

Fundamentos electromagnéticos de la Revolución Tecnológica, ó ¿Como funcionan las máquinas eléctricas?

Oscar E. Piro

1. Primeras observaciones

La respuesta a la pregunta del título implica entender los fundamentos físicos de fenómenos naturales eléctricos y magnéticos, observados en la Antigua Grecia y descriptos por el filósofo griego Tales de Mileto (625-545 A.C.). Se había descubierto que ciertos materiales (vidrio, ámbar, médula de saúco, resina, etc.) cuando frotados con un paño de seda (o una piel de gato) adquirirían la propiedad de atraer pequeños objetos y de atraerse o rechazarse entre sí a distancia, sin que mediara contacto directo entre ellos.

También se observó que cierto mineral (que hoy identificamos como magnetita, Fe_3O_4) proveniente de Magnesia (actual Manisa, en Turquía), una ciudad griega del Asia Menor occidental, tenía la propiedad natural que cuerpos de ese material eran capaces de atraer a pequeños trozos de hierro a los que confería la misma propiedad.

1.1. Breve historia de la electricidad

La observación de fenómenos (luego llamados “eléctricos”) en muchos diferentes materiales, llevó a la conclusión de que la electricidad era una suerte de fluido que puede producirse y transportarse entre cuerpos cuando son frotados entre sí. Esta visión se vio sustentada por el descubrimiento de la conducción eléctrica por Stephen Gray (Inglés, 1666-1736).

Se encontraron sólo dos tipos de manifestaciones eléctricas: el producido frotando vidrios, cristales o gemas con, principalmente, seda que se llamó “vítrea” y el producido frotando resina, ámbar, etc. con pieles, que se llamó “resinosa” (Charles Du Fay, Francés, 1698-1739), originándose de este modo una teoría de dos fluidos. Se observó que cuerpos con el mismo tipo de carga se repelían entre sí, mientras que cuerpos portando cargas distintas mostraban atracción mutua. Curiosamente, la seda o la piel con la que se electrizaraban por frotamiento los cuerpos mencionados adquirirían el fluido complementario, esto es electricidad resinosa en la seda y vítrea en la piel. Benjamín Franklin (Estadounidense, 1706-1790) cuestionó la interpretación en términos de dos fluidos, proponiendo la teoría de un solo fluido “extremadamente sutil y móvil”, que en exceso daría lugar a “electricidad vítrea” y que llamó “positiva (+)” y que cuando se encuentra en defecto daría lugar a las manifestaciones de la “electricidad resinosa” a la que llamó “negativa (-)”, nomenclatura que empleamos en la actualidad. Franklin también introdujo el concepto de la conservación de la carga: *la electricidad no puede nunca crearse o destruirse, sólo puede ser separada y transportada de un cuerpo a otro*. Así, cuando se frota una barra de vidrio con seda, la carga positiva generada en el vidrio es exactamente igual a la carga negativa que permanece en la seda. Normalmente, los cuerpos son eléctricamente neutros, esto es, cargas positivas y negativas se compensan exactamente para sumar cero. Para separarlas en generadores electrostáticos es necesario suministrar energía.

Sin embargo, estudios posteriores sobre el origen de las cargas eléctricas mostraron dos defectos en la teoría del fluido único de Franklin:

1) La materia está constituida de *átomos* que pueden pensarse como diminutos sistemas planetarios, donde ligerísimas partículas llamadas *electrones* (de masa igual a 9.10956×10^{-31} Kg), que portan carga negativa (-), orbitan alrededor del *núcleo atómico*, que contiene la mayor parte de la masa atómica (1836 veces mas pesado que el electrón en el caso del átomo mas liviano, el hidrógeno) y que porta una carga positiva (+). Si bien son los móviles electrones los que transportan carga en los sólidos, los *iones positivos* que se obtienen mediante la extracción de algunos electrones a los átomos neutros, y que son normalmente inmóviles en el sólido, pueden adquirir movilidad en medios tales como el electrolito de una batería de automóvil o el plasma gaseoso de una lámpara de descarga. Así pues, *hay dos fluidos* (como proponía Du Fay) y no uno como pensaba Franklin.

2) Franklin se equivocó en asignar al fluido móvil en los materiales sólidos el carácter de “electricidad vítrea” (+), en lugar de la correcta “electricidad resinosa” (-), asociada con los electrones. *De esta manera, y por razones históricas, continuamos denominando con el inapropiado nombre de “negativas” a las cargas más comunes (electrones) que transportan la electricidad!*

Conductores y aisladores: En general, los metales son buenos conductores de la electricidad (y, consecuentemente, del calor), mientras que los no-metales son aisladores o muy pobres conductores. Esto se debe a la facilidad con que los átomos metálicos pueden perder uno o más de sus electrones exteriores, como lo muestra la formación de iones metálicos positivos en solución. En un cuerpo metálico sólido, tal como un hilo de cobre, estos electrones pueden moverse libremente y así transportar la electricidad. Los iones metálicos positivos resultantes, en contraste, se encuentran rígidamente vinculados al sólido y no participan de la conducción. Los no-metales no poseen electrones libres, y así son aislantes, o éstos se encuentran en una muy pequeña proporción y así resultan ser conductores pobres.

1.2. ¿Cuán fuertes son las fuerzas eléctricas?

La descripción cualitativa de los fenómenos tiene un valor relativo y un conocimiento profundo de los mismos sólo puede originarse en la cuantificación de dichos fenómenos. Es así que durante la segunda mitad del siglo XVIII los científicos se abocaron a medir las fuerzas de interacción entre cargas y estudiar como varían con la magnitud de las mismas y con las distancias que las separan. Los estudios estaban fuertemente influenciados por el éxito de la descripción cuantitativa de las fuerzas gravitatorias por parte de Newton en su tratado “Principia” (1687), para dar cuenta del movimiento de los planetas alrededor del Sol, como proporcional al producto de las masas en interacción e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las mismas, esto es:

$$Fuerza = G \times \frac{masa1 \times masa2}{(distancia \text{ entre } 1 \text{ y } 2)^2} \quad (1)$$

donde G es una constante universal cuyo valor cuando las distancias se miden en metros (*m*), las masas en kilogramos (*Kg*) y las fuerzas en Newtons (*N*) vale $6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2/\text{Kg}^2$.

Así es que los estudiosos esperaban que una ecuación análoga se aplicara en el caso de las fuerzas eléctricas. Luego de investigaciones preliminares por parte de Daniel Bernoulli

(Holandés-Suizo, 1700-782) en 1760, Joseph Priestley (Inglés, 1733-1804), John Robison (Escocés, 1739-1805) y Henry Cavendish (Inglés, 1731-1810) en 1775, medidas experimentales persuasivas fueron realizadas en 1785 por el físico e ingeniero francés **Charles-Augustine de Coulomb** (1736-1806). Coulomb usó un aparato muy sensible de su invención, la balanza de torsión (Ver Fig.1), para medir la fuerza entre bolitas de médula de saúco cargadas eléctricamente. De esta manera, confirmó la esperada variación de la fuerza con el cuadrado de la distancia: por ejemplo, una reducción de la distancia entre las bolitas a la *mitad* conducía a un incremento en *cuatro veces* en la fuerza entre ellas; un aumento de la distancia al *doblo* reducía la fuerza a la *cuarta parte*, etc.

Figura 1. Balanza de torsión con la que Coulomb midió la fuerza entre cargas eléctricas.

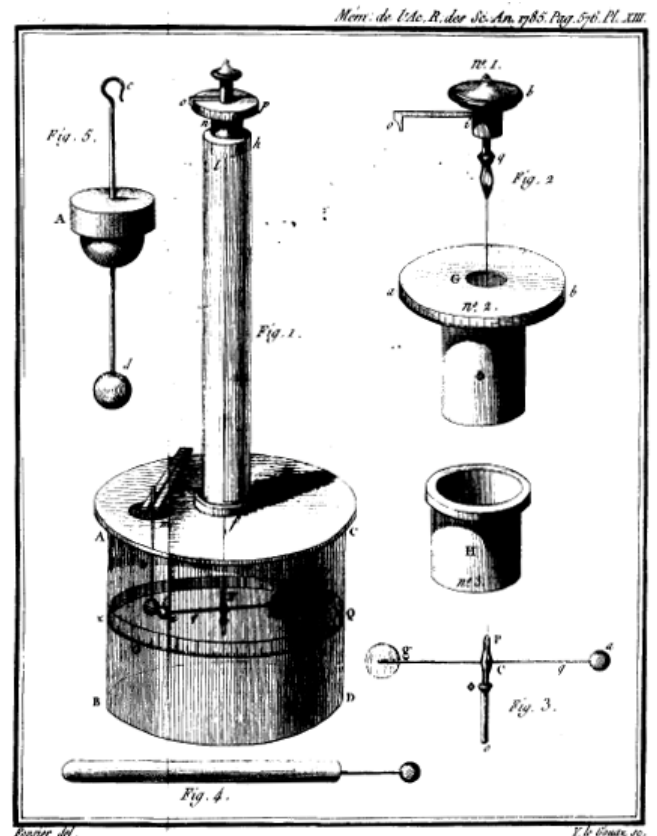
También estableció que la fuerza era proporcional al producto de las cargas eléctricas (“masas eléctricas“, como las llamó Coulomb) sobre las bolitas interactuantes, como era de esperar por analogía con la ley de fuerzas gravitacionales, esto es:

$$Fuerza = k \times \frac{carga1 \times carga2}{(distancia \text{ entre } 1 \text{ y } 2)^2} \quad (2)$$

Donde k, como G, es una constante fundamental, que depende de las unidades para definir fuerzas, cargas y distancias y que debe determinarse experimentalmente.

¿Como pudo Coulomb encontrar la dependencia con el producto de las cargas, si en su tiempo aún no se habían diseñado instrumentos para la medida precisa de las mismas? Lo hizo usando el sentido común en experimentos como el siguiente: Coulomb midió la fuerza entre dos bolitas cargadas separadas en una cierta distancia; luego removió una de las bolitas para ponerla en contacto con otra descargada del mismo tamaño, de tal manera de asegurarse que la carga inicial sería igualmente distribuida entre las dos bolitas y, por lo tanto, la carga de la primera bolita se *reduciría a la mitad*. Cuando esta bolita fue repuesta en su posición inicial observó que *la fuerza se reducía a la mitad*. Repitiendo el experimento, llevó la carga de la bolita a la *cuarta parte* de la inicial para observar que la fuerza era ahora la mitad de la anterior, esto es, *la cuarta parte de la fuerza original*, etc, ¡de esta manera Coulomb confirmó la forma matemática de la ley que lleva su nombre!

Volvamos a la pregunta de esta sección: ¿cuan fuertes son las fuerzas eléctricas? ¡enormes!, en relación con las familiares fuerzas gravitatorias (que dan cuenta del peso de los cuerpos). Para cuantificar ésta aseveración, comparemos la fuerza de atracción eléctrica entre los elementos constitutivos del átomo de hidrógeno, esto es, un electrón y un protón separados una cierta distancia, empleando la Ley de Coulomb con la correspondiente fuerza gravitatoria calculada



mediante la ley de atracción universal de Newton. El resultado es sorprendente: la fuerza eléctrica entre los constituyentes de un átomo de hidrógeno es 2.267×10^{39} veces más intensa que la gravitatoria! Esta es la razón por lo que no es la fuerza gravitatoria, sino la fuerza eléctrica la que mantiene los electrones en sus órbitas alrededor del núcleo y así determina la estructura de átomos, moléculas y de la materia que componen. En efecto, las fuerzas eléctricas se encuentran entre las más intensas de la Naturaleza, sólo superadas por las fuerzas nucleares (unas 100 veces mayores), que son de extremadamente corto alcance, por lo que no se manifiestan fuera del diminuto núcleo atómico (de unos 10^{-13} cm de dimensión).

1.3. Breve historia del magnetismo

En China, la primera referencia a este fenómeno se encuentra en un manuscrito del siglo IV A. C. titulado *Libro del amo del valle del diablo*: “La magnetita atrae al hierro hacia sí o es atraída por éste”. Fueron los chinos quienes descubrieron la propiedad de orientación Norte-Sur geográfica de una pieza de magnetita. En efecto, en un libro escrito por Wang Cheng en el año 83 de nuestra era se describe en detalle el uso de brújulas magnéticas con propósitos mágicos. Allí se habla de una “cuchara señalando el Sur”: una pieza de magnetita tallada en la forma de ese utensilio que cuando es colocada sobre una placa de bronce pulido (ver Fig. 2), gira orientando su mango hacia el Sur terrestre.



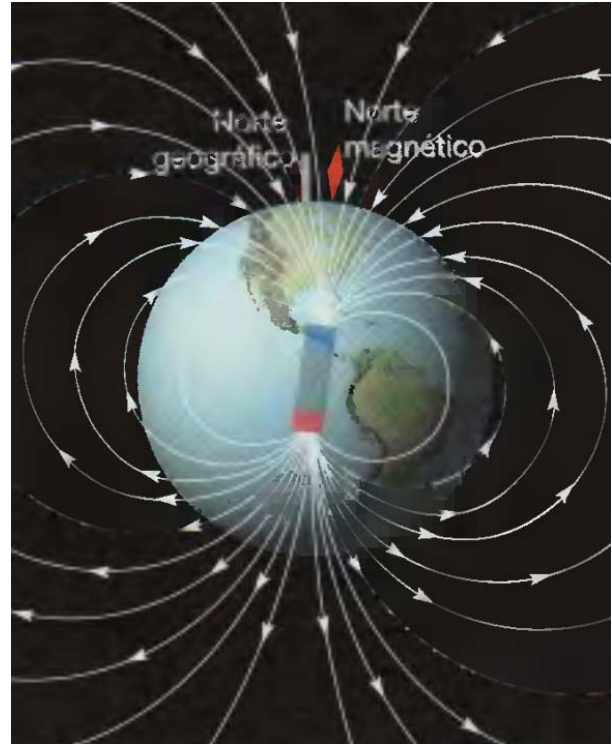
Figura 2. Antigua brújula China.

En un libro chino de 1084 escrito por Tseng Kung-Liang se describe en detalle un compás magnético consistente en un pequeño pez tallado en hierro magnetizado que se deja orientar libremente en la dirección Norte-Sur, manteniéndolo flotando en un recipiente de agua. Hacia el siglo XII, los chinos ya estaban valiéndose del enorme valor práctico de las brújulas en navegación.

El desarrollo del conocimiento sobre magnetismo ocurrió con cierto retraso en occidente. Un científico francés del siglo XIII llamado Pierre de Maricourt realizó experimentos magnéticos y escribió en 1269 el primer tratado sobre estos fenómenos, incluyendo una descripción detallada de la brújula magnética, que prontamente jugaron un rol fundamental en la navegación durante el medioevo europeo. Maricourt realizó observaciones fundamentales sobre las leyes de atracción y repulsión entre polos magnéticos: polos magnéticos de dos imanes que se orientan hacia el norte o los polos que se orientan hacia el sur, se repelen entre sí, en tanto que los polos magnéticos que apuntan en direcciones geográficas norte-sur opuestas, se atraen entre sí.

Los fundamentos del entendimiento científico del magnetismo fueron establecidos por **William Gilbert** (Inglés, 1544-1603). Basado en las observaciones de Manicourt sobre la polaridad de los imanes, Gilbert explicó correctamente la propiedad de orientación de las brújulas. Propuso que la Tierra se comporta como un gigantesco imán, cuyo polo sur magnético se encuentra próximo al Polo Norte geográfico y de esta manera atrae el polo norte de cualquier imán que se emplee como brújula (ver Fig. 3).

Figura 3. Las líneas de fuerza del campo magnético terrestre tienen un aspecto parecido a las que produciría una gigantesca barra imanada colocada en el centro de la Tierra.



Otros filósofos naturales de la época creyeron ver en las invisibles fuerzas magnéticas descubiertas por Gilbert en la Tierra, el origen de la atracción que experimentan los planetas en sus órbitas alrededor del Sol, una idea errónea que adoptaría Johannes Kepler (Alemán, 1571-1630) para tratar de explicar sus Leyes del Movimiento Planetario. La naturaleza diferente de la interacción entre cuerpos celestes que explica sus movimientos sería propuesta por Isaac Newton (Inglés, 1643-1727) en su Teoría de la Gravitación Universal de 1687.

Sin embargo, la creencia de Gilbert de que los fenómenos eléctricos y magnéticos no tenían relación entre sí, se vería refutada unos 220 años después cuando comenzó el desarrollo del electromagnetismo, como mostraremos mas adelante.

2. Nacimiento del electromagnetismo

Los fenómenos eléctricos y magnéticos fueron investigados y cuantificados sistemáticamente recién en los siglos XVII y XVIII, cuando se introdujo la noción de *campo eléctrico* una propiedad del espacio generada alrededor de cargas eléctricas, y de *campo magnético*, creado por el material magnetita (ver Fig. 4). Estos fenómenos parecieron inicialmente ser independientes entre si – hasta que se comenzó a estudiar las cargas en movimiento (corrientes).

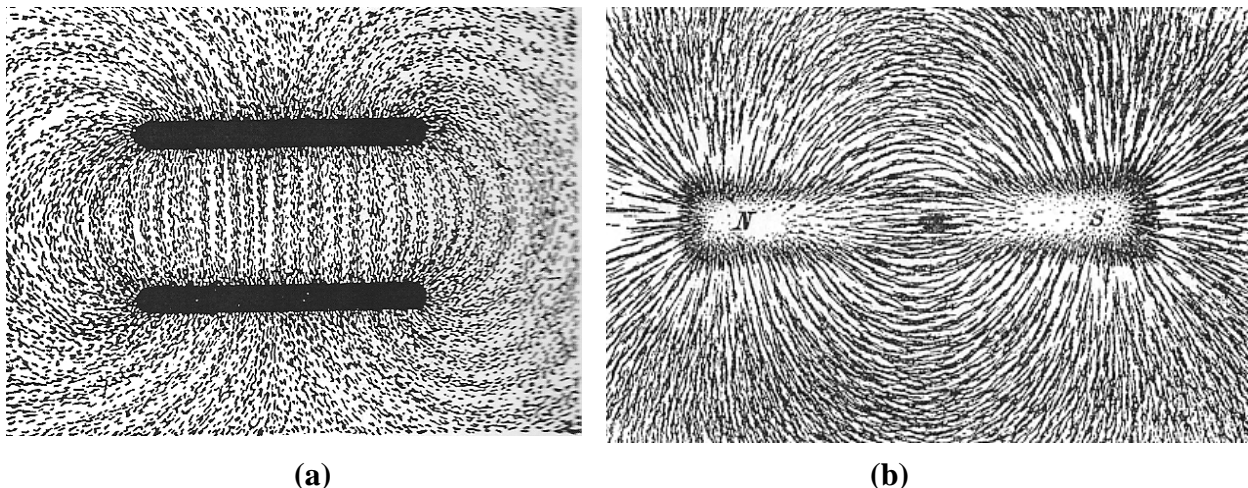
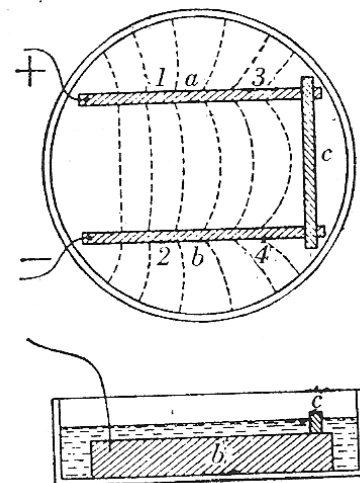


Figura 4. (a) Visualización del campo eléctrico entre dos planos conductores sometido a una diferencia de potencial y colocado en un recipiente conteniendo partículas de sémola dispersas en aceite de ricino. (b) Visualización de las líneas de fuerza del campo magnético producido por una barra imanada, empleando virutas de hierro depositadas sobre un papel colocado encima de la barra.

Las máquinas electrostáticas separaban cargas positivas y negativas, generando grandes diferencias de potencial, pero no eran adecuadas para producir corrientes constantes (Ver Fig. 5)

Figura 5. El campo eléctrico es responsable por el movimiento de cargas en un conductor. Cuando las placas *a* y *b* (de baja conductividad) se encuentran aisladas entre sí y conectadas a un generador electrostático, el campo eléctrico tiene el aspecto de la Fig. 4(a): las líneas de fuerza son perpendiculares a los conductores y no presentan componente a lo largo de los mismos, por lo que la corriente eléctrica es nula. Al puentear las placas con la cruceta conductora *c*, aparece una débil corriente del borne positivo al negativo y en correspondencia las líneas de fuerza del campo eléctrico se curvan, dando lugar a una componente a lo largo de las placas *a* y *b* responsable por el movimiento de las cargas.



Se debe al físico italiano [Alessandro Volta](#) (1745-1827) la invención en 1800 de la pila eléctrica que lleva su nombre y que *permitted a los físicos contar por primera vez en sus investigaciones con corrientes controlables y sostenibles en el tiempo.*



(a)

(b)

Figura 6. (a) *Antigua batería eléctrica de Volta*: un emparedado de treinta capas de Cu-Zn-paño-Cu-Zn-paño-etc, donde el paño era acidulado empapándolo con salmuera. El polo positivo es la rodaja de Cu en uno de los extremos, el negativo la de Zn en el otro extremo de la pila. Considerando medidas modernas que indican 1.1V por elemento y que éstos se encuentran conectados en serie, se estima que Volta pudo haber obtenido pilas con unos 30V de diferencia de potencial entre sus bornes.

(b) Mas de dos siglos después de su invención, los principios físico-químicos de la pila de Volta son los mismos que operan en la variedad de baterías actuales que potencian dispositivos electrónicos móviles, tales como teléfonos celulares, computadoras portátiles, cámaras fotográficas y de filmación digitales, etc. y también la batería que suministra energía eléctrica a los automóviles actuales y a los híbridos de la próxima generación.

Una experiencia clave realizada en 1820 por el físico danés [Hans Christian Oersted](#) (1777-1851) demostró que los fenómenos eléctricos y magnéticos estaban íntimamente relacionados entre sí: ¡el pasaje de una corriente eléctrica por un conductor actuaba sobre una aguja magnética colocada en las inmediaciones! (ver Fig. 7).

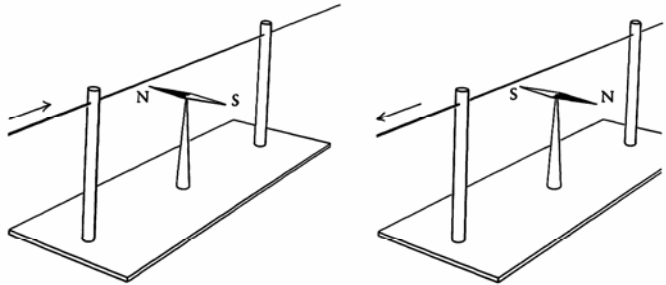
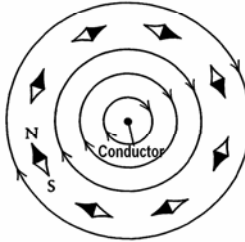


Figura 7. Experiencia de Oersted. Líneas de fuerza del campo magnético alrededor de un conductor.



Así, las cargas eléctricas no sólo creaban un campo eléctrico cuando se encontraban en reposo, sino que cuando se ponían en movimiento (corrientes) eran capaces de generar también campos magnéticos. Poco después, el mismo Oersted observó el fenómeno inverso: *un imán ejerce fuerzas sobre una corriente eléctrica*.

