

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**VISUALIZACIÓN BIDIMENSIONAL Y
SOLUCIÓN MATEMÁTICA DE
CAMPOS ELÉCTRICOS TÍPICOS PARA
TENSIONES SUPERIORES A 5 000 VDC**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

CARLOS ALBERTO ALVARADO PANTOJA

PROMOCIÓN 1994-1

LIMA-PERÚ

2 012

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

INDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO 1	3
INTRODUCCIÓN	3
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 OBJETIVOS	5
CAPITULO 2	6
ELECTROSTÁTICA APLICADA A LA INGENIERÍA	6
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTROSTÁTICA	6
2.1.1 Desarrollo histórico	6
2.1.2 Electricidad estática	8
2.1.3 Aislantes y conductores	9
2.1.4 Generadores electrostáticos	11
2.1.5 Carga inducida	12
2.1.6 Carga por fricción	12
2.1.7 Carga por inducción	13
2.2 CONCEPTOS MATEMÁTICOS FUNDAMENTALES	13
2.2.1 La Ley de Coulomb	13
2.2.2 El campo eléctrico	14
2.2.3 La Ley de Gauss	14
2.2.4 La ecuación de Poisson	15
2.2.5 La ecuación de Laplace	15

2.3	FENÓMENOS ELECTROESTÁTICOS	15
2.3.1	Electrización	16
2.3.2	Carga Eléctrica	16
2.3.3	Principio de conservación y cuantificación de la carga	16
2.4	CONFIGURACIONES TÍPICAS DE CAMPOS ELECTROSTÁTICOS	17
2.4.1	Campo eléctrico creado por una carga puntual	17
2.4.2	Principio de superposición	18
2.4.3	Representación gráfica del campo eléctrico	18
 CAPÍTULO 3		25
DESARROLLO DE UN MÓDULO PARA LA VISUALIZACIÓN BIDIMENSIONAL DE UN CAMPO ELÉCTRICO		25
3.1	EQUIPO BÁSICO PARA LA FORMACIÓN DE CAMPOS Y VISUALIZACIÓN BIDIMENSIONAL	25
3.1.1	Autotransformador	26
3.1.2	Transformador de corriente alterna	27
3.1.3	Diodos	30
3.1.4	Condensador eléctrico.	40
3.1.5	Medidor de alto voltaje	48
3.1.6	Equipo de visualización del campo eléctrico	51
3.2	CONDICIONES DE OPERACIÓN	52
 CAPÍTULO 4		54
PLAN DE ENSAYOS		54
4.1	PARA LA OBTENCIÓN DE LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO	54

4.1.1	Carga puntual	54
4.1.2	Cargas puntuales con igual signo	55
4.1.3	Cargas puntuales con distinto signo	55
4.1.4	Lámina finita	56
4.1.5	Láminas finitas con igual signo	56
4.1.6	Láminas finitas con distinto signo	57
4.1.7	Láminas infinitas con igual signo	57
4.1.8	Láminas infinitas con distinto signo	58
4.1.9	Configuración cilíndrica	58
4.1.10	Configuración irregular	59
4.2	CAPACITORES	59
4.2.1	Capacitor plano	59
4.2.2	Capacitor cilíndrico	60
4.2.3	Capacitancia de un capacitor con dieléctrico	60
4.2.4	Potencial de ruptura de un dieléctrico	61
4.3	ELECTRIZACIÓN POR INDUCCIÓN	61
4.3.1	Descargas eléctricas	61
4.3.2	Descarga eléctrica entre dos placas paralelas	62
	CAPÍTULO 5	63
	ANÁLISIS Y SOLUCIONES MATEMÁTICAS	63
5.1	COMPORTAMIENTO DE UNA CARGA PUNTO EN UN CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME	63
5.2	PARTÍCULA MOVIÉNDOSE PARALELAMENTE AL CAMPO	63
5.3	PARTÍCULA MOVIÉNDOSE PERPENDICULARMENTE AL CAMPO	64

5.4	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA DISTRIBUCIÓN CONTINUA VOLUMÉTRICA DE CARGA	65
5.4.1	Caso general	66
5.5	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA ESFERA MACIZA UNIFORMEMENTE CARGADA	67
5.5.1	Campo eléctrico desde el punto A o en cualquier punto exterior a la corteza	68
5.5.2	Campo eléctrico en el punto B o en cualquier punto interior de la esfera	68
5.6	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA DISTRIBUCIÓN CONTINUA SUPERFICIAL DE CARGA	69
5.6.1	Caso general	69
5.7	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UN PLANO INFINITO DE DENSIDAD DE CARGA UNIFORME	70
5.8	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR DOS PLACAS INFINITAS Y PARALELAS	72
5.8.1	Campo eléctrico entre las dos placas	73
5.9	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UN DISCO CARGADO DE GROSOR DESPRECIABLE	73
5.10	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA ESFERA HUECA Y DE ESPESOR DESPRECIABLE	75
5.10.1	Campo eléctrico en el exterior de la corteza esférica	75
5.10.2	Campo eléctrico en el interior de la esfera	75
5.11	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA DISTRIBUCIÓN CONTINUA LINEAL DE CARGA	75
5.11.1	Caso general	76
5.11.2	Campo eléctrico generado por una línea infinita de carga y densidad lineal decarga λ constante	77

5.11.3	Campo eléctrico generado por una línea finita de carga y densidad lineal de carga λ constante sobre los puntos de su bisectriz	80
5.11.4	Campo eléctrico generado por dos hilos paralelos, infinitos y de densidad de carga uniforme	82
5.12	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UN ANILLO DE DENSIDAD DE CARGA UNIFORME SOBRE LOS PUNTOS DE SU EJE	84
5.13	CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA DISTRIBUCIÓN DISCRETA DE CARGAS	86
5.13.1	Caso general	86
5.13.2	Campo eléctrico creado por un dipolo eléctrico	86
5.13.3	Campo generado por un cuádruplo eléctrico lineal en su bisectriz	93
CAPÍTULO 6		96
ANÁLISIS ECONÓMICO		96
6.1	METRADO BASE	96
6.2	PRESUPUESTO BASE	97
CONCLUSIONES		100
BIBLIOGRAFÍA		102
APENDICE		104

PRÓLOGO

El electromagnetismo es una teoría de campos; es decir, las explicaciones y predicciones que provee se basan en magnitudes físicas vectoriales dependientes de la posición en el espacio y del tiempo. El electromagnetismo describe los fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento, usando para ello campos eléctricos y magnéticos y sus efectos sobre las sustancias sólidas, líquidas y gaseosas. Por ser una teoría macroscópica, es decir, aplicable sólo a un número muy grande de partículas y a distancias grandes respecto de las dimensiones de éstas, el Electromagnetismo no describe los fenómenos atómicos y moleculares, para los que es necesario usar la Mecánica Cuántica. El electromagnetismo considerado como fuerza es una de las cuatro fuerzas fundamentales del universo actualmente conocido.

En la actualidad el estudio de la electrostática básica, parte del electromagnetismo, que se desarrolla en la Facultad de Ingeniería Mecánica es solamente teórico, lo que me ha llevado a formular la presente Tesis para el desarrollo de un equipo para la visualización bidimensional de campos eléctricos generados con tensiones superiores a 5000 VDC, comparar la solución matemática de configuraciones típicas de campos eléctricos con los observados por el equipo desarrollado y plantear el modelo de solución de configuraciones no típicas.

El desarrollo de la presente Tesis ha sido el siguiente:

En el Capítulo 1, se presenta los antecedentes, la justificación y los objetivos trazados para el desarrollo de la Tesis.

En el Capítulo 2, se hace una descripción de la electrostática aplicada a la ingeniería, desarrollándose los conceptos básicos de la electrostática, haciéndose una descripción de aislantes y conductores, también se muestran los conceptos matemáticos fundamentales de la ley de Coulomb, el campo eléctrico, la ley de Gauss, la ecuación de Poisson y la ecuación de Laplace, asimismo se presentan las configuraciones típicas de campos electrostáticos.

En el Capítulo 3, se muestra el procedimiento para el desarrollo de un módulo para la visualización bidimensional de un campo eléctrico, haciéndose una descripción detallada de todos sus componentes.

En el Capítulo 4, se propone el plan de ensayos para la obtención de líneas de campo eléctrico y se muestran los resultados experimentales.

En el Capítulo 5, se efectúa el análisis y se dan las soluciones matemáticas para las diferentes configuraciones de los electrodos que se encuentran dentro de un campo eléctrico.

En el Capítulo 6, Se hace un análisis económico para la construcción del módulo, presentándose un metrado base y un presupuesto base.

Finalmente se presentan las conclusiones y un apéndice que ha servido de base para el desarrollo de la presente Tesis.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La Universidad Nacional de Ingeniería y dentro de ella en la Facultad de Ingeniería Mecánica no existe una planificación estratégica para desarrollar proyectos de investigación.

La formación es sólo profesional con el objetivo de que sean exitosos en su campo de acción. Creo que una universidad de excelencia tiene que hacer investigación y tener grupos dedicados a generar conocimientos pertinentes para el país, que mejoren la calidad de vida de las personas y ayuden a su desarrollo social.

El electromagnetismo es una rama de la Física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría, cuyos fundamentos fueron sentados por Michael Faraday y formulados por primera vez de modo completo por James Clerk Maxwell. La formulación consiste en cuatro ecuaciones diferenciales vectoriales que relacionan el campo eléctrico, el campo magnético y sus respectivas fuentes materiales (corriente eléctrica, polarización eléctrica y polarización magnética), conocidas como ecuaciones de Maxwell.

El electromagnetismo es una teoría de campos; es decir, las explicaciones y predicciones que provee se basan en magnitudes físicas vectoriales dependientes de la posición en el espacio y del tiempo. El electromagnetismo describe los fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento, usando para ello campos eléctricos y magnéticos y sus efectos sobre las sustancias sólidas, líquidas y gaseosas. Por ser una teoría macroscópica, es decir, aplicable sólo a un número muy grande de partículas y a distancias grandes respecto de las dimensiones de éstas, el Electromagnetismo no describe los fenómenos atómicos y moleculares, para los que es necesario usar la Mecánica Cuántica.

El electromagnetismo considerado como fuerza es una de las cuatro fuerzas fundamentales del universo actualmente conocido.

En la actualidad el estudio de la electrostática básica, parte del electromagnetismo, que se desarrolla en la Facultad de Ingeniería Mecánica es solamente teórico, lo que me ha llevado a formular la presente Tesis para el desarrollo de un equipo para la visualización bidimensional de campos eléctricos generados con tensiones superiores a 5000 VDC, comparar la solución matemática de configuraciones típicas de campos eléctricos con los observados por el equipo desarrollado y plantear el modelo de solución de configuraciones no típicas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Cuando hablamos de electrostática nos referimos a los fenómenos que ocurren debido a una propiedad intrínseca y discreta de la materia, la carga, cuando es estacionaria o no depende del tiempo.

La electricidad estática se usa habitualmente en xerografía en la que un pigmento en polvo se fija en las áreas cargadas previamente, lo que hace visible la imagen impresa. En electrónica, la electricidad estática puede causar daños a los componentes, por lo que los operarios han de tomar medidas para descargar la electricidad estática que pudieran haber adquirido. Esto puede ocurrir a una persona por frotamiento de las suelas de los zapatos (de materiales como la goma) contra suelos de tela o alfombras, o por frotamiento de su vestimenta contra una silla de plástico. Las tensiones generadas así serán más altas en los días con baja humedad relativa ambiente.

Al aterrizar un avión se debe proceder a su descarga por seguridad. En los automóviles también puede ocurrir la electrificación al circular a gran velocidad en aire seco, por lo que también se necesitan medida de seguridad para evitar las chispas eléctricas.

La formación de campos electrostáticos en sus diferentes configuraciones: placas paralelas, esferas formando un dipolo, placa con esfera, etc, se pueden visualizar con el equipo desarrollado.

1.3 OBJETIVOS

- a) Desarrollar un equipo para la visualización bidimensional de campos eléctricos generados con tensiones superiores a 5000 VDC.
- b) Comparar la solución matemática de configuraciones típicas de campos eléctricos con los observados por el equipo desarrollado.
- c) Plantear el modelo de solución de configuraciones no típicas.

CAPITULO 2

ELECTROSTÁTICA APLICADA A LA INGENIERÍA

2.1 . CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTROSTÁTICA

La electrostática es la rama de la física que estudia los fenómenos producidos por distribuciones de cargas eléctricas, esto es, el campo electrostático de un cuerpo cargado.

Históricamente, la electrostática fue la rama del electromagnetismo que primero se desarrolló. Con la postulación de la Ley de Coulomb fue descrita y utilizada en experimentos de laboratorio a partir del siglo XVII y ya en la segunda mitad del siglo XIX las leyes de Maxwell concluyeron definitivamente su estudio y explicación, y permitieron demostrar cómo las leyes de la electrostática y las leyes que gobiernan los fenómenos magnéticos pueden ser estudiadas en el mismo marco teórico denominado electromagnetismo.

2.1.1 Desarrollo histórico

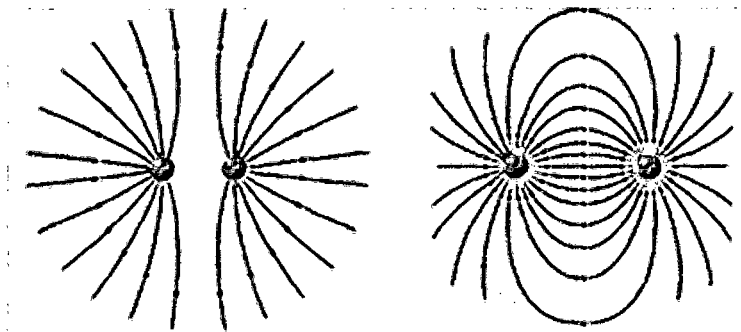


Figura 2.1: Representación de campo eléctrico producido por dos cargas.

Alrededor del 600 a. C. el filósofo griego Tales de Mileto descubrió que si frotaba un trozo de la resina vegetal fósil llamada ámbar, en griego elektron, este cuerpo adquiriría la propiedad de atraer pequeños objetos. Algo más tarde, otro griego, Teofrasto (310 a. C.), realizó un estudio de los diferentes materiales que eran capaces de producir fenómenos eléctricos y escribió el primer tratado sobre la electricidad.

A principios del siglo XVII comienzan los primeros estudios sobre la electricidad y el magnetismo orientados a mejorar la precisión de la navegación con brújulas magnéticas. El físico real británico William Gilbert utiliza por primera vez la palabra electricidad, creada a partir del término griego elektron (ámbar). El jesuita italiano Niccolo Cabeo analizó sus experimentos y fue el primero en comentar que había fuerzas de atracción entre ciertos cuerpos y de repulsión entre otros.

Alrededor de 1672 el físico alemán Otto von Guericke construye la primera máquina electrostática capaz de producir y almacenar energía eléctrica estática por rozamiento. Esta máquina consistía en una bola de azufre atravesada por una varilla que servía para hacer girar la bola. Las manos aplicadas sobre la bola producían una carga mayor que la conseguida hasta entonces. Francis Hawksbee perfeccionó hacia 1707 la máquina de fricción usando una esfera de vidrio.

En 1733 el francés Francois de Cisternay du Fay propuso la existencia de dos tipos de carga eléctrica, positiva y negativa, constatando que:

- Los objetos frotados contra el ámbar se repelen.
- También se repelen los objetos frotados contra una barra de vidrio.
- Sin embargo, los objetos frotados con el ámbar atraen los objetos frotados con el vidrio.

En 1745 se construyeron los primeros elementos de acumulación de cargas, los condensadores, desarrollados en la Universidad de Leiden por Ewald Jürgen Von Kleist y Pieter Van Musschenbroeck.

En 1767, Joseph Priestley publicó su obra *The History and Present State of Electricity* sobre la historia de la electricidad hasta esa fecha. Este libro sería durante un siglo el referente para el estudio de la electricidad. En él, Priestley anuncia también alguno de sus propios descubrimientos, como la conductividad del carbón. Hasta entonces se pensaba que sólo el agua y los metales podían conducir la electricidad.

En 1785 el físico francés Charles Coulomb publicó un tratado en el que se describían por primera vez cuantitativamente las fuerzas eléctricas, se formulaban las leyes de atracción y repulsión de cargas eléctricas estáticas y se usaba la balanza de torsión para realizar mediciones. En su honor, el conjunto de estas leyes se conoce con el nombre de ley de Coulomb. Esta ley, junto con una elaboración matemática más profunda a través del teorema de Gauss y la derivación de los conceptos de campo eléctrico y potencial eléctrico, describe la casi totalidad de los fenómenos electrostáticos. Durante todo el siglo posterior se sucedieron avances significativos en el estudio de la electricidad, como los fenómenos eléctricos dinámicos producidos por cargas en movimiento en el interior de un material conductor. Finalmente, en 1864 el físico escocés James Clerk Maxwell unificó las leyes de la electricidad y el magnetismo en un conjunto reducido de leyes matemáticas.

2.1.2 Electricidad estática

La electricidad estática es un fenómeno que se debe a una acumulación de cargas eléctricas en un objeto. Esta acumulación puede dar lugar a una descarga eléctrica cuando dicho objeto se pone en contacto con otro.

Antes del año 1832, que fue cuando Michael Faraday publicó los resultados de sus experimentos sobre la identidad de la electricidad, los físicos pensaban que la electricidad estática era algo diferente de la electricidad obtenida por otros métodos. Michael Faraday demostró que la electricidad inducida desde un imán, la electricidad producida por una batería, y la electricidad estática son todas iguales.

La electricidad estática se produce cuando ciertos materiales se frotan uno contra el otro, como lana contra plástico o las suelas de zapatos contra la alfombra, donde el proceso de frotamiento causa que se retiren los electrones de la superficie de un material y se reubiquen en la superficie del otro material que ofrece niveles energéticos más favorables. O cuando partículas ionizadas se depositan en un material, como ocurre en los satélites al recibir el flujo del viento solar y de los cinturones de radiación de Van Allen. La capacidad de electrificación de los cuerpos por rozamiento se denomina efecto triboeléctrico; existe una clasificación de los distintos materiales denominada secuencia triboeléctrica. La electricidad estática se utiliza comúnmente en la xerografía, en filtros de aire, en algunas pinturas de automóvil, en algunos aceleradores de partículas subatómicas, etc. Los pequeños componentes de los circuitos electrónicos pueden dañarse fácilmente con la electricidad estática. Sus fabricantes usan una serie de dispositivos antiestáticos y embalajes especiales para evitar estos daños. Hoy la mayoría de los componentes semiconductores de efecto de campo, que son los más delicados, incluyen circuitos internos de protección antiestática.

2.1.3 Aislantes y conductores

Los materiales se comportan de forma diferente en el momento de adquirir una carga eléctrica. Así, una varilla metálica sostenida con la mano y frotada con una

piel no resulta cargada. Sin embargo, sí es posible cargarla cuando al frotarla se usa para sostenerla un mango de vidrio o de plástico y el metal no se toca con las manos al frotarlo. La explicación es que las cargas pueden moverse libremente entre el metal y el cuerpo humano, lo que las iría descargando en cuanto se produjeran, mientras que el vidrio y el plástico no permiten la circulación de cargas porque aíslan eléctricamente la varilla metálica del cuerpo humano.

Esto se debe a que en ciertos materiales, típicamente en los metales, los electrones más alejados de los núcleos respectivos adquieren fácilmente libertad de movimiento en el interior del sólido. Estos electrones libres son las partículas que transportarán la carga eléctrica. Al depositar electrones en ellos, se distribuyen por todo el cuerpo, y viceversa, al perder electrones, los electrones libres se redistribuyen por todo el cuerpo para compensar la pérdida de carga. Estas sustancias se denominan conductores. En contrapartida de los conductores eléctricos, existen materiales en los que los electrones están firmemente unidos a sus respectivos átomos. En consecuencia, estas sustancias no poseen electrones libres y no será posible el desplazamiento de carga a través de ellos. Al depositar una carga eléctrica en ellos, la electrización se mantiene localmente. Estas sustancias son denominadas aislantes o dieléctricos. El vidrio y los plásticos son ejemplos típicos.

La distinción entre conductores y aislantes no es absoluta: la resistividad de los aislantes no es infinita (pero sí muy grande), y las cargas eléctricas libres, prácticamente ausentes de los buenos aislantes, pueden crearse fácilmente suministrando la cantidad adecuada de energía para separar a un electrón del átomo al que esté ligado (por ejemplo, mediante irradiación o calentamiento). Así, a una

temperatura de 3000 K, todos los materiales que no se descomponen por la temperatura, son conductores.

Entre los buenos conductores y los dieléctricos existen múltiples situaciones intermedias. Entre ellas destacan los materiales semiconductores por su importancia en la fabricación de dispositivos electrónicos que son la base de la actual revolución tecnológica. En condiciones ordinarias se comportan como dieléctricos, pero sus propiedades conductoras se modifican mediante la adición de una minúscula cantidad de sustancias dopantes. Con esto se consigue que pueda variarse la conductividad del material semiconductor como respuesta a la aplicación de un potencial eléctrico variable en su electrodo de control.

Ciertos metales adquieren una conductividad infinita a temperaturas muy bajas, es decir, la resistencia al flujo de cargas se hace cero. Se trata de los superconductores. Una vez que se establece una corriente eléctrica de circuito cerrado en un superconductor, los electrones fluyen por tiempo indefinido.

