

Nociones Básicas de Campos Magnéticos y Ondas

Jean
Mogrovejo



Nociones Básicas de Campos Magnéticos y Ondas

Mgtr. Jean Andre Mogrovejo Bucheli



Tecnológico Universitario EuroAmericano

DIRECCIÓN:
Quisquis 1317 y Los Ríos
Guayaquil – Guayas - Ecuador
(+593) 04-2288-440
www.euroamericano.edu.ec

RECTOR:
Mgtr. Antonio Marques Firmino

AUTOR:
Mgtr. Jean Andre Mogrovejo Bucheli

CORREO:
jmogrovejo@euroamericano.edu.ec

Primera Edición – marzo 2023
Editorial “R2ICS” | Pichincha | Quito | Ecuador



Datos de catalogación bibliográfica

MOGROVEJO-BUCHELI, J.
Nociones Básicas de Campos Magnéticos y Ondas
Primera Edición
Quito, Ecuador, 2023
Editorial: Red Internacional de Investigación en Ciencias
Sociales y Humanidades “R2ICS”

ISBN: 978-9942-7125-0-9
Área: Física
Formato A5: 148 x 210 mm Páginas: 172

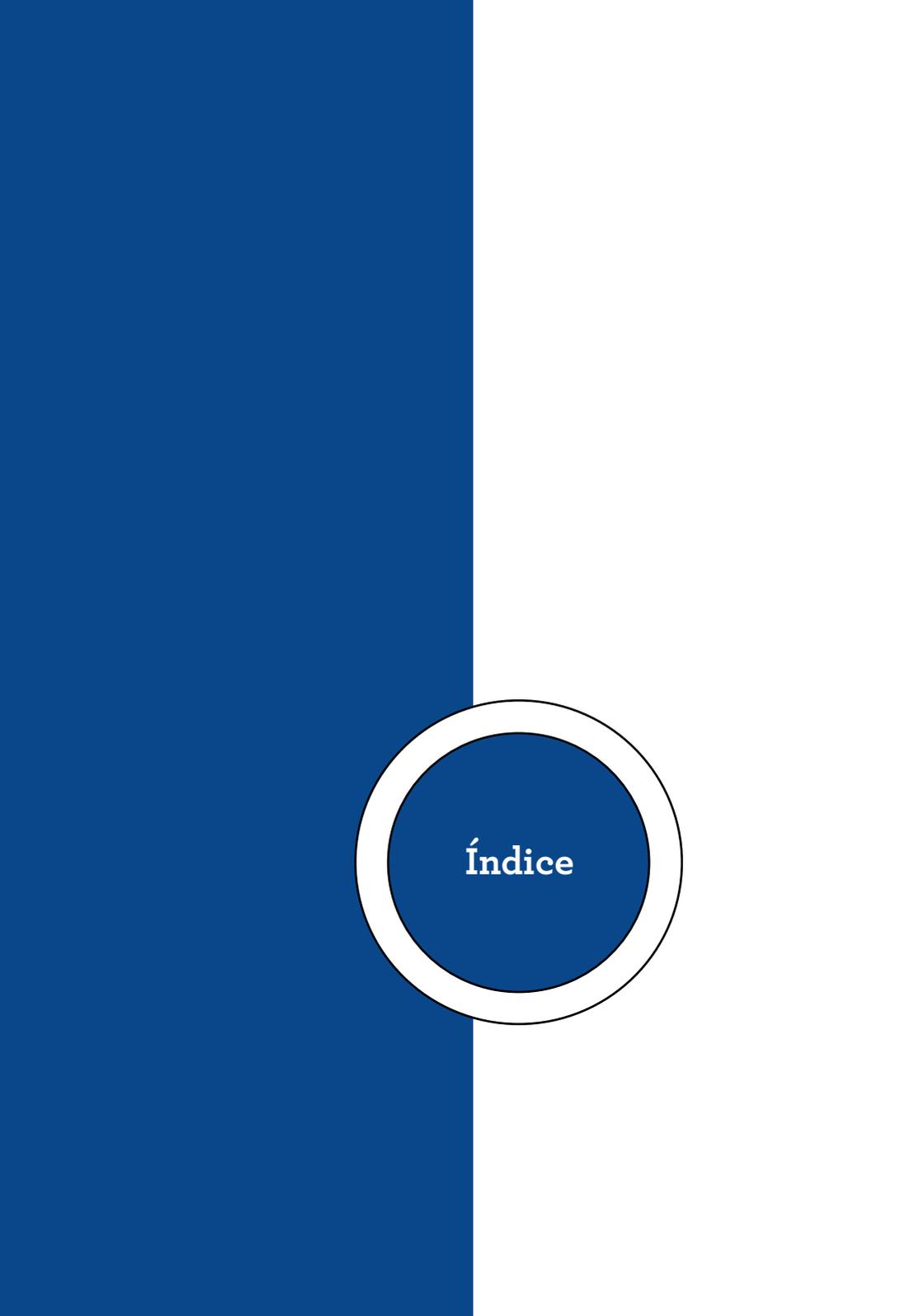
ISBN: 978-9942-7125-0-9



9789942712509

Diseño y maquetación R2ICS

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación puede reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor. El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del autor o de sus representantes.
Conforme lo establece el Art. 71 y 72 del Reglamento de Carrera y Escalafón del Profesor e Investigador del Sistema de Educación Superior (Codificación), este texto ha sido sometido a un proceso de revisión de pares disciplinares así como la revisión metodológica. El detalle en anexo evaluación de pares.



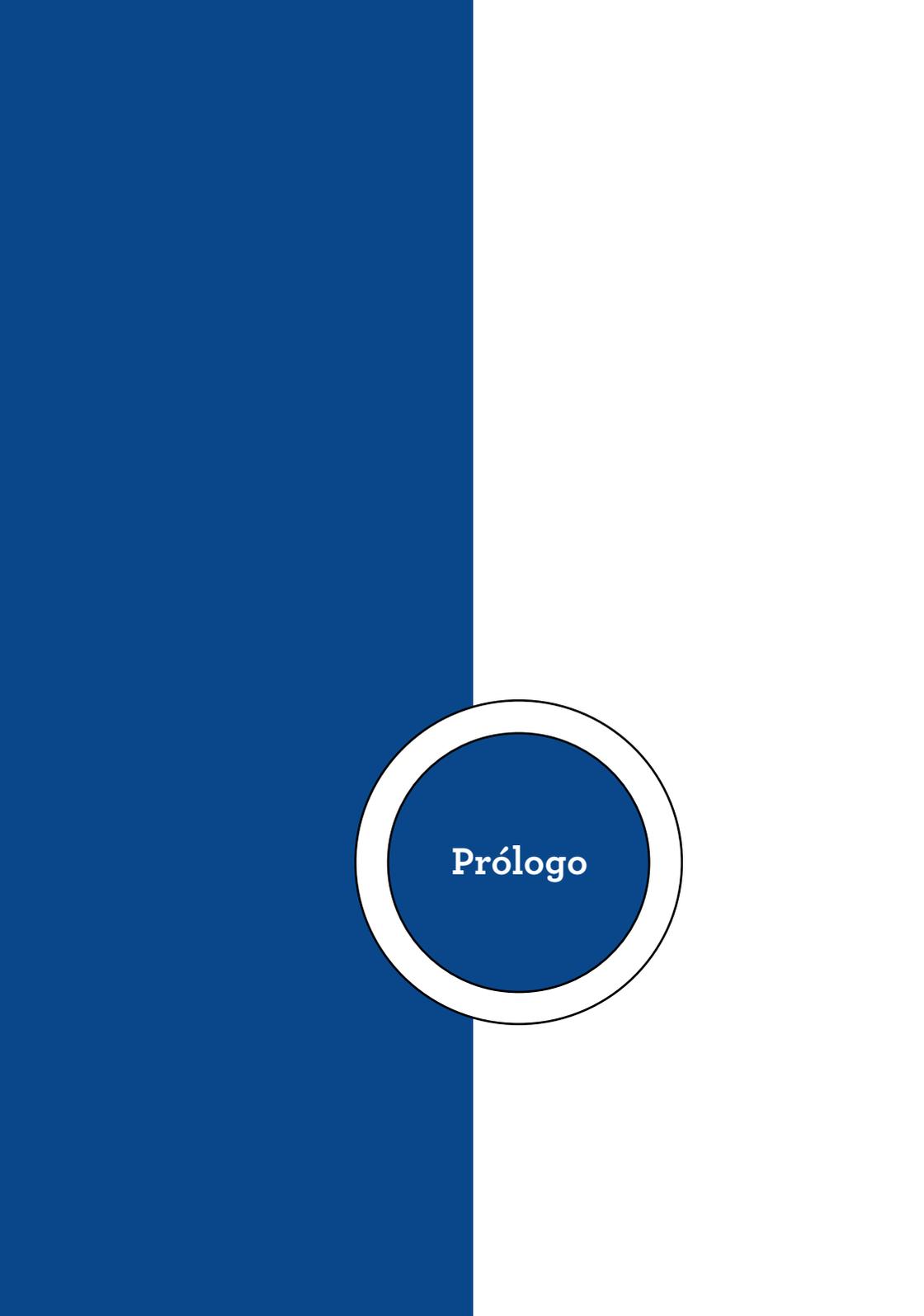
Índice

Contenido

Prólogo	13
Introducción	17
Capítulo 1	19
Electrostática en el Vacío y Conductores	21
Introducción a la Electrostática en el Vacío	23
Introducción	23
Electrostática.....	27
Conceptos Varios: Carga Neta, Electricidad Estática Estacionaria.....	27
Carga Neta.....	27
¿Qué es Electricidad Estática?.....	28
Carga Estática	29
Carga Estacionaria	30
Carga Puntual	31
Carga de Prueba	32
Ley de Coulomb.....	32
¿Qué es la Ley de Coulomb?	32
Campo Eléctrico.....	39
Campo Eléctrico Creado por una Distribución Puntual de Cargas	43
Campo Eléctrico Creado por una Distribución Continua de Cargas	44
Capítulo 2	47
Electrostática en el Vacío	49
Potencial Electroestático.....	50
Superficies Equipotenciales	53
Ángulo Sólido	55
Ángulo Sólido Bajo el que se ve una Superficie S Desde un Punto	59
Ángulo Sólido Bajo el que se ve una Superficie Cerrada Desde un Punto Exterior al Volumen Encerrado por la Superficie	63
Ley de Gauss.....	65
Campo Creado por un Plano Infinito	66
Campo en el Interior de un Condensador	68
Comportamiento de Conductores en el Campo Eléctrico Estático	70
Propiedades de los Conductores en Equilibrio Electroestático	74
Pantalla Electroestática.....	74
Perturbaciones de Alta Frecuencia a Través de los Transformadores.....	76
Función de las Pantallas Electroestáticas en Transformadores de Aislamiento (TDA).....	78
Apantallamiento Sencillo	78
Doble Apantallamiento	79
Triple Apantallamiento	80
Capítulo 3	83
Frontera Entre Conductores y el Vacío	85
Forma Diferencial de la Ley de Gauss.....	86
Forma Diferencial de la Ley de Gauss.....	86
Forma Integral de la Ley de Gauss	87

Ecuación de Poisson y Laplace	88
Dieléctricos	90
Aplicaciones.....	92
Dipolo Eléctrico	93
Dipolo Eléctrico	94
Dipolo Puntual	95
Conductores y Dieléctricos	98
Dieléctricos como Distribuciones de Dipolos. Polarización	101
Campo Creado por una Distribución de Dipolos Puntuales	104
Carga Latente de Polarización	108
Ley de Gauss para Dieléctricos	110
Rigidez Dieléctrica	113
Capítulo 4.....	115
Campo de Corriente Estacionaria y Magnetostática en el Vacío	117
Campo de Corriente Estacionaria	118
Fuerza Magnética.....	118
Sobre una Carga en Movimiento	118
Sobre una Distribución de Corriente.....	119
Campo Magnético Debido a una Corriente	120
Aplicaciones.....	121
Fuentes del Campo Magnético.....	122
Ley de Gauss para el Campo Magnético	123
Ley de Ampère.....	124
Ecuaciones de la Magnetostática	125
Aplicaciones.....	125
El Potencial Vector Magnético.....	127
Desarrollo Multipolar Magnético	128
Dipolo Magnético	130
Magnetostática	132
Historia del Electromagnetismo.....	132
Inducción Electromagnética.....	135
¿Qué es la Inducción Electromagnética?.....	135
Experimento de Faraday	138
Otras Aplicaciones de la Inducción Electromagnética.....	141
Cocina de Inducción	141
Hornos Industriales de Inducción	141
Lámparas de Inducción.....	142
Recarga de Teléfonos Móviles por Inducción.....	142
Corriente o Dipolo Magnético o Magnetización	143
¿Qué Significa la Magnetización?	143
Propiedades Magnéticas.....	144
¿Cómo Funciona la Magnetización?.....	145
Definición.....	146
Unidades	147
Valores Típicos.....	147
Tipos o Mecanismos de Magnetización.....	148
Diamagnetismo	149

Materiales Diamagnéticos.....	150
Paramagnetismo	151
Causa del Paramagnetismo	153
Algunos Materiales Paramagnéticos	154
Ferromagnetismo	154
Materiales Ferromagnéticos.....	155
Antiferromagnetismo	156
Descubrimiento	159
Ferrimagnetismo	160
Referencias Bibliográficas	165



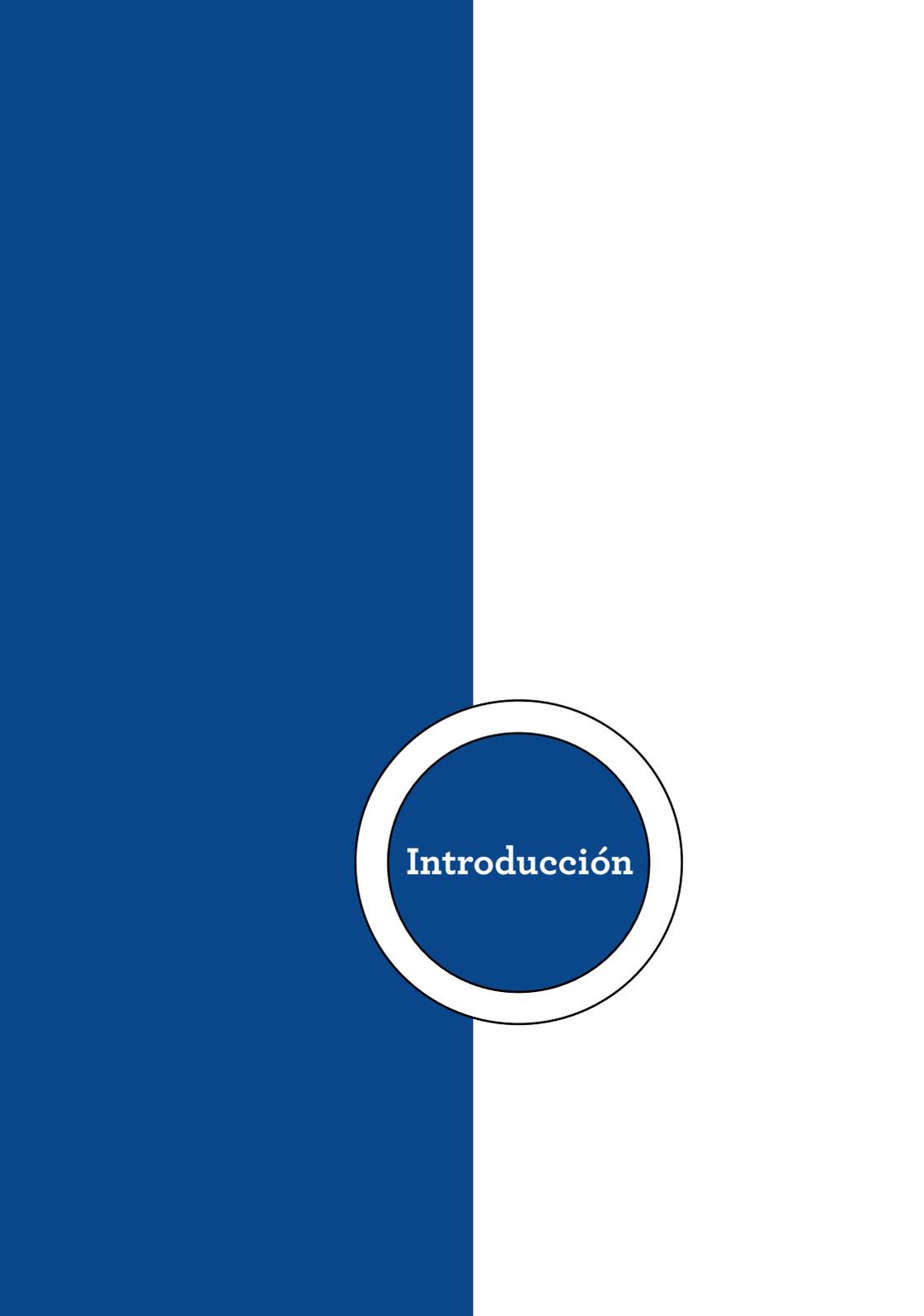
Prólogo

Prólogo

Como lo indica el título, el objetivo de Nociones Básicas de Campos Magnéticos y Ondas es proporcionar a los estudiantes de especializaciones en redes, telecomunicaciones, informática, electrónica y en otros campos afines, una descripción didáctica general de numerosas aplicaciones de los campos magnéticos y las ondas.

Antes de que un pedagogo de ciencias poco conocido de la Universidad de Copenhague, Dinamarca, Hans Christian Oersted en 1980, en su casa realizara una demostración científica para sus amigos y estudiantes, con el fin de demostrar el calentamiento de un hilo por una corriente eléctrica y también realizar las demostraciones sobre el magnetismo, el único magnetismo del cual se conocía en esa época, era el del hierro. Hoy en día, sin embargo, nos encontramos rodeados por distintos campos magnéticos y todo tipo de ondas, que son creados de forma artificial por el hombre, es debido a esto que se ha vuelto una necesidad para las personas, poseer los conocimientos apropiados para comprender como se generan y poderlos aplicar en las diferentes áreas.

Cuando comencé a impartir la materia, los conocimientos de los estudiantes sobre los temas que se abordaran eran nulos, debidos a que, muchos de los temas de los cuales se hablara pertenecían al área de física, y solo se impartía en colegios privados. Ahora algunos de los conocimientos que se adquirían en los colegios privados, son impartidos en los Tecnológicos Superiores - Universitarios y también como materias en las Universidades.



Introducción

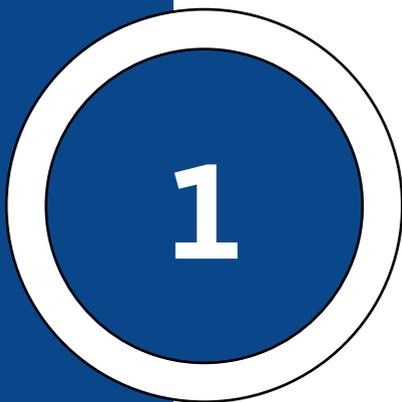
Introducción

El presente texto, “Nociones Básicas de Campos Magnéticos y Ondas” presenta un nivel de conocimiento que irá de lo básico a lo intermedio, debido que se abordarán temas fundamentales hasta temas más técnicos. Durante el desarrollo del texto, los estudiantes aprenderán diferentes temas relacionados con la electrónica y las comunicaciones. El texto se centra en los conceptos relacionados a la parte electrónica, los cuales les servirán para tener las nociones de cómo se realizan las comunicaciones usando las ondas.

Nociones Básicas de Campos Magnéticos y Ondas, se encuentra dividido en cuatro capítulos, el primer capítulo “Electrostática en el Vacío y Conductores”, se aborda temas como la introducción a la electrostática en el vacío, los conceptos de carga neta, electricidad estática estacionaria, la Ley de Coulomb, el campo eléctrico, el campo eléctrico creado por una distribución puntual de cargas y el campo eléctrico creado por una distribución continua de cargas.

En el capítulo dos “Electrostática en el Vacío”, se estudia sobre el potencial electrostático, las superficies equipotenciales, el ángulo sólido, la Ley de Gauss, el comportamiento de conductores en el campo eléctrico, estático y la pantalla electrostática. En el tercer capítulo “Frontera entre Conductores y el Vacío” se verá la forma diferencial de la Ley de Gauss, la ecuación de Poisson y Laplace, los dieléctricos y el dipolo eléctrico.

El capítulo final “Campo de Corriente Estacionaria y Magnetostática en el Vacío”, aborda los temas de Campo de Corriente Estacionaria, Magnetostática, Inducción Electromagnética, Corriente o Dipolo Magnético o Magnetización y Tipos o Mecanismos de Magnetización.



Capítulo 1

Electrostática en el Vacío y Conductores

Figura 1

Electricidad: Electroestática y Electrodinámica



Fuente: (Elizabeth Morales, 2012)

Nota: Visualización de la electricidad.

Objetivos

Al terminar este capítulo podrá:

1. Saber y explicar ¿Qué es la electrostática en el vacío?
2. Tener conocimiento y decir ¿Qué es la carga neta?
3. Entender y manifestar ¿Qué es electricidad estática?
4. Dominar y detallar ¿Qué es carga estática y estacionaria?
5. Saber y explicar ¿Qué es carga puntual?

6. Tener conocimiento y decir ¿Qué es la carga de prueba?
7. Estar informado y describir ¿Qué es la ley de coulomb?
8. Dominar y detallar ¿Qué es un campo eléctrico?
9. Dominar y detallar ¿Qué es un campo eléctrico creado por una distribución puntual de cargas?
10. Dominar y detallar ¿Qué es un campo eléctrico creado por una distribución continua de cargas?