La extensión del trabajo de Oersted a la interacción magnética entre corrientes y la cuantificación de los efectos pondero-motrices según leyes matemáticas precisas fue realizada, principalmente, por los estudios del físico francés [André-María Ampère](#) (1775-1836), reportados en sus publicaciones de 1822 y 1826, y por la colaboración entre los físicos franceses Jean-Baptiste Biot (1774-1862) y Félix Savart (1791-1841), quienes describieron en detalle el campo magnético generado por una corriente y la fuerza ejercida sobre otra corriente (Ley de Biot-Savart).

Fue también Ampere quien sugirió que diminutas corrientes cerradas en el interior de un material podrían ser el origen de sus propiedades magnéticas, de esta manera unificando la explicación del fenómeno como *debido siempre a corrientes eléctricas*. Estas ideas fueron precursoras del entendimiento moderno del magnetismo de la materia que atribuye sus propiedades a corrientes electrónicas cerradas en el interior del átomo y del mismo electrón (spin).

2.1. Ley de Ampere

Los experimentos de Oersted mostraban las propiedades de orientación de una aguja magnética en las inmediaciones de una corriente (ver Fig. 7)

Podemos asociar los efectos de la corriente por un conductor muy largo a la creación de un vector campo magnético (de inducción) B cuyas líneas de fuerza son concéntricas con el conductor y orientadas en la dirección S-N de la aguja (regla de la mano derecha o regla del tirabuzón).

Poco después de los experimentos de Oersted, Ampere encontró que no sólo existen fuerzas recíprocas entre corrientes e imanes sino, también, entre las mismas corrientes! Utilizando

aparatos como los de la Figura 8 (llamados “bancos de Ampere”), estudió en forma cuantitativa dichas interacciones magnéticas.

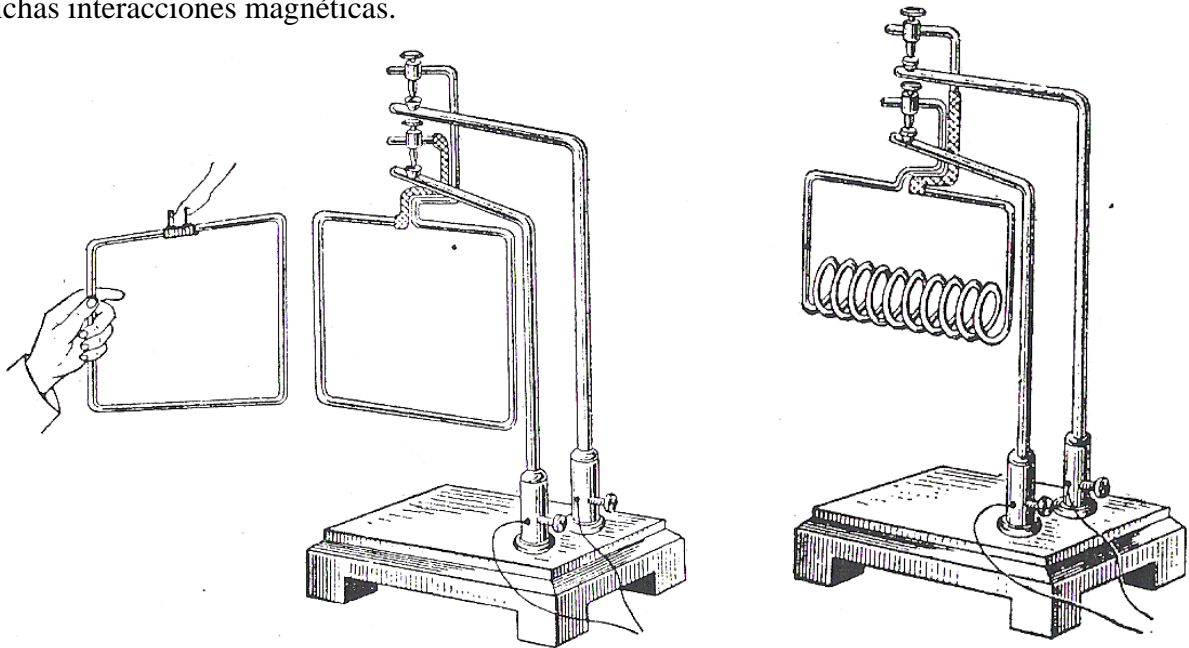
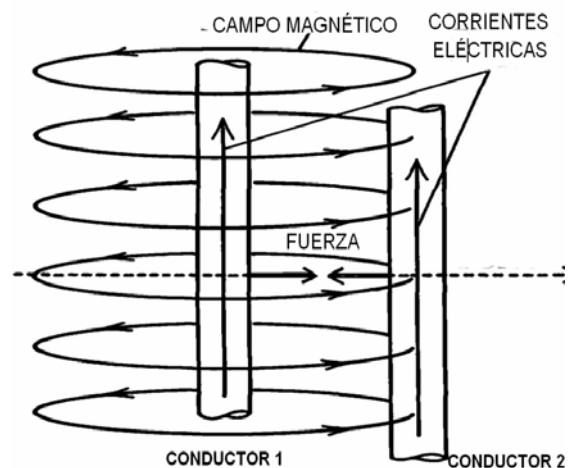


Figura 8. Bancos de Ampere.

Estudiando la interacción magnética entre corrientes como muestra la Fig. 9, Ampere encontró que la fuerza mutua (F) en un segmento de longitud l de conductor 2 inmerso en el campo magnético creado por el conductor 1 viene dada por:

$$Fuerza = k \times \frac{\text{corriente1} \times \text{corriente2} \times l}{(\text{distancia entre 1 y 2})} \quad (3)$$

Figura 9. Interacción magnética entre dos conductores muy largos y paralelos portando sendas corrientes eléctricas.



La fuerza es perpendicular a los alambres y a lo largo del segmento que los une; es de atracción cuando las corrientes son paralelas, de repulsión cuando son anti-paralelas.

En el Sistema Internacional (SI), se define el Ampere (A) como aquella corriente común circulado por dos conductores paralelos separados 1m entre sí que produce una fuerza de 2×10^{-7} Newtons por metro de longitud. Así, la cte. $k=2 \times 10^{-7}$ Newtons/A². La unidad de carga en este sistema es el Coulomb, que corresponde a la cantidad de carga transportada por una corriente de 1A durante 1 segundo.

Valiéndonos del concepto de campo, podemos igualmente interpretar la ley anterior en términos del vector de inducción magnético \mathbf{B} (en Webers/m²)

$$B = k \times \frac{\text{corriente}l}{(\text{distancia entre 1 y 2})} \quad (4)$$

Creado por el conductor 1 en la posición del conductor 2 y expresar la fuerza sobre una longitud l de este conductor como $F = i l B$, que tomando en cuenta el carácter vectorial de F , B y l puede escribirse en general:

$$\mathbf{F} = i \mathbf{l} \wedge \mathbf{B} \quad (5)$$

Escribiendo la cte k en términos de la permitividad magnética del vacío $\mu_0 (=4\pi \times 10^{-7} \text{ Web/A.m})$ a través de $k=\mu_0/2\pi$, resulta:

$$B = \mu_0 \frac{i}{2\pi r} \Rightarrow B \times 2\pi r = \mu_0 i, \quad (6)$$

caso particular de la Ley de Ampere:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 i \quad (7)$$

Definiendo el vector campo magnético \mathbf{H} mediante $\mathbf{B}=\mu_0 \mathbf{H}$, resulta:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i, \quad (8)$$

Donde H se mide en Amperes/metro y su integral encerrando la corriente *total* i es la fuerza magnetomotriz (fmm) creada por esta corriente en el circuito C ,

En un medio magnético la ley de Ampere para \mathbf{B} sigue siendo válida, pero ahora la corriente i es la suma de la corriente libre (i_l) y de la corriente de magnetización (i_m), en tanto que la forma de la Ley para \mathbf{H} incluye sólo la corriente libre. Esto es, \mathbf{B} tiene por fuentes todas las corrientes (las libres de los conductores y las ligadas de los materiales magnéticos), en tanto que \mathbf{H} tiene por fuente sólo las corrientes de los conductores). En los materiales magnéticos lineales es $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}=\mu_r\mu_0\mathbf{H}$ con la permeabilidad magnética relativa μ_r variando entre 2.000 y 80.000 fuera de la región de saturación del material.

Teniendo en cuenta que una corriente es un flujo de cargas eléctricas, podemos re-interpretar la fuerza de Ampere (Ecuación 4) sobre un segmento de circuito en términos de la fuerza sobre dichas cargas. Si ρ es la densidad de cargas libres en el conductor (en Coulombs/m³), v la velocidad media de estas cargas (metros/seg) circulando por un conductor de área transversal A (en m²), entonces la corriente $i=\rho v A$ (en Amperes). Reemplazado en Ec.(4), la fuerza (en Newtons) sobre el conductor resulta $F = (\rho A l) v B$. Pero $\rho A l = \rho V = Q$ es la carga total móvil en ese segmento de conductor, por lo que la fuerza sobre una carga Q que se mueve con velocidad v en un campo magnético \mathbf{B} puede escribirse como:

$$\mathbf{F} = Q \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}, \quad \text{Fuerza de Lorentz}, \quad (9)$$

propuesta por Hendrik A. Lorentz (Holandés, 1853-1928) en 1892. Además de su utilidad para encontrar la fuerza sobre cargas individuales en movimiento respecto de campos magnéticos, la Ec.(9) re-escrita como

$$\frac{\mathbf{F}}{Q} = \mathbf{E} = \mathbf{v} \wedge \mathbf{B} \quad (10)$$

muestra que en un sistema en movimiento respecto de un campo magnético *estacionario* surge un campo eléctrico que, a su vez, da lugar a una fuerza electromotriz (fem) en dicho sistema móvil. Este concepto es de extrema utilidad práctica en la racionalización del funcionamiento de los dispositivos electro-mecánicos (en ingeniería se le llama “voltaje de velocidad”).

2.2. Ley de Inducción de Faraday

Posteriormente, y en otra serie de experimentos fundamentales para el desarrollo del electromagnetismo, el físico inglés [Michel Faraday](#) (1791-1867) demostró en 1831 el fenómeno inverso: *campos magnéticos variables pueden generar corrientes* (ver Fig, 10) y, *por tanto, campos eléctricos* (Ley de Inducción de Faraday).

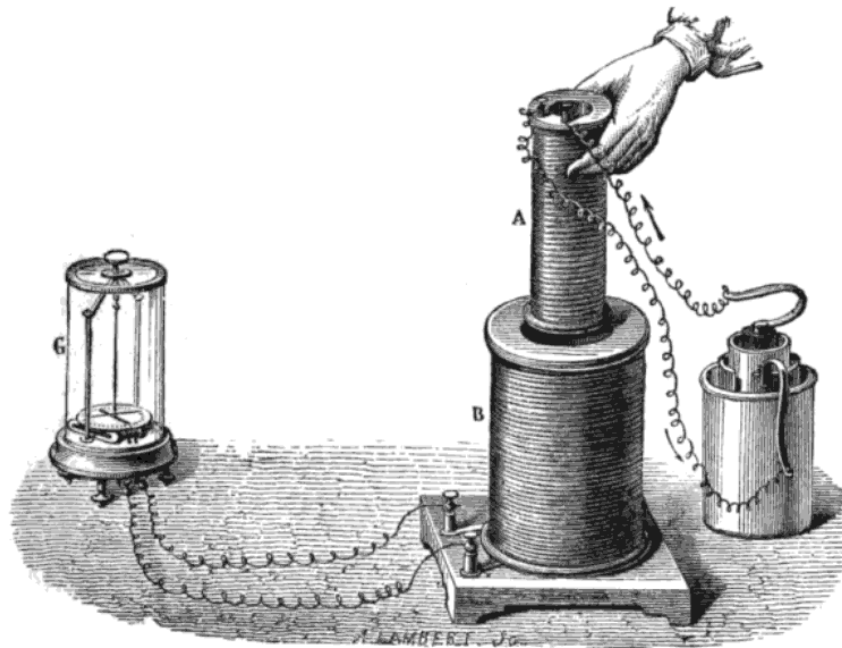


Figura 10. La batería (derecha) provee una corriente a través de la pequeña bobina *A*, creando un campo magnético. Cuando la bobina es estacionaria, no se inducen corrientes. Pero cuando la bobina *A* se mueve hacia dentro y fuera de la bobina más grande *B*, el flujo magnético a través de este segundo enrollamiento varía, induciendo una corriente que es detectada por el galvanómetro *G*.

La forma matemática mas general para describir la fem ε generada es:

$$\varepsilon = \oint_{\partial\Sigma(t)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma(t)} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{S}, \quad (11)$$

donde el flujo de \mathbf{B} se calcula sobre una superficie $\Sigma(t)$ que tiene por borde el contorno $\partial\Sigma(t)$, en general móviles (ver Figura 11).

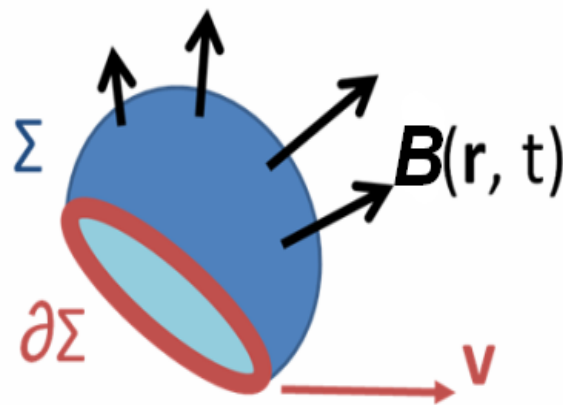
Definiendo el flujo Φ_B de \mathbf{B} mediante:

$$\Phi_B = \iint_{\Sigma(t)} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{S},$$

resulta la expresión simplificada:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (12)$$

Figura 11. Cualquier variación en el tiempo del flujo magnético a través de la superficie en forma de gorra (en azul) que tiene por borde el perímetro en rojo, genera una fem en este circuito.



Es notable que la *Ley de Inducción de Faraday* (11) es una única ecuación describiendo dos fenómenos diferentes que pueden estar presentes en forma separada o simultánea: la fem de movimiento generada por la fuerza magnética de un campo \mathbf{B} estacionario sobre un conductor móvil (coincidente con el campo de Lorentz $\mathbf{E} = \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$), y la fem por ‘efecto transformador’ generada por fuerzas eléctricas debidas a un campo magnético variable en el tiempo. La *Ley de Inducción de Faraday* es así fundamental en el entendimiento de los principios de funcionamiento de las máquinas eléctricas (generadores, motores, transformadores).

El sentido de las corrientes de inducción obedece a la llamada *Ley de Lenz* (1833), nominada en honor de su descubridor, el físico alemán Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865), y que no es sino una manifestación del *Principio de Conservación de la Energía* (ver Figura 12).

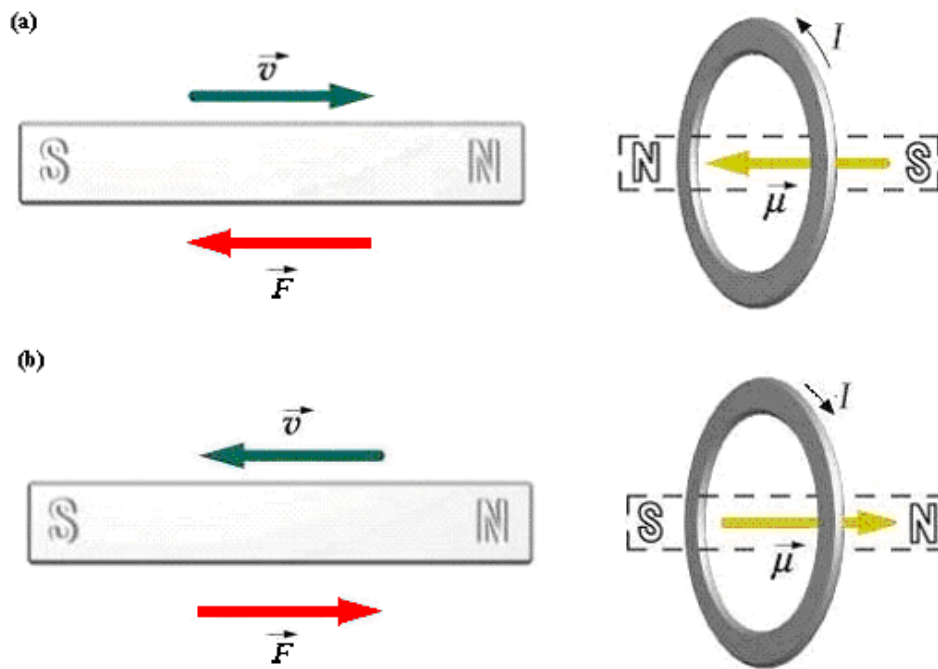


Figura 12. Ley de Lenz aplicada a un imán en movimiento próximo a una espira. (a) Cuando el imán se aproxima, genera corrientes en la espira que lo repelen. (b) Cuando se aleja, la corriente generada lo atrae. Direcciones de las corrientes opuestas a las de la Ley de Lenz conducirían a la aceleración espontánea del imán y a un correspondiente crecimiento espontáneo de la corriente en la espira, sin que ningún agente externo provea la energía necesaria al sistema.

James Clerk Maxwell (Escocés, 1831-1879) descubre en 1856 el fenómeno inverso al de inducción de Faraday, esto es que *campos eléctricos variables pueden generar campos magnéticos*, y de esta manera completa la unificación de los fenómenos eléctricos y magnéticos en un área importantísima de la Física y la Ingeniería llamada *electromagnetismo*. El mismo Maxwell condensa en un conjunto de cuatro ecuaciones que llevan su nombre (posiblemente las más elegantes de la Física) la fenomenología resultante de más de 25 siglos de observaciones.

Es sobre estas bases que físicos, ingenieros e inventores desde mediados del siglo XIX desarrollaron una variedad de dispositivos que potenciaron la Segunda Revolución Industrial o Revolución Tecnológica (la Primera se produjo entre la segunda mitad del siglo XVIII y mediados del siglo XIX, e incluyó la invención de la máquina de vapor y el desarrollo del área de la Física llamada Termodinámica), sobre la que se basa nuestra actual Civilización Tecnológica.

3. Electromagnetismo en acción: las máquinas eléctricas

3.1. Era de la corriente continua (1831-1886)

Motivado por la necesidad de generadores de corriente continua (CC) que extendieran la capacidad de las baterías, las máquinas eléctricas de CC pasaron durante el período 1831-1886 por cuatro etapas de su desarrollo:

Etapas 1. 1831-1851: Máquinas eléctricas con imanes permanentes

Etapas 2. 1851-1867: Excitación independiente de las máquinas por electroimanes

Etapas 3. 1867-1871: Máquinas eléctricas auto-excitadas e inducidos elementales

Etapas 4. 1871-1886: Máquinas eléctricas con inducidos perfeccionados y estructura magnética multipolar.

El primer generador electromagnético fue inventado por M. Faraday en 1831-1832, poco después del descubrimiento de la *Ley de Inducción* que lleva su nombre (ver Figura 13a). En la Fig. 13b se muestra el principio de funcionamiento de este ‘generador por movimiento’. No era un diseño práctico y sólo tiene un valor histórico y didáctico (genera una fem muy pequeña).

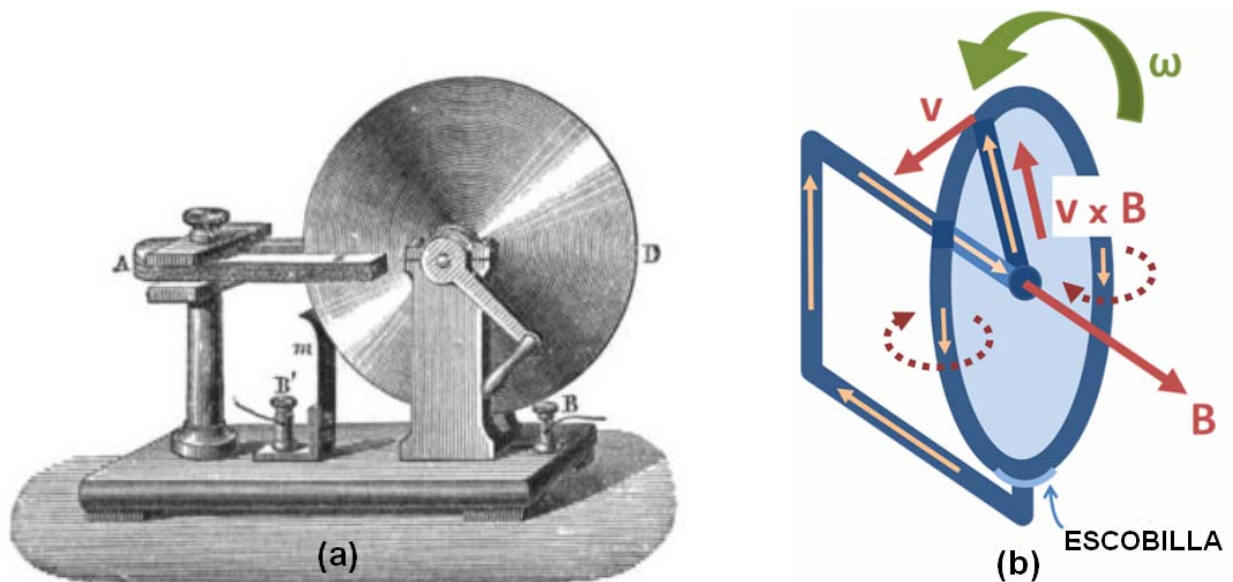
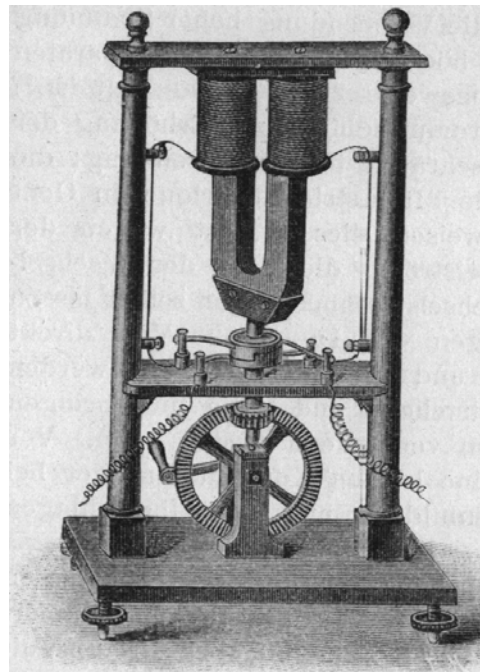


Figura 13. (a) Disco de Faraday. A es un imán permanente; el borne B está conectado al eje de rotación, el B' a la periferia del disco. Notar la manivela con la que se hacía rotar la dínamo (b) Principio de funcionamiento.

Otros inventores propusieron diferentes diseños de dínamos, entre ellos S. A. Jedlik (físico e inventor Húngaro, 1800–1895) en 1827 y H. Pixii (fabricante de instrumentos Francés, 1808–1835) en 1832 (ver Fig. 14). En la bobina de la dínamo de Pixii se producía una corriente alterna, por lo que éste desarrolló un dispositivo de conmutación (conmutador), que convertía la corriente alterna generada en las bobinas de la armadura en una corriente continua para alimentar el circuito externo.

