



Profesor de Cátedra: Luis Vargas
Profesor Auxiliar: Lorenzo Reyes
loreyes@ing.uchile.cl
13 de agosto de 2009

EL6000 – Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables Clase Auxiliar 1 – Electromagnetismo y máquinas eléctricas

Tópicos Básicos de Electromagnetismo

Un poco de historia...

Los antiguos Griegos ya poseían una noción de electromagnetismo debido a que habían observado que frotando un pequeño pedazo de ámbar (piedra preciosa de origen vegetal) aparecían chispas y que luego al acercarlo a paja o plumas, éstas eran atraídas. La palabra ámbar en griego es *elektron*, origen del término Electricidad.

La Fuerza Magnética, una de las cinco fuerzas más importantes de la naturaleza junto con la Fuerza de Atracción Universal, fue por primera vez experimentada por los Griegos en Magnesia, donde al tener pedazos de un cierto material llamado magnetita un material ferromagnético como el hierro era atraído.

Así nace el ElectroMagnetismo.

El científico Charles Coulomb descubrió la forma de la Fuerza Eléctrica para un par de cargas, la que es inversa al cuadrado de la distancia entre las cargas. Hasta principio del siglo XIX se tenía la idea que ambos fenómenos: Electricidad y Magnetismo, estaban relacionados pero sin saber cómo.

Sin embargo, Oersted observa en 1820 como la aguja de una brújula cambia de sentido al acercar un circuito por el que pasa una corriente eléctrica, logrando de esa forma tener una relación empírica entre ambos fenómenos.

Por su parte, Ampere demuestra matemáticamente que al acercar un imán a un conductor, se genera una corriente eléctrica en dicho conductor.

Faraday es el encargado de demostrar como una densidad de flujo magnético genera una fuerza electromotriz (f.e.m.) lo que da el primer paso a un Generador Eléctrico.

En 1873 James Clerk Maxwell expone las mundialmente famosas “Ecuaciones de Maxwell”, las que gobiernan todos los fenómenos ElectroMagnéticos en la actualidad. Este trabajo es considerado del mismo peso que las Leyes de Newton en el mundo científico.

Alrededor de 1808 Heinrich Hertz verifica las ecuaciones de Maxwell obteniendo ondas electromagnéticas en su laboratorio. A estas alturas, los estudios de Maxwell eran reconocidos no tan solo por la comunidad científica sino también por todos los ciudadanos del mundo.

Desde este punto en adelante, científicos de todos lados del mundo han usado las Ecuaciones de Maxwell para desarrollar distintas tecnologías. Dentro de estas tecnologías juegan un rol importante Transformadores, Motores y Generadores, encargados de la generación, transmisión y distribución de la Energía Eléctrica.

¿Qué es el Campo Magnético?

El campo magnético es un campo de fuerza que produce cambio de dirección en partículas que poseen una carga eléctrica característica y que se desplazan a una cierta velocidad.

Este campo magnético puede ser producido por un imán permanente natural (magnetita) o por una corriente eléctrica. Se presenta normalmente como líneas de campo magnético.