Introducción a la Electroestática en el Vacío

Introducción

Cuando se empezó con la interpretación de los fenómenos naturales, se mostró que su explicación era imposible, solo si considerábamos las fuerzas de tipo gravitatorio, envista que, se volvían inexplicables los fenómenos como los elásticos, de tensión superficial, presión de vapor y otros muchos, todo debido a que, las fuerzas gravitatorias resultaban demasiado pequeñas n varios órdenes de magnitud. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

Por otra parte, y aun si no consideramos la discrepancia cuantitativa existente, cuando intentemos describir los fenómenos moleculares, se nos volverá imposible comprender que existen fuerzas repulsivas presentes entre las partículas a nivel molecular, si aplicamos sólo los conceptos adquiridos que son útiles en el estudio de los fenómenos gravitatorios. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

En función a lo explicado en los párrafos previos, es que se vuelve necesario requiere de otro tipo de fuerzas mayor, que posea magnitudes mayores, que nos permitan representar estas interacciones, y estas no son otras que las fuerzas de origen eléctrico y magnético. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

Es muy posible que ya no lo recordemos, pero se dice y es muy probable que, nuestro primer contacto con los

fenómenos de tipo eléctrico, se produjera, cuando en la escuela se nos solicitó realizar el experimento de frotar un bolígrafo o una pluma sobre nuestro jersey, y que, observáramos como eran atraídos con él, pedacitos de papel, en ese entonces estábamos, sin saberlo aún, realizando una experiencia denominada triboelectricidad (electricidad por frotamiento), que de igual manera es probablemente, la primera forma en la que la humanidad puso de manifiesto la existencia de cargas eléctricas y por supuesto también sería normalmente la primera vez que tendríamos la oportunidad de pensar en la existencia de un campo de fuerzas. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Al estudiar sobre la electrostática, podremos ordenar las ideas sobre fenómenos conocidos, por un lado, comprenderemos la existencia de fuerzas que para manifestarse, no requieren del contacto, y por otro parte, sabremos sobre la naturaleza eléctrica de la materia. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Ahora está más que claro, desde niños ya estábamos acostumbrados a la existencia de la fuerza gravitatoria y sin tener conocimiento alguno de ellas, todo debido al simple hecho de que estas están totalmente ligada a nuestra vida desde que nacemos, y no nos sorprende que las cosas abandonadas en el aire tiendan a caer. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Si recordamos la experiencia vivida con los trocitos de papel, es muy probable que en ese momento nos pareció que estábamos haciendo magia, o que aquello tenía algún tipo de trampa, envista de que, por primera vez nos encontrábamos con una situación no habitual que no comprendíamos, estamos

presenciando nada más que, la existencia de interacciones a distancia distintas de las gravitatorias. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Una sensación muy similar a la nuestra se desarrolló durante la de Edad Media, y posteriormente en el Renacimiento, donde el fenómeno eléctrico se ligó a la magia y a las ferias, quedando el estudio desde el punto de vista científico en una situación análoga a la que se tuvo en las épocas griega y romana. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Es tiempo de que hablemos un poco del término, el prefijo “electro”, proviene del nombre griego del ámbar (elektron), puesto que la experiencia realizada al frotar una varilla de ámbar con la piel de un animal (igual que la experiencia realizada por nosotros en la escuela), fue la que inicio el desarrollo del estudio de los fenómenos eléctricos. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Las experiencias de triboelectricidad que fueron realizadas con varillas de ámbar o vidrio que permiten atraer, en contra de las fuerzas gravitatorias, trocitos de papel, luego tuvieron una sistematización empleando péndulos eléctricos. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Se logró observa que la esfera del péndulo era atraída por la varilla, tras electrizar la varilla de ámbar, frotándola con la piel de un animal, y luego aproximarla a el péndulo eléctrico, de muy similar manera se presenció otra situación que ocurre si la varilla electrizada por frotamiento es de vidrio, en este caso, al permitir que la esfera del péndulo entre en contacto con la varilla desaparece la atracción. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Podemos observar otro fenómeno de atracción, si se realiza la experiencia ahora con dos péndulos, al cual, a uno lo ponemos en contacto con la varilla de ámbar, mientras que al otro con la de vidrio y luego aproximar los péndulos, veremos que se atraen mutuamente, situación muy diferente pasa, si ahora tocamos con la mano los péndulos descargados, y ponemos ambos en contacto con la misma varilla electrizada, observaremos que, ahora los dos péndulos se repelerán, al contrario de lo que ocurría, si cada péndulo entraba en contacto con un tipo de varilla. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Hoy conocemos más que bien la explicación para cada uno de los experimentos que hasta ahora se han citado, y si no es así, te explico que sucede a continuación, la respuesta a la cada situación es muy sencilla, cuando se frota la varilla de vidrio con un paño, la varilla pierde electrones (que comunica al paño), así quedando cargada positivamente o con una carga positiva, mientras que ocurre lo contrario con el ámbar, la carga que se adquiere por la varilla se traslada parcialmente al péndulo, produciéndose entonces los fenómenos de atracción y repulsión que hemos descrito en los párrafos superiores. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Cada situación nos pone en evidencia de la existencia de dos tipos distintos de interacción eléctrica, que recibieron los nombres de electricidad resinosa y vítrea, según quien la produjera, así permitiendo dar una explicación a los fenómenos de atracción y repulsión que no se pueden entender con la teoría gravitatoria. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Electrostática

Veamos ahora algunas de las definiciones que se han planteado para el término de electrostática, en primera instancia se nos indica que, es la rama de la física que estudia los fenómenos eléctricos producidos por distribuciones de carga estáticas. (2 *Electrostática*, s. f.)

Una segunda definición indica que, la electrostática estudia las fuerzas eléctricas producidas por distribuciones de cargas a través de conceptos tales como el campo eléctrico, el potencial eléctrico y de leyes físicas como la ley de Coulomb. (2 *Electrostática*, s. f.)

Presentada la definición de electrostática, es relevante mencionar que, históricamente la electrostática fue la rama del electromagnetismo que primero se desarrolló. (2 *Electrostática*, s. f.)

Conceptos Varios: Carga Neta, Electricidad

Estática Estacionaria

Carga Neta

Hablemos ahora sobre la carga neta, su definición nos indica que, es la suma algebraica de todas las cargas que posee un cuerpo, es decir es la sumatoria total de cada una de las cargas existentes en un cuerpo. (*Ejemplo I Tecnología médica-*

estética, s. f.)

También se nos indica que, la carga eléctrica nos permite cuantificar el estado de electrización de los cuerpos teniendo como unidad mínima la carga del electrón, en términos más simples, conocer la carga eléctrica nos permite saber qué carga tiene un cuerpo. (*Ejemplo I Tecnología médica-estética, s. f.*)

¿Qué es Electricidad Estática?

Esta más que claro que, la palabra “estático” significa falta de movimiento, por lo tanto, se puede decir que la electricidad estática viene a ser, una carga eléctrica que no tiene movimiento. (*¿Qué es la electrostática? - Definición, s. f.*)

Así mismo sabemos que, todos los materiales están formados por átomos y el átomo viene a ser la partícula más pequeña de un material que todavía conserva las propiedades de dicho material, también hay que señalar que, están formados por un núcleo con carga positiva alrededor del cual se mueven uno o más electrones negativos. (*¿Qué es la electrostática? - Definición, s. f.*)

También debemos saber que, cuando un átomo se encuentra en reposo, la carga positiva del núcleo viene hacer igual a la suma de las cargas negativas de todos los electrones que giran a su alrededor, es decir que tiene una cantidad igual de carga positiva y negativa, esto significa que la carga es neutra. (*¿Qué es la electrostática? - Definición, s. f.*)

Ahora en el caso de que el núcleo gane o pierde

electrones, se producirá un desequilibrio, por último, si un átomo pierde uno o más electrones, este pasa a tener carga positiva, mientras que al ganar uno o más electrones pasara a tener carga negativa, y se conocerá como ion. (*¿Qué es la electrostática? - Definición, s. f.*)

Ya debe estar claro de que solo existen dos tipos de carga luego de las explicaciones que han dado en los párrafos superiores, y esta son positiva y negativa. (*¿Qué es la electrostática? - Definición, s. f.*)

De igual manera como se indicó en la introducción del capítulo, los átomos que posean el mismo tipo de carga presentaran un fenómeno de repulsión, es decir se repelen entre sí, mientras que los que tienen cargas opuestas presentarían una atracción. (*Cómo se genera la electricidad estática, s. f.*)

Carga Estática

Como se indicó previamente en un párrafo, la electricidad estática no es nada más que, una carga estacionaria, sin embargo, por otra parte, existen los materiales no conductores y los conductores no derivados a tierra, que tienen la capacidad de absorber y retener una carga o potencial eléctrico estacionario, y también existen algunos materiales comunes que pueden adquieren una carga de varios miles de voltios durante la manipulación normal. (*Conceptos de Electricidad Estática y Magnitudes Eléctricas, s. f.*)

Carga Estacionaria

La enciclopedia gratis Wikipedia, indica que, podemos denominar corriente eléctrica estacionaria, a la corriente eléctrica que se produce en un conductor de forma que la densidad de carga ρ de cada punto del conductor es constante, es decir que se cumple que:

$$\frac{d\rho}{dt} = 0$$

(Corriente eléctrica estacionaria, 2009)

Debido a lo indicado en el párrafo superior, se indica que, estas corrientes se producen de forma que la derivada parcial de la densidad de carga respecto al tiempo es cero en todos los puntos del conductor, cumpliéndose para ellas la ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot J = 0$$

(Corriente eléctrica estacionaria, 2009)

Para cerrar esta sección, es preciso indicar que, todas las corrientes eléctricas que son empleadas para el transporte de energía, que son de intensidad constante o corrientes continuas, y también las lentamente variable con el tiempo, entre las que se incluyen las corrientes alternas de 50 o 60 Hz, se pueden decir que, son muy aproximadamente consideradas como corrientes estacionarias. *(Corriente eléctrica estacionaria, 2009)*

Carga Puntual

Iniciaré esta sección indicando que, una carga puntual es una carga eléctrica hipotética, que posee una magnitud finita y está contenida en un punto geométrico carente de toda dimensión, es decir es, carga puntual consiste en dos cuerpos con carga que son muy pequeños en comparación con la distancia que los separa. (*Carga puntual*, 2021)

Al resolver problemas de electrostática, la suposición realizada sobre la carga puntual resulta muy práctica, debido a que, los efectos derivados de una distribución de cargas en un espacio finito se anulan y el problema se simplifica enormemente, por ejemplo, el golpeo de un martillo sobre la cabeza de un clavo es un muy claro ejemplo de lo mencionado. (*Carga puntual*, 2021)

Ya que en este caso el punto no tiene volumen, superficie, ni longitud, la densidad (lineal, de superficie o volumétrica) de una carga puntual de magnitud finita es infinita; así que las cargas puntuales no existen en realidad. (*Carga puntual*, 2021)

Sin embargo, para poder resolver un problema donde las dimensiones reales del espacio en que está(n) contenida(s) la(s) carga(s) son despreciables comparándolas con otras dimensiones dadas por el problema, nos resulta muy útil considerar dichas cargas como puntuales. (*Carga puntual*, 2021)

Un ejemplo específico de lo explicado es, el caso del electrón, cuyo radio es inmensamente pequeño comparado con las distancias de las órbitas atómicas, por otro lado, si la

carga esté contenida dentro de una geometría esférica, se ha demostrado que dicha carga se comporta exactamente como una carga puntual localizada en el centro de la esfera. (*Carga puntual*, 2020)

Carga de Prueba

El escritor, José L. Fernández, indica que, para poder determinar la existencia o inexistencia de un determinado campo eléctrico, así como sus características, se vuelve necesario introducir dentro de él una carga q' que nos sirva de testeador, la carga q' , se denomina carga de prueba o carga testigo y por convenio siempre se considera positiva. (José L. Fernández, s. f.)

De igual manera, también nos indica que, si la carga de prueba o carga testigo sufre la acción de una fuerza eléctrica, esta querrá decir que se encuentra en el seno de un campo eléctrico y gracias a ella podremos cuantificarlo por medio de una nueva magnitud a la que llamaremos intensidad del campo. (José L. Fernández, s. f.)

Ley de Coulomb

¿Qué es la Ley de Coulomb?

El escritor, Fabián Coelho, nos indica que, se empleará la ley de Coulomb en el área de la física para calcular la fuerza

eléctrica que actúa entre dos cargas en reposo, de igual manera nos indica que, gracias a la ley se puede predecir cuál será la fuerza electrostática de atracción o repulsión que existe entre dos partículas, según su carga eléctrica y la distancia existente entre ambas. (Fabián Coelho, 2020)

La ley de Coulomb debe su nombre al físico francés Charles-Augustin de Coulomb, quien en 1785 enunció esta ley, y que constituye la base de la electrostática. (Fabián Coelho, 2020)

“La magnitud de cada una de las fuerzas eléctricas con que interactúan dos cargas puntuales en reposo es directamente proporcional al producto de la magnitud de ambas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa y tiene la dirección de la línea que las une.” (Fabián Coelho, 2020)

“La fuerza es de repulsión si las cargas son de igual signo, y de atracción si son de signo contrario”.(Fabián Coelho, 2020)

La ley se representa mediante la siguiente ecuación:

$$F = k * \frac{q_1 * q_2}{r^2}$$

(Fabián Coelho, 2020)

- F = fuerza eléctrica de atracción o repulsión en Newtons (N). Donde las cargas iguales se repelen y las cargas opuestas se atraen. (Fabián Coelho, 2020)

- k = es la constante de Coulomb o constante eléctrica de proporcionalidad. Donde la fuerza varía según la permitividad eléctrica (ϵ) del medio, bien sea agua, aire, aceite, vacío, entre otros. (Fabián Coelho, 2020)
- q = valor de las cargas eléctricas medidas en Coulomb (C). (Fabián Coelho, 2020)
- r = distancia que separa a las cargas y que es medida en metros (m). (Fabián Coelho, 2020)

La permitividad eléctrica del vacío es constante, y es una de las más empleadas en los cálculos, y se calcula de la siguiente manera:

$$\epsilon_0 = 8,8541878176 \times 10^{-12} C^2 / (N \cdot m^2)$$

(Fabián Coelho, 2020)

Así mismo, es de suma importancia tener en cuenta la permitividad del material, el valor de la constante de Coulomb en el Sistema Internacional de medidas es:

$$k = 9 * 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

(Fabián Coelho, 2020)

Sin embargo, se debe indicar que, la ley solo toma en cuenta la interacción existente entre dos cargas puntuales al mismo tiempo y solo determina la fuerza que existe entre q_1 y q_2 sin considerar las cargas alrededor, también Coulomb

logró determinar las propiedades de la fuerza electrostática al desarrollar como instrumento de estudio, una balanza de torsión, que consistió en una barra que colgaba sobre una fibra con la capacidad de torcerse y volver a su posición inicial. (Fabián Coelho, 2020)

Usando este instrumento, Coulomb podía medir la fuerza que se ejercía sobre un punto de la barra al colocar varias esferas cargadas a diferentes distancias con el fin de medir la fuerza de atracción o repele según girara la barra. (Fabián Coelho, 2020)

Por otra parte, la formulación de las interacciones existentes entre cargas puntuales se llevó a cabo en 1785 por Coulomb empleando una balanza de torsión, si bien, podríamos decir, por darle un carácter intuitivo, que el origen de esta ley experimental fue realizado con la ayuda de dos péndulos eléctricos cargados, dispuestos en la misma horizontal, de la experiencia se pudo observar que, la fuerza que aparecía en las cargas cumple con los siguientes aspectos:(*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

- Tiene la dirección de la línea que une las cargas. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)
- El módulo es proporcional al valor de ambas cargas. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)
- Puede ser atractiva o repulsiva según el signo de las cargas. Siendo atractiva para cargas de distinto signo y de repulsión para cargas del mismo signo. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)
- Es del tipo acción-reacción, con lo que la fuerza F_{21} que ejerce q_2 sobre q_1 es igual en magnitud, pero de sentido opuesto a F_{12} , esto es:(*Tema 1 -*

Electrostática en el vacío, 2011) $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$

- Varía con la distancia de forma inversamente proporcional a su cuadrado. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Dando la fórmula matemática:
$$\vec{F}_{12} = K_e \frac{q_1 q_2}{d_{12}^2} \vec{u}_{12}$$

De la ecuación se puede indicar que \vec{F}_{12} la fuerza que ejerce la carga q_1 sobre la q_2 , d_{12} la distancia entre ambas cargas, y \vec{u}_{12} un vector unitario en la dirección definida por las cargas y en el sentido de q_1 a q_2 . (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Mientras que el valor de la constante K_e (constante eléctrica) varía según el sistema de unidades utilizado. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

En el Sistema Internacional (SI) vale 9×10^9 y sus unidades son $\text{Newton} \times \text{metro}^2 \times \text{culombio}^{-2}$ ($\text{N m}^2 \text{C}^{-2}$). (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Esta expresión, que es aplicable sólo a dos cargas puntuales, es preciso generalizarla para poder considerar situaciones en las que aparecen distribuciones discretas o continuas de cargas. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

También, para el caso de una distribución discreta de cargas puntuales, cada una de las cargas interaccionará con todas las demás, con lo que quedará sometida a varias fuerzas, haciendo que, para el estudio de estas situaciones aceptáramos

que se cumple el principio de superposición, mismo que establece que, la fuerza sobre una de las cargas será la suma de las fuerzas que independientemente ejerzan las restantes. (*Tema 1 - Electrostatica en el vacío*, 2011)

De tal forma que, la fuerza que actúa sobre una carga (q), por la acción de varias (q'_i), se calculara mediante la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_e = K_e q \sum_{i=0}^n \frac{q'_i}{r_i^2} \vec{u}_i$$

(*Tema 1 - Electrostatica en el vacío*, 2011)

Hasta este punto, solo hemos considerado la fuerza que actúa sobre una carga puntual por existir otras cerca de ella, en este instante consideremos la acción de una distribución continua de cargas sobre una carga puntual. (*Tema 1 - Electrostatica en el vacío*, 2011)

Aplicando una vez más el principio de superposición, es decir, realizamos la suma de efectos producidos por cada elemento diferencial de carga, que podemos considerar como una carga puntual y suponiendo que se trata de una distribución de cargas en volumen, cada elemento diferencial de carga puede ser expresado como $dq = \rho d\tau$, con lo que tendremos:

$$\vec{F} = K_e q \int_V \frac{\rho(\vec{r}') d\tau}{r^2} \vec{u}_r$$

En donde \vec{u}_r un vector unitario en la dirección definida por cada elemento de volumen considerado y la carga puntual, del mismo modo, podemos considerar las distribuciones

lineales o superficiales de carga, en cuyo caso habrá que considerar la integral de línea o superficie respectivamente. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

Al comenzar el estudio de la interacción entre cargas eléctricas recurrimos a su comparación con la interacción gravitatoria, y acabamos de comprobar que la expresión de la fuerza que se ejerce sobre una carga por estar otra presente (ley de Coulomb) tiene una gran similitud formal con la ley de Gravitación Universal, dándonos la expresión de la fuerza sobre una masa debida a otra situada en sus proximidades. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

$$\vec{F} = G \frac{M * m}{r^2} \vec{u}_r$$

Pasemos a ver las analogías y diferencias de ambas leyes: (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

- Ambas fuerzas son del tipo acción-reacción. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)
- Ambas varían con la inversa del cuadrado de la distancia que separa a los escalares. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

Sin embargo, aparece una diferencia fundamental ya que: (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

- La fuerza eléctrica puede ser atractiva o repulsiva según sea la naturaleza de las cargas. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

- La fuerza gravitatoria siempre es atractiva. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Además, debemos resaltar la gran diferencia entre los órdenes de magnitud de los módulos de ambos tipos de fuerzas. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Campo Eléctrico

Una vez más, vamos a comparar las interacciones entre masas y entre cargas eléctricas, para analizar si se pueden utilizar en el caso de las cargas algunos conceptos definidos para las masas, con su correspondiente modificación, debido al cambio de propiedad de la materia considerada. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

En el caso de las masas, ya sabemos que se puede definir el campo gravitatorio creado por una masa, aunque en general nos solemos limitar a considerar de manera específica el campo gravitatorio terrestre, es decir el creado por la Tierra. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Esto es debido a dos razones, por una parte, estamos inmersos en él y nosotros mismos sentimos sus efectos, y mientras que por otra los otros campos gravitatorios creados por cuerpos de nuestros entornos tienen efectos que, en contra de lo que sucede con el campo gravitatorio terrestre, apenas podemos experimentar en nosotros mismos. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

Estamos acostumbrados a la existencia del campo gravitatorio debido a la Tierra, que, se ponen de manifiesto por la fuerza (en este caso siempre de atracción) que la Tierra ejerce sobre cualquier objeto con masa situado en sus proximidades, debido a esto, todos los cuerpos que son abandonados en el aire “caen”. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

Cuando se desea realizar la representación del fenómeno, la hacemos mediante un campo vectorial, pese a que, este campo siempre existe, sólo se observa por el movimiento originado, por acción de la fuerza, en el cuerpo con masa. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

Del mismo modo, el campo que empleamos para modelizar el fenómeno gravitatorio es un campo vectorial cuyas dimensiones son las de una fuerza por unidad de masa, (escalar sobre el que se detecta su existencia), el cálculo, se expresa como el producto del vector campo en el punto, multiplicado por la masa del objeto valor del escalar sobre el que vemos los efectos del campo, y solemos escribir:

$$\vec{F}_g = m * \vec{g}$$

(*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

El campo gravitatorio, mencionado, está creado por una masa la de la tierra y, para detectar su presencia empleamos otra masa, es decir que, si bien en cualquier punto de nuestro entorno existe el campo gravitatorio, no lo detectamos si en ese punto no colocamos un escalar adecuado para que sobre el aparezca la fuerza gravitatoria. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

En contraste es totalmente impensable usar un rayo de luz para detectar el campo terrestre, debido a que, este carece de masa. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

Podemos proceder, de manera similar, con el fenómeno eléctrico e intentar definir un campo, el eléctrico, creado por una carga, manteniendo el paralelismo con el campo gravitatorio, buscamos definir también un campo vectorial, en este caso, el vector que caracteriza el campo tendrá las unidades de una fuerza dividida por el escalar sobre el que actúa la fuerza (la carga)”, y que por tanto será: (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_e}{q} \quad q > 0$$

Analicemos la expresión, antes que nada, debemos tener claro, que el campo eléctrico no es una fuerza, este se pone de manifiesto por la aparición de una fuerza, como le ocurría también al campo gravitatorio, sin embargo, para que podamos detectar esa fuerza, debemos colocar una carga eléctrica, similar a lo realizado con el campo gravitatorio, en el cual observamos la fuerza que se ejercía sobre un cuerpo con masa. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*, 2011)

