

## Capítulo II. Motores

En la actualidad, son ampliamente utilizados en nuestra vida cotidiana, desde utensilios en el hogar como lo son licuadoras, batidoras, procesadores de alimentos, extractor de jugos, refrigeradores pasando por automóviles, elevadores etc. En fin, son empleados para una amplia variedad de cosas, razón por la cual son tan importantes hoy en día.

Existen 2 divisiones muy populares en lo que respecta al área de motores: motores de combustión y motores eléctricos. Dentro de los motores eléctricos a su vez existen dos grandes divisiones principales: motores de corriente directa y motores de corriente alterna.

### **2.1 Motores eléctricos**

Una máquina eléctrica es un dispositivo que es capaz de convertir energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Cuando la conversión es de energía mecánica a eléctrica es conocido comúnmente como un generador, en cambio cuando la conversión es de energía eléctrica a energía mecánica es llamado motor. Esta conversión se logra gracias a la acción de campos magnéticos. [1]

El principio del funcionamiento de los motores eléctricos es bastante sencillo y en esencia es el mismo tanto en los motores de corriente directa como en los de corriente alterna.

Para poder comprender este funcionamiento, antes que nada hay que abordar el tema referente al magnetismo y su relación con la electricidad.

La palabra magneto fue empleada para nombrar a las rocas que atraían metales y proviene del nombre del lugar donde se encontraron los primeros imanes naturales, Magnesia. La figura 2 muestra una de estas rocas. [6]



**Figura 1. Magnetita.**

Un imán o magneto es un cuerpo que posee la propiedad de atraer hacia sí elementos ferromagnéticos como lo son algunos metales y pueden ser naturales como la magnetita o artificiales, estos últimos son barras de hierro o acero que adquirieron propiedades magnéticas.

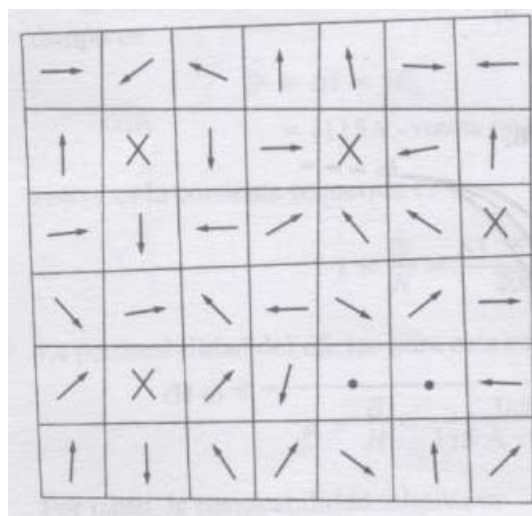
El proceso anteriormente mencionado es conocido como magnetización o imantación y se puede realizar por diversas maneras como lo son: contacto, inducción o procedimientos eléctricos. La figura 3 muestra el proceso de magnetización por contacto. [6]



**Figura 2. Magnetización por contacto. [6]**

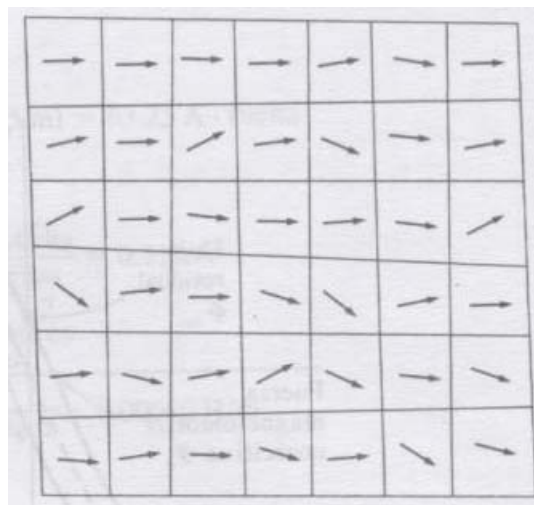
En los imanes naturales, o en los artificiales, la corriente que origina el magnetismo es el conjunto de todas las corrientes de sus moléculas, que son los electrones girando alrededor de sus núcleos. [1]

En casi todas las sustancias, estos imanes elementales están desordenados, es decir, cada uno orientado en una dirección del espacio, por lo que la resultante total del conjunto de estos imanes elementales es nula, y no presentan magnetismo. La figura 4 muestra un ejemplo de este tipo de orientación. [1]



**Figura 3. Orientación desordenada. [1]**

En ciertas sustancias, estos pequeños dominios magnéticos pueden orientarse muy fácilmente, debido a influencias externas (puede ser el mismo magnetismo terrestre); cuando varios dominios elementales magnéticos se orientan en una misma dirección espacial, su resultante ya no es nula, y el cuerpo resulta magnetizado, en otras palabras: el cuerpo posee propiedades magnéticas por tal motivo se comporta como un imán. En la figura 5 se observa esta orientación. [1]



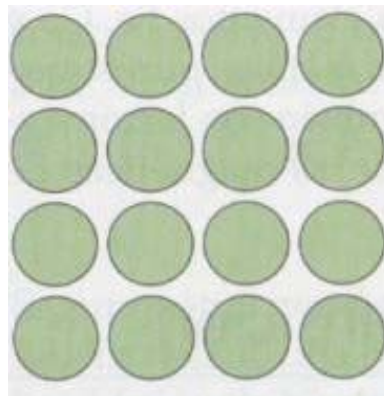
**Figura 4. Orientación ordenada. [1]**

También, existen imanes temporales e imanes permanentes, la diferencia entre ellos radica en el tiempo que pueden permanecer con las propiedades magnéticas, por ejemplo si se magnetiza una barra de hierro esta mantendrá sus propiedades magnéticas, en tanto que no se retire la fuente de magnetización razón por la cual se le considera un imán temporal. Con el acero sucede lo contrario, una vez realizada la magnetización no pierde sus propiedades magnéticas y entonces se le conoce como imán permanente. [6]

