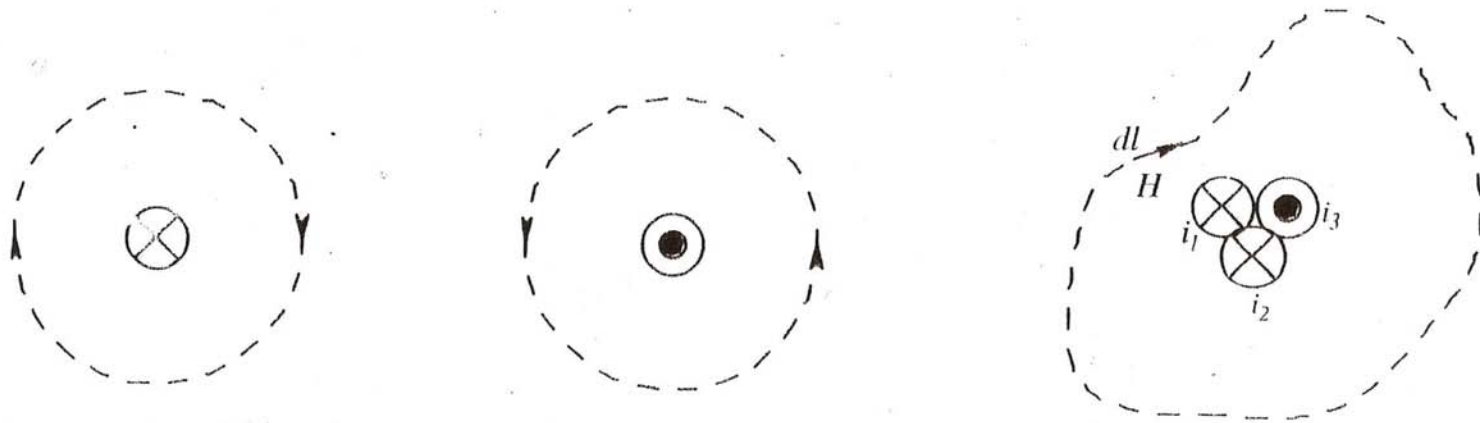


## Ley de Ampere



Campo magnético producido por la corriente que circula en un arreglo de conductores

En cualquier instante, la integral de línea de la intensidad de campo magnético ( $H$ ) a lo largo de cualquier camino cerrado es igual a la cantidad total de corriente encerrada en el camino.

$$\oint H dl = \sum i$$

Densidad de flujo ( $B$ )

En todo instante de tiempo en un campo magnético de intensidad  $H$  la densidad de líneas de flujo magnético (densidad de flujo,  $B$ ) depende de la permeabilidad magnética del material en el que se encuentra el campo  $H$ .

En el aire:

$$B = \mu_0 H$$

La permeabilidad magnética del aire (o del espacio libre) es:

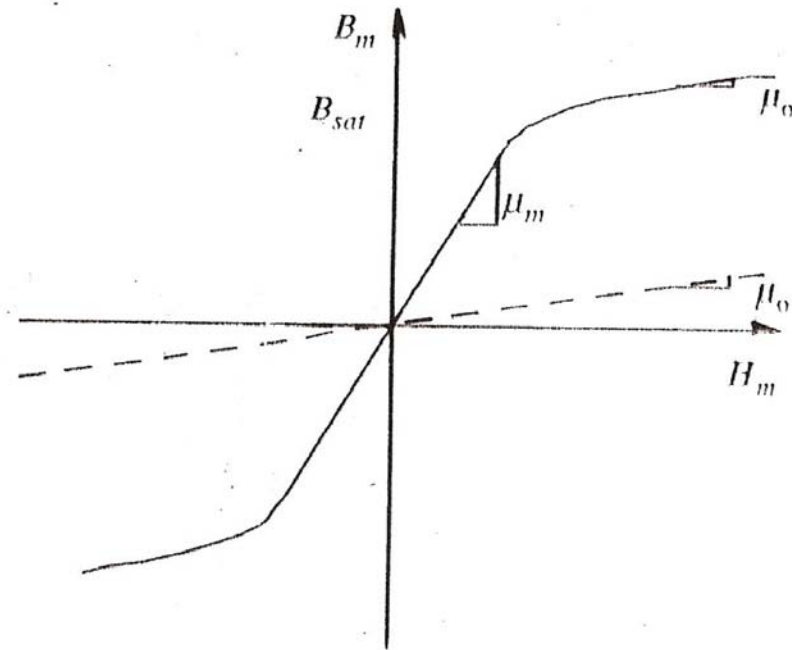
$$\mu_o = 4\pi * 10^{-7} \left[ \frac{\text{henries}}{m} \right]$$

