

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La aplicación más interesante de la inducción electromagnética es la obtención a escala industrial de energía eléctrica, tanto en corriente continua como en corriente alterna. Consideramos tan natural el consumo y disfrute de la energía eléctrica que raras veces nos preguntamos cómo se produce. Si no existiera el fenómeno de la inducción electromagnética, lo más probable es que la única fuente de nuestra electricidad fuera la pila de Volta.

1. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA. EXPERIENCIAS DE FARADAY Y HENRY.

Ya sabemos que una corriente eléctrica produce un campo magnético. A continuación veremos cómo, bajo ciertas condiciones, un campo magnético puede producir a su vez, una corriente eléctrica en un conductor. Este efecto se conoce con el nombre de inducción electromagnética.

La inducción electromagnética es el proceso mediante el cual se genera una corriente eléctrica en un circuito como resultado de “la variación de un campo magnético”.

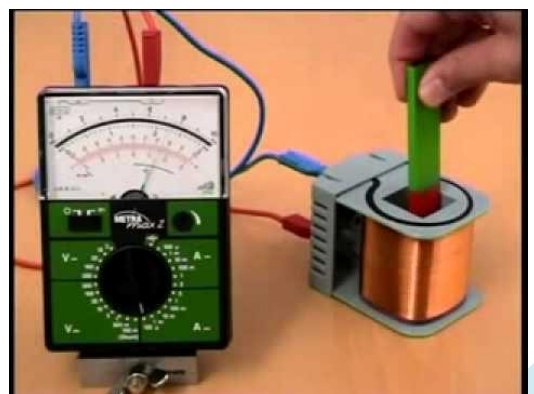
El fenómeno de la inducción fue descubierto por M. Faraday. Este científico estaba convencido de que un campo magnético es capaz de producir una corriente eléctrica. Durante años intentó, infructuosamente, conseguir dicha corriente a partir de un campo magnético constante. En 1832, tras una serie de experimentos, descubrió que para generar una corriente necesitaba un campo magnético variable. A continuación veremos los experimentos que le llevaron a conseguirlo.

1.1. EXPERIENCIA DE FARADAY

Supongamos que tenemos una espira unida a un galvanómetro, aparato que se utiliza para medir pequeñas corrientes eléctricas. Por este circuito no pasará corriente, puesto que no posee generador. El galvanómetro pues, marcará cero.

Si se aproxima un imán a dicho circuito observamos que:

- La aguja del galvanómetro se desvía, lo que indica el paso de una corriente.
- Cuanto más rápido es el movimiento del imán, mayor es la desviación de la aguja del galvanómetro.
- Si se detiene el imán en el interior de la espira, el galvanómetro vuelve a marcar cero.
- Si se aleja el imán, la aguja del galvanómetro se mueve de nuevo, pero en sentido contrario.



Faraday también comprobó que se produce el mismo efecto si dejamos inmóvil el imán y movemos la espira. Si se aproxima el polo sur del imán, también aparece corriente

eléctrica pero en sentido contrario a cuando se aproxima el polo norte. En el siguiente video verás en qué consistió el experimento de Faraday.
https://youtu.be/PT9bh_BrX9M

De esta experiencia se deducen las siguientes consecuencias:


1. Solo aparece corriente mientras hay movimiento relativo entre espira e imán.
2. La corriente cesa en el instante en el que cesa el movimiento.
3. La corriente cambia de sentido si se invierte el sentido de movimiento.
4. La corriente que aparece en la espira es producida por una fem (fuerza electromotriz) que recibe el nombre de **fuerza electromotriz inducida**.
5. La fem cambia de polaridad cuando se invierte el sentido del movimiento.
6. En la formación de las corrientes inducidas se distinguen dos elementos:
 - El inducido, que es el circuito donde aparece la corriente. En el video, la bobina.
 - El inductor, que es el agente productor del fenómeno: el imán.

1.2. EXPERIENCIA DE HENRY

Casi simultáneamente, y de manera independiente, el científico americano Joseph Henry descubrió que si un conductor de longitud ℓ se mueve perpendicularmente a sí mismo y a un campo magnético, se crea una diferencia de potencial entre los extremos del conductor. Esta diferencia de potencial origina una corriente si el alambre forma parte de un circuito cerrado.

