



# **UNIVERSIDAD NACIONAL** **DE CÓRDOBA**

## ***MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA***

### **TEMAS**

**GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA**

**Clase 1**

*Autor: Ing. Gabriel Serra.*

*Colaboración Ing. Enrique Alonso*

## **GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA**

### **LEYES BÁSICAS:**

Ley de Faraday o Newman:

Establece que, en un conductor dentro de un campo magnético caracterizado por una variación del flujo, se induce una f.e.m. cuyo valor está dado por:

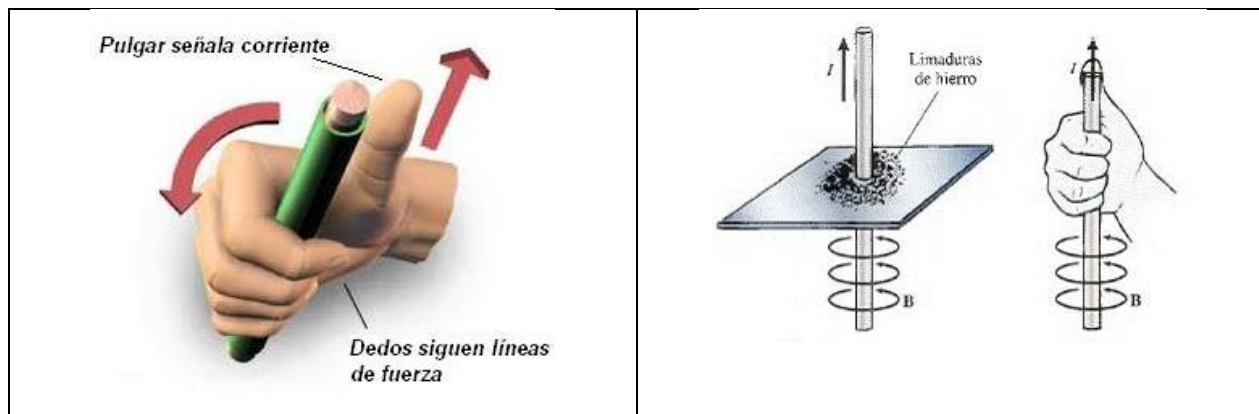
$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

El signo (-) está indicando que la f.e.m. inducida es tal que se opone a la causa que la originó, es decir que tenderá a generar un flujo que se oponga a la variación del flujo  $\phi$ .

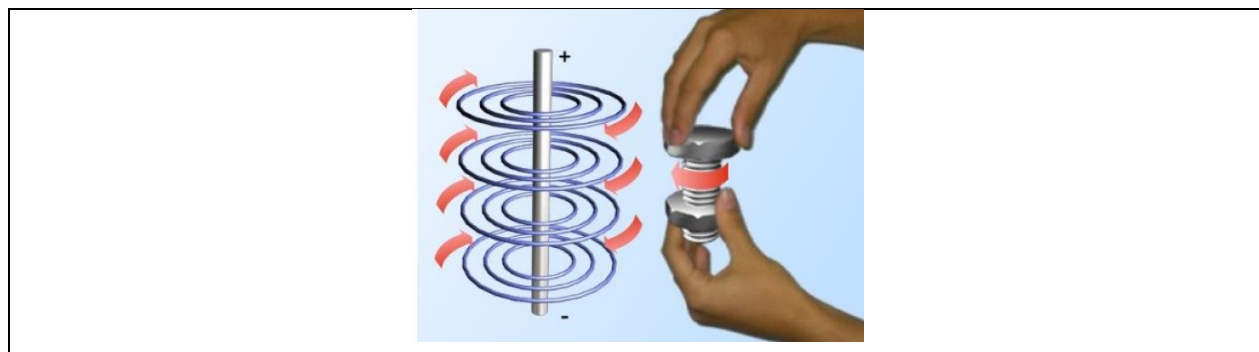
### **RELACION ENTRE EL CAMPO MAGNETICO Y LA CORRIENTE:**

Al circular una corriente por un conductor, generará un campo magnético alrededor del mismo. Existe una relación bien definida entre la dirección de la corriente y el campo magnético. Hay dos reglas simples para recordar esta relación.

Regla de la mano derecha: Si se toma al conductor de manera que el dedo pulgar señale la corriente, el resto de los dedos señalará la dirección de las líneas de flujo:

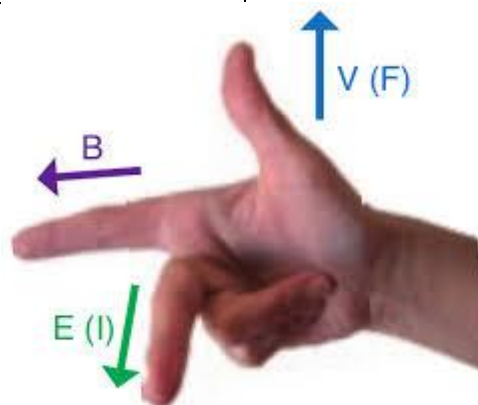
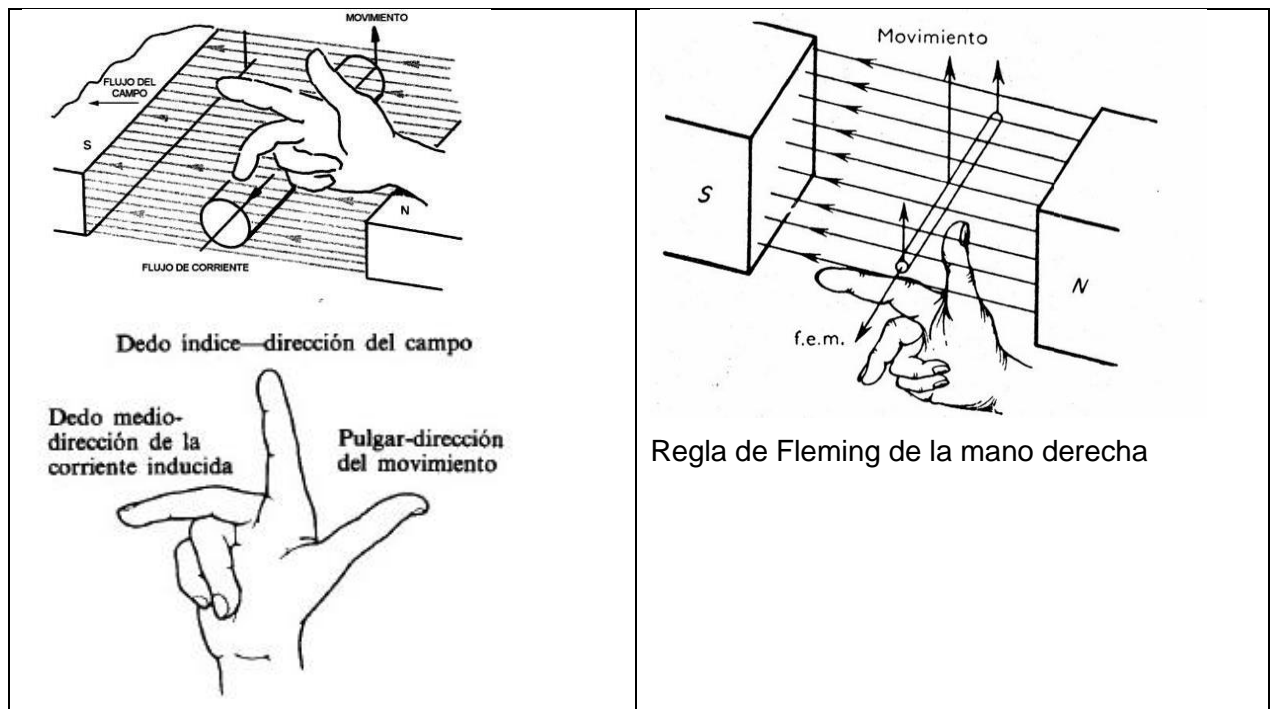


Regla del tirabuzón: el sentido de avance del tirabuzón indica la corriente y el sentido de giro de las líneas de flujo.

