos de transmisión mecánicos, hidráulicos o eléctricos del vehículo considerado, disminuyen el efecto total a un valor del 32 – 37%. De las 10000Kcal contenidas en 1Kg de gas oil, se aprovechan pues en la periferia de la rueda, para propulsar el vehículo, de 3200 a 3700Kcal. Frente a este rendimiento del ciclo Diesel, el ciclo de Vapor alcanzaba el 11%, esto es de las 7000Kcal contenidas en 1Kg de carbón, se aprovechaba en el mejor de los casos de 770 a 900Kcal.

A mitad de estos valores, se encuentra el efecto útil de la tracción eléctrica, alrededor de un 21% del efecto útil total.

Diagramas de pérdidas:

<u>Diesel:</u>	100%	{	55/60% pérdidas en el motor Diesel (irradiación – refrigeración – escape). 8% mecánicas en la transmisión 32/37% efecto útil disponible para la tracción
<u>Eléctrica:</u>	100%	{	70% pérdidas en central de energía 3% pérdidas línea de transmisión 4% pérdidas mecánicas en la locomotora 23% efecto útil disponible
<u>Vapor:</u>	100%	{	60% pérdidas en máquina de vapor (expansión incompleta – estrangulación – pérdidas mecánicas) 25% pérdidas en la caldera de vapor 4% pérdidas en consumos propios (bombas de alimentación – distribución) 11% efecto útil disponible

Comparación de sistemas de tracción:

Si bien la locomotora de vapor tiene un rendimiento pequeño (del orden del 11%), puede alcanzarse un 18% en las locomotoras de turbina, todo ello a costa de grandes complicaciones y elevados gastos.

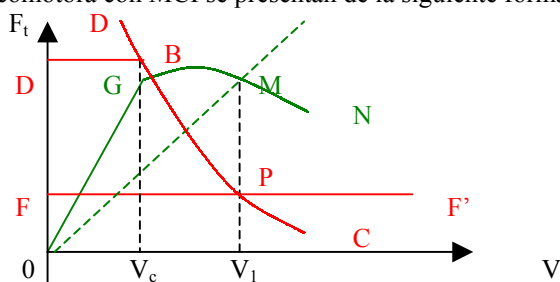
Esta razón llevó a la adaptación de motores de combustión interna, dado que su rendimiento es del orden del 35%. No obstante ello, el motor de combustión interna desde el punto de vista de la tracción ferroviaria, no presenta características tan favorables como el de la máquina a vapor.

En efecto, en una locomotora a vapor, el esfuerzo de tracción  $F_t$  varía con la velocidad  $V$  de acuerdo con una curva  $F_t=f(V)$  expresada por la curva ABC, la cual se encuentra limitada en su parte superior por la adherencia DB, o sea que la curva del esfuerzo de tracción utilizable esta representada por DBC.

En general, el esfuerzo de tracción tiene un valor elevado en el arranque, que es el punto en que la resistencia a vencer es mas grande; permanece luego casi constante hasta la velocidad crítica  $V_c$  y luego disminuye según una variación hiperbólica  $F_t = (K \text{ HP})/V$ .

En cuanto a la potencia  $P$ , como ella es el producto del esfuerzo tractivo por la velocidad, se representa por la curva OGN. A partir de  $V_c$  la potencia de la locomotora varía poco con la  $V$ . A la velocidad óptima  $V_1$ , correspondiente a la potencia máxima  $V_1M$ , el valor del esfuerzo tractivo  $V_1Q$  es muy inferior al máximo, que se obtiene en el arranque y se mantiene casi constante hasta la velocidad crítica  $V_c$ .

Si ahora consideramos 2 locomotoras, una a vapor y la otra con un motor de combustión interna, ambas de la misma potencia  $P$  y las obligamos a traccionar el mismo tren (o sea similar resistencia al avance), las características de la locomotora con MCI se presentan de la siguiente forma:



Por razones constructivas, funcionamiento económico y de buena conservación, el número de r.p.m. de un MCI se mantiene entre determinados límites de variación, entre esos valores el esfuerzo tractivo no puede cambiar mucho a menos de modificar desfavorablemente el funcionamiento del motor.

El esfuerzo tractivo se puede considerar constante y representado por la recta  $FF'$ , que pasa por  $Q$ , ya que ambas locomotoras remolcan al mismo tren. Al ser la potencia proporcional a la velocidad, estará representada por la línea recta  $OM$  que pasa por  $M$  puesto que hemos supuesto que el MCI tiene potencia igual a la locomotora de vapor. Vemos pues que, el MCI desarrolla en el arranque y a velocidades menores a  $V_c$  un esfuerzo tractivo menor que la locomotora a vapor y por tanto la aceleración será menor y en el arranque poco útil.

Por otra parte mientras que en la locomotora a vapor por la unión mediante bielas entre el órgano motor (máquina de vapor) y las ruedas es permanente o sea que la locomotora a vapor se pone en movimiento al mismo tiempo que la máquina, el MCI no puede arrancar sin el auxilio de una fuente auxiliar que lo lleva a una velocidad de rotación suficiente para su funcionamiento.

Para poder adaptar el MCI a la tracción guiada es necesario reproducir lo mejor posible la curva de potencia y de esfuerzo tractivo de la locomotora a vapor, interponiendo entre el motor y las ruedas una transmisión.

## TRANSMISIÓN:

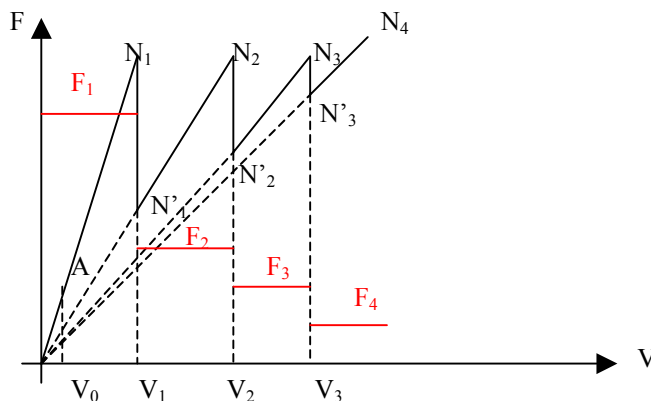
Hemos visto que en el MCI, las r.p.m. del cigüeñal del motor Diesel se mantiene en valores muy restringidos, mientras que el número de vueltas de las ruedas deberá variar en límites muy amplios ya que la velocidad de marcha varía entre los 0 y 150Km/h. Es necesario disponer de un órgano que sea capaz de transformar la velocidad de régimen del motor en diferentes marchas del vehículo.

Para ello se recurre a una transmisión (caja de velocidades en la transmisión mecánica) que permite por un lado una desmultiplicación de la velocidad de rotación, de modo que el par transmitido se encuentre suficientemente incrementado para producir en el arranque y a velocidades iguales o inferiores a la crítica, aceleraciones suficientes.

Las transmisiones pueden ser mecánicas (transformadores de par discontinuo), eléctricas y/o hidráulicas (transformadores de par continuo).

### a) Transmisión mecánica:

En el caso de las primeras, se utilizan con potencias inferiores a los 300HP, son menos costosas y menos pesadas que las eléctricas o hidráulicas pero también de superior rendimiento (90% para las mecánicas contra 75 – 80% en las eléctricas). Como inconveniente, para pasar de una velocidad a otra es necesario desbrigar o sea interrumpir el esfuerzo de tracción, de ahí resultan caídas bruscas de potencia que impiden obtener velocidades comerciales elevadas.