En un material genérico:

$$B_m = \mu_m H_m$$

$$\mu_m = \mu_r \mu_o$$

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_o}$$

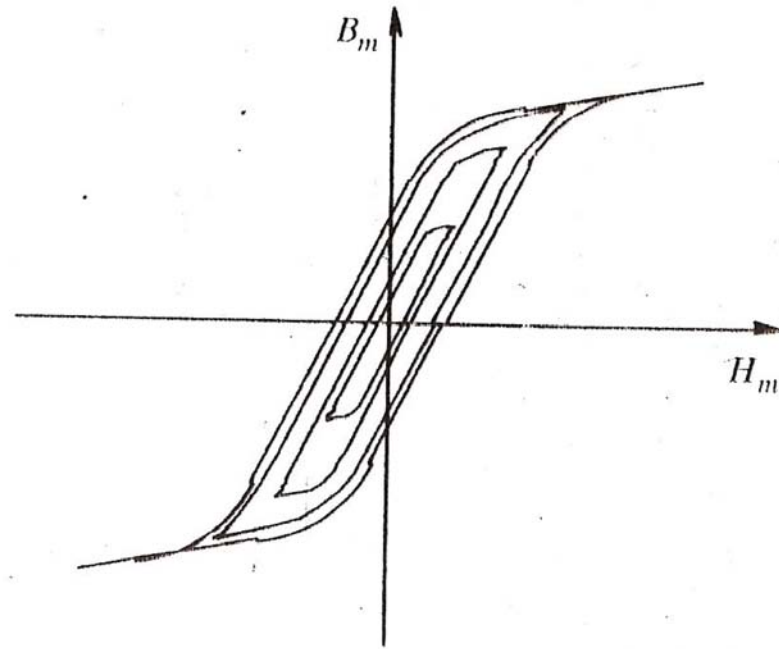


Densidad de flujo,  $B$ , contra la intensidad de campo,  $H$ , en el aire (línea punteada) y en un material con una permeabilidad magnética genérica,  $\mu_o$ , mostrando saturación.

La permeabilidad magnética del aire (o del espacio libre),  $\mu_0$ , es constante, pero la permeabilidad magnética de un material genérico,  $\mu_m$ , varía con la intensidad magnética, H, saturando al valor  $\mu_0$  para intensidades magnéticas elevadas.

En un material magnético, si se varía cíclicamente la intensidad magnética H, la densidad de flujo B cambia siguiendo un ciclo de histéresis, de forma que el valor de B no regresa a cero cuando H se hace cero.

Las pérdidas que ocurren en el ciclo de magnetización son función del área del lazo de histéresis.



Densidad de flujo,  $B$ , contra la intensidad de campo,  $H$ , en un material magnético genérico, mostrando ciclos de histéresis magnética y saturación.

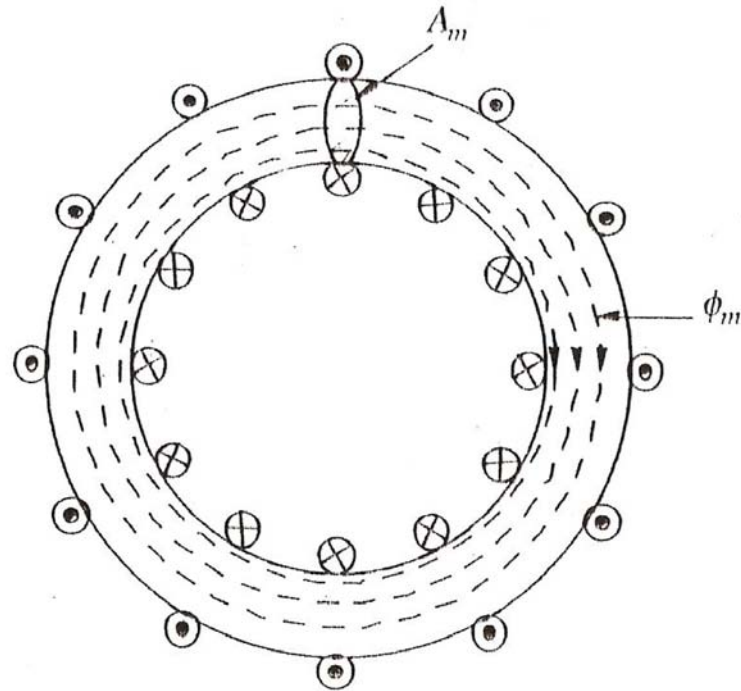
## Flujo magnético ( $\phi$ )