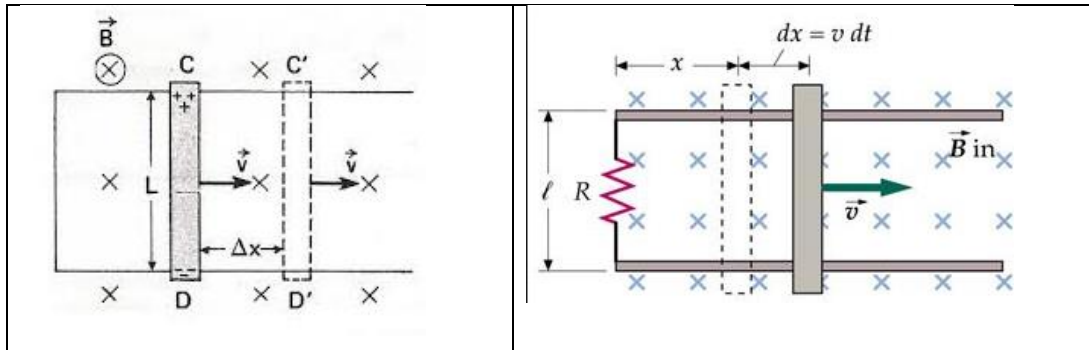


La ley de Faraday o Newman también puede expresarse de otra forma: si el campo magnético es uniforme y colocamos en él un conductor al que desplazamos con una determinada velocidad " $v$ ", aparecerá en los extremos del mismo una f.e.m. que será proporcional a la variación del flujo barrido en el transcurso del movimiento:

Si tenemos:



Si consideramos un intervalo de tiempo  $t$ :



El conductor habrá recorrido una distancia:

$$d = v \cdot t$$

Y el área cubierta será igual a:

$$S = l \cdot v \cdot t$$

El flujo barrido será:

$$\Phi = S \cdot B = l \cdot v \cdot t \cdot B$$

Y por unidad de tiempo:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = l \cdot v \cdot B$$

Luego la f.e.m. inducida tomará el valor:

$$E = l \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

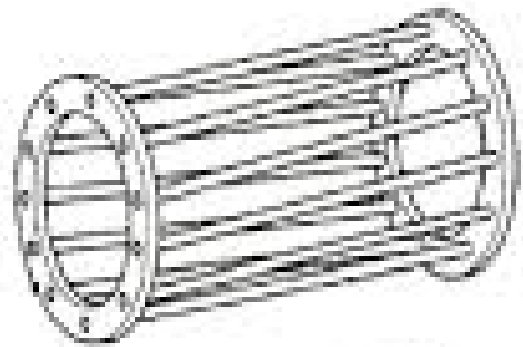
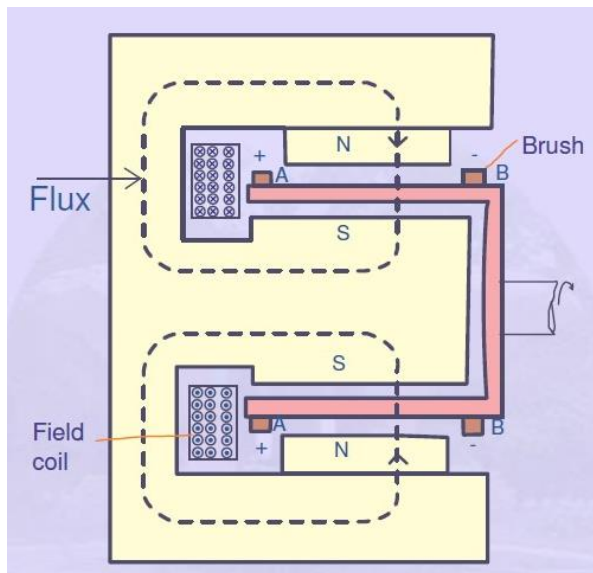
## GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA

Pueden dividirse en dos tipos de acuerdo al principio de generación:

1. Las máquinas que generan corriente continua en forma directa. Son los llamados **“generadores homopolares”** que no son de gran difusión y no alcanzan el 5% de las máquinas.
2. Las que generan una tensión alterna que se transforman luego en continuas. Son las llamadas **“rotativas con conmutador”** siendo este elemento el que produce esa transformación.

### Maquinas homopolares:

Generador homopolar de tambor tiene un campo magnético (B) que se irradia de forma radial desde el centro del tambor e induce voltaje a lo largo de l tambor.



Rotor de maquina homopolar, anillos donde apoyan las escobillas, una por cada anillo, y las barras que vinculan los anillos donde se genera la FEM.

Corte de maquina homopolar

Consideramos un imán permanente con la característica de ser asimétrico de revolución respecto al eje este imán constituye la parte fija o estator. (color crema en el esquema). Las líneas de punto representan el sentido del flujo. El flujo es generado en este caso por la bobina ubicada solidaria al rotor, la cual es alimentada por una corriente continua,

La parte móvil o rotor, está formada por dos aros o anillos, vinculados por conductores en paralelo, barras. (color rojo en el esquema).

Los conductores rotan en el entrehierro, de las polos norte y sur, siendo la interior un cilindro (polo sur de la figura interno al rotor) y el exterior un tubo (polo norte en la figura externo al rotor), sobre cada uno de los aros conductores eléctricos, apoya una escobilla de material grafito/cobre, las cuales permiten extraer la corriente generada por los conductores eléctricos longitudinales, todos ellos generando en paralelo ( generan la misma tensión y circula una proporción de  $I/n$ , donde  $I$  es la corriente total suministrada por el generador y  $n$  es la cantidad de conductores que vinculan ambos anillos. Al comenzar su movimiento el rotor, harán que los conductores corten líneas de campo y se induzca una f.e.m. que será dada por:

$$E = l. (\vec{v} \times \vec{B}) = l. B. \omega. r$$

Siempre el campo es perpendicular al movimiento del conductor (el flujo se establecerá en la menor distancia del entrehierro, siendo la misma en sentido radial), el campo es radial y la

velocidad tangencial. Siendo " $\omega$ " la velocidad angular de rotación de los aros, " $r$ " el radio del rotor y " $l$ " la longitud de los conductores del rotor. (siempre la velocidad en perpendicular al campo). Para sacar este potencial al exterior será suficiente colocar escobillas que rocen los anillos. La potencia dependerá de la potencia mecánica que mueve el sistema y el valor de la tensión inducida dependerá de las variables que regulan su valor ( $l, B, \omega, r$ ).