Cuando se pasa de  $V_1$  a  $V_2$  el esfuerzo tractivo cae de  $F_1$  a  $F_2$  y así sucesivamente hasta que alcanzada la máxima velocidad, los trenes de engranajes intermedios sean eliminados y el eje motor ataca directamente al eje de la transmisión y por tanto a la caja cónica o de los ejes motrices. La curva de potencia  $AN_1N'_1N_2$  se presenta en forma de diente de sierra. Durante la duración del desembragado la fuerza viva del vehículo suministra el trabajo necesario para vencer las diferentes resistencias al movimiento.

### b) Transmisión eléctrica:

Este tipo se utiliza para potencias superiores a 300HP. Comparada con la mecánica, suministra una curva de potencia más continua y regular. Cuando funcionan automáticamente, protegen ellas mismas el motor contra falsas maniobras. El motor Diesel acciona un generador que suministra corriente a los motores eléctricos que accionan las ruedas. La transmisión se hace de tal modo que para una regulación determinada de la inyección de combustible (volumen inyectado por vuelta) la potencia se mantenga constante, cualquiera sean las condiciones de marcha. Ello implica constancia de la potencia de la potencia desarrollada en las llantas, o sea  $F_t \times V = cte$ . Para que ello suceda es necesario que el producto de la tensión en los bordes del generador por la intensidad de corriente permanezca constante o sea  $EI = K$ .

El problema se transforma en estudiar una generatriz tal que para un régimen determinado, la curva  $E = E(I)$  tome la forma de una hipérbola equilátera.

**PROPULSIÓN:**Definición y unidades:

Propulsar un vehículo es proveerlo de la fuerza necesaria para vencer las resistencias al movimiento y acelerar el vehículo (vencer su inercia).

Los radios de mayor aceleración (mayor fuerza  $TE - R$ ) son obtenidos a partir del reposo.

La potencia de un motor de combustión interna (Diesel u Otto) se expresa normalmente en HP (CV).

Se Pueden definir 3 potencias:

- Potencia indicada: medida en los cilindros.
- Potencia al freno: medida en el eje de salida (normalmente en el eje del dinamómetro).
- Potencia efectiva: la potencia disponible en las ruedas.

Para vehículos carreteros BIP y PE dependen de las resistencias en embragues, cajas de velocidad y diferencial.

En vehículos eléctricamente propulsados se tiene solo un par de engranajes y cojinetes de punta de eje, de ahí que sus pérdidas sean menores. La potencia efectiva es la realmente disponible para propulsar el vehículo. La potencia de los motores eléctricos se expresa en KW y tenemos dos posibles definiciones:

- Potencia horaria: máxima potencia disponible en 1 hora.
- Potencia continua: máxima potencia en ilimitada operación.

La potencia horaria es de un 15 a un 25% mayor que la continua.

El motor eléctrico puede pomar sobrecargas por menor tiempo y disponer de potencias entre un 35 a 50% mayores a la horaria.

**Motor de combustión interna:**

Características de sus funciones  $P(\text{HP})$ ,  $T(\text{Nm})$  y  $g(\text{grs}/\text{HP})$ .

Determinación del diagrama  $TE = f(V)$ .

La relación entre  $v(\text{Km}/\text{h})$  y  $n(1/\text{min})$  está dada por  $V = \frac{60nD\pi}{1000U_jW}$ , con:  $V$  velocidad en  $\text{Km}/\text{h}$ ,  $n$  en  $1/\text{min}$ ,  $D$  diámetro de

la rueda en  $m$ ,  $U_j$  velocidad de transmisión (distinta para  $c/$  vehículo),  $W$  velocidad diferencial (constante para cada vehículo).

$P - \text{HP}$

$TE - \text{N}$

$$TE = 2650 \frac{P}{V} \eta$$

$\eta$  rendimiento  $0,75 - 0,85$  (según  $1^a, \dots, 5^a$  velocidad).

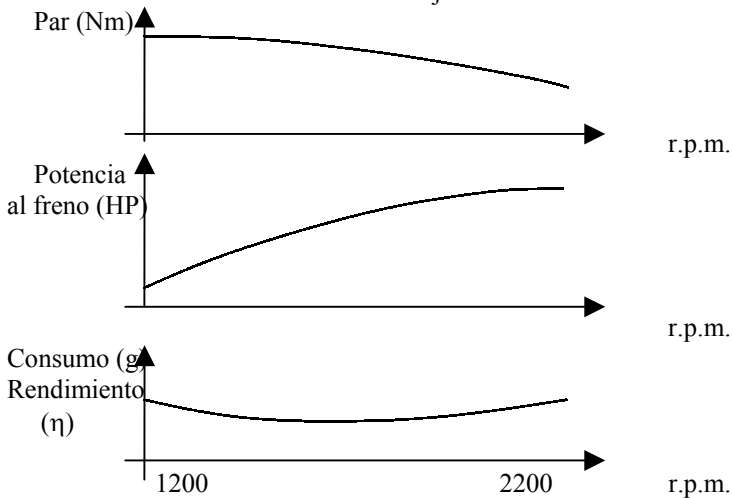
Para convertir  $P = f(n)$  en  $TE = f(V)$ :

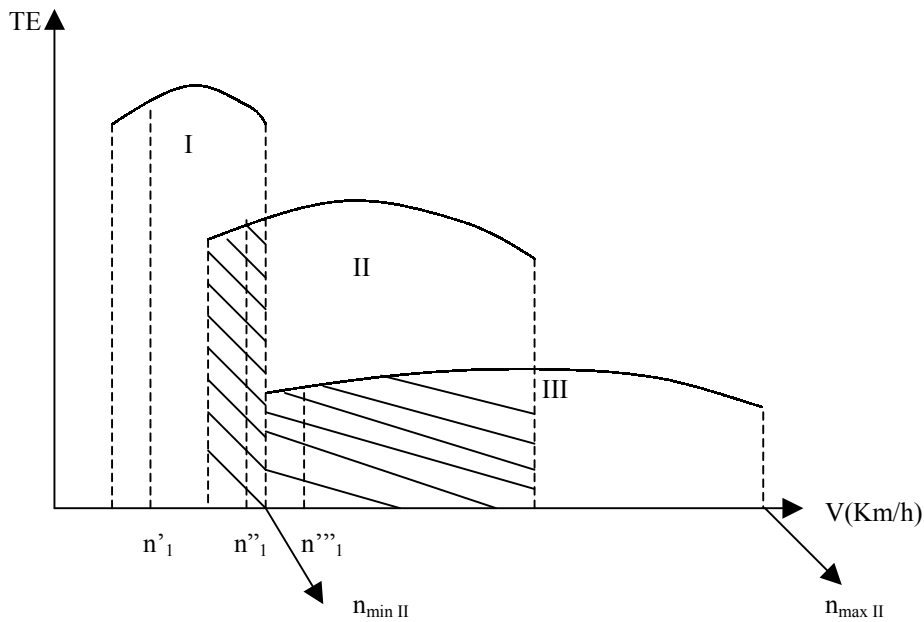
Se toma  $n_1 \rightarrow TE_1 \rightarrow V_1$  para cada engranaje de velocidad

Con  $P_1$  y  $V_1 \rightarrow TE_1$  para cada engranaje de velocidad

Si trazamos  $R = f(V)$ , obtendremos  $TE - R = f(V)$ .