2.1.4 Generadores electrostáticos

Los generadores de electricidad estática son máquinas que producen altísimas tensiones con una muy pequeña intensidad de corriente. Ejemplos de tales generadores son el electróforo, la máquina de Wimshurst y el generador de Van de Graaff.

Al frotar dos objetos no conductores se genera una gran cantidad de electricidad estática. En realidad, este efecto no se debe a la fricción, pues dos superficies no conductoras pueden cargarse con sólo apoyar una sobre la otra. Sin embargo, al frotar dos objetos aumenta el contacto entre las dos superficies, lo que aumentará la cantidad de electricidad generada. Habitualmente los aislantes son buenos para generar y para conservar cargas superficiales. Algunos ejemplos de estas sustancias son el caucho,

los plásticos y el vidrio. Los objetos conductores raramente generan desequilibrios de cargas, excepto, por ejemplo, cuando una superficie metálica recibe el impacto de un sólido o un líquido no conductor, como en los transportes de combustibles líquidos. La carga que se transfiere durante la electrificación por contacto se almacena en la superficie de cada objeto, a fin de estar lo más separada posible y así reducir la repulsión entre las cargas.

2.1.5 Carga inducida

La carga inducida se produce cuando un objeto cargado repele o atrae los electrones de la superficie de un segundo objeto. Esto crea una región en el segundo objeto que está con una mayor carga positiva, creándose una fuerza atractiva entre los objetos. Por ejemplo, cuando se frota un globo, el globo se mantendrá pegado a la pared debido a la fuerza atractiva ejercida por dos superficies con cargas opuestas (la superficie de la pared gana una carga eléctrica inducida pues los electrones libres de la superficie del muro son repelidos por los electrones que ha ganado el globo al frotarse; se crea así por inducción electrostática una superficie de carga positiva en la pared, que atraerá a la superficie negativa del globo).

2.1.6 Carga por fricción

En la carga por fricción se transfiere gran cantidad de electrones porque la fricción aumenta el contacto de un material con el otro. Los electrones más internos de un átomo están fuertemente unidos al núcleo, de carga opuesta, pero los más externos de muchos átomos están unidos muy débilmente y pueden desalojarse con facilidad. La fuerza que retiene a los electrones exteriores en el átomo varía de una sustancia a otra. Por ejemplo los electrones son retenidos con mayor fuerza en la resina que en la lana, y si se frota una torta de resina con un tejido de lana bien seco, se transfieren los

electrones de la lana a la resina. Por consiguiente la torta de resina queda con un exceso de electrones y se carga negativamente. A su vez, el tejido de lana queda con una deficiencia de electrones y adquiere una carga positiva. Los átomos con deficiencia de electrones son iones, iones positivos porque, al perder electrones (que tienen carga negativa), su carga neta resulta positiva.

2.1.7 Carga por inducción

Se puede cargar un cuerpo por un procedimiento sencillo que comienza con el acercamiento a él de una varilla de material aislante, cargado. Considérese una esfera conductora no cargada, suspendida de un hilo aislante. Al acercarle la varilla cargada negativamente, los electrones de conducción que se encuentran en la superficie de la esfera emigran hacia el lado lejano de ésta; como resultado, el lado lejano de la esfera se carga negativamente y el cercano queda con carga positiva. La esfera oscila acercándose a la varilla, porque la fuerza de atracción entre el lado cercano de aquélla y la propia varilla es mayor que la de repulsión entre el lado lejano y la varilla. Vemos que tiene una fuerza eléctrica neta, aun cuando la carga neta en la esfera como un todo sea cero. La carga por inducción no se restringe a los conductores, sino que puede presentarse en todos los materiales.

2.2 CONCEPTOS MATEMÁTICOS FUNDAMENTALES

2.2.1 La Ley de Coulomb

La ecuación fundamental de la electrostática es la ley de Coulomb, que describe la fuerza entre dos cargas puntuales Q_1 y Q_2 . Dentro de un medio homogéneo como es el aire, la relación se expresa como:

$$\mathbf{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon r^2} \hat{r}$$

donde F es la fuerza, ϵ es una constante característica del medio, llamada la «permisividad». En el caso del vacío, se denota como ϵ_0 . La permisividad del aire es sólo un 0,5% superior a la del vacío, por lo que a menudo se usan indistintamente.

La carga elemental es una unidad muy pequeña para cálculos prácticos, es por eso que en el sistema internacional a la unidad de carga eléctrica, el culombio, se le define como la cantidad de carga de $6,25 \times 10^{18}$ electrones. El movimiento de electrones por un conductor se denomina corriente eléctrica y la cantidad de carga eléctrica que pasa por unidad de tiempo se la define como intensidad de corriente.

Las cargas del mismo signo se repelen entre sí, mientras que las cargas de signo opuesto se atraen entre sí. La fuerza es proporcional al producto de las cargas eléctricas e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia entre las cargas.

La acción a distancia se efectúa por medio del campo eléctrico existente en el punto en el cual está situado cada carga.

2.2.2 El campo eléctrico

El campo eléctrico (en unidades de voltios por metro) se define como la fuerza (en newton) por unidad de carga (en coulomb). De esta definición y de la ley de Coulomb, se desprende que la magnitud de un campo eléctrico E creado por una carga puntual Q es:

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}$$

2.2.3 La Ley de Gauss

La Ley de Gauss establece que el flujo eléctrico total a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga eléctrica total encerrada dentro de la superficie. La constante de proporcionalidad es la permisividad del vacío.

Matemáticamente, la ley de Gauss toma la forma de una ecuación integral:

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

Alternativamente, en forma diferencial, la ecuación es

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E} = \rho$$

2.2.4 La ecuación de Poisson

La definición del potencial electrostático, combinada con la forma diferencial de la ley de Gauss, provee una relación entre el potencial Φ y la densidad de carga ρ :

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Esta relación es una forma de la ecuación de Poisson.

2.2.5 Ecuación de Laplace

En ausencia de carga eléctrica, la ecuación es:

$$\nabla^2 \phi = 0$$

que es la ecuación de Laplace.

2.3 FENÓMENOS ELECTROESTÁTICOS

La existencia del fenómeno electrostático es bien conocida desde la antigüedad, existen numerosos ejemplos ilustrativos que hoy forman parte de la enseñanza moderna, como el hecho de que ciertos materiales se cargan de electricidad por simple frotamiento.

2.3.1 Electrización

Se denomina electrización al efecto de ganar o perder cargas eléctricas, normalmente electrones, producido por un cuerpo eléctricamente neutro, se puede presentar:

- a) Por contacto: Se puede cargar un cuerpo neutro con solo tocarlo con otro previamente cargado. En este caso, ambos quedan con el mismo tipo de carga, es decir, si se toca un cuerpo neutro con otro con carga positiva, el primero debe quedar con carga positiva.

- b) Por frotamiento: Al frotar dos cuerpos eléctricamente neutros (número de electrones igual al número de protones), ambos se cargan, uno con carga positiva y el otro con carga negativa.

2.3.2 Carga Eléctrica

Es una de las propiedades básicas de la materia. Realmente, la carga eléctrica de un cuerpo u objeto es la suma de las cargas de cada uno de sus constituyentes mínimos (moléculas, átomos y partículas elementales). Por ello se dice que la carga eléctrica está cuantificada. Existen dos tipos de carga eléctrica, que se han denominado cargas positivas y negativas. Las cargas eléctricas de la misma clase o signo se repelen mutuamente y las de signo distinto se atraen.

2.3.3 Principio de conservación y cuantificación de la carga

Las cargas eléctricas sólo se pueden producir por parejas. La cantidad total de las cargas eléctricas positivas producidas es igual a la de las negativas, es decir, la cantidad total de carga eléctrica en cualquier proceso permanece constante. Además, cualquier carga localizada en un cuerpo siempre es múltiplo entero de la unidad natural de carga, la del electrón.

2.4 CONFIGURACIONES TÍPICAS DE CAMPOS ELECTROSTÁTICOS

2.4.1 Campo eléctrico creado por una carga puntual

El campo que crea una carga puntual Q se deduce a partir de la ley de Coulomb.

Consideremos una carga de prueba Q_0 , colocada a una distancia r de una carga punto Q . La fuerza entre ambas cargas, medida por un observador en reposo respecto a la carga Q estará dada por:

$$\vec{F} = \frac{Q_0 Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r$$

La intensidad del campo eléctrico en el sitio en que se coloca la carga de prueba está dada por:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}$$

y por lo tanto resulta:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r = K \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$$

Donde:

u_r Es un vector unitario en la dirección radial,

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} C^2/Nm^2$ es la llamada permisividad del vacío y

K es la constante de Coulomb cuyo valor es $8,98 \times 10^9 Nm^2/C^2$.

Donde se tienen las equivalencias

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi K} \text{ respectivamente.}$$

La unidad de intensidad de campo eléctrico es $[N/C]$ (Newton por Culombio) o $[V/m]$ (Voltio por Metro).

2.4.2 Principio de superposición

La influencia del campo producido por una carga aislada se puede generalizar al caso de un sistema formado por más de una carga y luego extenderse al estudio de un cuerpo cargado. Experimentalmente se verifica que las influencias de las cargas aisladas que constituyen un sistema son aditivas, o en otras palabras, se suman o superponen vectorialmente. Así, la intensidad de campo E en un punto cualquiera del espacio que rodea a varias cargas será la suma vectorial de las intensidades de los campos debidos a cada una de las cargas individualmente consideradas.

Matemáticamente se puede considerar la siguiente ecuación:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = K \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\|\vec{r}\|^2} \hat{r}$$

Donde K es la constante arbitraria; n es la cantidad de cargas tenidas en cuenta; $\|\vec{r}\|$ es la magnitud del vector distancia entre el punto donde se quiere hallar el campo eléctrico total y la carga i ; y \hat{r} es el vector unitario formado de la misma manera.

2.4.3 Representación gráfica del campo eléctrico

Una forma muy útil de esquematizar gráficamente un campo es trazar líneas que vayan en la misma dirección que dicho campo en varios puntos. Esto se realiza a través de las líneas de fuerza, líneas imaginarias que describen, si los hubiere, los cambios en dirección de las fuerzas al pasar de un punto a otro. En el caso del campo eléctrico, puesto que tiene magnitud y sentido se trata de una cantidad vectorial, y será

un vector tangente a la línea de fuerza en cualquier punto considerado. Según la primera ley de Newton, la fuerza que actúa sobre una partícula produce un cambio en su velocidad; por lo tanto, el movimiento de una partícula cargada en una región dependerá de las fuerzas que actúen sobre ella en cada punto de dicha región. Ahora considérese una carga q , situada en un punto sobre la que actúa una fuerza \vec{F} que es tangente a la línea de campo eléctrico en dicho punto. En vista de que las líneas del campo eléctrico varían en su densidad (están más o menos juntas) y dirección, podemos concluir que la fuerza que experimenta una carga tiende a apartarla de la línea de campo eléctrico sobre la que se encuentra en cada instante.

En otras palabras, una carga bajo los efectos de un campo eléctrico no seguirá el camino de la línea de fuerza sobre la que se encontraba originalmente.

La relación entre las líneas de fuerza (imaginarias) y el vector intensidad de campo, es la siguiente:

- a) La tangente a una línea de fuerza en un punto cualquiera da la dirección de \mathbf{E} en ese punto.
- b) El número de líneas de fuerza por unidad de área de sección transversal es proporcional a la magnitud de \mathbf{E} . Cuanto más cercanas estén las líneas, mayor será la magnitud de \mathbf{E} .

No es obvio que sea posible dibujar un conjunto continuo de líneas que cumplan estos requisitos. De hecho, se encuentra que si la ley de Coulomb no fuera cierta, no sería posible hacerlo.

Si un elemento de superficie de área ΔA es atravesado por ΔN líneas y si la intensidad del campo eléctrico en el centro del elemento de superficie es E , se tiene que:

$$\frac{\Delta N}{\Delta A_n} \propto E$$

El subíndice n indica que ΔA es normal a \mathbf{E} . Para convertir esta proporcionalidad en ecuación se elige ϵ_0 como constante de proporcionalidad. Así, se espacian arbitrariamente las líneas de fuerza de modo que, en cualquier punto, el número de líneas por unidad de superficie y la intensidad del campo eléctrico esté ligado por la relación:

$$\frac{\Delta N}{\Delta A_n} = \epsilon_0 E$$

Considérense, ahora, las líneas de fuerza que salen de una carga puntual positiva q y una esfera de radio r arbitrario rodeando la carga y de modo que ésta se encuentre en el centro. La intensidad del campo eléctrico en todos los puntos de la superficie de esta esfera es:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

En consecuencia, el número de líneas por unidad de superficie es el mismo en todos los puntos de la superficie y está dado por:

$$\epsilon_0 E = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2}$$

Las líneas de fuerza atraviesan la superficie perpendicularmente puesto que \mathbf{E} tiene una dirección radial. El área de la esfera es $4\pi r^2$, lo que implica que el número de líneas que atraviesan la superficie es:

$$N = \epsilon_0 A E = q$$

Esto demuestra que si el valor del exponente de r , en la ley de Coulomb, no fuera 2, el número de líneas de fuerza no solo no estaría dado por el valor de q , también sería

inversamente proporcional a alguna potencia de r y por ello sería imposible dibujar un conjunto continuo de líneas que cumplan los requisitos indicados más arriba.

Para la construcción de líneas de fuerza se debe tener en cuenta lo siguiente:

- a) Por convención, las líneas deben partir de cargas positivas y terminar en cargas negativas y en ausencia de unas u otras deben partir o terminar en el infinito.

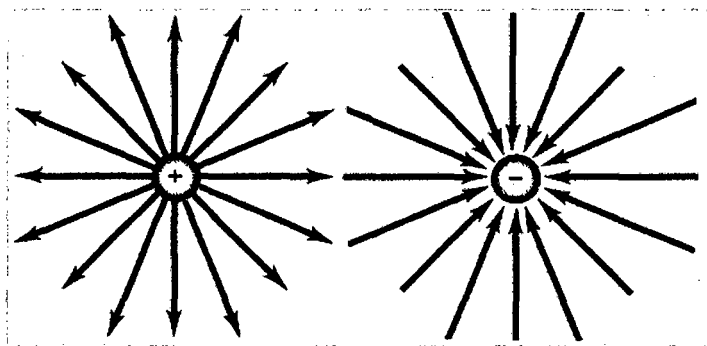


Figura 2.2: Representación de campos eléctricos creados por cargas puntuales negativa y positiva.

Una carga puntual positiva dará lugar a un mapa de líneas de fuerza radiales, pues las fuerzas eléctricas actúan siempre en la dirección de la línea que une a las cargas interactuantes, y dirigidas hacia fuera porque una carga de prueba positiva se desplazaría en ese sentido. En el caso del campo debido a una carga puntual negativa el mapa de líneas de fuerza sería análogo, pero dirigidas hacia ella ya que ése sería el sentido en que se desplazaría la carga positiva de prueba. Como consecuencia de lo anterior, en el caso de los campos debidos a varias cargas, las líneas de fuerza nacen siempre de las cargas positivas y por ello son denominadas manantiales y mueren en las negativas por lo que se les llama sumideros.

- b) Las líneas de fuerza jamás pueden cruzarse.

Las líneas de fuerza o de campo salen de una carga positiva o entran a una negativa. De lo anterior se desprende que de cada punto de la superficie de una esfera, suponiendo forma esférica para una carga, puede salir o entrar sólo una

línea de fuerza, en consecuencia entre dos cargas que interactúan sólo puede relacionarse un punto de su superficie con sólo un punto de la otra superficie, y ello es a través de una línea, y esa línea es la línea de fuerza.

Si se admitiera que dos líneas de fuerza se interceptan, entonces se podría extender la superficie de la otra carga hacia el lugar donde se interceptan las líneas que se mencionan y se podría concluir que dos líneas entran o salen de una superficie de una carga eléctrica. Con esto se está contradiciendo lo postulado inicialmente. En consecuencia, es imposible que dos líneas de fuerza se intercepten.

Por otra parte, si las líneas de fuerza se cortaran, significaría que en dicho punto E poseería dos direcciones distintas, lo que contradice la definición de que a cada punto sólo le corresponde un valor único de intensidad de campo.

- c) El número de líneas de fuerza que parten de una carga positiva o llegan a una carga negativa es proporcional a la cantidad de carga respectiva.
- d) Las líneas de fuerza deben ser perpendiculares a las superficies de los objetos en los lugares donde conectan con ellas.

Esto se debe a que en las superficies de cualquier objeto, sin importar la forma, nunca se encuentran componentes de la fuerza eléctrica que sean paralelas a la superficie del mismo. Si fuera de otra manera, cualquier exceso de carga residente en la superficie comenzaría a acelerar. Esto conduciría a la aparición de un flujo de carga en el objeto, lo cual nunca se observa en la electricidad estática.

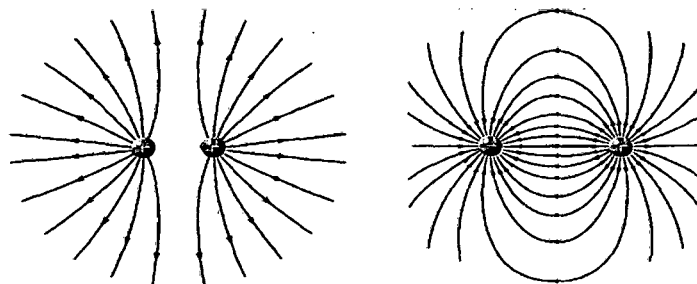


Figura 2.3: Representación del campo eléctrico creado por dos cargas positivas de igual magnitud y por un dipolo eléctrico.

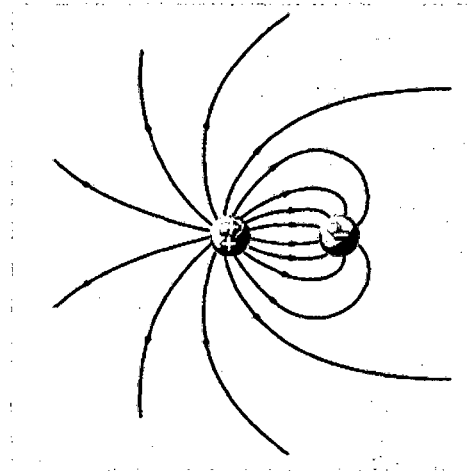


Figura 2.4: Representación del campo eléctrico creado por dos cargas de diferente magnitud y signos opuestos.

Las representaciones anteriores reflejan el principio de superposición. Ya sea que las cargas ostenten el mismo signo o signo opuesto, las líneas de fuerza se verán distorsionadas respecto de la forma radial que tendrían si las cargas estuvieran aisladas, de forma tal, que la distorsión es máxima en la zona central, o sea, en la región más cercana a ambas. Si las cargas tienen la misma magnitud, la representación resulta simétrica respecto de la línea media que las separa. En el caso opuesto, predominará la influencia de una de ellas dando lugar a una distribución asimétrica de líneas de fuerza.

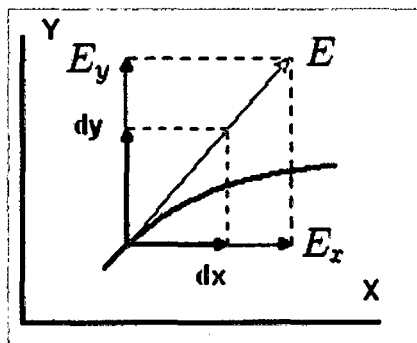


Figura 2.5: Ecuación de las líneas de fuerza

Siendo el campo tangente a las líneas de fuerza, se cumple:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{E_y}{E_x}$$

Donde la función $y = f(x)$ describe la forma de la línea de fuerza.

Si tenemos una sola carga puntual, todas las líneas de fuerza son rectas que parten de la carga. Efectivamente, en este caso, el campo es radial y la razón entre E_y y E_x es

$\frac{y}{x}$, por tanto:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y}{x} \Rightarrow \ln(y) = \ln(x) + C$$

Siendo C la constante de integración. Este resultado se puede escribir como:

$$y = C'x \quad (C' = \exp(C))$$

Que es la ecuación de una recta que pasa por el origen, como era de esperar.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE UN MÓDULO PARA LA VISUALIZACIÓN BIDIMENSIONAL DE UN CAMPO ELÉCTRICO

3.1 EQUIPO BÁSICO PARA LA FORMACIÓN DE CAMPOS Y VISUALIZACIÓN BIDIMENSIONAL

La configuración del equipo básico para la formación de campos eléctricos y su visualización bidimensional estará conformada por las siguientes partes:

- a) Autotransformador
- b) Transformador de corriente alterna
- c) Diodos
- d) Condensador de placas paralelas
- e) Medidor para alto voltaje
- f) Equipo de visualización del campo eléctrico

3.1.1 Autotransformador

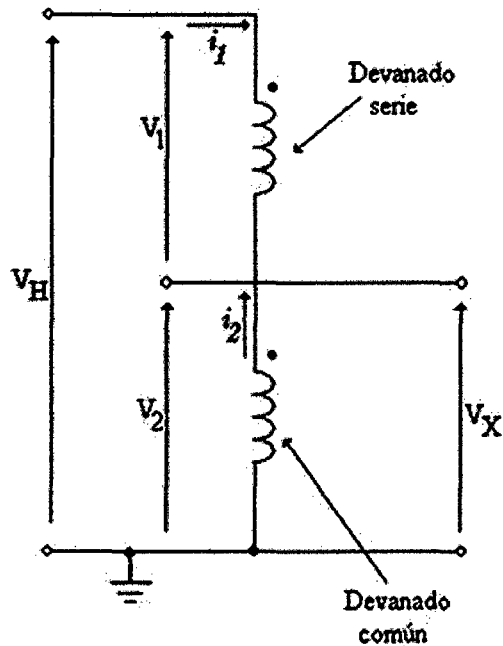


Figura 3.1: Esquema de conexión de un autotransformador.