Aun cuando, en el caso del campo gravitatorio terrestre es difícil apreciar que la fuerza ejercida sobre una masa depende de su posición, en cuanto pensemos en la Ley de Gravitación universal aplicada a los planetas entenderemos que la fuerza es distinta en cada posición. (*Tema 1 - Electroestática en el vacío*,

2011)

Cuando tenemos una carga “ Q ” sabemos que si colocamos otra carga “ q ” aparece sobre ella una fuerza, que depende de la distancia entre ambas, por tanto, al variar la posición de la carga “ q ” la fuerza que aparece sobre ella variará, lo que en términos de campo eléctrico significa que el vector campo ha variado, por tanto, el campo eléctrico depende del punto que consideremos. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

En este marco, definimos campo eléctrico como la región del espacio en la que, al colocar en un punto cualquiera, un cuerpo con la propiedad adecuada (carga eléctrica) aparece una fuerza sobre este cuerpo. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

En la expresión que nos ha servido para definir el campo, no se ha tenido en cuenta que, el fenómeno eléctrico se presenta sobre cargas positivas o negativas, y el sentido de sus efectos es el opuesto para un tipo de cargas que para el otro, por ello para definir la dirección y el sentido del vector que define el campo, se toma como sentido del campo en cada punto, el que seguiría una carga positiva colocada en él. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

En la expresión hemos empleado el límite del cociente (fuerza/carga) cuando la carga es muy pequeña y positiva, pedimos que la carga sea muy pequeña a fin de que no modifique el valor del campo en el punto que estamos considerando y en sus cercanías. (*Tema 1 - Electrostática en el vacío*, 2011)

De lo anterior se deduce que el campo creado por una carga puntual en un punto cualquiera del espacio “P”, tendrá la forma:

$$\vec{E} = K_e \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$$

(Tema 1 - Electrostática en el vacío, 2011)

Siendo Q la carga que crea el campo, r el módulo del vector que une la carga “Q” y el punto “P” en el que queremos conocer el campo (la distancia de la carga al punto) y \vec{u}_r un vector unitario en esa dirección, su sentido vendrá determinado por el del movimiento que tendría una carga positiva colocada en el punto “P”. (Tema 1 - Electrostática en el vacío, 2011)

Campo Eléctrico Creado por una Distribución Puntual de Cargas

Aplicando de nuevo el principio de superposición, la expresión del campo en un punto cualquiera del espacio, “P”, debido a varias (n) cargas puntuales vendrá dada por la suma de las contribuciones al campo de cada una de las cargas, es decir:

$$\vec{E} = K_e \sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{r_i^2} \vec{u}_i$$

(Tema 1 - Electrostática en el vacío, 2011)

Siendo Q_i cada una de las “n” cargas generadoras del campo, r_i el módulo del vector posición que une cada una de

ellas y el punto “P”, \vec{u}_i y un vector unitario en cada una de esas direcciones, cuyo sentido, como siempre, vendrá dado por el que tendría el movimiento de una carga positiva colocada en el punto “P” si sólo existiera la carga “ Q_i ”, lo que hace necesaria la suma vectorial de los resultados obtenidos. (*Tema 1 - Electrostatica en el vacio*, 2011)

Campo Eléctrico Creado por una Distribución Continua de Cargas

Para conocer el campo debido a una distribución continua de cargas, meditemos de manera similar a como hicimos para determinar la fuerza debida a una distribución de cargas no puntuales, ocupamos una carga elemental (dq) que de nuevo podemos considerar como una carga puntual, calculamos el valor del campo debida a ella y aplicando el principio de superposición, posteriormente sumamos los efectos de todas las posibles cargas elementales en las que subdividimos la distribución continua, es decir realizamos una suma continua (integración) de las contribuciones. (*Tema 1 - Electrostatica en el vacio*, 2011)

Desde el punto de vista formal la solución es sencilla, y la expresamos como:

$$\vec{E} = K_e \int_{\tau} \frac{\rho d\tau}{r^2} \vec{u}_r ; \vec{E} = K_e \int_{\Sigma} \frac{\sigma ds}{r^2} \vec{u}_r ; \vec{E} = K_e \int_l \frac{\lambda dl}{r^2} \vec{u}_r$$

(*Tema 1 - Electrostatica en el vacio*, 2011)

Siendo ρ, σ y λ las densidades de carga volúmica, superficial y lineal respectivamente y llamando " τ, Σ y l " al volumen, la superficie y la línea sobre las que se distribuye la carga. (*Tema 1 - Electrostatica en el vacío*, 2011)



2

Capítulo 2

Electrostática en el Vacío

Figura 2

Electrostática



Fuente: (¿Qué es la electrostática? - Definición, s. f.)

Nota: Electrostática tomada con la mano.

Objetivos

Al terminar este capítulo podrá:

1. Estar al corriente y aclarar ¿Qué es el potencial electrostático?
2. Tener conocimiento y explicar ¿Qué son las superficies equipotenciales?
3. Estar al tanto y esclarecer ¿Qué es el ángulo sólido?
4. Comprender y exponer ¿Qué es la Ley de Gauss?
5. Tener información y presentar el comportamiento de conductores en el campo eléctrico estático.
6. Dominar y revelar ¿Qué es la pantalla electrostática?

Potencial Electrostático

Se dice que, un cuerpo posee una energía potencial por el hecho de encontrarse en un punto del campo gravitatorio, análogamente, un cuerpo cargado tendrá una energía potencial en virtud de su posición en un campo eléctrico. (*Tema 3. Potencial electrostático*, s. f.)

En esta sección se vas a estudiar el concepto de potencial asociado a un campo electrostático, definiremos como potencial, a la energía potencial por unidad de magnitud activa, al aplicar la definición, al caso de campos electrostáticos, se nos facilita el estudio del trabajo realizado por las fuerzas electrostáticas, al considerar el potencial como una propiedad del campo independiente de las cargas que se sitúen en el mismo. (*Tema 3. Potencial electrostático*, s. f.)

Además, Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández, de la Universidad Politécnica de Madrid, nos indican que, una carga eléctrica puntual q (carga de prueba) tiene, en presencia de otra carga q_1 (carga fuente), una energía potencial electrostática, de modo semejante a la relación que se establece entre la fuerza y el campo eléctrico, se puede definir una magnitud escalar, potencial eléctrico (V) que tenga en cuenta la perturbación que la carga fuente q_1 produce en un punto del espacio, de manera que cuando se sitúa en ese punto la carga de prueba, el sistema adquiere una energía potencial. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

El potencial eléctrico creado por una carga q_1 en un punto a una distancia r se define como: (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

$$V = K \frac{q_1}{r}$$

Por lo que una carga de prueba q situada en ese punto tendrá una energía potencial U dada por: (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

$$U = qV$$

El potencial depende sólo de la carga fuente y sus unidades en el Sistema Internacional son los voltios (V), el origen para el potencial se toma en el infinito, para mantener el criterio elegido para la energía. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

Por otro lado, para calcular el potencial en un punto generado por varias cargas fuente se suman los potenciales creados por cada una de ellas, teniendo en cuenta que es una magnitud escalar y que será positivo o negativo dependiendo del signo de la carga fuente. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

El trabajo realizado por la fuerza electrostática para llevar una carga q desde un punto A , a un punto B se puede expresar entonces en función de la diferencia de potencial entre A y B : (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

$$W_{AB} = U_A - U_B \approx qV_A - qV_B \approx -q\Delta V$$

Bajo la única acción de la fuerza electrostática, todas las cargas tienden a moverse de modo que el trabajo de la fuerza sea positivo, es decir, de modo que disminuye su energía

potencial, esto quiere decir que, las cargas de prueba positivas se mueven hacia donde el potencial eléctrico disminuye y las cargas de prueba negativas se mueven hacia donde el potencial aumenta. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

Rememorando la definición de trabajo de una fuerza:
(Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} \approx \int_A^B q\vec{E} \cdot d\vec{l} \approx -q\Delta V$$

Podemos obtener la relación entre el campo eléctrico y la diferencia de potencial entre dos puntos: (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

$$\Delta V = V_B - V_A \approx - \int_A^B q\vec{E} \cdot d\vec{l}$$

De esta expresión se deduce que en una región del espacio en la que el campo eléctrico es nulo, el potencial es constante y, para calcular el campo eléctrico a partir del potencial se utiliza el operador gradiente, de modo análogo a cómo se obtiene la fuerza a partir de la energía potencial: (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

$$\vec{E} = -\nabla V \approx -\frac{d}{dr} \left(K \frac{q_1}{r} \right) \vec{u}_r \approx K \frac{q_1}{r^2} \vec{u}_r$$

Superficies Equipotenciales

Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández, de la Universidad Politécnica de Madrid, nos indican, que, una superficie equipotencial es el lugar geométrico de los puntos de un campo escalar en los cuales el “potencial de campo” o valor numérico de la función que representa el campo, es constante y que las superficies equipotenciales pueden calcularse empleando la ecuación de Poisson. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

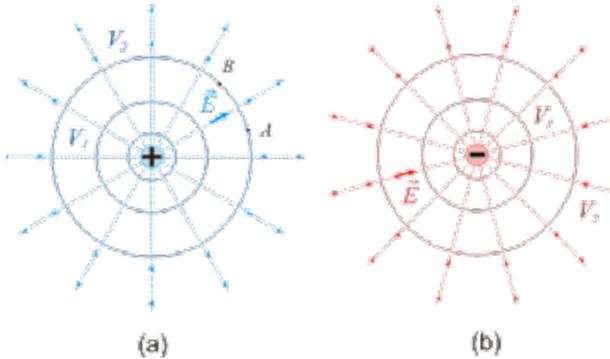
El caso más sencillo puede ser, el de un campo gravitatorio en el que hay una masa puntual, las superficies equipotenciales son esferas concéntricas alrededor de dicho punto, en donde el trabajo realizado por esa masa siendo el potencial constante, será pues, por definición, cero. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

Cuando el campo potencial se restringe a un plano, la intersección de las superficies equipotenciales con dicho plano se llama líneas equipotenciales. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

De igual manera se dice que las superficies equipotenciales son aquellas en las que el potencial toma un valor constante, por ejemplo, las superficies equipotenciales creadas por cargas puntuales son esferas concéntricas centradas en la carga, como se deduce de la definición de potencial ($r = cte$). (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

Figura 2.1

Superficies Equipotenciales Creadas por una Carga Puntual Positiva (A) y otra Negativa (B)



Fuente: (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

Nota: Visualización de las fuerzas creadas en unas superficies equipotenciales creadas por una carga puntual positiva y otra negativa.

Rememorando la expresión para el trabajo, se evidencia que, cuando una carga se mueve sobre una superficie equipotencial la fuerza electrostática no realiza trabajo, puesto que la ΔV es nula. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

Además, para que el trabajo realizado por una fuerza sea nulo, ésta debe ser perpendicular al desplazamiento, por lo que el campo eléctrico (paralelo a la fuerza) es siempre perpendicular a las superficies equipotenciales. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

La figura anterior (a) muestra que en el desplazamiento sobre la superficie equipotencial desde el punto A hasta el B el

campo eléctrico es perpendicular al desplazamiento, por tanto las propiedades de las superficies equipotenciales se pueden resumir en: (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

- Las líneas de campo eléctrico son, en cada punto, perpendiculares a las superficies equipotenciales y se dirigen hacia donde el potencial disminuye. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)
- El trabajo para desplazar una carga entre dos puntos de una misma superficie equipotencial es nulo. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)
- Dos superficies equipotenciales no se pueden cortar. (Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández, s. f.)

Ángulo Sólido

Podemos definir como ángulo sólido, al ángulo espacial que abarca un objeto observado desde un ángulo dado, que se corresponde con la zona del espacio, limitada por las rectas proyectantes desde el objeto hacia el observador. (*Ángulo sólido*, 2020)

A modo de ejemplo, si la proyección cónica del objeto tiene forma circular, el ángulo espacial corresponde al ángulo sólido de un cono, así mismo, si la proyección cónica es un cuadrado el ángulo sólido es el ángulo espacial de una pirámide cuyo vértice es el observador. (*Ángulo sólido*, 2020)

El estereorradián cuyo símbolo es sr, es la unidad del ángulo sólido en el SI y es una magnitud adimensional que se

representa con la letra griega Ω , si se requiere calcular el ángulo sólido bajo el cual se ve un objeto desde un punto, se proyecta el objeto sobre una esfera de radio conocido, centrada en el punto de vista, en este caso, si la superficie de la proyección del objeto sobre la esfera es S , el ángulo sólido bajo el cual se ve el objeto estará, por definición representado por la expresión:

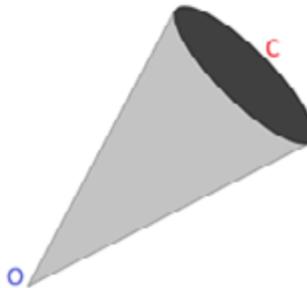
$$\Omega = \frac{S}{R^2}$$

(Ángulo sólido, 2020)

Pongamos el caso de, una curva cerrada c del espacio, un punto O y la superficie formada por todas las semirrectas con origen en O y un punto en la curva c , a esta superficie la llamaremos superficie cónica de vértice O determinada por la curva cerrada c . (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Figura 2.2

Superficie Cónica de Vértice o Determinada por la Curva C.



Fuente: (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

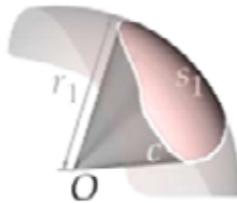
Nota: Vista de una superficie cónica de vértice o determinada por la curva c .

Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, indican que, ángulo sólido es cada una de las dos partes en que una superficie cónica divide al espacio, mientras que, el vértice O de la superficie cónica se llama vértice de los dos ángulos sólidos. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Pongamos el caso de, la siguiente figura, con centro en el vértice de un ángulo sólido se traza una superficie esférica, y se considera el casquete esférico limitado por la curva en que la superficie cónica corta a la superficie esférica, y se halla el cociente entre la superficie de ese casquete y el cuadrado del radio de la superficie esférica, se obtiene un número real α . Si se traza otra superficie esférica con otro radio , puede demostrarse que el cociente entre la superficie del nuevo casquete y el cuadrado del radio con que ha sido trazado es también α . Y así sucesivamente para el mismo ángulo sólido, en otras palabras, para cada ángulo sólido se cumple que: (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Figura 2.3: Cada Ángulo Sólido Tiene la Propiedad de que se Llama Medida de ese Ángulo

$$\frac{s_1}{r_1^2} = \frac{s_2}{r_2^2} = \dots = \frac{s_n}{r_n^2} = \alpha$$



Cada ángulo sólido tiene la propiedad de que

$$\frac{s_1}{r_1^2} = \frac{s_2}{r_2^2} = \dots = \frac{s_n}{r_n^2} = \alpha . \alpha \text{ se llama medida de ese ángulo.}$$

Fuente: (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Nota: Propiedades de un ángulo sólido.

Por otra parte, el número real α de la ecuación es adimensional, pero el ángulo sólido de medida 1 se viene llamando estereorradián, por lo que el Sistema Internacional de Unidades dice de él lo que expresa el entrecomillado de más arriba, que estereorradián es otro nombre del número 1 cuando sea conveniente. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Su símbolo es sr. Así si $\alpha = 1$ se dice a veces que el ángulo sólido mide 1 sr, si $\alpha = 0.3$, se dice que el ángulo sólido mide 0.3 sr, etc. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Sin embargo, también es válido decir que esos ángulos sólidos miden 1 y 0.3 respectivamente. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Ángulo Sólido Bajo el que se ve una Superficie S

Desde un Punto

Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, llaman ángulo sólido bajo el que se ve una superficie S desde un punto O , al ángulo sólido definido por la superficie cónica de las semirrectas con origen en O , que pasan por los puntos de la curva cerrada que limita a la superficie S , como se observa en la gráfica. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Figura 2.4

Ángulo Sólido Bajo el que se ve la Superficie S Desde el Punto O



Fuente: (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Nota: Vista desde el punto O de un ángulo sólido.

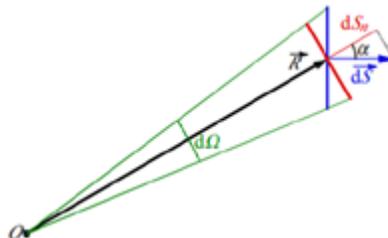
Por otra parte, si se trata de una superficie plana dS , representada por el vector perpendicular a ella como se presenta en la siguiente imagen, el ángulo sólido $d\Omega$ bajo el cual se ve esa superficie desde un punto O es aproximadamente el mismo que el ángulo sólido bajo el que se ve la superficie representada por dS_n , que es la componente de dS en la dirección de \vec{u} , la aproximación es mayor cuanto menor sea R y el vector tiene como origen el punto O y como extremo un punto de dS , la proyección de dS sobre la dirección de \vec{u} es: (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

$$dS_n = dS \cos \theta \approx \vec{u} \cdot \vec{dS} \approx \frac{\vec{R} \cdot \vec{dS}}{R}$$

Para llegar a la ecuación, se ha tenido en cuenta que la proyección de un vector tal como dS sobre una dirección es el producto escalar del vector unitario en esa dirección por el vector que se proyecta, en este caso dS . (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Figura 2.5

Ángulo Sólido $d\Omega$ Bajo el que se ve una Superficie Plana dS



Fuente: (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Nota: Vista de una superficie plana en un ángulo sólido.

Como \vec{n} es perpendicular a \vec{r} , es próxima a la superficie del casquete esférico de radio R limitado por el ángulo sólido $d\Omega$, es decir:

$$d\Omega = \frac{dS_n}{R^2} \approx \frac{\vec{R} \cdot \vec{dS}}{R^3}$$

(Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Podemos utilizar la ecuación, para hallar una expresión para el ángulo sólido bajo el que se ve una superficie S cualquiera desde el punto O , aproximaremos la superficie S por pequeñas superficies planas, cada superficie se ve desde O aproximadamente bajo el ángulo sólido dado por la ecuación., de manera que, el ángulo sólido bajo el cual se ve toda la superficie S desde O es la integral de la ecuación, dicho de otra manera.

$$\Omega = \int_S \frac{\vec{R} \cdot \vec{dS}}{R^3}$$

(Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

En realidad, la fórmula integral, se puede tomar como definición formal de ángulo sólido bajo el que se ve la superficie S desde el punto O , en la fórmula integral es cada vector con origen en O y extremo en un punto de cada dS . Las definiciones formales equivalentes de la fórmula original y en

su variante integral, de ángulo sólido indican que hay ángulos sólidos negativos, en efecto, si se halla el ángulo sólido bajo el cual se ve la superficie, opuesta de, desde el punto O como se observa en la figura, el resultado es $-d\Omega$, el opuesto de $d\Omega$ de la fórmula original y toda la superficie $-S$ se ve desde O bajo el ángulo sólido, por otra parte la siguiente expresión representa el ángulo sólido opuesto de Ω de la fórmula integral:

$$\Omega' = \int_S \frac{\vec{R} * (-\vec{dS})}{R^3} \approx - \int_S \frac{\vec{R} * \vec{dS}}{R^3} \approx -\Omega$$

(Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

En resumidas cuentas, al encontrar el ángulo sólido bajo el cual se ve una superficie desde un punto, se pueden considerar dos sentidos, uno hacia cada parte de la superficie, donde el resultado de la fórmula integral será positivo o negativo según el sentido de la superficie que se considere, también el ángulo sólido bajo el que se ve cualquier superficie cerrada desde un punto del volumen interior a ella se obtendrá dividiendo el área de cualquier superficie esférica con centro en el punto entre el radio de esa superficie:

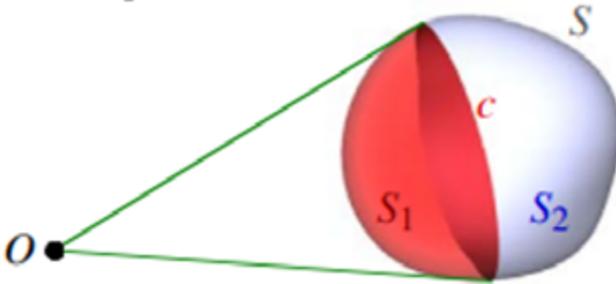
$$\Omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} \approx 4\pi$$

(Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Ángulo Sólido Bajo el que se ve una Superficie Cerrada Desde un Punto Exterior al Volumen Encerrado por la Superficie

En su texto, Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, expresan que, se llama ángulo sólido bajo el que se ve el volumen interior a la superficie cerrada S desde un punto O exterior a ese volumen, al ángulo sólido positivo determinado por la superficie cónica a la que pertenecen las semirrectas de origen O tangentes a S , como se observa en la figura. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Figura 2.6: *Ángulo Sólido Bajo el que se ve una Superficie Cerrada S Desde un Punto Exterior al Volumen que Encierra es Cero*



Fuente: (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Nota: Vista de una superficie cerrada s desde un punto exterior al volumen que encierra es cero.