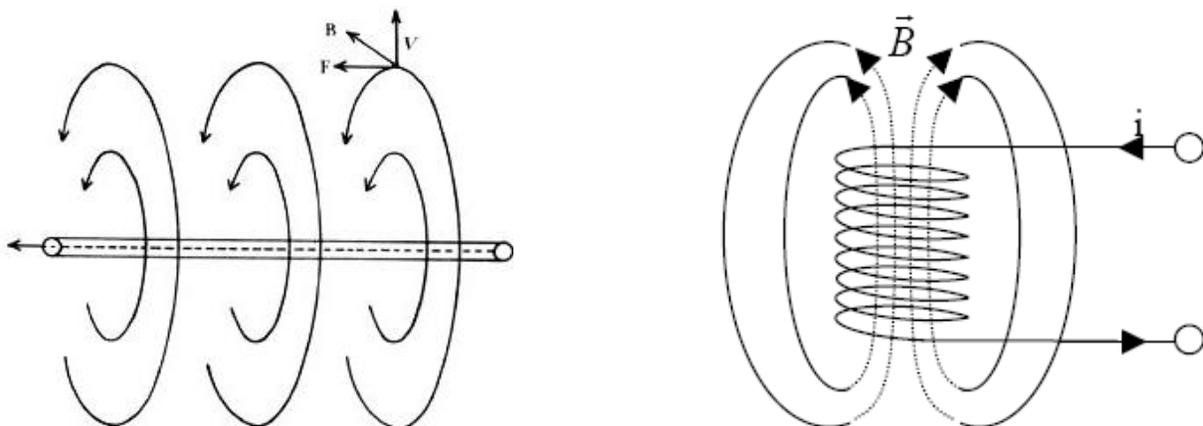
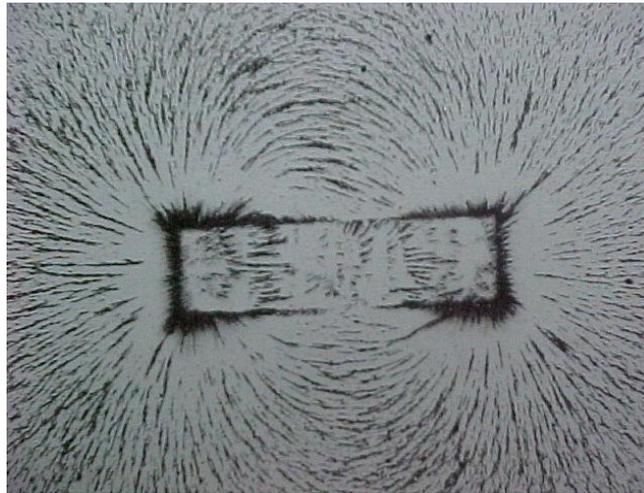


Figura 1: Líneas de Campo Magnético

Inducción Electromagnética

Ley de Ampere

Ampere fue el encargado de demostrar matemáticamente como un campo magnético genera una corriente eléctrica en un circuito. Su famosa ecuación, la Ley de Ampere, es la siguiente:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{ent}$$

Donde el primer término de la ecuación denota la cantidad de flujo magnético por una curva cerrada en el espacio, mientras que el segundo corresponde a la permeabilidad magnética del vacío (μ_0) multiplicado por la cantidad de corriente que pasa por una sección de área formada por la curva cerrada.

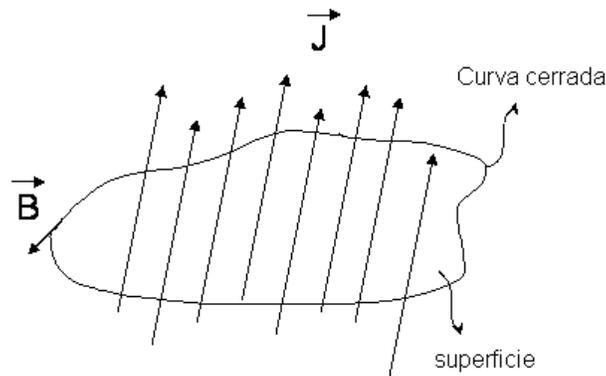


Figura 2: Enlace de flujo magnético

La dirección con la que se mueve el campo magnético con respecto a la dirección de la corriente se rige por la famosa “Regla de la Mano Derecha”. Cabe destacar que la Ley de Ampere demuestra tanto que un campo magnético genera una corriente en un conductor eléctrico como que una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor.

En el caso de una bobina, el campo magnético está dado por el número de vueltas del enrollado, siendo el campo magnético más fuerte mientras más vueltas tiene el enrollado.

Ley de Faraday

Luego, fue Faraday quien demostró matemáticamente que una densidad de flujo magnético variable $\Phi(t)$ induce una fuerza electromotriz dada por:

$$e(t) = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

La variación de Φ en el tiempo puede producirse por una corriente variable en el tiempo (efecto de transformador) o por una variación de la geometría del sistema (efecto de generador). Este último caso, es el que interesa, por cuanto la entrada es energía mecánica (necesaria para modificar la geometría) y la salida es energía eléctrica.

Cabe destacar que cualquier de las leyes antes presentadas pueden ser obtenidas a partir de las ecuaciones de Maxwell.