Figura 14. Dínamo de Pixii; el conmutador está ubicado inmediatamente por debajo del imán rotante, donde también se observan las dos escobillas colectoras que portan la corriente rectificada al circuito externo.



Antonio Pacinotti (Profesor de Física Italiano, 1841–1912) inventa en 1860 una dínamo con el diseño prototípico de todas las máquinas eléctricas que lo sucedieron. Pacinotti usó una armadura en forma de anillo bobinado en toda su circunferencia con un arrollamiento de alambre conductor aislado para producir una corriente menos ondulada que la obtenida con los desarrollos anteriores (ver Figs. 15a, b). También descubrió una importante propiedad de la dínamo: era reversible, esto es, se ponía en rotación cuando era alimentada con CC de una fuente externa. Así, el dispositivo podía también ser usado como motor eléctrico.

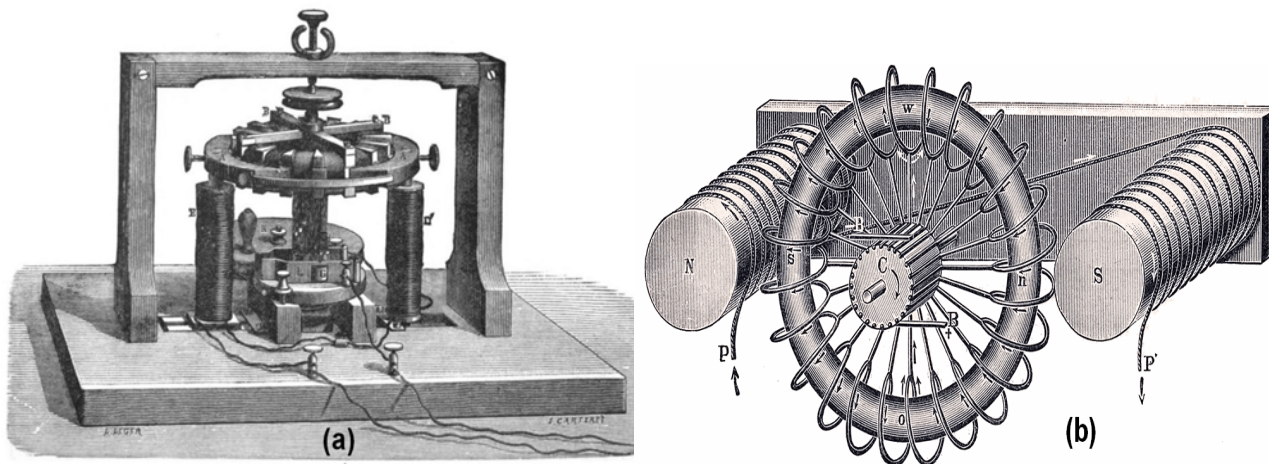


Figura 15. (a) Vista general de la dínamo de Pacinotti. (b) Detalle mostrando los devanados, el conmutador y las escobillas colectoras. Notar que el arrollamiento tiene el *mismo* sentido a lo largo de la circunferencia del anillo y que las escobillas están desplazadas 180° entre si y dispuestas según un eje perpendicular al campo magnético.

Zénobe Gramme (Belga, 1826-1901) re-inventa en 1869 una versión mejorada del generador de Pacinotti, que constituyó la primera dínamo con potencia eléctrica de utilidad industrial, y que fue el prototipo de todos los perfeccionamientos técnicos posteriores. Una ventaja de la dínamo de Gramme fue el empleo de un mejor circuito para el flujo magnético, mediante el llenado del espacio ocupado por el campo magnético con núcleos de hierro y la minimización de los espacios de aire entre el estator y el rotor (ver Fig. 16).

Figura 16. Dínamo de Gramme para demostración. El campo magnético es producido por un imán permanente con la forma de herradura (estator). En la parte frontal puede apreciarse el bobinado del anillo de la armadura (rotor), el conmutador montado sobre el eje del rotor y las escobillas que colectan la CC generada para su utilización externa. También puede verse la manija con la que se hace rotar la polea visible en la parte trasera, vinculada mediante una correa a una polea menor montada sobre el eje de la dínamo (Museo de Física, UNLP).

Gramme también encontró en 1873 (de manera casual durante una exposición industrial en Viena) que su dínamo era reversible y podría emplearse como motor de CC (una propiedad observada previamente por Pacinotti). En diseños previos de dínamos (como el de Pixxi) el pasaje de un imán permanente en las cercanías de los polos de uno o dos electroimanes, creaba breves pulsos de tensión eléctrica en lugar de una tensión de CC. Con suficientes bobinas, el voltaje resultante es prácticamente constante, como muestra la sucesión de Figs.17



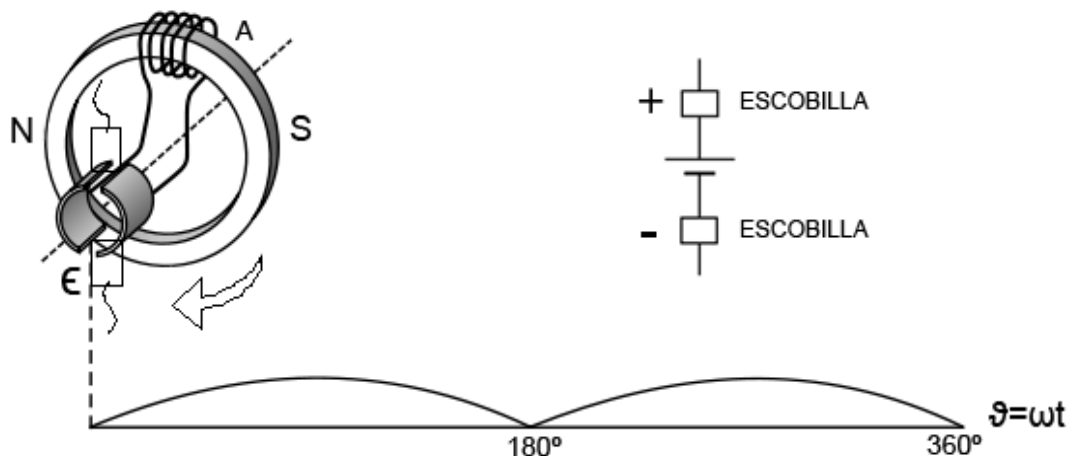


Figure 17a. Esta ilustración muestra en la parte superior un anillo de Pacinotti-Gramme simplificado con una bobina, y en la parte inferior la fem producida en las escobillas colectoras durante una revolución completa del anillo. El anillo está inmerso en el campo magnético creado por imanes (no indicados) cuyos polos Norte (N) y Sur (S) se encuentran horizontales en la figura, en tanto que las escobillas se disponen verticalmente y desplazadas en 180° entre sí.

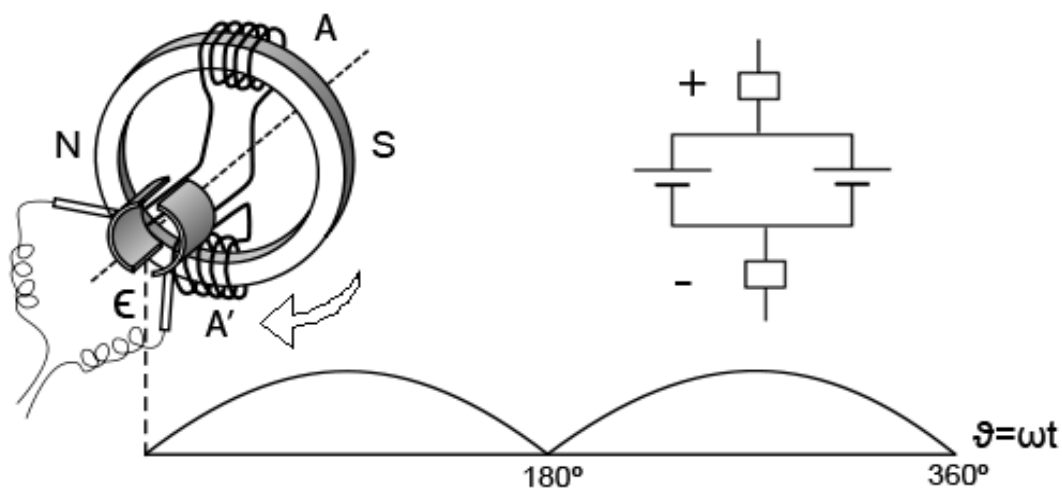


Figura 17b. Anillo de Gramme con dos bobinas. La segunda bobina (A') sobre el lado opuesto del anillo está asociada en paralelo con la primera (A), con los dos puntos de bifurcación conectados a sendas delgas colectoras. Como el sentido del arrollamiento de la bobina inferior (A') es el mismo que el de la bobina superior (A) y ambas están inmersas en el mismo campo magnético, las fems correspondientes son iguales, están en fase y se acoplan en paralelo.

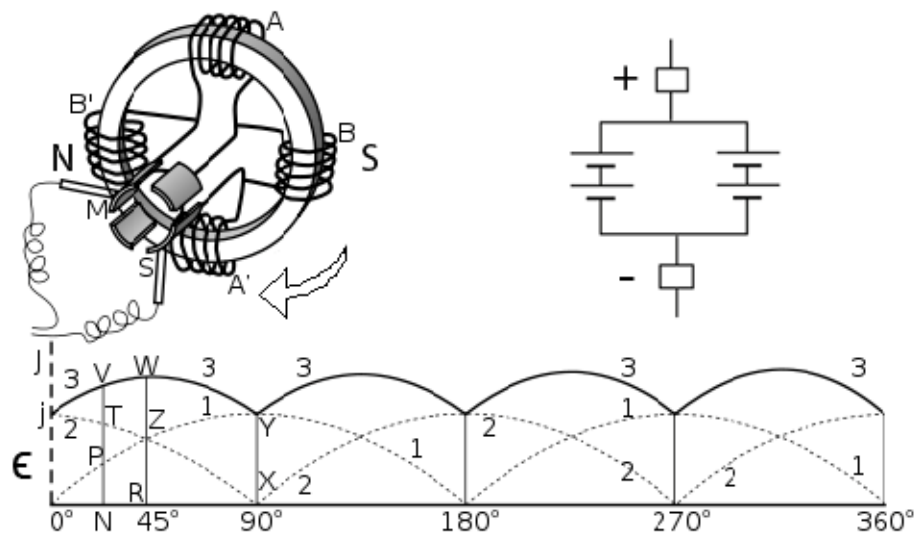


Figura 17c. Anillo de Gramme con cuatro bobinas. Las bobinas B y B' están arrolladas en el mismo sentido que las A y A' y están intercaladas en serie con éstas últimas. Su desplazamiento angular en el anillo de 90° respecto del par A, A' da lugar a una fem en B, B' 90° fuera de fase con la fem generada en A, A'; esto es, cuando A y A' alcanzan su fem máxima, la fem de B, B' se anula. La tensión entre las escobillas puede verse como debida a la suma de las fems generadas por las dos bobinas en serie localizadas sobre los arcos del anillo a izquierda y derecha del eje (vertical) de las escobillas (tales como A, B y A', B'). Estas dos asociaciones de fems en serie están, a su vez, acopladas en paralelo entre sí con los puntos de bifurcación conectados a sendas escobillas.

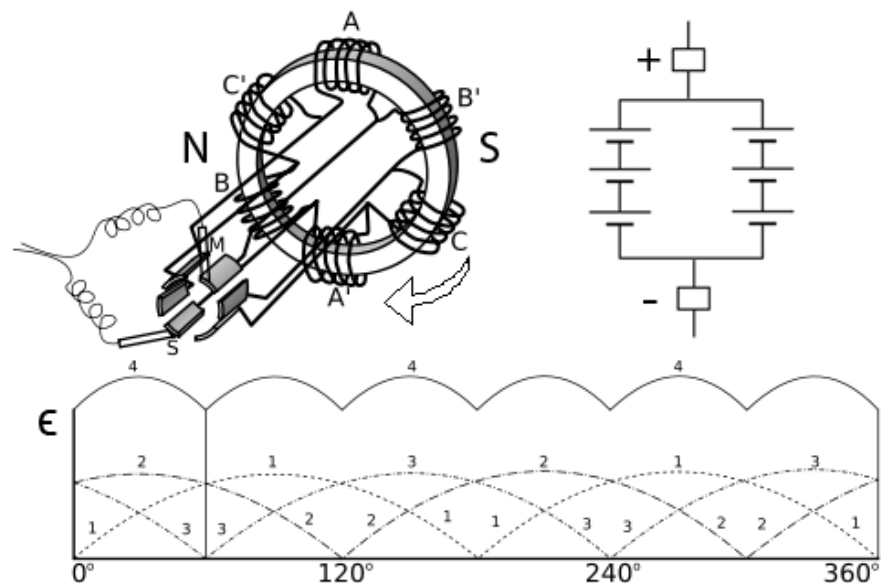


Figura 17d. Anillo de Gramme con seis bobinas. Aquí el eje de las escobillas define dos arcos del anillo con tres bobinas en serie cada uno, que generan fems defasadas en 120° entre sí. El voltaje entre las escobillas es la suma de esas tres fems. En todo momento las fems resultantes sobre ambos arcos son las mismas y están en fase, constituyendo una asociación en paralelo conectada a sendas escobillas.

Podemos establecer el patrón general de un anillo de Gramme con un número mayor de enrollamientos: bobinas adyacentes se conectan entre sí en serie y a una de las delgas del colector que, por lo tanto, coinciden en número con el de arrollamientos. Las escobillas que transportan la corriente a la carga de la dínamo se disponen en puntos opuestos del diámetro del colector. En todo momento de la rotación, el contacto de las escobillas con el colector define sobre el anillo dos arcos simétricos, cada uno constituidos por la mitad de los arrollamientos conectados en serie, cuyas fems se suman para constituir el voltaje de la dínamo. Las fems totales generadas por ambos arcos son iguales, están en fase y se asocian en paralelo entre si, con los puntos de bifurcación conectados a sendas escobillas (ver esquema de Fig.18).

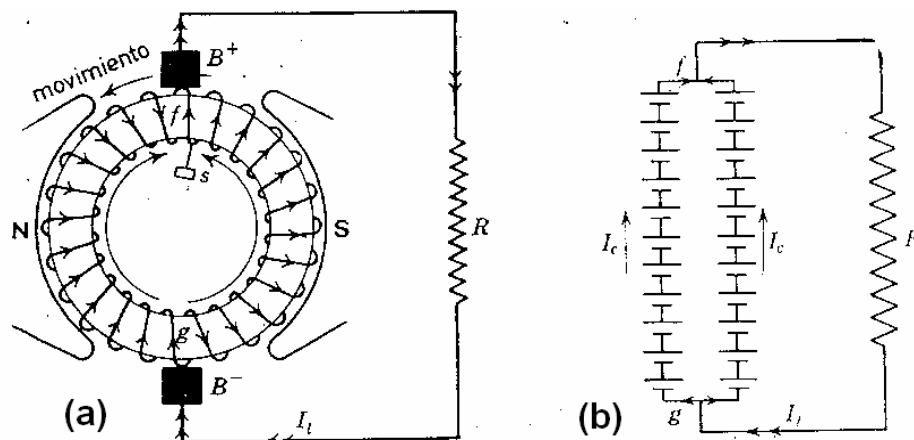
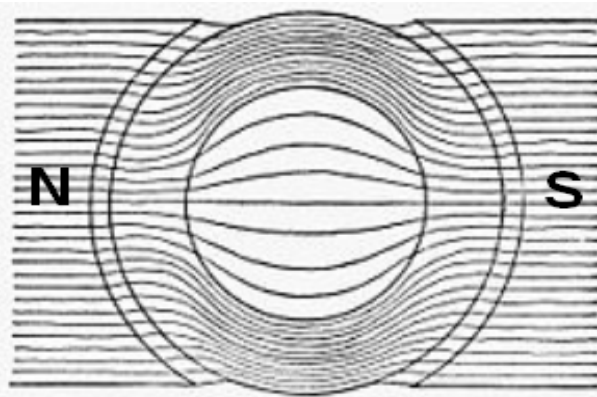


Figura 18. (a) Anillo de Gramme esquemático con escobillas colectoras (b) Representación de los orígenes de fem y su asociación en serie-paralelo.

Se observa que cuanto mayor es el número de bobinas, mas se aproxima la corriente fluctuante a una CC. En la práctica pueden presentarse grandes dínamos con centenares de estos enrollamientos conectados a colectores compuestos de otras tantas delgas.

A pesar que el anillo de Gramme suministraba una salida de potencia constante, todavía era ineficiente en el uso del campo magnético para producir fem, debido a la forma como las líneas de fuerza del campo magnético pasan a través del anillo.

Figura 19. Líneas de campo magnético a través de un anillo ferromagnético colocado entre los polos de un imán.



En efecto, debido a la alta permeabilidad magnética del anillo respecto del aire y tal como se aprecia en la Fig. 19, las líneas de fuerza tienden a concentrarse dentro del toroide y seguir la superficie de éste hasta el polo opuesto, con relativamente pocas líneas penetrando en el interior del anillo. En consecuencia, la parte interior del arrollamiento es inefectiva para producir fem dado que corta

muy pocas líneas de fuerza en comparación con la parte exterior de dichas bobinas. Así, el arrollamiento interior sólo agrega resistencia al circuito, reduciendo la eficiencia de la dínamo. Esta dificultad fue resuelta mediante arrollamientos de alambre enteramente sobre el exterior de una armadura en forma de tambor, como se muestra en el rotor elemental con cuatro bobinas de la Fig. 20a y en el rotor simple parcialmente bobinado de la Fig. 20b.

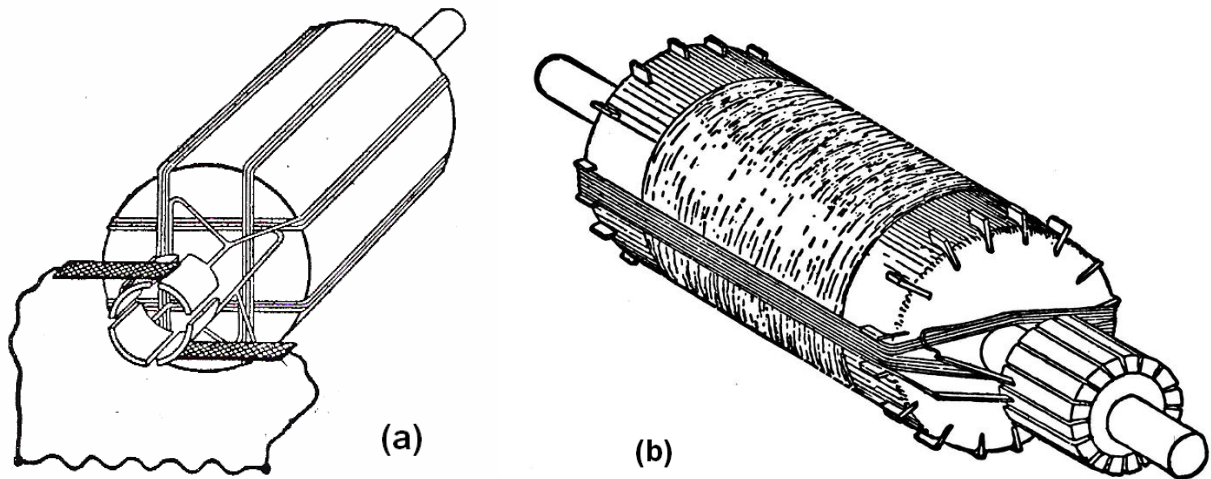


Figura 20: Esquema de la armadura de tambor mostrando los arrollamientos externos y sus conexiones al conmutador (a) Armadura de tambor con cuatro arrollamientos y otras tantas delgas. (b) Antigua armadura (de Siemens) mostrando sólo una bobina de cobre diametral y su conexión a las delgas del conmutador. El núcleo cilíndrico era de madera y su periferia se cubría con un enrollamiento de alambre de hierro sobre el que se disponía el arrollamiento de cobre.

La Fig. 21a muestra un esquema con un diseño de armadura con arrollamientos múltiples y Fig.21b el aspecto del bobinado completo de un rotor moderno.

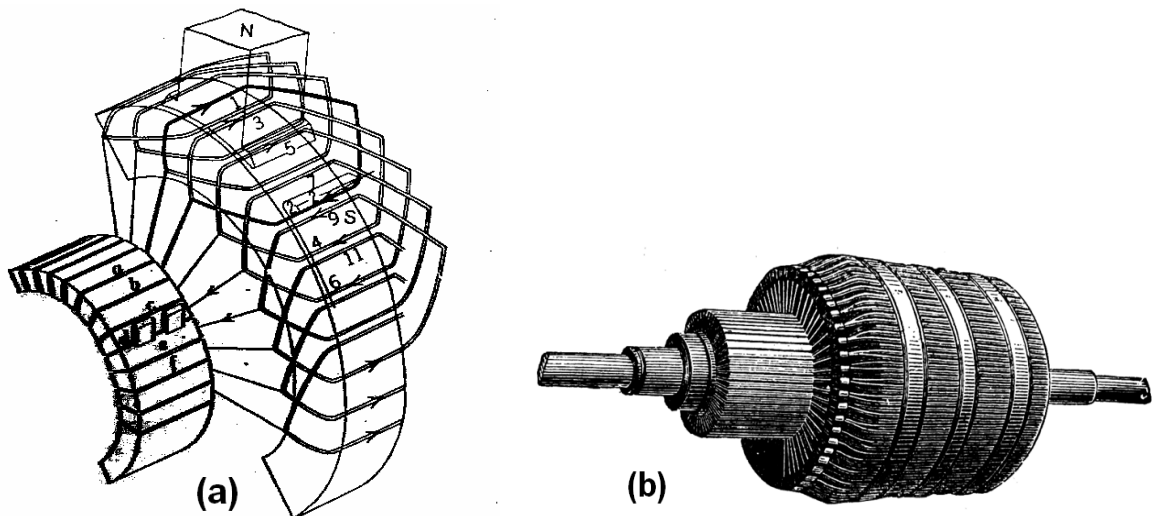


Figura 21. (a) Arrollamiento múltiple o imbricado (b) Rotor de una dínamo de Gramme práctica.

