



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# Fundamentos de la generación de la electricidad

**Apellidos y nombre:** Velázquez Martí, Borja ([borvemar@dmta.upv.es](mailto:borvemar@dmta.upv.es))<sup>1</sup>

**Departamento/Centro:** <sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria  
Universitat Politècnica de València

## Índice general

<b>1. Resumen de las ideas clave</b>	<b>2</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>4. Fundamentos electromagnéticos del funcionamiento del generador eléctrico</b>	<b>3</b>
4.1. Concepto de campo eléctrico . . . . .	3
4.2. Concepto de campo magnético . . . . .	3
4.3. Flujo magnético . . . . .	5
4.4. Concepto de potencial eléctrico . . . . .	5
4.5. Principio de funcionamiento de un generador eléctrico: Ley de Faraday . . . . .	5
4.6. Campo magnético producido por un conductor rectilíneo . . . . .	6
4.7. Campo magnético producido por una espira conductora . . . . .	7
<b>5. Generadores eléctricos</b>	<b>8</b>
<b>6. Cierre</b>	<b>10</b>
<b>7. Bibliografía</b>	<b>10</b>

## 1 Resumen de las ideas clave

Este artículo tiene como objetivo definir los conceptos electromagnéticos básicos que rigen el funcionamiento de los generadores de energía eléctrica a partir de energía mecánica. Estas máquinas funcionan haciendo variar un campo magnético sobre conductores donde se produce una corriente inducida. Es por ello que antes de abordar el análisis de esta tecnología es necesario que se tengan claros los conceptos de campo eléctrico, campo magnético, flujo magnético; al tiempo de establecer las ecuaciones que permiten calcularlos a partir de una corriente en un conductor rectilíneo, o una corriente que circula por una o varias espiras. El movimiento de los conductores generará las variaciones de campo magnético, inductoras de variaciones de tensión en otros conductores (llamados inducidos) en a través de la ley de Faraday. En este documento se realiza la exposición de estas magnitudes físicas.

## 2 Introducción

Los generadores de energía eléctrica son dispositivos habitualmente utilizados en multitud de energías renovables tales como aerogeneradores, impulsados por el viento; turbinas hidráulicas; o motores de gas metano o gas producido por pirólisis de biomasa que pueden estar acoplados a los mismos proporcionando una energía esencial en el contexto tecnológico que vivimos.

Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Lo consigue gracias a la interacción de dos elementos principales que lo componen: la parte móvil llamada rotor, y la parte estática que se denomina estátor.

Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético (actúa como inductor) para que el otro lo transforme en electricidad (actúa como inducido).

Conocer los conceptos físicos involucrados y las formas de cálculo de los mismos es fundamental, y debe ser previo a poder abordar el diseño de estos equipos.

En las sucesivas secciones vamos a fijar estos conceptos de forma concisa, pero con la suficiente profundidad para poder abordar empresas más ambiciosas en el campo de la energía.

## 3 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento será capaz de:

1. Definir el concepto de campo eléctrico .
2. Explicar los conceptos de campo y flujo magnético
3. Demostrar el valor del campo magnético generado por una corriente que circula por un conductor rectilíneo
4. Demostrar la ecuación que permite calcular el campo magnético generado por una corriente que circula por una espira
5. Describir la inducción de electricidad en un alternador.
6. Describir la disposición de los elementos inductores e inducidos en el alternador.

## 4 Fundamentos electromagnéticos del funcionamiento del generador eléctrico

### 4.1 Concepto de campo eléctrico

Una carga estática  $q_1$  (sin movimiento) provoca una fuerza  $\vec{F}$  sobre otras cargas  $q_2$ , cuyo valor viene dado por la ley de Coulomb

$$\vec{F} = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

$d$  representa la distancia entre las dos cargas y  $K$  es una constante cuyo valor es  $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

Denominamos campo eléctrico  $\vec{E}$  a la fuerza ejercida por unidad de carga.

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}}{q_2} = K \cdot \frac{q_1}{d^2}$$

### 4.2 Concepto de campo magnético

Una carga en movimiento, además de provocar la fuerza asociada al campo eléctrico, provoca otra adicional según la Ley de Lorentz.

$$\vec{F} = q_1 \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

donde  $\vec{v}$  es la velocidad de la carga  $q_1$ .