La máxima aceleración se obtiene en bajas velocidades. Función de la carga de velocidad. Máxima velocidad a obtener.





### Ventajas y desventajas entre motores de combustión interna y propulsión eléctrica:

A medida que aumenta la potencia por unidad, se reducen los costos operativos por cada caballo de fuerza: si consideramos 100% al costo por HP para una locomotora de 1800HP, una de 2500HP produce 70%, una de 3000HP produce 60%, una de 3600HP produce 50% y una de 5500HP (ALCO "Century", 24ton/eje) cuesta solo 45% por unidad HP.

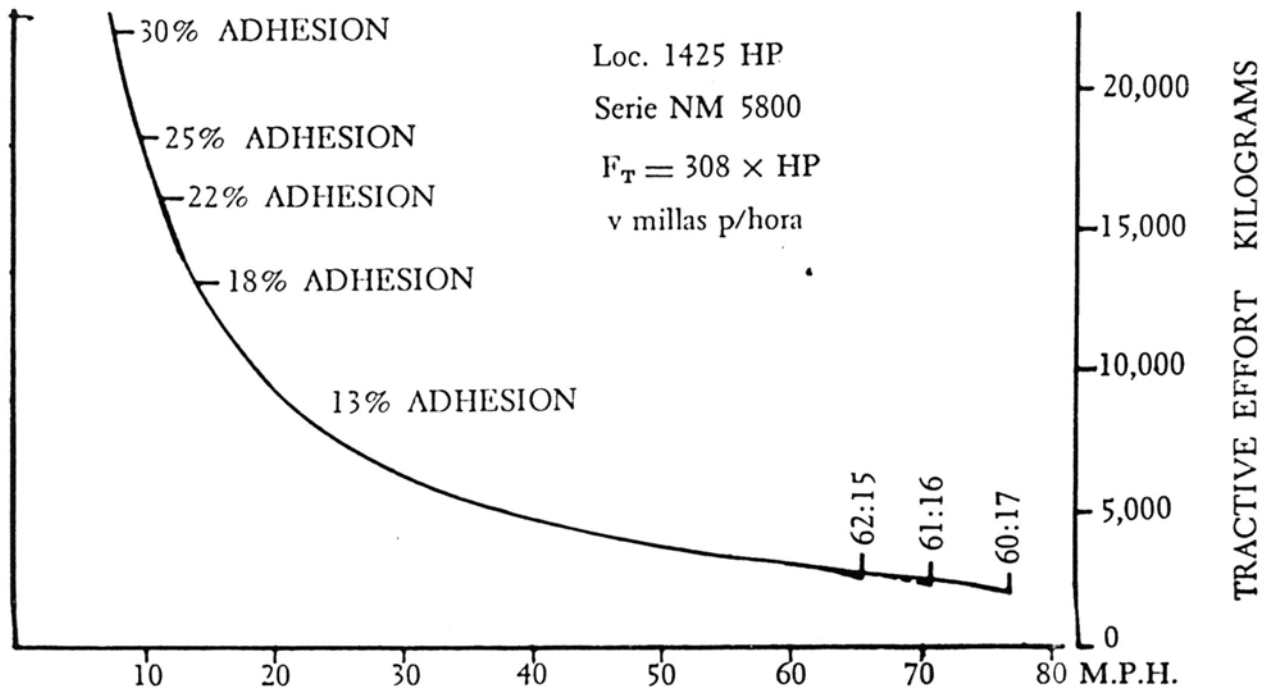
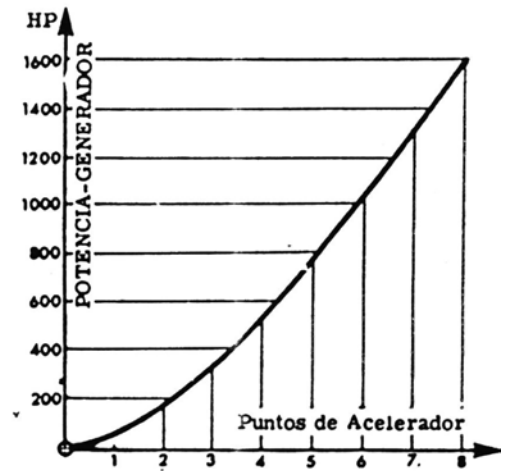
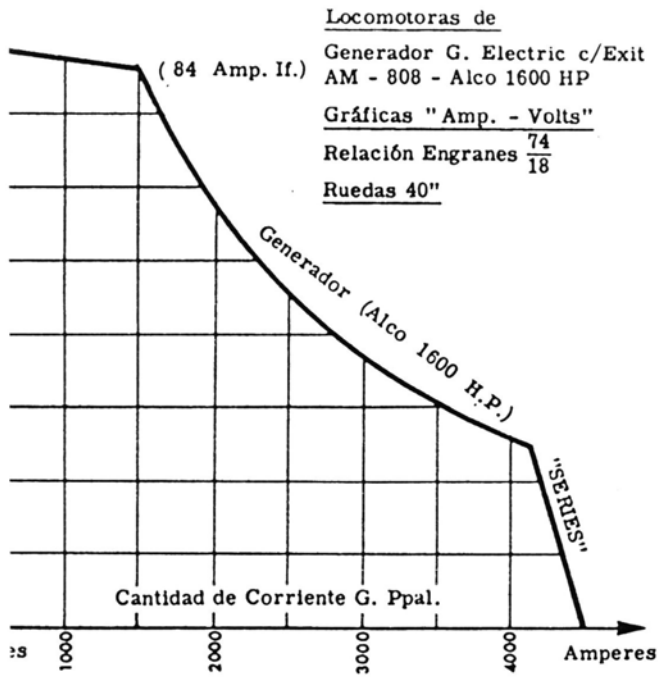
Obviamente las grandes locomotoras demandan mayores cargos fijos en las vías, estructuras, etc., pero resulta indiscutible que la gran Diesel eléctrica es a la vez más económica y arrastra mínima carga improductiva y debe emplearse en vías de gran tráfico en lugar de numerosas pequeñas máquinas en múltiple.

Con respecto a la propulsión diesel eléctrica versus la eléctrica, se reproduce aproximadamente algunas conclusiones analizadas por el Comité eléctrico de la Asociación Americana de Ferrocarriles y de Ingenieros Ferroviarios (AIR y AREA en el Comité N° 18 de enero de 1964):

"...La electricidad ha sido y será el medio más económico para impulsar ferrocarriles.

Los dividendos o tasas de retorno que ofrece la electrificación de algunas vías actuales americanas por ahora es menos atractiva que seguir usando diesels, sólo por razones de equipos existentes, limitaciones de capital, aprovechamiento de instalaciones y temporales razonamientos financieros, siendo las conclusiones favorables a la electrificación valederas para el futuro.

...El comité de la AREA (1964) recomienda finalmente: electrificar vías importantes precisamente cuando el equipo ferroviario necesita una importante renovación..."