Observe que la superficie cónica tangente a S determina sobre S la curva c formada por los puntos de tangencia, es borde de dos superficies, S_1 y S_2 , que, juntas, forman la superficie cerrada S , donde el ángulo sólido bajo el que se ve cada una de esas superficies desde O se halla con la fórmula integral expuesta en el apartado anterior, que da el mismo valor absoluto para los ángulos de las dos superficies, pues ambas están limitadas por la misma curva. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Mientras que, en una superficie cerrada suele tomarse como sentido positivo el saliente de la superficie, debido a lo indicado, es por eso por lo que, el ángulo sólido de la superficie S_1 resulta opuesto del ángulo sólido de la superficie S_2 , por lo tanto, la suma de esos dos ángulos, que es cero, se llama ángulo sólido bajo el que se ve la superficie cerrada S desde el punto O , exterior al volumen encerrado por la superficie. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

En resumen, el ángulo sólido bajo el que se ve una superficie cerrada S desde un punto exterior al volumen encerrado por esa superficie es cero. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Al determinar el flujo del campo eléctrico, creado por una carga eléctrica puntual a través de la superficie S llegamos a la fórmula integral, caso similar ocurre, al hallar el flujo del campo gravitatorio creado por una masa puntual y, en general, al hallar flujos de campos creados por objetos puntuales cuyos módulos sean inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia entre el objeto y el punto en el que se halla el campo. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Contando con la definición de ángulo sólido proporcionada, por fórmula integral, se vuelve muy fácil determinar esos flujos, que resultan proporcionales al ángulo sólido bajo el que se ve la superficie S desde el punto que ocupa la causa del campo. (Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor., 2017)

Ley de Gauss

Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández, en “Flujo del campo eléctrico. Ley de Gauss”, indican que, el flujo del campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga q contenida dentro de la superficie, dividida por la constante ϵ_0 y que la superficie cerrada empleada para calcular el flujo del campo eléctrico se denomina superficie gaussiana. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

$$\Phi = \oint_s \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

También es oportuno indicar que, la ley de Gauss es una de las ecuaciones de Maxwell, y está relacionada con el teorema de la divergencia, conocido también como teorema de Gauss, y fue formulada por Carl Friedrich Gauss en 1835 y para aplicarla, es necesario conocer previamente la dirección y el sentido de las líneas de campo generadas por la distribución de carga, por último, la elección de la superficie gaussiana dependerá de cómo sean estas líneas. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

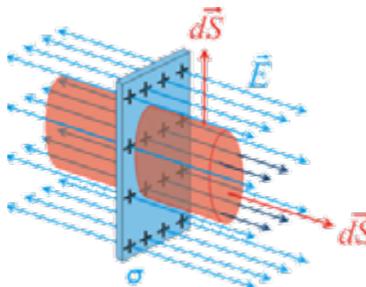
Campo Creado por un Plano Infinito

Mediante el uso de la ley de Gauss, se puede realizar el cálculo del campo eléctrico creado por un plano infinito cargado, para ilustrar lo expresado, la siguiente figura, representa un plano infinito cargado con una **densidad superficial de carga** σ ($= q/S$) uniforme y positiva. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

Las líneas de campo siempre salen de las cargas positivas, por lo que el campo creado por el plano será uniforme (ya que la densidad de carga lo es) y sus líneas irán hacia afuera de ambos lados del plano, mientras que el flujo del campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es siempre el mismo (ley de Gauss), en este caso, por simplicidad de cálculo, se ha elegido una superficie gaussiana cilíndrica (representada en rojo en la figura). (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

Figura 2.7

Superficie Gaussiana Cilíndrica



Fuente: (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

Nota: Visualización de los campos en una superficie gaussiana cilíndrica

En la ilustración, se observa que el flujo a través de la superficie lateral del cilindro es nulo (ninguna línea de campo la atraviesa), las únicas contribuciones no nulas al flujo son las que se producen a través de sus dos bases, entonces la expresión para el flujo del campo eléctrico a través del cilindro es: (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

$$\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \int_{\substack{Sup. \\ lateral}} \vec{E} d\vec{S} + \int_{Base1} \vec{E} d\vec{S} + \int_{Base2} \vec{E} d\vec{S}$$

Envista que las dos bases del cilindro son iguales y el módulo del campo es el mismo en todos los puntos de su superficie, la integral anterior se simplifica, quedando:(Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

$$\Phi = 2 \int_{Base1} \vec{E} d\vec{S} = 2E \int_{Base1} dS = 2E S$$

Donde el valor del flujo, viene dado por la ley de Gauss:(Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

$$\Phi = 2E S = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Y q/S es la densidad superficial de carga σ : (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

$$E = \frac{q}{2\epsilon_0 S}; \quad \boxed{E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}}$$

Campo en el Interior de un Condensador

La definición para un **condensador** o capacitor, que nos plantean, Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández, en “Flujo del campo eléctrico”, es, un dispositivo formado por dos conductores (denominados armaduras), generalmente con forma de placas, cilindros o láminas, separados por el vacío o por un material dieléctrico (no conduce la electricidad), que se utiliza para almacenar energía eléctrica.(Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

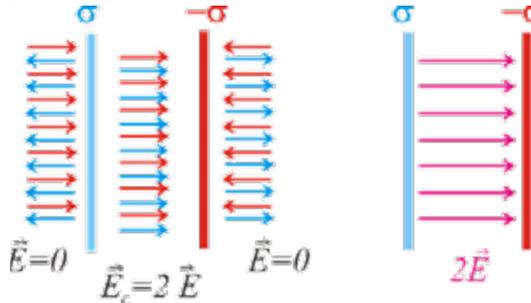
Podemos hablar de una forma muy sencilla de un condensador, que consiste en dos placas metálicas muy cercanas entre sí con cargas q en una y $-q$ en la otra., al cual se denomina **plano-paralelo**, donde (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)el módulo del campo eléctrico creado por cada una de las placas del condensador, como se ha visto en la imagen anterior, viene dado por la expresión matemática: (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Las líneas del campo eléctrico creado por la placa cargada positivamente están dirigidas hacia fuera de la misma, lo contrario que ocurre para la placa con carga negativa.(Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

Figura 2.8

Placa Cargada



Fuente: (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

Nota: Campos eléctricos en una placa cargada.

Por consiguiente, en el exterior del condensador el campo será nulo y en el interior su módulo es el doble del campo que crearía una sola de las placas: (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

$$E_c = 2E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Finalmente, debemos indicar que, los condensadores se utilizan en circuitos electrónicos como dispositivos para almacenar energía, el primer condensador fue fabricado en 1746, y estaba constituido por un recipiente de vidrio recubierto por una lámina metálica por dentro y por fuera y se conoce comúnmente como botella de Leiden. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-b)

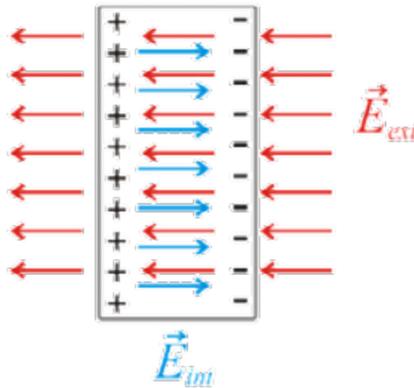
Comportamiento de Conductores en el Campo Eléctrico Estático

Según Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., en “Conductores en equilibrio electrostático”, un material conductor, es aquel que permite el transporte de carga eléctrica, comúnmente, los sólidos metálicos son buenos conductores, ya que sus electrones de valencia están poco ligados a los núcleos atómicos, lo que permite que se muevan con facilidad a través del sólido, a este tipo de electrones poco ligados se denominan electrones libres.(Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

En el momento que un sólido conductor cargado con una cierta carga q , se le deja evolucionar la suficiente cantidad de tiempo, alcanza una situación de equilibrio electrostático en la que ya no hay movimiento de cargas, el campo en el interior del conductor es nulo (si no, habría movimiento de cargas y no estaría en equilibrio). (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

Figura 2.9

Placa Conductora



Fuente: (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

Nota: Campos eléctricos en una placa conductora.

Al situar una placa conductora como se observa en la figura, en una región del espacio en que existe un campo eléctrico, los electrones de la placa se verán sometidos a una fuerza opuesta al campo externo y se acumularán en el lado derecho de la placa, dejando el lado izquierdo con un exceso de carga positiva. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

La distribución de carga dentro del conductor genera un campo eléctrico interno de sentido opuesto al externo y de igual módulo, de modo que en el interior del conductor el campo eléctrico total es nulo, este hecho constituye el principio de funcionamiento de una jaula de Faraday. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

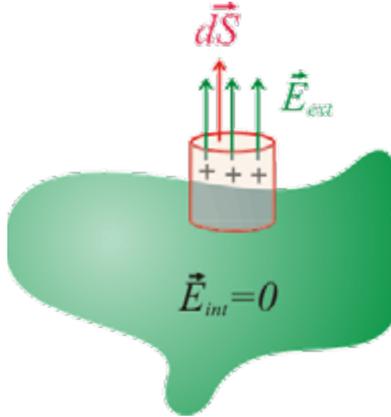
Por consiguiente, si el campo en el interior de un material conductor en equilibrio electrostático es nulo, no puede haber carga eléctrica en el interior del mismo, (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)de manera que, la carga de un conductor se acumula en su superficie, así mismo el campo eléctrico externo al conductor no puede tener componente tangencial, ya que las cargas de la superficie se moverían sobre ella y ya no sería un conductor en equilibrio; es decir, el campo externo es normal a la superficie del conductor.(Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

Lo expuesto, implica que la superficie del conductor es equipotencial puesto que la fuerza (paralela al campo) no realiza trabajo y el campo en el exterior de un conductor se calcula empleando la ley de Gauss. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

Si bien, la densidad superficial de carga no es la misma toda la superficie del conductor (depende de la curvatura local de la superficie), por lo que el módulo del campo eléctrico que crea tampoco será el mismo en todos los puntos, si se considera un pequeño elemento de superficie, éste es aproximadamente plano, como se ilustra en la figura, el campo creado por este pequeño elemento de superficie se calcula determinando el flujo a través de la superficie cerrada representada en rojo en la figura. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

Figura 2.10

Campo Creado por Elemento



Fuente: (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

Nota: Representación de los campos creados por un elemento.

El cálculo es análogo al realizado para determinar el campo creado por un plano infinito, la diferencia es que ahora el flujo a través de la base del cilindro que se encuentra en el interior del sólido es nulo (puesto que no hay líneas de campo en el interior), por lo cual. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

$$\Phi = \int_{Base1} \vec{E} d\vec{S} = \int_{Base1} E dS = ES \quad ES = \frac{q}{\epsilon_0}; \quad \boxed{E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}}$$

En esta situación, cuanto mayor sea σ en una zona de la superficie del conductor, mayor será el módulo del campo eléctrico que crea, por tanto, el campo eléctrico es por tanto mayor en un conductor en punta (donde se acumulan las

cargas) que en uno plano. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

Propiedades de los Conductores en Equilibrio

Electrostático

Las propiedades de los conductores en equilibrio electrostático se pueden resumir en: (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

- El campo eléctrico en el interior es nulo.
- La carga eléctrica se distribuye sobre la superficie, concentrándose en las zonas de menor radio de curvatura (es decir, más puntiagudas).
- La superficie del conductor es una superficie equipotencial. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)
- El campo eléctrico en la superficie está dirigido hacia afuera y es perpendicular a la superficie. (Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández., s. f.-a)

Pantalla Electroestática

Andrés Granero, expresa que las perturbaciones de Alta Frecuencia causadas por las variaciones bruscas de carga en el secundario pueden ser conducidas a través del transformador y repercutir en la red de alimentación, y para reducir estos efectos, los transformadores pueden fabricarse con una pantalla electrostática diseñada para atenuar las perturbaciones de

Alta Frecuencia (Armónicos), por supuesto, esta pantalla se utiliza igualmente para impedir la transmisión de señales de Alta Frecuencia del primario al secundario en condiciones de defecto o transitorios tales como: (Andrés Granero, 2015)

- Ondas de choque tipo rayo. (Andrés Granero, 2015)
- Interrupciones bruscas de la carga. (Andrés Granero, 2015)
- Operaciones de reguladores en carga. (Andrés Granero, 2015)
- Sobretensiones transitorias. (Andrés Granero, 2015)

Con respecto a la fabricación del transformador, estas pantallas aumentan las dimensiones del transformador y con relación a su instalación deberán tomarse precauciones especiales para que su conexión a tierra se realice de forma correcta con objeto de evitar que la pantalla adquiera potenciales elevados, una pantalla electrostática está formada por una lámina o espira metálica (Cu o Al) no cerrada, separando el primario del secundario. (Andrés Granero, 2015)

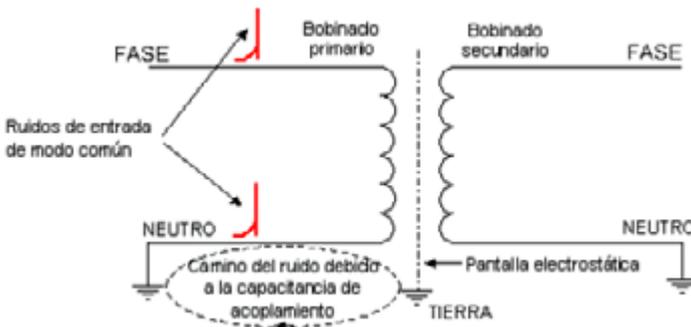
Considerando que, el régimen de neutro del centro de transformación juega también un papel importante en lo que se refiere a la transmisión de la onda de choque a la BT, definitivamente, aparte de la transmisión capacitiva a través del transformador, la onda de corriente del rayo desarrolla en la impedancia de la toma de tierra una tensión tanto más importante cuanto más auto inductivo sea la misma. (Andrés Granero, 2015)

Perturbaciones de Alta Frecuencia a Través de los Transformadores

Entre los bobinados, existe una capacidad en todos los transformadores, por intermedio de, este camino de la capacidad entre bobinados que los ruidos de alta frecuencia pueden acoplarse al bobinado secundario, no obstante al utilizar una pantalla electrostática conectada a tierra para separar el bobinado primario del secundario, la capacidad entre los mismos queda reducida de forma significativa, incrementado la impedancia (resistencia) de esta vía de acoplamiento, y por esta razón, se reduce notablemente la cantidad de energía de alta frecuencia que se puede manifestar en el bobinado secundario. (Andrés Granero, 2015)

Figura 2.11

El Transformador Filtra por su Naturaleza los Ruidos de Modo Común, la Pantalla Electrostática Entre los Bobinados Filtra los Ruidos de Alta Frecuencia en Modo Normal



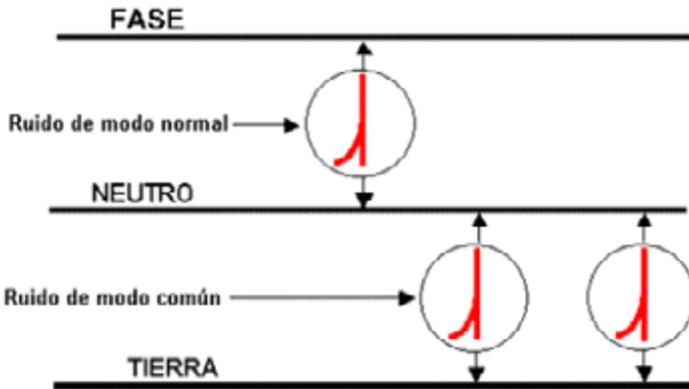
Fuente: (Andrés Granero, 2015)

Nota: Diagrama de un transformador.

El ruido de modo común (MC) está presente tanto en el conductor de fase como de neutro, y es medido con respecto a tierra, el término común se refiere al hecho de que un ruido idéntico aparece en el conductor de fase y neutro, por otra parte, puede ser causado por descargas atmosféricas, la operación de interruptores, o una mala conexión de tierra, también el uso de protectores de sobretensión puede crear ruidos de modo común, debido a que, la energía del ruido en modo normal es derivada dentro del conductor de neutro. (Andrés Granero, 2015)

Figura 2.12

Fase



Fuente: (Andrés Granero, 2015)

Nota: Ruidos entre fase, neutro y tierra.

Por último, los ruidos que pueden ser medidos entre fase y neutro, son llamados ruidos de modo normal (en alta frecuencia) o ruidos de modo diferencial o transversal (MD), adicionalmente, la mayoría de los ruidos de modo normal

son producto del encendido o apagado de grandes cargas, fundamentalmente grandes motores o condensadores de corrección de factor de potencia. (Andrés Granero, 2015)

Función de las Pantallas Electroestáticas en Transformadores de Aislamiento (TDA)

Los transformadores de aislamiento se pueden clasificar por su número de pantallas: (Andrés Granero, 2015)

- Apantallamiento sencillo (una pantalla)
- Doble apantallamiento.
- Triple apantallamiento (ultra-aislamiento)

Apantallamiento Sencillo

- Puede suprimir interferencias de modo común en el lado primario a frecuencias de hasta 100kHz, proporcionando aislamiento del orden de 120-140 dB. (Andrés Granero, 2015)
- Este aislamiento (dB) es limitado por la resistencia AC del aislamiento ($M\Omega$) entre primario y secundario a bajas frecuencias. (Andrés Granero, 2015)
- Tiene problemas cuando se incrementa la frecuencia por encima de los 100kHz, porque la capacitancia entre primario y secundario decrece ($X_c = 1/2\pi fC$)
- No suprimen adecuadamente interferencias de modo diferencial (Andrés Granero, 2015)

La inclusión de una pantalla de Faraday entre los devanados elimina la capacidad parásita entre estos, pero también establece dos nuevas capacidades entre la pantalla y cada uno de los devanados, dichas capacidades permiten que las corrientes de alta frecuencia fluyan hacia los sistemas de puesta a tierra, tanto del devanado primario como del secundario. (Andrés Granero, 2015)

Por otra parte, en el caso de tener problemas con transitorios rápidos de alta frecuencia y descargas electrostáticas (ESD), la pantalla colocada entre los dos devanados no es tan efectiva a altas frecuencias debido al amplio espectro de frecuencias, sobre todo de las ESD, a bajas frecuencias la solución de una pantalla es buena, pero a medias y altas frecuencias, la atenuación de las EMIs entre el primario y el secundario, tanto en modo común (MC) como en modo diferencial (MD) simultáneamente, no es óptima, envista que los dos modos están presentes a la vez, se debe usar una doble pantalla electrostática. (Andrés Granero, 2015)

Doble Apantallamiento

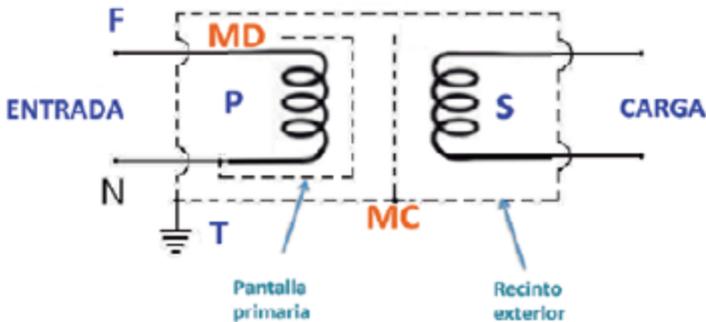
Al agregar una segunda pantalla en el devanado primario actúa como una trayectoria de baja impedancia para las EMIs de MC que viajan de una pantalla a la siguiente, eliminando la conversión de MC a MD que es inherente a los transformadores. (Andrés Granero, 2015)

En un transformador de aislamiento (TDA) con 2 pantallas, la pantalla enfrentada hacia el lado del primario se conecta al neutro del primario para suprimir las EMIs en MD,

es decir la pantalla enfrentada al secundario se conecta a la tierra de referencia para suprimir las EMIs en MC, y ambas pantallas normalmente suministrarán 60-80 dB de atenuación de EMI en MC desde 100 Hz a 1MHz. (Andrés Granero, 2015)

Figura 2.13

TDA con Doble Pantalla Electroestática



Fuente: (Andrés Granero, 2015)

Nota: Diagrama de un TDA con doble pantalla electroestática

Triple Apantallamiento

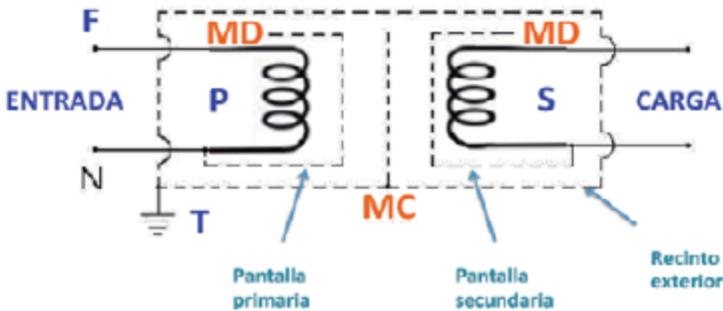
Cuando las cargas conectadas en el secundario generan EMIs en MC, es factible evitar su propagación a otros equipos a través de un TDA, en esta situación, se puede bloquear el camino, añadiendo una tercera pantalla que se conecta a uno de los polos del devanado secundario (neutro del secundario). (Andrés Granero, 2015)

Al contar con un TDA con triple pantalla, la pantalla central se conecta a tierra, mientras las demás pantallas se conectan al neutro del primario y del secundario respectivamente,

con esta configuración, el TDA de tres pantallas normalmente suministrará 65-80 dB de atenuación de EMIs en MC desde 100 Hz a 1MHz, y la técnica, reduce la capacidad por debajo de 0,009 pF, e incrementa el aislamiento por encima de los 100 MΩ. (Andrés Granero, 2015)

Figura 2.14

TDA con Tres Pantallas Electroestáticas



Fuente: (Andrés Granero, 2015)

Nota: Diagrama de un TDA con tres pantallas electroestáticas.

Aclaración: Para evitar las perforaciones en la parte BT de los centros de transformación, la paramenta correspondiente debe poseer un aislamiento reforzado (10 kV/50 Hz), adicionalmente, si en la BT existen elementos sensibles tales como equipos informáticos, elementos de mando y control, etc., es recomendable interponer pantallas electroestáticas en los transformadores de alimentación. (Andrés Granero, 2015)



Capítulo 3

Frontera Entre Conductores y el Vacío

Figura 3

Capacitancia y Materiales Dieléctricos



Fuente: (Capacitancia y materiales dieléctricos, s. f.)

Nota: Dispositivos que almacenan carga y energía.

Objetivos

Al terminar este capítulo podrá:

1. Estar al corriente y aclarar ¿Qué es la forma diferencial e integral de la ley de Gauss?
2. Dominar y mostrar ¿Qué es la ecuación de Poisson y Laplace?
3. Saber y aclarar ¿Qué son los dieléctricos?
4. Estar al tanto y presentar ¿Cuáles son las aplicaciones de los dieléctricos?
5. Comprender y describir al dipolo eléctrico.

Forma Diferencial de la Ley de Gauss

José Antonio Hervás, en “Interacción Eléctrica - Ley De Gauss”, nos indica que, el significado físico del teorema de Gauss en su forma diferencial es que relaciona el campo eléctrico E en un punto del espacio con la distribución de carga, expresada por ρ , en el mismo punto; es decir que expresa una relación local entre dos cantidades físicas. (José Antonio Hervás, s. f.)

De esta manera, se puede expresar que, las cargas eléctricas son las fuentes del campo eléctrico y que su distribución y magnitud determinan el campo eléctrico en cada punto del espacio. (José Antonio Hervás, s. f.)