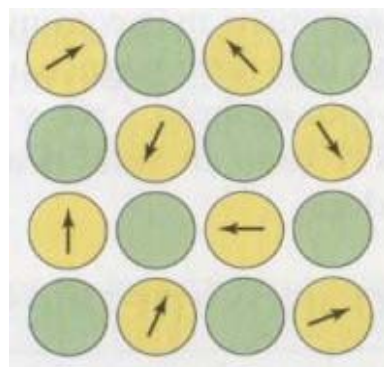
Los cuerpos cuyos dominios magnéticos son fácilmente orientables, es decir, que son fáciles de magnetizar como el hierro, se llaman paramagnéticos. Aquellos otros

que, por el contrario, resultan difícilmente o nulamente magnetizables, son llamados diamagnéticos. [6]

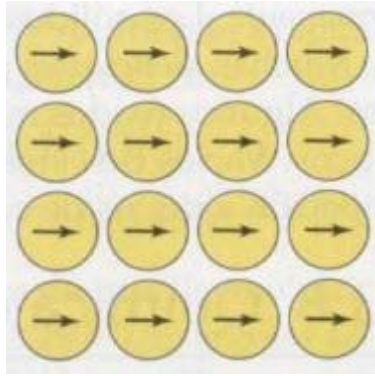
Existe un grupo de materiales (hierro, cobalto, níquel y compuestos especiales) que son extremadamente paramagnéticos. Dado que el hierro es el primero que se descubrió con tal comportamiento, estos materiales reciben el nombre de ferromagnéticos. En las figuras 6 se puede observar la orientación de estos cuerpos. [6]



**Figura 5a. Cuerpo diamagnético. [6]**



**Figura 6b. Cuerpo paramagnético. [6]**



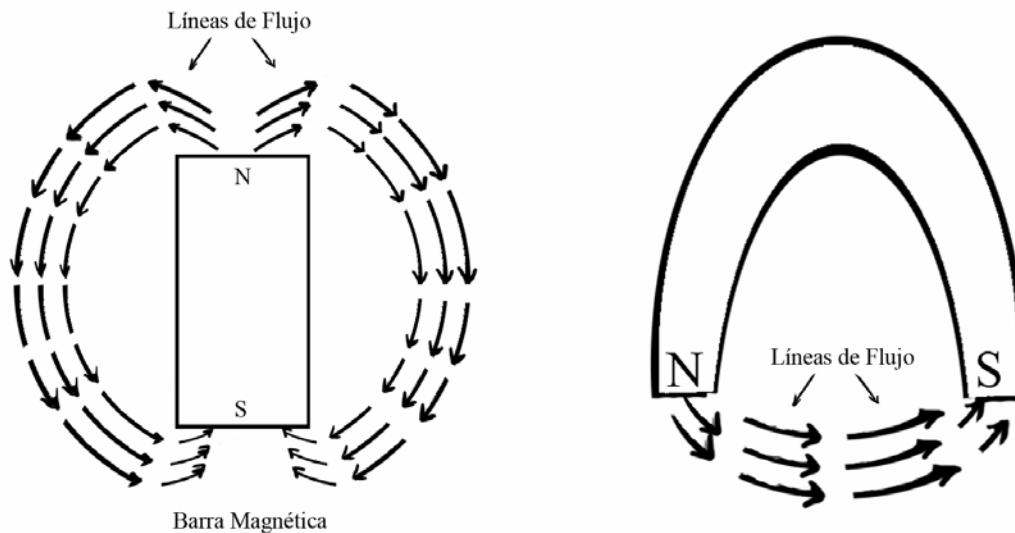
**Figura 6c. Cuerpo Ferromagnético. [6]**

Los imanes pueden obtener diversas formas como por ejemplo: barra, herradura, anillo, etc. Estas diferentes formas pueden variar dependiendo del uso que se les vaya a dar.

Estos cuerpos poseen dos polos, llamados polo norte y polo sur en referencia a los polos de la Tierra, que es un gran magneto.

Si partimos a la mitad un imán nuevamente se obtendrán los dos polos, es decir nunca habrá un imán que sea monopolos o en otras palabras que tenga un solo polo.

La región de espacio en la cual, el imán puede ejercer sus propiedades de atracción es conocida como campo magnético. La manera en la que el campo magnético está distribuido puede visualizarse en la figura 7.



**Figura 6. Líneas de flujo en imanes.**

Como puede visualizarse en la figura anterior, el campo magnético está representado por las líneas de flujo que son de gran ayuda para lograr tener una imagen mas concreta de la distribución existente del campo magnético en los imanes.

La interacción entre imanes está regida por ésta regla: polos iguales se repelen mientras que polos diferentes se atraen. Ésta interacción es fundamental para el funcionamiento de los motores eléctricos.