Henry observó los siguientes hechos:

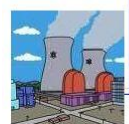
- Cuando el alambre se mueve a través del campo, el galvanómetro indica que hay corriente.
- Mientras el conductor se mueve hacia arriba, la corriente circula en un sentido. Pero si se mueve hacia abajo, la corriente tiene sentido opuesto.
- Si el alambre se deja quieto o se mueve paralelo al campo, no se induce corriente en el alambre. La corriente solo se induce si el alambre se mueve cortando las líneas de campo.



Bloque II
Interacción Electro magnética

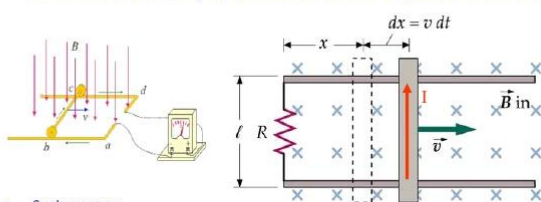
RESUMEN

Campo Eléctrico.
Campo Magnético.
Inducción Electromagnética.



Experiencia de Henry

- Casi simultáneamente, Henry descubrió que si un conductor de longitud ℓ se mueve perpendicularmente a un campo magnético se origina una d.d.p. en los extremos del conductor. Esta diferencia de potencial origina una corriente si el alambre forma parte de un circuito cerrado.



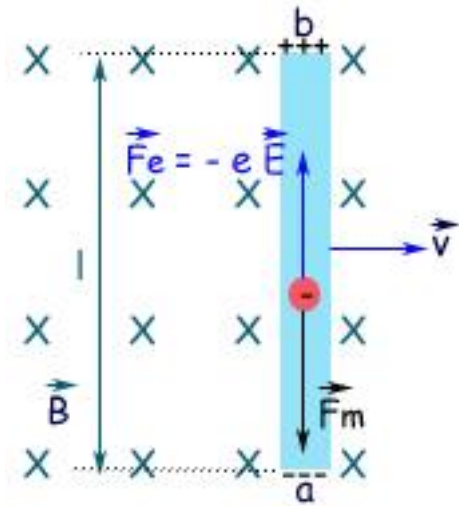
- Se observa que:
 - Cuando el alambre se mueve a través del campo, el galvanómetro indica que hay una corriente en el conductor.
 - Si cambiamos de sentido de movimiento, el sentido de la corriente cambia.
 - Si el alambre se deja quieto o se mueve paralelo al campo, no se induce corriente en el circuito.
 - Si el alambre está inmóvil y se mueve el campo magnético, aparece la corriente inducida.

Seminario de Física y Química
Curso 2007/2008

1.3. INTERPRETACIÓN DE LAS EXPERIENCIAS DE FARADAY Y DE HENRY.

Hay dos formas diferentes de explicar la aparición de las corrientes inducidas.

- Una primera interpretación consiste en considerar el fenómeno de la inducción electromagnética como una consecuencia de la ley de Lorentz; cuando una carga se mueve en un campo magnético, está sometida a una fuerza. Las cargas libres que existen en un conductor se mueven en el mismo sentido bajo la acción de esta fuerza, originándose la corriente inducida.



Esta hipótesis explica la experiencia de Henry. Supongamos un conductor de longitud l que se mueve en un campo magnético como se indica en la imagen.

Los electrones libres del conductor están sometidos a la fuerza: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$.

Esta fuerza hace que los electrones se muevan a lo largo del conductor, produciéndose una acumulación de carga negativa en el extremo inferior, con la consiguiente acumulación de carga positiva en el extremo superior. Como consecuencia de esta polarización de las cargas, se crea un campo eléctrico de intensidad: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \vec{v} \times \vec{B}$ o bien $|\vec{E}| = |\vec{v}||\vec{B}|\text{sen}\alpha$.

Este campo eléctrico es uniforme y origina una diferencia de potencial entre los extremos del conductor: $|\vec{E}| = \frac{V}{l}$ de donde $V = lvB\text{sen}\alpha$, siendo α el ángulo que forma la velocidad del conductor con el campo magnético. En el caso de que el conductor se mueva perpendicularmente al campo magnético, la diferencia de potencial inducida entre los extremos del conductor será máxima: $V=lvB$.

- Una segunda interpretación, más sencilla e intuitiva, es suponer que la causa de las corrientes inducidas es la variación del flujo magnético que atraviesa el plano del inducido. Recuerda que identificamos el flujo con el número de líneas de campo que atraviesan una superficie. En el caso del campo magnético el flujo viene dado por: $\Phi = \int \vec{B} \cdot \vec{dS} = \int B \cdot S \cdot \cos \alpha$, máximo si $\alpha=0$ y mínimo (nulo) si $\alpha=90^\circ$.