El inconveniente de este tipo de máquinas radica en los bajos voltajes que se obtienen, por ejemplo:

$$l = 1 \text{ [m]}$$

$$B = 10^4 \text{ G} = 1 \text{ [Wb/m}^2\text{]}$$

$$\omega \cdot r = 10 \text{ [m/s]}$$

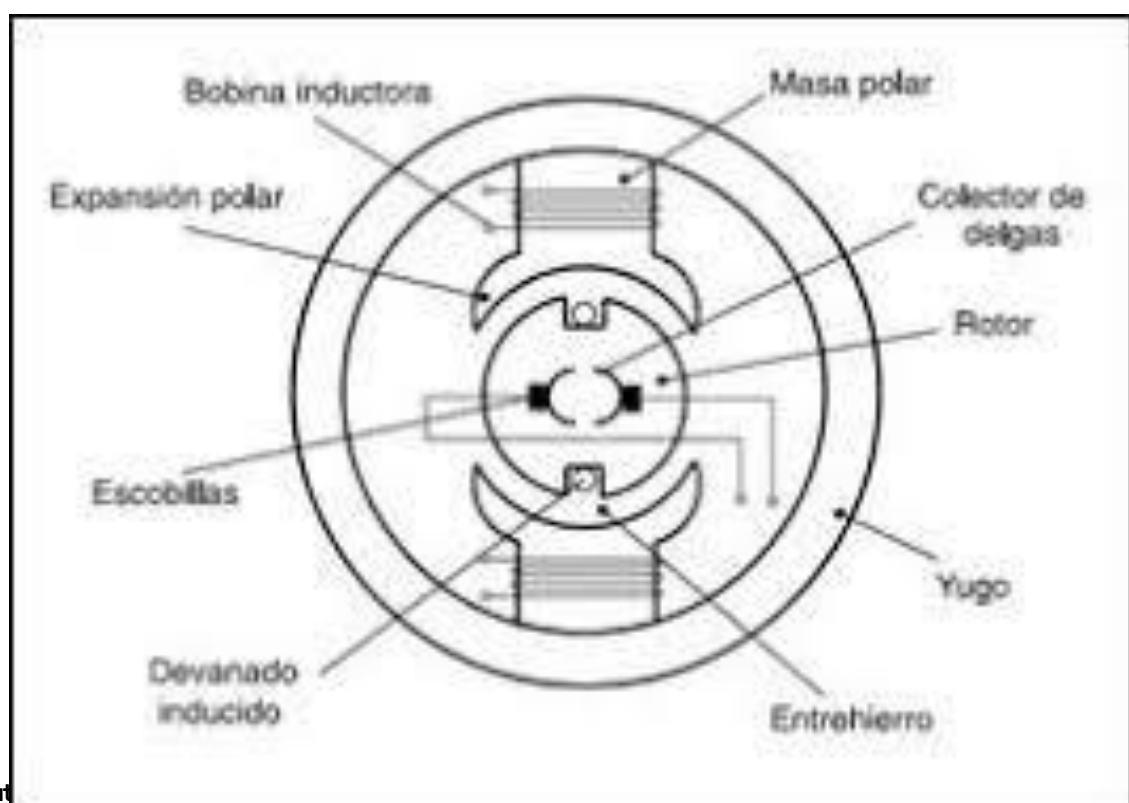
La tensión generada será:

$$E = 10 \text{ [V]}$$

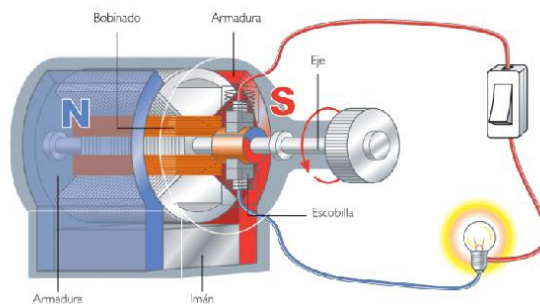
Si se aumenta el número de conductores se puede aumentar la corriente que soporta el generador, pero no la tensión ya que todos los conductores están en paralelo.

Máquinas rotativas con conmutador: Constituyen la mayoría de las máquinas generadoras de corriente continua. Son esencialmente generadores de tensiones alternadas que a través de un dispositivo de rectificación mecánico, "conmutador", aparece a la salida con las características de corriente continua.

Las partes constitutivas principales son:



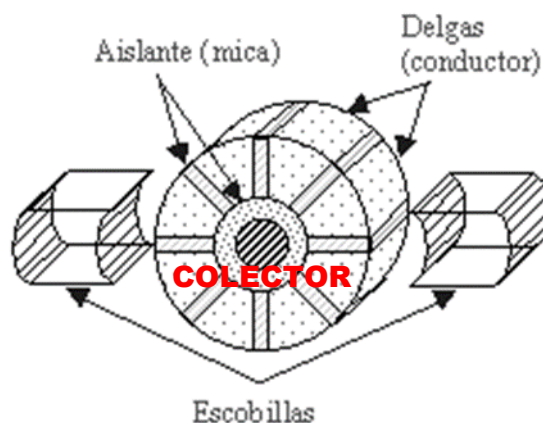




**El estator** o parte fija constituye básicamente un inductor magnético y como tal, podemos imaginarlo como un imán permanente o un electroimán, en la figura la bobina inductora. Más adelante, veremos que las características de la máquina dependerán de la naturaleza de este inductor. Es quien suministra el flujo magnético, necesario para generar la FEM.

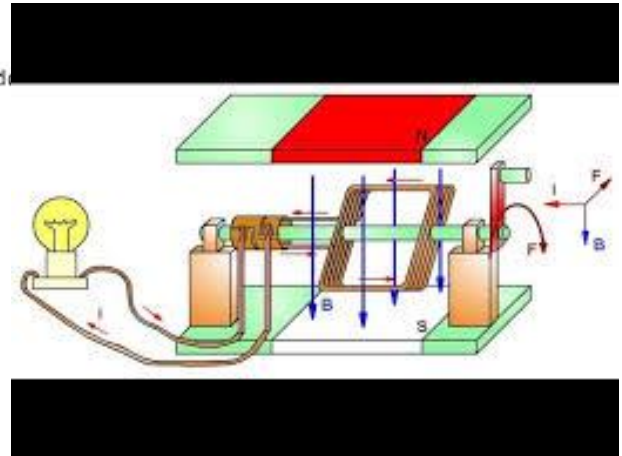
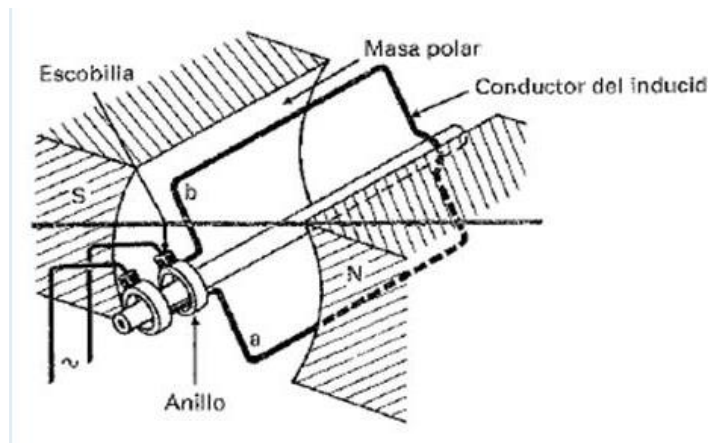
**El rotor** constituye la parte móvil, que esta accionada por un motor, que lo impulsa (lo mantiene en movimiento), es el que le provee el movimiento. En el rotor están los devanados del inducido, los cuales al moverse en un campo magnético, genera la inducción, en definitiva f.e.m.

**El conmutador** constituye un dispositivo mecánico que en base a un simple principio permitirá obtener a la salida la señal de una sola polaridad. (ya veremos cómo funciona, pero en principio es un rectificador mecánico). Al rotor está adosado el colector, que son segmentos de cobre, llamados delgas (donde irán vinculadas el final de una bobina y el principio de la siguiente), las delgas se encuentran aisladas entre sí en general por mica o un material que soporte altas temperaturas. Por otro lado, y solidarias al estator, tendremos dos porta escobillas con sus escobillas compuestas por una aleación de grafito/cobre. La vinculación eléctrica, y la forma de extraer la potencia eléctrica generada en el rotor, será por el contacto delga (cobre) y escobilla (cobre/grafito). El grafito es el lubricante del contacto, pero un alto contenido de este provoca mayor caída de tensión de contacto ( $\Delta U$ ) y un desgaste más prematuro, un agregado de cobre genera menor caída de tensión pero daña el colector (es más simple y económico reemplazar escobillas que colector).



## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR CON CONMUTADOR

Imaginaremos un esquema simple para comprender los distintos elementos que se incorporan para constituir los componentes básicos de estos generadores.