Un **autotransformador** es una máquina eléctrica, de construcción y características similares a las de un transformador, pero que a diferencia de éste, sólo posee un único devanado alrededor del núcleo. Dicho devanado debe tener al menos tres puntos de conexión eléctrica, llamados tomas. La fuente de tensión y la carga se conectan a dos de las tomas, mientras que una toma (la del extremo del devanado) es una conexión común a ambos circuitos eléctricos (fuente y carga). Cada toma corresponde a un voltaje diferente de la fuente (o de la carga, dependiendo del caso).

Donde:

- V_H : Voltaje en el primario ($V_H = V_1 + V_2$)
- V_X : Voltaje en el secundario ($V_X = V_2$)
- i_H : Corriente en el primario ($i_H = i_1$)
- i_X : Corriente en el secundario ($i_X = i_1 + i_2$)

Al igual que los transformadores, los autotransformadores funcionan basados en el principio de campos magnéticos variantes en el tiempo.

El autotransformador a utilizar es en el que la toma secundaria se logra a través de una escobilla deslizante, permitiendo una gama continua de voltajes secundarios que van desde cero hasta el voltaje de la fuente. Este diseño recibe el nombre genérico de Variac.

Las características del autotransformador utilizado es la siguiente:

Voltaje de entrada: 220 Volt Corriente Alterna.

Voltaje de Salida: Variable de 0 a 220 Volt.

Potencia: 100 Watt

3.1.2 Transformador de corriente alterna

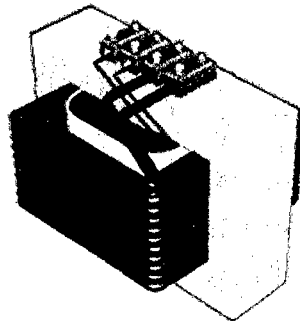


Figura 3.2: Transformador.

Se denomina transformador a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal (esto es, sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc.

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de voltaje, en energía alterna de otro nivel de voltaje, por medio de la acción de un campo magnético. Está constituido por dos o más bobinas de material conductor, aisladas entre sí eléctricamente por lo general enrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo.

Los transformadores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética y están constituidos, en su forma más simple, por dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado de hierro dulce o hierro silicio. Las bobinas o devanados se denominan primarios y secundarios según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente.

Funcionamiento:

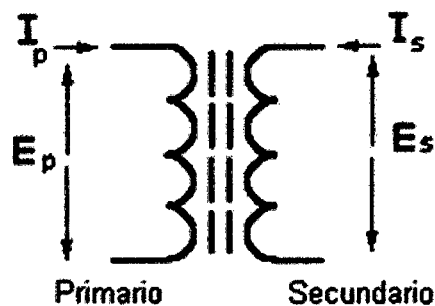


Figura 3.3: Representación esquemática del transformador.

Si se aplica una fuerza electromotriz alterna en el devanado primario, las variaciones de intensidad y sentido de la corriente alterna crearán un campo magnético variable dependiendo de la frecuencia de la corriente. Este campo magnético variable originará, por inducción electromagnética, la aparición de una fuerza electromotriz en los extremos del devanado secundario.

Relación de Transformación

La relación de transformación nos indica el aumento ó decremento que sufre el valor de la tensión de salida con respecto a la tensión de entrada, esto quiere decir, por cada Volt de entrada cuántos Volt hay en la salida del transformador.

La relación entre la fuerza electromotriz inductora (E_p), la aplicada al devanado primario y la fuerza electromotriz inducida (E_s), la obtenida en el secundario, es directamente proporcional al número de espiras de los devanados primario (N_p) y secundario (N_s).

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

La razón de la transformación (m) del voltaje entre el bobinado primario y el bobinado secundario depende de los números de vueltas que tenga cada uno.

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = m$$

Donde:

V_p : es la tensión en el devanado primario ó tensión de entrada,

V_s : es la tensión en el devanado secundario ó tensión de salida,

I_p : es la corriente en el devanado primario ó corriente de entrada, e

I_s : es la corriente en el devanado secundario ó corriente de salida.

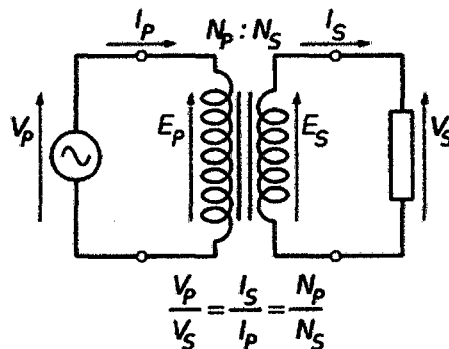


Figura 3.4: Relación de voltaje, Corriente y Número de espiras

El tipo de transformador a utilizar es el de elevador de voltaje. Esto quiere decir que la relación de transformación de estos transformadores es menor a uno.

Las características eléctricas del transformador a utilizar son las siguientes:

Voltaje de entrada: 220 Volt.

Voltaje de Salida: 10000 Volt.

Potencia: 500 Watt.

3.1.3 Diodos

Un **diodo** es un dispositivo semiconductor que permite el paso de la corriente eléctrica en una única dirección con características similares a un interruptor. De forma simplificada, la curva característica de un diodo (I-V) consta de dos regiones: por debajo de cierta diferencia de potencial, se comporta como un circuito abierto (no conduce), y por encima de ella como un circuito cerrado con una resistencia eléctrica muy pequeña. Debido a este comportamiento, se les suele denominar **rectificadores**, ya que son dispositivos capaces de suprimir la parte negativa de cualquier señal, como paso inicial para convertir una corriente alterna en corriente continua.

Cuando se somete al diodo a una diferencia de tensión externa, se dice que el diodo está polarizado, pudiendo ser la polarización **directa** o **inversa**.

Polarización directa de un diodo

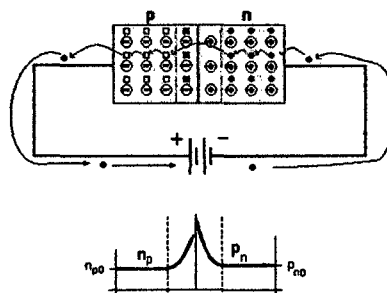


Figura 3.5: Polarización directa de un diodo

En este caso, la batería disminuye la barrera de potencial de la zona de carga espacial, permitiendo el paso de la corriente de electrones a través de la unión; es decir, el diodo polarizado directamente conduce la electricidad.

Para que un diodo esté polarizado directamente, se debe conectar el polo positivo de la batería al ánodo del diodo y el polo negativo al cátodo. En estas condiciones podemos observar que:

- El polo negativo de la batería repele los electrones libres del cristal n, con lo que estos electrones se dirigen hacia la unión p-n.
- El polo positivo de la batería atrae a los electrones de valencia del cristal p, esto es equivalente a decir que empuja a los huecos hacia la unión p-n.
- Cuando la diferencia de potencial entre los bornes de la batería es mayor que la diferencia de potencial en la zona de carga espacial, los electrones libres del cristal n, adquieren la energía suficiente para saltar a los huecos del cristal p, los cuales previamente se han desplazado hacia la unión p-n.
- Una vez que un electrón libre de la zona n salta a la zona p atravesando la zona de carga espacial, cae en uno de los múltiples huecos de la zona p convirtiéndose en electrón de valencia. Una vez ocurrido esto el electrón es atraído por el polo positivo de la batería y se desplaza de átomo en átomo hasta llegar al final del cristal p, desde el cual se introduce en el hilo conductor y llega hasta la batería.

De este modo, con la batería cediendo electrones libres a la zona n y atrayendo electrones de valencia de la zona p, aparece a través del diodo una corriente eléctrica constante hasta el final.

Polarización inversa de un diodo

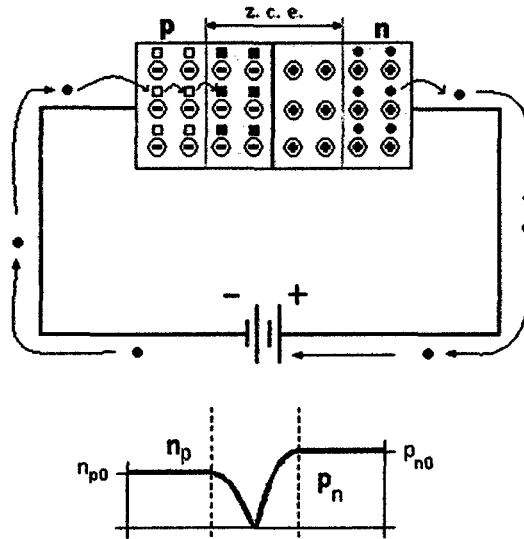


Figura 3.6: Polarización inversa de un diodo

En este caso, el polo negativo de la batería se conecta a la zona p y el polo positivo a la zona n, lo que hace aumentar la zona de carga espacial, y la tensión en dicha zona hasta que se alcanza el valor de la tensión de la batería, tal y como se explica a continuación:

- El polo positivo de la batería atrae a los electrones libres de la zona n, los cuales salen del cristal n y se introducen en el conductor dentro del cual se desplazan hasta llegar a la batería. A medida que los electrones libres abandonan la zona n, los átomos pentavalentes que antes eran neutros, al verse desprendidos de su electrón en el orbital de conducción, adquieren estabilidad (8 electrones en la capa de valencia, ver semiconductor y átomo) y una carga eléctrica neta de +1, con lo que se convierten en iones positivos.
- El polo negativo de la batería cede electrones libres a los átomos trivalentes de la zona p. Recordemos que estos átomos sólo tienen 3 electrones de valencia, con lo que una vez que han formado los enlaces covalentes con los

átomos de silicio, tienen solamente 7 electrones de valencia, siendo el electrón que falta el denominado *hueco*. El caso es que cuando los electrones libres cedidos por la batería entran en la zona p, caen dentro de estos huecos con lo que los átomos trivalentes adquieren estabilidad (8 electrones en su orbital de valencia) y una carga eléctrica neta de -1, convirtiéndose así en iones negativos.

- Este proceso se repite una y otra vez hasta que la zona de carga espacial adquiere el mismo potencial eléctrico que la batería.

En esta situación, el diodo no debería conducir la corriente; sin embargo, debido al efecto de la temperatura se formarán pares electrón-hueco a ambos lados de la unión produciendo una pequeña corriente (del orden de $1 \mu\text{A}$) denominada **corriente inversa de saturación**.

Además, existe también una denominada **corriente superficial de fugas** la cual, como su propio nombre indica, conduce una pequeña corriente por la superficie del diodo; ya que en la superficie, los átomos de silicio no están rodeados de suficientes átomos para realizar los cuatro enlaces covalentes necesarios para obtener estabilidad.

Esto hace que los átomos de la superficie del diodo, tanto de la zona n como de la p, tengan huecos en su orbital de valencia con lo que los electrones circulan sin dificultad a través de ellos.

No obstante, al igual que la corriente inversa de saturación, la corriente superficial de fuga es despreciable.

Curva característica del diodo

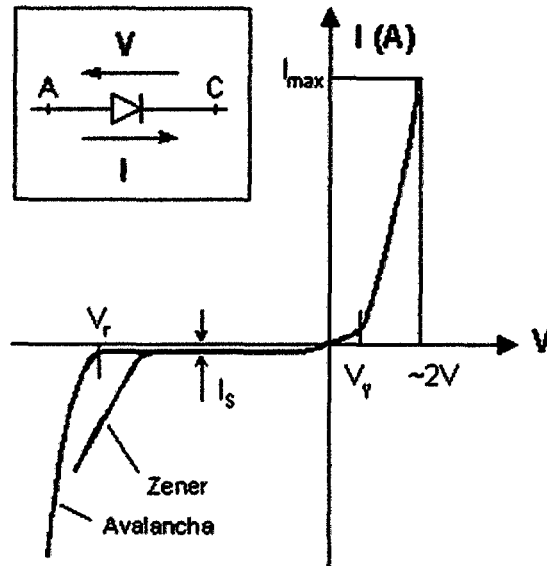


Figura 3.7: Curva característica del diodo

- **Tensión umbral, de codo o de partida (V_r).**

La tensión umbral (también llamada barrera de potencial) de polarización directa coincide en valor con la tensión de la zona de carga espacial del diodo no polarizado. Al polarizar directamente el diodo, la barrera de potencial inicial se va reduciendo, incrementando la corriente ligeramente, alrededor del 1% de la nominal. Sin embargo, cuando la tensión externa supera la tensión umbral, la barrera de potencial desaparece, de forma que para pequeños incrementos de tensión se producen grandes variaciones de la intensidad de corriente.

- **Corriente máxima (I_{max}).**

Es la intensidad de corriente máxima que puede conducir el diodo sin fundirse por el efecto Joule. Dado que es función de la cantidad de calor que puede disipar el diodo, depende sobre todo del diseño del mismo.

- **Corriente inversa de saturación (I_s).**

Es la pequeña corriente que se establece al polarizar inversamente el diodo por la formación de pares electrón-hueco debido a la temperatura, admitiéndose que se duplica por cada incremento de 10° en la temperatura.

- **Corriente superficial de fugas.**

Es la pequeña corriente que circula por la superficie del diodo (ver polarización inversa), esta corriente es función de la tensión aplicada al diodo, con lo que al aumentar la tensión, aumenta la corriente superficial de fugas.

- **Tensión de ruptura (V_r).**

Es la tensión inversa máxima que el diodo puede soportar antes de darse el efecto avalancha. Teóricamente, al polarizar inversamente el diodo, este conducirá la corriente inversa de saturación; en la realidad, a partir de un determinado valor de la tensión, en el diodo normal o de unión abrupta la ruptura se debe al efecto avalancha; no obstante hay otro tipo de diodos, como los Zener, en los que la ruptura puede deberse a dos efectos:

- **Efecto avalancha** (diodos poco dopados). En polarización inversa se generan pares electrón-hueco que provocan la corriente inversa de saturación; si la tensión inversa es elevada los electrones se aceleran incrementando su energía cinética de forma que al chocar con electrones de valencia pueden provocar su salto a la banda de conducción. Estos electrones liberados, a su vez, se aceleran por efecto de la tensión, chocando con más electrones de valencia y liberándolos a su vez. El resultado es una *avalancha* de electrones que provoca una corriente grande. Este fenómeno se produce para valores de la tensión superiores a 6 V.

- **Efecto Zener** (diodos muy dopados). Cuanto más dopado está el material, menor es la anchura de la zona de carga. Puesto que el campo eléctrico E puede expresarse como cociente de la tensión V entre la distancia d ; cuando el diodo esté muy dopado, y por tanto d sea pequeño, el campo eléctrico será grande, del orden de $3 \cdot 10^5$ V/cm. En estas condiciones, el propio campo puede ser capaz de arrancar electrones de valencia incrementándose la corriente. Este efecto se produce para tensiones de 4 V o menores.
Para tensiones inversas entre 4 y 6 V la ruptura de estos diodos especiales, como los Zener, se puede producir por ambos efectos.

Modelos matemáticos

El modelo matemático más empleado es el de **Shockley** (en honor a William Bradford Shockley) que permite aproximar el comportamiento del diodo en la mayoría de las aplicaciones. La ecuación que liga la intensidad de corriente y la diferencia de potencial es:

$$I = I_S \left(e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1 \right)$$

Donde:

- I es la intensidad de la corriente que atraviesa el diodo
- V_D es la diferencia de tensión entre sus extremos.
- I_S es la corriente de saturación (aproximadamente 10^{-12} A)
- q es la carga del electrón cuyo valor es $1.6 \cdot 10^{-19}$
- T es la temperatura absoluta de la unión
- k es la constante de Boltzmann

- n es el coeficiente de emisión, dependiente del proceso de fabricación del diodo y que suele adoptar valores entre 1 (para el germanio) y del orden de 2 (para el silicio).
- El término $V_T = kT/q = T/11600$ es la tensión debida a la temperatura, del orden de 26 mV a temperatura ambiente (300 K ó 27 °C).

Rectificador de onda completa

Un Rectificador de onda completa es un circuito empleado para convertir una señal de corriente alterna de entrada (V_i) en corriente continua de salida (V_o) pulsante. A diferencia del rectificador de media onda, en este caso, la parte negativa de la señal se convierte en positiva o bien la parte positiva de la señal se convertirá en negativa, según se necesite una señal positiva o negativa de corriente continua.

Existen dos alternativas, bien empleando dos diodos o empleando cuatro (puente de Graetz).

Rectificador con dos diodos.

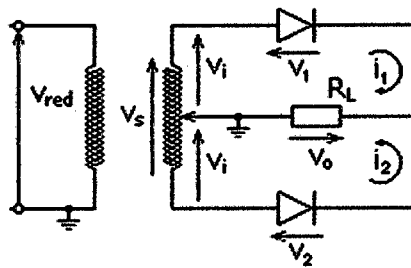


Figura 3.8: Rectificador de onda completa con dos diodos.

En el circuito de la figura, ambos diodos no pueden encontrarse simultáneamente en directa o en inversa, ya que las diferencias de potencial a las que están sometidos son de signo contrario; por tanto uno se encontrará polarizado inversamente y el otro

directamente. La tensión de entrada (V_i) es, en este caso, la mitad de la tensión del secundario del transformador.

Tensión de entrada positiva.

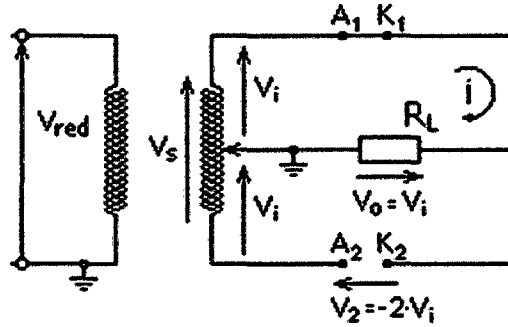


Figura 3.9: Tensión de entrada positiva.

El diodo 1 se encuentra en polarizado directamente (conduce), mientras que el 2 se encuentra en inversa (no conduce). La tensión de salida es igual a la de entrada. El diodo 2 ha de soportar en inversa la tensión máxima del secundario.

Tensión de entrada negativa.

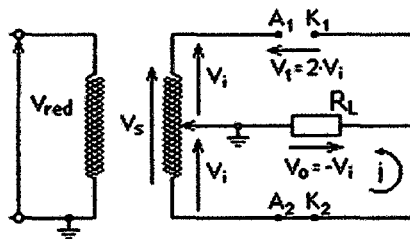


Figura 3.10: Tensión de entrada negativa

El diodo 2 se encuentra en directa (conduce), mientras que el diodo 1 se encuentra en inversa (no conduce). La tensión de salida es igual a la de entrada pero de signo contrario. El diodo 1 ha de soportar en inversa la tensión máxima del secundario.

Puente de Graetz o Puente Rectificador de doble onda

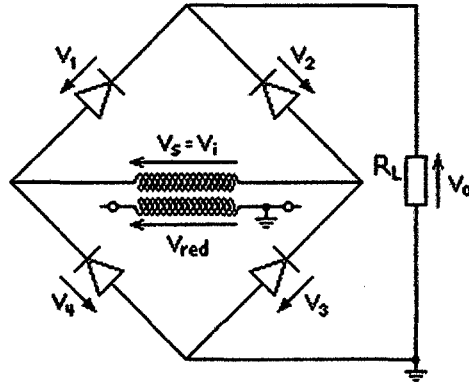


Figura 3.11: Puente de Graetz o Puente Rectificador de doble onda

En este caso se emplean cuatro diodos con la disposición de la figura. Al igual que antes, sólo son posibles dos estados de conducción, o bien los diodos 1 y 3 están en directa y conducen (tensión positiva) o por el contrario son los diodos 2 y 4 los que se encuentran en inversa y conducen (tensión negativa).

A diferencia del caso anterior, ahora la tensión máxima de salida es la del secundario del transformador (el doble de la del caso anterior), la misma que han de soportar los diodos en inversa, al igual que en el rectificador con dos diodos. Esta es la configuración usualmente empleada para la obtención de onda continua.

Tensión rectificada.

$V_o = V_i = V_s/2$ en el rectificador con dos diodos.

$V_o = V_i = V_s$ en el rectificador con puente de Graetz.

Si consideramos la caída de tensión típica en los diodos en conducción, aproximadamente 0,6V; tendremos que para el caso del rectificador de doble onda la

$V_o = V_i - 1,2V$.

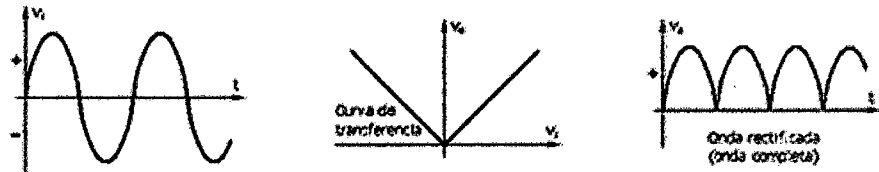


Figura 3.12: Onda rectificada de onda completa.