## GENERADORES DE ELECTRICIDAD

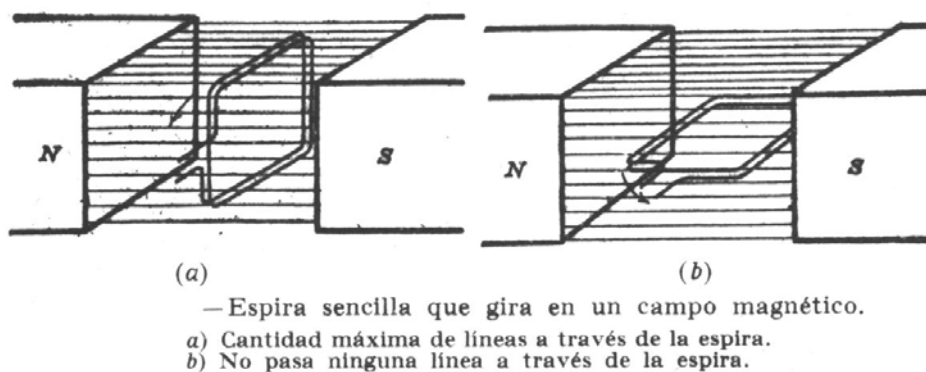
### Definición

Los generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre unos conductores eléctricos dispuestos sobre una armazón. Si mecánicamente se produce un movimiento relativo de los conductores y el campo, se generará una fuerza electromotriz, de modo que, si se enlazan a un circuito exterior, le suministrarán energía eléctrica.

En el generador de corriente continua, o dinamo el campo magnético es, ordinariamente, fijo y la armazón (inducido) la que gira. En muchos tipos de generadores de corriente alterna, la armazón está fija y es el campo el que gira. Lo mismo el inducido, en un caso, como el campo en el otro, se hacen girar por medio de una fuerza mecánica aplicada a su eje.

### Fuerza electromotriz generada

Si se hace variar el flujo que abraza una, se induce una f.e.m. en esta última. El funcionamiento del generador está fundado en este principio. El flujo que abrazan las espiras del inducido se hace variar haciéndolo variar en el campo inductor.



En la figura se representa una espira que gira en un campo magnético uniforme, producido por dos polos, N y S. En (a), el plano de la espira es perpendicular a la dirección del campo magnético y corta el máximo posible de flujo. Sea  $\phi$  este flujo en maxwell.

Si la espira gira en sentido contrario al de las agujas del reloj, al efectuar un cuarto de revolución se encontrará en la posición representada en (b) con su plano paralelo a la dirección del campo, por lo que no abraza flujo alguno. Por lo tanto, en un cuarto de vuelta el flujo cortado ha disminuido  $\phi$  maxwell. La f.e.m. media inducida en la espira durante este tiempo

es pues, para un arrollamiento de varias espiras,  $E_{av} = N \frac{\phi}{t} 10^{-8}$  voltios.

Si N es el número de espiras y t el tiempo necesario para girar un cuarto de vuelta. Como  $t=1/4s$ , si s son las revoluciones de la espira por segundo, la f.e.m. media durante un cuarto de vuelta es  $E_{av} = 4Ns\phi 10^{-8}$  voltios.

Y si el flujo se expresa en Weber ( $\Phi$ ), la f.e.m. valdrá  $E_{av} = 4Ns\Phi$  voltios.

La f.e.m. inducida por un conductor de longitud l cm que corta un flujo de densidad de B gauss a una velocidad de v m/s, es  $e=Blv10^{-8}$  voltios.

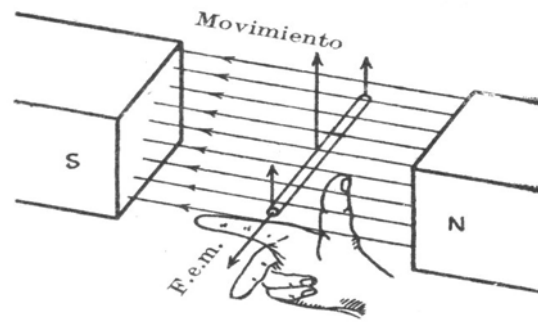
Siempre que B, l, y v sean perpendiculares entre sí. Si esto no ocurre, la fórmula anterior debe multiplicarse por el seno que formen dos cualesquiera de las tres cantidades B, l y v.

Si se usa el sistema internacional la ecuación anterior queda:  $e=Blv$  voltios.

### Dirección de la fuerza electromotriz inducida. Regla de la mano derecha de Fleming

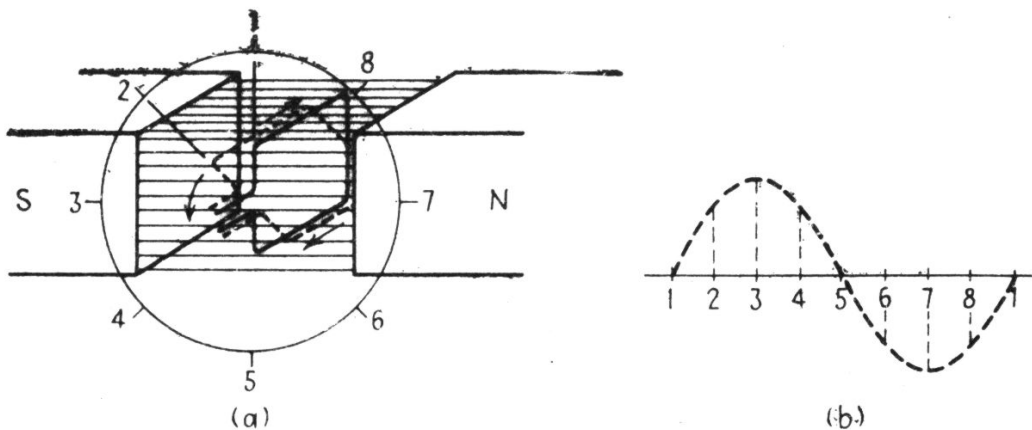
Existe una relación definida entre la dirección del flujo, la dirección del movimiento del conductor y la dirección de la f.e.m. inducida en este último.

Una regla útil para determinar esta relación es la regla de la mano derecha de Fleming. Para su aplicación se utilizan como se indica en la figura los dedos de la mano derecha.



- Regla de la mano derecha de Fleming.

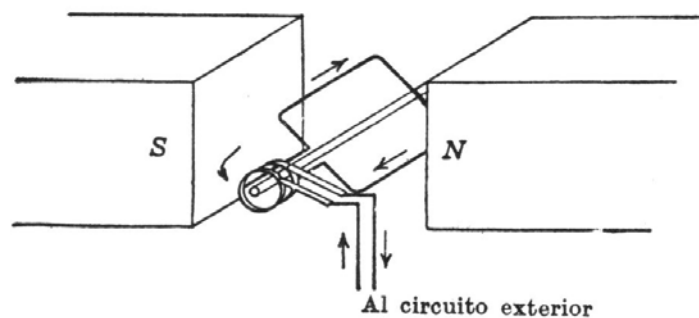
### Fuerza electromotriz generada por la rotación de una espira



- Fuerza electromotriz inducida en una espira que gira a velocidad constante en un campo magnético uniforme.