Forma Diferencial de la Ley de Gauss

Al tomar la ley de Gauss en su forma integral. (*Ley de Gauss*, 2021)

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

Si le aplicamos al primer término el teorema de Gauss de la divergencia, nos queda la siguiente expresión. (*Ley de Gauss*, 2021)

$$\int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

Como ambos lados de la igualdad poseen diferenciales volumétricas, y esta expresión debe ser cierta para cualquier volumen, solo puede ser que: (*Ley de Gauss*, 2021)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Que es la forma diferencial de la Ley de Gauss (en el vacío), adicionalmente la ley se puede generalizar cuando hay un dieléctrico presente, introduciendo el campo de desplazamiento eléctrico \vec{D} , de esta manera la Ley de Gauss se puede escribir en su forma más general como: (*Ley de Gauss*, 2021)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

Finalmente es de esta forma en que la ley de Gauss es realmente útil para resolver problemas complejos de maneras relativamente sencillas. (*Ley de Gauss*, 2021)

Forma Integral de la Ley de Gauss

Su forma integral utilizada en el caso de una distribución extensa de carga puede escribirse de la manera siguiente: (*Ley de Gauss*, 2021)

$$\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV = \frac{Q_A}{\epsilon_0}$$

Donde Φ es el flujo eléctrico, \vec{E} es el campo eléctrico, $d\vec{A}$ es un elemento diferencial del área A sobre la cual se realiza la integral, Q_A es la carga total encerrada dentro del área A , ρ es la densidad de carga en un punto de V y ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío. (Ley de Gauss, 2021)

Ecuación de Poisson y Laplace

Lino Spagnolo, nos indica que, en el análisis del campo eléctrico se han presentado diversas alternativas, si se conoce una distribución de cargas eléctricas se calcula el campo eléctrico con las leyes de Coulomb o de Gauss, mientras que, si se conoce el potencial en toda la región el campo eléctrico se calcula con la fórmula siguiente. (Lino Spagnolo., s. f.)

$$\vec{E} = -\nabla V$$

Pese a lo citado, en la práctica es poco común que se conozcan algunas de esas dos alternativas, en realidad, es más frecuente conocer las condiciones electrostáticas de cargas o potencial en algunas regiones particulares como el potencial en las placas de un condensador o el movimiento de una carga (electrones) en el interior de un tubo de alto vacío, etc., estas condiciones se generalizan llamándolas condiciones de borde o de contorno y también problemas de borde o frontera, y con

esos valores se desea hallar el campo \vec{E} y el potencial V en toda la región. (Lino Spagnolo., s. f.)

Para esta situación, se utilizan las ecuaciones de Laplace o de Poisson cuyo significado se deduce a partir de la Ley de Gauss para el campo electrostático en medios lineales. (Lino Spagnolo., s. f.)

$$\nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} = \rho$$

Y dado que:

$$\vec{E} = -\nabla V \rightarrow \therefore \nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho}{\epsilon} \text{ o } \nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

La expresión indicada, constituye la ecuación de Poisson, mientras que la ecuación de Laplace es para el caso particular de una región sin cargas. (Lino Spagnolo., s. f.)

$$\rho = 0 \rightarrow \therefore \nabla^2 V = 0$$

Cabe mencionar la existencia de un importante teorema denominado Teorema de Unicidad, que asegura que, una solución de las ecuaciones de Laplace o de Poisson, obtenida por un medio matemático gráfico, analítico, de elementos finitos, etc., es la solución única y correcta del problema si se contemplaron debidamente las condiciones de contorno, por último, sin entrar en los detalles de esta prueba, aplicaremos la fórmula de Poisson o Laplace en casos bien específicos para familiarizarnos con su uso. (Lino Spagnolo., s. f.)

Dieléctricos

Julián Pérez Porto, explica que, el término de dieléctrico es un adjetivo que se utiliza para calificar al material que, por sus características, no resulta un buen conductor de la electricidad, siendo su conductividad eléctrica, por lo tanto, reducida. (Julián Pérez Porto, 2020)

Adicionalmente es importante recordar que se denomina electricidad a la fuerza manifestada a través del rechazo o la atracción entre partículas con carga, y que, a la forma de energía que se basa en dicha fuerza también se la conoce como electricidad, por otro lado la conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo para permitir el paso de la corriente eléctrica a través suyo y los buenos conductores, de este modo, no obstaculizan ese paso, a diferencia de lo que ocurre con los malos conductores.(Julián Pérez Porto, 2020)

Reanudando el concepto de dieléctrico, que habla del elemento que es un mal conductor eléctrico que, dicho de otra manera, la corriente eléctrica encuentra grandes dificultades para atravesar un material que es dieléctrico y debido a sus propiedades funcionan como aislantes, teniendo entre ellos al papel, la cerámica, el vidrio, así mismo el aire es dieléctrico, al igual que otros gases y también que varios líquidos (como el aceite de ricino). (Julián Pérez Porto, 2020)

Es importante no olvidar y siempre tener en cuenta que, la capacidad aislante no es infinita, los cuerpos dieléctricos resisten un valor máximo de intensidad del campo eléctrico que

se conoce como rigidez dieléctrica, superada dicha marca, el material se vuelve conductor. (Julián Pérez Porto, 2020)

Se puede afirmar, en este marco, que los materiales dieléctricos cuentan con distintos grados de permitividad, esto alude a la capacidad que tienen para que el campo eléctrico se establezca o no. (Julián Pérez Porto, 2020)

Otra definición encontrada en Wikipedia, la enciclopedia libre, plantea que, se denomina dieléctrico a un material con una baja conductividad eléctrica ($\sigma \ll I$); dicho con otras palabras, un aislante, que tiene el atributo de formar dipolos eléctricos en su interior bajo la acción de un campo eléctrico, de esta manera, diremos que, todos los materiales dieléctricos son aislantes, sin embargo, no todos los materiales aislantes son dieléctricos. (*Dieléctrico*, 2020)

El término “dieléctrico” (del griego δια- día-, que significa ‘a través de’) fue concebido por William Whewell en respuesta a una petición de Michael Faraday. (*Dieléctrico*, 2020)

Adicionalmente, algunos ejemplos de este tipo de materiales son el vidrio, la cerámica, la goma, el petróleo, la mica, la cera, el papel, la madera seca, la porcelana, algunas grasas para uso industrial y electrónico y la baquelita, en tanto, a los gases se utilizan como dieléctricos el aire, el nitrógeno y el hexafluoruro de azufre. (*Dieléctrico*, 2020)

Aplicaciones

Como ya se comentó en la sección superior los dieléctricos más utilizados son el aire, el papel y el Policloruro de vinilo y si bien, la introducción de un dieléctrico en un condensador aislado de una batería, presenta los siguientes resultados: (*Dieléctrico*, 2020)

- Disminuye el campo eléctrico entre las placas del condensador. (*Dieléctrico*, 2020)
- Disminuye la diferencia de potencial entre las placas del condensador, en una relación V_i/k . (*Dieléctrico*, 2020)
- Aumenta la diferencia de potencial máxima que el condensador es capaz de resistir sin que salte una chispa entre las placas (ruptura dieléctrica). (*Dieléctrico*, 2020)
- Aumento por tanto de la capacidad eléctrica del condensador en k veces. (*Dieléctrico*, 2020)
- La carga no se ve afectada, ya que permanece la misma que ha sido cargada cuando el condensador estuvo sometido a un voltaje. (*Dieléctrico*, 2020)

Por lo regular un dieléctrico se vuelve conductor cuando se sobrepasa el campo de ruptura del dieléctrico, esta tensión máxima se denomina rigidez dieléctrica, en otros términos, si aumentamos mucho el campo eléctrico que pasa por el dieléctrico convertiremos dicho material en un conductor. (*Dieléctrico*, 2020)

Tenemos que la capacitancia con un dieléctrico llenando todo el interior del condensador (plano-paralelo) está dado por la siguiente expresión y representa a la permitividad eléctrica del vacío. (*Dieléctrico*, 2020)

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d}$$

Dipolo Eléctrico

La definición presentada en, Wikipedia la enciclopedia libre, para dipolo eléctrico es, un sistema de dos cargas de signo opuesto e igual magnitud cercana entre sí, aparecen en cuerpos aislantes dieléctricos, a diferencia de lo que ocurre en los materiales conductores, en los aislantes los electrones no son libres. (*Dipolo eléctrico*, 2021)

Además al aplicar un campo eléctrico a un dieléctrico aislante éste se polariza dando lugar a que los dipolos eléctricos se reorienten en la dirección del campo disminuyendo la intensidad de éste, el caso de la molécula de agua, aunque tiene una carga total neutra (igual número de protones que de electrones), presenta una distribución asimétrica de sus electrones, lo que la convierte en una molécula polar, alrededor del oxígeno se concentra una densidad de carga negativa, mientras que los núcleos de hidrógeno quedan desnudos, desprovistos parcialmente de sus electrones y manifiestan, por tanto, una densidad de carga positiva, en vista a esto en la práctica, la molécula de agua se comporta como un dipolo. (*Dipolo eléctrico*, 2021)

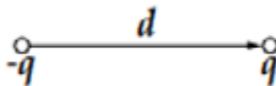
Lo expresado, nos indica cómo se establecen las interacciones dipolo-dipolo entre las propias moléculas de agua, formándose enlaces o puentes de hidrógeno, la carga parcial negativa del oxígeno de una molécula ejerce atracción electrostática sobre las cargas parciales positivas de los átomos de hidrógeno de otras moléculas adyacentes, a pesar de que, son uniones débiles, el hecho de que alrededor de cada molécula de agua se dispongan otras cuatro moléculas unidas por puentes de hidrógeno permite que se forme en el agua (líquida o sólida) una estructura de tipo reticular, responsable en gran parte de su comportamiento anómalo y de la peculiaridad de sus propiedades fisicoquímicas. (*Dipolo eléctrico*, 2021)

Dipolo Eléctrico

Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, sugieren que, un dipolo eléctrico es cada conjunto de dos cargas puntuales opuestas separadas, y el Brazo de un dipolo es el vector d de origen en el punto que ocupa $-q$ y extremo el que ocupa q . (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Figura 3.1

Dipolo Eléctrico



Fuente: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Nota: Representación de un dipolo eléctrico.

Asimismo, el vector $p = qd$ se denomina momento del dipolo o momento dipolar y su unidad es Cm (culombio metro). (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

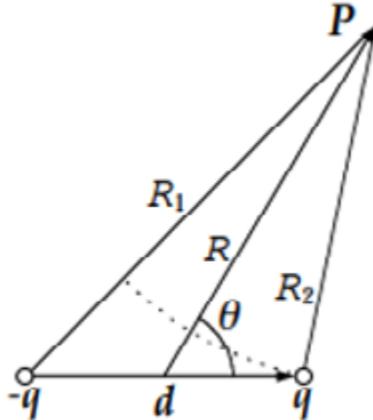
Dipolo Puntual

Con origen de potenciales en el infinito, el potencial que un dipolo crea en un punto P (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2} \right)$$

Figura 3.2

Dipolo Puntual es el Dipolo en el que R es Mucho Mayor que D



Fuente: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Nota: Representación de un dipolo puntual.

Si el módulo d del brazo del dipolo es despreciable frente a los módulos de R_1 y R_2 , la diferencia $R_1 - R_2$ de la fórmula anterior es aproximadamente la proyección de d sobre R_1 , y como R_1 tiende entonces a R resulta (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$R_1 - R_2 \cong d \cos \theta = d \frac{R}{R}$$

Se ha empleado que la proyección de un vector sobre la dirección de otro, d sobre R en este caso, es el producto escalar de d por el vector unitario $\frac{R}{R}$ en la dirección de R , sustituyendo en la fórmula del potencial queda la expresión: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} * \frac{d \cos \theta}{R^2} = \frac{qd * R}{4\pi\epsilon_0 R^3} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} p * \nabla \left(\frac{1}{R} \right)$$

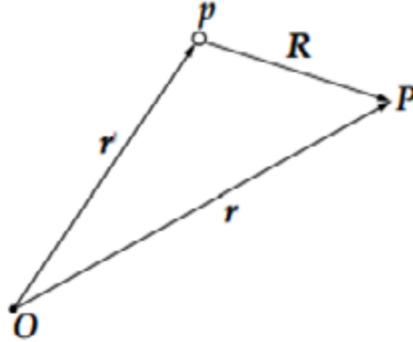
Se ha utilizado que:

$$p = qd \text{ y que } \frac{R}{R^3} = -\nabla \left(\frac{1}{R} \right)$$

También, Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, indican que, en un dipolo en el que se hace esa aproximación se denomina dipolo puntual, y R es entonces el vector con origen en el dipolo y extremo en el punto (x, y, z) en que se halla el potencial. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Figura 3.3

Dipolo Puntual en el Punto R'



Fuente: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Nota: Representación de un dipolo puntual en el punto r' .

Si (x', y', z') son las coordenadas del punto que ocupa el dipolo en la figura, entonces

$R = (x - x')i + (y - y')j + (z - z')k$ por lo que: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}}$$

Es función de x, y, z, x', y', z' . El gradiente de $1/R$, que hemos escrito $\nabla(1/R)$, es el vector cuyas componentes son las derivadas parciales de $1/R$ respecto a las variables x, y, z , el

termino $\nabla'(1/R)$ significa hallar el gradiente de $1/R$ respecto a las variables son x', y', z' . (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Si se hallan los dos gradientes se ve que: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$\nabla * \frac{1}{R} = \nabla * \frac{1}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}} = -\nabla' * \frac{1}{R}$$

Con lo que:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} p * \nabla' \left(\frac{1}{R} \right)$$

Esta será la fórmula del potencial de un dipolo que utilizaremos en lo que sigue. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Conductores y Dieléctricos

Siendo v el volumen limitado por la superficie cerrada S , se conocerá como partícula fija o partícula ligada, a la posición de una partícula en v , que no cambia respecto a la superficie S , mientras que, se llama partícula confinada en v' , a la situación donde $v' \subset v$, y una partícula no puede abandonar el volumen v' , que es el volumen de confinamiento de esa partícula. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Adicionalmente, se conoce como partícula libre en el volumen v , a una partícula cuyo volumen de confinamiento es todo v , porque, se partícula cuyo volumen de confinamiento es todo v , también se llama carga fija o carga ligada a una partícula fija con carga y una partícula libre con carga se llama carga libre. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Se sabe que, cada átomo de un sólido vibra confinado en un pequeño volumen del sólido, no obstante, como ese volumen suele ser pequeño comparado con el volumen total del sólido, los átomos de los sólidos se consideran partículas fijas. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

De igual manera, debemos saber que, hay grandes espacios vacíos, entre los átomos de los cuerpos, una ilustración clara de lo expresado es el vacío existente entre las estrellas, y de forma parecida a como alrededor de cada estrella giran sus planetas, alrededor del núcleo de cada átomo giran sus electrones. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Pero, aumentando su energía, algunos electrones de la última capa pueden abandonar el átomo al que pertenecen y convertirse en electrones libres, que vagan en el vacío que existe entre los átomos como algunos cuerpos celestes se mueven por el espacio, sin permanecer girando alrededor de ninguna estrella. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

En el caso de los metales ya ocurre eso sin necesidad de energía, pues a cualquier temperatura tienen electrones libres,

así todas las moléculas de los líquidos y gases, y los iones que pueda haber entre ellas son partículas libres, pues se mueven por todo el volumen del fluido. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Por ejemplo, los iones tienen carga, son cargas libres, a modo de ejemplo, en una disolución acuosa de una sal, de un ácido o de una base hay iones positivos y negativos, que son cargas libres. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Al mismo tiempo en la atmósfera, junto a las moléculas neutras de oxígeno, nitrógeno, etc. Hay iones de estos y otros cuerpos originados por los rayos cósmicos, por tormentas o por otras causas, poseen iones que son cargas libres. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Algunas otras definiciones que Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, presentan para algunos términos son:

- **Conductor:** Es un volumen con cargas libres, a modo de ejemplo, un sólido y un líquido con cargas libres son conductores, así mismo, los metales son conductores. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)
- **Aislantes:** Son volúmenes sin cargas libres, como muestra de lo indicado, el vacío es, por tanto, un aislante, también los cuerpos que mantengan todos los electrones ligados a sus átomos son aislantes, a pesar de ello, a temperatura superior al cero absoluto hay

electrones libres en todos los cuerpos.(Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

- Cuanto menor sea su concentración más parece el cuerpo un aislante, debido a lo cual, en la práctica, se habla de buenos o malos conductores y de buenos o malos aislantes, por tanto, se dice que, los metales son buenos conductores, pues tienen muchos electrones libres, para ilustrar, el cobre y el aluminio son los más usados como conductores, en contra parte, el vidrio, la mica y ciertos plásticos se encuentran entre los mejores aislantes, que se llaman dieléctricos. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Dieléctricos como Distribuciones de Dipolos.

Polarización

Los dieléctricos son conjuntos de moléculas, en la cual, cada molécula tiene cargas positivas y negativas, que suman cero, por esta razón, las moléculas se pueden imaginar cómo conjuntos de pares de cargas puntuales opuestas separadas por pequeñas distancias, en otras palabras, describiremos cada molécula por un conjunto de dipolos. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Nos plantearemos la siguiente hipótesis de partida para estudiar los dieléctricos: “Que cada una de sus moléculas es un conjunto de dipolos”. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Se conocerá como, momento dipolar de esa molécula, a la suma vectorial de los momentos dipolares de todos los dipolos de una molécula, y moléculas polares, a las moléculas cuyo momento dipolar no es cero, mientras que, moléculas apolares o no polares, es cuando el momento dipolar es cero. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

A modo de ejemplo, y para ilustrar, las moléculas de agua son polares, las de dióxido de carbono apolares. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Como la distancia entre las cargas de los dipolos de las moléculas es microscópica, pueden considerarse dipolos puntuales si las distancias que se consideran son mucho mayores que los brazos de los dipolos moleculares. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Por este motivo, desde el punto de vista electrostático, un dieléctrico puede describirse por un conjunto de dipolos puntuales en el volumen del dieléctrico, lo que llamaremos distribución volúmica de dipolos puntuales y momento dipolar de ese volumen, a la suma de los momentos dipolares de los dipolos contenidos en un volumen. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Sea una distribución volúmica de dipolos puntuales en un volumen v , donde la polarización es una función vectorial P definida en v tal que el momento dipolar p' de cada volumen

v' contenido en v es:

$$p' = \int_{v'} P dv'$$

(Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Si existe, coincide en cada punto con:

$$P = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta v}$$

Donde el volumen Δv contiene a ese punto en ∇p es el momento dipolar del volumen Δv , en otras palabras, P es la densidad de momento dipolar en cada punto, o sea, el momento dipolar por unidad de volumen en cada punto. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Se ve que la unidad de P en el Sistema Internacional de Unidades es el $Cm/m^3 = C/m^2$ (culombio por metro cuadrado), la de una densidad superficial de carga. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Mientras que, si P es una función continua de x' , y' , z' , la distribución se llama distribución continua de dipolos puntuales y la polarización de un dieléctrico es la polarización de la distribución de sus dipolos moleculares. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Campo Creado por una Distribución de Dipolos Puntuales

Sea P la polarización de una distribución de dipolos puntuales, y si una parte dv de su volumen es pequeña, se puede considerar aproximadamente un dipolo puntual de momento dipolar a (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Según la fórmula, ese dipolo crea un potencial en un punto:

$$dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} P * V' \left(\frac{1}{R} \right) dv$$

En el cual, R es el vector que va desde cada dv al punto en el que se quiere hallar el potencial, mientras que, el potencial que toda la distribución crea en el punto considerado se obtiene integrando en todo el volumen de la distribución de dipolos puntuales: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v P * V' \left(\frac{1}{R} \right) dv$$

De la identidad:

$$\nabla' * \left(\frac{1}{R} P \right) = \frac{1}{R} \nabla' * P + P * \nabla' \left(\frac{1}{R} \right)$$

Se obtiene

$$P * \nabla' * \left(\frac{1}{R} \right) = \nabla' * \left(\frac{1}{R} P \right) - \left(\frac{1}{R} \nabla' \right) P$$

Sustituyendo en la fórmula del potencial,

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v \nabla' \left(\frac{1}{R} P \right) dv - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v \left(\frac{1}{R} \right) \nabla' * P dv$$

Por el teorema de Gauss o de la divergencia,

$$\int_v \nabla' \cdot \left(\frac{1}{R} P \right) dv = \oint_S \frac{1}{R} P \cdot dS$$

S es la superficie límite del volumen v. Sustituyendo y ordenando,

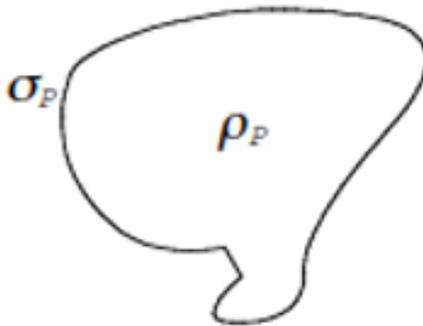
$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v \frac{-\nabla' \cdot P}{R} dv + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \frac{1}{R} P \cdot dS$$

Si hacemos $\rho = -\nabla' \cdot P$ y $\sigma = P \cdot n$, donde n es el vector unitario en la dirección y sentido del dS , es decir, normal a la superficie, queda: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v \frac{\rho_p}{R} dv + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \frac{\sigma_p}{R} dS$$

Figura 3.4

Un Dieléctrico Equivale a Dos Distribuciones Simultáneas de Carga: una Volúmica y otra Superficial



Fuente: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Nota: Representación de un dieléctrico con dos distribuciones simultáneas de carga: una volúmica y otra superficial.