3.1.4 Condensador eléctrico.

Un condensador eléctrico es un dispositivo que almacena energía eléctrica y está formado por un par de superficies conductoras en situación de influencia total (esto es, que todas las líneas de campo eléctrico que parten de una van a parar a la otra), generalmente en forma de tablas, esferas o láminas, separadas por un material dieléctrico o por el vacío, que, sometidas a una diferencia de potencial adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de las placas y negativa en la otra (siendo nula la carga total almacenada).

La carga almacenada en una de las placas es proporcional a la diferencia de potencial entre esta placa y la otra, siendo la constante de proporcionalidad la llamada capacidad o capacitancia. En el Sistema internacional de unidades se mide en Faradios (F), siendo 1 faradio la capacidad de un condensador en el que, sometidas sus armaduras a una diferencia de potencial de 1 voltio, éstas adquieren una carga eléctrica de 1 culombio.

La capacidad de 1 faradio es mucho más grande que la de la mayoría de los condensadores, por lo que en la práctica se suele indicar la capacidad en micro- $\mu\text{F} = 10^{-6}$, nano- $\text{nF} = 10^{-9}$ o pico- $\text{pF} = 10^{-12}$ -faradios.

El valor de la capacidad de un condensador viene definido por la siguiente fórmula:

$$C = \frac{Q_1}{V_1 - V_2} = \frac{Q_2}{V_2 - V_1}$$

en donde:

C : Capacitancia

Q_1 : Carga eléctrica almacenada en la placa 1.

Q_2 : Carga almacenada en la placa 2.

$V_1 - V_2$: Diferencia de potencial entre la placa 1 y la 2.

Nótese que en la definición de capacidad es indiferente que se considere la carga de la placa positiva o la de la negativa, ya que

$$Q_2 = C(V_2 - V_1) = -C(V_1 - V_2) = -Q_1$$

Aunque por convenio se suele considerar la carga de la placa positiva.

En cuanto al aspecto constructivo, tanto la forma de las placas o armaduras como la naturaleza del material dieléctrico son sumamente variables. Existen condensadores formados por placas, usualmente de aluminio, separadas por aire, materiales cerámicos, mica, poliéster, papel o por una capa de óxido de aluminio obtenido por medio de la electrólisis.

Energía almacenada

El condensador almacena carga eléctrica, debido a la presencia de un campo eléctrico en su interior, cuando aumenta la diferencia de potencial en sus terminales, devolviéndola cuando ésta disminuye. Matemáticamente se puede obtener que la energía \mathcal{E} , almacenada por un condensador con capacidad C , que es conectado a una diferencia de potencial $V_1 - V_2$, viene dada por:

$$\mathcal{E} = \int \left(\frac{1}{2} \varepsilon E^2 \right) dV = \frac{1}{2} C (V_1 - V_2)^2 = \frac{1}{2} Q_1 (V_1 - V_2) = \frac{Q_1^2}{2C}$$

Comportamientos ideal y real

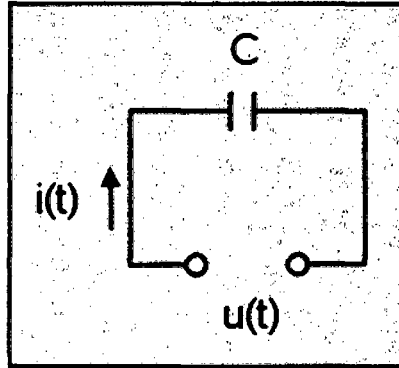


Figura 3.13: Condensador ideal.

El condensador ideal de la figura 3.13 puede definirse a partir de la siguiente ecuación diferencial:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

donde C es la capacidad, $u(t)$ es la función diferencia de potencial aplicada a sus terminales e $i(t)$ la corriente resultante que circula.

Comportamiento en corriente continúa

Un condensador real en corriente continua se comporta prácticamente como uno ideal, es decir, como un circuito abierto. Esto es así en régimen permanente ya que en régimen transitorio, esto es, al conectar o desconectar un circuito con condensador, suceden fenómenos eléctricos transitorios que inciden sobre la diferencia de potencial en sus bornes.

Comportamiento en corriente alterna

En corriente alterna, un condensador ideal ofrece una resistencia al paso de la corriente que recibe el nombre de reactancia capacitiva, X_C , cuyo valor viene dado por la inversa del producto de la pulsación ($\omega = 2\pi f$) por la capacidad, C :

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

Si la pulsación se expresa en radianes por segundo (rad/s) y la capacidad en faradios (F), la reactancia resultará en ohmios.

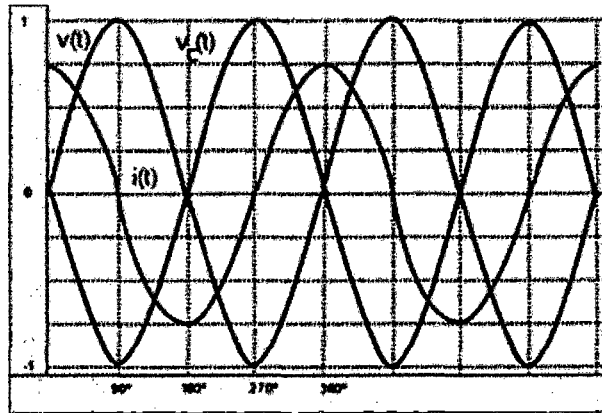


Figura 3.14: Diagrama cartesiano de las tensiones y corriente en un condensador.

Al conectar una corriente alterna senoidal $v(t)$ a un condensador circulará una corriente $i(t)$, también senoidal, que lo cargará, originando en sus bornes una caída de tensión, $-v_c(t)$, cuyo valor absoluto puede demostrarse que es igual al de $v(t)$. Al decir que por el condensador "circula" una corriente, se debe puntualizar que, en realidad, dicha corriente nunca atraviesa su dieléctrico. Lo que sucede es que el condensador se carga y descarga al ritmo de la frecuencia de $v(t)$, por lo que la corriente circula externamente entre sus armaduras.

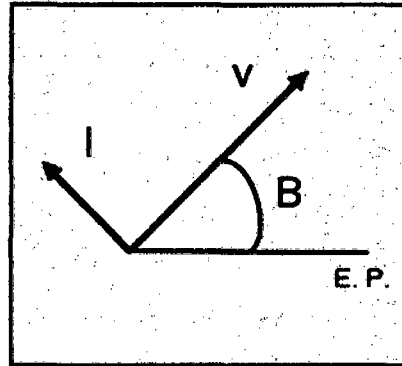


Figura 3.15: Diagrama fasorial.

La corriente en el condensador queda adelantada 90° respecto de la tensión aplicada. Considerando un condensador C , como el de la figura 3.13, al que se aplica una tensión alterna de valor:

$$u(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t + \beta)$$

De acuerdo con la ley de Ohm circulará una corriente alterna, adelantada 90° ($\pi/2$) respecto a la tensión aplicada (figura 3.15), de valor:

$$i(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t + \beta + 90^\circ)$$

Dónde

$$I_0 = \frac{V_0}{X_C}$$

Si se representa el valor eficaz de la corriente obtenida en forma polar:

$$\vec{I} = I \angle \beta + 90^\circ$$

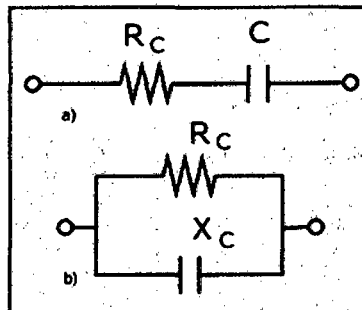


Figura 3.16: Circuitos equivalentes de un condensador en corriente alterna.

y operando matemáticamente:

$$\vec{I} = \frac{V}{X_C} \underline{|\beta + 90^\circ} = \frac{V \underline{|\beta}}{X_C \underline{|\underline{-90^\circ}}}$$

Por lo tanto, en los circuitos de corriente alterna, un condensador ideal se puede asimilar a una magnitud compleja sin parte real y parte imaginaria negativa:

$$\vec{X}_C = 0 - X_C j = X_C \underline{|\underline{-90^\circ}}$$

En el condensador real, habrá que tener en cuenta la resistencia de pérdidas de su dieléctrico, R_C , pudiendo ser su circuito equivalente, o modelo, el que aparece en la figura 3.16a) o 3.16b) dependiendo del tipo de condensador y de la frecuencia a la que se trabaje, aunque para análisis más precisos pueden utilizarse modelos más complejos que los anteriores.

Carga y descarga

Al conectar un condensador en un circuito, la corriente empieza a circular por el mismo. A la vez, el condensador va acumulando carga entre sus placas. Cuando el condensador se encuentra totalmente cargado, deja de circular corriente por el circuito. Si se quita la fuente y se coloca el condensador y la resistencia en cortocircuito, la carga empieza a fluir de una de las placas del condensador a la otra a través de la resistencia, hasta que la carga es nula en las dos placas. En este caso, la corriente circulará en sentido contrario al que circulaba mientras el condensador se estaba cargando.

$$\text{Carga: } V(t) = V_0(1 - e^{-t/R_C}) \text{ y } I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-t/R_C}$$

$$\text{Descarga: } V(t) = V_0 e^{-t/R_C} \text{ y } I(t) = -\frac{V_0}{R} e^{-t/R_C}$$

En donde:

$V(t)$ es la tensión en el condensador.

V_0 es la tensión de la fuente.

$I(t)$ la intensidad de corriente que circula por el circuito.

Tipos de dieléctrico utilizados en condensadores

- **Condensadores de aire.** Se trata de condensadores, normalmente de placas paralelas, con dieléctrico de aire y encapsulados en vidrio. Como la permisividad eléctrica relativa es la unidad, sólo permite valores de capacidad muy pequeños. Se utilizó en radio y radar, pues carecen de pérdidas y polarización en el dieléctrico, funcionando bien a frecuencias elevadas.
- **Condensadores de mica.** La mica posee varias propiedades que la hacen adecuada para dieléctrico de condensadores: bajas pérdidas, exfoliación en láminas finas, soporta altas temperaturas y no se degrada por oxidación o con la humedad. Sobre una cara de la lámina de mica se deposita aluminio, que forma una armadura. Se apilan varias de estas láminas, soldando los extremos alternativamente a cada uno de los terminales. Estos condensadores funcionan bien en altas frecuencias y soportan tensiones elevadas, pero son caros y se ven gradualmente sustituidos por otros tipos.
- **Condensadores de papel.** El dieléctrico es papel parafinado, bakelizado o sometido a algún otro tratamiento que reduce su higroscopia y aumenta el aislamiento. Se apilan dos cintas de papel, una de aluminio, otras dos de papel y otra de aluminio y se enrollan en espiral. Las cintas de aluminio constituyen las dos armaduras, que se conectan a sendos terminales. Se utilizan dos cintas de papel para evitar los poros que pueden presentar.
- **Condensadores electrolíticos.** Es un tipo de condensador que utiliza un electrolito, como su primera armadura, la cual actúa como cátodo. Con la tensión adecuada, el electrolito deposita una capa aislante (la cual es en general una capa muy fina de óxido de aluminio) sobre la segunda armadura o cuba (ánodo), consiguiendo así capacidades muy elevadas. Son

inadecuados para funcionar con corriente alterna. La polarización inversa destruye el óxido, produciendo un corto entre el electrolito y la cuba, aumentando la temperatura, y por tanto, arde o estalla el condensador consecuentemente. Existen varios tipos, según su segunda armadura y electrolito empleados:

- **Condensadores de aluminio.** Es el tipo normal. La cuba es de aluminio y el electrolito una disolución de ácido bórico. Funciona bien a bajas frecuencias, pero presenta pérdidas grandes a frecuencias medias y altas. Se emplea en fuentes de alimentación y equipos de audio. Muy utilizado en fuentes de alimentación conmutadas.
- **Condensadores de tantalio.** Es otro condensador electrolítico, pero emplea tantalio en lugar de aluminio. Consigue corrientes de pérdidas bajas, mucho menores que en los condensadores de aluminio. Suelen tener mejor relación capacidad/volumen.
- **Condensadores bipolares (para corriente alterna).** Están formados por dos condensadores electrolíticos en serie inversa, utilizados en caso de que la corriente pueda invertirse. Son inservibles para altas frecuencias.
- **Condensadores de poliéster o Mylar.** Está formado por láminas delgadas de poliéster sobre las que se deposita aluminio, que forma las armaduras. Se apilan estas láminas y se conectan por los extremos. Del mismo modo, también se encuentran condensadores de policarbonato y polipropileno.
- **Condensadores de poliestireno también conocidos comúnmente como Styroflex (marca registrada de Siemens).** Otro tipo de condensadores de plástico, muy utilizado en radio, por disponer de coeficiente de temperatura

inverso a las bobinas de sintonía, logrando de este modo estabilidad en los circuitos resonantes.

- **Condensadores cerámicos.** Utiliza cerámicas de varios tipos para formar el dieléctrico. Existen tipos formados por una sola lámina de dieléctrico, pero también los hay formados por láminas apiladas. Dependiendo del tipo, funcionan a distintas frecuencias, llegando hasta las microondas.
- **Condensadores síncronos.** Es un motor síncrono que se comporta como un condensador.
- **Dieléctrico variable.** Este tipo de condensador tiene una armadura móvil que gira en torno a un eje, permitiendo que se introduzca más o menos dentro de la otra. El perfil de la armadura suele ser tal que la variación de capacidad es proporcional al logaritmo del ángulo que gira el eje.
 - **Condensadores de ajuste.** Son tipos especiales de condensadores variables. Las armaduras son semicirculares, pudiendo girar una de ellas en torno al centro, variando así la capacidad. Otro tipo se basa en acercar las armaduras, mediante un tornillo que las aprieta.

El condensador a emplear tiene las siguientes características:

Placas conductoras: Aluminio.

Material dieléctrico: Mylar

Capacidad: 2500 pF

Voltaje máximo de trabajo: 40 000 Volt.

3.1.5 Medidor de alto voltaje

Para medir voltajes superiores a 40 000 Volt, en corriente continua, se hace necesario hacer uso de un divisor de voltaje de tipo resistivo, que soporte la corriente y la potencia a ser utilizada.

Divisor de voltaje

Un divisor de voltaje es una configuración de circuito eléctrico que reparte el voltaje de una fuente entre una o más impedancias conectadas en serie.

Supóngase que se tiene una fuente de voltaje V_f , conectada en serie con n impedancias.

Para conocer el voltaje en la impedancia genérica Z_i , se utiliza la ley de Ohm:

$$V_i = I \cdot Z_i$$

$$I = \frac{V_f}{\sum Z_n}$$

Sustituyendo la segunda ecuación en la primera se obtiene que el voltaje en la impedancia genérica Z_i será:

$$V_i = \frac{Z_i}{\sum Z_n} \cdot V_f$$

Divisor resistivo

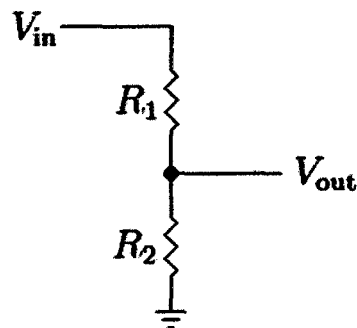


Figura 3.17: Divisor resistivo.

Un divisor resistivo es un caso especial donde ambas impedancias, Z_1 y Z_2 , son puramente resistivas.

De ser así tenemos la siguiente fórmula:

$$V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{\text{in}}$$

R_1 y R_2 pueden ser cualquier combinación de resistencias en serie o paralelo.

Para la fabricación del atenuador de voltaje se tiene en consideración:

El multímetro a utilizar es capaz de medir 1000 Volt = V_{out}

La resistencia interna del multímetro es de $10\text{ M}\Omega = R_2$

La corriente máxima que circula por el multímetro es:

$$I = \frac{V_{out}}{R_2} = \frac{1000\text{ V}}{10 \times 1000000\Omega} = 0,0001\text{ A}$$

El voltaje de ingreso máximo es de 100 000 Volt = V_{in}

Entonces el valor de R_1 será:

$$1000 = \frac{10 * 1000000}{R_1 + 10 \times 1000000} * 100000$$

Despejando R_1

$$R_1 = 99 \times 10^7 \Omega = 990\text{ M}\Omega$$

La potencia disipada total será:

$$P = V * I = 100000 * 0,0001 = 10\text{ W}$$

En las tiendas de productos electrónicos venden resistencias de un valor máximo de $20\text{ M}\Omega$ y de potencias de $\frac{1}{2}$ y 1 Watt.

Se debe comprar 49 resistencias de $20\text{ M}\Omega$ y una de $10\text{ M}\Omega$, de 1 Watt de potencia cada una, y colocarlos en serie para conseguir el atenuador de voltaje.

3.1.6 Equipo de visualización del campo eléctrico

El equipo de visualización del campo eléctrico estará conformado por los siguientes elementos:

- a) Condensador plano de placas paralelas con una distancia de separación d .

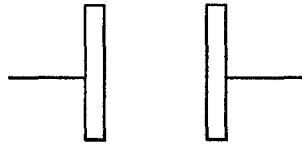


Figura 3.18: Condensador plano de placas paralelas

- b) Condensador de placa y una esfera con una distancia de separación d .

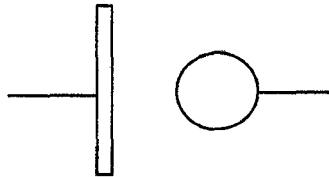


Figura 3.19: Condensador de placa y una esfera

- c) Condensador de dos esferas con una distancia de separación d .

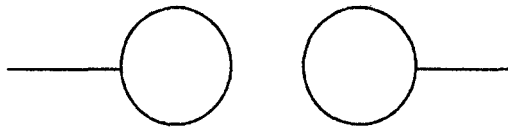


Figura 3.20: Condensador de dos esferas

- d) Cubeta de acrílico

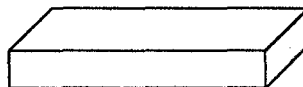


Figura 3.21: Cubeta de acrílico

- e) Aceite de ricino
- f) Partículas de sémola o semilla de gras.

3.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN

El equipo básico para la formación de campos eléctricos y su visualización bidimensional estará configurado de acuerdo al plano 1 del apéndice.

Antes de proceder el ensayo se debe verificar que todas las conexiones se encuentren adecuadamente instaladas.

Cualquier objeto metálico cercano al lugar del ensayo debe ser retirado y el cuarto donde se realice el ensayo debe estar cerrado para evitar corrientes de aire que van a alterar el ensayo. Colocar la cubeta de acrílico sobre la parte central de la placa de electrodos. Luego, verter aproximadamente 60 ml de aceite de ricino limpio y esperar hasta que el aceite permanezca estático.

Distribuir la sémola granulado semilla de gras en forma uniforme sobre la superficie del aceite de ricino.

El funcionamiento del autotransformador nos permite obtener a la salida del transformador de alta voltajes variables continuos de 0 a 10 000 Volt, el cual es rectificado y aplicado al visualizador de campos eléctricos, la nitidez de esta visualización va a depender del voltaje aplicado. Formado el campo eléctrico se procede a desconectar la conexión eléctrica del autotransformador y se procede a tomar las fotos correspondientes.

El alto voltaje y la producción de campos eléctricos muchas veces malogran los equipos electrónicos que se encuentren funcionando, por lo que se recomienda que éstos sean desconectados.

CAPÍTULO 4

PLAN DE ENSAYOS

4.1 PARA LA OBTENCIÓN DE LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO

4.1.1 Carga puntual



Figura 4.1: Campo eléctrico de una carga puntual

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando un pequeño electrodo cilíndrico que se carga con el generador de voltaje variable desarrollado, se obtiene las líneas de campo eléctrico.

4.1.2 Cargas puntuales con igual signo

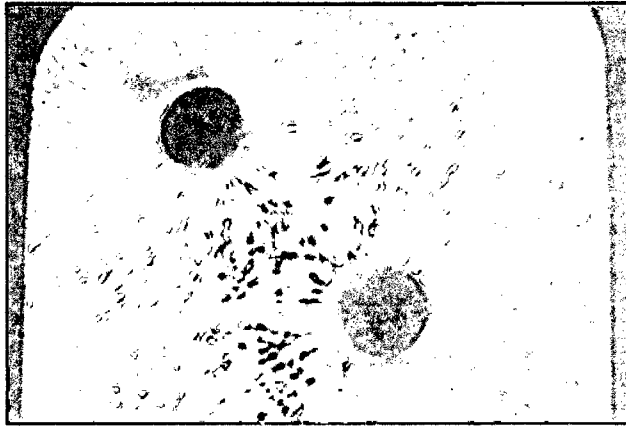


Figura 4.2: Líneas de campo para dos cargas eléctricas puntuales del mismo signo.

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando dos electrodos cilíndricos que se cargan de igual signo con el generador de voltaje variable desarrollado, se obtienen las líneas de campo eléctrico.

4.1.3 Cargas puntuales con distinto signo



Figura 4.3: Líneas de campo de dos cargas eléctricas puntuales de distinto signo.

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando dos electrodos cilíndricos que se cargan de distinto signo con el generador de voltaje variable desarrollado, se obtienen las líneas de campo eléctrico.

4.1.4 Lámina finita

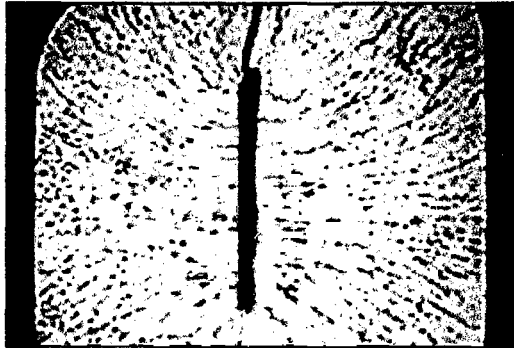


Figura 4.4: Líneas de campo eléctrico para lámina finita

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando una lámina metálica finita que se carga con el generador de voltaje variable desarrollado, se obtienen las líneas de campo eléctrico correspondiente.