La figura (a) representa una espira que gira en sentido contrario al de las agujas de un reloj y a velocidad constante, en un campo magnético. Según la posición de la espira, la f.e.m. inducida en ella cambia de valor. Cuando está en la posición 1, no se genera f.e.m., porque ningún conductor corta líneas magnéticas, ya que se mueven paralelamente a ellas (para esta posición es nula la variación del flujo que abraza la espira). Cuando la espira alcanza la posición 2 (de trazos), sus conductores activos cortan oblicuamente las líneas y la f.e.m. tiene el valor indicado en 2 en la figura (b). Al llegar a la posición 3, los conductores cortan las líneas perpendicularmente y por consiguiente, el máximo número posible de ellas. Por lo tanto, la f.e.m. es máxima cuando la espira está en esta posición. En la posición 4, la f.e.m. disminuye porque el número de líneas cortadas se va reduciendo. En la posición 5 ya no corta ninguna línea y como en la 1 la f.e.m. es nula. En la posición 6, la dirección de la f.e.m. en los conductores se invertirá, puesto que se encuentran ahora frente a un polo de signo contrario al correspondiente a las posiciones 1 a 5. La f.e.m. crece hasta un máximo negativo, que se alcanza en 7 y luego decrece hasta que la espira ocupa de nuevo la posición 1. Después se va repitiendo el mismo ciclo. La región correspondiente a las posiciones 1 y 5, en las cuales el plano de la espira es normal a la dirección del campo inductor y no se induce f.e.m. en las bobinas giratorias, se llama zona neutra.

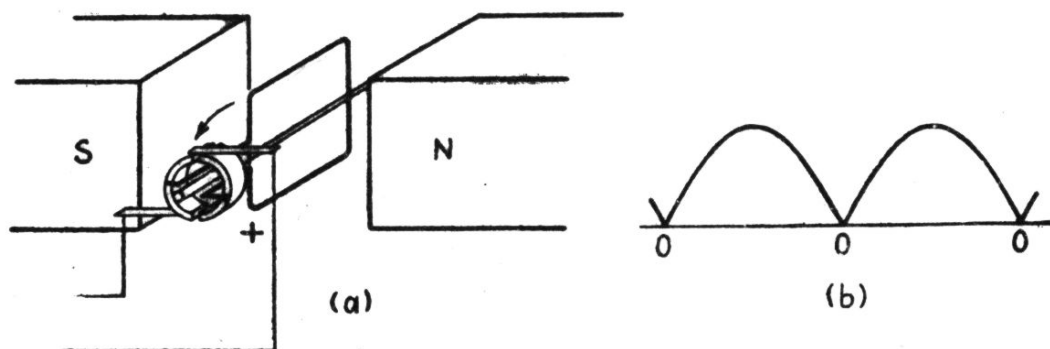
Esta f.e.m. inducida es alterna y sigue una ley de variación sinusoidal. Esta f.e.m. alternativa puede actuar sobre un circuito exterior conectado a dos anillos con escobillas.



Los anillos son de una pieza y están aislados entre sí y también del eje inducido. Las escobillas son de metal o de carbón y se apoyan sobre los respectivos anillos pasando a través de ellas la corriente que va al circuito exterior.



Si se desea obtener una corriente continua, es decir que tenga siempre la misma dirección, no se pueden utilizar los anillos. La corriente en las espiras es necesariamente alterna, puesto que lo es la f.e.m. que la produce, como se indicó en la parte (b) de la figura anterior. Es necesario por lo tanto, rectificar dicha corriente antes de enviarla al circuito exterior, lo que puede lograrse por medio de un colector con escobillas como se ve en la parte (a) de la siguiente figura.



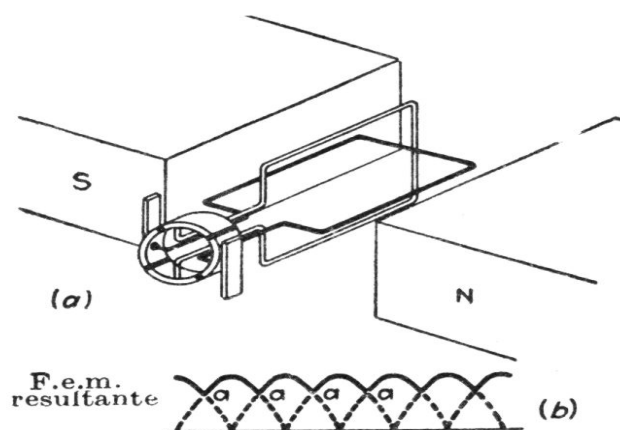
— Efecto de rectificación del colector.

En lugar de dos anillos como en la otra figura, se utiliza solamente uno solo, pero cortado según una generatriz en dos posiciones diametralmente opuestas y empalmado cada una de las mitades a uno de los extremos de la espira.

La figura muestra que, cuando se invierte la dirección de la corriente en la espira, las conexiones con el circuito externo se invierten también. Por lo tanto, la dirección de circulación de la corriente en el circuito exterior es invariable. Las escobillas pasan sobre los cortes del anillo cuando la espira es perpendicular al campo magnético, esto es, en el plano neutro, cuando no se produce ninguna f.e.m., como sucedía en los puntos 1 y 5 de la anterior figura. Estos puntos están marcados con 0 – 0 en la parte (b) de esta figura.

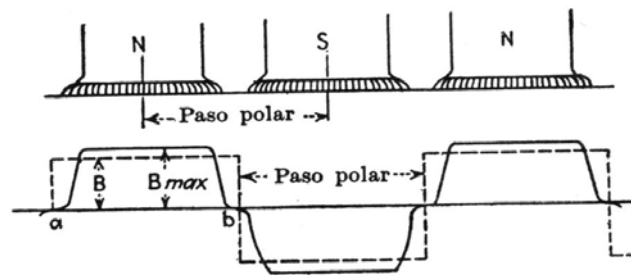
Comparando la parte (b) de ambas figuras se verá que la mitad negativa de la ondulación se ha invertido convirtiéndose en positiva.

Una f.e.m. que se anula dos veces en cada ciclo no se prestaría a las necesidades comerciales de un suministro con corriente continua. Una máquina con una sola espira tendría muy poco rendimiento para su tamaño y peso. Puede conseguirse que la f.e.m. ondulatoria de la figura tenga menores oscilaciones si se emplean dos espiras y cuatro segmentos o delgas en el colector, lo que da origen a un arrollamiento de circuito abierto, ya que es imposible partir de una delga cualquiera del colector y volver a ella después de seguir todo el arrollamiento. En este tipo de arrollamiento no se utiliza toda la f.e.m. producida por cada espira, debido a que una de ellas queda fuera de contacto cuando las escobillas pasan por los puntos a, a, de la parte (b) de la siguiente figura y la f.e.m. representada por las líneas de puntos no se emplea.



— Efecto de dos espiras y cuatro delgas del colector sobre la ondulación de la f.e.m.

## Fuerzas en el inducido



— Distribución del flujo en una dínamo sin carga.

En la figura se representan dos polos N y uno S de un generador. Para simplificar se representa la superficie del inducido como si se hubiese desarrollado sobre un plano. En la parte inferior se ha dibujado la curva de densidad de flujo. Las ordenadas positivas corresponden al flujo del polo N que entra en el inducido y las ordenadas negativas al que sale de él para entrar en el polo S. El flujo total que sale del polo N viene dado por el área limitada por uno de los trozos positivos de la curva de distribución multiplicada por la longitud del polo según la dirección del eje. Análogamente, el flujo total que abandona el inducido para penetrar en el polo S, se determina por el área de uno de los ciclos negativos de la curva multiplicada por la longitud, en sentido axial, del polo. La máxima densidad de flujo corresponde a la ordenada  $B_{max}$ .

Cada una de las regiones positivas y negativas de la curva se puede reemplazar por un rectángulo de igual área, como los de líneas de trazos de la figura. La altura de este rectángulo será de  $B$  maxwell por centímetro cuadrado. Tratemos de determinar la f.e.m. media inducida en un solo conductor al quedar sometido al flujo de los polos sucesivos.