A la última fórmula, se le puede dar una interpretación muy ingeniosa, resulta que el potencial que una distribución de dipolos puntuales crea en un punto es el mismo que si la distribución fuera una distribución volúmica de carga de densidad $\rho_p = -\nabla \cdot ' P$ y además tuviera en su superficie límite una densidad superficial de carga $\sigma_p = P \cdot n$. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

En resumidas cuentas, para todos los efectos electrostáticos, cada distribución volúmica de dipolos puntuales equivale a una distribución volúmica de carga con densidad ρ_p , con su superficie límite cargada con densidad superficial de carga σ_p . $\rho_p = -\nabla \cdot P$ se llama densidad volúmica de carga de polarización, y $\sigma_p = P \cdot n$ densidad superficial de carga de polarización, de manera que, el campo eléctrico que un dieléctrico o una distribución de dipolos puntuales crea en un punto vale (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v \frac{\rho_p dv}{R^3} R + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \frac{\sigma_p dS}{R^3} R$$

Si la polarización P es nula, las densidades volúmica y superficial de carga de polarización también lo son, y el campo que crea el dieléctrico es cero, aun cuando, el dieléctrico sea polar, la polarización puede ser nula en todos sus puntos, basta que los dipolos estén orientados de forma que la suma de sus momentos en cualquier volumen sea cero. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Este es el estado habitual de la mayor parte de los dieléctricos, tanto de los polares como de los no polares, que su polarización es cero en todos sus puntos, no obstante, si la polarización no es cero, la distribución equivale a dos distribuciones de carga de densidades ρ_p en el volumen de la distribución y σ_p en la superficie que la limita. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Si en la distribución hay otras cargas, la densidad que ha de considerarse en cada punto a todos los efectos electrostáticos es la total $\rho_t = \rho + \rho_p$, donde ρ es la densidad volúmica de cualquier otra carga distinta de la de polarización, lo mismo si hay otras cargas en la superficie: $\sigma_t = \sigma + \sigma_p$, por último, si no se ha incorporado carga adicional la carga total del volumen de la distribución de dipolos es cero, pues la carga positiva de cada dipolo es igual a la negativa. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Carga Latente de Polarización

Llamaremos carga volúmica de polarización de una distribución de dipolos puntuales a: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$q_{Pv} = \int_v \rho_p dv$$

En la cual, v es el volumen de la distribución, mientras que, se conocerá como, carga superficial de polarización de una distribución de dipolos puntuales a: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$q_{PS} = \oint_S \sigma_p dS$$

Donde S es la superficie cerrada que limita a v . (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Ambas cargas son las que tendría la distribución de carga que crearía en cada punto el mismo campo eléctrico que crea la distribución de dipolos o el dieléctrico al que describe la figura, también se denominan cargas latentes de polarización. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

La suma de las dos, $q_P - q_{Pv} + q_{PS}$ se llama carga total de polarización o carga latente total de polarización, así mismo el teorema nos indica que: “La carga latente total de polarización de una distribución de dipolos puntuales es cero”. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$\begin{aligned} q_P = q_{Pv} + q_{PS} &= \int_v \rho_p dv + \oint_S \sigma_p dS = \int_v (-\text{div } \mathbf{P}) dv + \oint_S \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} dS = \\ &= -\int_v \text{div } \mathbf{P} dv + \int_v \text{div } \mathbf{P} dv = 0 \end{aligned}$$

Aplicando el teorema de la divergencia, según el cual indica que, v es el volumen de la distribución y S la superficie que lo limita. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$\oint_S \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} dS = \int_v \text{div } \mathbf{P} dv$$

El resultado obtenido es interesante, pues muestra que el campo creado por un dieléctrico polarizado sin carga adicional se debe a una redistribución de su carga, que equivale a densidades de carga en cada punto no nulas, aunque la carga total es siempre cero. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Ley de Gauss para Dieléctricos

Establecida la equivalencia entre un dieléctrico o distribución de dipolos y una distribución de carga, ya se puede aplicar al dieléctrico las propiedades ya estudiadas, únicamente hay que recordar que la densidad de carga en cada punto de un dieléctrico o de una distribución de dipolos puntuales debe incluir, además de otras posibles, la carga de polarización. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Entonces, si el campo E en cada punto de un dieléctrico está creado solo por cargas eléctricas, incluidas las de polarización, la ley de Gauss para cada punto de un dieléctrico se escribe. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_t}{\epsilon_0} = \frac{\rho + \rho_p}{\epsilon_0} = \frac{\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}}{\epsilon_0}$$

En la cual, ρ_p es la densidad volúmica de la carga de polarización y ρ es la densidad de carga debida a otras cargas añadidas distintas de las de los dipolos, adicionalmente nombraremos a ρ densidad volúmica de carga adicional y $\rho_t = \rho + \rho_p$ es la densidad volúmica de carga total. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

De la ecuación antes descrita se obtiene que,

$$\nabla * (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \rho$$

El vector $\mathbf{D} = (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P})$ se llama vector desplazamiento eléctrico o, simplemente, vector desplazamiento, posee la

misma unidad que P : C/m^2 , la de densidad superficial de carga. Resulta $\nabla \cdot D = \rho$ que es una forma muy sencilla de la ley de Gauss, válida con independencia de si el medio es material o es el vacío. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

En este último caso, como en el vacío no hay moléculas polarizadas ni no polarizadas, la polarización P vale cero, con lo que:

$$D = \epsilon_0 E \text{ y } \nabla \cdot D = \epsilon_0 \nabla \cdot E = \rho \text{ o } \nabla * E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

que es la relación encontrada para el vacío. Nótese, por tanto, que las dos ecuaciones presentadas son equivalentes. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

No es que la ley de Gauss para los dieléctricos añada algo que la misma ley para el vacío no contuviera, ya que se ha deducido de la ley para el vacío, y, recíprocamente, de la ley de Gauss para los dieléctricos acabamos de deducir la ley para el vacío. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Como a su vez la ley de Gauss para el vacío es equivalente a la ley de Coulomb, resulta que también la ley de Gauss para los dieléctricos es equivalente a la ley de Coulomb: cualquiera de las tres puede tomarse como axioma, como punto de partida para construir la Electroestática. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

A las mismas relaciones se habría llegado a partir de la forma integral de la ley de Gauss en el vacío. En efecto, en cualquier superficie cerrada S de un dieléctrico (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$\begin{aligned}\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} &= \frac{q_t}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_v (\rho + \rho_p) dv = \frac{1}{\epsilon_0} \int_v \rho dv - \frac{1}{\epsilon_0} \int_v \nabla \cdot \mathbf{P} dv = \\ &= \frac{1}{\epsilon_0} \int_v \rho dv - \frac{1}{\epsilon_0} \oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S}\end{aligned}$$

El volumen v en el que se calcula la integral es el limitado por la superficie cerrada, y se ha utilizado el teorema de la divergencia, para poder comparar el primer miembro y el último, y así obtener la expresión: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$\begin{aligned}\oint_S (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) \cdot d\mathbf{S} &= \int_v \rho dv = q \\ \mathbf{D} &= \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}\end{aligned}$$

Que es el desplazamiento y q la carga distinta de la carga de polarización en el volumen considerado, se deduce el siguiente resultado: (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho dv = q$$

Que es la ley de Gauss en su forma integral: “el flujo de D a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga

adicional que haya en el volumen limitado por esa superficie”, adicionalmente, nótese en la anterior igualdad que el flujo del vector desplazamiento a través de una superficie tiene dimensión de carga eléctrica, o sea, se mide en C . (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Rigidez Dieléctrica

Según Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, si el campo que se aplica a un aislante es suficientemente elevado, puede arrancar electrones de sus moléculas, ionizándolas, y originando cargas libres que hacen perder al material sus propiedades de aislante. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

El mayor módulo de campo eléctrico que se puede aplicar a un aislante sin que ionice sus moléculas se llama rigidez dieléctrica del aislante, y los campos eléctricos de módulo superior a la rigidez dieléctrica de un aislante se llaman campos eléctricos ionizantes para ese aislante, mientras que, los de módulo menor se llaman campos eléctricos no ionizantes. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)

Los campos eléctricos que polarizan un dieléctrico han de ser no ionizantes, o sea, de módulos menores que la rigidez dieléctrica del dieléctrico, única forma de que polarice sus moléculas sin ionizarlas, por último, la rigidez dieléctrica de los aislantes depende de diversas variables, como de su humedad y de su temperatura, y se conoce que la rigidez dieléctrica del aire es próxima a 30 kV/cm. (Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor, s. f.)



Capítulo 4

Campo de Corriente Estacionaria y Magnetostática en el Vacío

Figura 4

Magnetismo



Fuente: (Univision, 2018)

Nota: Magnetismo e imanes.

Objetivos

Al terminar este capítulo podrá:

1. Estar al corriente y aclarar ¿Qué es el campo de corriente estacionaria?
2. Tener conocimiento y decir ¿Qué es la fuerza magnética?
3. Comprender y expresar ¿Qué es la Magnetostática?
4. Enterarse y aclarar sobre la inducción electromagnética.
5. Tener información y describir ¿Qué es la magnetización?
6. Descubrir y revelar ¿Cuáles son los tipos o mecanismos de magnetización?

Campo de Corriente Estacionaria

Fuerza Magnética

Sobre una Carga en Movimiento

En electrostática, se estudia que, una carga puntual en reposo experimenta una fuerza $F = qE$ y que, si esta carga se encuentra en movimiento, debemos añadir una fuerza adicional, proporcional a la velocidad y ortogonal a ella, de acuerdo con la ley de Lorentz. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Se denomina fuerza magnética, a esta fuerza adicional añadida, y campo magnético, al campo vectorial \mathbf{B} , que da la magnitud de esta fuerza, (también conocido como inducción magnética y como densidad de flujo magnético). (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Adicionalmente, la medida en el SI, Tesla (T) es usada para la medición del campo magnético, siendo $1 \text{ T} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$, no obstante, un Tesla es una cantidad grande para los valores usuales, por este motivo con frecuencia se usa como unidad el Gauss ($1 \text{ Gauss} = 0.0001 \text{ T}$), y de igual importancia, una propiedad característica de la fuerza magnética sobre una carga magnética es que no realiza trabajo. (*Campo magnético de*

corrientes estacionarias, 2009)

$$W = \int \mathbf{F}_m \cdot d\mathbf{r} = \int (q\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot (\mathbf{v}dt) = 0$$

De manera que, permanecen constantes la energía cinética y la celeridad (módulo de la velocidad) de una carga que se mueve en un campo magnético. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Sobre una Distribución de Corriente

La fuerza sobre una carga en movimiento puede extenderse a un conjunto de ellas, que formarán una densidad de corriente. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009) Para el caso de una densidad \mathbf{J} la fuerza magnética, está dada por la expresión.

$$\mathbf{F}_m = \int \mathbf{J} \times \mathbf{B} d\tau$$

Y análogamente se tiene la fuerza sobre una distribución de corriente superficial y sobre un conductor filiforme. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

$$\mathbf{F}_m = \int \mathbf{K} \times \mathbf{B} dS \quad \mathbf{F}_m = I \int d\mathbf{r} \times \mathbf{B}$$

Si tenemos un conjunto de distribuciones, la resultante será la suma de la fuerza sobre cada una de ellas. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Campo Magnético Debido a una Corriente

La generación de los campos magnéticos pueden tener distintas causas, para ilustrar, entre ellas, se encuentran las propias corrientes eléctricas, mientras que, el campo magnético creado por una carga puntual en movimiento a velocidades bajas (comparadas con la de la luz) vale aproximadamente:

$$\mathbf{B} \simeq \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\mathbf{v}' \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}$$

(Campo magnético de corrientes estacionarias, 2009)

Siendo \mathbf{r}' la posición instantánea de la carga. μ_0 es una constante denominada permeabilidad del vacío, cuyo valor en el SI es.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$$

(Campo magnético de corrientes estacionarias, 2009)

Así mismo, integrando la expresión anterior, se puede calcular el campo magnético creado por una distribución de corriente lineal, a diferencia del caso de una corriente estacionaria, donde la aproximación se convierte en una igualdad y el campo magnético viene dado por la ley de Biot y Savart:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\mathbf{r}' \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}$$

(Campo magnético de corrientes estacionarias, 2009)

De forma análoga al caso de la corriente lineal tenemos el campo creado por una distribución de corriente estacionaria volumétrica y por una superficial. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d\tau' \quad \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{K} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dS'$$

En estas expresiones las densidades de corriente son funciones de la posición:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{r}') \quad \mathbf{K} = \mathbf{K}(\mathbf{r}')$$

Aplicaciones

Existen muy pocos casos que pueden resolverse de forma sencilla empleando la integración directa de la ley de Biot y Savart. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

- Un caso particular importante es el campo magnético de una corriente rectilínea de longitud finita o infinitamente larga que produce un campo, que gira en torno al hilo, siendo una circunferencia sus líneas de campo. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi \rho} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \mathbf{u}_\varphi$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi \rho} \mathbf{u}_\varphi$$

- De igual forma es importante el campo magnético de una espiral circular, que en los puntos de su eje vale:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I R^2 \mathbf{u}_z}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

- Este campo apunta en la dirección del eje de la espira, siendo máximo, con un valor $\mu_0 I / 2R$ en su centro. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Fuentes del Campo Magnético

Paralelamente, a lo que, ocurría con el campo eléctrico, el cálculo del campo magnético por integración directa, mediante la ley de Biot y Savart, es complejo incluso en los casos más elementales. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Por ello, y porque permite un estudio más profundo, es preferible determinar las fuentes de \mathbf{B} , esto es, calcular sus fuentes escalares (la divergencia de \mathbf{B}) y sus fuentes vectoriales (el rotacional de \mathbf{B}), ya que como prueba el teorema de Helmholtz, conocidos la divergencia y el rotacional de un campo, podemos determinar completamente el campo. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Ley de Gauss para el Campo Magnético

Para las fuentes escalares, tenemos, en forma integral:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

y en forma diferencial, aplicando el teorema de Gauss:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

En sus dos formas, esta ley expresa la ausencia de fuentes escalares magnéticas, esto es, el campo debido a corrientes eléctricas estacionarias nunca produce el efecto de una carga magnética aislada (*monopolo*), la ley es aplicable no sólo al caso de corrientes estacionarias, sino que se ha comprobado su validez en cualquier situación, esto es, no se han descubierto monopolos magnéticos. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Asociada a esta ley existe una condición de salto para el campo magnético en una interfaz entre dos regiones $n^*[\mathbf{B}] = 0$ que expresa que la componente normal del campo magnético alcanza el mismo valor en sendos lados de una frontera. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Ley de Ampère

Al tomar el rotacional en la ley de Biot y Savart se obtiene la ley de Ampère en su forma diferencial:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Mientras que, al aplicar el teorema de Stokes, se obtiene la forma integral:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 I$$

La forma integral, en palabras, expresa que la circulación del campo magnético de corrientes estacionarias a lo largo de una curva cerrada Γ es igual a la permeabilidad del vacío multiplicada por la corriente total que atraviesa una superficie arbitraria apoyada en Γ y orientada según la regla de la mano derecha. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Asociada a la ley de Ampère se encuentra la condición de salto $n^*[\mathbf{B}] = \mu_0 \mathbf{K}$ que nos da la discontinuidad en las componentes tangenciales del campo magnético como función de la densidad de corriente superficial. La ley de Ampère implica que el campo magnético, a diferencia del electrostático, sí tiene fuentes vectoriales, dadas por las densidades de corriente. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Geoméricamente, significa que las líneas de campo magnético tenderán a girar alrededor de las líneas de corriente. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Ecuaciones de la Magnetostática

Reuniendo las dos leyes anteriores, podemos describir completamente el comportamiento del campo magnético, por tal razón, al usarla ambas leyes juntas, se obtienen las denominadas leyes de la magnetostática: (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

TABLA 1.1

Leyes de la Magnetostática

	Diferencial	Salto	Integral
Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\mathbf{n} \cdot [\mathbf{B}] = 0$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$
Ampère	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$	$\mathbf{n} \times [\mathbf{B}] = \mu_0 \mathbf{K}$	$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 I$

Fuente: (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Nota: Ecuaciones de las leyes de la *magnetostática*.

Aplicaciones

Aparte de su esencial importancia teórica, la ley de Ampère (en combinación con la ley de Gauss para el campo magnético) es una poderosa herramienta para el cálculo de campos magnéticos en situaciones de alta simetría. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Así, permite hallar de forma sencilla. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

- El campo magnético de un hilo infinito por el cual circula una corriente I . (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho} \mathbf{u}_\varphi$$

- El campo magnético de un cable cilíndrico de radio a por el cual circula una densidad de corriente J_0 . (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \frac{\mu_0 J_0 \rho}{2} \mathbf{u}_\varphi & (\rho < a) \\ \frac{\mu_0 J_0 a^2}{2\rho} \mathbf{u}_\varphi & (\rho > a) \end{cases}$$

- El campo magnético de un solenoide ideal de radio a , con n espiras por unidad de longitud, por las que circula una corriente I . (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \mu_0 n I \mathbf{u}_z & (\rho < a) \\ \mathbf{0} & (\rho > a) \end{cases}$$

El Potencial Vector Magnético

De que el campo magnético sea solenoidal se deduce que puede expresarse como el rotacional de otro campo vectorial, llamado potencial vector magnético.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Adicionalmente, el potencial vector de un campo magnético dado no es único, en vista que, siempre se le puede sumar un gradiente de un campo escalar arbitrario. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Cuando se impone la condición adicional $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, el potencial vector verifica la ecuación de Poisson vectorial.

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Entre cuyas soluciones se encuentra.

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\tau'$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Con expresiones análogas para corrientes superficiales y lineales. El potencial vector posee poca utilidad práctica, aunque sí tiene importancia teórica y es útil a la hora de calcular

flujos magnéticos, ya que:

$$\Phi_m = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \oint_{\Gamma} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{r}$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Donde S una superficie apoyada en Γ y orientada según la regla de la mano derecha. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Desarrollo Multipolar Magnético

Cuando se tiene una distribución de corriente localizada en una pequeña región del espacio, puede aproximarse el campo en puntos alejados de la distribución mediante el desarrollo multipolar magnético. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Para el caso de una espira cerrada el potencial vector puede aproximarse por:

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \sim \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

En la cual m , es el momento magnético dipolar de la distribución, se expresa por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{m} = \frac{I}{2} \oint \mathbf{r}' \times d\mathbf{r}' = IS$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Este vector, para una espira lineal plana, tiene por módulo el producto de la corriente que circula por ella por el área delimitada por la curva, y apunta en la dirección normal según la regla de la mano derecha, mientras que, para el caso de una distribución de corriente de volumen o de superficie, la expresión para el potencial vector es idéntica, siendo el momento dipolar.

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} \int \mathbf{r}' \times \mathbf{J} d\tau' \quad \mathbf{m} = \frac{1}{2} \int \mathbf{r}' \times \mathbf{K} dS'$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

En ocasiones, m es nulo para una distribución dada, lo que obliga a recurrir a términos de orden superior en el desarrollo multipolar (término cuadrupolar, octupolar,). A partir del potencial vector puede hallarse el campo magnético, que resulta ser análogo al campo eléctrico de un dipolo p :

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - r^2\mathbf{m}}{r^5} + \dots$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Dipolo Magnético

Llamamos dipolo magnético, a una fuente de campo magnético que produce un campo magnético de la forma, que se caracteriza por su momento dipolar m .

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - r^2\mathbf{m}}{r^5}$$

(Campo magnético de corrientes estacionarias, 2009)

Puede corresponder a una pequeña espira, o a una distribución localizada de corriente, pero también existen dipolos magnéticos intrínsecos, que son una propiedad de las partículas, como su carga, y no corresponden a corriente alguna, por otra lado, cuando un dipolo magnético m se encuentra sometido a la acción de un campo magnético externo, experimenta una fuerza.

$$\mathbf{F} = (\mathbf{m} \times \nabla) \times \mathbf{B}_{\text{ext}}$$

(Campo magnético de corrientes estacionarias, 2009)

Sin embargo, en la mayoría de las situaciones se reduce a la expresión más cómoda y un momento de la fuerza.

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} + \mathbf{m} \times \mathbf{B}_{\text{ext}}$$

(Campo magnético de corrientes estacionarias, 2009)

En este caso, el segundo término representa un par intrínseco que tiende a alinear el dipolo con el campo magnético, lo que constituye el fundamento de las brújulas y, estas dos interacciones pueden derivarse de la energía de un dipolo en un campo externo.

$$U_m = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}_{\text{ext}}$$

(*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Esta energía es mínima cuando el dipolo apunta en la misma dirección y sentido que el campo aplicado sobre él, por si fuera poco, la similitud entre la forma del campo magnético de un dipolo magnético y la del campo eléctrico de un dipolo eléctrico sugiere una interpretación alternativa de los dipolos magnéticos. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Por tanto, con el caso eléctrico los podemos considerar como formados por una carga positiva (llamada polo norte) y una carga negativa (el polo sur), a diferencia del caso eléctrico, estas cargas serían inseparables. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Este modelo, aunque permite una fácil interpretación de muchos fenómenos magnéticos (como la fuerza entre imanes) falla a la hora de predecir una relación entre el momento dipolar y el momento angular. (*Campo magnético de corrientes estacionarias*, 2009)

Magnetostática

Los diccionarios, otorgan con definición de la magnetostática, al estudio de todos los fenómenos físicos en los que intervienen campos magnéticos constantes en el tiempo, así mismo, se dice que, abarca desde la atracción que ejercen los imanes y los electroimanes sobre los metales ferromagnéticos, como el hierro, hasta los campos magnéticos creados por corrientes eléctricas estacionarias.(*Educalingo*, 2021)

En realidad ambos fenómenos están estrechamente relacionados, ya que las corrientes eléctricas crean un campo magnético proporcional a la intensidad de corriente y que disminuye con la distancia.(*Educalingo*, 2021)

Adicionalmente, todo cuerpo que entra en un campo magnético toma una imantación que depende de su naturaleza, y que generalmente pierde al retirarse de ese campo; algunos aceros conservan parte del magnetismo inducido o magnetismo remanente, y hay cuerpos paramagnéticos que son atraídos por los imanes, y cuerpos diamagnéticos, que son repelidos por ellos.(*Educalingo*, 2021)

Historia del Electromagnetismo

Los fenómenos magnéticos fueron conocidos por los antiguos griegos.(*Magnetostática*, s. f.) Se dice que por primera vez se observaron en la ciudad de Magnesia del Meandro, ciudad antigua situada en el interior de la península turca de

la que apenas quedan hoy algunos restos arqueológicos, de ahí el término magnetismo. (*Magnetostática*, s. f.) Sabían que ciertas piedras atraían el hierro, y que los trocitos de hierro atraídos atraían a su vez a otros. (*Magnetostática*, s. f.) Estas se denominaron imanes naturales. (*Magnetostática*, s. f.)