Generador de tensión alterna elemental

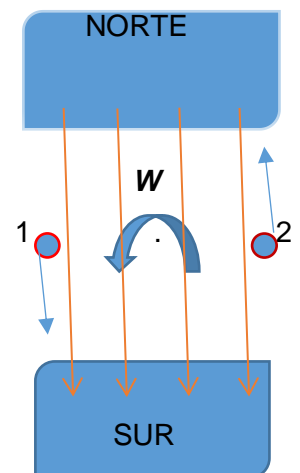
Supongamos la presencia de un campo magnético uniforme creado por un imán permanente y dentro del mismo una espira que gira a velocidad angular uniforme " $\omega$ ". Imaginemos la espira una posición tal como la 1- 2. En el conductor 2 la corriente será saliente y en el conductor 1 entrante, es decir, que la polaridad de la tensión generada es tal que 1 es positivo respecto a 2. Por otra parte, si el flujo máximo " $\Phi_{max}$ " es el valor del flujo creado por el imán la espira alcanzará un flujo que será:

$$\phi(t) = \phi_{max} \cdot \cos \omega t$$

(medido a partir de que la bobina esté horizontal) y la tensión inducida es igual a:

$$e(t) = \phi_{max} \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

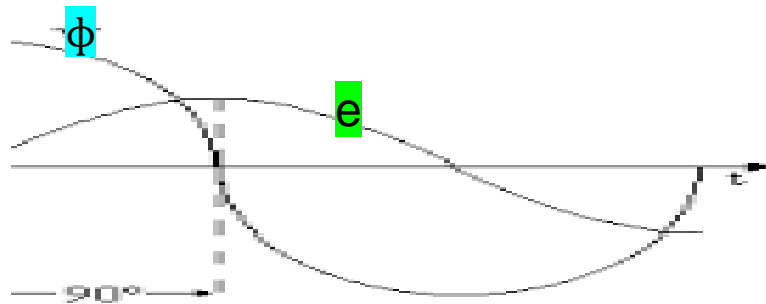
$$e(t) = E_{max} \cdot \sin \omega t$$



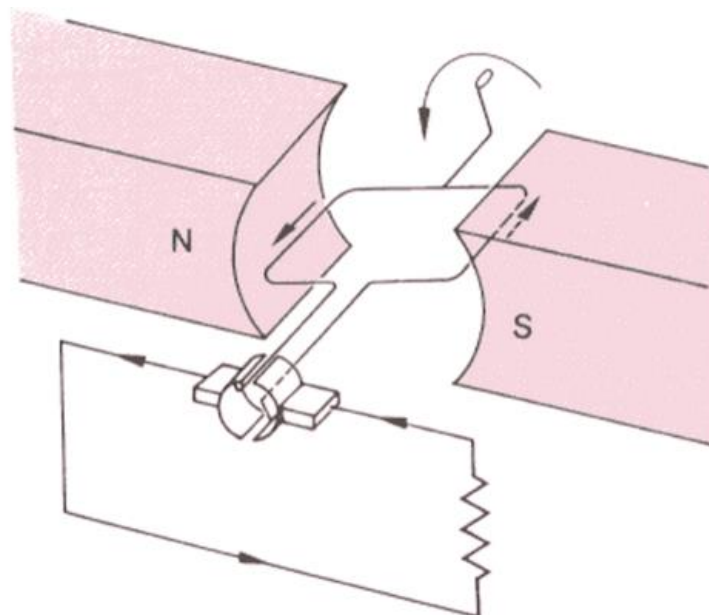
De esta manera en los bordes de la bobina tendríamos esta tensión alternada que de acuerdo a lo visto la consideraremos positiva cuando el terminal (1) es positivo. (internamente la corriente circulara de 1 a 2, 1 es positivo respecto a 2, externamente la corriente ira de 2 a 1, siendo I terminal 2 positivo respecto a 1)



Gráficamente:



Si ahora realizamos en análisis, (pero comenzando con la espira a 90 grados del análisis anterior, como podemos visualizar en la gráfica inferior b)



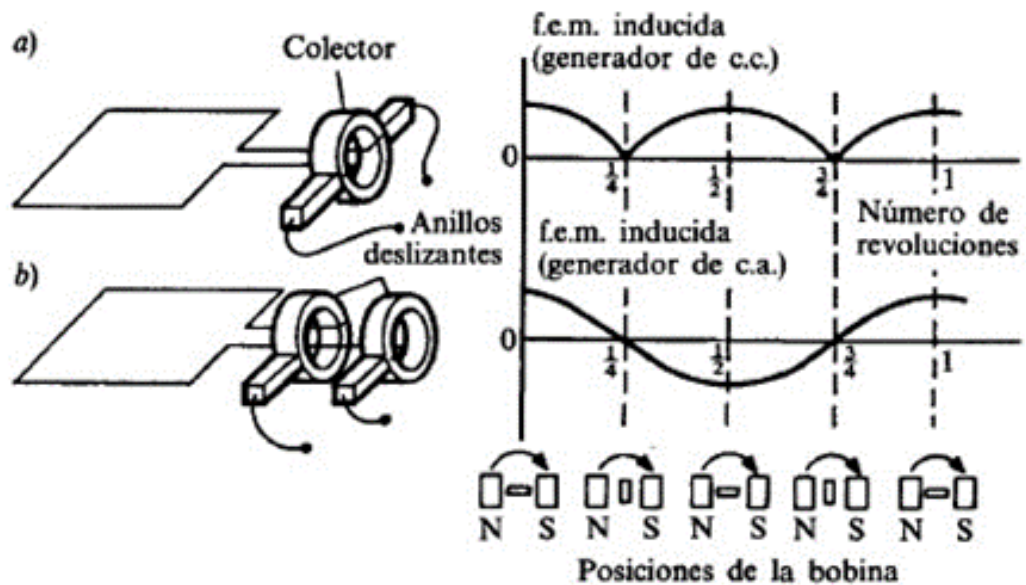


Figura 1

Si analizamos la figura 1b), vemos que, teniendo dos anillos completos, cada uno de ellos vinculado a uno de los extremos de la bobina, la tensión generada girando la espira será alterna, conforme a la gráfica.

Si ahora, como podemos ver en grafica 1a), en lugar de tener dos anillos completos, utilizamos dos semi anillos (de 180° cada uno), y vinculamos cada extremo de la bobina, a cada uno de los semi anillos y escobillas realizando contacto entre las dos delgas, en el momento en que la tensión es cero, tendremos la gráfica de tensión adjunta (las escobillas se disponen a 180° una de otra). Con esto logramos la rectificación de la onda generada por una sola espira. De esta manera hemos logrado una tensión de una sola polaridad, pero no continua (no constante) aun.

En la gráfica siguiente podemos observar lo mismo, donde tenemos la posición de la espira representada cada 90°(considerando la ubicación de los polos, tal que generen líneas de campo horizontales) , y debajo de la misma la onda de tensión obtenida a lo largo de una vuelta completa de la espira.