Existe una estrecha relación entre el magnetismo y la electricidad. En 1820 Hans Christian Oersted descubrió que cuando una brújula era acercada a un conductor eléctrico como un alambre, ésta se movía al hacer pasar un flujo de corriente en el alambre. Esta relación entre la corriente eléctrica y el campo magnético utilizando el alambre y la brújula puede visualizarse en la figura 8. [3]



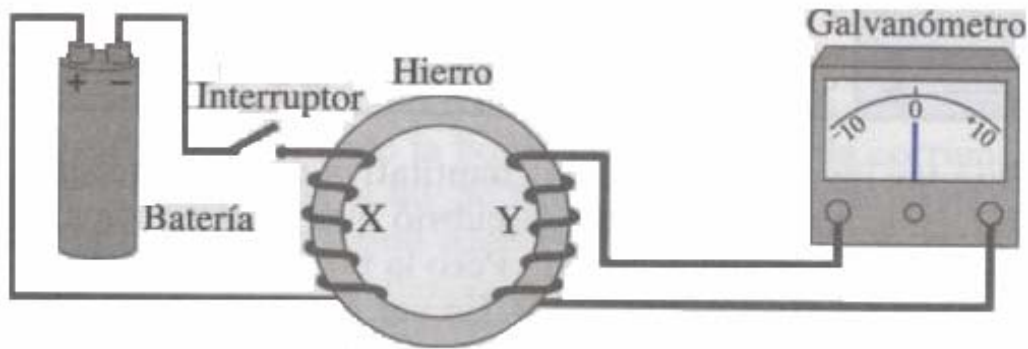
**Figura 7. Deflexión de agujas en brújulas debido a una corriente eléctrica. [3]**

El inglés Michael Faraday descubrió que se puede inducir una corriente eléctrica utilizando un campo magnético. Su experimento consistió en conectar una batería a una bobina con un núcleo de hierro, una bobina es un alambre enrollado y el núcleo es el material que se encuentra dentro de esta bobina. El hierro logra un mayor campo magnético que el aire cuando se le hace circular una corriente al embobinado. [3]

Faraday conectó una batería a un embobinado con un entrehierro y con esto pretendía hacer circular en este, una corriente lo suficientemente grande como para inducir un campo magnético que fuera capaz de inducir otra corriente en un segundo embobinado que a su vez estaba conectado a un galvanómetro, instrumento empleado para medir la corriente eléctrica que se le hace circular.

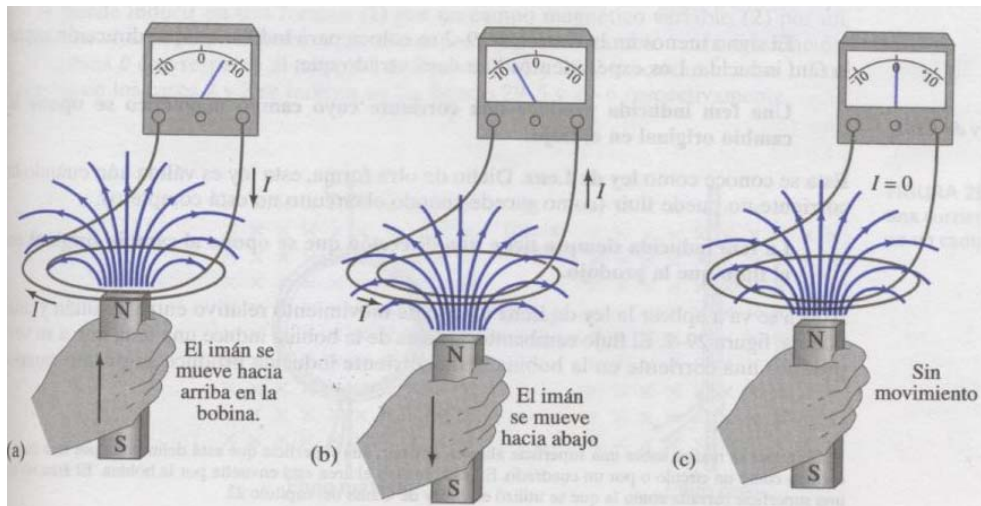


De esta manera pretendía poder comprobar su teoría de que es posible producir una corriente eléctrica induciendo un campo magnético sobre un conductor, en este caso el alambre. La figura 9 muestra este experimento. [3]



**Figura 8. Circuito de Faraday. [3]**

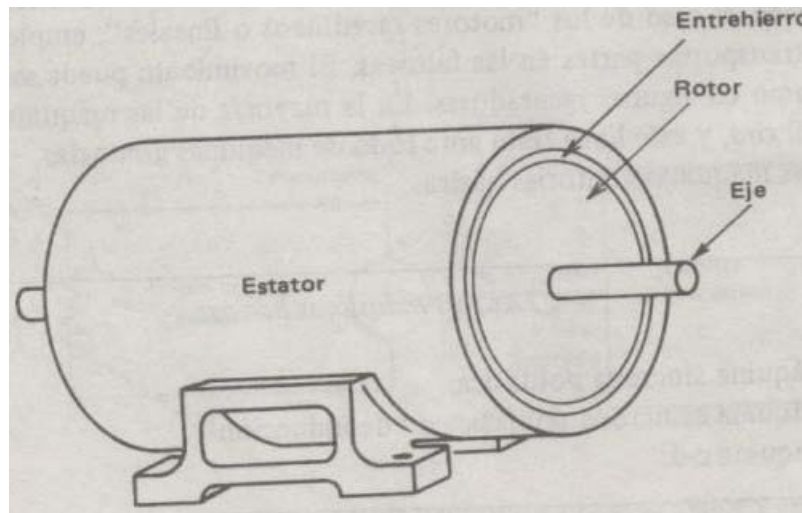
Faraday no tuvo éxito con su experimento al utilizar una corriente estable, es decir, después de haber conectado la batería al embobinado pero observó que la aguja del galvanómetro se movía al conectar y al desconectar la batería. Razón que lo hizo pensar que una corriente estable en el primer embobinado no inducía una corriente en el segundo por lo tanto concluyó que un campo magnético estable no produce corriente eléctrica en cambio un campo magnético variable sí es capaz de producirla. La figura 10 muestra este experimento. [3]