Sea  $\phi$  el flujo total en maxwell que parte del polo N o que penetra en el polo S;  $l$  la longitud activa del conductor en centímetros,  $s$  la velocidad del inducido en revoluciones por segundo y  $P$  el número de polos.

Cuando el conductor recorre la distancia  $ab$ , igual al paso polar, la f.e.m. media inducida será:  $E_{av} = Blv 10^{-8}$  voltios, siendo  $B$  la densidad media de flujo por paso polar,  $l$  la longitud activa del conductor en centímetros y  $v$  su velocidad en centímetros por segundo, que vale  $v = ab/t$  cm/s.

Si  $t$  es el tiempo que necesita el conductor para recorrer la distancia  $ab$ , igual al paso polar. Se tendrá que

$$E_{av} = \frac{Bl(ab)}{t} 10^{-8} = \frac{\phi}{t} 10^{-8} \text{ voltios, ya que } Bl(ab) \text{ da el flujo total cortado por el conductor entre los puntos } a \text{ y } b, \text{ o sea}$$

$\phi$ , flujo por polo en maxwell.

El tiempo vale  $t = l/sP$  segundos. Por lo tanto, la f.e.m. media por conductor es  $E_{av} = sP10^{-8}$  voltios.

Si hay  $Z$  conductores y  $P'$  m circuitos de paso de corriente a través del inducido, deben existir  $Z/P'$  conductores en serie.

Por consiguiente, la f.e.m. total generada entre dos escobillas es  $E = \frac{\phi s P Z}{P' 10^8}$  voltios.

Si la velocidad  $S$  viene dada en revoluciones por minuto, la ecuación anterior se transforma en  $E = \frac{\phi s P Z}{60 P' 10^8}$  voltios. (\*)

Si el flujo por polo  $\Phi$  se da en weber, la fórmula anterior se escribirá:  $E = \frac{\Phi s P Z}{60 P'}$  voltios.

## Curva de saturación

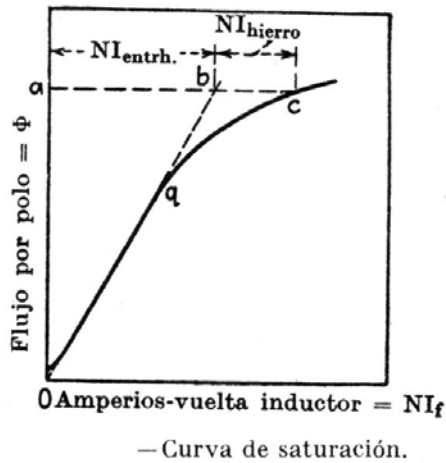
La expresión (\*) puede también escribirse de la forma  $E = \left( \frac{PZ}{60 P' 10^8} \right) \phi S$  voltios.

La cantidad encerrada en el paréntesis es constante para una máquina dada y puede ser representada por  $K$ . Por lo tanto  $E = K\phi S$ .

La f.e.m. inducida en un dínamo es directamente proporcional al flujo por polo y a la velocidad. Si la velocidad se mantiene constante, la f.e.m. inducida es directamente proporcional al flujo por polo.

El flujo es debido a los amperios - vueltas del inductor, y como el número de espiras de éstos es constante, el flujo es función de la intensidad de la corriente inductora. No es directamente proporcional a esta corriente, porque la permeabilidad del circuito magnético es variable.

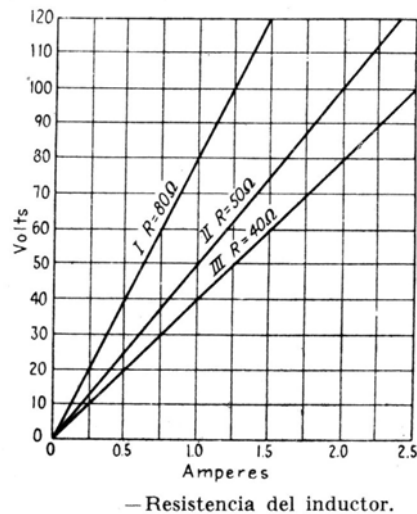
En la figura siguiente se representa la curva de saturación que da la relación entre los amperios - vuelta del inductor y el flujo por polo. El flujo no se inicia por lo regular desde el valor 0, sino desde un valor ligeramente superior, debido al magnetismo residual en el circuito magnético.



Para valores bajos de los amperios – vuelta inductores, la curva se transforma prácticamente en recta, porque la mayor parte de la reluctancia del circuito magnético corresponde al entrehierro. En el punto q, el hierro empieza a estar saturado y la curva se aparta de la alineación.

### Resistencia del inductor

Según la ley de Ohm, la corriente en un circuito simple es proporcional a la tensión si la resistencia es constante. Si se grafica la tensión en función de la corriente se obtiene una recta que pasa por el origen. Por ejemplo, si la resistencia del circuito inductor es de 50 ohmios, la corriente será de 2 amperios cuando la tensión sea de 100 voltios; 1,5 amperios para 75 voltios y 1 amperio para 50 voltios.

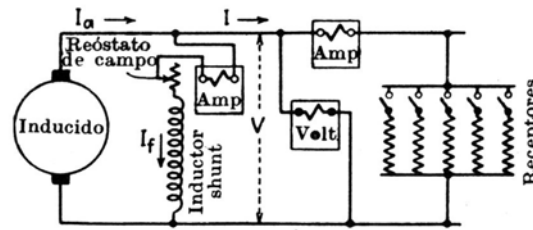


Esta relación corresponde a la recta II. La recta I representa la variación de la tensión con la intensidad para 80 ohmios de resistencia del inductor. Como se ve, a los 80 voltios la corriente es de 1 amperio y a 40 voltios es de 0,5 amperios, etc.. La recta III corresponde a una resistencia de 40 ohmios del circuito de excitación.

Puede observarse que cuanto mayor es la resistencia, mas pronunciada es la pendiente de la recta característica. De hecho, esta pendiente es igual a la resistencia en ohmios, puesto que la tangente del ángulo que la línea forma con el eje de abscisas es  $E/I$ .

### Tipos de generadores

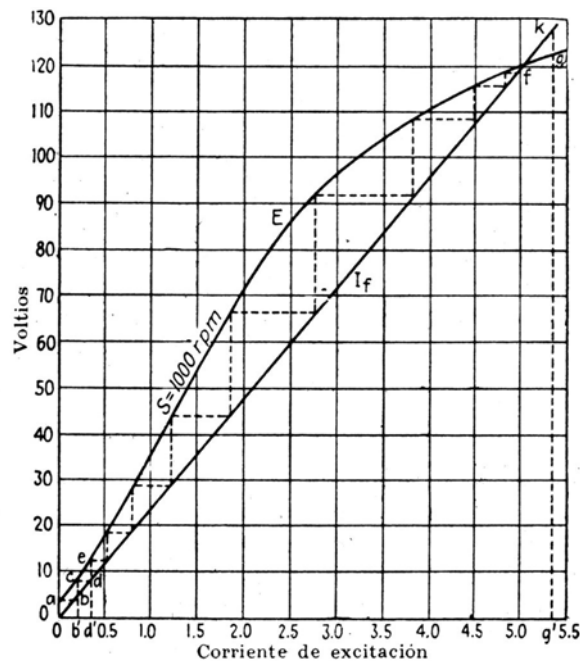
Existen tres tipos de generadores de corriente continua: en derivación o shunt, de excitación compuesta o compound y en serie. En el tipo de excitación en derivación, el circuito inductor se conecta entre los terminales del inducido, generalmente con un reóstato en serie.