Sea la cantidad (uniforme) de líneas de fuerza:

$$B_m = \mu_m \frac{Ni}{l_m}$$

Por lo que el flujo magnético ( $\phi$ ) resulta:

$$\phi_m = B_m A_m = A_m \mu_m \frac{Ni}{l_m} = \frac{Ni}{\left( \frac{l_m}{A_m \mu_m} \right)}$$



Flujo magnético ( $\phi$ ) en un toroide

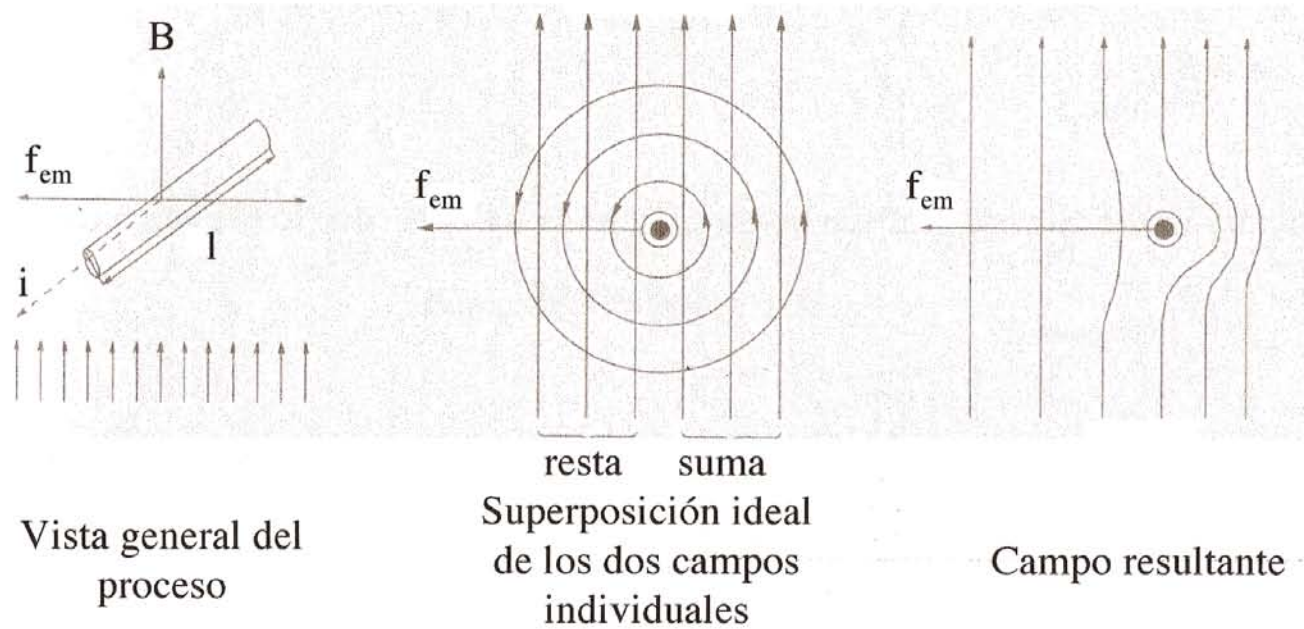


Se define la reluctancia magnética del material del toroide como:

$$\mathfrak{R} = \frac{l_m}{A_m \mu_m}$$

Y los enlaces de flujo ( $\lambda$ ) como:

$$\lambda = N\phi$$



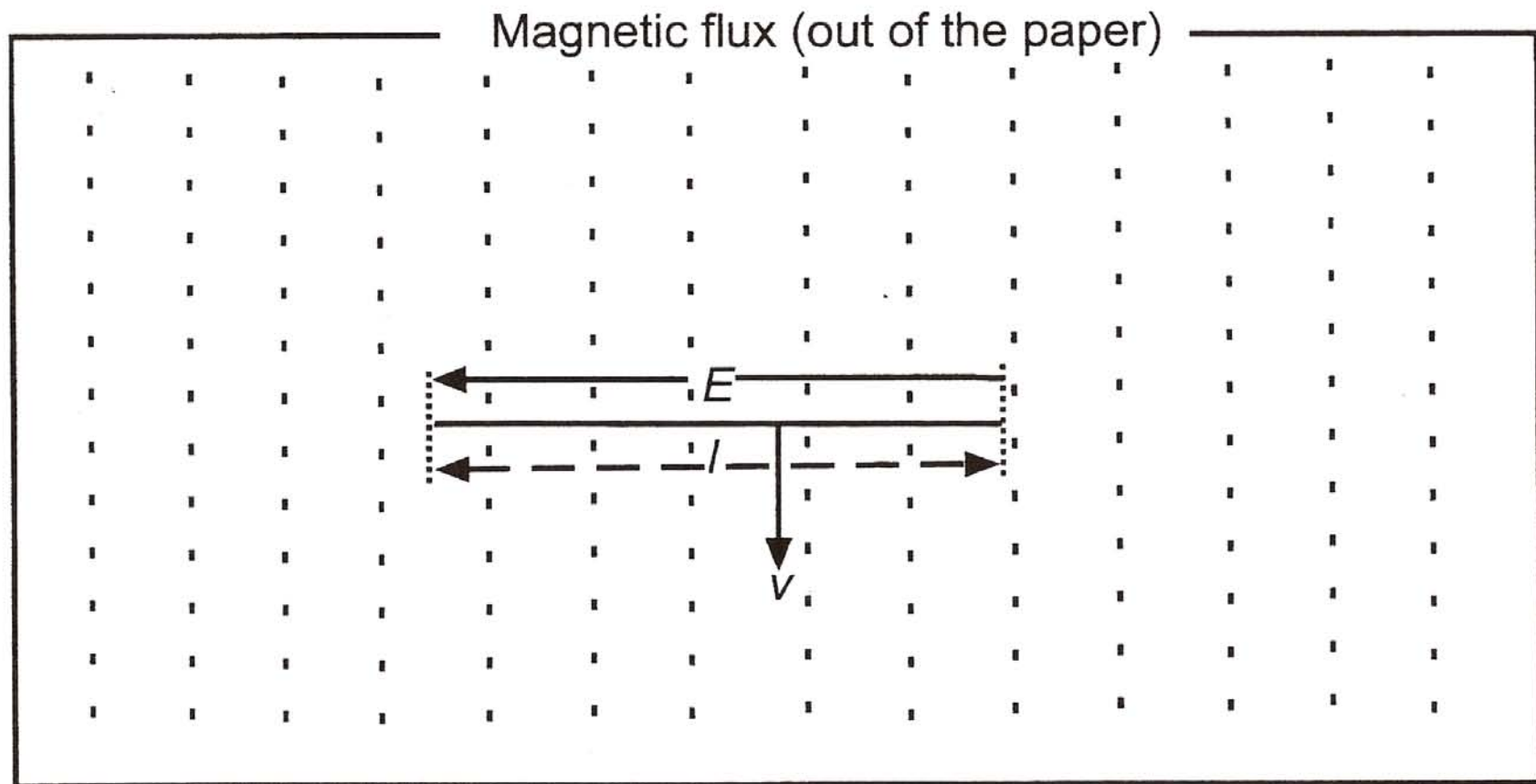
Interacción entre un conductor que lleva una corriente “ $i$ ” y un campo magnético externo “ $B$ ”

La interacción entre los dos campos crea un campo localmente no uniforme, y la no uniformidad genera una fuerza que trata de desplazar al conductor buscando que el campo estacionario vuelva a la condición de equilibrio con distribución uniforme.

Fuerza inducida en un conductor por un campo magnético.

La fuerza  $f_{em}$  inducida por un campo magnético de densidad de flujo  $B$  sobre un conductor de longitud  $l$  a través del cual circula una corriente  $i$  es:

$$f_{em} = Bil$$



Interacción entre un conductor en movimiento y un campo magnético-

Si se desplaza un conductor cortando las líneas de flujo de un campo magnético se produce una diferencia de potencial entre los extremos del conductor en movimiento.

Si el conductor está fijo, y lo que se desplaza es el campo, se produce el mismo efecto.