**Figura 9. Relación entre movimiento del campo magnético y la corriente. [3]**

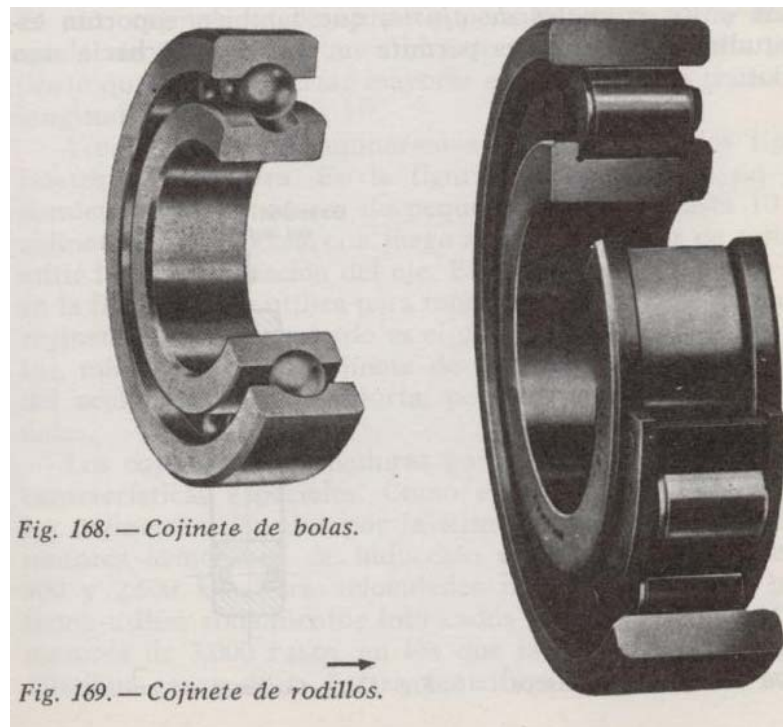
Una vez abordados los temas básicos para poder comprender el principio del funcionamiento de los motores se hará un pequeño resumen de los componentes generales de los motores eléctricos.

El componente o parte exterior de estas máquinas eléctricas es una parte fija, es decir que carece de movimiento llamada estator. Dentro de este componente existe una parte móvil llamada rotor. Este rotor se encuentra en la parte central del estator montado sobre una barra rígida, que por lo general es de acero, nombrada eje. El rotor está unido rígidamente al eje por lo cual poseen la misma velocidad tanto el eje como el rotor. El eje está sostenido por cojinetes de modo que el rotor tiene un movimiento libre. Entre el estator y el rotor se encuentra un espacio denominado entrehierro. Las figuras 11 y 12 muestran estas partes del motor. [4]



**Figura 10. Partes básicas de un motor. [4]**

Los cojinetes proveen un medio de acoplamiento entre la máquina y el sistema mecánico, la conexión puede ser directa o por medio de un acoplamiento empleando un engranaje o por medio de una polea y banda. [4]

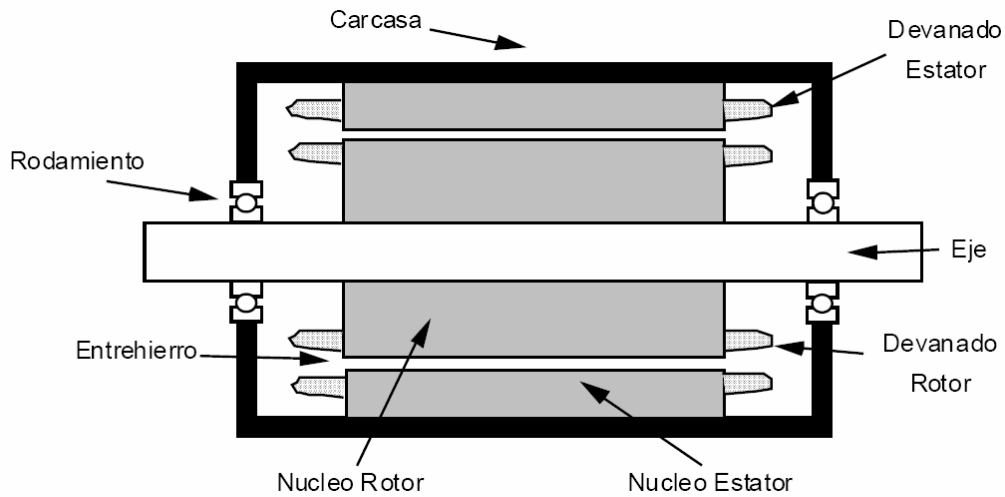


*Fig. 168. — Cojinete de bolas.*

*Fig. 169. — Cojinete de rodillos.*

**Figura 11. Cojinetes. [4]**

Tanto el rotor como el estator poseen tres partes básicas que son: el núcleo, el devanado y el aislante, mostradas en la figura 13. [4]



**Figura 12. Partes básicas del rotor y estator.**

Los núcleos, tanto del estator como del rotor, conducen el campo magnético a través de las bobinas de los devanados y el material de estos por lo general es de hierro o acero. [4]

Los devanados en cambio, tienen la función de conducir la corriente eléctrica que a su vez es la que produce el campo magnético como lo demostró Faraday con su experimento. La figura 14 muestra un devanado. [4]



**Figura 13. Devanado.**

Al devanado del voltaje de alimentación o de entrada, es por lo general llamado devanado primario y al de la resultante o salida se le conoce con el nombre de devanado secundario. [4]

El movimiento de los motores es resultado de la atracción y repulsión entre los polos magnéticos del rotor y del estator. Como ya fue mencionado antes, polos iguales producen una fuerza mecánica de repulsión, mientras que polos distintos producen una fuerza mecánica de atracción.