Generador Sincrónico Simple

Considere que se tiene un imán permanente generando un campo magnético constante, el cual puede rotar en torno a su centro de gravedad. Cercano a él se posiciona una bobina de N vueltas como se ve en la figura 3.

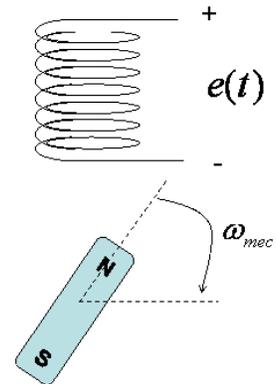


Figura 3: Generador Sincrónico Simple

Por Ley de Faraday la fuerza magnetomotriz $e(t)$, tendrá la forma:

$$e(t) = N\Phi_{m\acute{a}x} \cdot \omega_{mec} \cdot \sin(\omega_{mec}t)$$

Donde es importante destacar que la intensidad de este voltaje dependerá proporcionalmente del número de vueltas N, de la intensidad de flujo máxima $\Phi_{m\acute{a}x}$ y de la velocidad con que gire el imán ω_{mec} . Este voltaje (f.e.m.) creará una corriente en la bobina al conectar una carga a ella. Esta es la aplicación directa de un GENERADOR SINCRÓNICO MONOFÁSICO.

Estos Generadores se usan en la práctica en su modalidad Trifásica, es decir usando 3 bobinas en lugar de 1. Se caracterizan normalmente por el número de polos que tengan, que queda determinado por el número de imanes (cada uno tiene 2 polos). Su apellido “Sincrónico” se debe a que la frecuencia de la corriente generada por estas máquinas corresponde directamente a la velocidad de giro que tenga el rotor (donde se colocan los imanes) y del número de polos de la máquina.

Este tipo de máquinas es la encargada de gran parte de la generación de energía en el país, usada en casi todas las Centrales Hidroeléctricas, Térmicas, etc. de Chile.

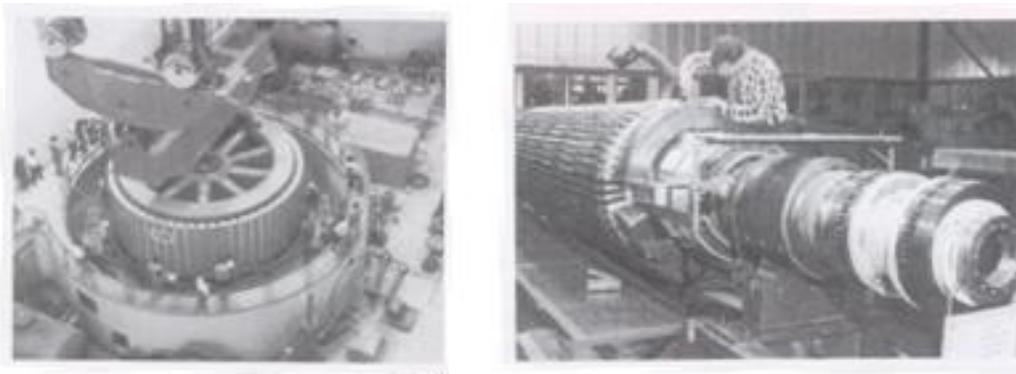


Figura 4: Generadores Sincrónicos Industriales

Máquinas de Inducción

Un estator con tres enrollados idénticos, ubicados físicamente a 120° y alimentados con voltaje trifásico equilibrado, origina un campo magnético rotatorio de magnitud constante el cual gira a una cierta velocidad (ω_s) constante.