— Conexiones de un generador en derivación.

El shunt, por lo tanto, debe tener una resistencia relativamente elevada, con el fin de que no se derive por él una parte excesivamente elevada de la corriente del generador. Los generadores compound son semejantes a los de excitación en derivación, pero llevan un arrollamiento adicional en el inductor, conectado en serie con el inducido y el circuito exterior. En los generadores con excitación en serie, ésta se produce totalmente mediante un arrollamiento de relativamente pocas espiras, conectado en serie con el inducido y el circuito exterior.

### Generadores shunt



— Método de excitación de un generador en derivación

La figura representa la curva de saturación  $E$  de un generador shunt y la característica de resistencia  $I_f$  de su inductor en derivación, ambas referidas a las mismas coordenadas. Como el shunt se conecta a los terminales del inducido, las ordenadas de la característica de resistencia del inductor deben representar la tensión entre los terminales del generador. La resistencia del inductor, representada por su característica de resistencia en la figura, es de 24 ohmios, de manera que a 120 voltios el campo absorbe 5 amperios y a 60 voltios 2,5 amperios, etc..

Cuando se pone en marcha un generador que esté parado, la f.e.m. es cero. La tensión generada puede aumentar de la manera siguiente: cuando el generador marcha a poca velocidad su f.e.m. es pequeña y está representada por  $oa$  en la figura, que equivale a unos 4 voltios, que se generan en el inducido a expensas del magnetismo remanente en el circuito magnético. Estos 4 voltios, son también la tensión entre terminales del inductor, ya que están conectados a los del inducido. La intensidad de corriente excitatriz que se establece por esta tensión de 4 voltios se puede obtener trazando por  $a$  una horizontal prolongada hasta que encuentre la característica de resistencia en  $b$ . La corriente excitatriz, en este caso particular, es  $ob'$  es decir, unos 0,2 amperios. Fijándose en la curva de saturación se observa que, para este valor de la corriente, la f.e.m. inducida,  $b'c$ , es de unos 8 voltios. Los 8 voltios generan una corriente de unos 0,33 amperios en el inductor, como se ve proyectando  $c$  sobre la característica de resistencia, lo que da el punto  $d$ . Esta corriente de excitación  $od'$  genera un voltaje  $d'e$ , que a su vez incrementa el valor de la corriente en el shunt. Así se ve que cada nuevo valor de la corriente excitatriz produce un incremento de la f.e.m., el que a su vez produce un aumento de la corriente en el shunt, o sea que su acción es acumulativa. La f.e.m. continúa aumentando hasta alcanzar el punto  $f$ , en que la característica de resistencia corta la curva de saturación, sin que pueda pasar de él por las razones que siguen.

Consideremos un punto  $k$  mas allá de  $f$  sobre la característica de resistencia. Este punto representa una corriente excitatriz  $og'$  de unos 5,3 amperios. Para producir esta corriente se requiere una tensión de excitación de  $g'k$  de unos 128 voltios. Pero esta corriente de 5,3 amperios produce una f.e.m. inducida que sólo es de 122 voltios. Si se necesitan 128 voltios para

producir dicha corriente y el generador puede producir 122 voltios con la citada corriente, es evidente que no puede alcanzar el punto k.

En el generador, las variaciones de la excitación no se producen en la forma escalonada que se indica por las líneas de puntos de la figura anterior. El flujo no cambia instantáneamente, de modo que las indicaciones de un voltímetro conectado a los terminales de un generador crecen de una manera gradual y suave.

La excitación progresiva de los generadores shunt puede también estudiarse aplicando los principios de la geometría analítica. La f.e.m.  $E$  definida por la curva de saturación es función de la intensidad de la corriente inductora, por lo que puede escribirse  $E = f(I_f)$  voltios (i).

Despreciando la pequeña caída de tensión en el inducido debida a la corriente inductora,  $I_f = \frac{E}{R_f}$  amperios (ii), si  $R_f$  es la resistencia del circuito inductor.

Resolviendo (i) e (ii), se obtendrán los valores los valores que la tensión y la intensidad de la corriente inductora adoptan al crecer progresivamente la excitación. Sin embargo, es difícil obtener la expresión analítica de la función (i). La solución puede obtenerse, no obstante, por intersección de los gráficos representativos de (i) e (ii), lo que da el punto f.

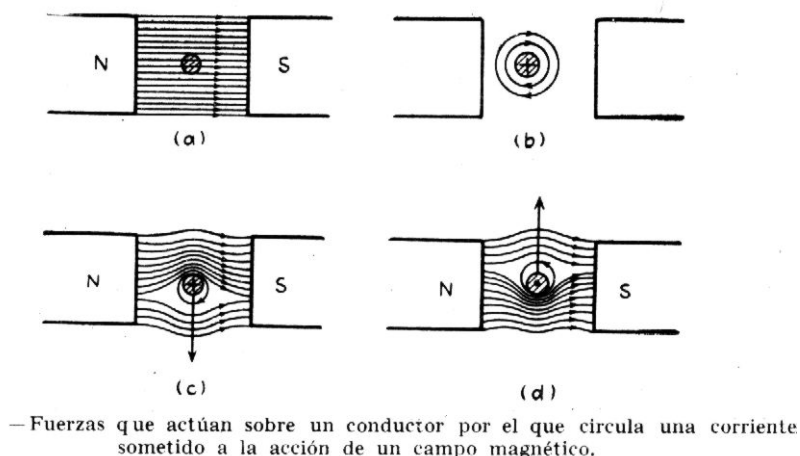
Es evidente que la saturación del hierro es la que impide que crezca indefinidamente la excitación.

## EL MOTOR

Hemos visto que un generador es una máquina que convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

De una manera análoga, el motor es una máquina destinada a convertir la energía eléctrica en energía mecánica. La misma máquina no obstante, puede servir indistintamente como motor y como generador.

### Principio del motor eléctrico



La figura (a) representa un campo magnético de intensidad uniforme, en el cual está colocado un conductor rectilíneo y normal a la dirección del campo y al plano del papel, que no transporta corriente alguna. En (b) se supone que el conductor transporta una corriente que tiene la dirección del observador hacia el papel, pero se ha suprimido el campo debido a los dos polos S y N. El conductor queda entonces rodeado de un campo magnético cilíndrico, debido a la corriente que por aquel circula. La dirección de este campo, que puede determinarse por la regla del sacacorchos, es la de las agujas del reloj. En la figura (c) se representa el campo resultante, obtenido combinando el campo principal y el que produce la corriente en el conductor.

El campo debido a la corriente que circula por el conductor se suma al campo principal que queda por encima del conductor y se opone al campo que queda por debajo. Como resultado de ello se produce una concentración del campo en la región situada inmediatamente por encima del conductor y una disminución de la densidad del flujo en la región situada inmediatamente por debajo de él.

Puede verse que en este caso actuará una fuerza sobre el conductor, que lo empujará hacia abajo, como queda indicado por la flecha.