Los devanados en los motores son diseñados para que produzcan polos magnéticos en la superficie interna del estator y en la superficie externa del rotor. Esta interacción de atracción y repulsión de polos magnéticos producen el movimiento del rotor y por consiguiente el del eje. [4]

Para poder lograr un movimiento continuo y en un mismo sentido es necesario que el número de polos tanto en el rotor como en el estator sean los mismos. Por cada polo norte se debe de tener un polo sur y por ende el número de polos siempre será un número par.

Si en un motor se tienen dos polos en el estator, se tendrán dos polos en el rotor y se dice que el motor es de dos polos.

## **2.2 Motores de corriente directa**

Es importante mencionar que el primer método de generación de energía eléctrica fueron las baterías que generan una corriente directa y por ello las primeras máquinas eléctricas que existieron fueron las que funcionaban con corriente directa.

Cuando la generación de energía en modo de corriente alterna sustituyó a la de corriente directa, muchos de los motores usados fueron sustituidos por motores de corriente alterna pero a pesar de ello en la actualidad se siguen utilizando una gran cantidad de motores de CD. [4]

Una de las razones por las cuales los motores de CD siguen siendo tan populares es debido a que son ampliamente utilizados en los automóviles y camiones porque estos utilizan baterías. Por ejemplo los elevadores eléctricos de las ventanas, los limpiadores de parabrisas, los ventiladores del aire acondicionado, etc. Todos estos dispositivos emplean motores de corriente directa. [4]

Por otra parte, los motores de corriente directa se han caracterizado por su versatilidad, debido a sus características volts-amperes y velocidad-torque para su operación. Como consecuencia de la facilidad con la que pueden ser controlados los sistemas a base de motores de corriente directa son ampliamente utilizados en aplicaciones que requieran de un amplio control de velocidad o de precisión en la salida del motor. [2]

Como se vio anteriormente el movimiento de los motores eléctricos se logra gracias al efecto de los campos magnéticos, pero una vez que los polos del rotor se han alineado con el polo opuesto del estator existe una inversión de la corriente para poder

lograr un movimiento continuo en el mismo sentido, esto se logra gracias al conmutador y a las escobillas que hacen la función de alternar la corriente y lograr cambiar las polaridades del rotor. [3]

Las escobillas son contactos estacionarios que ejercen presión con el conmutador que se encuentra unido al eje, El conmutador cambia su conexión con la otra escobilla y esto a su vez produce el cambio en la corriente. Estos elementos son mostrados en la figura 15. [3]

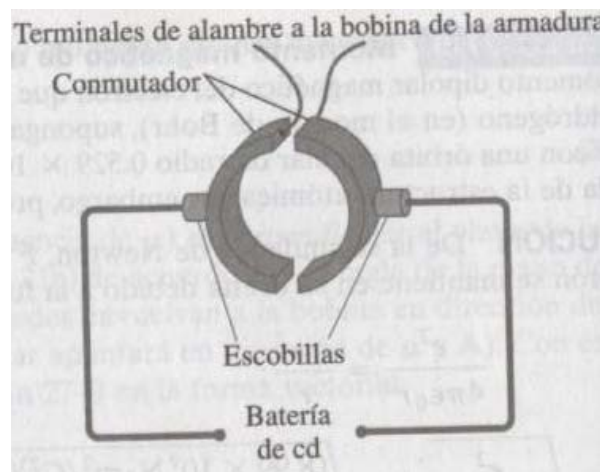


Figura 14. Escobillas y conmutador. [3]

### **2.3 Motores de corriente alterna**

Alrededor del año 1880, entró en funcionamiento el primer sistema generador de potencia de corriente continua en la ciudad de Nueva York, su propósito era el de suministrar la potencia necesaria para encender bombillas incandescentes, es decir, simples focos. Sin embargo, uno de los impedimentos de este sistema era que transmitía voltajes muy bajos, lo que requería una corriente considerablemente grande para poder transmitir cantidades de potencia suficientes para la demanda existente. Las altas corrientes provocaban enormes pérdidas en la transmisión por lo cual, las plantas

generadoras debían estar muy cerca de los usuarios. Esto las volvía locales y no permitía su distribución a grandes distancias, en consecuencia, un limitado número de usuarios tenían acceso a esta nueva tecnología. [4]

Cuando se crearon los transformadores (dispositivos que convierten energía eléctrica de un nivel de voltaje a otro) y se comenzó a generar corriente alterna, la limitante anteriormente mencionada dejó de ser un problema.

Al elevar el voltaje con un transformador, la corriente se reduce para poder conservar la misma potencia que sale de este. Con la ayuda del transformador se puede generar la energía eléctrica alterna en un punto y ser transmitida grandes distancias económicamente y con pérdidas mucho menores a las que existirían sin utilizar este método de transformación de corriente alterna. Las pérdidas generadas en las líneas de transmisión son proporcionales al cuadrado de la corriente, tras elevar el voltaje eventualmente se disminuye la corriente junto con las pérdidas. [1]

Una vez más el magnetismo influye de gran manera ya que el principio de operación de este tipo de motores involucra campos magnéticos. La diferencia fundamental con los motores de corriente continua radica en que no es necesario tener un conmutador y escobillas que alternen la corriente, ésta alterna desde que es transmitida por ello su estado cambiante es natural y a su vez aprovechado por los motores de CA.



### 2.3.1 Motor síncrono

Estos motores reciben su nombre debido a que su velocidad está directamente relacionada con la frecuencia de la línea de alimentación. La relación anteriormente mencionada es regida por la siguiente ecuación, donde  $n_s$  es medida en revoluciones/minutos:

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

De esta manera, si conectamos un motor de dos polos a una fuente de alimentación que trabaje a 60Hz entonces la velocidad del motor será de 3600 revoluciones por minutos (RPM).