Tensión inducida en un conductor por un campo magnético.

La tensión  $e_{em}$  inducida por un campo magnético de densidad de flujo  $B$  sobre un conductor de longitud  $l$  que se mueve con una velocidad  $u$  es:

$$e_{em} = Blu$$

Hasta la fecha las interacciones entre campos magnéticos y conductores han sido combinadas de dos formas distintas para producir los diferentes tipos de conversores electromecánicos de energía ("máquinas eléctricas"):

1- Máquinas DC: Operan en base a la interacción entre un campo magnético fijo en el espacio y la corriente DC que circula en una bobina que puede moverse en el espacio donde está definido el campo magnético estacionario.

Si la fuerza generada por la interacción campo/corriente es la causa del movimiento de la bobina, la máquina opera como motor; si es una fuerza externa la que mueve la bobina, la máquina opera como generador DC ("dinamo").

2- Máquinas AC: Operan en base la interacción entre dos campos magnéticos, por lo menos uno de los cuales es generado por un conjunto de bobinas alimentadas con corriente AC.

De acuerdo con el tipo de sistema AC empleado las máquinas AC se pueden agrupar en las siguientes categorías:

A.- Máquinas de bobinado distribuido.

En primera aproximación estas máquinas han sido diseñadas para operar alimentadas con un sistema polifásico AC sinusoidal y las espiras de cada bobina se distribuyen en todo el estator, siguiendo una distribución de densidad de bobinados sinusoidal.

Existen dos tipos definidos por dos sistemas fundamentalmente distintos de operación:



1.- Máquinas síncronas: En general existe un campo magnético independiente en el rotor, generado por una bobina DC o un imán permanente, que interacciona con el campo magnético generado por las bobinas del estator, campo que gira en el espacio a una velocidad que es función de la frecuencia de alimentación; el rotor gira sincronizado, con la velocidad del campo magnético producido por las bobinas del estator.

La relación de fase entre los vectores espaciales de los campos magnéticos de rotor y estator determina si la máquina síncrona opera como motor (la energía eléctrica aplicada a las bobinas de estator causan el movimiento) o como generador (la energía mecánica externa aplicada al eje del rotor causa el movimiento).

2.- Máquinas asíncronas o de inducción: El campo magnético del rotor es inducido por el campo magnético generado por las bobinas del estator, lo que requiere que el rotor gire a una velocidad distinta a la del campo inducido por las bobinas del estator (giro asíncrono).

Si el rotor gira a una velocidad menor a la de sincronismo, la máquina asíncrona opera como motor (la energía eléctrica aplicada a las bobinas de estator causan el movimiento), si gira a una velocidad mayor, opera como un generador (la energía mecánica externa aplicada al eje del rotor causa el movimiento a una velocidad superior a la de sincronismo).

## B.- Máquinas de alimentación por pulsos rectangulares.

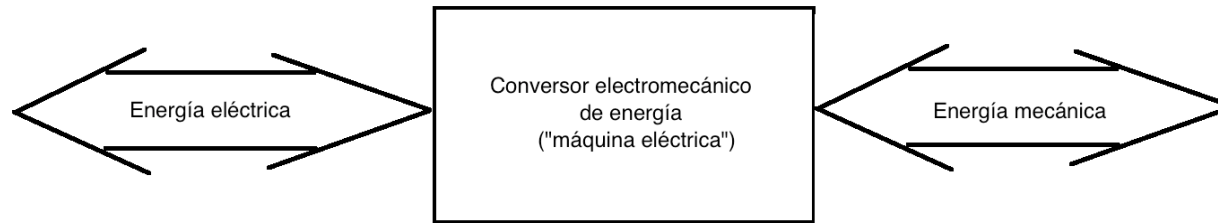
En primera aproximación estas máquinas han sido diseñadas para operar alimentadas con un sistema polifásico de trenes de pulsos rectangulares cuya secuencia y separación en el tiempo puede variarse de forma arbitraria, esto es, ni la posición instantánea del rotor ni la secuencia de pulsos aplicados anteriormente determinan el comportamiento subsiguiente.

Las espiras de cada bobina se agrupan en zonas determinadas del estator, usualmente en polos salientes.