4.1.5 Láminas finitas con igual signo

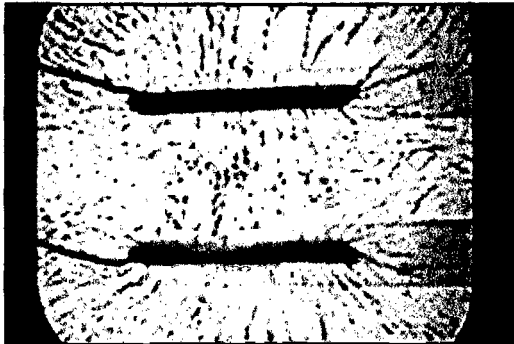


Figura 4.5: Líneas de campo eléctrico para láminas finitas paralelas de igual signo

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando dos láminas metálicas finitas que se cargan de igual signo con el generador devoltaje variable desarrollado, se obtienen las líneas de campo eléctrico. Se pueden observar los efectos de bordes.

4.1.6 Láminas finitas con distinto signo



Figura 4.6: Líneas de campo eléctrico para láminas finitas paralelas de distinto signo

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando dos láminas metálicas finitas que se cargan de distinto signo con el generador devoltaje variable desarrollado, se obtienen las líneas de campo eléctrico. Se pueden observar los efectos de bordes.

4.1.7 Láminas infinitas con igual signo

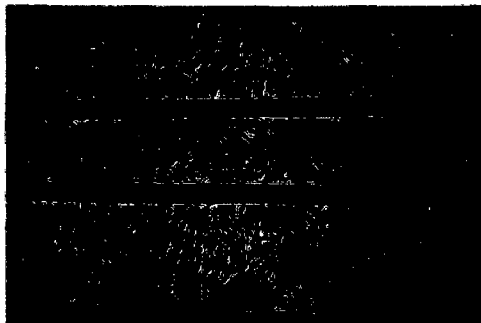


Figura 4.7: Líneas de campo eléctrico para láminas infinitas paralelas de igual signo.

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando dos láminas metálicas de una longitud considerable, que se cargan de igual signo con el generador devoltaje variable desarrollado, se obtienen las líneas de campo eléctrico.

4.1.8 Láminas infinitas con distinto signo

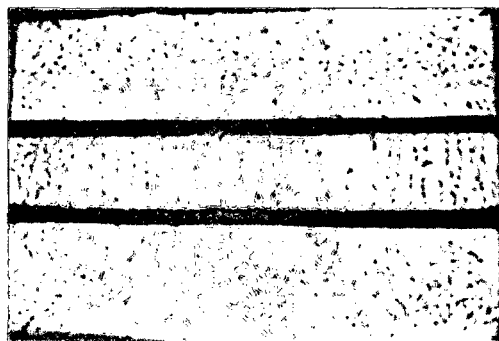


Figura 4.8: Líneas de campo eléctrico para láminas infinitas paralelas de distinto signo.

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando dos láminas metálicas de una longitud considerable, que se cargan de distinto signo con el generador devoltaje variable desarrollado, se obtienen las líneas de campo eléctrico.

4.1.9 Configuración cilíndrica

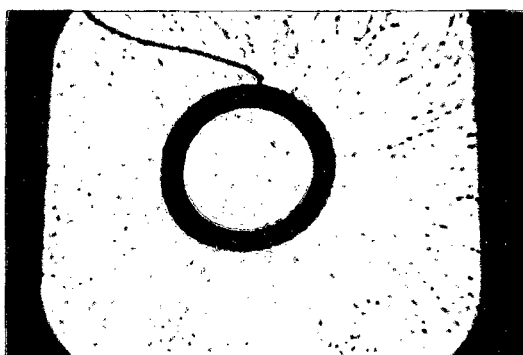


Figura 4.9: Líneas de campo eléctrico para una Configuración cilíndrica

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando un recipiente metálico cilíndrico que se carga con el generador de voltaje variable desarrollado, se obtienen las líneas de campo eléctrico correspondientes.

4.1.10 Configuración irregular

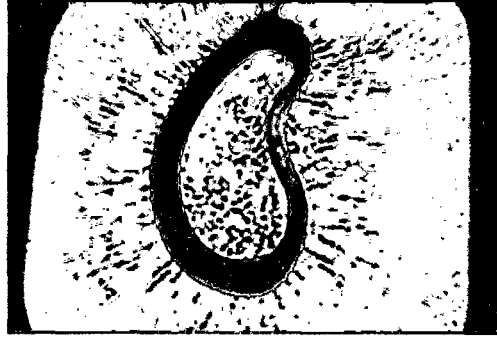


Figura 4.10: Líneas de campo eléctrico para una configuración irregular

Por medio del uso de aceite, semillas de grama y empleando un recipiente metálico de forma irregular que se carga con el generador devoltaje variable desarrollado, se obtienen las líneas de campo eléctrico correspondientes.

4.2 CAPACITORES

4.2.1 Capacitor plano

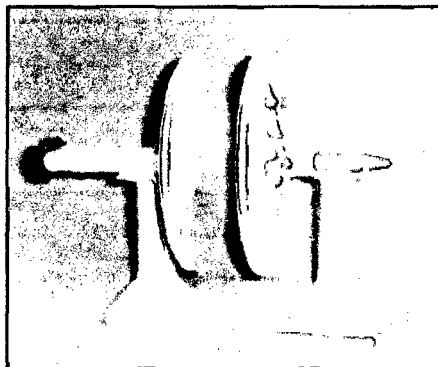


Figura 4.11: Capacitor plano

Se dispone de un capacitor de placas circulares planas paralelas al cual se le suministra carga por medio del generador electrostático desarrollado. Se puede observar la descarga entre las placas del capacitor.

4.2.2 Capacitor cilíndrico



Figura 4.12: Capacitor cilíndrico

Se dispone de un capacitor de placas cilíndricas al cual se le suministra carga por medio del generador electrostático desarrollado. Se puede observar una fuerte descarga al unir por medio de un conductor las placas interna y externa.

4.2.3 Capacitancia de un capacitor con dieléctrico

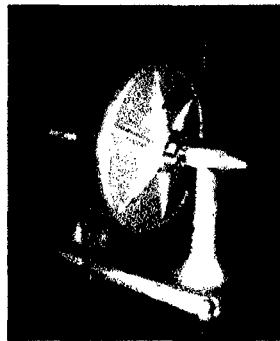


Figura 4.13: Capacitancia de un capacitor con dieléctrico

Utilizando un multímetro con atenuador para determinar la diferencia de potencial entre las placas de un capacitor plano, se puede observar que la capacitancia de un capacitor aumenta al colocar un dieléctrico entre sus placas.

4.2.4 Potencial de ruptura de un dieléctrico



Figura 4.14: Potencial de ruptura de un dieléctrico

Se dispone de algunos capacitores a los cuales por exceso de voltaje se le produjo una perforación en el dieléctrico que separa sus placas.

4.3 ELECTRIZACIÓN POR INDUCCIÓN

4.3.1 Descargas eléctricas

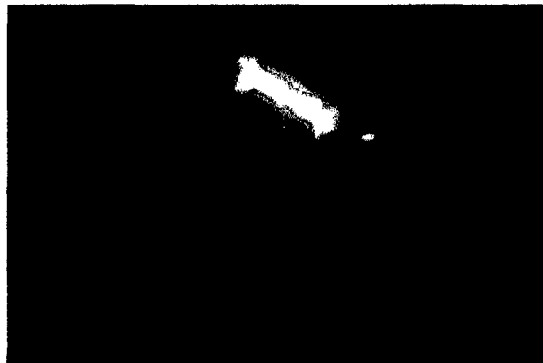


Figura 4.15: Descarga eléctrica entre dos esferas cargadas.

Por medio del uso del generador electrostático se puede observar descargas eléctricas, a través del aire, entre las esferas cargadas eléctricamente con distintos signos.

4.3.2 Descarga eléctrica entre dos placas paralelas



Figura 4.16: Descarga eléctrica entre dos placas paralelas

Por medio del uso del generador electrostático desarrollado se puede observar descargas eléctricas, a través del aire, entre las placas paralelas cargadas eléctricamente con distintos signos. Esto se aprovecha para desarrollar el equipo Laser pulsante.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y SOLUCIONES MATEMÁTICAS

5.1 COMPORTAMIENTO DE UNA CARGA PUNTO EN UN CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME

Un campo eléctrico ejerce sobre una partícula cargada una fuerza $\vec{F} = \vec{E}q$

Esta fuerza produce una aceleración $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ siendo m la masa de la partícula.

5.2 PARTÍCULA MOVIÉNDOSE PARALELAMENTE AL CAMPO

Considérese una partícula de masa m y carga q que se suelta a partir del reposo en un campo entre dos placas paralelas cargadas tal como se muestra en la figura.

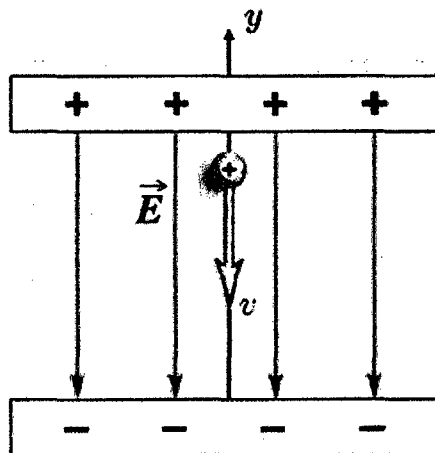


Figura 5.1: Partícula moviéndose paralelamente al campo

El movimiento es similar al de un cuerpo que cae en el campo gravitacional terrestre.

La aceleración está dada por
$$a = \frac{F}{m}$$

Como $F = qE$, se cumple que
$$a = \frac{qE}{m}$$

Aplicando las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado, como $v_0 = 0$, se tiene que:

$$v = at = \frac{qEt}{m}$$

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{qEt^2}{2m}$$

$$v^2 = 2ay = \frac{2qEy}{m}$$

La energía cinética adquirida luego de recorrer una distancia y será;

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \left(\frac{2qEy}{m} \right) = qEy$$

5.3 PARTÍCULA MOVIÉNDOSE PERPENDICULARMENTE AL CAMPO

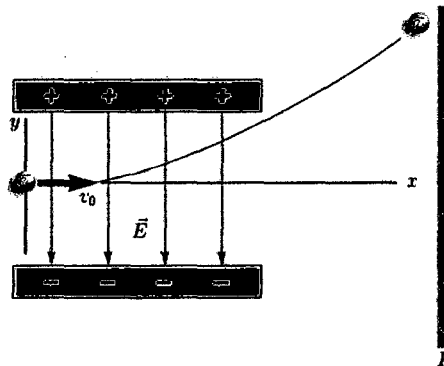


Figura 5.2: Partícula moviéndose perpendicularmente al campo

La figura muestra un electrón de masa m y carga e que es disparado con una velocidad v_0 perpendicularmente a un campo uniforme \vec{E} .

El movimiento es similar al de un proyectil disparado horizontalmente en el campo gravitacional terrestre. En consecuencia el movimiento horizontal x y el vertical y están dados por las expresiones:

$$x = v_0 t$$

$$y = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{eE}{2m} t^2$$

Sustituyendo a t se obtiene:

$$y = \frac{eE}{2mv_0^2} x^2$$

Que es la ecuación de la trayectoria.

Cuando el electrón sale de entre las placas, lo hace en una trayectoria recta tangente a la parábola en el punto de salida y puede hacerse llegar a una pantalla fluorescente P colocada a cierta distancia más allá de las placas.

5.4 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA DISTRIBUCIÓN CONTINUA VOLUMÉTRICA DE CARGA

El concepto de campo electrostático facilita la descripción, en términos físicos, de la influencia que una o más cargas eléctricas ejercen sobre el espacio que les rodea. Para una **distribución continua volumétrica de carga** el campo eléctrico puede ser calculado directamente tal cómo se desarrolla en esta Tesis, o bien puede calcularse indirectamente a través de la ecuación de Poisson.

5.4.1 Caso general

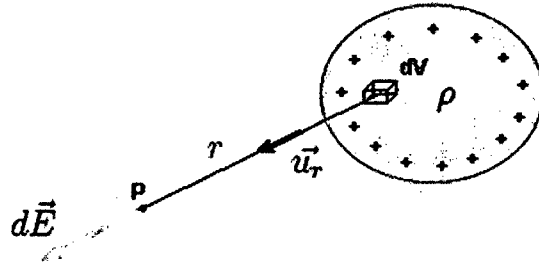


Figura 5.3: Campo eléctrico producido por un elemento dV de una distribución volumétrica uniforme de carga.

Si se dispone de una distribución volumétrica continua de carga, el campo producido matemáticamente es una solución del problema de Poisson. Equivalentemente el campo puede calcularse en un punto cualquiera mediante el principio de superposición, dividiendo la carga en elementos infinitesimales dq . Entonces, se calcula el campo $d\mathbf{E}$ que produce cada elemento en el punto en cuestión, tratándolos como si fueran cargas "puntuales": La magnitud de $d\mathbf{E}$ está dada por:

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{u}_r$$

El campo resultante en el punto se encuentra, entonces, sumando; esto es, integrando; las contribuciones debidas a todos los elementos de carga, o sea,

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E}$$

Esta solución es básicamente la solución del problema de Poisson obtenida mediante el método de la función de Green, en este caso la función de Green viene dada por:

$$G(\bar{\mathbf{r}}, \mathbf{r}) = \frac{1}{|\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{r}|} = \frac{1}{\|\bar{\mathbf{r}} - \mathbf{r}\|}$$

Si la distribución continua de carga que se considera tiene una densidad volumétrica de carga

$$\rho = \frac{dq}{dV},$$

Entonces

$$dq = \rho dV.$$

Por lo tanto,

$$\mathbf{E} = \int_V d\mathbf{E} = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{u}_r = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho(r)dV}{r^2} \vec{u}_r$$

5.5 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA ESFERA MACIZA UNIFORMEMENTE CARGADA

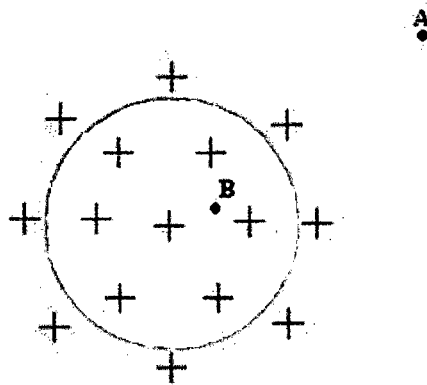


Figura 5.4: Campo eléctrico generado por una esfera maciza uniformemente cargada

NOTAS: (1) Las cruces rojas simbolizan la carga de la esfera. (2) El aro amarillo no forma parte de la esfera, es imaginario.

Hay que destacar que si la esfera está uniformemente cargada, es porque se trata de una esfera maciza de material dieléctrico.

5.5.1 Campo eléctrico desde el punto A o en cualquier punto exterior a la corteza

En cualquier punto exterior a la esfera se observa que, por simetría, el campo tiene dirección radial con centro en el centro de la esfera. Se toma una superficie gaussiana de radio $r > R$ (donde R es el radio de la esfera cargada). En la superficie de esta esfera el valor del campo eléctrico es constante en módulo y siempre paralelo al vector \vec{S} . Entonces, por la Ley de Gauss se tiene que:

$$\int_S \vec{E} d\vec{S} = \int_V \frac{\rho dV}{\epsilon_0}; \quad E \int_S dS = \frac{\rho}{\epsilon_0} \int_V dV; \quad E 4\pi r^2 = \frac{\rho}{\epsilon_0} \frac{4}{3}\pi R^3$$

$E = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r^2}$	$\vec{E} = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r^2} \vec{u}_n$
--	--

5.5.2 Campo eléctrico en el punto B o en cualquier punto interior de la esfera

El campo eléctrico en el punto B es el creado por las cargas que se encuentran dentro del aro amarillo (en este caso sólo una, la cruz central), todas las cargas que se encuentran fuera de él no contribuyen al campo eléctrico porque la esfera está cargada uniformemente, es decir, todos los campos creados por las cargas exteriores al aro amarillo se anulan entre sí, porque las cargas están situadas simétricamente.

El campo eléctrico es equivalente al creado por una carga puntual situada en el centro de la esfera:

$$E = K \frac{Q}{r^2} = \frac{\rho}{3\epsilon_0} r$$

Donde Q es la carga que se encuentra dentro del aro amarillo y r es la distancia desde el centro de la esfera hasta el punto B.

5.6 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA DISTRIBUCIÓN CONTINUA SUPERFICIAL DE CARGA

El concepto de campo electrostático facilita la descripción, en términos físicos, de la influencia que una o más cargas eléctricas ejercen sobre el espacio que les rodea. Para una **distribución superficial continua de carga** puede ser calculado cómo se indica.

5.6.1 Caso general

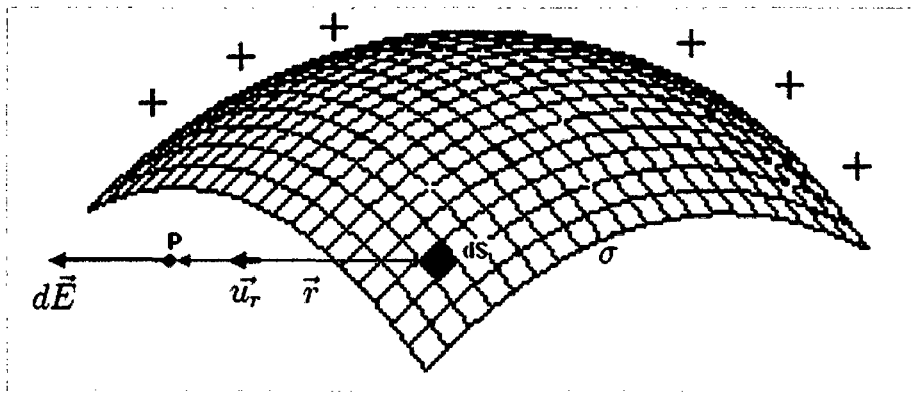


Figura 5.5: Campo eléctrico producido por un elemento dS de una distribución superficial continua de carga.

Si se dispone de una distribución superficial continua de carga, el campo producido en un punto cualquiera puede calcularse dividiendo la carga en elementos infinitesimales dq . Entonces, se calcula el campo dE que produce cada elemento en el punto en cuestión, tratándolos como si fueran cargas.

La magnitud de dE está dada por:

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \vec{u}_r$$

El campo resultante en el punto se encuentra, entonces, sumando; esto es, integrando; las contribuciones debidas a todos los elementos de carga, o sea,

$$\vec{E} = \int d\vec{E}$$

Si la distribución continua de carga que se considera tiene una densidad superficial de carga

$$\sigma = \frac{dq}{dS},$$

Entonces

$$dq = \sigma dS.$$

Por lo tanto,

$$\vec{E} = \int_S d\vec{E} = \int_S \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \vec{u}_r = \int_S \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma dS}{r^2} \vec{u}_r$$

5.7 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UN PLANO INFINITO DE DENSIDAD DE CARGA UNIFORME

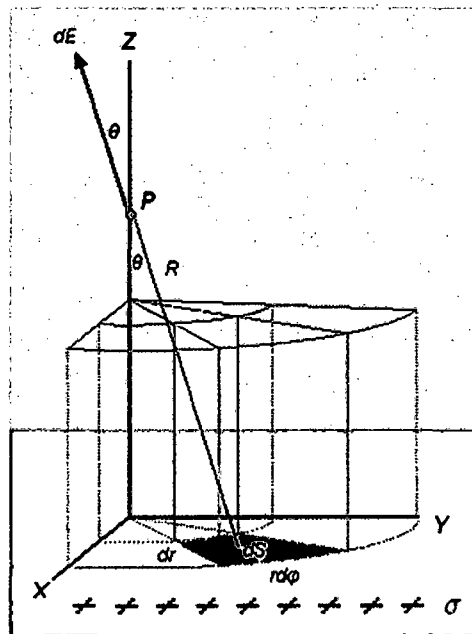


Figura 5.6: Campo eléctrico generado por un plano infinito de densidad de carga uniforme

La figura muestra una porción de un plano infinito cuya densidad superficial de carga (esto es, la carga por unidad de superficie) tiene valor constante σ . Sea dS un elemento diferencial de superficie. La carga contenida en este elemento será

$$dq = \sigma dS$$

y la magnitud del campo dE debida al elemento de carga dq será:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{R^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma dS}{r^2 + z^2}$$

siendo r y z las proyecciones del radio vector R sobre el plano XY y el eje Z respectivamente.

Ahora bien, al estar utilizando coordenadas cilíndricas para el cálculo, se puede observar que cada elemento diferencial de superficie dS , por simetría, posee una contraparte diametralmente opuesta. Esto hace que las componentes radiales de dE se anulen. Así, las componentes sobre Z son las únicas que contribuyen al resultado final.