La Fig. 22 (a) muestra la generación elemental de fem en la armadura de tambor con arrollamientos múltiples de la dínamo (b)

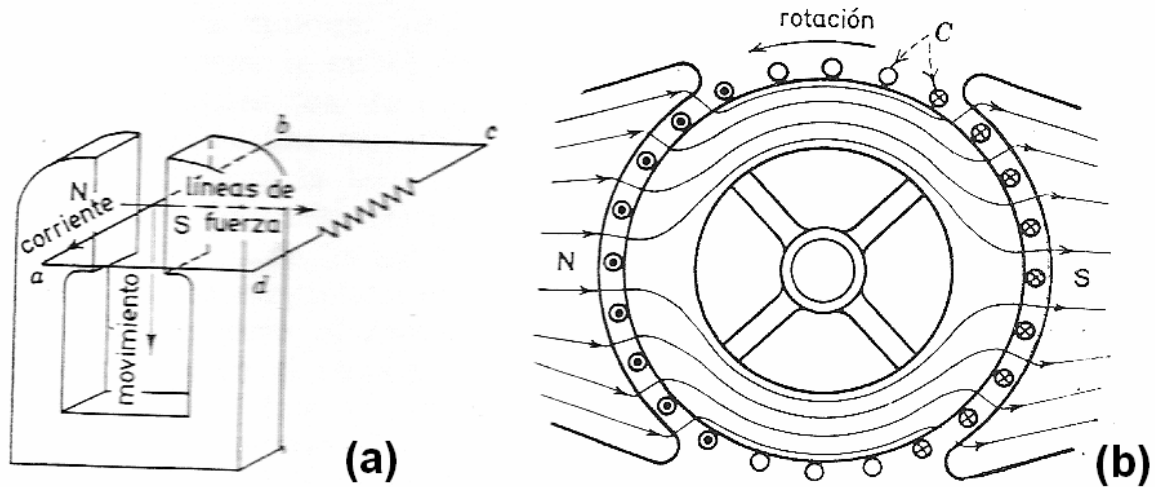
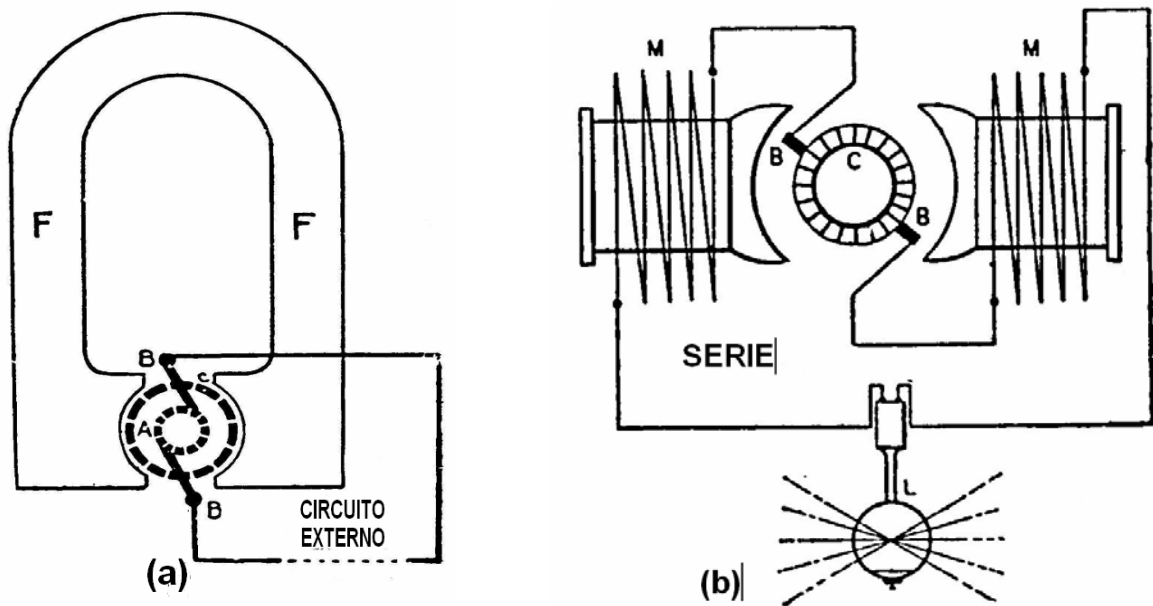


Figura 22. (a) Generación elemental de fem por velocidad (b) Flujo y fems inducidas en un generador de CC.

Excepto para dínamos de Gramme de muy poca potencia donde se utilizan como polos de excitación imanes permanentes (magnetos), las demás máquinas emplean electroimanes en el estator. La variante más práctica es cuando estos electroimanes son alimentados por el propio generador (*auto-excitación*). En la Fig. 23 se compara una magneto (a) con los tres tipos posibles de conexión de dínamos auto-excitados, en serie (b), en paralelo (c) y compuesto (d).



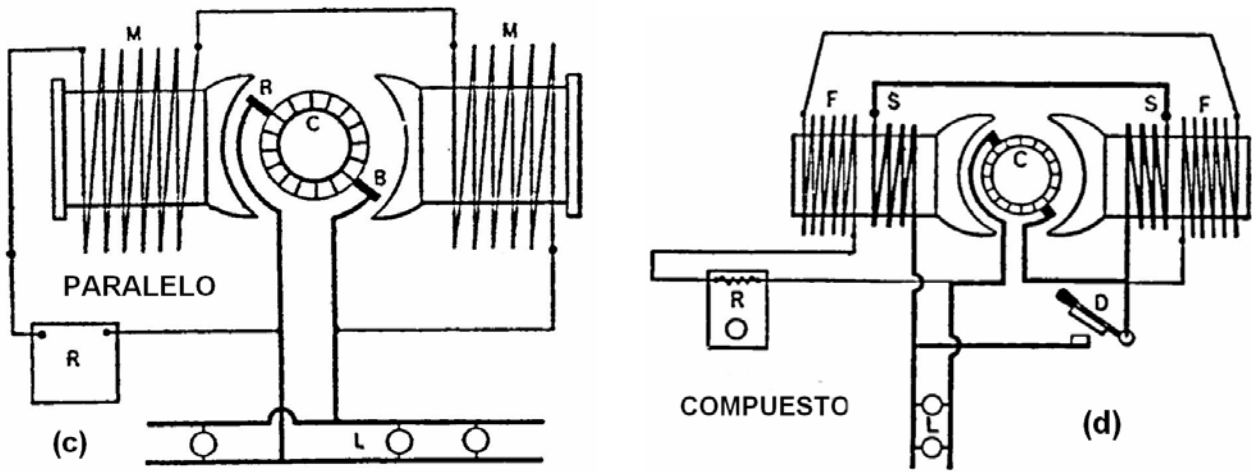


Figura 23: Máquina de CC con imán permanente (a), excitación en serie (b), paralela (c) y compuesta (d).

Debe notarse que los motores auto-excitados diseñados para CC funcionan también con CA, dado que la dirección de la CA de alimentación cambia *simultáneamente* en las bobinas de la armadura (rotor) y de campo (estator), manteniendo así el sentido del torque motriz. Por esta razón, estos motores se llaman *universales* y se emplean alimentados con CA en motores de baja potencia de artefactos domésticos tales como aspiradoras y licuadoras y para potenciar herramientas portátiles.

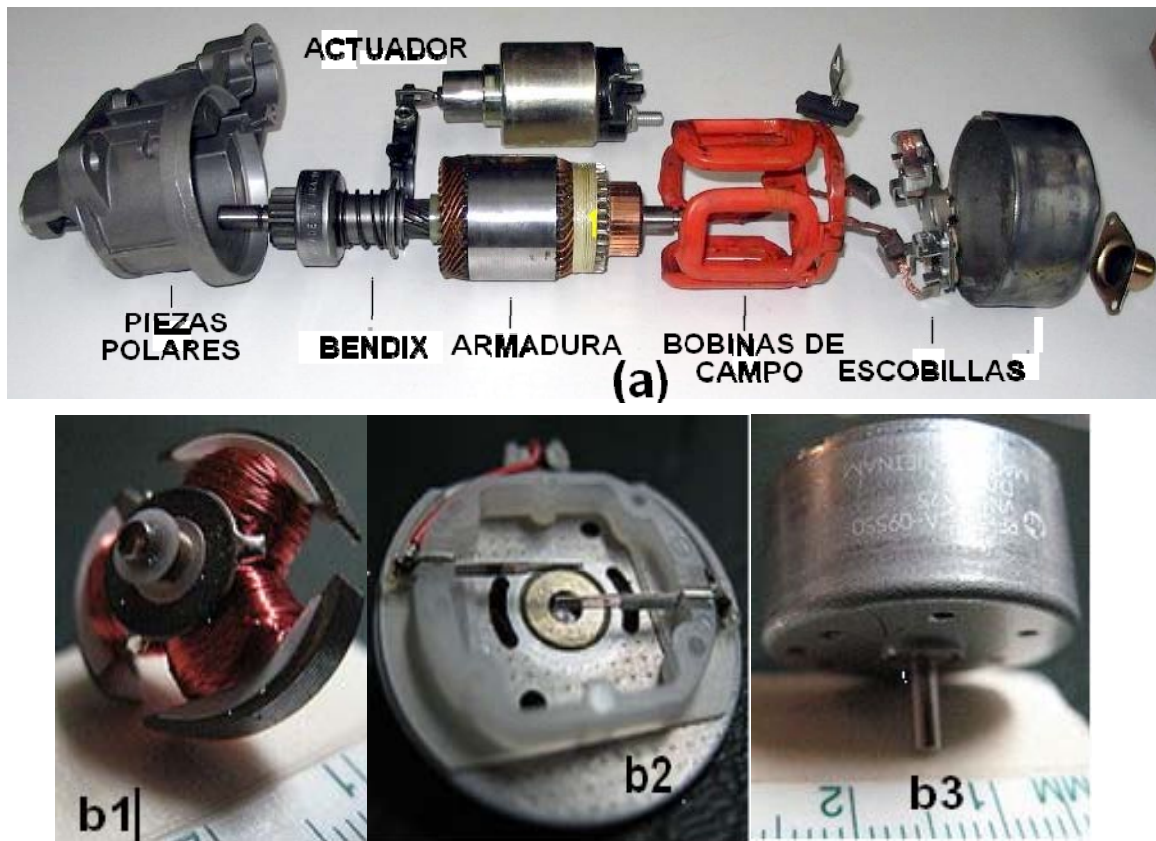


Figura 24. (a) Motor auto-excitado serie de CC para el arranque de automóviles (b) Motor de CC para el accionamiento de reproductores CD: b1: armadura (rotor); b2; escobillas; b3: estator de imanes permanentes

Las Figs. 24 muestra dos usos comunes actuales de estos motores de CC: en el arranque de automóviles y para accionar reproductores de CD.

Motores de CC de potencia se emplean también en la tracción eléctrica de trenes, tranvías y subtes, en ascensores, etc.

Los generadores de CC sin embargo, han caído en desuso a favor del empleo de alternadores, por la dificultad en cambiar la tensión continua de suministro de energía eléctrica. La Fig. 25 muestra un convertidor de la época de CC (220V) a CC (110V). Esto obligaba a tender líneas diferentes para suministrar los voltajes adecuados a cada aplicación (alumbrado, tracción eléctrica, motores, galvanoplastia, telefonía y telegrafía, etc). La Fig. 26 muestra el aspecto del cableado de suministro de CC de la ciudad de Nueva York en 1888.

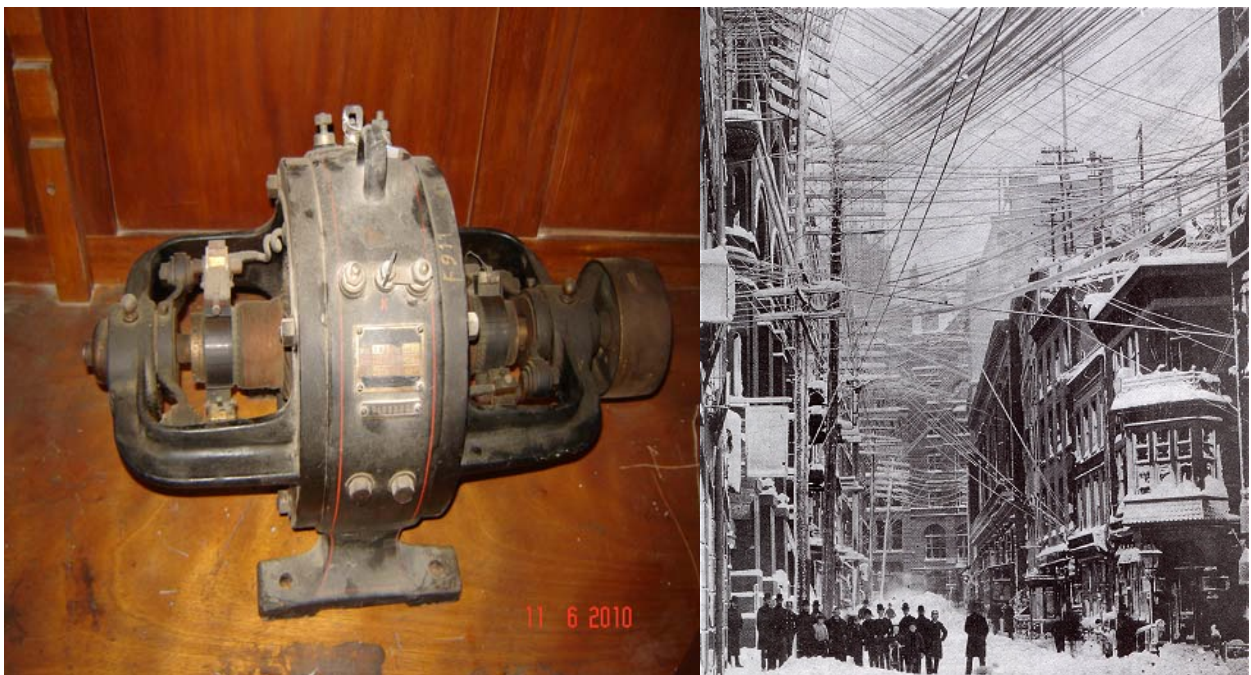


Figura 25. Convertidor CC (220V)→CC (110V). Museo de Física, UNLP.

Figura 26. Líneas de transmisión de CC de N. York durante la gran nevada de 1888

A esto se sumaba la dificultad de generar CC de alta tensión para su distribución a grandes distancias (en razón de la llamada “Ley V^2 de economía” en el tendido de líneas), por lo que las estaciones generadoras de suministro local proliferaban, incrementándose de este modo los costos en la construcción y distribución de energía eléctrica.

Ley V^2 de economía de líneas de transmisión

Tomemos, por simplicidad una línea de largo L y sección S_o de resistencia R_o que alimenta una carga de resistencia r_o con una potencia nominal $P_o=V_o I_o$. El rendimiento (η) de esa línea se define como:

$$\eta = \frac{P_u}{P_o} = \frac{P_o - P_L}{P_o} = 1 - \frac{P_L}{P_o}, \quad (13)$$

donde, P_o , P_u y P_L son, respectivamente, las potencias entregadas al sistema línea-carga, la útil (en la carga) y la pérdida (en la línea). Duplicando la tensión, podemos mantener las mismas potencias y así el rendimiento si cuadruplicamos las resistencias de línea y carga. Particularmente, la nueva resistencia de línea es $R=4R_o$. Dado que de acuerdo a la Ley de Ohm es $R=\rho L/S$, resulta que $S=1/4S_o$ y así el volumen del conductor $V=SL$ es 4 veces menos que $V_o=S_o L$. Admitiendo un costo de la línea proporcional al peso del material conductor de las mismas, resulta una reducción de ese costo a la cuarta parte del valor correspondiente al voltaje mitad. Esto implica que para reducir costos de líneas a un mínimo, debemos transportar la energía eléctrica a la mayor tensión posible.

3.2. Dominio de la corriente alterna

La Fig. 27 muestra el esquema de un generador elemental de corriente alterna (CA) monofásica.

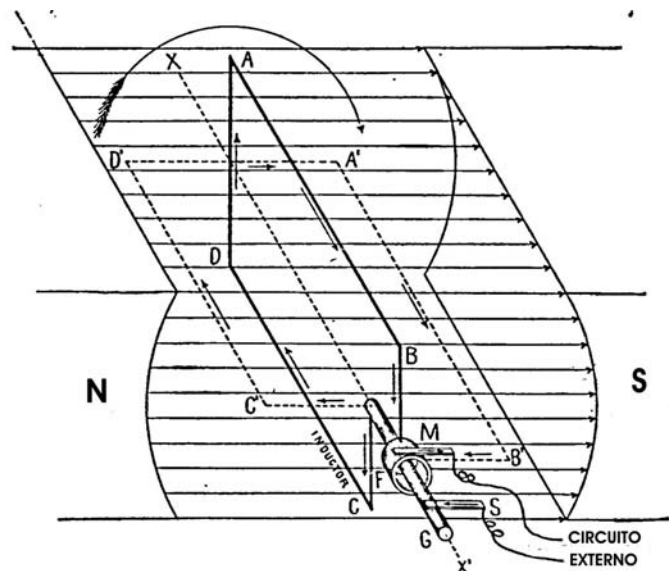
Figura 27. La CA es colectada por las escobillas M y S en contacto con el anillo F y el eje G, aislados entre sí y conectados a los terminales del cuadro conductor rotante ABCD.

La fem generada en la única espira se deriva de la Ley de Inducción de Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (14)$$

donde el flujo ligado Φ de campo magnético B viene dado por:

$$\Phi(t) = \Phi_m \cos(2\pi f_2 t), \quad (15)$$



con f_2 igual a la frecuencia (en Hz) de movimiento de rotación del cuadro respecto al campo externo \mathbf{B} . Así resulta:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f_2 \Phi_m \text{sen}(2\pi f_2 t). \quad (16)$$

Si se trata de N_2 espiras concentradas, entonces, la fem es:

$$\varepsilon_2 = N_2 \varepsilon = 2\pi f_2 N_2 \Phi_m \text{sen}(2\pi f_2 t) = \varepsilon_2(\text{max}) \text{sen}(2\pi f_2 t). \quad (17)$$

Definiendo la tensión eficaz $E_2 = \varepsilon_2(\text{max})/\sqrt{2}$, resulta:

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_2 N_2 \Phi_m = 4.44 f_2 N_2 \Phi_m. \quad (18)$$

En los casos prácticos, las N_2 espiras se bobinan en forma distribuida. Esto simplemente introduce en la ecuación anterior un ‘factor de arrollamiento k ’ cuyo valor es algo menor que uno, por lo que la forma general de la *ecuación básica en el diseño de todos los generadores* es:

$$E_2 = 4.44 k f_2 N_2 \Phi_m. \quad (19)$$

La CA muy pronto mostró su superioridad respecto de la CC en los sistemas de distribución y empleo masivos de la energía eléctrica. En efecto, se puede generar fácilmente CA de alto voltaje (mediante transformadores; ver Fig. 28) para su transmisión a grandes distancias sin grandes pérdidas de energía y luego reducir dicho voltaje a valores adecuados (usualmente 110, 220 y 380V a 50 o 60Hz) para su empleo seguro en la industria y los hogares.

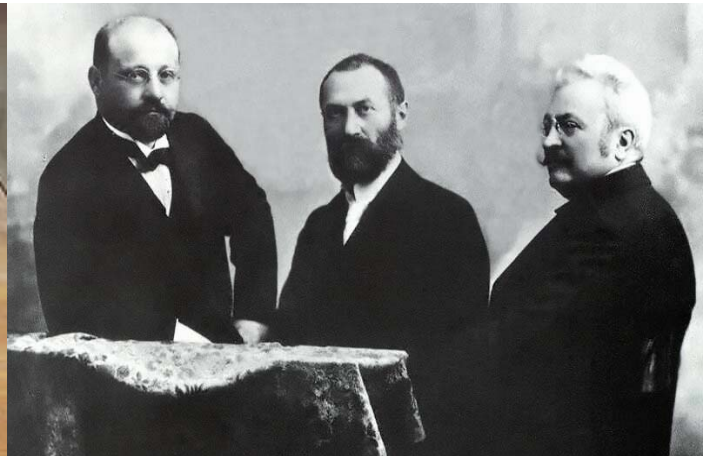


Figura 28. Prototipo del primer transformador mundial de alta eficiencia diseñado por los ingenieros K. Zipernowsky, O. Bláthy y M. Déri entre 1884 y 1885 para la Compañía Ganz, llamado Ganz "ZBD" (Museo de Artes Aplicadas, Budapest, Hungría).

La Figura 29 se muestra en corte un transformador moderno trifásico de potencia refrigerado con aceite.



Figura 29. Transformador trifásico moderno. El reservorio de aceite es visible en la parte superior. Las aletas asisten en la disipación de calor.

No es difícil probar, mediante la Ley de Inducción de Faraday, que para un transformador ideal se cumple la relación entre tensiones, corrientes y número de espiras de los arrollamientos primario y secundario indicados al pie de la Figura 30 siguiente.

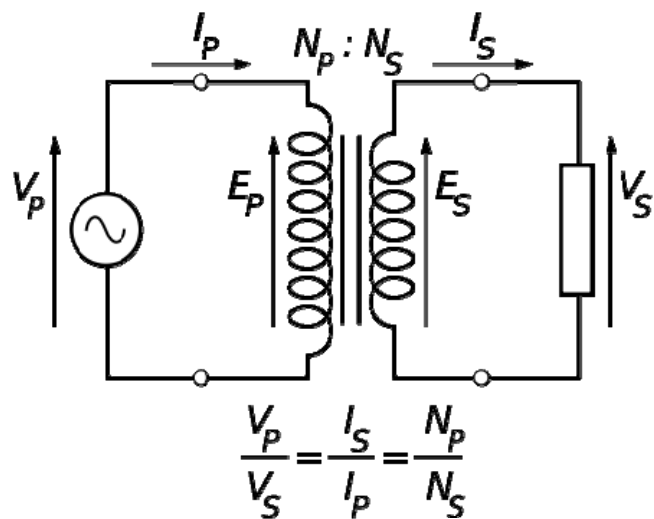
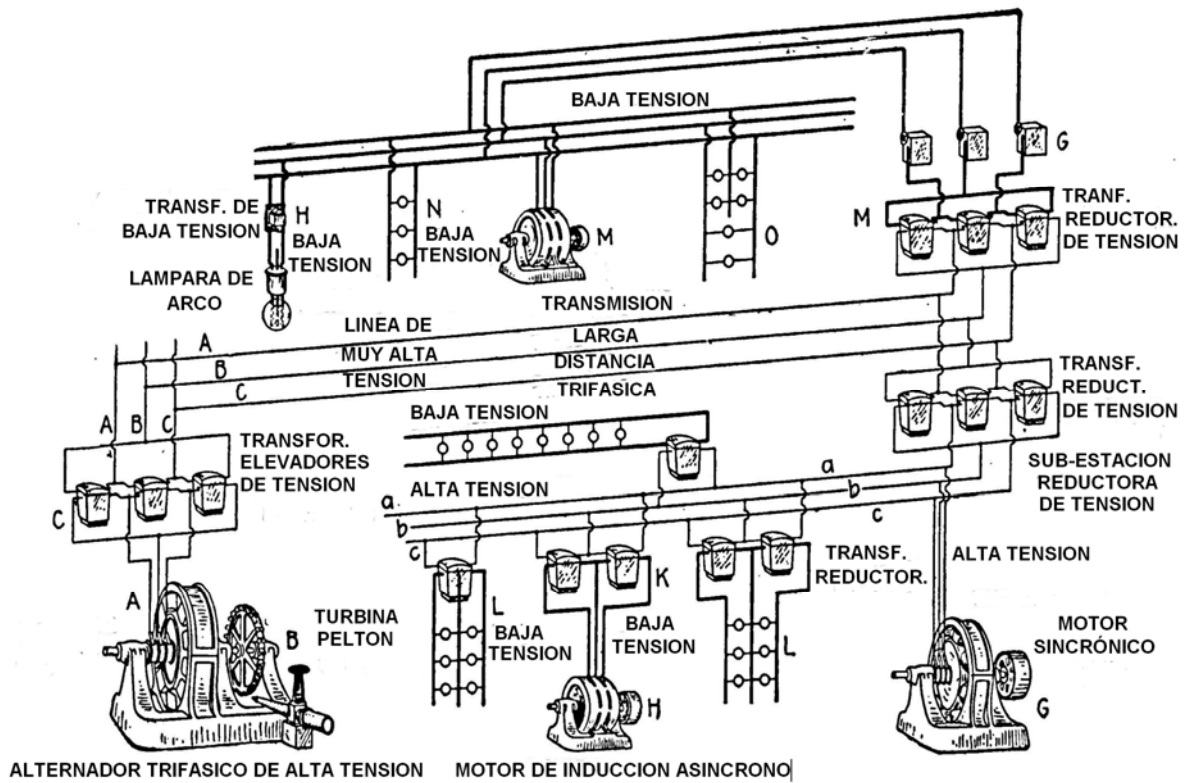


Figura 30. Relación de voltaje, corriente y número de espiras en los circuitos primario y secundario de un transformador.