De la expresión anterior se deduce la unidad de flujo magnético, que en el SI recibe el nombre de **weber (Wb)**: $1 \text{ Wb}=1\text{T } 1\text{m}^2$

El flujo magnético, depende de tres factores: a) Es proporcional a la intensidad del vector campo magnético. b) Es proporcional al valor de la superficie S. c) Depende del ángulo que forman las líneas de campo con la normal a la superficie. Basta que cambie el valor de uno de esos factores para que haya variación de flujo.

2. LEY DE FARADAY-LENZ

Como consecuencia de los experimentos, se puede afirmar que la inducción electromagnética se basa en dos principios fundamentales:

- Toda variación de flujo que atraviesa un circuito cerrado produce en este la aparición de una fuerza electromotriz que da lugar a una corriente inducida.

- b) La corriente inducida es una corriente instantánea, pues solo dura mientras dura la variación de flujo.

La inducción electromagnética se rige por dos leyes:

- **Ley de Lenz:** nos da el sentido de la corriente inducida.
- **Ley de Faraday:** nos da el valor de dicha corriente.

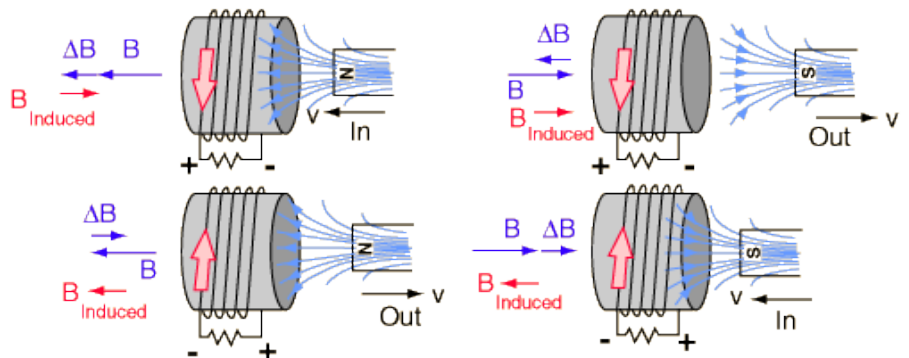
2.1. LEY DE LENZ

El sentido en que circula una corriente inducida fue determinado por primera vez en 1834 por el físico alemán H. Lenz. El resultado de su descubrimiento se conoce como ley de Lenz.

La corriente se induce en un sentido tal que los efectos que genera tienden a oponerse al cambio de flujo que la origina.

Es decir, **el flujo producido por la corriente inducida se opone a la variación del flujo inductor.** La ley de Lenz representa el principio de acción-reacción del electromagnetismo: el sentido de la corriente es tal que tiende a oponerse a la causa que la origina.

- Cuando el polo norte del imán se aproxima a la bobina, induce una corriente en ella que, a su vez, crea otro campo magnético. Este campo magnético inducido produce una fuerza que se



opone al movimiento del imán. El sentido de la corriente en la bobina debe ser tal que aparezca el polo norte de su campo frente al polo norte del imán que se aproxima. Para que esto ocurra, la corriente debe circular según se indica en la figura aplicando la regla de la mano derecha.

- Si el polo norte se aleja debe aparecer en la cara de la bobina un polo sur que tienda a oponerse a dicho alejamiento, y para ello la corriente de la bobina debe cambiar de sentido.

2.2. LEY DE FARADAY

Esta ley nos permite calcular el valor de la corriente inducida:

La corriente inducida es producida por una fuerza electromotriz (fem) inducida que es directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo inductor y al número de espiras del inducido.

La fem inducida se representa con la letra ε .

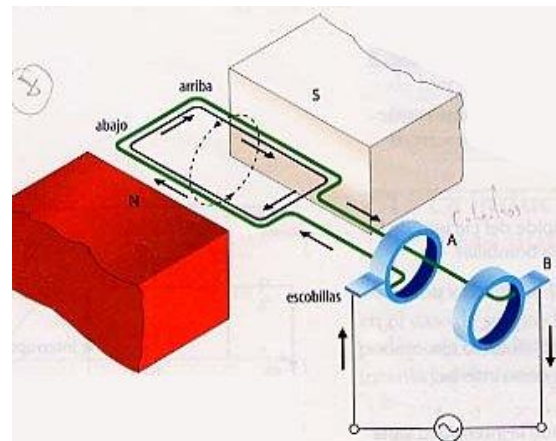
La forma matemática de la ley es: $\varepsilon = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, donde ε viene expresada en voltios, Φ en weber y t en segundos. N es el número de espiras del inducido.