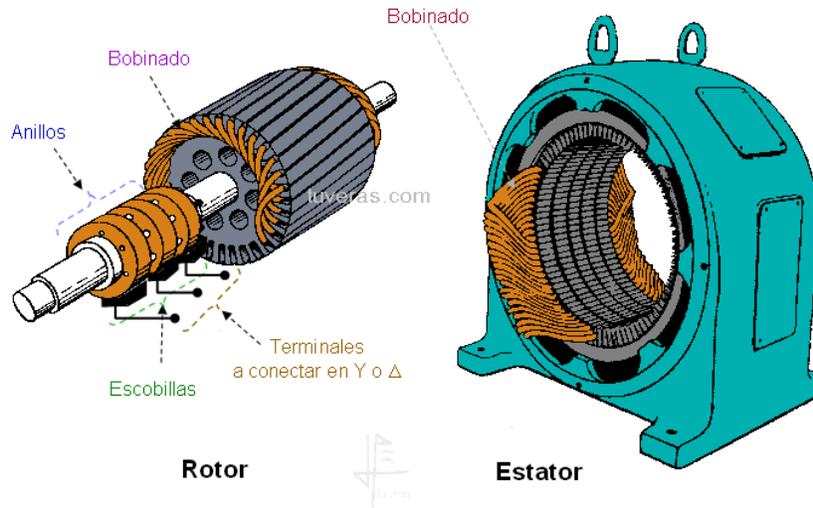


Figura 5: Máquinas de Inducción

Este tipo de máquinas funciona justo al revés de una máquina sincrónica, si se hace girar a la velocidad de la red, esta máquina NO GENERA ELECTRICIDAD, sin embargo y al mismo tiempo, si el estator está alimentado y el rotor está detenido, entonces SI HAY ENERGÍA en la máquina. Esta característica se debe al antes nombrado Campo Magnético Rotatorio.

Centrales Eléctricas¹

La función de una central hidroeléctrica es transformar la energía potencial y cinética del agua primero en energía mecánica y luego en eléctrica. Mediante un sistema de captación (en general será a través de embalses y tuberías) y un sistema de transformación (turbinas y generadores) la energía eléctrica obtenida, será adecuada para suministrar los sistemas de consumo.

La primera central hidroeléctrica se construyó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña. El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la producción total de electricidad.

La tecnología de las principales instalaciones se ha mantenido igual durante el siglo XX. Las centrales dependen de un gran embalse de agua contenido por una presa. El caudal de agua se controla y se puede mantener casi constante. El agua se transporta por unos conductos o tuberías forzadas, controlados con válvulas y turbinas para adecuar el

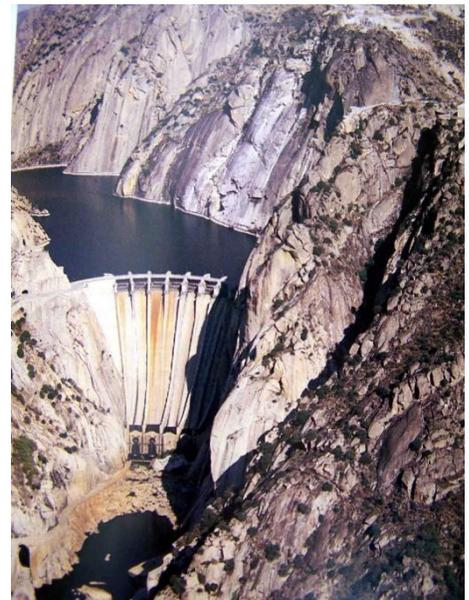


Figura 6: Central Hidráulica

¹ Propiedad intelectual: Ignacio Polanco Lobos.

flujo de agua con respecto a la demanda de electricidad. El agua que entra en la turbina sale por los canales de descarga. Los generadores están situados justo encima de las turbinas y conectados con árboles verticales. El diseño de las turbinas depende del caudal de agua; las turbinas Francis se utilizan para caudales grandes y saltos medios y bajos, y las turbinas Pelton para grandes saltos y pequeños caudales.

Además de las centrales situadas en presas de contención, que dependen del embalse de grandes cantidades de agua, existen algunas centrales que se basan en la caída natural del agua, cuando el caudal es uniforme. Estas instalaciones se llaman de agua fluente o de pasada. Una de ellas es la de las Cataratas del Niágara, situada en la frontera entre Estados Unidos y Canadá, más cercano a la realidad del país, una central de pasada es la Central Florida, ubicada en la comuna de mismo nombre.