Las Figs. 31 siguientes comparan el esquema de distribución de CA trifásica de 1917 con uno actual.



Codigo de color:
Negro: Generacion
Azul: Transmision
Verde: Distribucion

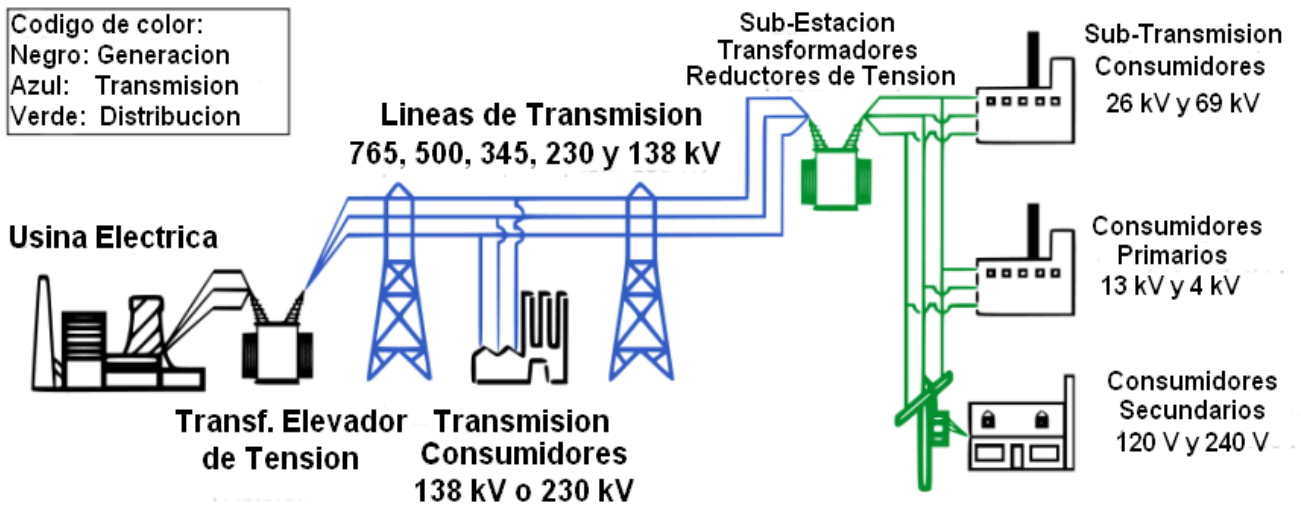


Figura 31. Arriba: Distribución de CA trifásica ca 1917. Debajo: Red de CA trifásica actual (Estados Unidos).

Sin embargo, permanecía un gran obstáculo para su aceptación generalizada: la necesidad del diseño eficiente y económico de un motor que transforme la energía eléctrica de CA en trabajo mecánico. En efecto, el empleo de los llamados motores universales (CC y CA), originalmente diseñados para funcionar con CC (a pesar que actualmente en uso para funciones específicas de baja potencia que requieren un gran torque de arranque, tales como taladros y otras herramientas de mano, licuadoras, aspiradoras, etc) presentan diversos inconvenientes, tales como chisporroteo de las escobillas en sus contactos con las delgas del colector, consecuente ruido electromagnético de alta frecuencia que afecta la recepción de señales radioeléctricas aéreas, etc, además de su alto costo.

Hasta que **Nikola Tesla** (1856–1943), durante un paseo por un parque de Budapest (Hungría), concibió en 1882 una idea brillante: la producción de un campo magnético rotante, un concepto explorado independientemente en 1885 por el físico e ingeniero italiano **Galileo Ferraris** (1847-1897), mediante devanados estacionarios desplazados angularmente y alimentados por corrientes polifásicas. Este sistema de corrientes origina un campo magnético rotatorio como el producido mecánicamente en el esquema elemental de la Fig. 32.

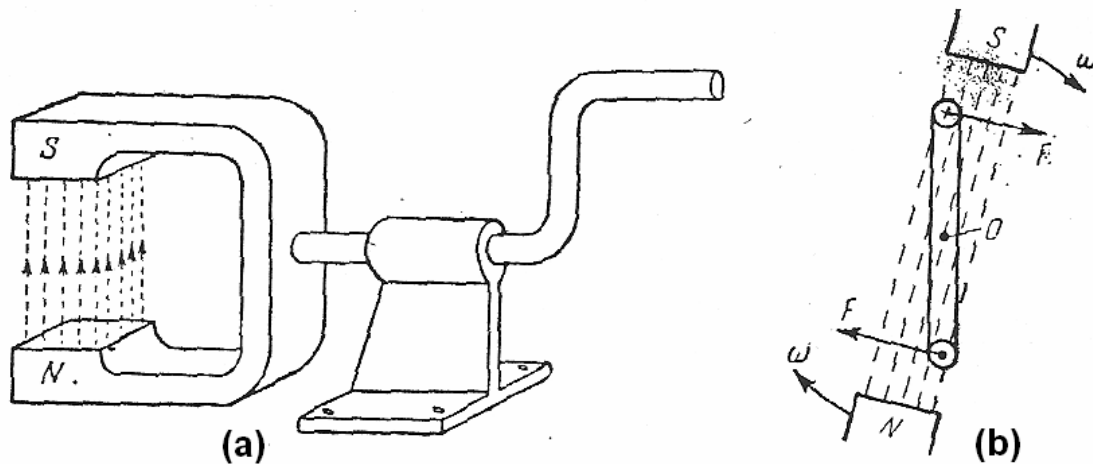


Figura 32. (a) Campo magnético giratorio producido por la rotación mecánica de un imán permanente. (b) Fuerzas producidas por el campo magnético rotatorio sobre una espira conductora cerrada.

El principio de funcionamiento del motor de CA se muestra en la Fig. 32(b):

- i) El campo magnético giratorio induce una fem (*inducción de Faraday*) en la espira que constituye el rotor del motor.
- ii) La fem genera una corriente en la espira conductora cerrada, cuyo sentido de circulación viene dado por la *ley de Lenz*.
- iii) El campo magnético actúa sobre la corriente generada con la *fuerza de Ampere* (F), produciendo un torque que arrastra la espira a seguir la rotación del campo magnético.
- iv) Para mantener el movimiento del rotor cuando su eje (O) se acopla a una carga externa, la espira debe girar con una velocidad angular un *poco menor* que la del campo magnético (ω); de allí el nombre de *motor asíncrono*.

La Fig. 33 muestra el campo magnético rotatorio generado por tres espiras concéntricas, desplazadas angularmente en 120° y 240° entre sí en la periferia de un estator y alimentadas por corriente trifásica.

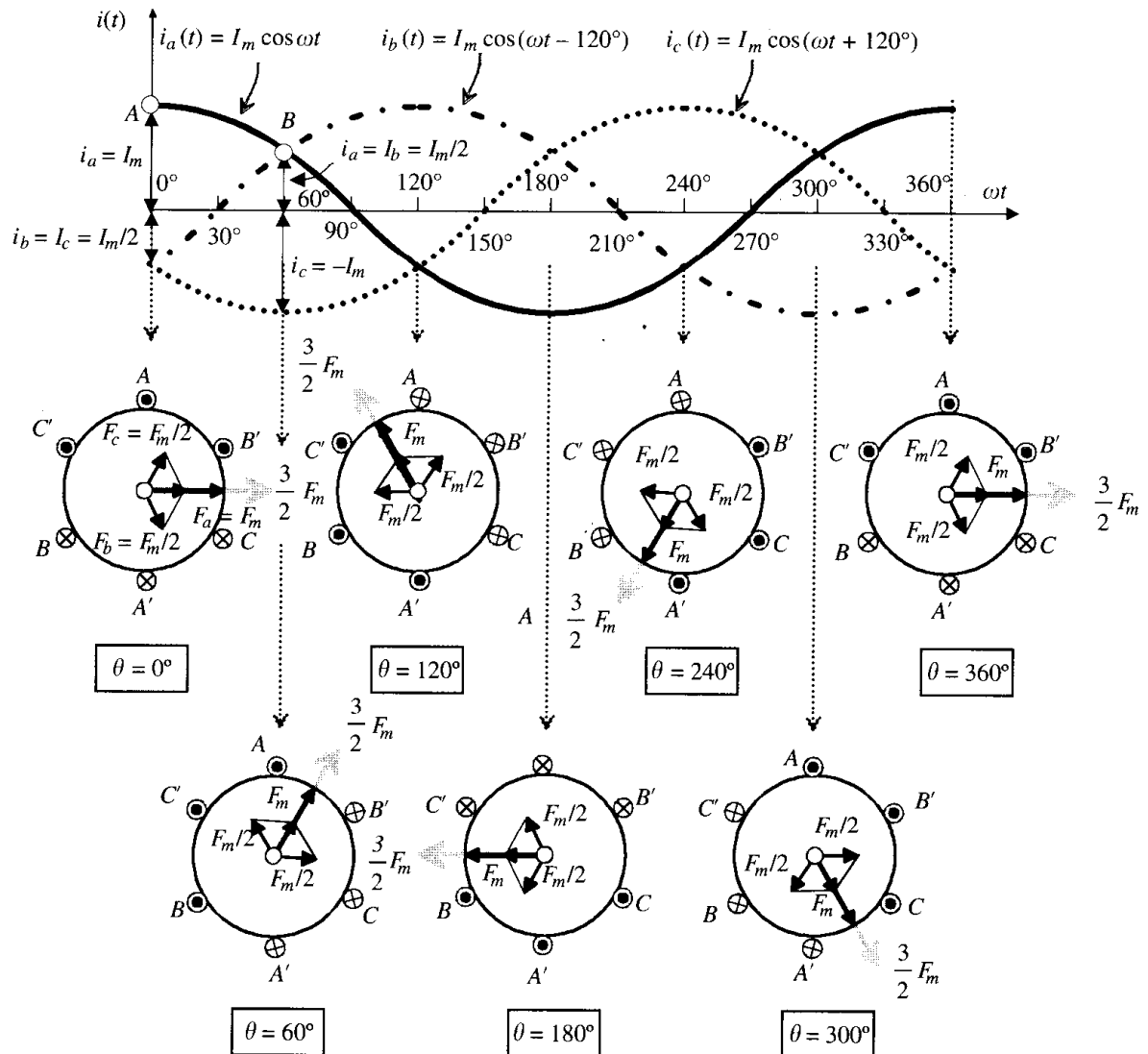


Figura 33. Campo magnético rotatorio resultante producido por tres espiras AA', BB' y CC' alimentadas con corriente trifásica (*Teorema de Ferraris*).

3.3. Guerra de las Corrientes

Durante la llamada "**Guerra de las Corrientes**" hacia fines de los 1880's, se enfrentaron [George Westinghouse](#) y Thomas Alva Edison, debido a la promoción por parte de éste último de

la CC para la distribución y empleo de energía eléctrica, frente a la alternativa de CA propuesta por Westinghouse y Nikola Tesla. El resultado de la ‘guerra’ se decidió principalmente en las siguientes ‘batallas’ de experiencias exitosas con la generación, transmisión y empleo industrial de la CA:

- i) Westinghouse usa con éxito en 1891 el sistema de CA de Tesla en la Planta de Generación Hidroeléctrica de Ames. Localizada cerca de Ophir, Colorado, USA, fue el primer sistema comercial en producir y transmitir corriente alterna. El generador era impulsado por una turbina Pelton de 1,80 mts que recibía una caída de agua de 97,5 metros. El alternador Westinghouse de 100 HP era el mas grande manufacturado en la época y generaba CA monofásica de 3000 V a 133 Hz. La energía eléctrica era transmitida a una mina distante 4,2 Kms. El costo total de la línea de transmisión fue de unos US \$700, alrededor del 1% del costo estimado para una línea de CC. Se mostró que la transmisión de CA era muy eficiente, ya que la pérdida en la línea resultó ser menor que el 5%.
- ii) La *Feria International Electro-Técnica*, llevada a cabo en Frankfurt (Alemania), entre el 16 de Mayo al 19 de Octubre de 1891. La exhibición mostró la primera transmisión a grandes distancias de corriente trifásica de alta potencia, la que era generada en Lauffen am Neckar, distante unos 175 km de la Feria. Como resultado de esta exitosa experiencia de campo, la CA trifásica fue adoptada como la forma estándar de transmisión en las redes de distribución eléctrica de todo el mundo. La Feria presentó una turbina hidráulica en Lauffen que potenciaba un alternador trifásico equipado con un campo rotante (ver Figura 34). El alternador giraba a 150 rpm, y tenía un campo magnético rotante con 32 polos. Producía una potencia nominal de 300 HP y un voltaje de salida de 55 V. La frecuencia de la corriente era de 40 Hz. La tensión del alternador era aumentada hasta 8000 V para su transmisión mediante transformadores aislados y refrigerados con aceite. Posteriormente, se realizaron pruebas de transmisión con tensiones de hasta 25.000 V (entre fases). La línea de transmisión uso unas 60 Tns de alambre de cobre de 4 mm de diámetro. En la exhibición, el voltaje fue reducido mediante transformadores para la conexión de motores y de sistemas motor-generador para alimentar lámparas de alumbrado (ver Figura 35). La eficiencia total desde la turbina a la carga fue en promedio del 75%, lo que dispó muchas dudas sobre aspectos prácticos de la transmisión de potencia eléctrica de CA a grandes distancias.

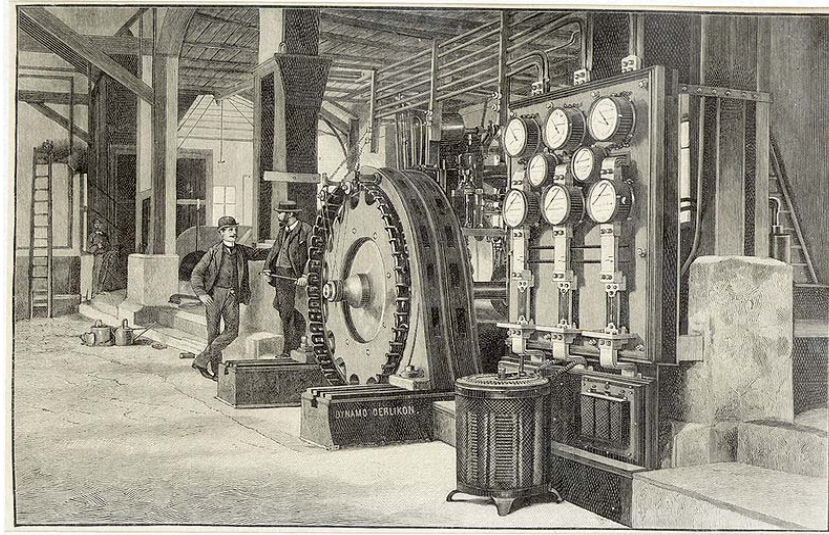


Figura 34. Generador trifásico en la usina hidroeléctrica de Lauffen (Alemania, 1891)

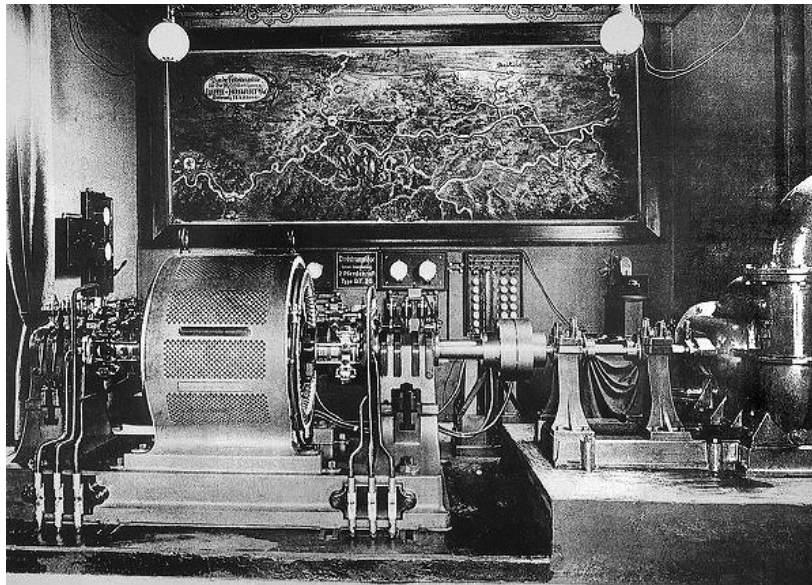


Figura 35. Motor trifásico conectado a una bomba que alimentaba la caída de agua artificial de la Feria de Frankfurt (Alemania 1891).

- iii) La *Feria Mundial de Chicago 1893* (en celebración de los 400 años de la llegada de Colon a America) exhibió un sistema completo polifásico de generación y distribución, instalado por Westinghouse. General Electric Company (con el apoyo de T. Edison y J. P. Morgan) propuso alimentar la exhibición (particularmente, la iluminación) con CC, a un costo original de US\$1.8 millones. Después que esto fuera rechazado por exorbitante, General Electric redujo su oferta a un costo de US\$554.000. Sin embargo, empleando el

sistema de CA patentado por Nikola Tesla, Westinghouse propuso iluminar la Exposición de Chicago por US\$399.000, ganando de ésta manera la licitación.

Fue un momento histórico y el comienzo de una revolución cuando Tesla y Westinghouse introdujeron al público la potencialidad de la energía eléctrica de CA. La Compañía Westinghouse exhibió diversos sistemas polifásicos, incluyendo generadores polifásicos, transformadores elevadores y reductores de tensión, líneas de transmisión, motores sincrónicos y de inducción de porte comercial, y convertidores rotatorios CA/CC (incluyendo un motor de tren operacional). Las máquinas eléctricas funcionales en escala mostraron al público una visión de las posibilidades de los sistemas polifásicos de potencia de CA, que pueden transportar energía eléctrica a grandes distancias y ser utilizada por una variedad de aplicaciones, incluyendo la conversión a CC.

- iv) *Cataratas del Niágara*. En 1890 se formó la Comisión Internacional Niágara de expertos, encabezada por Lord Kelvin, con el objeto de analizar propuestas para utilizar la energía hidráulica de las Cataratas del Niágara (cerca de la ciudad de Buffalo, Estado de Nueva York, USA). De entre 19 presentaciones, la Comisión llegó incluso a considerar brevemente una propuesta que empleaba aire comprimido como un medio de transmisión de potencia, sin embargo terminó inclinándose por la transmisión eléctrica. A pesar de ello no pudieron decidir sobre el método específico que resultara la mejor solución. Finalmente, el 27 de Octubre de 1893 la Comisión llegó a la convicción de otorgar el contrato a la propuesta de CA de Westinghouse (diez alternadores polifásicos de 5.000 HP cada uno), dejando de lado a las propuestas de CC de General Electric y Edison. Los trabajos comenzaron en 1893 con un proyecto de generación y transmisión de CA de 25 Hz para minimizar pérdidas de transmisión por impedancia (Westinghouse había empleado una frecuencia de 133 Hz en 1891). La frecuencia de la corriente fue cambiada a 60 Hz en los 1950's. Algunos dudaron que el sistema alcanzara a generar suficiente electricidad para potenciar la industria en Buffalo. Tesla estaba seguro que iba a funcionar, y expresó que las Cataratas del Niágara tenían la capacidad de potenciar todo el este de Estados Unidos. Ninguno de los sistemas previos de CA polifásica alcanzaba la escala de potencia del proyecto Niágara.
- El 15 de Noviembre de 1896, las industrias de Buffalo (a unos 40 Kms de distancia) fueron alimentadas por la energía eléctrica enviada desde los generadores de la Estación Adams de las Cataratas del Niágara. Los generadores hidroeléctricos (de 5.000 HP) fueron construidos por la Corporación Eléctrica Westinghouse, usando las patentes de Tesla sobre sistemas de CA. Las placas de los generadores llevan inscripto el nombre de Tesla. Para conformar los intereses de la General Electric, el contrato para la construcción de las líneas de transmisión a Buffalo (usando de nuevo las patentes de Tesla) ¡fue otorgado a esa compañía!.

3.4. Máquinas eléctricas polifásicas

La mayor parte de la generación mundial de energía eléctrica de potencia se realiza mediante sistemas de CA trifásicos y, como resultado, con muy pocas excepciones, los generadores sincrónicos son máquinas trifásicas. Para la producción de un conjunto de tres voltajes desplazados en 120° en el tiempo, se requiere un mínimo de tres bobinas desplazadas angularmente 120° en el espacio (ver Fig. 36).

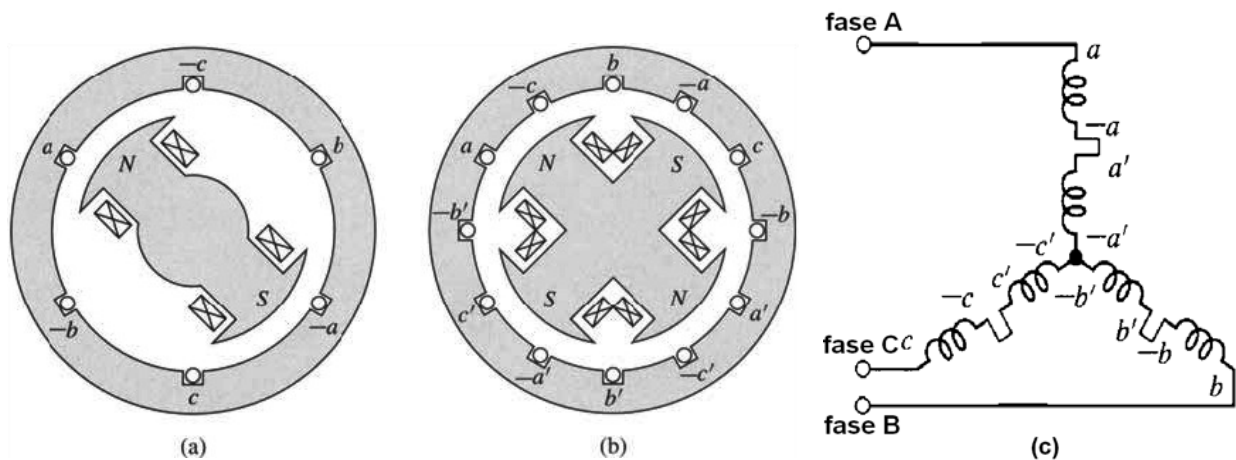


Figura 36. Vista esquemática de generadores trifásicos de polos salientes: (a) Dos polos, (b) cuatro polos, y (c) conexión estrella (Y) de los arrollamientos del estator tetrapolar.