Un flujo magnético que cambia con una rapidez de un weber por segundo, induce una fem de 1 voltio por cada vuelta del conductor.

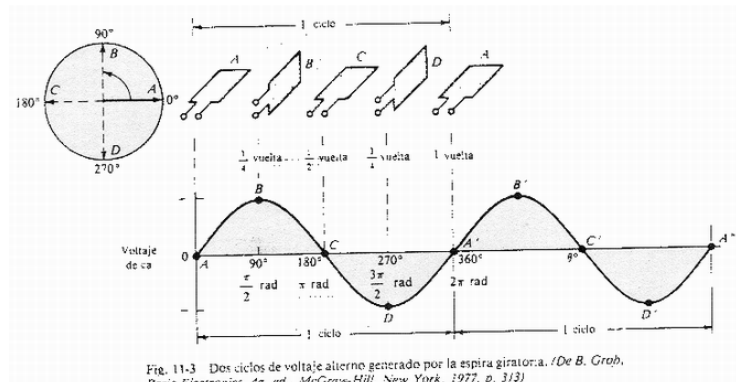
3. PRODUCCIÓN DE CORRIENTES ALTERNAS MEDIANTE VARIACIONES DE FLUJO MAGNÉTICO.

Una de las principales aplicaciones de la inducción electromagnética es la obtención de energía eléctrica a nivel industrial. La inducción electromagnética permite transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Los generadores industriales emplean bobinas que giran dentro de un campo magnético. Conforme giran, el flujo a través de dichas bobinas cambia y se origina en ellas una corriente eléctrica.

En su forma más simple, un generador de corriente alterna consta de una espira que gira por algún medio externo en un campo magnético. Tanto el campo como el área de la espira permanecen constantes. A medida que la espira gira, el flujo magnético a través de ella cambia con el tiempo, induciéndose una fem, y si existe un circuito externo, circulará una corriente. Los extremos de la espira están conectados a unos anillos colectores que giran con ella.



Supongamos que la espira gira con una velocidad angular constante ω . Si α es el ángulo que forman las líneas de campo magnético con la normal al plano de la espira en cualquier instante, el flujo magnético se puede escribir como: $\Phi = BScos\alpha = BScos(\omega t)$.



Según la ley de Faraday, la fem inducida en la espira será: $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -BS\omega sen(\omega t)$. La fuerza electromotriz que aparece en la espira es una función sinusoidal que cambia alternativamente de polaridad.

Si en lugar de una espira fuera una bobina de N espiras la que girase en el campo magnético, la fem inducida en cualquier instante sería N veces mayor:

$\varepsilon = NBS\omega \text{sen}(\omega t) = \varepsilon_m \text{sen}(\omega t) = \varepsilon_m \text{sen}(2\pi ft)$. ε_m , es el valor máximo de la fem inducida.

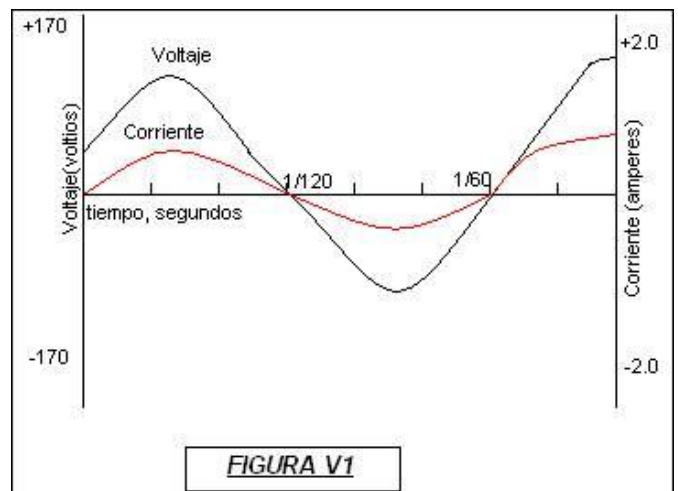
Para que un generador funcione hace falta una fuente externa de energía (hidráulica, térmica, nuclear...), que haga que la bobina gire con la frecuencia deseada. En Europa, la frecuencia de la corriente que nos suministran las compañías eléctricas es de 50 Hz. Esto quiere decir que la corriente cambia de sentido 100 veces cada segundo. Como esta variación es tan rápida, la intensidad de la luz que genera una bombilla aparenta ser constante.