Por tanto, se define un campo vectorial  $\vec{B}$  asociado a las cargas en movimiento que producen una fuerza perpendicular al mismo y al vector velocidad que posee la carga. A este campo se denomina campo magnético.

Dicho de otra forma, el campo magnético es un campo vectorial que afecta a cargas en movimiento, provocándoles una fuerza perpendicular al mismo y a su vector velocidad, cuyo valor será:

$$F = q_1 \cdot B \cdot \sin \theta$$

Este fenómeno lo poseen además materiales, que sin tener cargas en movimiento, provocan fuerzas de forma similar. Éstos son materiales magnéticos o imanes.

Por tanto, para que exista un campo magnético debe existir una fuente de energía magnética (como un imán), una carga en movimiento, o una corriente eléctrica (muchas cargas en movimiento). Estos elementos son los únicos capaces de crear un campo magnético y los únicos que pueden ser afectados por él.

La unidad de campo magnético en el Sistema Internacional es el tesla (T). Un tesla se define como el campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (newton) sobre una carga de 1 C (culombio) que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de campo.

Si una partícula cargada se mueve a través de una región en la que coexisten un campo eléctrico y uno magnético, la fuerza resultante está dada por:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q_1 + q_1 \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

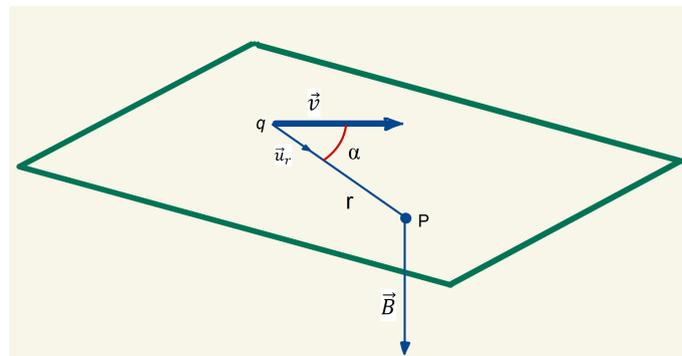
El campo que genera una carga puntual en movimiento puede ser calculada como

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q_1 \vec{v} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

Donde,

- $q_1$  es la carga creadora del campo
- $\vec{v}$  es la velocidad de dicha carga
- $r$  es la distancia desde el punto donde se encuentra la carga hasta el punto P, donde se está calculando el campo
- $\vec{u}_r$  es un vector unitario que va desde el punto donde se encuentra la carga hacia el punto donde se calcula el campo
- $\mu_0$  es una constante denominada permeabilidad magnética del vacío. Su valor en el Sistema Internacional es  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m/A}$

La dirección y el sentido del campo  $\vec{B}$  vienen dados por la regla de la mano derecha, y su módulo es el módulo del producto vectorial (Figura 1).



**Figura 1:** Dirección del campo magnético  $\vec{B}$  generado en un punto P por una carga en movimiento

El campo magnético provocado por una corriente eléctrica que circula por un conductor se obtiene de la ley de Biot-Sabart. Si definimos  $\vec{v}$  como la velocidad de desplazamiento de las cargas, y  $d\vec{l}$  como un diferencial de longitud del conductor, tenemos que:

$$\vec{v}_1 = \frac{dl}{dt} \rightarrow \vec{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q_1 \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{dt \cdot r^2}$$

La variación de carga por unidad de tiempo se define como la intensidad de corriente  $I = \frac{dq}{dt}$ , por tanto:

$$\vec{B}_1 = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

### 4.3 Flujo magnético

El flujo magnético es una medida del campo magnético total que pasa a través de un área dada. La unidad de flujo magnético es el weber. Se calcula como

$$\Phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

### 4.4 Concepto de potencial eléctrico

Se define como diferencia de potencial o tensión eléctrica ( $V = V_2 - V_1$ ) la energía en un desplazamiento por unidad de carga, midiéndose en voltios.

$$W = \int_s \vec{F} \cdot d\vec{l} = (V_2 - V_1) \cdot q$$

La potencia se puede escribir como

$$N = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} = \int \vec{E} \cdot q \cdot \frac{d\vec{l}}{dt} = V \cdot I$$

De ahí se demuestra que la diferencia de potencial se puede definir como

$$V = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

### 4.5 Principio de funcionamiento de un generador eléctrico: Ley de Faraday

La Ley de Faraday pone de manifiesto que la variación del flujo magnético en un conductor (lineal o espira) produce un el voltaje inducido proporcional a dicha variación. Esto significa que si dentro de un campo magnético introducimos una espira y la hacemos girar, a causa de la variación del flujo magnético provocaremos la corriente inducida que la podemos hacer circular por un circuito.