Siendo

$$dS = (dr)(rd\phi) \cos\theta = \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}}$$

se obtiene:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma(dr)(rd\phi)}{r^2 + z^2} \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}}$$

Con lo cual:

$$\begin{aligned} E &= \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma z r dr d\phi}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{z\sigma}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{r dr d\phi}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{z\sigma}{4\pi\epsilon_0} (2\pi) \int_0^{+\infty} \frac{r dr}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \\ &= \frac{z\sigma}{2\epsilon_0} \int_0^{+\infty} r (r^2 + z^2)^{-\frac{3}{2}} dr = \frac{z\sigma}{2\epsilon_0} \left(\frac{-1}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right)_0^{+\infty} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \end{aligned}$$

En consecuencia:

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

El anterior, es un resultado físico muy notable, ya que, como se ve, la magnitud del campo es independiente de la distancia.

5.8 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR DOS PLACAS INFINITAS Y PARALELAS

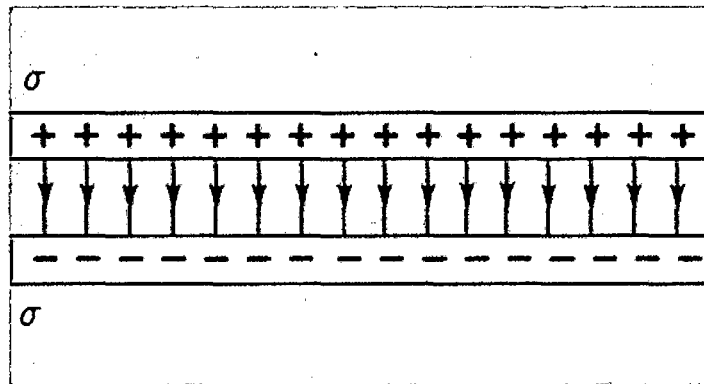


Figura 5.7: Campo eléctrico en el exterior de las placas

El campo eléctrico generado en el exterior de las placas es nulo en cualquier punto. Como las placas son infinitas, los campos eléctricos que crean no dependen de la distancia que hay entre la placa y el punto en el cual se mide el valor del campo eléctrico; además, como las placas están cargadas de forma contraria (una es positiva y otra negativa), los campos se restan anulándose entre sí.

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} - \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = 0$$

5.8.1 Campo eléctrico entre las dos placas

El campo eléctrico entre las dos placas es la suma vectorial de los dos campos eléctricos.

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

5.9 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UN DISCO CARGADO DE GROSOR DESPRECIABLE

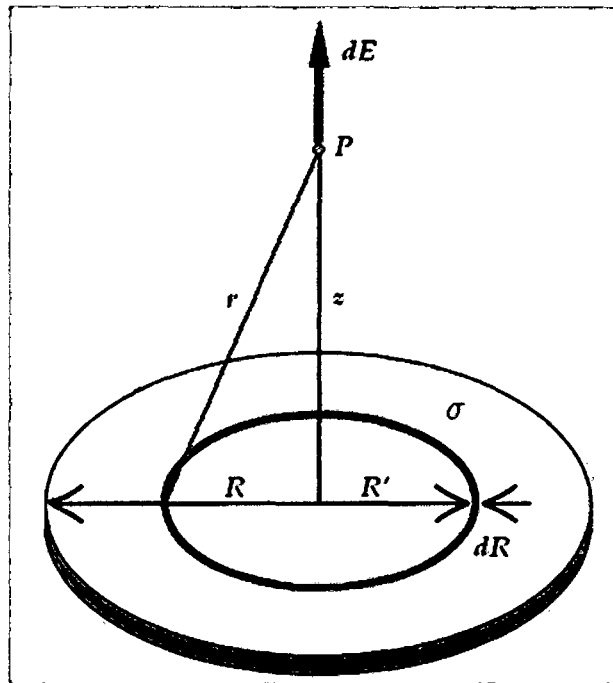


Figura 5.8: Campo eléctrico generado por un disco cargado de grosor despreciable

La figura muestra un disco cargado cuya densidad superficial de carga (esto es, la carga por unidad de superficie) tiene un valor constante σ .

Sea dS un elemento diferencial de superficie en forma de anillo. La carga contenida en este elemento será:

$$dq = \sigma dS$$

y, sabiendo que el campo eléctrico generado por un anillo cargado sobre puntos de su eje está dado por

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qx}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

siendo a el radio del anillo y x la distancia entre el centro del anillo y el punto considerado, la magnitud del campo dE debida al elemento de carga dq será:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma dS z}{(R'^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Ahora bien,

$$dS = 2\pi R' dR'$$

y, en consecuencia se cumplirá:

$$dE = \frac{\sigma z}{2\epsilon_0} \frac{R' dR'}{(R'^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Con lo cual:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \int_0^R \frac{z R' dR'}{(R'^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right)$$

O sea:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right)$$

Esta expresión también puede ser deducida, utilizando coordenadas cilíndricas, mediante un razonamiento similar al utilizado en la sección Campo eléctrico generado por un plano infinito de densidad de carga uniforme. La única diferencia es que en lugar de integrar entre 0 y $+\infty$, se integra entre 0 y R , con lo cual se llega a la misma expresión.

5.10 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA ESFERA HUECA Y DE ESPESOR DESPRECIABLE

5.10.1 Campo eléctrico en el exterior de la corteza esférica

Para calcular el campo en el exterior a la esfera se considera que toda la carga Q distribuida en la superficie (que coincide, en este caso, con la carga total) se encuentra comprimida en el centro de la esfera, conclusión a la que se llega tras aplicar la ley de Gauss, de modo que el campo creado es equivalente al generado por una única carga puntual ubicada en el centro de la esfera:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

donde r es la distancia desde el centro de la esfera hasta el punto donde se está calculando el campo eléctrico.

5.10.2 Campo eléctrico en el interior de la esfera

El campo eléctrico en el interior de una esfera hueca es siempre nulo, conclusión a la que se llega tras aplicar la ley de Gauss:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} = 0$$

5.11 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA DISTRIBUCIÓN CONTINUA LINEAL DE CARGA

El concepto de campo electrostático facilita la descripción, en términos físicos, de la influencia que una o más cargas eléctricas ejercen sobre el espacio que les rodea. Para una distribución continua lineal de carga puede ser calculado cómo se indica.

5.11.1 Caso general

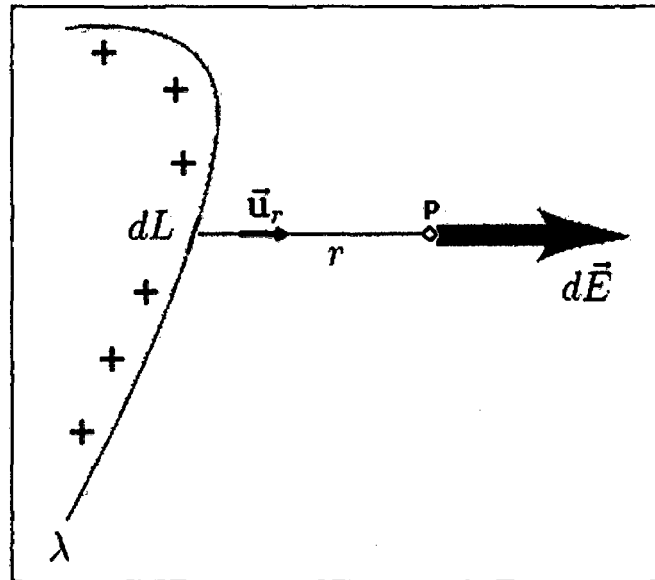


Figura 5.9: Campo eléctrico producido por un elemento dL de una distribución lineal uniforme de carga.

Si se dispone de una distribución lineal continua de carga, el campo producido en un punto cualquiera puede calcularse dividiendo la carga en elementos infinitesimales dq . Entonces, se calcula el campo dE que produce cada elemento en el punto en cuestión, tratándolos como si fueran cargas. La magnitud de dE está dada por:

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \vec{u}_r$$

El campo resultante en el punto se encuentra, entonces, sumando; esto es, integrando; las contribuciones debidas a todos los elementos de carga, o sea,

$$\vec{E} = \int d\vec{E}$$

Si la distribución continua de carga que se considera tiene una densidad lineal de carga

$$\lambda = \frac{dq}{dL}$$

entonces

$$dq = \lambda dL.$$

Por lo tanto,

$$\vec{E} = \int_L d\vec{E} = \int_L \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \vec{u}_r = \int_L \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dL}{r^2} \vec{u}_r$$

5.11.2 Campo eléctrico generado por una línea infinita de carga y densidad lineal de carga λ constante

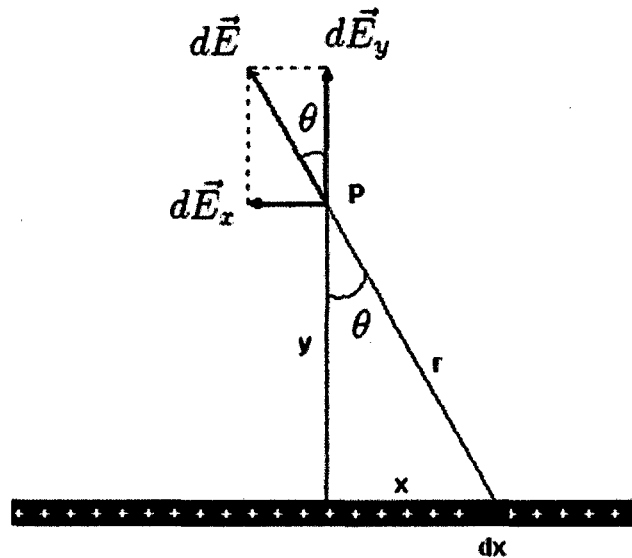


Figura 5.10: Campo eléctrico creado por un elemento dx de una línea infinita de carga.

La figura muestra una porción de una línea infinita de carga de densidad lineal de carga uniforme

$$\lambda = \frac{dq}{dx}.$$

La magnitud de la contribución de campo eléctrico $d\vec{E}$ sobre el punto P debida al elemento de carga

$$dq = \lambda dx$$

está dada por:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{x^2 + y^2} \quad (1)$$

El vector $d\vec{E}$ tiene las componentes:

$$dE_x = -dE \sin \theta \quad y \quad dE_y = dE \cos \theta$$

El signo menos delante de dE_x indica que $d\vec{E}_x$ apunta en la dirección negativa de las x .

Por tanto, las componentes x e y de \vec{E} en el punto P, están dadas por:

$$E_x = \int dE_x = - \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \sin \theta dE$$

y

$$E_y = \int dE_y = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \cos \theta dE$$

En estas expresiones E_x debe ser cero porque todo elemento de carga a la izquierda de la perpendicular que une P con la línea de carga tiene un elemento correspondiente a la derecha, de modo que sus contribuciones al campo en la dirección de las x se anulan mutuamente. Así pues, \vec{E} apunta exactamente en la dirección de las y . Como las contribuciones a E_y de la mitad derecha y de la mitad izquierda de la línea de carga son iguales, se puede escribir:

$$E = E_y = 2 \int_{x=0}^{x=+\infty} \cos \theta dE$$

sustituyendo la expresión (1) en esta ecuación, se tiene:

$$E = 2 \int_{x=0}^{x=+\infty} \cos \theta \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{x^2 + y^2} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=+\infty} \cos \theta \frac{dx}{x^2 + y^2}$$

(2)

Siendo

$$\tan \theta = \frac{x}{y}$$

se tiene

$$x = y \tan \theta$$

diferenciando esta expresión resulta:

$$dx = y \sec^2 \theta d\theta$$

y sustituyendo en (2) se obtiene:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=+\infty} \cos \theta \frac{y \sec^2 \theta d\theta}{x^2 + y^2} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=+\infty} \frac{y}{x^2 + y^2} \cos \theta \sec^2 \theta d\theta$$

(3)

Si se tiene en cuenta que:

$$\cos \theta = \frac{y}{r}$$

$$\sec \theta = \frac{r}{y}$$

$$y \quad x^2 + y^2 = r^2$$

se puede establecer que:

$$\frac{y}{x^2 + y^2} \cos \theta \sec^2 \theta d\theta = \frac{y}{r^2} \frac{y}{r} \frac{r^2}{y^2} = \frac{y}{ry} = \frac{\cos \theta}{y}$$

Sustituyendo en la expresión (3) se obtiene

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 y} \int_{x=0}^{x=+\infty} \cos \theta d\theta$$

Obsérvese que cuando

$$x \rightarrow 0, \theta \rightarrow 0$$

y cuando $x \rightarrow +\infty$, $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$

por lo tanto:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 y} \int_{\theta=0}^{\theta=\frac{\pi}{2}} \cos\theta d\theta = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 y} \left[\sin\frac{\pi}{2} - \sin 0 \right] = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 y}$$

Por lo tanto:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 y}$$

5.11.3 Campo eléctrico generado por una línea finita de carga y densidad lineal de carga λ constante sobre los puntos de su bisectriz

Considérese una varilla delgada no conductora de longitud finita l con una carga total q distribuida uniformemente a lo largo de ella, tal como se muestra en la figura.

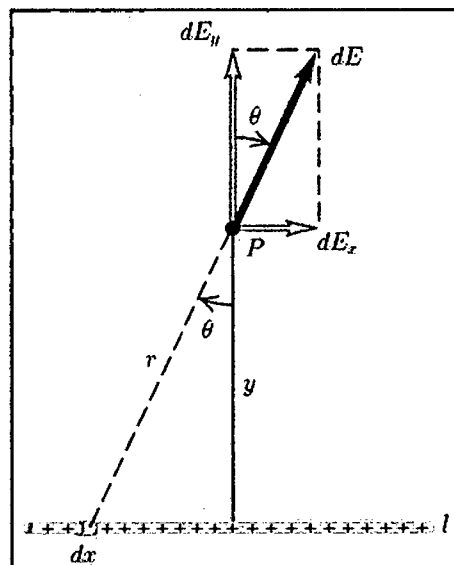


Figura 5.11: Campo eléctrico creado por un elemento dx de una línea de carga de longitud l .

La magnitud de la contribución de campo eléctrico $d\vec{E}$ sobre el punto P debida al elemento de carga $dq = \lambda dx$ está dada por:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{x^2 + y^2} \quad (1)$$

El vector $d\vec{E}$ tiene las componentes:

$$dE_x = -dE \sin \theta \quad dE_y = dE \cos \theta$$

El signo menos delante de dE_x indica que $d\vec{E}_x$ apunta en la dirección negativa de las x .

Por tanto, las componentes x e y de \vec{E} en el punto P, están dadas por:

$$E_x = \int dE_x = - \int_{x=0}^{x=l} \sin \theta dE$$

y

$$E_y = \int dE_y = \int_{x=0}^{x=l} \cos \theta dE$$

En estas expresiones E_x debe ser cero porque todo elemento de carga a la izquierda de la perpendicular que une P con la línea de carga tiene un elemento correspondiente a la derecha, de modo que sus contribuciones al campo en la dirección de las x se anulan mutuamente. Así pues, \vec{E} apunta exactamente en la dirección de las y . Como las contribuciones a E_y de la mitad derecha y de la mitad izquierda de la línea de carga son iguales, se puede escribir:

$$E = E_y = 2 \int_{x=0}^{x=\frac{l}{2}} \cos \theta dE$$

sustituyendo la expresión (1) en esta ecuación, se tiene:

$$E = 2 \int_{x=0}^{x=\frac{l}{2}} \cos \theta \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{x^2 + y^2} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=\frac{l}{2}} \cos \theta \frac{dx}{x^2 + y^2} \quad (2)$$

Siendo

$$\cos\theta = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

sustituyendo en (2) se obtiene

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=\frac{l}{2}} \frac{y}{x^2 + y^2} \frac{dx}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\lambda y}{2\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=\frac{l}{2}} \frac{1}{x^2 + y^2} \frac{dx}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\lambda y}{2\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=\frac{l}{2}} \frac{dx}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$$

$$E = \frac{\lambda y}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{x}{y^2 \sqrt{x^2 + y^2}} \right]_{x=0}^{x=\frac{l}{2}}$$

En consecuencia

$$\lambda = \frac{q}{l}$$

Teniendo en cuenta que y haciendo las sustituciones correspondientes, se obtiene:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 y} \frac{1}{\sqrt{l^2 + 4y^2}}$$

5.11.4 Campo eléctrico generado por dos hilos paralelos, infinitos y de densidad de carga uniforme

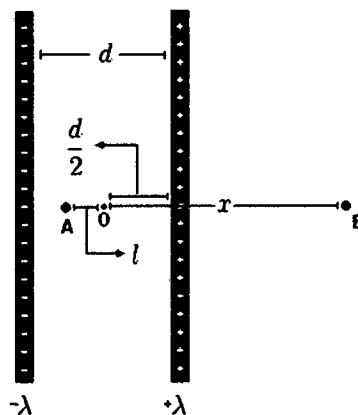


Figura 5.12: Campo eléctrico generado por dos hilos paralelos, infinitos y de densidad de carga uniforme

5.11.4.1 Campo eléctrico en un punto B exterior

El campo eléctrico en el exterior de los hilos es la suma de los campos eléctricos que generan ambos, como apuntan en sentido opuesto, se restan.

Sea \vec{E}_1 el campo debido al hilo cargado positivamente y \vec{E}_2 el generado por el hilo con carga negativa. Se tiene, entonces:

$$E = E_1 - E_2 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0(x - \frac{d}{2})} - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0(x + \frac{d}{2})}$$

Operando, la expresión anterior se reduce a:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{d}{x^2 - (\frac{d}{2})^2}$$

5.11.4.2 Campo eléctrico en un punto A entre los hilos

El campo eléctrico entre los hilos es la suma de los campos eléctricos respectivos, como ambos campos apuntan en el mismo sentido, se suman.

Sea \vec{E}_1 el campo debido al hilo cargado positivamente y \vec{E}_2 el generado por el hilo con carga negativa. Se tiene, entonces:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0(\frac{d}{2} + l)} + \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0(\frac{d}{2} - l)}$$

Operando, la expresión anterior se reduce a:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{d}{(\frac{d}{2})^2 - l^2}$$

5.12 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UN ANILLO DE DENSIDAD DE CARGA UNIFORME SOBRE LOS PUNTOS DE SU EJE

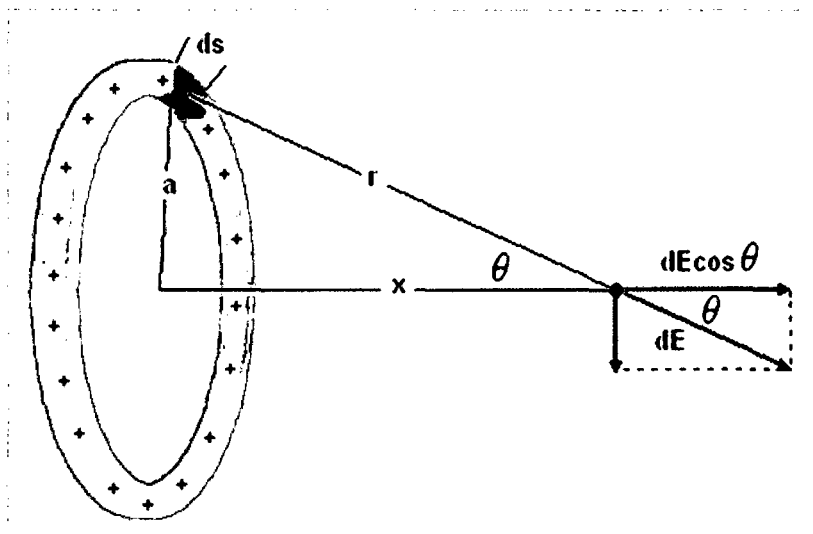


Figura 5.13: Campo eléctrico generado por un anillo de densidad de carga uniforme sobre los puntos de su eje

La figura muestra un anillo de carga q y radio a . Considérese un elemento diferencial del anillo de longitud ds , localizado en la parte superior. Este elemento contiene una carga dada por:

$$dq = q \frac{ds}{2\pi a}$$

siendo $2\pi a$ la circunferencia del anillo. Este elemento produce un campo eléctrico diferencial dE en el punto P . El campo resultante E se encuentra integrando los efectos de todos los elementos que constituyen el anillo. Por simetría, este campo resultante debe estar en el eje del anillo. Así pues, solamente la componente dE paralela a este eje contribuye al resultado final. La componente perpendicular al eje se anula por una componente igual y opuesta que produce el elemento de carga situado en el lado opuesto del anillo. Así la integral general de vector

$$\vec{E} = \int d\vec{E}$$

se transforma en una integral escalar.

$$E = \int dE \cos \theta$$

La cantidad dE será:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{qds}{2\pi a} \right) \frac{1}{a^2 + x^2}$$

Según la figura, se tiene:

$$\cos \theta = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}}$$

Como para un punto P, x tiene el mismo valor para todos los elementos de carga y, por tanto, no es una variable, se obtiene:

$$E = \int dE \cos \theta = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qds}{(2\pi a)(a^2 + x^2)} \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qx}{(2\pi a)(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \int ds$$

La integral es simplemente la circunferencia del anillo ($2\pi a$) y, en consecuencia, se obtiene:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qx}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Esta expresión de E se reduce $E=0$ para $x=0$ ya que, en tal caso, cada componente perpendicular al eje se anula, como antes, con una componente igual y opuesta que produce el elemento de carga situado en el lado opuesto del anillo y la componente paralela al eje vale cero.

Para $x \gg a$, se puede omitir a en el denominador de esta ecuación, dando:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{x^2}$$

Este es un resultado esperado porque a distancias suficientemente grandes el anillo se comporta como una carga punto q .