Por lo tanto si se conectan uno o más motores de este tipo y con el mismo número de polos a una misma línea de alimentación, todos los motores estarán funcionando a la misma velocidad ya que emplean la misma frecuencia y a ésta se le conoce como velocidad síncrona. [4]

### 2.3.2 Motor asíncrono

Estos motores son muy parecidos a los motores síncronos, la única diferencia radica en la construcción del rotor. Estos rotores son de dos tipos: devanados y de jaula de ardilla. La razón por la cual son llamados motores asíncronos es debido a que su velocidad de operación es ligeramente menor que la velocidad síncrona. [4]

En estos motores no existe ninguna conexión eléctrica hacia los devanados del rotor poniéndose estos en corto circuito. Son acoplados por el flujo magnético que

atraviesa el entrehierro. Tomando en cuenta la ley de Faraday, al moverse el rotor en relación al flujo magnético provoca que se induzca un voltaje en los devanados del rotor puestos en corto circuito. Por ser inducida la corriente del rotor estos motores también reciben el nombre de motores de inducción. [4]

Los motores de inducción de jaula de ardilla son ampliamente usados debido a que son altamente resistentes, relativamente baratos y requieren poco mantenimiento.

## **2.4 Análisis de vibraciones en motores**

Idealmente, las máquinas rotativas trabajarían de manera constante y sin errores, es decir, sin tener fallas de ningún tipo; pero sabemos que en la práctica esto no suele suceder. Las máquinas tienden a fallar y tienen una vida útil e incluso algunas veces ésta vida útil no llega a alcanzarse.

Si se espera a que la máquina tenga una falla para hacer su respectiva reparación se puede perder mucho tiempo, que en muchos casos conlleva a una pérdida económica también. Incluso, muchas veces se puede tener una pequeña falla que no sea detectada visiblemente y después de un tiempo ésta misma provocar una falla mucho mas severa resultando en una reparación muy costosa que pudo haber sido evitada al corregir a tiempo la primera falla.

Por ello es necesario tener un método o sistema que sea capaz de detectar las fallas antes de que se vuelvan críticas y de esta manera poder planificar lo más eficientemente posible su reparación por ejemplo en la industria, sin afectar en gran medida la producción debido al mantenimiento de los motores.

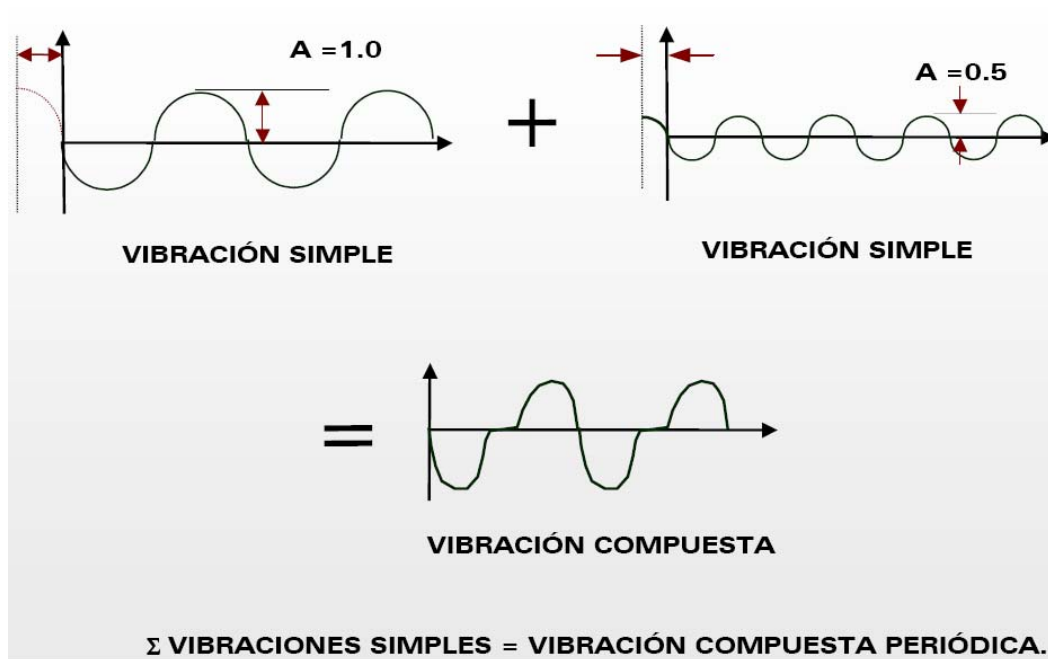
Afortunadamente existe un método para poder detectar fallas en estas máquinas rotativas antes de que afecten en gran medida el funcionamiento de estas. Incluso se puede dar un seguimiento del estado de éstas conforme avanza el tiempo. Este eficaz método es el análisis de vibraciones.