Matemáticamente la Ley de Faraday puede expresarse como:

$$V_e = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_c \vec{B} \cdot ds$$

Por la ley de la divergencia se puede escribir como:

$$\Delta \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

- $\vec{E}$  es el campo eléctrico
- $d\vec{l}$  es el elemento infinitesimal de longitud del circuito representado por el contorno C,
- $\vec{B}$  es el campo magnético,
- $S$  es una superficie arbitraria, cuyo borde es C. Las direcciones del contorno C y de  $d\vec{S}$  están dadas por la regla de la mano derecha.

$$V_{\epsilon} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Donde

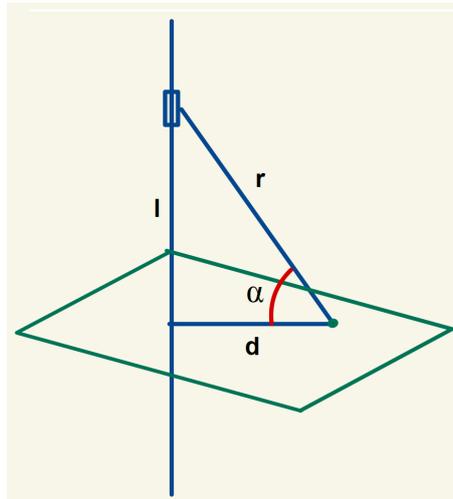
$V_{\epsilon}$  es la tensión inducida o fuerza electromotriz inducida,

$\frac{d\Phi}{dt}$  es la tasa de variación temporal del flujo magnético  $\Phi$ . El sentido de la tensión inducida (el signo negativo en la fórmula) se debe a la ley de Lenz.

$N$  es el número de espiras

#### 4.6 Campo magnético producido por un conductor rectilíneo

Utilizamos la ley de Biot para calcular el campo magnético  $\vec{B}$  producido por un conductor rectilíneo indefinido por el que circula una corriente de intensidad  $i$  (Figura 2).



**Figura 2:** Distancia de un elemento diferencial de longitud al punto donde se desea calcular el campo magnético

$$\vec{B} = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{dl \cdot \sin \theta}{r^2}$$

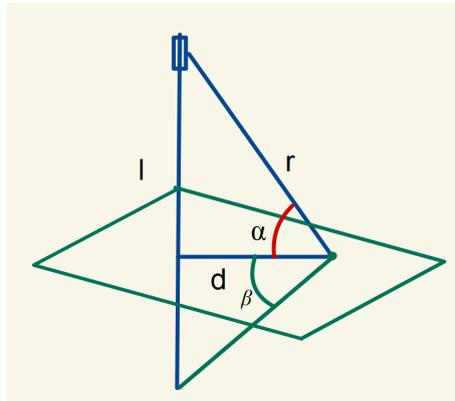
$$r = \frac{d}{\cos \alpha} \quad l = \tan \alpha \cdot d \quad dl = \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot d$$

$$\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot d \cdot \sin \alpha}{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha}} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\sin \alpha}{d} d\alpha$$

$$\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi d} I$$

Si el conductor es finito, se adecuan los límites de integración (Figura 3),

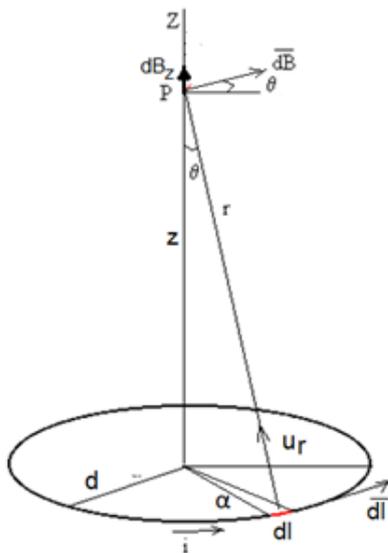
$$\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi d} I \cdot \int_{-\beta}^0 \sin \alpha + \int_0^{\alpha} \sin \alpha = \frac{\mu}{4\pi d} I \cdot (\cos \alpha + \cos \beta)$$