3.1. Valores eficaces de la corriente alterna

Si el generador de corriente alterna está conectado a un circuito externo con una resistencia R, circulará por él una corriente de intensidad variable, que también es función sinusoidal del tiempo y cuyo valor en cada instante vendrá dado por la ley de Ohm.

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_m}{R} \text{sen}(\omega t) = I_m \text{sen}(\omega t)$$

Esta expresión nos recuerda la ecuación de un movimiento vibratorio, De hecho, la intensidad de una corriente alterna no consiste, como ocurre con la corriente continua, en un movimiento continuo y en el mismo sentido de los electrones a través del conductor, sino que se trata de vibraciones de pequeña amplitud de los electrones en el seno del conductor, es decir, es del tipo de un movimiento ondulatorio.



El hecho de que tanto la tensión como la corriente alternas dependan del tiempo presenta algunas dificultades.

- Si la tensión y la intensidad no son constantes, ¿cómo se puede decir que la tensión de nuestras viviendas es de 220 V?
- ¿Cómo es posible medir con un voltímetro o un amperímetro, la tensión y la intensidad en una corriente alterna? Si esos valores no son constantes, la aguja indicadora estaría oscilando continuamente.

Aunque la corriente continua y la alterna sean de distinta naturaleza, las dos producen el mismo efecto calorífico cuando pasan a través de una resistencia. Esa característica común nos permite definir los **valores eficaces** de la corriente alterna.

Matemáticamente, el valor eficaz o valor cuadrático medio de una magnitud física en un intervalo de tiempo es igual a la media cuadrática de los valores instantáneos que alcanza dicha magnitud en el intervalo.

Físicamente, el valor eficaz de una corriente alterna, tanto para la tensión como para la intensidad, se define como **el valor que debería tener una corriente continua para producir la misma cantidad de calor en el mismo tiempo y en la misma resistencia.**

Este valor eficaz viene a ser el 70% del valor máximo.

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_m}{0\sqrt{2}} \approx 70\%\varepsilon_m; I_e = \frac{I_m}{0\sqrt{2}} \approx 70\%I_m$$

Para medir la tensión e intensidad alternas no podemos utilizar voltímetros y amperímetros convencionales, que utilizan la fuerza que ejerce un campo magnético sobre una corriente para medir ésta. Para corriente alterna se utilizan voltímetros y amperímetros térmicos, los cuales nos dan los valores eficaces de la corriente. Ambos aparatos suelen ir integrados en uno llamado **multímetro**.

4. LA ENERGÍA ELÉCTRICA: IMPORTANCIA DE SU PRODUCCIÓN E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

La electricidad es la forma de energía más solicitada hoy en día por varias razones:

- Permite su transporte y distribución en fracciones de segundo.
- Puede transformarse fácilmente en energía mecánica y en energía térmica con muy pocas pérdidas de energía útil.
- Está disponible en todo momento en la red.
- Es una energía relativamente limpia, pues no produce residuos o contaminación, salvo en la generación y una pequeña parte de contaminación térmica en su consumo.

El consumo de energía eléctrica es un componente básico en el nivel de calidad de vida y es fundamental para el desarrollo industrial de un país.

4.1. Producción de energía eléctrica

A continuación se indican las fases que intervienen en la producción y distribución de energía eléctrica.

- Obtención:** La energía eléctrica se obtiene en una central eléctrica. Las compañías suministradoras utilizan grandes turbinas que pueden ser movidas por agua (central hidroeléctrica), o vapor de agua (central térmica o nuclear). Estas turbinas son las que hacen girar el alternador.
- Transporte.** El transporte se realiza a través de cables especiales llamados líneas de transmisión. Estas líneas de alta tensión (220 kV) conducen la electricidad desde la central hasta una subestación, que suele estar a la entrada de la población, donde se reduce la tensión.
- Distribución:** Desde la subestación parten líneas de tensión media (12 kV), hasta unos transformadores situados cerca de nuestras viviendas donde la tensión se reduce a 220 V. A partir de este punto las líneas de distribución suelen ser subterráneas.