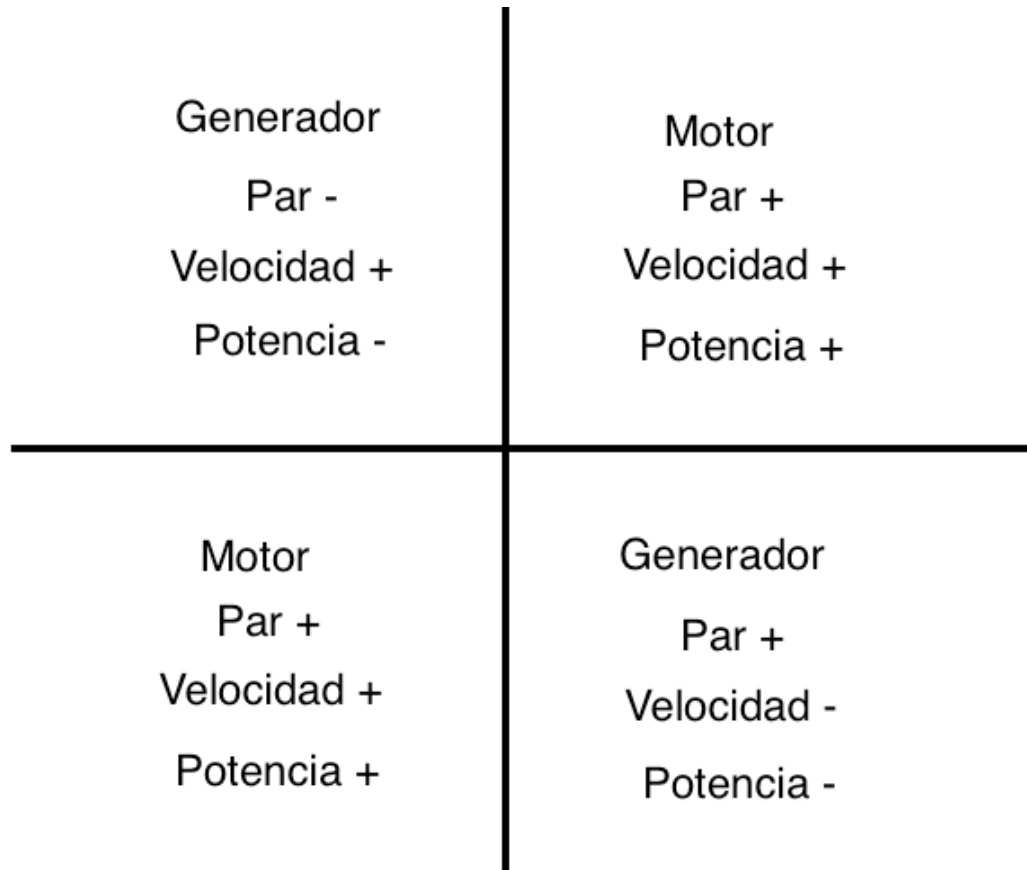
Existen múltiples tipos que por su aplicación principal suelen agruparse en:

1.- Motores de pasos.

2.- Motores DC sin escobillas (BLDC: Brushless DC Motors).



En general las máquinas eléctricas son conversores electromecánicos bidireccionales que, dependiendo de las acciones del control, pueden convertir energía eléctrica en energía mecánica, actuando como motores, o energía mecánica en energía eléctrica, actuando como generadores o "frenos regenerativos" (usualmente los motores de pasos no operan como generadores).



Cuadrantes de operación de un conversor electromecánico de energía "máquina eléctrica"

También son bidireccionales en el sentido puramente mecánico del término, ya que dependiendo de las acciones del control, su eje puede girar en sentido horario o anti-horario.

En principio la bi-direccionalidad en el sentido de giro es totalmente simétrica, aunque por razones de auto-ventilación puede haber un sentido de giro preferido para evitar sobrecalentamiento.

Desde el punto de vista del modelo de control, las máquinas eléctricas en general son redes de dos puertos, uno eléctrico y otro mecánico, por lo que su modelo requiere como mínimo de dos ecuaciones principales: una que describa el comportamiento eléctrico y otra que describa el comportamiento mecánico.

En algunos casos (por ejemplo en las máquinas DC con bobinado de campo) existe un segundo puerto eléctrico que se puede considerar como auxiliar de regulación, dado que los cambios en este circuito modifican la operación del convertidor electromagnético principal, pero usualmente no aportan energía adicional a la conversión.