**Figura 3:** Límites de integración en un segmento de conductor definido por donde circula una corriente de intensidad  $i$

#### 4.7 Campo magnético producido por una espira conductora

Si partimos de la representación de la Figura 4, se tiene que como  $d\vec{l}$  y  $\vec{u}_r$  son perpendiculares,



$$d\vec{B}_z = dB \cdot \sin \theta = dB \cdot \frac{d}{\sqrt{z^2 + d^2}}$$

$$d\vec{B}_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2} \cdot \frac{d}{\sqrt{z^2 + d^2}}$$

Como  $dl = d \cdot d\alpha$  y  $r = \sqrt{z^2 + d^2}$ ,

$$dB_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d \cdot d\alpha}{z^2 + d^2} \cdot \frac{d}{\sqrt{z^2 + d^2}}$$

$$B_z = \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d \cdot d\alpha}{z^2 + d^2} \cdot \frac{d}{\sqrt{z^2 + d^2}} = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I \cdot d^2}{(z^2 + d^2)^{3/2}}$$

Tenemos el valor del campo magnético en el centro de la espira, que sigue la dirección  $z$ .

**Figura 4:** Campo magnético generado por una espira

## 5 Generadores eléctricos

Los generadores eléctricos se diferencian según el tipo de corriente que producen. Así, nos encontramos con dos grandes grupos de máquinas eléctricas rotativas: los alternadores y las dinamos.

Los alternadores generan electricidad en corriente alterna. El elemento inductor es el rotor y el inducido el estátor. Un ejemplo son los generadores de las centrales eléctricas, las cuales transforman la energía mecánica en eléctrica alterna.

Las dinamos generan electricidad en corriente continua. El elemento inductor es el estátor y el inducido el rotor. Un ejemplo lo encontraríamos en la luz que tiene una bicicleta, la cual funciona a través del pedaleo.

El rotor se monta en un eje que descansa en dos rodamientos o cojinetes. El espacio de aire que separa el estátor del rotor, necesario para que pueda girar la máquina, se denomina entrehierro. Como se ha dicho, el principio de funcionamiento de los generadores se basa en el fenómeno de inducción electromagnética según la Ley de Faraday.

Esta ley pone de manifiesto que a la variación del flujo magnético en un conductor o espira produce un voltaje inducido proporcional a la misma. Esto significa que si dentro de un campo magnético introducimos una espira y la hacemos girar, a causa de la variación del flujo magnético provocaremos la corriente inducida que la podemos hacer circular por un circuito.

$$V_{\epsilon} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Donde  $V_{\epsilon}$  es la tensión inducida o fuerza electromotriz inducida;  $\frac{d\Phi}{dt}$  es la tasa de variación temporal del flujo magnético  $\Phi$ . El sentido de la tensión inducida (el signo negativo en la fórmula) se debe a la ley de Lenz.

En el alternador, al hacer girar un imán alrededor de unas espiras conseguiremos una tensión que variará en función del tiempo. Esta tensión tendrá una forma alterna, puesto que al variar el ángulo del imán se mueven las líneas de campo dentro de las espiras, modificándose también el voltaje. En las posiciones de  $180^{\circ}$  y  $360^{\circ}$  los polos estarán invertidos uno respecto a otro.

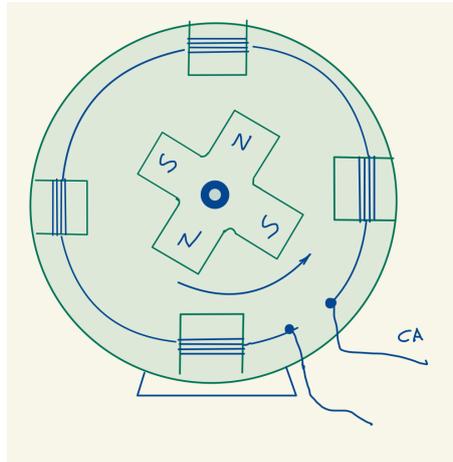
Para entender el fenómeno de la inducción es importante tener claros los conceptos de campo magnético y flujo magnético.