4.2. TRANSFORMADORES DE LA TENSION Y LA CORRIENTE ELÉCTRICA.

Un transformador es un dispositivo utilizado para cambiar la tensión de la corriente alterna, y consiste en dos bobinas arrolladas al mismo núcleo de hierro, pero aisladas entre sí. Todo el flujo que pasa a través de una bobina (primario), conectada a una fuente de corriente alterna, pasa a través de la otra bobina (secundario).

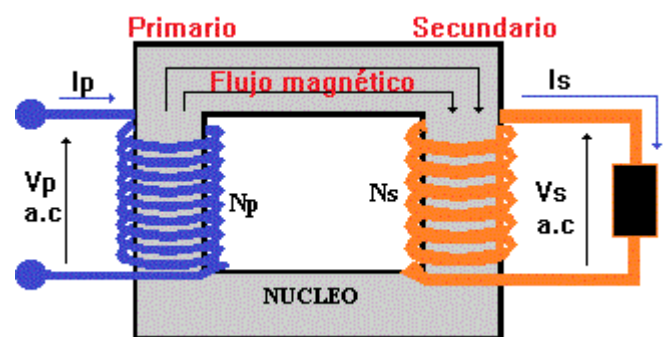
El flujo del campo magnético creado por la corriente variable de entrada en el interior de la bobina se conduce casi íntegramente a través del núcleo de hierro (ya que este tiene una permeabilidad magnética o capacidad de transmitir las líneas de campo muy superior a la del aire que lo rodea y, al ser variable, crea una corriente eléctrica inducida en la bobina del secundario, que es la corriente de salida. El valor de esta fem alterna es: $\varepsilon_s = -N_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, donde $\Delta\Phi$ es la variación del flujo producido en el primario por la tensión $\varepsilon_p = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Dividiendo miembro a miembro ambas expresiones se obtiene una primera ecuación del transformador, la cual relaciona la tensión en los bornes del primario y del secundario con el número de espiras.

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

Elijiendo adecuadamente la **razón de transformación** $\frac{N_s}{N_p}$, se puede obtener

en el secundario cualquier tensión que se desee para una tensión determinada del primario. Si la tensión del primario es mayor que la del secundario ($N_s < N_p$), el transformador se llama **reductor** o transformador de baja. Si ocurre lo contrario, el transformador es **elevador** o transformador de alta.



Si partimos del supuesto de que el transformador no consume energía, la potencia de entrada en el primario será igual a la potencia de salida en el secundario: $\varepsilon_p I_p = \varepsilon_s I_s$, de donde se deduce que la intensidad de la corriente es inversamente proporcional a la tensión.

Los transformadores son fundamentales en el transporte de la energía eléctrica. Normalmente entre la central eléctrica, donde está el generador y la fem inducida es de pocos voltios, y el lugar de consumo hay una distancia de varios cientos de kilómetros, perdiéndose energía en las líneas de conducción, de modo que si P es la potencia del generador, la potencia que llega al lugar de consumo será: $P' = P - RI^2$.

P es la potencia producida en el generador: eI y el segundo término, corresponde a las pérdidas en la línea de conducción por efecto Joule.

Para que la pérdida de energía sea mínima, el término RI^2 debe tener el mínimo valor posible. Esto se consigue utilizando conductores gruesos de poca resistencia y transportando la corriente a alta tensión de manera que la intensidad de la corriente sea muy pequeña. Esta solución es imposible aplicarla con corriente continua, ya que un generador de continua es incapaz de producir tensiones superiores a 4000 V y, además sería peligroso para el usuario utilizar esa tensión. Estos inconvenientes se evitan utilizando corriente alterna, ya que se puede producir a baja tensión y transportar mediante líneas de alta tensión, hasta 500000 V.

4.3. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Aunque la electricidad es la única energía que no produce ningún tipo de residuo, su producción y el sistema de transporte sí tienen incidencia sobre el medioambiente. El impacto sobre el medio ambiente de la producción eléctrica viene determinado por las materias primas empleadas: agua, carbón, fuel-oil, gas, uranio...

A-Centrales hidroeléctricas: Estas centrales aprovechan el desnivel existente en un tramo de río para producir energía eléctrica; su acción en el medio ambiente se deriva de la transformación de un sistema fluvial en otro lacustre.