Es conveniente suponer que este fenómeno se debe a la concentración de las líneas de fuerza a uno de los lados del conductor. Las líneas magnéticas de fuerza pueden considerarse como si fueran cintas elásticas en tensión. Estas líneas están siempre tratando de contraerse para adquirir una longitud mínima. La tensión de estas líneas sobre la parte superior del conductor tiende a empujarlo hacia abajo, como se indica en la figura.

Si se invierte la corriente del conductor, la concentración de líneas tiene lugar por debajo del conductor, con tendencia a empujarlo hacia arriba, como se indica en la parte d de la figura.

El funcionamiento de un motor eléctrico depende del principio que se explica en la figura anterior. Todo conductor por el que circula una corriente y está situado en un campo magnético tiende a trasladarse en dirección normal a la del campo.

### Fuerzas que se desarrollan sobre un conductor por el que circula una corriente

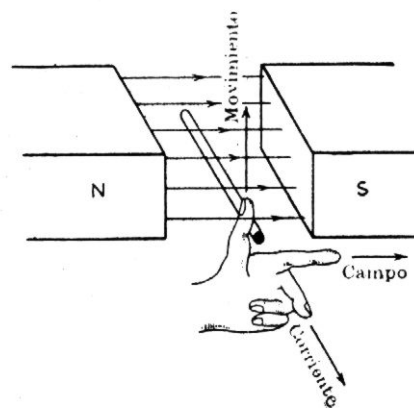
La fuerza que actúa sobre un conductor por el que circula una corriente cuando está sometido a la acción de un campo magnético es directamente proporcional a las tres magnitudes: intensidad del campo, intensidad de la corriente y longitud del conductor que queda dentro del campo. La fuerza en dinas viene dada por la expresión  $F = BI \frac{l}{10}$  dinas; o si se expresa en el sistema mks  $F=BIl$  newton.

En las dos fórmulas anteriores, B, l e I deben ser perpendiculares entre sí. Si el ángulo que forman dos cualesquiera de estas cantidades es distinto de 90°, las fórmulas deben multiplicarse por el seno del ángulo formado.

### Regla de la mano izquierda de Fleming

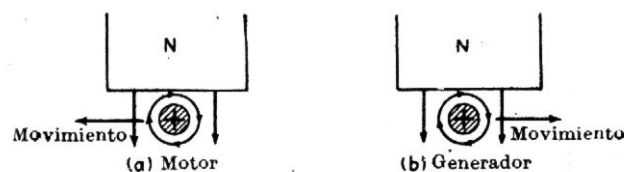
La relación entre la dirección del campo magnético, la dirección del movimiento del conductor y la dirección de la f.e.m. inducida en el conductor viene determinada por la regla de la mano derecha.

De una manera parecida, la relación entre la dirección de un campo magnético, la relación de una corriente que circule sometida a la acción de éste y la dirección del movimiento que se produce en el conductor por el que pasa la corriente, puede determinarse por medio de la regla de la mano izquierda.



— Regla de la mano izquierda, de Fleming.

Otro método conveniente para determinar esta relación es hacer uso del hecho que la concentración de las líneas de fuerza detrás del conductor tiende a empujarlo en sentido contrario. Es necesario simplemente trazar el campo principal y las líneas que rodean el conductor, como en la parte (a) de la figura siguiente.



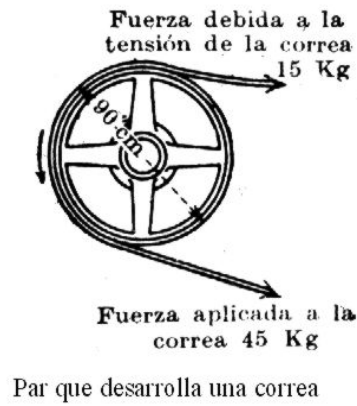
— Acciones en un motor y en un generador.

Es evidente que las líneas se concentran a la derecha del conductor, de modo que tenderán a moverlo hacia la izquierda.

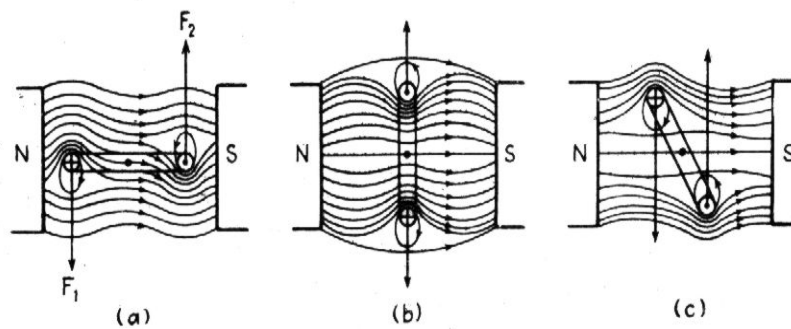
En la figura (b) se representa el caso análogo para el generador, en el cual el conductor se mueve hacia la derecha. Por consiguiente, en un generador, los conductores deben moverse en dirección contraria a la que tiende a oponerse a este movimiento, lo que hace necesaria una fuerza mecánica exterior para moverlos, que suministra el motor al cual está acoplado el generador.

### Par

Cuando una rueda, un volante u otro mecanismo cualquiera gira alrededor de un eje situado en su centro, es necesaria una fuerza tangencial para producir y mantener la rotación. Esta fuerza puede desarrollarla la propia máquina, como en los motores y máquinas de vapor o puede aplicarse mediante una polea, un árbol o una transmisión de engranajes.



### Par desarrollado por un motor



— Par desarrollado para distintas posiciones de una bobina.

La figura (a) representa una bobina rectangular de una sola espira, cuyo plano es paralelo a la dirección del campo magnético. La corriente circula en dirección del lector hacia el papel en el conductor izquierdo y en el sentido opuesto en el conductor derecho de la espira; por lo tanto, sobre el conductor de la izquierda actúa una fuerza  $F_1$  que tiende a moverlo hacia abajo y en el de la derecha otra  $F_2$  que tiende a moverlo hacia arriba. Como la intensidad de la corriente en los conductores es la misma y los dos están sometidos a la acción de un campo de igual intensidad, será  $F_1=F_2$ . Estas dos fuerzas producen un momento que tiende a hacer girar la espira en sentido contrario a las agujas del reloj. En la figura (a), la espira está en la posición para la cual el par es máximo, porque el brazo es máximo.

Cuando la espira alcanza la posición (b), ni un conductor ni el otro pueden moverse sin que la espira se deforme. Es una posición de par nulo, porque es nula la distancia del eje de rotación de la espira a la línea de acción de las fuerzas.

Si, no obstante, se invierte la dirección de la corriente en la espira cuando ésta llega a la posición (b) y se puede hacer que rebese el punto muerto, como en (c), se desarrolla un par que tiende a continuar la rotación en el sentido contrario a las agujas del reloj.

Para desarrollar un par que actúe continuamente en una dirección, la dirección de la corriente en la espira del inducido debe cambiar al pasar por el plano en que el par es nulo. Se requiere pues, un colector que haga la conmutación. El caso es análogo a la necesidad de emplear un colector en los generadores, con el fin de que la corriente suministrada al circuito exterior lleve siempre la misma dirección.

Un motor de una sola bobina, como el que se representa en la figura anterior, resultaría poco práctico, porque al tener puntos muertos el par desarrollado sería intermitente. Un inducido con dos bobinas eliminaría los puntos muertos, pero el par desarrollado continuaría siendo más o menos pulsatorio.

Los mejores resultados se obtienen cuando se aumenta el número de bobinas, como en los inducidos de los generadores.