5.13 CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR UNA DISTRIBUCIÓN DISCRETA DE CARGAS

El concepto de campo electrostático facilita la descripción, en términos físicos, de la influencia que una o más cargas eléctricas ejercen sobre el espacio que les rodea. Para un grupo de cargas puntuales puede ser calculado cómo se indica.

5.13.1 Caso general

Para determinar el campo eléctrico producido por un conjunto de cargas puntuales se calcula el campo debido a cada carga en el punto dado como si fuera la única carga que existiera y se suman vectorialmente los mismos para encontrar el campo resultante en el punto. En forma de ecuación:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \vec{u}_{ri}$$

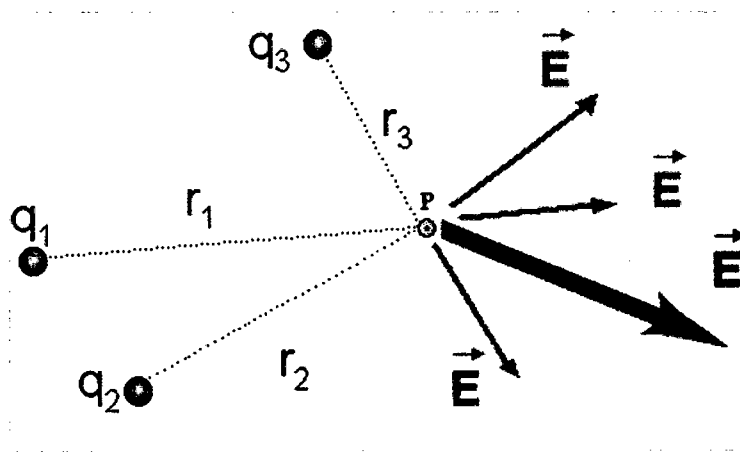


Figura 5.14: Campo eléctrico generado por una distribución discreta de cargas

5.13.2 Campo eléctrico creado por un dipolo eléctrico

A continuación se analiza el campo eléctrico creado por una distribución de dos cargas de igual magnitud y de signo opuesto conocida como Dipolo eléctrico

5.13.2.1 Campo eléctrico en los puntos de la bisectriz del eje del dipolo

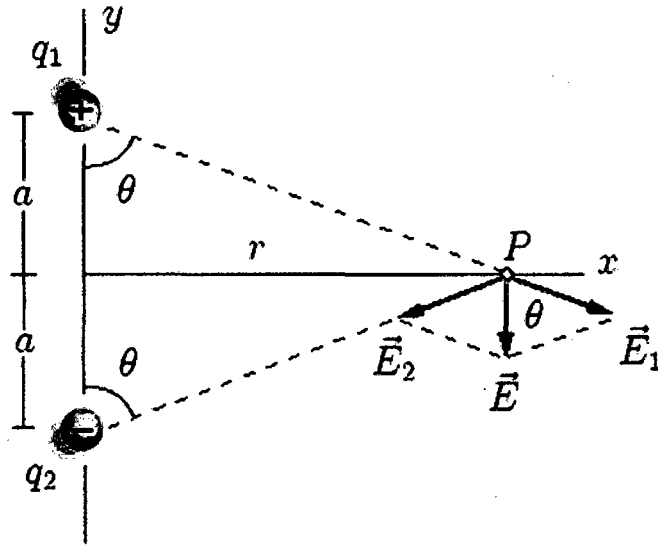


Figura 5.15: Campo eléctrico en los puntos de la bisectriz del eje del dipolo

Según el principio de superposición, el campo eléctrico en el punto P es la suma vectorial de los dos campos creados por ambas cargas:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Por el teorema de Pitágoras se cumple que la distancia entre cualquiera de las cargas y el punto P es:

$$\sqrt{a^2 + r^2}$$

Y como ambas cargas son de igual magnitud se cumple:

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{a^2 + r^2}$$

Las componentes E_{1x} y E_{2x} poseen la misma magnitud pero apuntan en sentidos opuestos, por lo tanto:

$$E_{1x} + E_{2x} = 0$$

En consecuencia, para efectuar la suma vectorial, sólo se deberán tener en cuenta a las componentes E_y , es decir, la suma vectorial de \vec{E}_{1y} \vec{E}_{2y} apuntan verticalmente hacia abajo, y siendo $E_{1y} = E_{2y}$, se cumplirá que:

$$E = 2E_1 \cos\theta$$

Teniendo en cuenta que:

$$\cos\theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}}$$

y sustituyendo esta expresión y la de E_1 en la expresión de E se obtiene:

$$E = \frac{2}{4\pi\epsilon} \frac{q}{a^2 + r^2} \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{2aq}{(a^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Si $r \gg a$ se puede omitir a a en el denominador y la ecuación se reduce a:

$$E \approx \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{(2a)(q)}{r^3}$$

El producto $2aq$ se denomina momento p del dipolo eléctrico. Entonces, se puede volver a escribir la ecuación de E como:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{p}{(a^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Y si $r \gg a$, es decir, para puntos *distantes* a lo largo de la bisectriz del eje del dipolo como:

$$E \approx \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{p}{r^3}$$

5.13.2.2 Campo eléctrico en los puntos del eje del dipolo

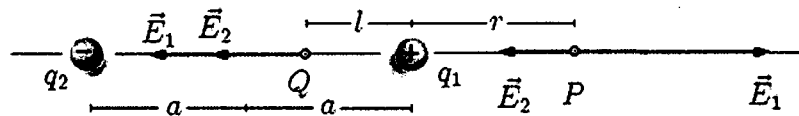


Figura 5.16: Puntos fuera de la línea de unión de las cargas

Como en el caso anterior, según el principio de superposición, el campo eléctrico en el punto P es la suma vectorial de los campos creados por ambas cargas.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Se observa que, al estar ambos vectores sobre el eje x , se cumple:

$$E_{1y} = E_{2y} = 0$$

Por tanto, a efectos de calcular la suma vectorial, solo deben tenerse en cuenta las componentes E_{1x} y E_{2x} .

En consecuencia las magnitudes del campo debidas a q_1 y q_2 serán respectivamente:

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r-a)^2} \quad E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r+a)^2}$$

Como ambas componentes, E_{1x} y E_{2x} , apuntan en sentidos contrarios:

$$E = E_1 - E_2$$

O sea:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r-a)^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r+a)^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q}{(r-a)^2} - \frac{q}{(r+a)^2} \right] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} 4aq \frac{r}{(r^2 - a^2)^2}$$

Siendo $p = 2aq$ el momento del dipolo eléctrico:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{pr}{(r^2 - a^2)^2}$$

Y si $r \gg a$:

$$E \approx \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$

5.13.2.3 Puntos sobre la línea de unión de las cargas

La magnitud de \vec{E} para puntos ubicados entre las cargas, tales como el punto Q , puede deducirse mediante un razonamiento similar al anterior. La diferencia estriba en que las componentes, E_{1x} y E_{2x} , apuntan en el mismo sentido y por ello se suman en lugar de restarse:

$$E = E_1 + E_2$$

Siendo:

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{l^2} \quad E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(2a-l)^2}$$

Por tanto:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{l^2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(2a-l)^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q}{l^2} + \frac{q}{(2a-l)^2} \right] = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \frac{2a}{l^2(2a-l)}$$

Siendo $p = 2aq$ el momento del dipolo eléctrico:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{l^2(2a-l)}$$

5.13.2.4 Otros puntos

Considérese un dipolo eléctrico y un punto P de coordenadas (x, y) tal como el representado en la figura.

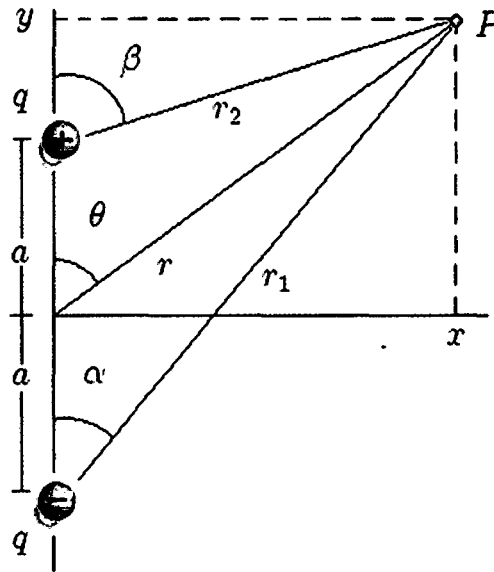


Figura 5.17: Para otros puntos

Se cumple que:

$$r_1 = \sqrt{(y+a)^2 + x^2} \quad \cos \alpha = \frac{y+a}{\sqrt{(y+a)^2 + x^2}} \quad \sin \alpha = \frac{x}{\sqrt{(y+a)^2 + x^2}}$$

$$r_2 = \sqrt{(y-a)^2 + x^2} \quad \cos \beta = \frac{y-a}{\sqrt{(y-a)^2 + x^2}} \quad \sin \beta = \frac{x}{\sqrt{(y-a)^2 + x^2}}$$

En base a lo anterior, los campos generados por cada carga serán:

$$E_{r1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q}{(y+a)^2 + x^2} \quad E_{r2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(y-a)^2 + x^2}$$

Para determinar el campo en P se aplica el principio de superposición por lo cual se debe efectuar la suma vectorial de los campos creados por ambas cargas.

Se calculan, entonces, las componentes \mathcal{X} :

$$E_{r1x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q}{(y+a)^2 + x^2} \sin \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q}{(y+a)^2 + x^2} \frac{x}{\sqrt{(y+a)^2 + x^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-qx}{[(y+a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}}$$

$$E_{r2x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(y-a)^2 + x^2} \sin \beta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(y-a)^2 + x^2} \frac{x}{\sqrt{(y-a)^2 + x^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qx}{[(y-a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}}$$

Las componentes \mathcal{Y} serán:

$$E_{r1y} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q}{(y+a)^2 + x^2} \cos\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q}{(y+a)^2 + x^2} \frac{y+a}{\sqrt{(y+a)^2 + x^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{-q(y+a)}{[(y+a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}}$$

$$E_{r2y} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(y-a)^2 + x^2} \cos\beta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(y-a)^2 + x^2} \frac{y-a}{\sqrt{(y-a)^2 + x^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q(y-a)}{[(y-a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}}$$

Sumando se obtiene para la componente \mathcal{X} total:

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \left[\frac{x}{[(y-a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{x}{[(y+a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Y para la componente \mathcal{Y} total:

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \left[\frac{y-a}{[(y-a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{y+a}{[(y+a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Los denominadores de las expresiones anteriores pueden ser escritos en forma compacta como:

$$\frac{1}{[(y \mp a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{[y^2 \mp 2ay + a^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{[x^2 + y^2 \mp 2ay + a^2]^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{[r^2 \mp 2ay + a^2]^{\frac{3}{2}}}$$

Si se consideran puntos alejados del dipolo, entonces, $r \gg a \Rightarrow r^2 \gg a^2$ con

lo cual se puede despreciar el término a^2 y en consecuencia se obtiene:

$$\frac{1}{[r^2 \mp 2ay + a^2]^{\frac{3}{2}}} \approx \frac{1}{[r^2 \mp 2ay]^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{\left[r^2 \left(1 \mp \frac{2ay}{r^2} \right) \right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{r^3} \left(1 \mp \frac{2ay}{r^2} \right)^{-\frac{3}{2}}$$

Aplicando el Teorema del binomio y tomando los dos primeros términos del desarrollo:

$$\left(1 \mp \frac{2ay}{r^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \approx 1 - \frac{3}{2} \left(\mp \frac{2ay}{r^2} \right) = 1 \pm \frac{3ay}{r^2}$$

En consecuencia:

$$\frac{1}{[(y \mp a)^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}} \approx \frac{1}{r^3} \left(1 \pm \frac{3ay}{r^2} \right)$$

Si se sustituye este resultado en las expresiones de las componentes, se obtiene:

$$E_x \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} qx \left[\frac{1}{r^3} \left(1 + \frac{3ay}{r^2} \right) - \frac{1}{r^3} \left(1 - \frac{3ay}{r^2} \right) \right]$$

$$E_y \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \left[(y-a) \frac{1}{r^3} \left(1 + \frac{3ay}{r^2} \right) - (y+a) \frac{1}{r^3} \left(1 - \frac{3ay}{r^2} \right) \right]$$

Operando apropiadamente y teniendo en cuenta que $2aq = p$, se obtiene para puntos alejados del dipolo:

$$E_x \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{3pxy}{(x^2 + y^2)^{\frac{5}{2}}} \quad E_y \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p(2y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^{\frac{5}{2}}}$$

5.13.3 Campo generado por un cuádruplo eléctrico lineal en su bisectriz

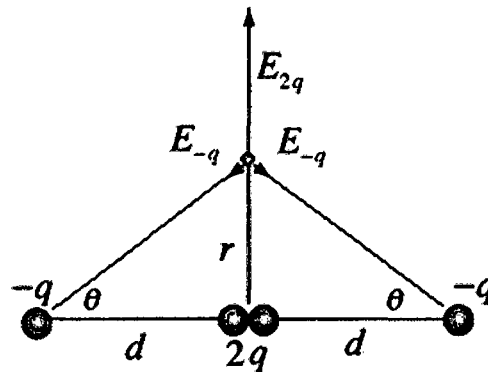


Figura 5.18: Campo generado por un cuádruplo eléctrico lineal en su bisectriz

Un cuádruplo eléctrico lineal es una distribución de cargas formada por dos dipolos alineados de forma opuesta de manera tal que sus cargas positivas se encuentran superpuestas.

Para determinar el campo eléctrico producido por el cuádruplo sobre los puntos pertenecientes a su bisectriz, de acuerdo al principio de superposición, se deben sumar las contribuciones debidas a las cargas positivas y las producidas por las negativas.

El campo producido por cada carga positiva será:

$$E_q = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Obsérvese que las componentes paralelas al cuádruplo serán nulas, por lo tanto el campo total producido por ambas cargas positivas será:

$$E_{2q} = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

El campo producido por cada carga negativa será:

$$E_{-q} = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + d^2)}$$

Por simetría, las componentes paralelas al cuádruplo, se cancelan, por lo tanto, sólo deben ser tenidas en cuenta las componentes colineales con la bisectriz.

Teniendo en cuenta que

$$\sin \theta = \frac{r}{\sqrt{r^2 + d^2}}$$

el valor de cada componente colineal con la bisectriz será:

$$E_{-q} = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + d^2)} \frac{r}{\sqrt{r^2 + d^2}}$$

y el aporte total correspondiente a ambas cargas negativas será:

$$E_{-2q} = \frac{-2q}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + d^2)} \frac{r}{\sqrt{r^2 + d^2}}$$

Por lo tanto, el campo total será:

$$E = E_{2q} + E_{-2q} = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 r^2} + \frac{-2q}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + d^2)} \frac{r}{\sqrt{r^2 + d^2}}$$

O sea:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{r}{(r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Si se saca $\frac{1}{r^2}$ de factor común, la expresión anterior se puede expresar como:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r^2} \left[1 - \left(1 + \frac{d^2}{r^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \right]$$

Si se consideran puntos alejados del cuádruplo, se cumple que:

$$r \gg d \Rightarrow r^2 \gg d^2 \Rightarrow \frac{d^2}{r^2} \ll 1$$

y por lo tanto aplicando el Teorema del

binomio se verifica que :

$$\left(1 + \frac{d^2}{r^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \approx 1 - \frac{3d^2}{2r^2}$$

Con lo cual, la expresión de campo eléctrico para los puntos alejados del cuádruplo se reduce a:

$$E \approx \frac{3Q}{4\pi\epsilon_0 r^4}$$

Donde $Q = 2qd^2$ se conoce como momento de cuádruplo.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1 METRADO BASE

Con el esquema eléctrico de la fuente generadora de alto voltaje y los datos del equipamiento a usar se procede a hacer el metrado base.

METRADO BASE			
Proyecto	Visualización bidimensional y solución matemática de campos eléctricos típicos para tensiones superiores a 5000V DC.		
Proyectista	Carlos Alberto Alvarado Pantoja		
Lugar	Universidad Nacional de Ingeniería	Departamento	Lima
Ítem	Descripción partida	Unidad	Metrado
1.00	TRABAJOS PRELIMINARES		
1.01	Movilización de equipos y herramientas	Global	1,00
1.02	Trazo y replanteo	Global	1,00
1.03	Transporte de materiales	Global	1,00
1.04	Trabajos de electricidad	Global	1,00
2.00	EQUIPOS		
2.01	Multitester digital CIE, series 804655, 850384	Unidad	2,00
2.02	Fuente regulada 0 a 30 V, 20 A, marca Celtrop.	Unidad	1,00
2.03	Cajas acrílicas tipo cristal de diferentes tamaños	Unidad	4,00
2.04	Placas acrílicas de diferente tamaño	Unidad	20,00
2.05	Cámara Creative Web Cam Go	Unidad	1,00
2.06	Variador de voltaje en CA	Unidad	1,00
2.07	Transformador elevador 220/10000	Unidad	1,00
2.08	Rectificador de voltaje	Unidad	1,00
2.09	Condensador de 2500 pF/40000 V.	Unidad	1,00
2.10	Bolas de acero de 50 mm de diámetro	Unidad	2,00
2.11	Placas paralelas de cobre	Unidad	6,00
2.12	Atenuador de voltaje de 1000 Megaohm	Unidad	1,00
2.13	Electrodos cilindricos	Unidad	2,00
2.14	Electrodos Paralelos	Unidad	2,00
3.00	INSTALACIONES ELECTRICAS		
3.01	Conductor Eléctrico con aislamiento para 15 kV	ml	30,00
3.02	Diodos de Selenio	Unidad	8,00
3.03	Accesorios de conexión	Global	1,00

3.04	Resistencia de 20 Megaohm	Unidad	100,00
3.05	Llave termomagnética	Unidad	1,00
4.00	PRUEBAS		
4.01	Visualización de Campos eléctricos con un electrodo cilíndrico	Equipo	1,00
4.02	Visualización de Campos eléctricos con dos electrodos cilíndricos	Equipo	1,00
4.03	Visualización de Campos eléctricos con dos placas paralelas	Equipo	1,00
4.04	Visualización de ruptura del dieléctrico de un condensador	Equipo	3,00
4.05	Visualización de un Laser pulsante con placas paralelas de cobre	Equipo	1,00

6.2 PRESUPUESTO BASE

Con el metrado base y los precios averiguados en el mercado local se establece el presupuesto base que tendrá el equipo de: Visualización bidimensional y solución matemática de campos eléctricos típicos para tensiones superiores a 5000V DC.

PRESUPUESTO BASE						
Proyecto	Visualización bidimensional y solución matemática de campos eléctricos típicos para tensiones superiores a 5000V DC.					
Proyectista	Carlos Alvarado Pantoja					
Lugar	Universidad Nacional de Ingeniería			Departamento		Lima
Ítem	Descripción partida	Unidad	Metrado	Precio unitario	Parcial	SUBTOTAL
1.00	TRABAJOS PRELIMINARES					
1.01	Movilización de equipos y herramientas	Global	1,00	300,00	300,00	
1.02	Trazo y replanteo	Global	1,00	100,00	100,00	
1.03	Transporte de materiales	Global	1,00	200,00	200,00	
1.04	Trabajos de Electricidad	Global	1,00	100,00	100,00	700,00
2.00	EQUIPOS					
2.01	Multitester digital CIE, series 804655, 850384	Unidad	2,00	200,00	400,00	
2.02	Fuente regulada 0 a 30 V, 20 A, marca Celtrop.	Unidad	1,00	240,00	240,00	
2.03	Cajas acrílicas tipo cristal de diferentes tamaños	Unidad	4,00	100,00	400,00	
2.04	Placas acrílicas de diferente tamaño	Unidad	10,00	50,00	500,00	

	Cam Go					
2.06	Variador de voltaje en CA	Unidad	1,00	450,00	450,00	
2.07	Transformador elevador 220/10000	Unidad	1,00	700,00	700,00	
2.08	Rectificador de voltaje	Unidad	1,00	350,00	350,00	
2.09	Condensador de 2500 pF/40000 V.	Unidad	1,00	360,00	360,00	
2.10	Bolas de acero de 50 mm de diámetro	Unidad	2,00	10,00	20,00	
2.11	Placas paralelas de cobre	Unidad	6,00	60,00	360,00	
2.12	Atenuador de voltaje de 1000 Mega ohm	Unidad	1,00	100,00	100,00	
2.13	Electrodos cilindricos	Unidad	2,00	10,00	20,00	
2.14	Electrodos Paralelos	Unidad	2,00	30,00	60,00	4560
3.00	INSTALACIONES ELECTRICAS					
3.01	Conductor Eléctrico con aislamiento para 15 kV	ml	30,00	5,00	150,00	
3.02	Diodos de Selenium	Unidad	8,00	10,00	80,00	
3.03	Accesorios de conexión	Global	1,00	20,00	20,00	
3.04	Resistencia de 20 Mega ohm	Unidad	100,00	0,50	50,00	
3.05	Llave termo magnética	Unidad	1,00	40,00	40,00	340,00
4.00	PRUEBAS					
4.01	Visualización de Campos eléctricos con un electrodo cilindrico	Equipo	1,00	80,00	80,00	
4.02	Visualización de Campos eléctricos con dos electrodos cilindricos	Equipo	1,00	80,00	80,00	
4.03	Visualización de Campos eléctricos con dos placas paralelas	Equipo	1,00	80,00	80,00	
4.04	Visualización de ruptura del dieléctrico de un condensador	Equipo	3,00	80,00	80,00	

4.05	Visualización de un Laser pulsante con placas paralelas de cobre	Equipo	1,00	80,00	80,00	400,00
Costo Directo Total						8140,00
Gastos Generales, Administración y Dirección 10%						814,00
Utilidad 10%						814,00
Subtotal						9768,00
I.G.V. 18%						1758,00
TOTAL DE PRESUPUESTO						11526,00

El equipo desarrollado permite la visualización bidimensional de campos eléctricos típicos para tensiones superiores a 5000V DC, los cuales serán comparados con los obtenidos mediante desarrollos matemáticos.