De la figura pueden inferirse dos aspectos importantes:

- i) El número mínimo (N) de conductores por fase en la armadura (normalmente, el estator) para optimizar la suma de las fems (de la misma amplitud y fase) generadas simultáneamente en dichos conductores al ser barridos por las líneas de fuerza del campo magnético de CC rotante depende del número de polos inductores del rotor (p) y viene dado por $N = p$,
- ii) Para que las fems generadas en los conductores de las bobinas de cada fase del estator se sumen, es necesario que el paso angular de las mismas coincida con el paso de los polos del rotor, esto es estén (como los polos) desplazados angularmente de manera uniforme en $360^\circ/p$ entre sí.
- iii) Para producir CA trifásica, los conductores de cada fase deben estar angularmente desplazados de las otras fases en un 'ángulo eléctrico' dado por $360^\circ/(3p/2)=240^\circ/p$. Así, el número total de conductores (=número de ranuras de estator) es igual a $3p$.
- iv) La relación entre la frecuencia eléctrica (f_e) y la mecánica (f_m) viene dada por la ecuación:

$$f_e = \left(\frac{p}{2}\right) f_m ,$$

El caso simple de un alternador trifásico con $p=4$ polos salientes se muestra esquemáticamente en la Fig 37. En este caso, el número de ranuras del estator es $3p=12$, el número N de

conductores por fase es 4 y están separados en $360^\circ/4=90^\circ$ entre sí, por lo que los segmentos axiales de una dada bobina se alojan en ranuras apartadas entre sí por un período de tres ranuras (30° por ranura). Las bobinas correspondientes a las tres fases están desplazadas angularmente entre sí en $240^\circ/4=60^\circ$ y 120° . La figura siguiente muestra una representación lineal de los arrollamientos del estator (devanado ondulado) y sus conexiones.

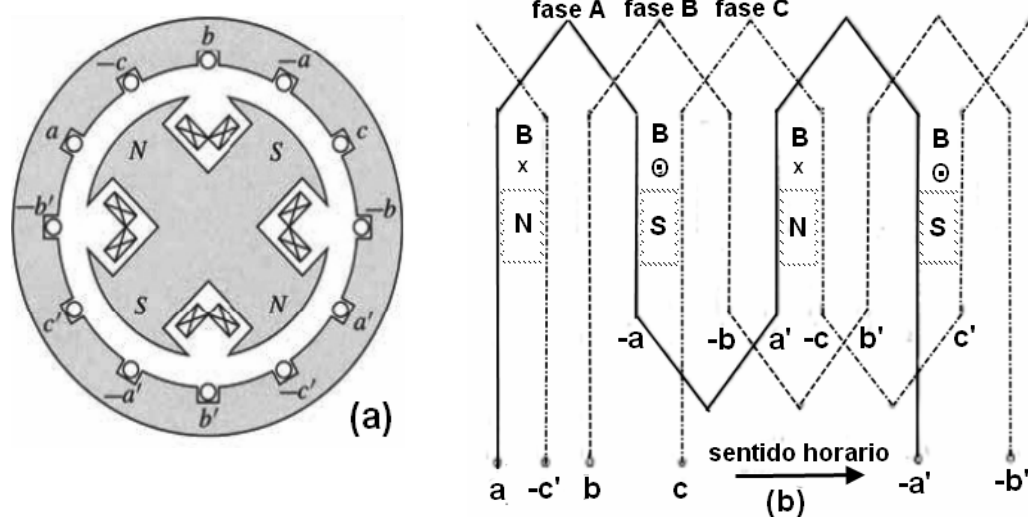
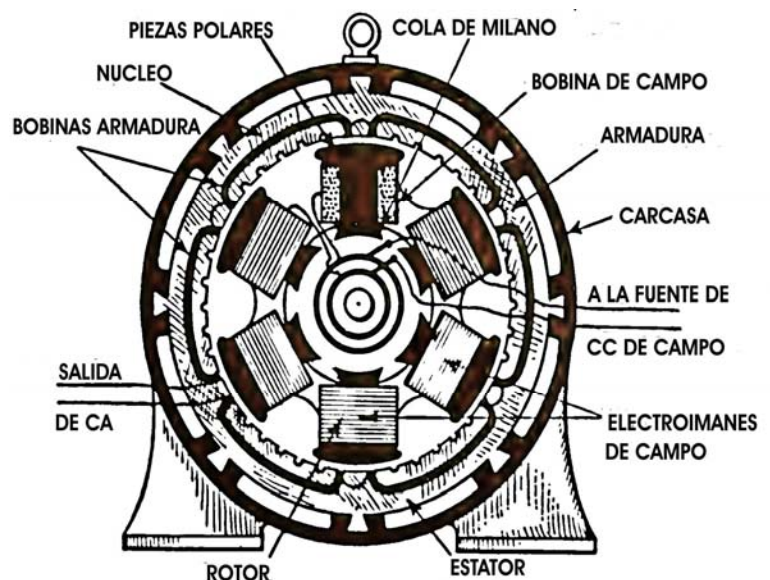


Figura 37. (a) Representación esquemática de un generador trifásico elemental de cuatro polos (b) Representación lineal del esquema de enrollamientos en el estator (armadura) y sus conexiones. Las fases se diferencian con líneas llena (fase A), de trazos (fase B) y de trazos y puntos (fase C). Las regiones indicadas en línea de trazo fino muestran la posición de los polos del rotor en el instante indicado en la parte (a).

La Figura 38 siguiente muestra un generador trifásico de 6 polos salientes, donde se ha indicado las bobinas de campo de del rotor, la conexión serie entre las mismas y de los dos extremos a sendos anillos deslizantes que las alimentan con CC de una fuente externa. Por claridad, se indican los arrollamientos de sólo una de las tres fases del estator (armadura) y la conexión serie entre los mismos.

Figura 38. Detalles constructivos de un generador de CA trifásico hexapolar

Dado que el estándar para la frecuencia f_e es de 50 o 60 Hz, se ve la necesidad de un alternador multipolar para los generadores hidroeléctricos, donde la frecuencia mecánica f_m es baja. En este caso, el empleo de polos salientes (o proyectados) es más conveniente constructivamente (ver Figs. 39 y 40).



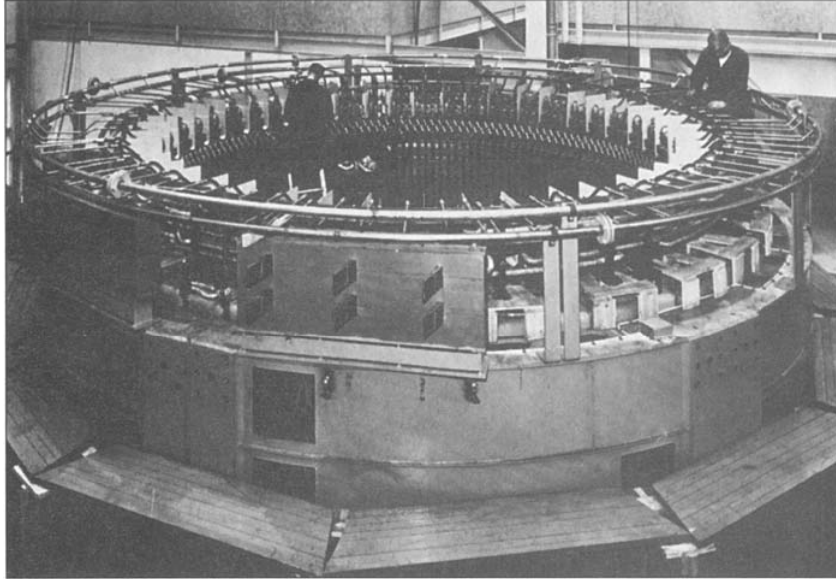


Figura 39. Estator de un generador trifásico hidroeléctrico de 90 MVA y 12kV que rota a 375 rpm. Los conductores son enfriados por el pasaje de agua (*Brown Boveri Corporation*).

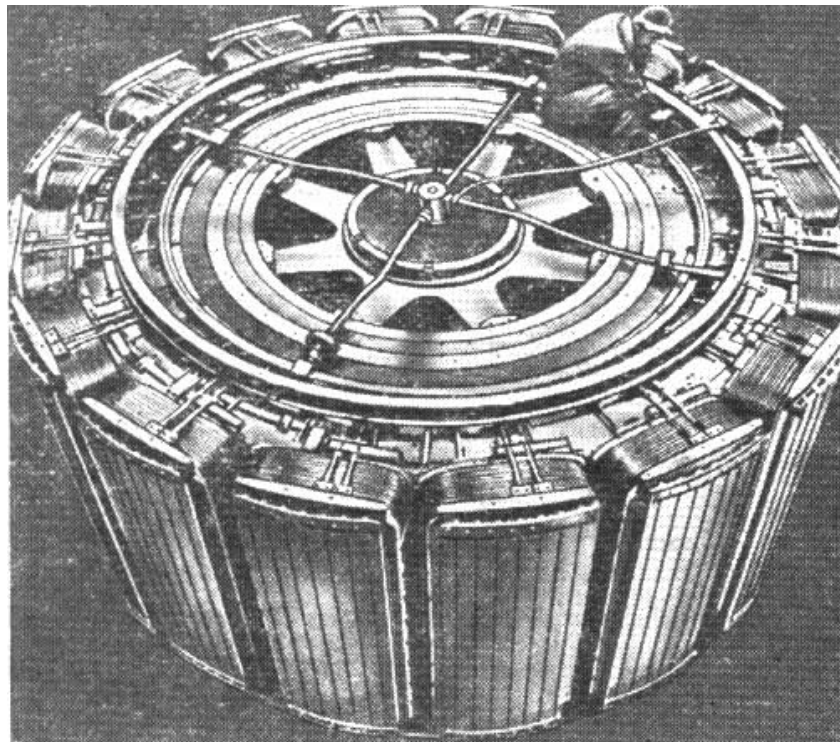


Figura 40. Rotor de 16 polos salientes del generador hidroeléctrico cuyo estator se muestra en la Fig. 39.

Los alternadores impulsados por turbinas de vapor o gas, sin embargo, operan mejor a relativamente altas velocidades y en este caso son comunes rotores cilíndricos de sólo dos o

cuatro polos no salientes con bobinas alojadas en ranuras múltiples practicadas en la periferia del rotor a lo largo del eje (ver Fig. 41).

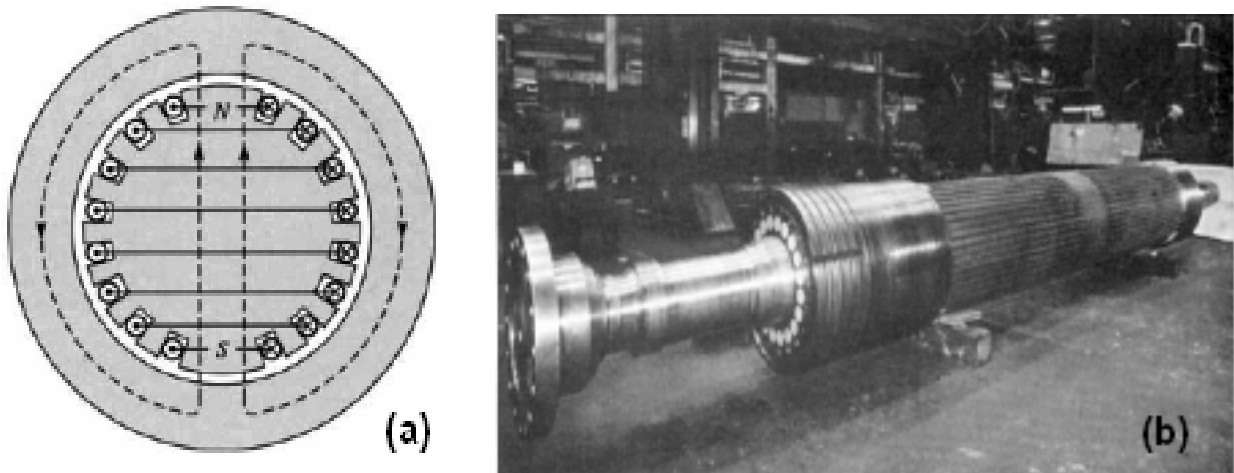
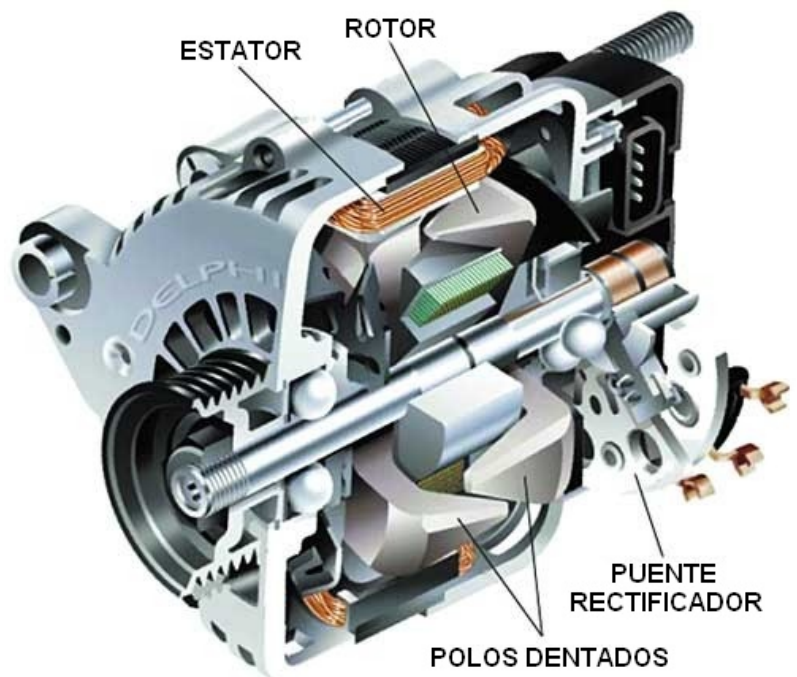


Figure 41. (a) Bobinado de campo de un rotor cilíndrico bipolar elemental (b) Rotor bipolar de un generador trifásico impulsado por una turbina a 3600 rpm (*Westinghouse Electric Corporation*).

Es interesante notar que el principio de funcionamiento de todos los generadores de CA sincrónicos es el mismo. Esto se aplica, en particular, al alternador de CA trifásico de los automóviles modernos, como el que se indica en la Fig. 42.

Figura 42. Vista en corte mostrando los componentes de un moderno alternador trifásico de automóvil.

La Figura 43 siguiente muestra un detalle del estator y del rotor de un generador trifásico similar al de la Figura 42.



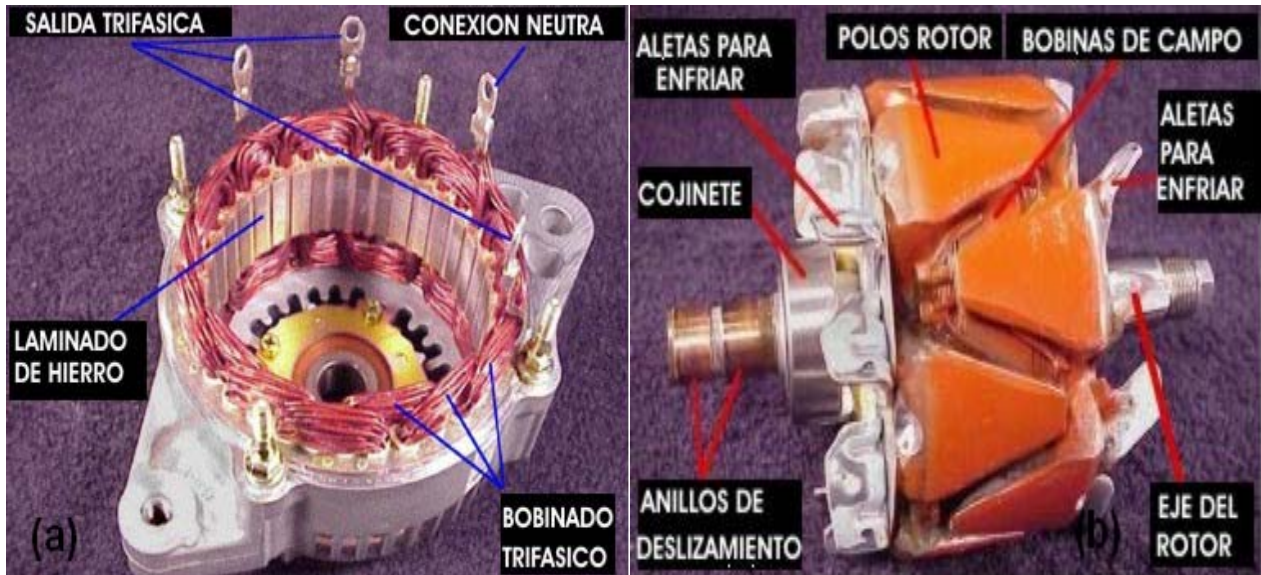


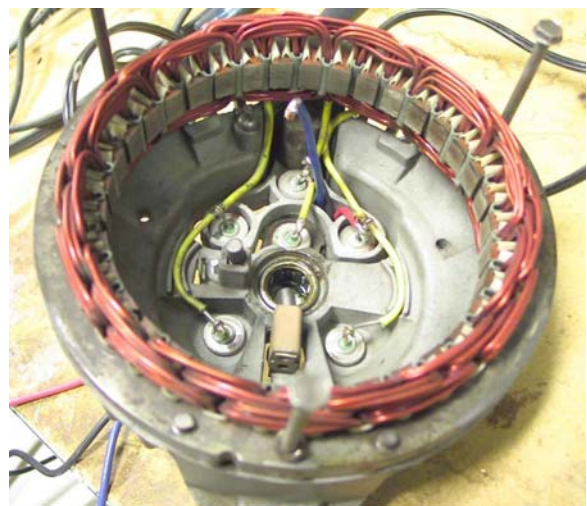
Figura 43. Alternador de CA trifásico de 12 polos de un automóvil moderno. (a) Estator con devanado ondulado o semi-arrollado (b) Rotor con electroimán de 12 polos alimentado con CC.

El ejemplar mostrado corresponde a un número de polos $p=12$. En este caso, el número de ranuras es $3p=36$, el número $N=p$ de conductores por fase es 12, los que se distribuyen angularmente en el estator de manera uniforme separados entre sí en $360^\circ/p=30^\circ$, por lo que los segmentos axiales consecutivos del arrollamiento de una dada fase se alojan en ranuras apartadas entre sí por un período de tres ranuras y se encuentra bobinado en la misma forma ondulada que en el caso del alternador trifásico de 4 polos mostrado en la Fig. 37.

El estator de los alternadores trifásicos de automóviles puede también presentar el mismo número de inductores por ranura y la misma distribución de los mismos en la periferia del estator mediante el enrollamiento alternativo de la Figura 44 correspondiente a $p=12$ polos y 36 ranuras

Figura 44. Estator de un alternador trifásico de 12 polos con arrollamiento completo. Se muestran las salidas de CA trifásica (3 cables amarillos) y sus conexiones a los 6 diodos del rectificador de onda completa que la convierten en CC.

Bobinas adyacentes de una misma fase se encuentran arregladas una al lado de la otra a lo largo del perímetro del estator, están conectadas en serie entre sí y arrolladas en direcciones opuestas con los correspondientes segmentos axiales adyacentes compartiendo la misma ranura (ver Fig. 44 y el esquema de la Fig. 45). De esta forma, se tienen 12 bobinas por fase que ocupan



otras tantas ranuras (1/3 del total). El conjunto de bobinas correspondiente a la segunda fase sigue el mismo patrón que el primer conjunto, sólo que se encuentra desplazado angularmente respecto de éste en el estator en $240^\circ/12=20^\circ$, ocupando el segundo tercio de ranuras disponibles. Teniendo en cuenta que la separación entre ranuras es de 10° , esto corresponde a un corrimiento de dos ranuras de este conjunto de bobinas respecto de las ocupadas por la primera fase. De la misma forma, el conjunto de bobinas de la tercera fase se encuentra desplazado angularmente respecto del primero en 40° (4 ranuras), completando de esta manera el llenado del tercer tercio restante de ranuras del estator.

Uno de los extremos de cada uno de los tres conjuntos de bobinas se conectan entre sí y los tres extremos libres constituyen la salida trifásica del alternador conectado en 'estrella' (Y).

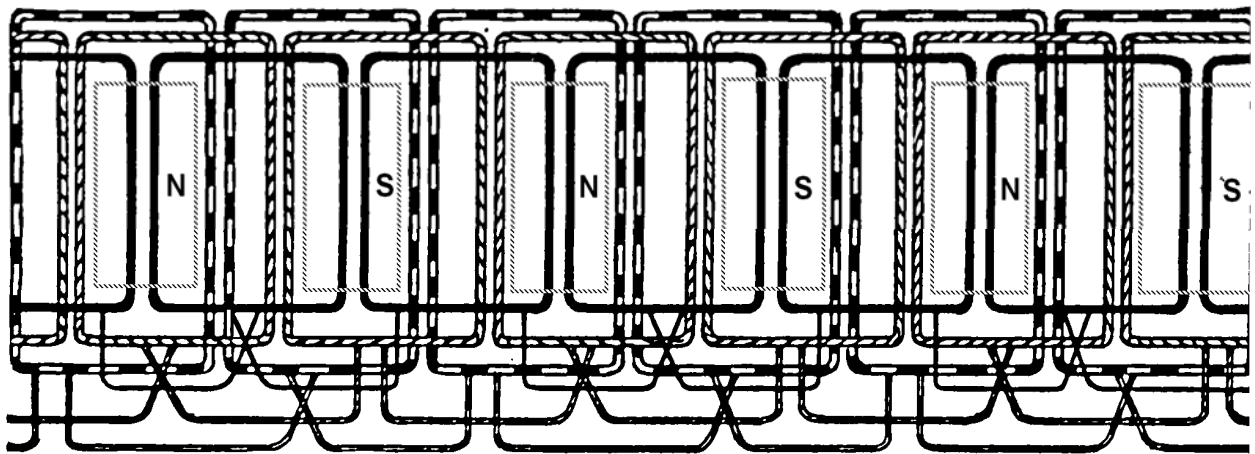


Figura 45. Representación lineal del esquema de enrollamientos en el estator (armadura) y sus conexiones del generador trifásico de la Fig. 44. Las fases se diferencian con líneas llena y de trazos. Segmentos axiales adyacentes de una misma fase comparten la misma ranura. Las regiones indicadas en línea de trazo fino muestran la posición de los polos del rotor en un dado instante.

La contrapartida de los generadores de CA sincrónicos es el motor de CA sincrónico. En la Fig. 46 se muestra un corte de un motor trifásico sincrónico de 60 Hz. Se suministra CA trifásica a las bobinas de la armadura en el estator y CC para alimentar los arrollamiento de campo en el rotor. Los campos magnéticos del estator y rotor deben ser constantes en amplitud y estacionarios entre sí. En un motor sincrónico, la velocidad de estado estacionario es determinada por el número de polos y la frecuencia de la corriente de armadura. Así, dicho motor actuado por una fuente de CA de frecuencia constante opera a una velocidad de rotación constante.