En este caso, la vibración se define como el movimiento mecánico que se puede medir en la superficie de una máquina. La vibración en los motores disminuye la vida útil de estos. Razón por la cual es de vital importancia reducir las vibraciones de los motores al máximo posible. [5]

Existen dos principales tipos de vibración en los motores eléctricos: la que es producida por una fuerza mecánica y la que aparece al existir una fuerza magnética, ésta última es una consecuencia natural producida por el principio de funcionamiento de los motores. [5]

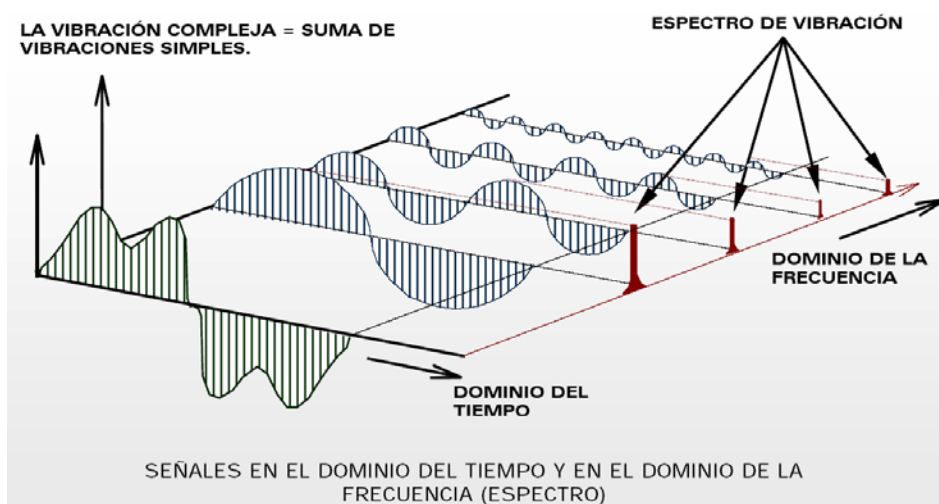
El tener pocas vibraciones normalmente es algo bueno ya que indica que hay un balanceo apropiado y un funcionamiento correcto, no obstante con estas se pueden detectar futuras fallas.

Las vibraciones emitidas son complejas, es decir, son una suma de vibraciones simples. El patrón de éstas puede decir varias cosas, sólo que hay que saber de qué manera interpretarlo. Un ejemplo de este tipo de vibración se observa en la figura 16. [11]



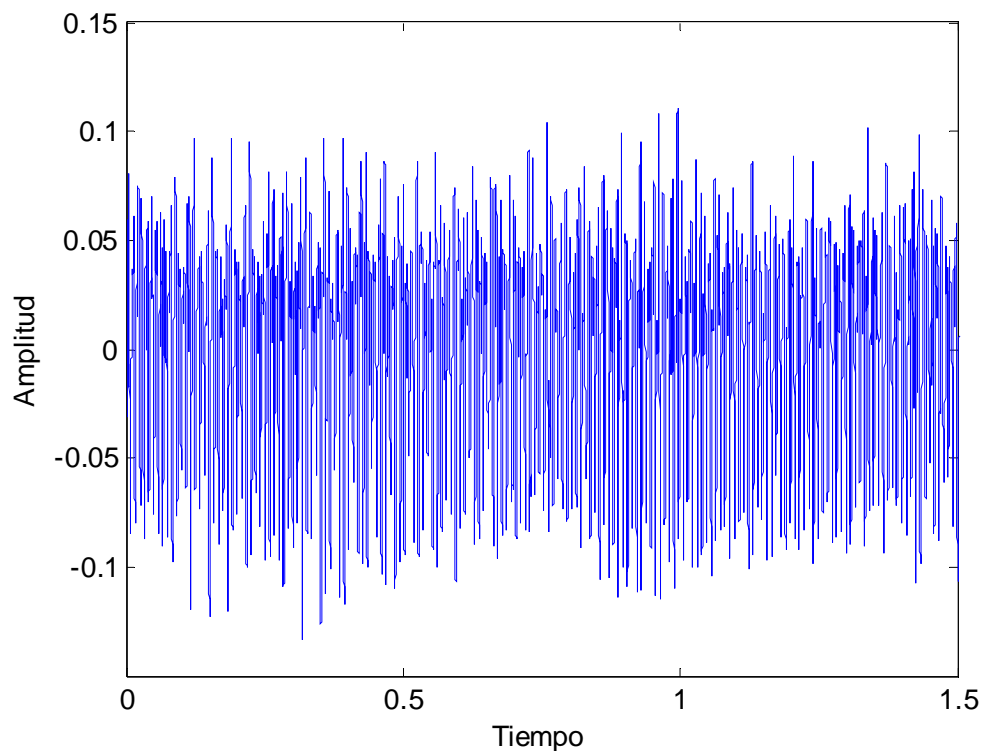
**Figura 15. Vibración compuesta. [11]**

Una manera sencilla de poder visualizar este tipo de señales complejas es en el dominio de la frecuencia, la figura 17 muestra la relación del dominio del tiempo, frecuencia y amplitud.