El primer filósofo que estudió el fenómeno del magnetismo fue Tales de Mileto. (*Magnetostática*, s. f.) Descubrió la propiedad de atracción de ciertos metales en un mineral denominado “magnetita” (óxido férrico), que era abundante en la región de Magnesia. (*Magnetostática*, s. f.)

También descubrió que, frotando el hierro con magnetita, o manteniéndola durante un cierto tiempo bajo su influencia, se imantaba, es decir, adquiría la virtud magnética (*Magnetostática*, s. f.). Tales atribuyen alma, es decir, vida al imán, porque atrae al hierro, y la noción de atracción magnética era explicada por él de esta forma. (*Magnetostática*, s. f.)

El conocimiento del magnetismo se mantuvo limitado a los imanes, hasta que, en 1820, el físico y químico Danés Hans Christian Ørsted (1777 - 1851), descubre que la electricidad y el magnetismo están relacionados. (*Magnetostática*, s. f.) Según historiadores, Ørsted llevó a cabo en su lugar de residencia, experimentos demostrativos dedicados a amigos y estudiantes sobre electricidad y magnetismo. (*Magnetostática*, s. f.) Con la ayuda de una pila voltaica hizo circular una corriente eléctrica a través de un alambre. (*Magnetostática*, s. f.)

Usted notó que cada vez que la corriente circulaba por el alambre, la aguja de una brújula que había colocado cerca se movía, sugiriendo así, que debía haber una relación entre la electricidad y el magnetismo. (*Magnetostática*, s. f.)

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX era muy común describir este descubrimiento como resultado de una casualidad. (*Magnetostática*, s. f.) Sin embargo, para algunos historiadores, Ørsted ya había sugerido en 1812, que una corriente eléctrica tenía efectos sobre un material imantado. (*Magnetostática*, s. f.) Pero recién 8 años después, el 21 de julio de 1820, Ørsted publica sus observaciones concluyendo que la simetría de las fuerzas que actuaban sobre la aguja de la brújula debía ser circular, es decir círculos concéntricos perpendiculares al alambre conductor. (*Magnetostática*, s. f.) Este retraso de 8 años es atribuido al hecho de que repetidamente estaba realizando el experimento equivocado, con lo que nunca llegaba a una explicación satisfactoria del fenómeno observado, ya que hasta 1820, Ørsted estaba convencido de que las líneas de fuerza debían ser paralelas al alambre o que tenían dirección radial. (*Magnetostática*, s. f.)

El 4 de septiembre de 1820, el matemático y físico Francés André-Marie Ampère (1775 - 1836), se entera del descubrimiento de Ørsted de que una corriente eléctrica crea efectos magnéticos en el espacio que la rodea. (*Magnetostática*, s. f.) A pesar de que la mayoría de los científicos de la época mantenían firme la creencia de que electricidad y el magnetismo no estaban relacionados, Ampère acepta el descubrimiento de Ørsted y rápidamente llevó a cabo sus propios experimentos comenzando por repetir el experimento de Ørsted. (*Magnetostática*, s. f.) Dos semanas después publica un trabajo más completo sobre este fenómeno y otros fenómenos afines y desarrolla la teoría matemática de la electrodinámica. (*Magnetostática*, s. f.)

Inducción Electromagnética

¿Qué es la Inducción Electromagnética?

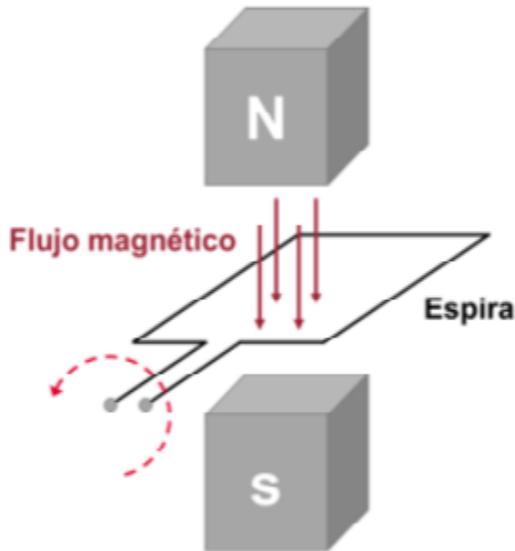
Utilizada en generadores y en motores eléctricos, la inducción electromagnética explica cómo un campo magnético cambiante puede producir una corriente eléctrica y, a la inversa, cómo una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020)

La aplicación más común de la inducción electromagnética es la generación de electricidad, cuando una bobina de material conductor, generalmente de cobre, se mueve en presencia de un campo magnético producido por ejemplo por un imán. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020) Las líneas del campo magnético del imán hacen que fluyan los electrones en el cable de la bobina. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020) El responsable de este descubrimiento científico fue Michael Faraday. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020)

Faraday, un físico y químico inglés nacido en 1791, hizo importantes contribuciones en el campo de la química, pero es especialmente conocido por la Ley de Faraday, relacionada con la electricidad y el magnetismo. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020) De procedencia humilde, fue inicialmente ayudante de un importante científico de su época, Humphry Davy, a quien llegó a eclipsar por la trascendencia de sus aportaciones. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020)

El gran descubrimiento de Faraday sucedió en 1831 al comprobar que se puede generar una corriente eléctrica cuando se modifica un campo magnético. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020) Faraday se inspiró en los hallazgos de Oersted en 1820, quien mostró cómo el paso de la corriente eléctrica por un conductor creaba un campo magnético a su alrededor. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020) Faraday intentó reproducir el experimento al revés, es decir, utilizando un imán para producir una corriente eléctrica. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020)

Sin embargo, solo consiguió su objetivo cuando hizo girar una espira de cobre en presencia de un imán, descubriendo un procedimiento para generar corriente eléctrica. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020) Efectivamente, el flujo magnético que atraviesa al anillo de cobre varía según va girando la espira, pasando de un flujo máximo en la situación de la figura a un flujo mínimo en caso de que la espira gire 90° . (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020) Esta variación del flujo magnético es lo que produce la aparición de una tensión eléctrica inducida en la espira y por tanto la circulación de una corriente eléctrica si se conecta un receptor entre sus bornes. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020) Así, la Ley de Faraday establece que la tensión eléctrica inducida en un circuito eléctrico es proporcional a la variación del flujo magnético que lo atraviesa. (*¿Qué Es La Inducción Electromagnética?*, 2020)

Figura 4.1*Experimento de Faraday*

Fuente: (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020)

Nota: Representación del experimento realizado por Faraday.

El descubrimiento de Faraday fue esencial para el comienzo de la producción de corriente eléctrica alterna y el transporte de electricidad hacia finales del siglo XIX, y por tanto para la electrificación de la economía y de la sociedad. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020)

Faraday también contribuyó con notables hallazgos en el campo de la química, entre otros la electrólisis (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020). Hoy la electrólisis está muy de moda, ya que es el procedimiento que se utiliza

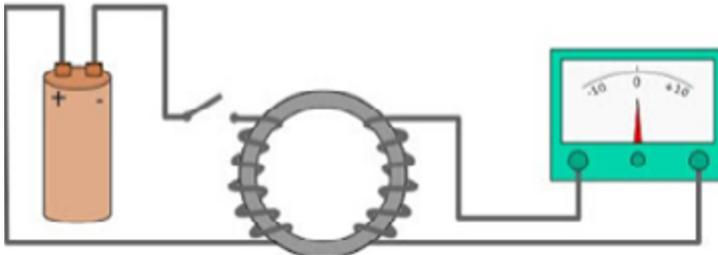
para producir hidrógeno a partir de agua, un combustible muy prometedor para sustituir a los actuales combustibles para vehículos, por su nula emisión de gases tóxicos. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020)

Experimento de Faraday

En uno de sus experimentos, en 1831, Faraday enrolló un cable conectado a una pila alrededor de un anillo de hierro y enrolló un segundo cable en el otro lado del anillo, un cable sin pila. (Javier Sánchez, s. f.) La idea era simple: si una corriente eléctrica generaba un campo magnético, tal vez un campo magnético generaría una corriente eléctrica. (Javier Sánchez, s. f.)

Figura 4.2

Experimento de Faraday



Fuente: (Javier Sánchez, s. f.)

Nota: Representación del experimento realizado por Faraday.

De modo que Faraday puso un detector en el segundo cable, el que no tenía pila alguna, y encendió el primer circuito

conectado a la pila.(Javier Sánchez, s. f.) Sin embargo, no sucedió lo que podría parecer evidente: cuando la pila estaba encendida y por tanto había un campo magnético, el segundo cable no mostraba corriente alguna.(Javier Sánchez, s. f.) La situación era exactamente igual con la pila encendida que con la pila apagada.(Javier Sánchez, s. f.) Pero, ¡ah!, algo inesperado sí sucedía: justo en el momento de encender el primer circuito o apagarlo, aparecía una corriente eléctrica en el segundo circuito. (Javier Sánchez, s. f.)

Lo extraño era que no era la existencia de un campo magnético lo que inducía una corriente en el circuito sin pila: era la variación del campo magnético la que generaba corriente. (Javier Sánchez, s. f.) Además, y esto era también curioso, cuando se encendía el circuito, la corriente en el segundo circuito iba en un sentido, pero al apagarlo, la corriente iba en sentido contrario.(Javier Sánchez, s. f.) En ambos casos se detectaba corriente durante un tiempo muy corto: el que duraba la transición apagado-encendido y viceversa.(Javier Sánchez, s. f.) Eran los cambios, y no la mera existencia de campo magnético, los que causaban la aparición de corriente. (Javier Sánchez, s. f.)

Faraday enunció un principio que hablaba exclusivamente de cables y circuitos, y el ruso **Heinrich Lenz** lo refinó añadiendo el sentido de la corriente. (Javier Sánchez, s. f.) Paradójicamente, ese fenómeno curioso, pero aparentemente inútil del que ni siquiera el propio Faraday fue capaz de predecir su importancia, hoy en día domina nuestra vida cotidiana. (Javier Sánchez, s. f.) Se encuentra allí donde dirigamos la mirada, pues es la base de nuestra tecnología,

nuestro desarrollo y, en consecuencia, nuestra civilización: generadores eléctricos (ya sean de centrales térmicas, atómicas, hidráulicas, eólicas), motores eléctricos, transformadores (que se encuentran en todos los aparatos eléctricos y electrónicos del hogar), osciladores, baterías, hornos de inducción:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$

(Javier Sánchez, s. f.)

Figura 4.3

Ley de Faraday

Las leyes de Faraday-Henry y la ley de Lenz pueden sintetizarse en una:

• El sentido de la corriente inducida se opone a la variación del flujo que la produce

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt}$$

• Al acercar el imán a la espira, aumenta el campo magnético que la atraviesa, y el flujo

• Al alejar el imán de la espira, disminuye el campo magnético que la atraviesa, y el flujo

• La corriente inducida circula en el sentido en el que se genera un campo magnético por la espira, cuyo flujo tiende a contrarrestar el del campo magnético del imán

Fuente: (Javier Sánchez, s. f.)

Nota: Ley de Faraday.

Otras Aplicaciones de la Inducción Electromagnética

El fenómeno de la inducción electromagnética continúa aplicándose a nuevas y prácticas soluciones tecnológicas, como la cocina de inducción, las lámparas de inducción, los hornos de inducción o la recarga de baterías eléctricas por inducción. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020)

Cocina de Inducción

Las cocinas de inducción permiten el calentamiento de los alimentos en el interior de un recipiente metálico gracias al principio de la inducción electromagnética. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020) Se hace circular corriente eléctrica de alta frecuencia por unas bobinas eléctricas colocadas debajo de la placa de la cocina, lo que produce un campo magnético que induce a su vez una corriente eléctrica en el recipiente metálico que contiene la comida. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020) La base de las cazuelas, sartenes y ollas para este tipo de cocinas debe ser de material ferromagnético, para que la corriente eléctrica se transforme en calor en el metal de los recipientes. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020)

Hornos Industriales de Inducción

Un horno de inducción es un aparato eléctrico que se utiliza para fundir metales y cuyo calor se produce por inducción. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020) Por las paredes

exteriores del horno se hace circular una corriente eléctrica en unas bobinas que producen un campo magnético en el interior del horno. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020) La corriente eléctrica inducida en el material metálico introducido en el interior del horno se transforma en calor que calienta o funde el metal. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020) Es una tecnología más limpia que la empleada en hornos de arco o en otros procesos de fundición, pero exige un buen control del proceso y la vigilancia del estado de los materiales refractarios de las paredes interiores del horno. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020)

Lámparas de Inducción

Las lámparas de inducción magnética constan únicamente de un circuito eléctrico ubicado en el centro de la ampolla de vidrio de la lámpara. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020) La corriente eléctrica crea un campo magnético que a su vez ioniza el gas en el interior de la lámpara, transformando la energía en luz. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020) Su principal ventaja es que ofrecen una vida útil mucho más larga que otros tipos de lámparas, una buena eficacia energética y buenas características cromáticas de la luz. (¿Qué es la Inducción Electromagnética?, 2020)

Recarga de Teléfonos Móviles por Inducción

La recarga de los teléfonos móviles sin necesidad de enchufarlos a la red eléctrica ya es posible en los últimos

años. La circulación de una corriente eléctrica en una bobina produce un campo magnético que alcanza al teléfono móvil. En el interior del teléfono, otra bobina ve atravesar el campo magnético procedente de la fuente y se induce en ella una corriente eléctrica que permite la carga de la batería. Este fenómeno también se pretende aplicar a la carga de baterías de vehículos eléctricos, y ya existen numerosos prototipos. (*¿Qué es la Inducción Electromagnética?*, 2020)

Corriente o Dipolo Magnético o Magnetización

¿Qué Significa la Magnetización?

Todos sabemos qué son los imanes, pero en este artículo nos gustaría tratar el tema de la magnetización. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)

Las sustancias que originalmente no son magnéticas también se pueden magnetizar. Sin embargo, solo si son ferromagnéticas. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)

Las sustancias ferromagnéticas tienen ciertas propiedades que les permiten crear y mantener su propio campo magnético. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)

Estas sustancias incluyen hierro, níquel, cobalto y algunas aleaciones específicas. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)

Antes de analizar más de cerca el tema de la magnetización, primero tenemos que repetir cuáles son

exactamente estas propiedades magnéticas y qué las constituye. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)

Propiedades Magnéticas

- Todas las sustancias que forman parte de nuestra vida cotidiana se pueden describir con tres propiedades magnéticas: ferromagnética, paramagnética y diamagnética. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)
- Para explicarlos, simplemente se miden por el efecto que tienen bajo la influencia de campos magnéticos externos. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)
- Los materiales diamagnéticos tienen una magnetización opuesta al campo magnético externo, lo que prácticamente significa que se repelen entre sí. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.) Un ejemplo típico es el elemento agua. Estos materiales no pueden ser magnetizados.
- Tampoco se pueden magnetizar materiales paramagnéticos. Con estos, la magnetización es igual al campo magnético externo, pero la alineación no es tan fuerte como en el caso de los materiales ferromagnéticos, ya que no tienen el llamado efecto de intercambio. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)

¿Cómo Funciona la Magnetización?

Los materiales ferromagnéticos consisten en átomos desordenados, con un núcleo atómico y electrones, pero no tienen efecto magnético. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.) Si ahora aplica un campo magnético externo, los electrones comienzan a moverse. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.) Debido a sus propios giros, que tienen su propio momento magnético, comienzan a clasificarse y adaptarse al campo magnético externo. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.) El material ferromagnético en sí se convierte en un imán. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.) Se caracteriza por el hecho de que mantiene esta fuerza magnética incluso cuando se elimina el campo magnético externo. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.) En términos de la fuerza magnética que queda, hablamos de remanencia. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)

Así como estos materiales pueden magnetizarse, la magnetización también puede cancelarse por influencias externas. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.) Estas influencias pueden ser calor extremo o fuertes vibraciones del imán. (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.) Por esta razón, siempre debe prestar atención a las condiciones de operación cuando use un imán para evitar fallas. Para obtener más información sobre magnetización o preguntas sobre nuestros productos, no dude en ponerse en contacto con nuestro personal especializado (*¿Qué significa la magnetización?*, s. f.)

Los medios materiales perciben y producen campos magnéticos debido a la presencia de dipolos magnéticos en su interior. (*Magnetización*, 2009) Cada átomo y cada partícula

subatómica poseen un pequeño momento magnético dipolar. (*Magnetización*, 2009)

- **Dipolos orbitales:** En el modelo atómico de Bohr, el electrón orbita alrededor del núcleo, lo que se puede considerar una pequeña espira. (*Magnetización*, 2009) En la mecánica cuántica moderna, no hay tal órbita, pero asimismo se cumple que existe un momento magnético proporcional al momento angular del electrón (propiedad asociada a la rotación). (*Magnetización*, 2009)
- **Dipolos intrínsecos:** Todas las partículas poseen además un momento magnético propio, proporcional a su momento angular intrínseco (el espín). Este momento magnético es una propiedad característica de cada partícula, como su carga o su masa, y no está asociado a una corriente eléctrica. (*Magnetización*, 2009)

Definición

Para caracterizar estos momentos magnéticos se define su densidad, de forma análoga a como se hace con la densidad de carga eléctrica, la densidad de corriente eléctrica o la polarización. (*Magnetización*, 2009) Dado un pequeño elemento de volumen $\Delta\tau$, lo suficientemente pequeño para ser microscópico, pero lo suficientemente grande como para contener miles de partículas, se define la *magnetización* (o *imanación*, o *imantación*) como (*Magnetización*, 2009)

$$M = \frac{1}{\Delta\tau} \sum_{\mathbf{m}_i \in \Delta\tau} \mathbf{m}_i$$

Esta magnetización es una función de la posición $M=M(r')$, considerando como r' la posición del elemento de volumen. (*Magnetización*, 2009)

Unidades

De la definición se tiene que:

$$[M] = \frac{[m]}{[\tau]} = \frac{1 \text{ A} \cdot \text{m}^2}{\text{m}^3} = \frac{1 \text{ A}}{\text{m}}$$

Valores Típicos

Los valores de la magnetización dependen mucho de la sustancia magnetizada. (*Magnetización*, 2009) Para un material ferromagnético, como el hierro, podemos hallar un [Máxima imanación del hierro valor máximo] suponiendo que todos los átomos poseen el mismo momento dipolar y todos aumentan en la misma dirección. (*Magnetización*, 2009)

En este caso, obtenemos:

$$M_{\max} \simeq 1.75 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

(*Magnetización*, 2009)

No obstante, los valores típicos suelen estar muy por debajo de este valor máximo. (*Magnetización*, 2009) Para una pieza de hierro sometida al campo magnético terrestre ($\sim 50 \mu\text{T}$) la magnetización es de varios kA/m. (*Magnetización*, 2009)

Para una sustancia no magnética, como el agua, la imanación es minúscula. (*Magnetización*, 2009) En un campo intenso, de 1 T, la imanación del agua es de unos 7 A/m. (*Magnetización*, 2009) En el campo terrestre es de $300 \mu\text{A/m}$. Teniendo en cuenta que el campo magnético de un dipolo va multiplicado por la constante:

$$\mu_0/(4\pi) = 10^{-7} \text{ H/m}$$

(*Magnetización*, 2009)

Puede entenderse que los efectos del agua magnetizada son despreciables en casi todos los casos (no en todos, pues con ayuda de imanes superconductores puede conseguirse la levitación magnética del agua). (*Magnetización*, 2009)

Tipos o Mecanismos de Magnetización

Las sustancias que pueden ser magnetizadas en mayor o menor medida por un campo magnético se denominan en general materiales magnéticos. Hay varios tipos de magnetismo, cada uno de ellos está caracterizado por su propia estructura. (*Tipos de magnetismo*, s. f.)

El valor de la susceptibilidad relativa varía desde 10-5 para un magnetismo débil hasta 106 para un magnetismo fuerte. (*Tipos de magnetismo*, s. f.) En algunos casos el valor puede ser negativo, mientras que en otros siquiera presenta un valor constante, sino que depende del campo. (*Tipos de magnetismo*, s. f.) Se puede interpretar el tipo de comportamiento en función de la estructura magnética del material. Adoptando este criterio se pueden clasificar los varios tipos de magnetismo como sigue: (*Tipos de magnetismo*, s. f.)

- Diamagnetismo.
- Paramagnetismo.
- Ferromagnetismo.
- Antiferromagnetismo.
- Ferrimagnetismo.

Diamagnetismo.

Propiedad de los materiales por la cual se magnetizan débilmente en sentido opuesto a un campo magnético aplicado. (*Diamagnetismo*, s. f.) Los materiales diamagnéticos son repelidos débilmente por los imanes. (*Diamagnetismo*, s. f.) El magnetismo inducido desaparece si lo hace el campo aplicado. (*Diamagnetismo*, s. f.) Todos los materiales poseen diamagnetismo, pero el término diamagnético sólo se utiliza para aquéllos en los que esta propiedad no está enmascarada por otro tipo de efecto magnético. (*Diamagnetismo*, s. f.)

En Electromagnetismo, el diamagnetismo es una propiedad de los materiales que consiste en ser repelidos por los imanes. (*Diamagnetismo*, s. f.) Es lo opuesto a los materiales

ferromagnéticos los cuales son atraídos por los imanes. (*Diamagnetismo*, s. f.) El fenómeno del diamagnetismo fue descubierto y nominado por primera vez en septiembre de 1845 por Michael Faraday cuando vio un trozo de bismuto que era repelido por un polo cualquiera de un Imán; lo que indica que el campo externo del imán induce un dipolo magnético en el bismuto de sentido opuesto. (*Diamagnetismo*, s. f.)

Materiales Diamagnéticos

Las sustancias, en su gran mayoría, son diamagnéticas, puesto que todos los pares de electrones con espín opuesto contribuyen débilmente al diamagnetismo, y sólo en los casos en los que hay electrones desaparejados existe una contribución paramagnética (o más compleja) en sentido contrario. (*Diamagnetismo*, s. f.)

Algunos ejemplos de materiales diamagnéticos son: el bismuto metálico, el hidrógeno, el helio y los demás gases nobles, el cloruro de sodio, el cobre, el oro, el silicio, el germanio, el grafito, el bronce y el azufre. (*Diamagnetismo*, s. f.) Nótese que no todos los citados tienen número par de electrones. (*Diamagnetismo*, s. f.)