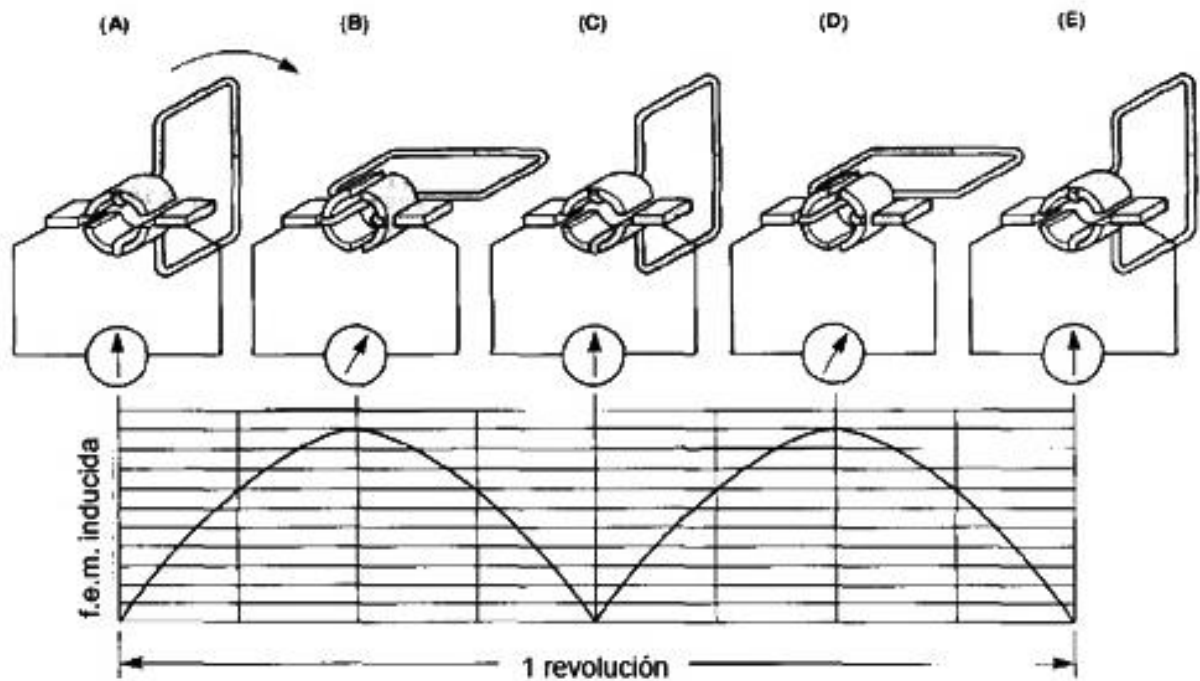
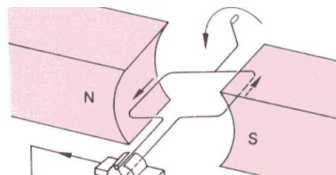
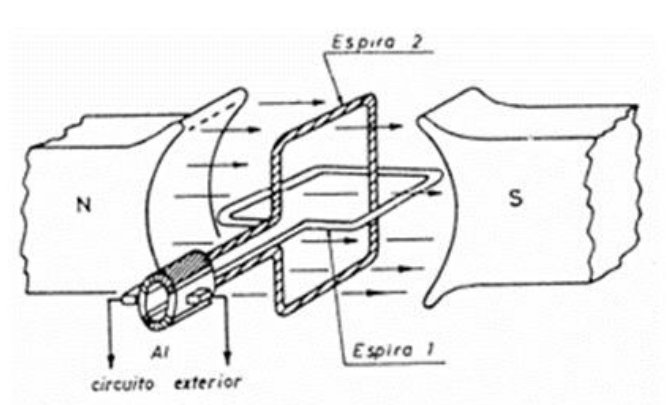
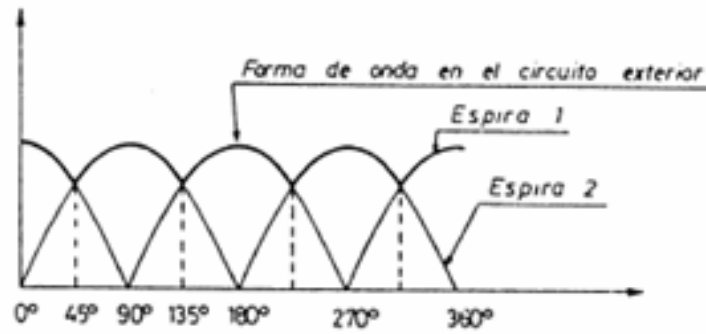


Figura 2

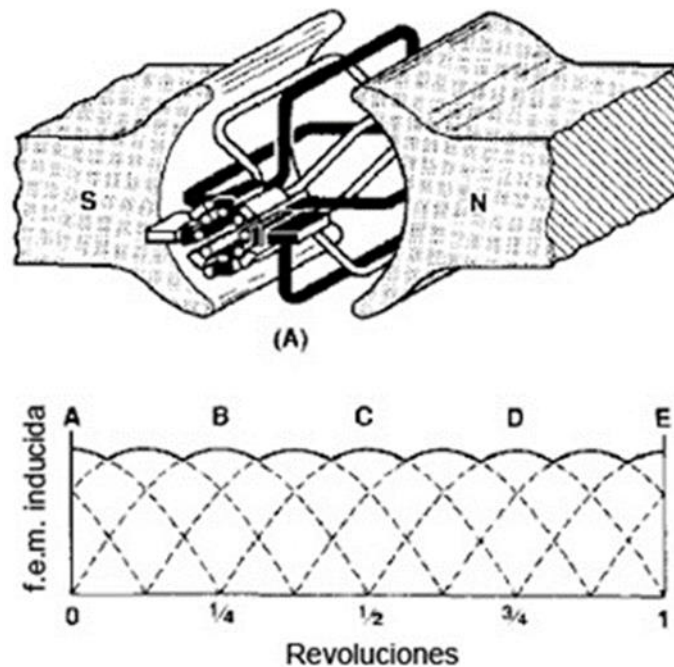


Imaginemos ahora que agregamos una segunda espira ubicada a  $90^\circ$  respecto a la primera y en vez de 2 semianillos de  $180^\circ$ , colocamos 4 delgas de  $90^\circ$  cada una, y los vinculamos al extremo de cada bobina, 2 por cada una.





Imaginemos ahora que agregamos dos nuevas espiras ubicada a  $45^\circ$ , cada una respecto a otra, colocamos 8 delgas de  $45^\circ$  cada una, y los vinculamos al extremo de cada bobina, 2 por cada una, obtendremos las siguiente gráficas y ondas de tensión..



De esta manera, nos acercamos cada vez más a la señal continua con el simple recurso de agregar espiras.

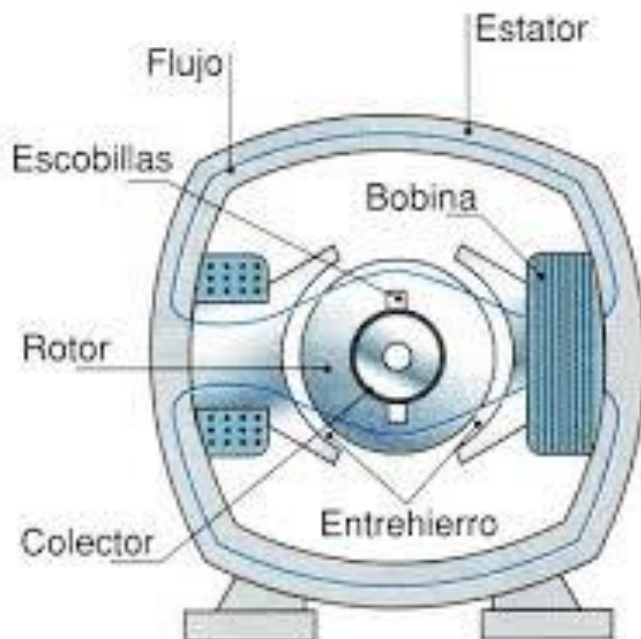
Pero técnicamente posee los siguientes inconvenientes:

- 1- **El entre hierro es demasiado amplio**, y requiere proveer muchos amperes vueltas, para lograr un valor aceptable de flujo, pero de todas maneras las tensiones que podrían obtenerse serían pequeñas. (el entre hierro mínimo es el diámetro de la espira)

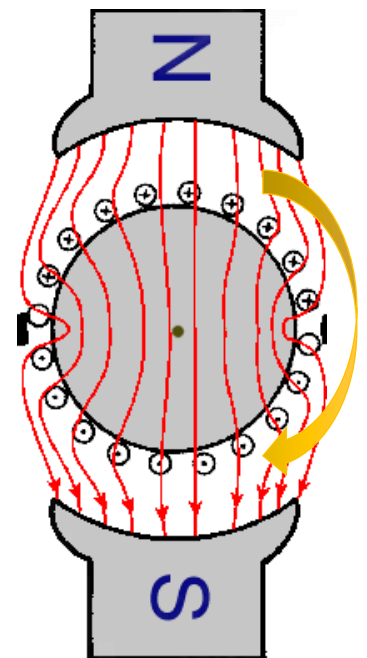
La solución es tratar de minimizar el entre hierro, a los fines de canalizar todo el flujo magnético por material ferromagnético, que es el material más apto a este fin.