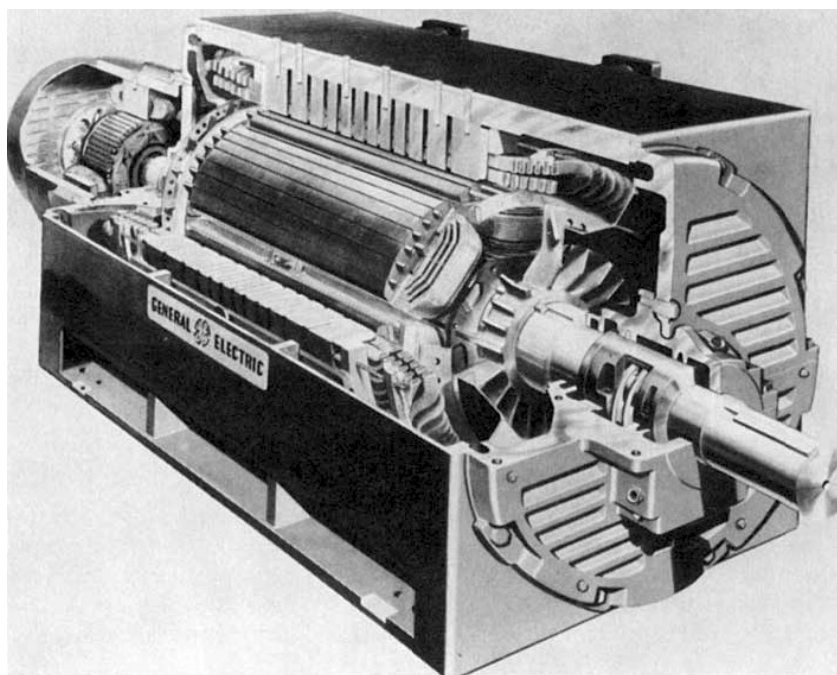
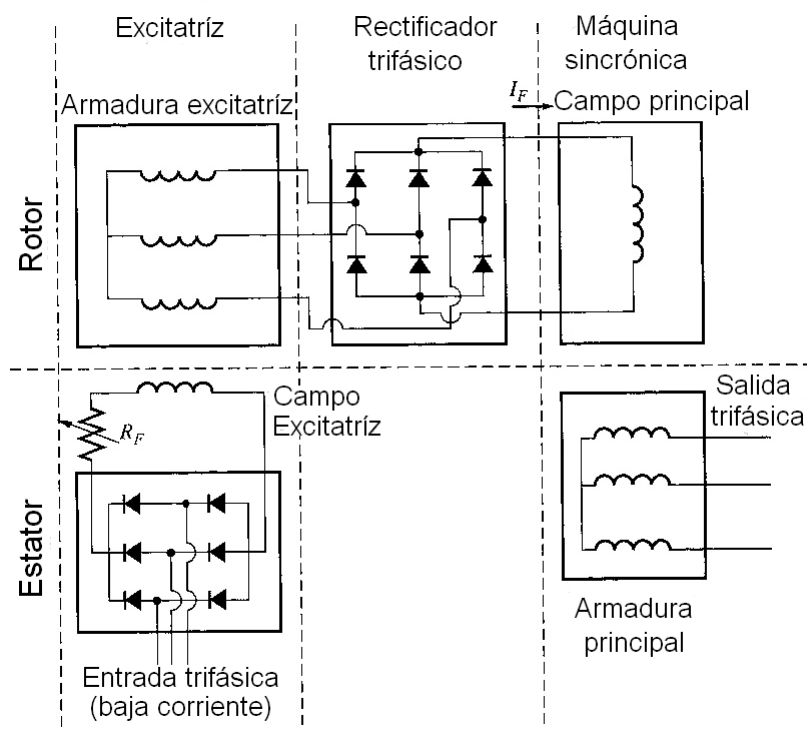


Figura 46. Vista en corte de un motor de CA trifásica sincrónico de altas revoluciones. La excitatriz de las bobinas de campo del rotor, que se muestra en el extremo izquierdo del rotor, es un pequeño generador de CA trifásico que es llevada a CC mediante un conjunto de rectificadores semiconductores montados sobre el mismo eje de manera de evitar anillos deslizantes para alimentar la CC el rotor principal. La pequeña CC de campo de la excitatriz (en el estator) es suministrada por la CA trifásica de línea rectificada con diodos semiconductores (*General Electric Company*).

La Figura 47 siguiente muestra el esquema de alimentación de motores de CA trifásica sincrónicos sin escobillas.

Figura 47. CA trifásica de baja potencia es rectificada a CC antes de ser usada para alimentar el circuito de campo de la excitatriz localizado. La salida del circuito de la armadura de la excitatriz (sobre el rotor) es entonces rectificada a CC para suministrar la corriente de campo de la máquina principal.



Para independizar completamente la excitación de CC de un generador de CA de cualquier fuente de energía externa se puede usar una pequeña excitatriz piloto. Esta es un pequeño generador AC trifásico con imanes permanentes montados sobre el eje del rotor y un bobinado trifásico en el estator. De esta manera produce la potencia requerida para alimentar el circuito de campo de la excitatriz, que a su vez controla el circuito de campo de la máquina principal. Si la excitatriz piloto está montada sobre el eje del generador, entonces no se requiere potencia eléctrica externa al sistema de generación. Esto se muestra esquemáticamente en la Fig. 48 siguiente:

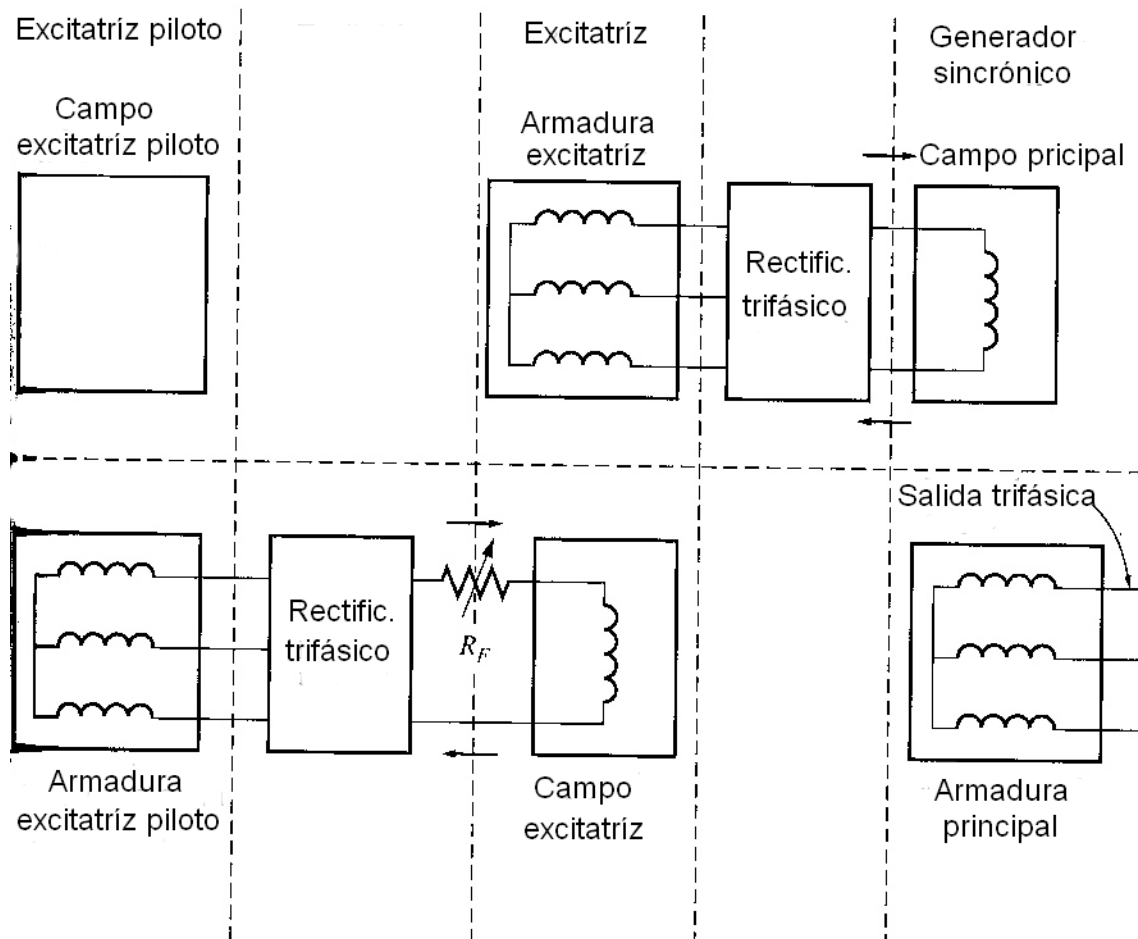


Figura 48. Sistema de excitación sin escobillas de un generador trifásico que incluye una excitatriz piloto. Los imanes permanentes de esta excitatriz piloto produce la corriente de campo de la excitatriz, que a su vez produce la corriente de campo del generador principal.

3.5. Motores asíncronos

Si bien la idea del campo rotante resolvió algunos de los problemas de los motores universales (ya no es necesario el problemático conmutador con múltiples delgas aisladas entre sí, bastan sólo tres o cuatro anillos continuos para colectar las corriente polifásicas inducidas en el rotor), aún resultaban motores caros y complejos para su uso masivo. Esto se debía a la necesidad de

bobinar el rotor como en los motores universales y controlar mediante un circuito externo las corrientes inducidas en dicho rotor. Esto fue finalmente superado por el prolífico Ingeniero e Inventor Ruso-Polaco [Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky](#) (1862-1919) con la introducción en 1891 del motor de inducción en corto-circuito. Mediante este notable invento, las corrientes de inducción en el rotor se cierran en una suerte de ‘jaula de ardillas’, consistente en varillas de metal uniformemente distribuidas en dirección paralela al eje del rotor y sobre su superficie cilíndrica, cortocircuitadas entre sí mediante sendos anillos en ambas bases de dicho cilindro (ver Fig. 49). El desarrollo condujo a motores de inducción asíncronos más económicos, menos complejos y así con menores requerimientos de mantenimiento, que son los que se utilizan actualmente en hogares, talleres e industrias.

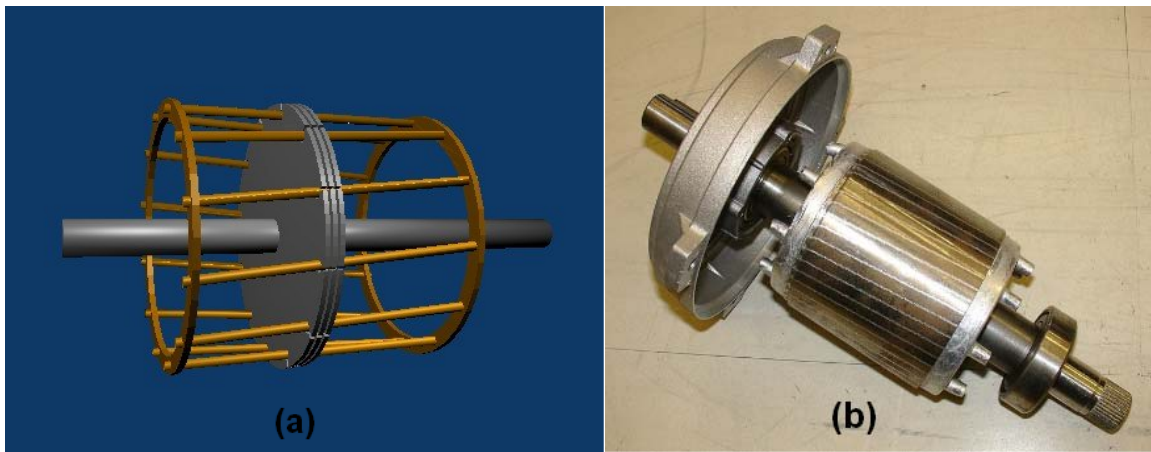


Figura 49. (a) Modelo mostrando las partes de un rotor en jaula de ardillas. (b) Aspecto del rotor de un motor de CA asíncrono práctico.

Base electromagnética del funcionamiento de motores de inducción asíncronos

La ecuación básica (19) de la fem de un generador de CA nos permite entender el funcionamiento de los motores de inducción asíncronos:

$$E_2 = 4.44k f_2 N_2 \Phi_m . \quad (19)$$

Aquí f_2 es la frecuencia de la corriente de inducción generada por el campo magnético rotatorio (de frecuencia f_1) del estator sobre el devanado (o jaula de ardillas) del rotor y su valor viene dado por:

$$f_2 = f_1 - f_m = s f_1 , \quad (20)$$

donde f_m es la frecuencia mecánica del rotor y s es el deslizamiento del rotor respecto del campo giratorio del estator y viene definido por:

$$s = \frac{f_1 - f_m}{f_1} . \quad (21)$$

La fem inducida en el rotor (19), genera en el bobinado del mismo una corriente I_2 determinada por la teoría de circuitos de CA:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}, \quad (22)$$

que retrasa con respecto a la fem en un ángulo de fase φ_2 dado por:

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}, \quad (23)$$

donde:

R_2 : Resistencia óhmica del devanado del rotor

$X_2 = 2\pi f_2 L_2$: Reactancia del devanado de inductancia L_2

El par de arranque del motor y su valor estacionario cuando impulsa la carga a su velocidad de rotación de régimen depende fuertemente de ángulo de fase φ_2 entre la corriente I_2 y la fem E_2 en el devanado del rotor. Consideremos dos casos límites:

i) Caso de reactancia inductiva pequeña respecto de la resistencia, $X_2 \ll R_2$:

I_2 en fase con E_2 ($\varphi_2=0$) $\rightarrow I_2$ interactúa con el campo B dando lugar a fuerzas de Ampere \rightarrow fuerzas de Ampere dan lugar a un torque neto que ‘arrastra’ el rotor y su carga de manera que acompañe la rotación de B (ver Figura 50a).

ii) Caso de reactancia inductiva grande respecto de la resistencia, $X_2 \gg R_2$:

I_2 atrasa respecto de E_2 en un ángulo φ_2 próximo a 90° $\rightarrow I_2$ interactúa con el campo B dando lugar a fuerzas de Ampere \rightarrow fuerzas de Ampere dan lugar a un torque neto próximo a cero (ver Figura 50b)

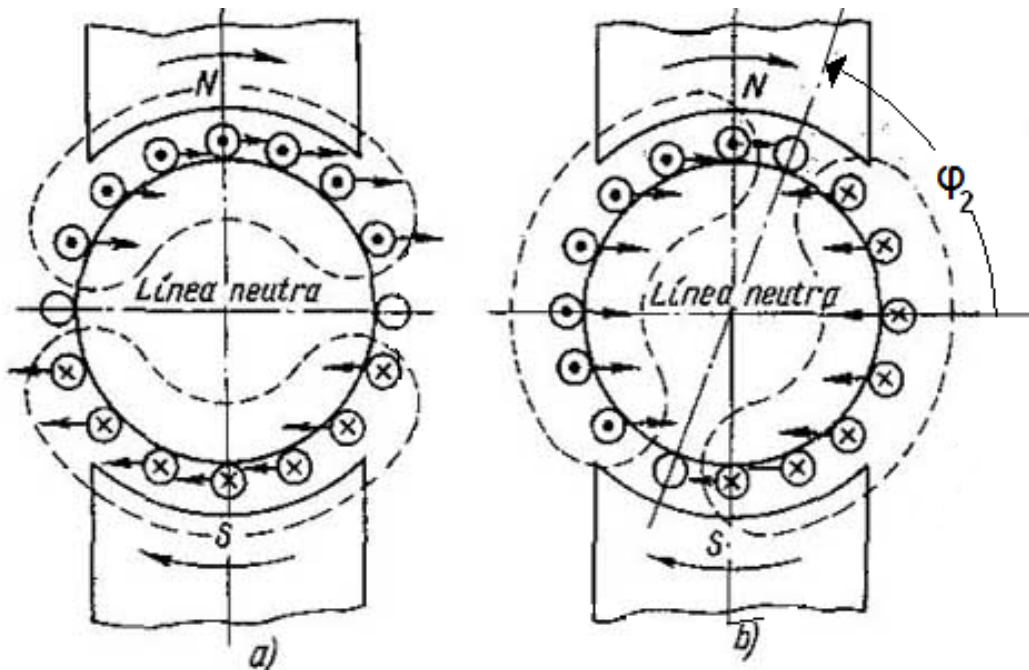


Figura 50. El campo magnético giratorio del estator se supone aquí producido por la rotación mecánica de un imán permanente. Los conductores sobre el rotor se muestran en corte por pequeños círculos distribuidos uniformemente, con las corrientes inducidas en los mismos indicadas por cruces cuando son entrantes y puntos cuando son salientes del plano del dibujo. La línea neutra (línea de trazos y puntos) indica los conductores de corriente nula que separan las mitades activas de conductores con corrientes opuestas (curva de trazos). Las flechas indican las fuerzas de Ampere del campo magnético rotante sobre las corrientes inducidas en los conductores del rotor. a) Caso de reactancia inductiva del rotor pequeña respecto de su resistencia óhmica. B) Caso de reactancia inductiva grande respecto de la resistencia.

Puede probarse que el torque T viene dado por:

$$T = cI_2\Phi_m \cos \varphi_2, \quad (24)$$

donde c es una constante. Reemplazando el valor de I_2 dado por Ec. (22) con la fem E_2 de Ec. (19), resulta, empleando Ec. (20) para la frecuencia f_2 de la corriente inducida en el devanado del rotor por el campo magnético rotante de frecuencia f_1 generado por el estator, la siguiente expresión del torque como función del deslizamiento s :

$$T(s) = cte \frac{sR_2}{R_2^2 + (2\pi f_1 L_2 s)^2}. \quad (25)$$

La dependencia del torque con la velocidad de rotación de un motor de CA asíncrono trifásico se muestra en la Figura 51 siguiente.

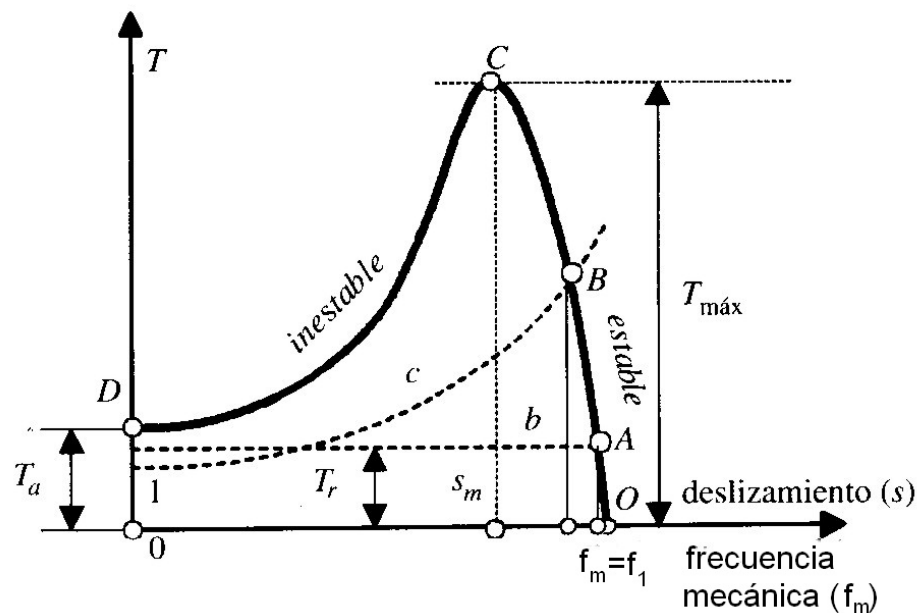


Figura 51. Torque vs frecuencia mecánica de rotación y deslizamiento de un motor trifásico.

Para potencias menores que 1HP, en muchas aplicaciones se emplean motores de CA asíncronos monofásicos. Su funcionamiento es enteramente similar al del motor trifásico. Ahora, el bobinado de una sola fase *no genera un único campo rotatorio* como el trifásico, *sino dos que rotan en direcciones opuestas* (Teorema de Leblanc) y la relación torque vs deslizamiento presenta la forma que corresponde a la suma de dos campos rotantes con frecuencias $\pm f_i$ como muestra la Figura 52.

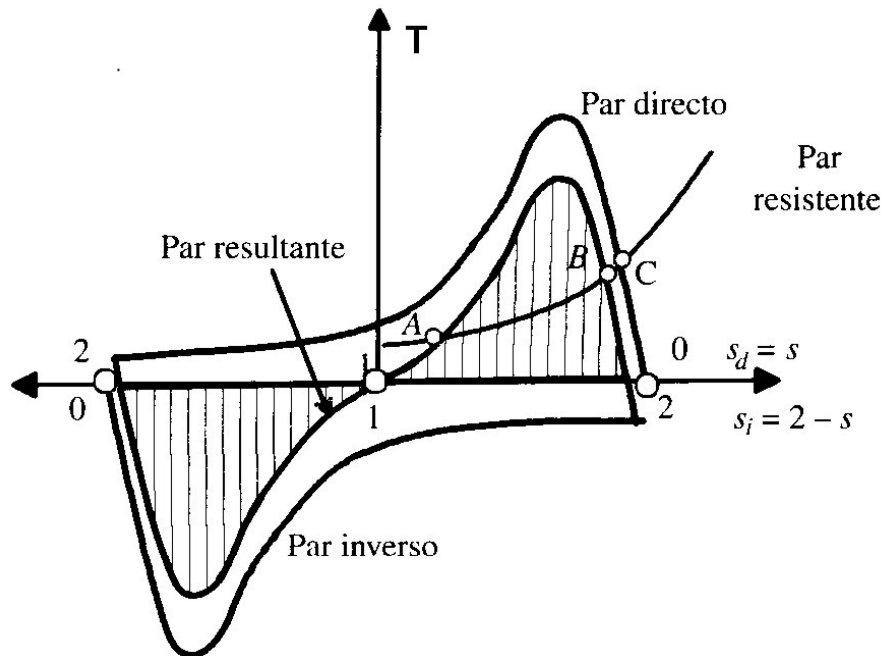


Figura 52. Torque vs deslizamiento de un motor asíncono monofásico.

Puede apreciarse que, a diferencia del trifásico, el motor monofásico no arranca por sí sólo ($T=0$ para $s=1$). Sin embargo, si se le da un ‘empujón’ mas allá del punto A donde $T(s)$ intercepta la curva de carga, entonces se acelerará hasta encontrar la situación de equilibrio estable del punto B donde, de nuevo, $T(s)=\text{Torque resistente de la carga}$. Este empujón puede lograrse de varias formas, todas involucrando la conexión en paralelo durante el arranque o permanente de otro juego de bobinas (llamadas ‘de arranque’) que presentan una resistencia mayor que las de trabajo, se encuentran bobinadas en el estator geoméricamente desplazadas angularmente respecto de estas últimas y, eventualmente, están conectadas en serie con un condensador. El objeto de esta conexión auxiliar es aproximarse a los efectos de una corriente bifásica en lo que hace a generar un campo magnético rotante y así un torque durante el arranque (ver Fig. 53). Usualmente, la bobina auxiliar de arranque se desconecta de la red una vez que el motor alcanzó su velocidad de régimen mediante un dispositivo centrífugo.