**Figura 16. Relación entre tiempo y frecuencia. [11]**

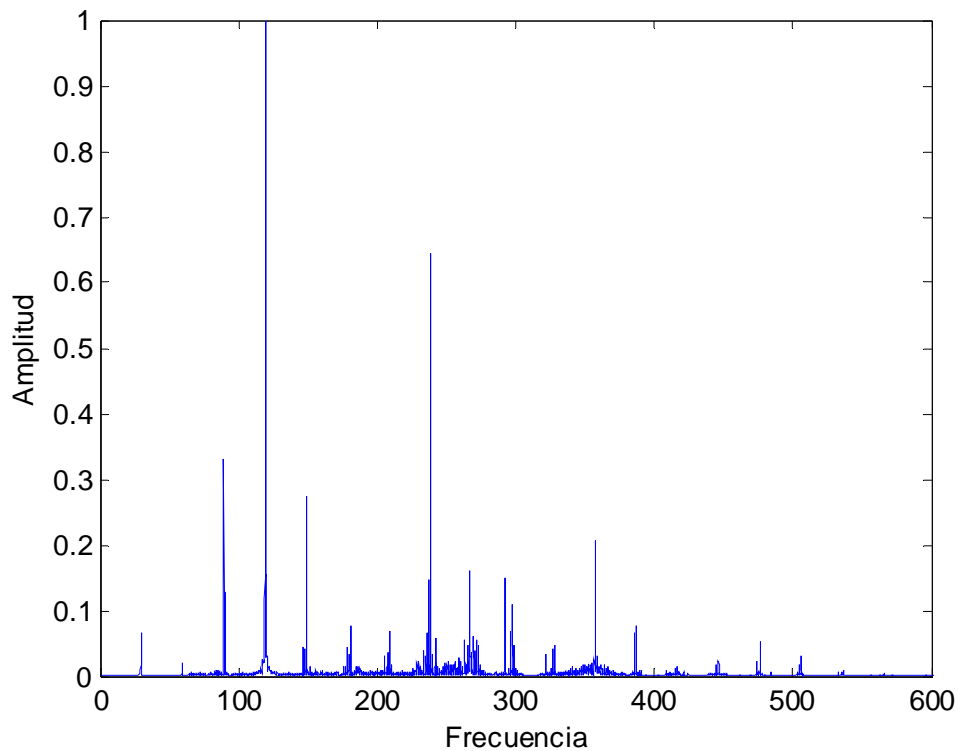
Si al patrón de las vibraciones obtenido por el sensor no se le aplica ninguna operación, se obtiene en el dominio del tiempo como en la figura 18, sin embargo es difícil poder interpretar lo que dice la gráfica.



**Figura 17. Gráfica en el dominio del tiempo.**

Para poder tener una interpretación mas fácil de lo que el patrón de vibraciones indica es necesario trabajar en el dominio de la frecuencia y para ello es necesario el análisis de Fourier.

La figura 19 muestra la misma señal de la figura 18 pero en el dominio de la frecuencia.



**Figura 18. Espectro en frecuencia (normalizado).**

Como se puede observar, es bastante sencillo identificar las frecuencias contenidas en la señal. Razón por la cual el análisis en el dominio de la frecuencia es empleado en el análisis de vibraciones.

## **2.5 Fallas comunes**

Existen diversas fallas que pueden existir en los motores. Estas pueden ser fallas mecánicas o fallas eléctricas.

Las fallas eléctricas mas comunes se presentan en los devanados y la causa principal es el óxido y la carbonización de estos que afectan la impedancia y reluctancia que a su vez afecta el campo magnético generado en el motor.

Las fallas mecánicas mas comunes se mencionan a continuación junto con una pequeña descripción y su frecuencia característica.

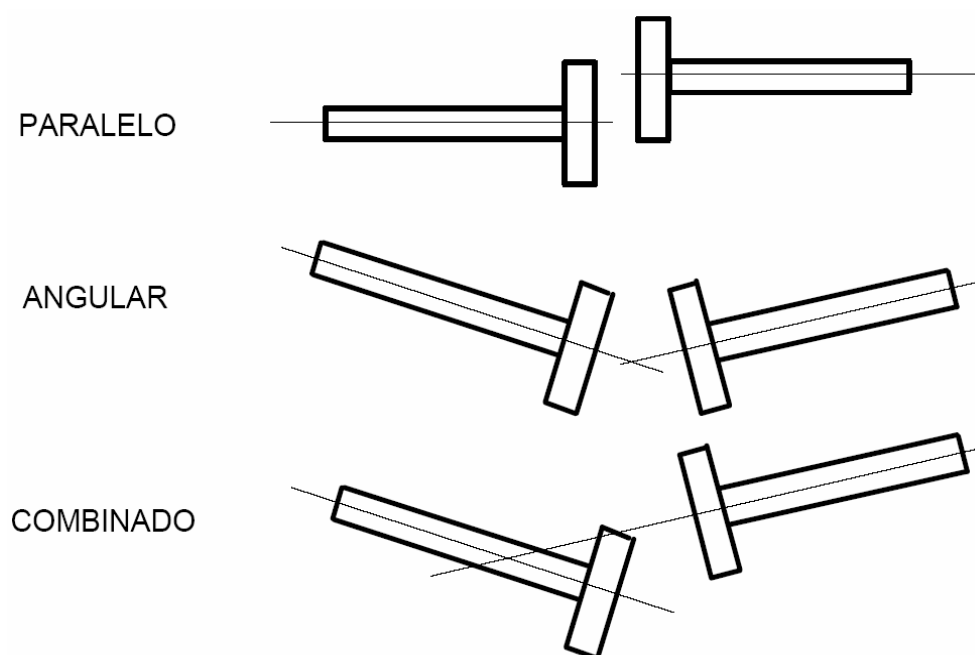
### **Desbalanceo**

Es una de las fuentes de vibración más comunes en las maquinas rotatorias, se define como la no coincidencia entre el eje longitudinal y el eje de rotación del elemento desbalanceado. [11]

La frecuencia característica a la que se presenta es 1X RPM (revoluciones por minuto o frecuencia de rotación). [11]

### **Desalineamiento**

Existen tres tipos de desalineamiento, son mostrados a continuación en la figura 20.



**Figura 19. Tipo de desalineamiento.**

El desalineamiento produce tres armónicas en la frecuencia de rotación: 1X, 2X y 3X RPM. [11]

### **Firmeza estructural**

Ablandamiento o desplazamiento de la base de la máquina, por mal ajuste en los tornillos de la base o por deterioro de los componentes de la sujeción.

La firmeza estructural, presenta una frecuencia característica a 1X RPM. [11]

### **Excentricidad**

La excentricidad se presenta cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico del rotor y esto produce que al girar se presenten campos magnéticos desiguales. [11]

La frecuencia característica de esta falla se presenta a 1X RPM con bandas laterales, es decir con frecuencias con una amplitud menor muy cercanas a 1X, tanto menores como mayores. [11]