A principios de la década de los noventa, las primeras potencias productoras de hidroelectricidad eran Canadá y Estados Unidos. Canadá obtiene un 60% de su electricidad de centrales hidráulicas. En todo el mundo, la hidroelectricidad representa aproximadamente la cuarta parte de la producción total de electricidad, y su importancia sigue en aumento. Los países en los que constituye fuente de electricidad más importante son Noruega (99%), Zaire (97%) y Brasil (96%). La central de Itaipú, en el río Paraná, que está situada entre Brasil y Paraguay, se inauguró en 1982 y fue por mucho tiempo la de mayor capacidad generadora del mundo con 12.600 MW. Sin embargo la central China de las 3 gargantas (Three Gorges), se ha convertido en la nueva central más grande del mundo con 22.500 MW instalados.

Ventajas y Desventajas de las Centrales Hidráulicas

Ventajas

- No requieren combustible, sino que usan una forma renovable de energía, constantemente repuesta por la naturaleza de manera gratuita.
- Es limpia, pues no contamina ni el aire ni el agua.
- A menudo puede combinarse con otros beneficios, como riego, protección contra las inundaciones, suministro de agua, caminos, navegación y aún ornamentación del terreno y turismo.
- Los costos de mantenimiento y explotación son bajos.
- Las obras de ingeniería necesarias para aprovechar la energía hidráulica tienen una duración considerable.
- La turbina hidráulica es una máquina sencilla, eficiente y segura, que puede ponerse en marcha y detenerse con rapidez y requiere poca vigilancia siendo sus costes de mantenimiento, por lo general, reducidos.

Desventajas

- Los costos de capital por kW instalado son con frecuencia muy altos.
- El emplazamiento, determinado por características naturales, puede estar lejos del centro o centros de consumo y exigir la construcción de un sistema de transmisión de electricidad, lo que significa un aumento de la inversión y en los costos de mantenimiento y pérdida de energía.
- La construcción lleva, por lo común, largo tiempo en comparación con la de las centrales termoeléctricas.
- La disponibilidad de energía puede fluctuar de estación en estación y de año en año.

Problema 1

¿Qué tipo de máquinas recomendaría para las siguientes aplicaciones?

- Generación eólica
- Generación mini-hidro
- Central hidroeléctrica
- Motor de correa transportadora
- Motor de disquetera de computador
- Motor de auto de juguete
- Grupo electrógeno
- Bomba de extracción de agua de pozo
- Molienda SAG

Problema 2

Dibuje las curvas torque velocidad de los siguientes motores:

- Motor CC conexión serie
- Motor CC conexión shunt
- Motor de inducción
- Motor sincrónico

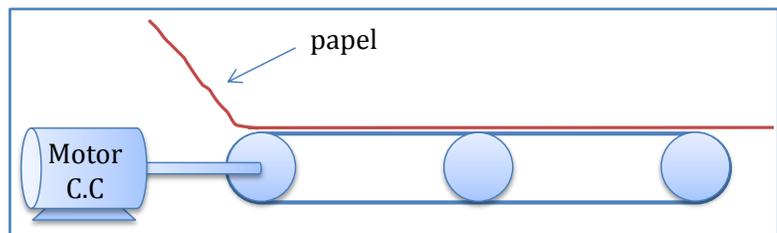
Problema 3

En una papelería se posee un motor C.C. conexión shunt para mover una correa transportadora. Este tipo de procesos necesita estar a una velocidad lo más constante posible para no romper el material. La velocidad de operación debe ser estrictamente 480[rpm].

La máquina, alimentada con 220[V], tiene una resistencia de armadura $R_a = 3,9[\Omega]$, una resistencia de campo $R_f = 452,6[\Omega]$ y una inductancia rotacional $G = 1,66[H]$.

El torque resistivo de la carga varía con respecto a la velocidad angular de giro de la forma:

$$T_R = 0,2 + 7 \cdot 10^{-2}\omega + 3 \cdot 10^{-3}\omega^2 \text{ [Nm]}$$



- Si la máquina operara sin ningún implemento extra:
 - ¿cuál sería la velocidad de operación en [rpm]?
 - ¿es recomendable utilizar de esta forma la máquina de acuerdo a las condiciones de operación?
 - ¿Cuál es el torque que debe entregar la máquina en esta condición de operación?
- Proponga un control reostático para lograr hacer funcionar correctamente la máquina:
 - Dimensione los implementos necesarios.
 - Calcule la eficiencia del sistema en este caso.
 - ¿Qué sucedería si por algún motivo se desconectaría el enrollado de campo? Responda analíticamente.