El grafito pirolítico, que tiene un diamagnetismo especialmente alto, se ha usado como demostración visual, ya que una capa fina de este material levita (por repulsión) sobre un campo magnético lo suficientemente intenso (a temperatura ambiente). (*Diamagnetismo*, s. f.) Experimentalmente, se verifica que los materiales diamagnéticos tienen una permeabilidad magnética inferior a la unidad, y una susceptibilidad magnética

negativa, prácticamente independiente de la temperatura, y generalmente del orden (en unidades cegesimales) de e.m.u./mol, donde M es la masa molecular. (*Diamagnetismo*, s. f.) En muchos compuestos de coordinación se obtiene una estimación más exacta utilizando las tablas de Pascal. (*Diamagnetismo*, s. f.) En los materiales diamagnéticos, el flujo magnético disminuye y en los paramagnéticos el flujo magnético aumenta. (*Diamagnetismo*, s. f.)

Tabla 1.2

Materiales Diamagnéticos

Material	$10^5\chi_m$	Material	$10^5\chi_m$
Bismuto	(-16.6)	Mercurio	(-2.9)
Plata	(-2.6)	Carbono (diamante)	(-2.1)
Carbono (grafito)	(-1.6)	Plomo	(-1.8)
Cloruro sódico	(-1.4)	Cobre	(-1.0)
Agua	(-0.91)	CO2	(-0.0012)

Fuente: (*Diamagnetismo*, s. f.)

Nota: Elementos *diamagnéticos*

Paramagnetismo

Propiedad de los materiales por la que se magnetizan en la misma dirección que un campo magnético aplicado. (*Paramagnetismo*, s. f.) Los materiales paramagnéticos son atraídos por los imanes. (*Paramagnetismo*, s. f.) Si el campo magnético aplicado desaparece, también lo hace el magnetismo inducido. (*Paramagnetismo*, s. f.)

El paramagnetismo es la tendencia de los momentos magnéticos libres (espín u orbitales) a alinearse paralelamente a un campo magnético. (*Paramagnetismo*, s. f.) Si estos

momentos magnéticos están fuertemente acoplados entre sí, el fenómeno será ferromagnetismo o ferrimagnetismo. (*Paramagnetismo*, s. f.) Cuando no existe ningún campo magnético externo, estos momentos magnéticos están orientados al azar. (*Paramagnetismo*, s. f.)

En presencia de un campo magnético externo tienden a alinearse paralelamente al campo, pero esta alineación está contrarrestada por la tendencia que tienen los momentos a orientarse aleatoriamente debido al movimiento térmico. (*Paramagnetismo*, s. f.) Este alineamiento de los dipolos magnéticos atómicos con un campo externo tiende a fortalecerlo. (*Paramagnetismo*, s. f.) Esto se describe por una permeabilidad magnética superior a la unidad, o, lo que es lo mismo, una susceptibilidad magnética positiva y muy pequeña. (*Paramagnetismo*, s. f.)

En el paramagnetismo puro, el campo actúa de forma independiente sobre cada momento magnético, y no hay interacción entre ellos. (*Paramagnetismo*, s. f.) En los materiales ferromagnéticos, este comportamiento también puede observarse, pero sólo por encima de su temperatura de Curie. (*Paramagnetismo*, s. f.) Se denomina materiales paramagnéticos a los materiales o medios cuya permeabilidad magnética es similar a la del vacío. (*Paramagnetismo*, s. f.)

Estos materiales o medios no presentan en ninguna medida el fenómeno. (*Paramagnetismo*, s. f.) En términos físicos, se dice que su permeabilidad magnética relativa tiene valor aproximadamente igual a 1. (*Paramagnetismo*, s. f.) Los materiales paramagnéticos sufren el mismo tipo de atracción y repulsión que los imanes normales, cuando están sujetos a

un campo magnético. (*Paramagnetismo*, s. f.) Sin embargo, al retirar el campo magnético, la entropía destruye el alineamiento magnético, que ya no está favorecido energéticamente. (*Paramagnetismo*, s. f.) Es decir, los materiales paramagnéticos son materiales atraídos por imanes, pero no se convierten en materiales permanentemente magnetizados. (*Paramagnetismo*, s. f.)

Causa del Paramagnetismo

Los materiales paramagnéticos están constituidos por átomos y moléculas que tienen momentos magnéticos permanentes (“dipolos” magnéticos) incluso en ausencia de campo. (*Paramagnetismo*, s. f.) Estos momentos magnéticos tienen su origen en los espines de electrones desapareados en de los orbitales moleculares presentes en muchos metales y materiales paramagnéticos. (*Paramagnetismo*, s. f.)

Esto tiene consecuencias cuando sobre dicho material se aplica un campo magnético. (*Paramagnetismo*, s. f.) Puesto que un espín alineado con el campo tiene menos energía que los anti-alineados y la energía conjunta de todos los electrones libres debe sumar aproximadamente la energía de Fermi, mantener esa energía constante implica que algunos átomos anti-alineados deben alinearse con el campo. (*Paramagnetismo*, s. f.)

En ausencia de campo las poblaciones de espines alineados y anti-alineados es más o menos la misma, pero en presencia de campo debe aumentar el número de alineados y decrecer el número de desalineados. (*Paramagnetismo*, s. f.)

Como el número de momentos magnéticos alineados finalmente supera al de anti-alineados existe una magnetización neta que produce un campo magnético que se suma al campo magnético externo. (*Paramagnetismo*, s. f.)

Algunos Materiales Paramagnéticos

- Aire
- Aluminio
- Magnesio
- Titanio
- Wolframio

Ferromagnetismo

Propiedad de algunos materiales que hace que resulten intensamente imantados cuando se sitúan en un campo magnético, y conserven parte de su imantación cuando desaparece dicho campo. (*Ferromagnetismo*, s. f.)

El ferromagnetismo es un fenómeno físico en el que se produce ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido. (*Ferromagnetismo*, s. f.) Un material ferromagnético es aquel que puede presentar ferromagnetismo. (*Ferromagnetismo*, s. f.) La interacción ferromagnética es la interacción magnética que hace que los momentos magnéticos tiendan a disponerse en la misma dirección y sentido. (*Ferromagnetismo*, s. f.) Ha de extenderse por todo un sólido para alcanzar el ferromagnetismo. (*Ferromagnetismo*, s. f.)

Generalmente, los ferromagnetos están divididos en dominios magnéticos, separados por superficies conocidas como paredes de Bloch. (*Ferromagnetismo*, s. f.) En cada uno de estos dominios, todos los momentos magnéticos están alineados. (*Ferromagnetismo*, s. f.) En las fronteras entre dominios hay cierta energía potencial, pero la formación de dominios está compensada por la ganancia en entropía. (*Ferromagnetismo*, s. f.)

Al someter un material ferromagnético a un campo magnético intenso, los dominios tienden a alinearse con éste, de forma que aquellos dominios en los que los dipolos están orientados con el mismo sentido y dirección que el campo magnético inductor aumentan su tamaño. (*Ferromagnetismo*, s. f.) Este aumento de tamaño se explica por las características de las paredes de Bloch, que avanzan en dirección a los dominios cuya dirección de los dipolos no coincide; dando lugar a un monodominio. (*Ferromagnetismo*, s. f.) Al eliminar el campo, el dominio permanece durante cierto tiempo. (*Ferromagnetismo*, s. f.)

Materiales Ferromagnéticos

Hay muchos materiales cristalinos que presentan ferromagnetismo. En la tabla se muestra una selección representativa de ellos, junto con sus temperaturas de Curie, la temperatura por encima de la cual dejan de ser ferromagnéticos. (*Ferromagnetismo*, s. f.) Como el hierro, el níquel, el cobalto, el acero, etc. (*Ferromagnetismo*, s. f.)

Tabla 1.3

Materiales Ferromagnéticos

Material	Temp. Curie (K)	Material	Temp. Curie (K)
Fe	1043	MnSb	587
Co	1388	CrO2	386
Ni	627	MnOFe2O3	573
Gd	292	Fe3O4	858
Dy	88	NiOFe23	858
MnAs	318	CuOFe2O3	728
MnBi	630	MgOFe23	713
Y3Fe5O12	560	EuO	69

Fuente: (*Ferromagnetismo*, s. f.)

Nota: Elementos ferromagnéticos.

Antiferromagnetismo

Es el ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección, pero en sentido inverso (por pares, por ejemplo, o una subred frente a otra). Un antiferromagneto es el material que puede presentar antiferromagnetismo. (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

Cuando el ordenamiento de los momentos magnéticos es en la misma dirección, pero en sentidos opuestos, por ejemplo, por pares, se produce el denominado antiferromagnetismo. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Si el valor absoluto de los momentos magnéticos apareados, es el mismo, se cancelan y si son diferentes se reducen. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) En los materiales ferromagnéticos hay una temperatura denominada

de Curie, por encima de la cual dejan de tener las propiedades ferromagnéticas. (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

Los materiales antiferromagnéticos también pierden las propiedades al elevar la temperatura, ahora denominada de Neel, que una vez superada los convierte en paramagnéticos, exhibiendo un momento magnético permanente en ausencia del campo externo aplicado. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Cuando aplicamos un campo magnético algunos de los momentos se alinean paralelos a él. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Aumentando la intensidad se puede lograr la alineación de todos. (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

Eso quiere decir que los momentos magnéticos que se pueden obtener en materiales antiferromagnéticos son elevados e incluso pueden dar lugar a la imanación permanente. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) El ferromagnetismo se da en los materiales cerámicos donde los momentos magnéticos de los iones son diferentes ofreciendo diferente resistencia a la alineación al aplicar un campo magnético. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Como resultado se obtiene una magnetización neta. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) La magnetita presenta ferrimagnetismo, aun cuando las interacciones que dan lugar a la propiedad magnética son antiferromagnéticas. (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

La visualización de los dominios en un material antiferromagnético formaba parte de la conjetura hasta recientemente en que se ha accedido a examinar la ordenación interior, gracias a la aplicación de los rayos X. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) El orden interno de estos materiales es del tamaño de la longitud de onda de los rayos X,

lo que significa que se sitúa por debajo de los 10 nanómetros. (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

Por tanto, la interacción antiferromagnética es la interacción magnética que hace que los momentos magnéticos tiendan a disponerse en la misma dirección y en sentido inverso, cancelándose si tienen el mismo valor absoluto, o reduciéndolos si son distintos. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Ha de extenderse por todo un sólido para alcanzar el antiferromagnetismo. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Como el ferromagnetismo, la interacción antiferromagnética se destruye a alta temperatura por efecto de la entropía. (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

Cuando la temperatura por encima de la cual no se aprecia el antiferromagnetismo se llama temperatura de Neel. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Por encima de esta, los compuestos son típicamente paramagnéticos. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Generalmente, los antiferromagnetos están divididos en dominios magnéticos. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) En cada uno de estos dominios, todos los momentos magnéticos están alineados. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) En las fronteras entre dominios hay cierta energía potencial, pero la formación de dominios está compensada por la ganancia en entropía. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Al someter un material antiferromagnético a un campo magnético intenso, algunos de los momentos magnéticos se alinean paralelamente con él, aún a costa de alinearse también paralelo a sus vecinos (superando la interacción antiferromagnética). (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

Generalmente, se requiere un campo magnético muy intenso para conseguir alinear todos los momentos magnéticos de la muestra. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Estas interacciones

antiferromagnéticas pueden producir momentos magnéticos grandes, incluso imanación. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) El ferromagnetismo ocurre en sistemas en los que una interacción antiferromagnética entre momentos magnéticos de diferente magnitud implica un momento magnético resultante grande. (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

La magnetita es un sólido extendido que presenta ferrimagnetismo: es un imán, aunque las interacciones son antiferromagnéticas. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) El Mn₁₂ es una molécula que presenta el mismo fenómeno: interacciones antiferromagnéticas conllevan un momento magnético grande del estado fundamental. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Por otro lado, los sistemas con canteo de espín, con interacciones antiferromagnéticas presentan imanación, por pequeñas desviaciones angulares del alineamiento de los momentos magnéticos, no totalmente antiparalelos. (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

Descubrimiento

Louis Eugène Néel (1904-2000), físico francés que realizó grandes aportaciones al magnetismo. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Siguiendo la obra de Pierre-Ernest Weiss, que introdujo el concepto de campo molecular y concibió la teoría del ferromagnetismo (1907), descubrió el fenómeno del antiferromagnetismo a principios de la década de 1930; continuó con una teoría cuantitativa de los campos ferrimagnéticos (1947). Demostró la memoria magnética de los yacimientos de rocas, que ayuda a explicar la física del

magnetismo terrestre. (*Antiferromagnetismo*, s. f.) Su obra contribuyó al avance de las técnicas relacionadas con las ferritas (como la electrónica), así como al conocimiento de los materiales magnéticos más corrientes utilizados como aislantes. (*Antiferromagnetismo*, s. f.)

Ferrimagnetismo

El ferrimagnetismo es un fenómeno físico en el que se produce ordenamiento magnético de los momentos magnéticos de una muestra de modo que todos los momentos magnéticos están alineados en la misma dirección, pero no en el mismo sentido. (*Ferrimagnetismo*, 2019) Así que algunos de ellos están opuestos y se anulan entre sí, en parte o completamente. (*Ferrimagnetismo*, 2019) Sin embargo estos momentos magnéticos que se pueden anular están distribuidos aleatoriamente y no consiguen anular por completo la magnetización espontánea. (*Ferrimagnetismo*, 2019) Un ferrimagneto es una muestra de material que presenta ferrimagnetismo. (*Ferrimagnetismo*, 2019)

El ferrimagnetismo también presenta, como el ferromagnetismo, magnetizaciones permanentes y de saturación (punto en el que ya no aumenta la magnetización por más que aumentemos la fuerza del campo), aunque no en valores tan altos. (*Ferrimagnetismo*, 2019) Otra similitud es que por encima de la temperatura de Curie se pierde el ferrimagnetismo y el material pasa a ser paramagnético. (*Ferrimagnetismo*, 2019)

Los materiales ferrimagnéticos proceden normalmente de la ferrita. (*Ferrimagnetismo*, 2019) Las ferritas, siendo materiales cerámicos, son buenos aislantes eléctricos. (*Ferrimagnetismo*, 2019) En algunas aplicaciones magnéticas, tales como transformadores de alta frecuencia, se requiere una baja conductividad eléctrica. (*Ferrimagnetismo*, 2019)



**Referencias
Bibliográficas**

Referencias Bibliográficas

- Andrés Granero. (2015, junio 24). *Utilidad de las Pantallas Electroestáticas en Transformadores*. IMSE. <http://imseingenieria.blogspot.com/2015/06/utilidad-de-las-pantallas.html>
- Ángulo sólido*. (2020, octubre 8). Wikipedia La enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81ngulo_s%C3%B3lido
- Antiferromagnetismo*. (s. f.). Ecured. <https://www.ecured.cu/Antiferromagnetismo>
- Campo magnético de corrientes estacionarias*. (2009, abril 20). Wiki Departamento de Física Aplicada III. http://laplace.us.es/wiki/index.php/Campo_magn%C3%A9tico_de_corrientes_estacionarias
- Carga puntual*. (2020, octubre 8). Wikipedia La enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_puntual
- Carga puntual*. (2021, diciembre 17). eswiki. https://www.eswiki.org/wiki/Carga_puntual
- Como se genera la electricidad estática*. (s. f.). Simco ion. <https://www.simco-ion.es/descargas/que-es-la-electricidad-estatica>
- Conceptos de Electricidad Estática y Magnitudes Eléctricas*. (s. f.) <https://sices.net/Profesores/files/GUIA%20GRADO%207%20P%201.pdf>
- Corriente eléctrica estacionaria*. (2009, diciembre 2). Wikipedia La enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_el%C3%A9ctrica_estacionaria
- Diamagnetismo*. (s. f.). Ecured. <https://www.ecured.cu/Diamagnetismo>

- Dieléctrico*. (2020, octubre 24). Wikipedia La enciclopedia Libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Diel%C3%A9ctrico>
- Dipolo eléctrico*. (2021, mayo 19). Wikipedia La enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Dipolo_el%C3%A9ctrico
- Educalingo*. (2021). Educalingo. <https://educalingo.com/es/dic-es/magnetostatica>
- Ejemplo I Tecnología médica-estética*. (s. f.). UNL Virtual. <https://aulavirtual4.unl.edu.ar/mod/book/view.php?id=26&chapterid=16>
- Electrostática*. (s. f.). <https://cursos.aiu.edu/Electricidad%20y%20Magnetismo%20en%20Ingenieria/PDF/Tema%202.pdf>
- Fabián Coelho. (2020, abril 17). *Ley de Coulomb*. Significados. <https://www.significados.com/ley-de-coulomb/>
- Félix Redondo Quintela, Roberto C. Redondo Melchor. (2017). *Ángulo plano y ángulo sólido*. <https://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Comentarios/Temas/AnguloSolido.pdf>
- Félix Redondo Quintela y Roberto C. Redondo Melchor. (s. f.). 2. *Dieléctricos*. https://electricidad.usal.es/Principal/Fenomenos/Publicaciones/Descargas/02_Dielectricos.pdf
- Ferrimagnetismo*. (2019, octubre 22). Wikipedia La enciclopedia Libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Ferrimagnetismo>
- Ferromagnetismo*. (s. f.). Ecured. <https://www.ecured.cu/Ferromagnetismo>
- Javier Sánchez. (s. f.). *Inducción electromagnética*. El Físico

Loco Cosas de Física y Química. <http://elfisicoloco.blogspot.com/2013/02/induccin-electromagnetica.html>

Jean Andre Mogrovejo Bucheli. (2017). *Implementación del ERP Open Source Odoos en una PYME* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/38698>

José Antonio Hervás. (s. f.). *Interacción Eléctrica - Ley de Gauss*. Matemáticas y Poesía. <http://www.matematicasypoesia.com.es/monografias/electricidad16.htm>

José L. Fernández. (s. f.). *Introducción al Concepto de Intensidad del Campo Eléctrico*. Fisicalab. <https://www.fisicalab.com/apartado/intro-intensidad-campo-electrico>

Julián Pérez Porto. (2020). *Definición de Dieléctrico*. Definición. De. <https://definicion.de/dielectrico/>

Ley de Gauss. (2021, junio 19). Wikipedia La enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Gauss#Forma_diferencial_e_integral_de_la_Ley_de_Gauss

Lino Spagnolo. (s. f.). *Ecuaciones de Laplace y Poisson*. https://www.unimoron.edu.ar/static/media/doc_936a-9f926ebb11e5bba308002700203f_o.pdf

Magnetización. (2009, abril 1). Wiki Departamento de Física Aplicada III. <http://laplace.us.es/wiki/index.php/Magnetizaci%C3%B3n>

Magnetostática. (s. f.). <https://www.famaf.unc.edu.ar/~anoardo/magnetostatica.pdf>

Paramagnetismo. (s. f.). Ecured. <https://www.ecured.cu/Paramagnetismo>

¿Qué es la electrostática? - Definición. (s. f.). Soluciones Electrostatica. <https://electrostatica.com/defini->

cion-que-es-la-electrostatica/

¿*Qué Es La Inducción Electromagnética?* (2020, septiembre 22). Total Energies. <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/inducccion-electromagnetica>

¿*Qué significa la magnetización?* (s. f.). IMA. <https://www.imamagnets.com/blog/que-significa-la-magnetizacion/>

Tema 1—Electrostática en el vacío. (2011). www.docsity.com

Tema 3. Potencial electrostático. (s. f.). E-ducativa. <http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4250/4341/html/index.html>

Teresa Martín Blas & Ana Serrano Fernández. (s. f.). *Potencial eléctrico. Superficies equipotenciales.* Electrostatica. <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/electro/potencial.html>

Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández. (s. f.-a). *Conductores en equilibrio electrostático.* Electrostatica. <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/electro/conductores.html>

Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández. (s. f.-b). *Flujo del campo eléctrico. Ley de Gauss.* Electrostatica. <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/electro/gauss.html>

Tipos de magnetismo. (s. f.). Library. <https://1library.co/article/tipos-magnetismo-magnetizaci%C3%B3n-materiales-ferromagn%C3%A9ticos.yn6kxv0q>

UNIVISION. (2018, abril 2). *Los diferentes tipos de imanes.* <https://www.univision.com/explora/los-diferentes-tipos-de-imaness>



**Evaluación
de pares**

Quito, 08 de marzo de 2023

Señor Magister
Renato Esteban Revelo Oña
Presidente "R2ICS"
Presente,

De mi consideración:

Atendiendo al pedido realizado por su persona, agradezco la invitación para ser **par evaluador** de la obra **Nociones Básicas de Campos Magnéticos y Ondas**, del autor: Mgtr. Jean Andre Mogrovejo Bucheli; comunico a usted que se ha revisado dicha obra con los criterios de relevancia y pertinencia que especifica el respectivo reglamento, por lo tanto, la misma es recomendable como una **OBRA RELEVANTE**.

Cabe indicar que los contenidos cumplen con estándares de calidad para los procesos de enseñanza y aprendizaje, es inédita y contribuyen al conocimiento y formación de los estudiantes universitarios, de tal manera que resultan fundamentales y sustanciales en la Educación Superior.

Informe que pongo a vuestra consideración para los fines pertinentes.

Atentamente,



Mgtr. Enoc Felipe Quishpe Guano (c)
CC: 1720225653
Analista Investigador de Evaluación Educativa
Instituto Nacional de Evaluación Educativa (Ineval)



CERTIFICADO DE REVISIÓN METODOLÓGICA (PAR EVALUADOR)

Quito, 05 de marzo de 2023

Una vez realizada la valoración metodológica para la **evaluación par** de la obra **Nociones Básicas de Campos Magnéticos y Ondas**, del autor: Mgtr. Jean Andre Mogrovejo Bucheli; se certifica que la obra cumple con los criterios de relevancia y pertinencia que especifica el respectivo reglamento de Educación Superior, por lo tanto, la misma es recomendable como una **OBRA RELEVANTE**.

Cabe indicar que los contenidos cumplen con estándares de calidad para los procesos de enseñanza y aprendizaje, es inédita y contribuyen al conocimiento y formación de los estudiantes universitarios, de tal manera que resultan fundamentales y sustanciales en la Educación Superior.

Atentamente,

Mgtr. Anita Lucía Mata Velastegui
CC: 1712685831
Revisor Metodológico



www.euroamericano.edu.ec