El aprovechamiento energético del agua trae consigo una serie de transformaciones ocasionadas por la construcción de presas, embalses, canales, tuberías, etc, que modifican el curso natural de los ríos y el paisaje.

La alteración del cauce y el caudal de los ríos, la modificación del paisaje debido al movimiento de grandes masas de tierra durante la construcción, así como la creación de robustos muros de contención, son las principales alteraciones ecológicas de este tipo de centrales, a las que hay que añadir el peligro remoto de rotura de presas. Hay que tener en cuenta también que la construcción de un embalse exige, a veces, la ocupación e inundación de tierra de cultivo y, en ocasiones de algunas poblaciones o áreas de interés natural.

Frente a estos aspectos negativos, las centrales hidroeléctricas tienen multitud de ventajas:

- Emplean un recurso natural renovable.
- No modifican negativamente la cantidad y la calidad del agua. Al contrario, puede verse mejorada a consecuencia de la eliminación, por decantación, de materias sedimentadas, lo que permite la utilización del agua para el abastecimiento humano.
- Evita en muchos casos inundaciones.
- Permiten conservar el cauce mínimo de un río, incluso en épocas de estiaje.
- Un embalse contribuye, en ciertas zonas áridas, a embellecer el paisaje, permitiendo su utilización para fines deportivos: náuticos, natación, pesca...

B- Centrales térmicas: Estas centrales utilizan como materias primas combustibles fósiles como el carbón, el gas y el fuel-oil; por lo tanto, los efectos sobre el medio ambiente se derivan:

- De los residuos que se producen en la combustión de estos productos; del carbón sobretodo (óxidos de azufre, nitrógeno y carbono, así como partículas de polvo).
- Del tratamiento del agua que se transforma en vapor (vertidos químicos).
- De la refrigeración para condensar el vapor (contaminación térmica). Sólo se aprovecha el 30% del calor producido; el resto es calor residual y, por tanto, es absorbido por el medio ambiente.

Estos efectos son controlados en gran parte a través de diversas medidas: por lo que se refiere a los residuos de la combustión, instalando chimeneas de gran altura, inyectando caliza y otros aditivos, empleando precipitadores, etc. Por otro lado, la contaminación química del agua se evita mediante la depuración de las aguas residuales. En cuanto a la contaminación térmica, hoy día prácticamente ha desaparecido, pues la refrigeración se efectúa fundamentalmente en circuito cerrado, mediante torres de refrigeración.

C- Centrales nucleares: Son centrales termoelectricas en las que la fuente de calor es un reactor nuclear en lugar de una caldera convencional. Los efectos ambientales de estas centrales provienen del tipo de combustible, de la liberación de calor al medio ambiente y de los residuos nucleares.

Al ser el combustible nuclear, los efectos son radiológicos, debido a la emisión de radioisótopos. Dado que la radiactividad puede ser medida de forma fácil y precisa, se puede conocer en todo momento cuál es la radiactividad que sale de la central. La dosis de radiación que recibe el individuo más expuesto a través de todos los caminos de exposición debe ser siempre inferior a la permitida por la reglamentación vigente. En cuanto esta dosis experimenta un ligero aumento, la central se paraliza.

El impacto del calor liberado depende de las características de la fuente fría de refrigeración (río, lago, mar...). Para el caso típico de un río, la zona que sufre una elevación de la temperatura superior a 1°C por encima de la temperatura habitual es un rectángulo de medio kilómetro cuadrado. Los efectos ecológicos se limitan a esta zona.

Los residuos que genera una central nuclear son de poco volumen pero de alto poder contaminante debido a su actividad radiológica. Dicha actividad son tratados convenientemente con el fin de reducir su actividad por debajo de los límites establecidos por la ley para su posterior almacenamiento.

Incidencia del transporte de la energía eléctrica sobre el medio ambiente.

El transporte de la energía eléctrica mediante líneas de alta tensión afecta al medio ambiente de diversas formas:

- Impacto estético de las torres que componen la línea.
- Limitación de la explotación del terreno situado bajo las líneas.
- Impacto negativo sobre ciertas aves y especies arbóreas.
- El crecimiento de las ciudades ha motivado la existencia de redes de alta tensión en zonas habitadas. Se ha barajado la posibilidad de que el campo electromagnético creado bajo las líneas de alta tensión pueda generar algún efecto perjudicial para la salud, aunque este extremo no ha sido confirmado.