Una mejora importante sería colocar un núcleo para las espiras de material ferromagnético y entonces el entrehierro sería pequeño, lo suficiente para permitir la rotación. Las espiras van

adosadas a este núcleo e incluso se colocan en ranuras a efecto de permitir el menor entrehierro. Además, a las zapatas polares se les da una forma semicircular del radio del rotor.



*Estructura básica de una máquina de corriente continua.*



En este caso, canalizamos el flujo por el circuito magnético, disminuimos el entre hierro a lo mínimo indispensable para evitar rozamientos y adicionalmente logramos otro beneficio, en el enfrentamiento del rotor y la zapara polar, siempre las líneas de flujo son radiales, debido a que buscan el camino de menor reluctancia (menor resistencia), y este se encuentra dado por la menor distancia entre rotor y estator, siendo la misma radial. En esta condición de flujo y el conductor al moverse tangencialmente, siempre se obtiene el máximo valor del producto vectorial, dado que el flujo y el movimiento del conductor son siempre perpendiculares (en la zona de enfrentamiento zapata polar rotor)

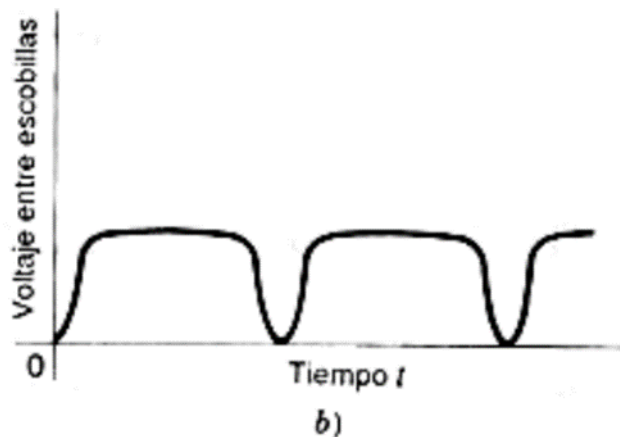
Podemos aplicar ahora el concepto del conductor que barre líneas de flujo y la tensión inducida sería:

$$E = l. (\vec{v} \times \vec{B}) = l. B. \omega. r$$

Siendo "l" la longitud de la espira que corta la línea de campo, longitud del rotor (ambos lados). Ahora el conductor corta un número constante de líneas, en la zona de enfrentamiento zapata polar-rotor y en el movimiento del conductor frente a la zapata polar genera un voltaje continuo. Entonces si analizamos el flujo en función de un ángulo de partida de 0°, ubicado a una distancia equidistante de ambas zapatas polares (llamada zona neutra magnética, flujo cero), sería la siguiente



Y si consideramos una sola espira, la tensión generada por la misma sería:



Entonces solo con dos espiras podríamos lograr una tensión continua.

Hemos logrado ahora concebir la obtención del voltaje continuo y es fácil suponer que este puede lograrse sin tener que colocarse un número grande de espiras. En realidad, con dos espiras puede ya lograrse un efecto continuo aceptable.

Además, el aprovechamiento del flujo es óptimo al tener un entrehierro pequeño.

Nos concentraremos ahora en los aspectos que hacen al mejoramiento del valor de la tensión de salida. Si analizamos que

$$E = l \cdot B \cdot \omega \cdot r$$

vemos que la tensión va a depender de las características constructivas ( $l, \omega, r$ ) y del valor del flujo  $\Phi$  o lo que es lo mismo de la inducción magnética  $B$ .

Con respecto a las características constructivas,  $l$  y  $r$  hacen al tamaño de la máquina por lo tanto están limitadas.

También  $\omega$  tiene un límite por la resistencia mecánica y por razones de funcionamiento.

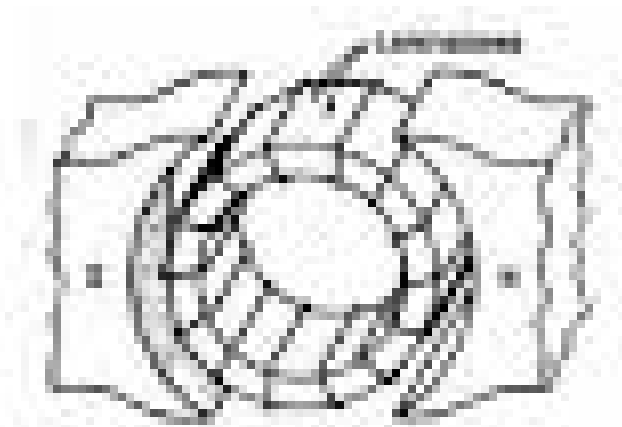


Y el valor de  $B$ , tiene que ver con los límites de saturación del material ferromagnético.

Pensando en el caso ideal, vemos que se desaprovecha la generación en medio ciclo en cada una de las espiras. Las espiras solo aportan durante  $360^\circ/\text{número de espiras}$ , si consideramos dos, solo aportan energía durante  $180^\circ$ , esto da origen al segundo problema.

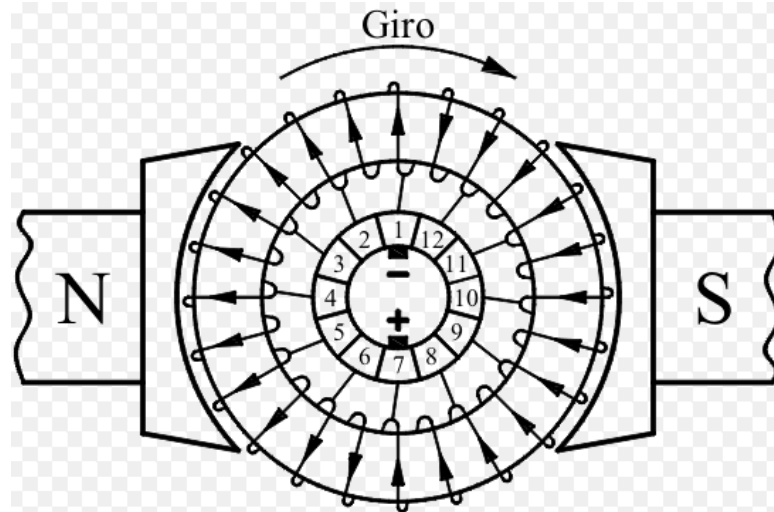
- 2- **Cada espira es un circuito independiente de los otros**, y solo circula corriente y entrega potencia en  $360^\circ/\text{número de espiras}$ .

La idea ahora es que estas espiras en lugar de estar asiladas entre si constituyan un bobinado continuo, es decir una espira como continuación de la otra de manera que sumen sus efectos. Vamos a razonar este nuevo esquema en base al denominado “**anillo de Gramme**” que responde históricamente a un modelo de máquina que así fue concebido, aunque actualmente no sea utilizado ya que ha sido superado por formas constructivas más efectivas, que veremos más adelante. No obstante, del punto de vista conceptual no hay diferencia en los razonamientos que desarrollaremos.



Como vemos el rotor es un tubo ferromagnético al cual se le han colocado 14 espiras sobre el mismo en un bobinado continuo, el principio se une al final.