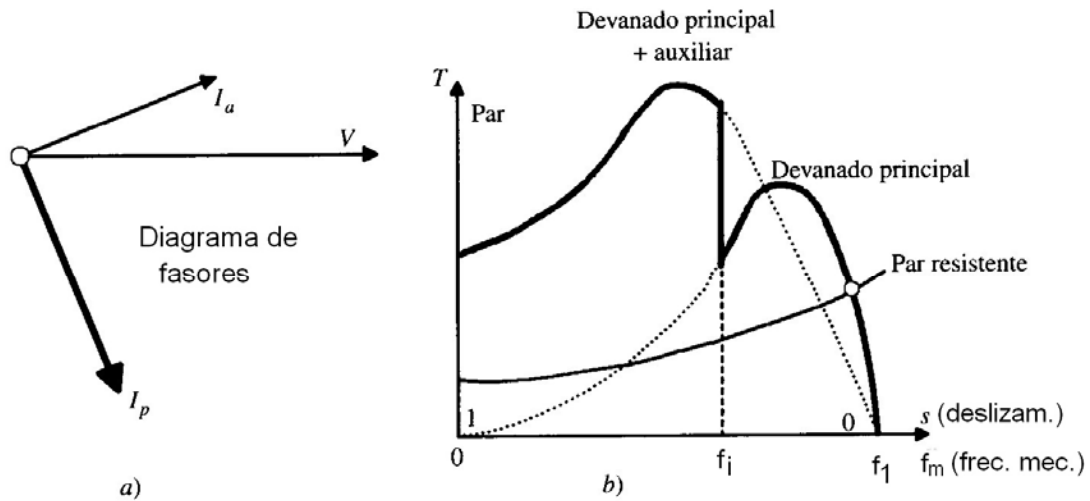


Figura 53. Motor de CA monofásico con condensador (a) Relación de fase entre la tensión de línea V y las corrientes en las bobinas de trabajo I_p y de arranque I_a (b) Relación par-velocidad de rotación.

4. Biografías

William Gilbert (1544–1603). También conocido como Gilberd, fue un filósofo natural y médico Inglés. Fue de los primeros académicos en apoyar las ideas de Copérnico y en rechazar tanto la filosofía Aristotélica prevaleciente en su tiempo como los métodos escolásticos de enseñanza en las universidades. Actualmente se lo recuerda mayormente por su libro *De Magnete* (1601), y se le atribuye el crédito de introducir el término *electricidad*. Es considerado por algunos como el padre de la electricidad y el magnetismo o la ingeniería eléctrica. Una unidad de la *fuerza magnetomotriz*, también conocida como *potencial magnético*, fue designada como *gilbert* (G) en su honor.



Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806). Fue educado en la École du Génie en Mézieres, Francia y se graduó en 1761 como ingeniero militar. Coulomb sirvió en las Indias Occidentales durante nueve años, donde supervisó la construcción de fortificaciones en la Martinica. Se lo recuerda por haber descrito de manera matemática la ley de atracción entre cargas eléctricas (*Ley de Coulomb*) en 1785, empleando una balanza de torsión que inventó en 1777. En su honor la unidad de carga eléctrica lleva el nombre de *coulomb* (C). Además realizó investigaciones sobre magnetismo, rozamiento, electricidad y mecánica estructural y de suelos (*Teoría de Coulomb*, 1776).



Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta

(1745–1827). Nació y se educó en Como, Lombardía, Italia. Recibió una educación básica y media humanista, pero al llegar a la enseñanza superior, optó por una formación científica. En 1774 fue nombrado profesor de física de la *Escuela Real* de Como. Un año después, Volta realizó su primer invento, el electróforo, con el que logra por primera vez, producir corriente eléctrica continua. Entre los años 1786 y 1788, se dedicó a la química, descubriendo y aislando el gas metano. Un año más tarde, en 1789, fue nombrado profesor titular de física experimental en la Universidad de Pavía. En 1780, un colega de Volta, Luigi Galvani, observó que el contacto de dos metales diferentes con el músculo de una rana originaba la aparición de corriente eléctrica. En 1794, Volta se interesó en el fenómeno y comenzó a experimentar con metales únicamente, llegando a la conclusión de que el tejido muscular animal no era necesario para producir corriente eléctrica. Esta idea sería demostrada experimentalmente por el funcionamiento de la primera pila eléctrica inventada en 1800 por el mismo Volta. Desde 1881, la unidad de fuerza electromotriz del Sistema Internacional (SI) lleva el nombre de *volt* (V) en su honor.



Hans Christian Oersted (1777–1851). Fue un físico

y químico danés. Influido por su padre, que era farmacéutico, se orientó inicialmente por los estudios de farmacia en 1797, al cumplir los veinte años. Tres años después, se licenció en medicina. Sin embargo, su pasión por la química, en especial por las fuerzas electroquímicas, unida a un interés creciente por la filosofía de la Naturaleza, explican en buena medida las razones por las que se interesó en los trabajos del físico, químico y filósofo Alemán Johann Wilhelm Ritter (1776–1810) sobre el galvanismo. De regreso de una estadía por estudios en París, en donde conoció, entre otros, a Jean-Baptiste Biot, trabajó en estrecha colaboración con Ritter. En 1820 descubrió la relación entre la electricidad y el magnetismo en un experimento tan fundamental como simple donde la corriente por un hilo conductor ponía en movimiento la aguja imantada de una brújula colocada en las inmediaciones. Con este experimento clave se iniciaría el estudio del electromagnetismo. Oersted publicó enseguida el resultado de sus experimentos en un pequeño artículo en latín titulado: *Experimenta*



Circa Effectum Conflictus Electrici in Acum Magneticam. Sus escritos se tradujeron enseguida y tuvieron gran difusión en el seno de la comunidad científica europea. En septiembre de 1820, los experimentos de Oersted fueron conocidos por André-Marie Ampère en Francia, quién los usó de base para el crear una teoría cuantitativa sobre la generación de campos magnéticos por corrientes y sobre fuerzas entre corrientes, punto de partida del desarrollo del electromagnetismo. En su honor, se define con el nombre *oersted* (Oe) a la unidad de intensidad del campo magnético. Se cree que también fue el primero en aislar el aluminio en 1825, mediante un proceso electrolítico.

André-Marie Ampère (1775-1836). Fue un matemático y físico francés, generalmente considerado como uno de los descubridores del electromagnetismo. Es conocido por sus importantes aportes al estudio de la corriente eléctrica y el magnetismo, que contribuyeron, junto con los trabajos del danés Hans Christian Oersted y los franceses Jean-Baptiste Biot y Félix Savart al desarrollo del electromagnetismo. Sus teorías e interpretaciones sobre la relación entre electricidad y magnetismo se publicaron en 1822, en su *Colección de Observaciones sobre Electrodinámica* y en 1826, en su *Teoría de los Fenómenos Electrodinámicos*. Ampère descubrió las leyes cuantitativas que describen el desvío de una aguja magnética por una corriente eléctrica. También descubrió las leyes de acciones mutuas entre corrientes. Dichas leyes constituyen los fundamentos del funcionamiento de las modernas máquinas y de los instrumentos de medidas eléctricas. La unidad de intensidad de corriente eléctrica, el *amperio* (A), recibe este nombre en su honor,



Michael Faraday (1791–1867). Fue un físico y químico Inglés que realizó contribuciones fundamentales en electromagnetismo y electroquímica. Hijo de un herrero, sólo tuvo una educación escolar básica y fue un autodidacta. A la edad de 14 años comenzó a trabajar como aprendiz de encuadernador. Durante ese período tuvo acceso a la lectura de libros que estimularon su interés en ciencia, particularmente, en electricidad.

En 1812, cuando tenía 20 años, Faraday asistió a las clases del famoso químico Inglés Humphry Davy (1778-1829). Mas tarde enviaría a Davy un cuaderno con 300 páginas de anotaciones que hiciera durante las clases; Davy respondió empleándolo primero como su secretario y más tarde, en Marzo de 1813, como Asistente Químico de la Institución Real.

Faraday acompañó a Davy como asistente científico en un largo periplo por el continente Europeo entre 1813 y 1815, cuando debió actuar, además, como su valet personal. A pesar de esto, el viaje le dio acceso a la elite científica Europea (llega a conocer a Ampere en Paris y a Volta en Milán) y a una serie de estimulantes ideas de la época.

Bajo la dirección de Davy, el trabajo inicial en química de Faraday se centró en el cloro, y en 1820 reportó la síntesis de los primeros compuestos de cloro con carbono, C_2Cl_6 y C_2Cl_4 . También logró licuar diversos gases tales como el cloro (Cl_2) en 1823, descubrió el benceno en 1825, investigó aleaciones de acero y produjo diversas nuevas clases de vidrios para propósitos ópticos.

Además de sus importantes contribuciones a la química, Faraday es mas conocido por sus descubrimientos fundamentales en electricidad y magnetismo y en electroquímica.

En 1821, inmediatamente después de conocidos los resultados del físico y químico danés Hans Christian Oersted en electromagnetismo, comienza a trabajar en este tema. Luego de discutir el problema con Davy y el físico y químico Inglés W. H. Wollaston (1766–1828), construye los primeros motores eléctricos que transforman energía eléctrica en mecánica, basados en lo que llamó *rotación electromagnética*: una rotación circular continua generada por la fuerza sobre un corriente eléctrica debida a un imán (motor homo-polar). Estos experimentos e invenciones constituirían los fundamentos de la moderna tecnología de máquinas eléctricas.

Faraday ingresó como miembro de la prestigiosa Sociedad Real de Londres en 1824 y al año siguiente fue nombrado director del laboratorio de la Institución Real. Mas tarde, en 1833 sucedería a Davy como profesor de química en esta Institución. Dos años más tarde, le fue concedida una pensión vitalicia de 300 libras anuales.

Dos años después de la muerte de Davy, en 1831, Faraday realiza una serie de experimentos seminales con los que descubre el fenómeno de inducción electromagnética mutua. En forma independiente, el físico estadounidense Joseph Henry (1816-1887) probablemente descubrió el efecto de auto-inducción unos pocos mese antes y ambos podrían haber sido anticipados por los trabajos del físico y sacerdote italiano Francesco Zantedeschi (1797-1873), realizados entre 1829 y 1830. El fenómeno de inducción fue mas tarde modelado matemáticamente por el físico



Escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) en la forma conocida como *Ley de Faraday*. En el período 1831-1832 inventa la primera dínamo que convierte energía mecánica en eléctrica, e introduce el fructífero concepto de líneas de fuerza para representar los campos eléctricos y magnéticos. Este concepto de líneas de flujo emanando de cuerpos cargados, corrientes e imanes provee una manera de visualizar los campos eléctricos y magnéticos que resultó crucial en el desarrollo exitoso de las máquinas electromecánicas que dominaron la ingeniería e industria durante el resto del siglo 19 e inicios del siglo 20. Durante esa época, también investigó sobre la electrólisis y descubrió las dos leyes fundamentales que llevan su nombre:

Primera Ley de Faraday de la Electrólisis: La masa de sustancia depositada en un proceso electrolítico es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado a través del electrolito.

Segunda Ley Faraday de la Electrólisis: Las masas de distintas sustancias depositadas por la misma cantidad de electricidad son directamente proporcionales a sus pesos atómicos e inversamente proporcionales a sus valencias químicas (estados de ionización).

También lleva su nombre una cantidad fundamental en estos procesos como es la carga de un mol de electrones o *constante de Faraday* (unos 96.485 coulombios).

Faraday realizó además aportes importantes en electrostática. En 1836 observó que la carga sobre un conductor hueco reside sólo en su exterior y que no tiene influencia sobre nada encerrado dentro del él, un efecto predicho antes por el físico Italiano Francesco Beccaria (1716–1781), alumno del físico estadounidense Benjamín Franklin (1706-1790) y observado por el mismo Franklin en 1755. Para demostrar el efecto, Faraday construyó un espacio recubierto enteramente con láminas metálicas al que sometió a descargas eléctricas en su exterior mediante un generador electrostático de alto voltaje. Usando un electroscopio, mostró la ausencia de cargas eléctricas en las paredes interiores de la clausura metálica. Construcciones semejantes, empleadas para apantallar personas o equipamiento de influencias electromagnéticas externas, se conocen como *jaulas de Faraday*. Como reconocimiento de las contribuciones de Faraday a la electrostática, se emplea el *faradio* (F) como la unidad SI de capacidad eléctrica.

En 1854, Faraday descubrió que el plano de polarización de luz linealmente polarizada propagándose en un medio óptico, rota en presencia de un campo magnético aplicado en la dirección de propagación, realizando de esta manera experimentos pioneros que revelan la relación existente entre ambos fenómenos. Este efecto se denomina *Rotación de Faraday*. Ese mismo año muestra que muchos materiales exhiben una repulsión débil por parte de los polos de un imán y acuña el nombre de *diamagnetismo* para describir el fenómeno.

Es interesante el notar que a pesar de haber recibido una limitada educación formal y conocer poco sobre matemáticas superiores, Faraday fue uno de los científicos más prolíficos e influyentes de la historia. Su nombre y descubrimientos son ubicuos en la cultura científica de nuestra Civilización Tecnológica. ¡No poca cosa para el hijo de un herrero!

Antonio Pacinotti (1841–1912). Fue un físico Italiano, profesor de física en la Universidad de Pisa. Es reconocido por inventar en 1860 un diseño avanzado de un generador de corriente continua, o dínamo, que describió en un artículo publicado en la revista italiana *Il Nuovo Cimento* en 1865. La dínamo de Pacinotti usaba una armadura en forma de anillo bobinada con alambre de cobre aislado que rotaba en el entre-hierro de un electroimán para producir una corriente menos pulsante y así más próxima a una corriente continua (CC) que la generada por los diseños previos. Pacinotti encontró además que la máquina era reversible, esto es entra en rotación cuando es alimentada por una fuente de CC externa y, de esta manera, podía actuar también como motor eléctrico.



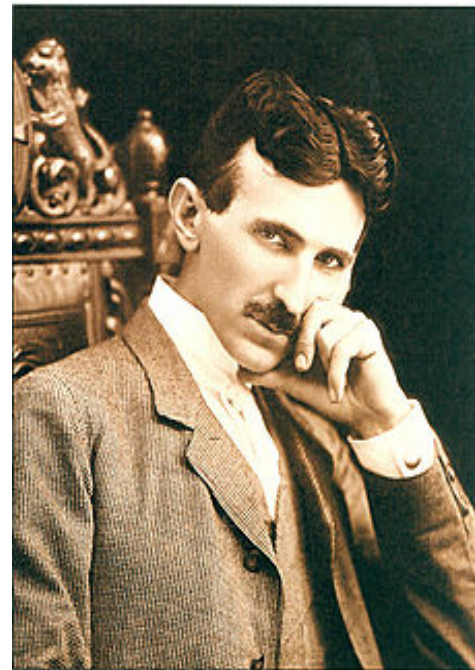
Zénobe Théophile Gramme (1826-1901). Fue un ingeniero eléctrico Belga. A pesar de no poseer conocimientos avanzados de matemáticas, en 1869 re-inventó una máquina de Pacinotti mejorada, conocida como máquina de Gramme, un diseño de dínamo de corriente continua (CC) capaz de generar una tensión mas suave (menos fluctuante) y mas alta que las dínamos conocidas en la época. En 1873 encontró accidentalmente que la máquina era reversible y que giraba cuando era conectada a cualquier fuente de potencia de CC (una propiedad descubierta previamente por Pacinotti). La máquina de Gramme fue el primer motor eléctrico de potencia práctico empleado exitosamente en la industria. Antes de su invención, los motores eléctricos sólo alcanzaban potencias muy pequeñas que los relegaban a su uso en juguetes y como curiosidades de laboratorio.



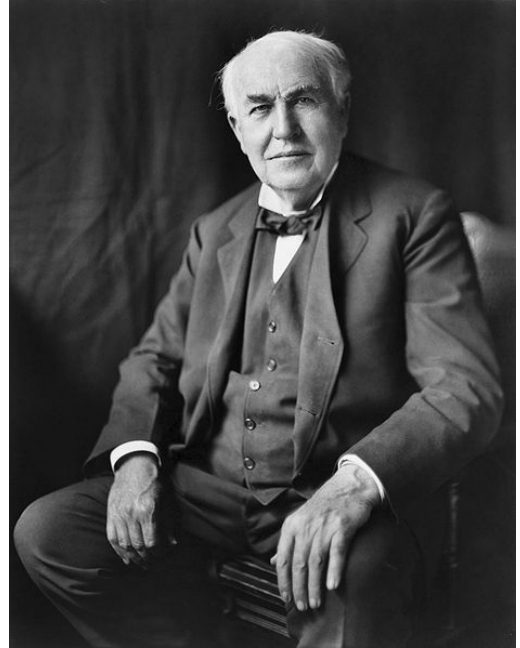
Galileo Ferraris (1847-1897). Fue un físico e ingeniero eléctrico Italiano, destacado por sus estudios en materia de corriente alterna (CA). Obtuvo una licenciatura en ingeniería y trabajó como asistente técnico en física cerca del Museo Industrial Regio italiano. De manera independiente, investigó el campo magnético rotatorio en 1885 (en la literatura electrotécnica, la derivación matemática de un campo magnético rotante a partir de corrientes polifásicas se conoce como el Teorema de Ferraris). Experimentó con distintos tipos de motores eléctricos asíncronos. La investigación finalizó con el desarrollo de un motor de CA. En 1888, Ferraris publicó su investigación en un documento a la Real Academia de Ciencias de Turín (más tarde, en ese mismo año, Nikola Tesla patentaba la idea en los Estados Unidos).



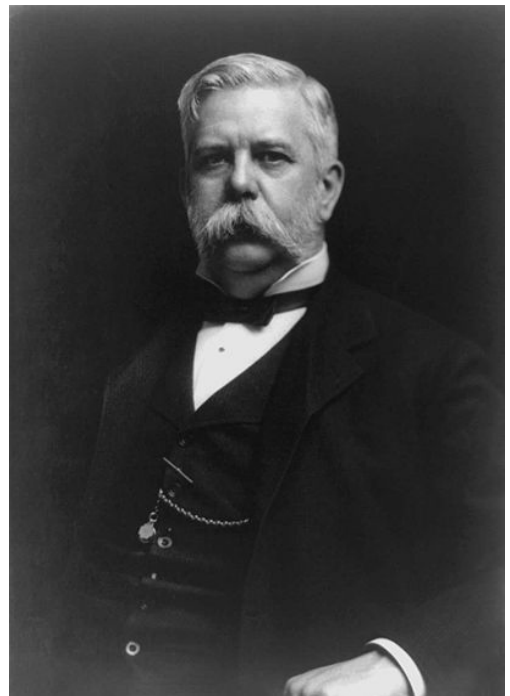
Nikola Tesla (1856–1943). Fue un físico, ingeniero electromecánico e inventor serbio, nacionalizado estadounidense en 1891. Tesla fue uno de los más importantes pioneros en el nacimiento de la electricidad comercial y es reconocido por sus múltiples y revolucionarios desarrollos en el campo del electromagnetismo hacia finales del siglo 19 e inicios del siglo 20. Las patentes de Tesla y sus trabajos teóricos constituyeron la base de los modernos sistemas de energía eléctrica de corriente alterna (CA), incluyendo los sistemas polifásicos de distribución eléctrica y el motor de CA, que potenciaron el desarrollo de la Segunda Revolución Industrial o Revolución Tecnológica. En 1960 se nominó la unidad de densidad de flujo o inducción magnética B con su nombre, el *tesla* (T). También se le rinde homenaje con la denominación de *Efecto Tesla* al fenómeno de transmisión inalámbrica de energía eléctrica a dispositivos electrónicos también inalámbricos. En 1893 Tesla demostró el fenómeno en experimentos de escala reducida encendiendo bulbos a distancia y mas tarde intentó llevarlo a una escala de transmisión intercontinental de potencia eléctrica industrial mediante su abortado Proyecto de la Torre Wardenclyffe). Además de su trabajo en electromagnetismo y en ingeniería electromecánica, Tesla realizó contribuciones de diverso grado en el establecimiento de la robótica, control remoto, radar, y ciencia computacional, y también al desarrollo de la balística, física nuclear y física teórica. En 1943, la Suprema Corte de los Estados Unidos sostuvo la prioridad de Tesla en los derechos de patente sobre tecnología de transmisión radial.



Thomas Alva Edison (1847–1931). Fue un inventor, científico y empresario estadounidense quién desarrolló innumerables dispositivos que influenciaron la sociedad de todo el mundo, incluyendo el fonógrafo, la cámara cinematográfica y lámparas eléctricas de luz durables. Referido con el apodo de "El mago de Menlo Park" (actualmente, ciudad Edison en Nueva Jersey) por un periodista, él fue uno de los primeros inventores en aplicar los principios de producción en masa y de trabajo en equipos numerosos al proceso de invención, por lo que es frecuentemente acreditado con la creación del primer laboratorio de investigación industrial. Se dice que el laboratorio de Edison en Menlo Park es precursor de la actual llamada 'fábrica de invención' en el 'Valle del Silicio' de California, USA. Edison es considerado uno de los más prolíficos inventores de la historia, registrando 1.093 patentes estadounidenses en su nombre, como así también diversas patentes en el Reino Unido, Francia, Alemania. Se le acreditan numerosas invenciones que contribuyeron a la comunicación masiva y, en particular, a las telecomunicaciones. Estas incluyen receptores telegráficos de movimiento en los mercados financieros ('stock ticker'), un registro mecánico de votos, una batería para automóviles eléctricos, grabadores y reproductores de música y cámaras de fijación y reproducción cinematográficas. Su trabajo avanzado en estos campos tiene origen en los inicios de su carrera como operador de telégrafo. Edison originó el concepto e implementación de la generación de energía eléctrica de potencia y su distribución a hogares, empresas y fábricas – un desarrollo crucial para el mundo industrializado moderno. Su primera usina de energía eléctrica de corriente continua fue instalada en 1882 en la Isla de Manhattan, Nueva York.



George Westinghouse, Jr (1846–1914). Fue un ingeniero y emprendedor estadounidense que inventó el freno de aire para su empleo en los ferrocarriles y fue un importante pionero de la industria eléctrica. Westinghouse fue uno de los rivales principales de Thomas A. Edison durante la temprana implementación del sistema eléctrico estadounidense. El sistema propuesto por Westinghouse, que empleaba corriente alterna basado en extensivas investigaciones de Nikola Tesla, finalmente se impuso sobre la insistencia de Edison con el (por aquel entonces) ineficiente sistema de corriente continua. En 1911, recibió la Medalla del Instituto Americano de Ingeniería Eléctrica (AIEE) por "logros meritorios en conexión con el desarrollo del sistema de corriente alterna".



Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky (1862-1919).

Fue un ingeniero eléctrico e inventor Ruso, nacido de la unión de una familia noble Polaca, originaria de Mazowsze, y una familia noble Rusa. Debido a las persecuciones políticas que siguieron al asesinato del zar Alexander II de Rusia en 1881, emigró a Alemania donde estudió en la Universidad Tecnológica de Darmstadt (TH Darmstadt). Desde 1887 trabajó para la Compañía General de Electricidad Alemana (AEG). Fue uno de los fundadores de los sistemas eléctricos trifásicos europeos (el otro fue Nikola Tesla en Estados Unidos). Desarrolló el generador eléctrico y el motor eléctrico trifásicos (1888) y estudió las conexiones estándar estrella y delta de esta corriente polifásica. El triunfo de los sistemas de distribución eléctrica trifásica tuvo su consagración en Europa durante la Exhibición Internacional Electro-Técnica de 1891 llevada a cabo en Frankfurt, Alemania, donde Dolivo-Dobrovolsky usó este sistema para transmitir energía eléctrica a una distancia de 176 km con un 75% de eficiencia. En 1891 inventó el transformador trifásico y el motor de inducción cortocircuitado (*jaula de ardillas*). Durante su vida obtuvo más de 60 patentes. En 1911 recibió un doctorado honorario de TH Darmstadt.