La mayoría de alternadores son máquinas de corriente alterna síncrona, es decir, la rotación del eje está sincronizada con la frecuencia de la corriente producida; el período de rotación es exactamente igual a un número entero de ciclos de corriente alterna. Esta relación viene dada por la expresión:

$$n \cdot p = 60 \cdot f$$

Donde  $f$  es la frecuencia a la cual está conectada la máquina y  $p$  es el número de pares de polos.

Su estructura es la siguiente:

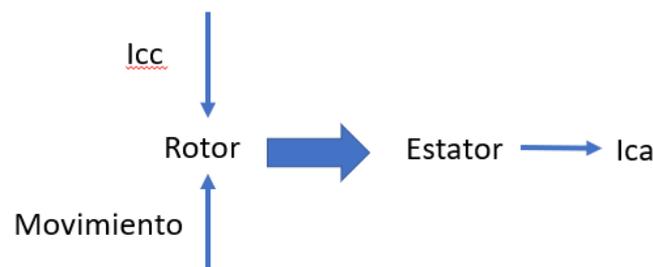


**Figura 5:** Estructura de un alternador

El alternador se construye generalmente colocando la parte fija (estátor) unida a la carcasa metálica que sirve de soporte. En su cara interior se colocan núcleos de hierro con ranuras longitudinales donde se alojan los conductores que conforman el enrollamiento inducido.

El rotor, que gira dentro del estátor, contiene el sistema inductor formado por electroimanes alimentados con corriente continua. Para construir los electroimanes el eje del rotor presenta también unos núcleos de hierro donde otros conductores se enrollan conectados al alimentador de corriente continua por unos los anillos de rozamiento.

Por lo tanto su diagrama de funcionamiento es el siguiente:



**Figura 6:** Esquema de energía entrante y saliente de un alternador

Para obtener la corriente continua inicialmente se utiliza una dinamo para el arranque, pero posteriormente una parte de la energía eléctrica producida se rectifica para la alimentación del inductor.

En función de la velocidad de la máquina hay dos formas constructivas.

- Rotor de polos salidos o rueda polar: Utilizado para turbinas hidráulicas o motores térmicos, para sistemas de baja velocidad.
- Rotor de polos lisos: Utilizado para turbinas de vapor y gas, estos grupos son llamados turboalternadores. Pueden girar a 3000, 1500 o 1000 r.p.m. en función de los polos que tenga.

Aspectos claves en el diseño de un alternador que proporcionan una potencia  $N_e$  son determinar:

- Cual en la potencia eléctrica a suministrar con corriente continua
- Cual es la potencia mecánica, velocidad de rotación y par que interviene en el proceso
- Cantidad de hierro que precisa cada polo de los inductores y de los inducidos.
- Número de espiras en cada polo inductor e inducido
- Cual debe ser la sección de los cables
- Disposición de la toma de tierra, diferencial y seccionadores del circuito de inducción en caso de derivación eléctrica.

## 6 Cierre

Con las ecuaciones desarrolladas podemos determinar el campo y el flujo magnético generados por un conductor rectilíneo por donde pasa una corriente eléctrica de intensidad  $i$ . También podemos calcular el campo y el flujo magnético generados por una espira conductora.

La variación del campo magnético se consigue mediante el movimiento electroimanes en el espacio, provocando una tensión inducida en espiras formadas por conductores, y por ende una corriente eléctrica.

Se ha descrito la disposición de los elementos inductores e inducidos en el alternador.

Como ejercicio de autoevaluación, se propone a los alumnos que expongan de forma autónoma las ecuaciones descritas.

## 7 Bibliografía

Fowler, R. J. (1994). Electricidad principios y aplicaciones. Reverté.

Moragues, J., Rapallini, A. (2003). Energía eólica. Instituto Argentino de la Energía, General Mosconi, 22.

Tipler, P. A., Mosca, G. (2004). Física para la ciencia y la tecnología. I (Vol. 1). Reverté.