A continuación, vemos otro anillo de Gramme, con 24 espiras y 12 delgas, cada dos espiras se vinculan a una delga (final de una bobina y principio de la siguiente), hemos reemplazado una espira por una bobina de 2 espiras (en el diseño de máquinas cada espira en realidad en una bobina la cual posee muchas espiras)



Si analizamos los sentidos de las FEM generadas (para ello de zona neutra a zona neutra consideramos o flujo entrante bajo polo norte o saliente bajo polo sur), vemos que desde zona neutra hacia un lado y otro tienen diferentes sentidos las corrientes, no obstante, concurren en ese nudo, donde deberá ubicarse la escobilla, que será de corriente saliente o entrante, generando borne positivo o borne negativo de nuestro generador.

¿Como determinamos la ubicación de escobillas? Ya determinadas en cada espira el sentido de las FEM, nos situamos en cualquier punto del bobinado y recorremos a favor la corriente hasta el punto donde cambia en sentido, corriente en contra, en ese lugar ubicaremos nuestra escobilla del borne positivo del generador. Para ubicar la escobilla del borne negativo del generador procedemos a situarnos en cualquier punto del bobinado y recorremos en mismo sentido opuesto a la corriente hasta que lleguemos a una espira donde se convierte a favor, es allí donde debemos ubicar la escobilla negativa.

Si ahora analizamos el circuito de las bobinas donde generamos la FEM, vemos que tendremos dos circuitos en paralelo, uno ubicado bajo polo norte y otro bajo el polo sur, si la corriente generada desde la escobilla es  $I$ , la corriente por cada una de estas ramas en paralelo es  $I/2$ .

Si ahora analizamos la cantidad de espiras ubicadas en cada rama, una bajo polo sur y otra bajo polo norte, vemos que son iguales, en nuestro caso 12 en cada rama. Si cada espira la consideramos como una FEM individual dada por

$$E = l \cdot B \cdot \omega \cdot r$$

El total de cada rama será

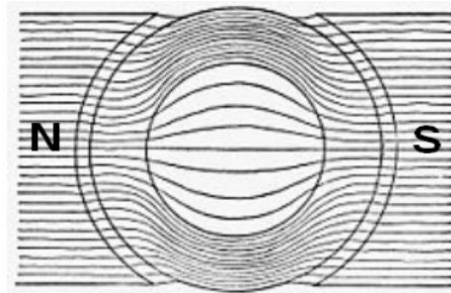
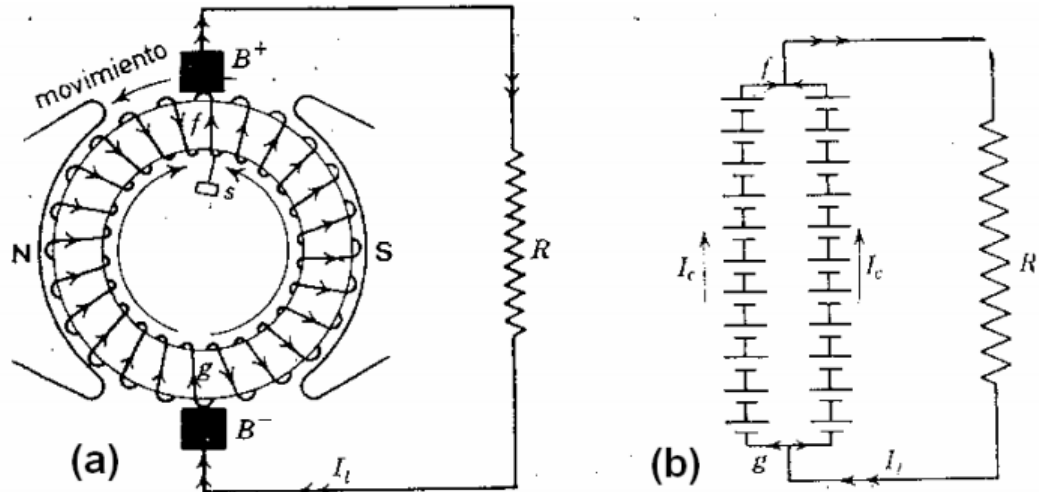
$$E = 12 l \cdot B \cdot \omega \cdot r$$

O genéricamente

$$E = N/2 \cdot l \cdot B \cdot \omega \cdot r$$

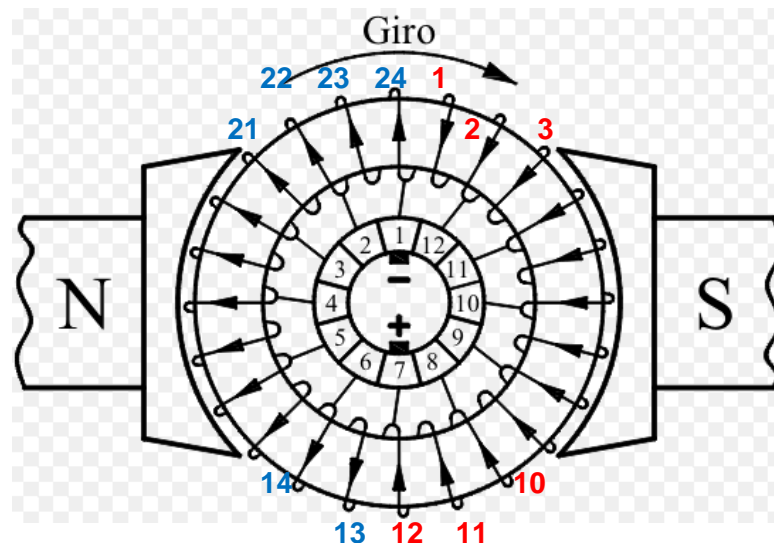
Donde  $N$  es el número total de espiras del anillo de Gramme.

Gráficamente podemos verlo de la siguiente manera:

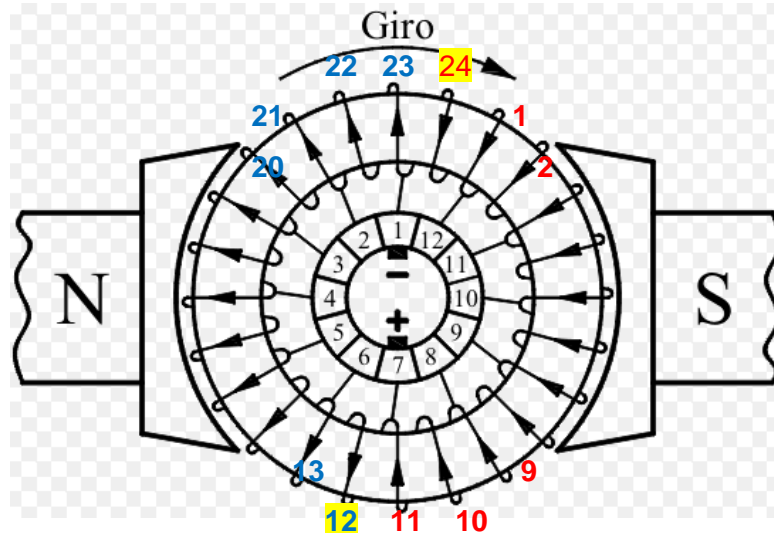


Distribucion de líneas de campo

Viendo la gráfica inferior, numerando de 1 a 24 las espiras, partiendo desde la zona neutra superior con la numero 1 y avanzando en sentido de giro, nos quedaría. (azul una rama, roja la otra)



Luego de haber girado  $(360/N)^\circ$ , en nuestro caso  $360/24: 15^\circ$ , nuestro esquema quedaría:



Como podemos analizar, las espiras 24 y 12 han cambiado de rama y se ha invertido su sentido de FEM y corriente, eso ocurrió dado que pasaron de estar bajo el efecto de un polo a estar bajo el efecto del otro, esto va ocurriendo constantemente y siempre se mantiene la misma cantidad de conductores activos por cada rama, este efecto de pasar de una rama a otra se llama conmutación.

Con esta concepción logramos sumar tensiones de todas las espiras, además de mantenerlas operables durante los  $360^\circ$ .

El inconveniente del anillo de Grame, es que los conductores del interior no cortan líneas de campo por lo cual no generan fem, pero son necesarias para poder vincular y sumar las tensiones de dos espiras contiguas, es de allí que llegamos a la concepción actual del generador, donde estos conductores internos, son desplazados  $180^\circ$  y se los coloca en una segunda capa inferior a los conductores ya ubicado allí. Ahora el rotor es completamente realizado en acero laminado, donde en cada ranura se ubican dos capas de conductor. Esto se realiza para la totalidad de conductores internos.

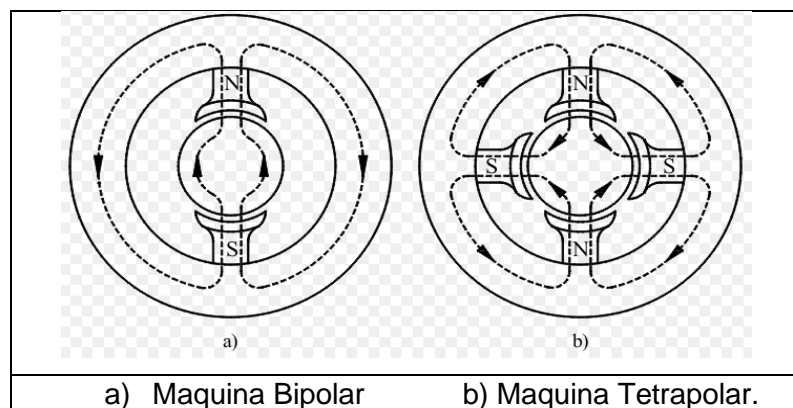


Vemos que ahora cortará líneas de campo y su fem es de tal sentido que se suma al circuito, logrando de esta manera tener 2 longitudes  $L$  activas por cada espira, lo cual permite aplicar la tensión obtenida, y sin el aporte de mayor cantidad de cobre.

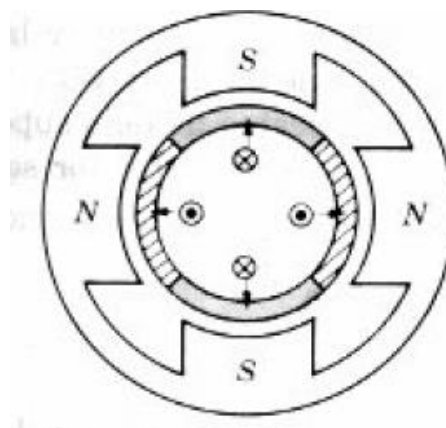


En esta figura no se aprecia las 2 capas, pero se ve como se coloca cada lado de espira a  $180^\circ$ , respecto al lado anterior.

Otra forma constructiva es colocar mayor cantidad de polos, como en la figura siguiente una máquina de 4 de polos:



La idea es que en un giro la espira cumple con dos ciclos de generación, y la espira ahora debe estar desarrollada en  $90^\circ$  y no en  $180^\circ$  como en el caso anterior.



Deduciremos ahora el valor de la tensión que puede generarse por cada lado de espira:

$$E = l \cdot v \cdot B$$

Donde:

$l$  longitud del rotor

$B$  densidad de flujo o flujo por unidad de superficie

$V$  velocidad desplazamiento del conductor

$$V = \omega \cdot r$$

$r$  radio del rotor

$$\omega = 2 \frac{\pi \cdot n}{60} \text{ [rad/s]}$$

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

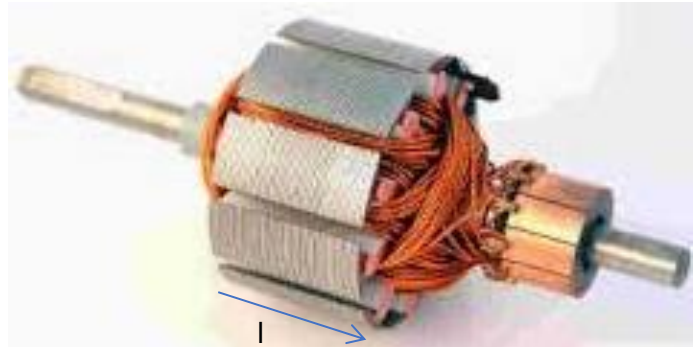
$$S = \frac{l \cdot r \cdot 2\pi}{P}$$

$P$  = Cantidad de polos.

$\Phi$  = Flujo total

$n$  = revoluciones por minuto ( R.P.M )

$\omega$  = velocidad angular [rad/s]



$$E = l \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} r \frac{\Phi P}{l \cdot r \cdot 2\pi} = \Phi \cdot n \cdot \frac{P}{60}$$

Si la cantidad de conductores activos es  $z$ , y la cantidad de ramas en paralelo es  $d$ , la cantidad de conductores en serie sumando fem individuales será  $z/d$

$$E = \frac{z}{d} \Phi \cdot n \cdot \frac{P}{60}$$

$$E = \frac{z}{d} \Phi \cdot n \cdot \frac{P}{60} \cdot 10^{-8}$$

La primera ecuación es para sistema MKS y la segunda para CGS

En definitiva

$$E = K \Phi n$$

Donde  $K$  depende de las características constructivas del generador.





Tipos de arrollamientos:

- Imbricados:

- Diametral
- Paso acortado
- Paso alargado

- Ondulados:

Arrollamientos imbricados

$Y_1$  = ancho de bobina

$Y$  = paso resultante +1 no cruzado, -1 cruzado

$Y_2$  = paso de conexión =  $Y_1 - Y$

Diametrales:

$$Y_1 = \frac{K}{p}$$

Donde K es cantidad total de ranuras y p cantidad de polos.

No diametrales:

$$Y_1 = \frac{K \pm b}{p}$$

+ paso alargado - paso acortado

$Y_1 \neq$  Entero  $\Rightarrow$  Arrollamiento Fraccionario

Imbricado No Cruzado:

$$Y_1 = \frac{K}{p}$$

$$Y_1 = 1$$

$$Y_2 = Y_1 - Y$$

Imbricado Cruzado:

$$Y_1 = \frac{K}{2 \cdot p}$$

$$Y_1 = -1$$

Entonces:

$$Y_2 > Y_1$$

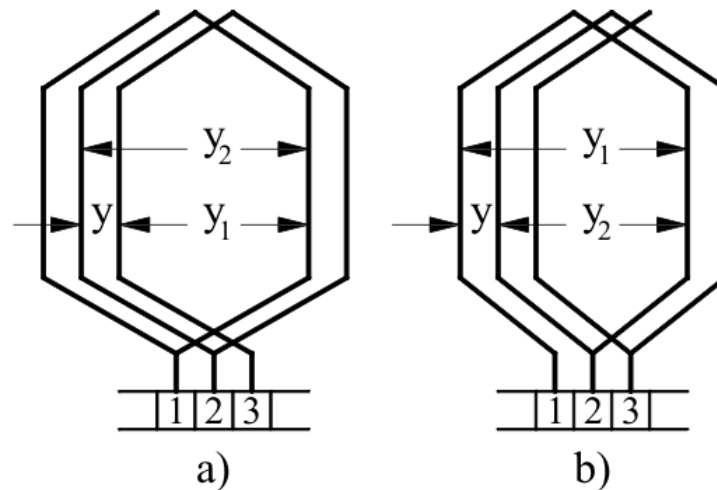


Figura a) arrollamiento cruzado, figura b) arrollamiento no cruzado

### Ondulado

$$Y = \frac{K \pm b}{p} \cdot 2$$

+ CRUZADO      - NO CRUZADO

$$Y_1 \cong Y_2 \cong \frac{Y}{2}$$

### Ondulado No Cruzado:

$$Y = \frac{K - 1}{p} \cdot 2$$