También permite realizar experiencias de medición de constante dieléctrica de láminas de diferente espesor y tensión de ruptura de líquidos.

Adicionalmente se muestra la formación de radiación ultravioleta, mediante el uso de placas paralelas de cobre, aprovechadas para la construcción de un Láser Pulsante, tema que podría ser desarrollado en una posterior investigación.

El costo directo total es relativamente bajo (USA \$4433,00), justificándose la inversión por los beneficios científicos y económicos a obtenerse, mediante el uso de este equipamiento.

CONCLUSIONES

1. Se ha culminado el desarrollo de un equipo para la visualización bidimensional de campos eléctricos generados con tensiones superiores a 5000 VDC.
2. Se ha comparado la solución matemática de configuraciones típicas de campos eléctricos con los observados por el equipo desarrollado.
3. El Equipo Visualizador de Campo Eléctrico está diseñado para observar las líneas de fuerza del campo eléctrico conocidas o por conocer, según los Electroodos que se estén probando.
4. Tomando todas las consideraciones técnicas para la instalación de los dispositivos eléctricos, se podrá verificar y mejorar las pruebas ya desarrolladas en la presente Tesis.
5. Los Dispositivos Eléctricos de este Equipo Visualizador pueden conseguirse en el Mercado Nacional, por lo que no será necesario importar dispositivos para poder armar un equipo de iguales características a la presentada en esta Tesis.
6. El voltaje de entrada es variable de 0 a 220 VAC y 60Hz y el de salida es de 0 a 15000 VDC.
7. Las pruebas se pueden realizar al aire, en vacío, en medios líquidos o sólidos.

8. En la prueba de la visualización en medios líquidos, se ha usado aceite automotriz usado para la caja de cambio Automático o Dirección Hidráulica llamado comúnmente "HIDROLINA".
9. La rotura dieléctrica de la hidrolina se ha producido a los 10800 VDC para una separación de 2,5 mm entre los electrodos de acero de 1 ½"φ.
10. La rotura dieléctrica de la hidrolina utilizada en la experiencia ha ocasionado la pérdida de sus propiedades físicas y químicas.

BIBLIOGRAFÍA

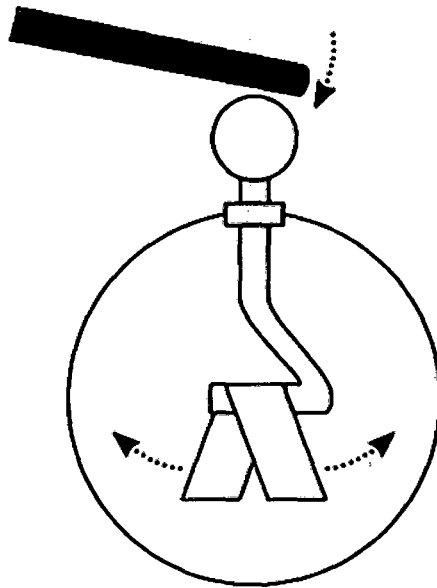
1. R. K. Wangsness, Campos Electromagnéticos. Ed. Limusa (Méjico) 20ª Edición, 1986.
2. J. R. Reitz, F. J. Milford, R. W. Christy, Fundamentos de la Teoría Electromagnética. Ed Addison-WesleyIberoamericana (Delaware) 1984.
3. J. D. Catalá, Electrostática, Ed. Quiasmo, 1ª Edición, (Madrid) 2009.
4. S. V. Marshall, R. E. DuBroff, G.G. Skitek, Electromagnetismo: Conceptos y Aplicaciones 4ª ed., Ed. Prentice-HallHispanoamericana, S.A. (Méjico) 1997.
5. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, Feynman, Vol. II: Electromagnetismo y materia Ed. Addison WesleyIberoamericana S.A. (Wilmington) 1987.
6. B. Di Bartolo, Classical Theory of Electromagnetism 2nd edition, Ed. World Scientific, Singapore 2004.
7. V. López Rodríguez, Problemas Resueltos de Electromagnetismo. Ed. Centro de Estudios Ramón Areces (Madrid)1990.
8. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, Física Teórica Vol (2) Teoría Clásica de Campos. Ed Reverté. (Madrid) 1975, Cpts.III-X
9. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, Física Teórica Vol (8) Electrodinámica de los Medios Contínuos. Ed Reverté (Madrid)1975, Cpts. I-V, IX-X

10. R. Becker, *Electromagnetic Fields and Interactions*, Ed. Dover Publications
(New York) 1964

APENDICE

APENDICE 1

Electroscopio



Esquema del funcionamiento del electroscopio

El **electroscopio** es un aparato que permite detectar la presencia de carga eléctrica en un cuerpo e identificar el signo de la misma.

El electroscopio sencillo consiste en una varilla metálica vertical que tiene una esfera en la parte superior y en el extremo opuesto dos láminas de aluminio muy delgadas. La varilla está sostenida en la parte superior de una caja de vidrio transparente con un armazón de cobre en contacto con tierra. Al acercar un objeto electrizado a la esfera, la varilla se electrifica y las laminillas cargadas con igual signo que el objeto se repelen, siendo su divergencia una medida de la cantidad de carga que han recibido. La fuerza de repulsión electrostática se equilibra con el peso de las hojas. Si se aleja el objeto de la esfera y las láminas, al perder la polarización, vuelven a su posición normal.

Cuando un electroscopio se carga con un signo conocido, puede determinarse el tipo de carga eléctrica de un objeto aproximándolo a la esfera. Si las laminillas se separan significa que el objeto está cargado con el mismo tipo de carga que el electroscopio. De lo contrario, si se juntan, el objeto y el electroscopio tienen signos opuestos.

Un electroscopio cargado pierde gradualmente su carga debido a la conductividad eléctrica del aire producida por su contenido en iones. Por ello la velocidad con la que se carga un electroscopio en presencia de un campo eléctrico o se descarga puede ser utilizada para

medir la densidad de iones en el aire ambiente. Por este motivo, el electroscopio se puede utilizar para medir la radiación de fondo en presencia de materiales radiactivos.

El primer electroscopio fue creado por el médico inglés William Gilbert para realizar sus experimentos con cargas electrostáticas. Actualmente este instrumento no es más que una curiosidad de museo, dando paso a mejores instrumentos electrónicos.

1. Explicación de su funcionamiento

Un electroscopio es un dispositivo que permite detectar la presencia de un objeto cargado aprovechando el fenómeno de separación de cargas por inducción. Explicaremos su funcionamiento empezando por ver qué sucede con las cargas en los materiales conductores.

Si acercamos un cuerpo cargado con carga positiva, por ejemplo un lapicero que ha sido frotada con un paño, las cargas negativas del conductor experimentan una fuerza atractiva hacia el lapicero. Por esta razón se acumulan en la parte más cercana a ésta. Por el contrario las cargas positivas del conductor experimentan una fuerza de repulsión y por esto se acumulan en la parte más lejana al lapicero.

Lo que ha ocurrido es que las cargas se han desplazado, pero la suma de cargas positivas es igual a la suma de cargas negativas. Por lo tanto la carga neta del conductor sigue siendo nula.

Consideremos ahora que pasa en el electroscopio. Recordemos que un electroscopio está formado esencialmente por un par de hojas metálicas unidas en un extremo. Por ejemplo una tira larga de papel de aluminio doblada al medio.

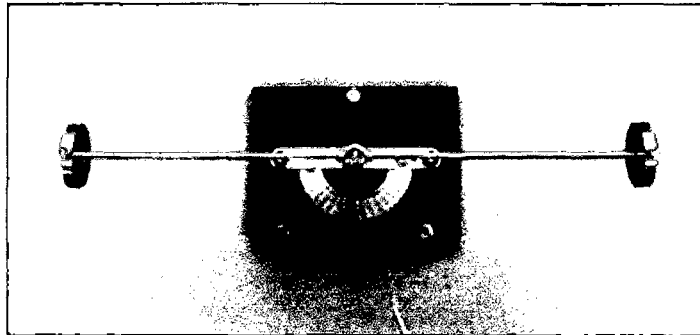
Si acercamos la lapicera cargada al electroscopio, como se indica en la figura, la carga negativa será atraída hacia el extremo más cercano a la lapicera mientras que la carga positiva se acumulará en el otro extremo, es decir que se distribuirá entre las dos hojas del electroscopio.

La situación se muestra en la figura: los dos extremos libres del electroscopio quedaron cargados positivamente y como las cargas de un mismo signo se rechazan las hojas del electroscopio se separan.

Si ahora alejamos la lapicera, las cargas positivas y negativas del electroscopio vuelven a redistribuirse, la fuerza de repulsión entre las hojas desaparece y se juntan nuevamente.

¿Qué pasa si tocamos con un dedo el extremo del electroscopio mientras está cerca del lapicero cargado? La carga negativa acumulada en ese extremo "pasará" a la mano y por lo tanto el electroscopio queda cargado positivamente. Debido a esto las hojas no se juntan cuando alejamos el lapicero.

Balanza de torsión



Péndulo de torsión.

La **Balanza de torsión**, que tiene su fundamento en el péndulo de torsión, está constituida por un material elástico sometido a torsión (par torsor). Cuando se le aplica una torsión, el material reacciona con un par torsor contrario o recuperador. Fue diseñada originalmente por el geólogo británico John Michell, y mejorada por el químico y físico de la misma nacionalidad Henry Cavendish. El instrumento fue inventado de forma independiente por el físico francés Charles-Augustin de Coulomb en el año 1777, que lo empleó para medir la atracción eléctrica y magnética.

1. Tipos

Los materiales más empleados como torsores suelen tener una forma alargada en forma de chapa, cable, barra, etc.

- Las **Gomas de torsión** se emplean en los relojes de péndulo de torsión.
- **Barras de torsión** (o *sway bars*) se emplean para dar soporte a los componentes de suspensión de los automóviles, permitiendo que estos componentes (que indirectamente se soportan sobre las ruedas) sean las responsables de amortiguar los movimientos verticales cuando se conduce un vehículo. El DeLorean DMC-12 emplea barras a temperaturas criogénicas para asistir la apertura de las puertas.

2. Usos y aplicaciones

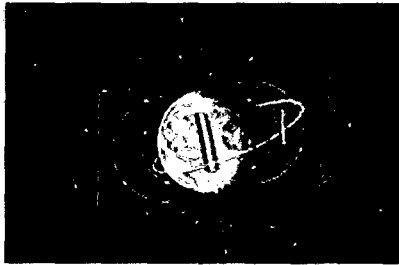
La balanza de torsión es un dispositivo creado por el físico Charles-Augustin de Coulomb en el año 1777, con el objeto de medir fuerzas débiles. Coulomb empleó la balanza para medir la fuerza electrostática entre dos cargas. El encontró que la fuerza electrostática entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las magnitudes de las cargas eléctricas e inversamente al cuadrado de la distancia entre las cargas. A este descubrimiento lo denominó Ley de Coulomb.

La balanza de torsión consiste en dos bolas de metal sujetas por los dos extremos de una barra suspendida por un cable, filamento o chapa delgada. Para medir la fuerza electrostática se puede poner una tercera bola cargada a una cierta distancia. Las dos bolas cargadas se repelen/atraen unas a otras, causando una torsión de un cierto ángulo. De esta forma se puede

saber cuánta fuerza, en newtons, es requerida para torsionar la fibra un cierto ángulo. La balanza de torsión se empleó para definir inicialmente la unidad de carga electrostática, hoy en día se define como la carga que pasa por la sección de un cable cuando hay una corriente de un amperio durante un segundo de tiempo, la fórmula para hacer esto es: $1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$. Un Culombio representa una carga aproximada de 6.241506×10^{18} e, siendo "e" la cantidad de carga que posee un electrón.

Una balanza de torsión se empleó en el experimento de Cavendish realizado en 1798 para medir la constante de gravedad con la mayor precisión posible. Las balanzas de torsión se siguen empleando hoy en día en los experimentos de física.

Cinturones de Van Allen



Cinturones de van Allen.

Los **cinturones de Van Allen** son ciertas zonas de la magnetosfera terrestre donde se concentran las partículas cargadas. Son llamados así en honor de su descubridor James Van Allen. Fueron descubiertos gracias al lanzamiento del satélite estadounidense Explorer 1, el cual fue en principio un fracaso debido a su forma alargada que junto con un sistema de control mal diseñado "descontroló" este dentro de su órbita. En la imagen podemos ver el Explorer 1 atravesando dichos cinturones.

Estos cinturones son áreas en forma de anillo de superficie toroidal en las que gran cantidad de protones y electrones se están moviendo en espiral entre los polos magnéticos del planeta, y se estructura en dos cinturones: uno interior y otro exterior. El cinturón interior está a unos 1.000 km por encima de la superficie de la Tierra y se extiende por encima de los 5.000 km; por su parte, el cinturón exterior se extiende desde aproximadamente 15.000 km hasta los 20.000 km. Este cinturón exterior en concreto, no afecta a satélites de órbitas altas/medias (MEO) como pueden ser los geoestacionarios (GEO) situados en torno a 35.000 km de altitud. Los satélites de órbita baja (LEO), deben buscar un compromiso entre la conveniencia de emplear una altitud considerable para evitar la resistencia residual de la alta atmósfera, que acorta la vida útil del satélite, y la necesidad de estar por debajo de los 1.000 km para no sufrir largas permanencias en los cinturones de radiación ni atravesar áreas de elevada intensidad, muy perjudiciales para dichos satélites.

Una región del cinturón interior, conocida como Anomalía del Atlántico Sur (SAA) se extiende a órbitas bajas y es peligrosa para las naves y satélites artificiales que la atraviesen, pues tanto los equipos electrónicos como los seres humanos pueden verse perjudicados por la radiación.

Estos cinturones de radiación se originan debido al intenso campo magnético de la Tierra, causado a su vez por la rotación de ésta. Dicho campo atrapa partículas cargadas (plasma) provenientes del sol (viento solar), así como partículas cargadas que se generan por interacción de la atmósfera terrestre con la radiación cósmica y la radiación solar de alta energía.

Efecto triboeléctrico

Serie triboeléctrica:

Mayor carga positiva

+

Aire

Piel humana

Cuero

Piel de conejo

Vidrio

Cuarzo

Mica

Pelo humano

Nylon

Lana

Plomo

Piel de gato

Seda

Aluminio

Papel (pequeña carga positiva)

Algodón (sin carga)

0

Acero (sin carga)

Madera (pequeña carga negativa)

Polimetilmetacrilato

Ámbar

Lacre

Acrílico

Poliestireno

Globo de goma

Resinas

Goma dura

Niquel, Cobre

Azufre

Bronce, Plata

Oro, Platino

Acetato, Rayón

Goma sintética

Poliéster

Espuma de poliestireno

Orlón

Papel film para embalar

Poliuretano

Polietileno (cinta Scotch)

Polipropileno

Vinilo (PVC)

Silicio

Teflón

Goma de Silicona

Ebonita

5



Mayor carga negativa

El efecto **triboeléctrico** es un tipo de electrificación causado por el contacto con otro material (por ejemplo el frotamiento directo). La polaridad y la fuerza de las cargas producidas se diferencian según los materiales, la aspereza superficial, la temperatura, la tensión, y otras características. Se denomina **triboelectricidad** (del griego *tribein*, "frotar"¹) al fenómeno de electrificación por frotamiento. La electrostática, puede producirse por frotamiento o por influencia.

El ámbar, por ejemplo, puede adquirir una carga eléctrica por el contacto y la separación (respectivamente fricción) con un material como la lana. Esta característica, registrada primero por Tales de Mileto, sugiriendo la palabra "electricidad", de la palabra griega (griego) para el ámbar "electrón".

1. Mecanismo

Los átomos están compuestos por un núcleo cargado positivamente debido a los protones, que se encuentra rodeado por electrones cargados negativamente. Así, el átomo es eléctricamente neutro.

Sin embargo, no todos los elementos presentan la misma afinidad por los electrones, es decir, su tendencia a captar o ceder electrones. Esto es debido a que los elementos químicos tienden a adquirir la configuración electrónica de los gases nobles más cercanos, ya que son los elementos electroquímicamente más estables. Así, el flúor, el elemento con mayor electroafinidad, tenderá a captar un electrón para así adquirir la configuración del neón, y de la misma forma el magnesio tenderá a cederlos con el mismo fin.

Aunque algo más complejo, cuando se frota dos materiales compuestos por elementos diferentes, la diferencia en afinidad electrónica provoca que uno de los materiales adquiera electrones del otro, y por tanto que uno quede cargado positiva y otro negativamente. Para que se produzca esta transferencia de cargas no es necesario el frotamiento; mediante contacto también se produce esta transferencia, pero al frotar se renuevan continuamente los puntos de contacto por donde se transfieren las cargas, y por ende tiene el mismo efecto que si aumentáramos la superficie real de contacto.

Una vez que el intercambio de cargas ha tenido lugar y los dos cuerpos se han separado, si el material es conductor las cargas se repartirán uniformemente por todo su volumen, mientras que si el material es aislante, la carga permanecerá muy cerca de la superficie donde ha tenido lugar la transferencia de cargas. En este último caso, el valor de la carga depositada puede oscilar entre 10^{-11} y 10^{-9} C por cada milímetro cuadrado de superficie (aproximadamente un electrón libre por cada 1000 átomos).

2. Serie triboeléctrica

La secuencia triboeléctrica es una lista de materiales dispuestos en un orden determinado.

Frotando dos materiales de la secuencia, el que esté en la posición más alta se cargará positivamente, mientras que el que se sitúa más abajo se carga negativamente. Además cuanto más separados estén los materiales en la tabla, más intensa es su electrificación.

Los materiales se enumeran a menudo en el orden de la polaridad de la separación de la carga cuando se tocan con otro objeto. Un material hacia el fondo de la serie, cuando está tocando a un material cercano al tope de la serie, logrará una carga más negativa, y viceversa. Cuanto más lejos están los dos materiales en la serie, mayor es la carga transferida.

Estas tablas, aunque orientativas, no siempre son ciertas, puesto que dependen del estado de las superficies que se ponen en contacto, de la humedad, del frotamiento, y de otros factores.¹

Los materiales cerca en la serie pueden no intercambiar el uno con el otro ninguna carga, o pueden intercambiar lo contrario de lo que es implicada por la lista. Esto depende más de la presencia del frotamiento, la presencia de contaminantes o de óxidos, o sobre características con excepción en del tipo de material. La carga también varía para los materiales próximos.

3. Causa

Aunque la palabra viene del Griego para el "frotamiento", los "tribos", los dos materiales necesitan solamente entrar en contacto y después separarse para que los electrones sean intercambiados. Después de entrar en contacto, un vínculo químico se forma entre algunas partes de las dos superficies, llamado adherencia, y las cargas se mueven a partir de un material al otro para igualar su potencial electroquímico. Esto es que crea el desequilibrio neto de la carga entre los objetos. Cuando están separadas, algunos de los átomos consolidados tienen una tendencia a guardar electrones adicionales, y algo una tendencia a darlos lejos, aunque el desequilibrio será destruido parcialmente por hacer un túnel o la interrupción eléctrica (generalmente descarga de corona). Además, algunos materiales pueden intercambiar los iones de la movilidad que diferencia, o intercambie los fragmentos cargados de moléculas más grandes

El efecto triboeléctrico se relaciona solamente con la fricción porque ambos implican la adherencia. Sin embargo, el efecto se realza enormemente frotando los materiales juntos, pues se tocan y se separan muchas veces. Para las superficies con diferencia de geometría, el frotamiento puede también conducir a la calefacción de salientes, causando la separación piroeléctrica de la carga que pueden agregar a la existente electrificación del contacto, o que puede oponer la polaridad existente. Los nano-efectos superficiales no se han podido entender bien, y el microscopio atómico de la fuerza ha hecho posible un progreso repentino en este campo de la física.

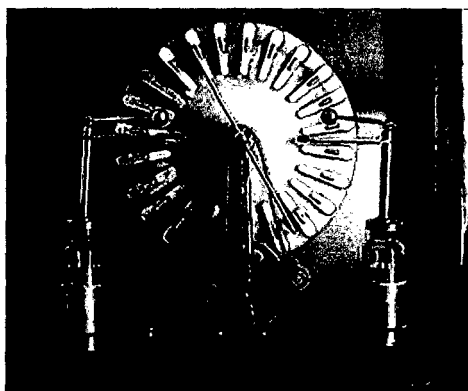
Porque la superficie del material está ahora eléctricamente cargada, negativamente o positivamente, cualquier contacto con un objeto conductor descargado o con un objeto que

tiene carga substancialmente diversa puede causar una descarga eléctrica de la electricidad estática urbanizada; una chispa. Una persona que camina simplemente a través de una alfombra puede acumular una carga de muchos millares de voltios, bastantes para causar una chispa a un centímetro de distancia o más. Este tipo de descarga es generalmente inofensiva porque la energía $((V^2 * C)/2)$ (energía $((V^2 * C)/2)$) de la chispa es muy pequeña, unos 10 mJ con el tiempo seco y frío, y mucho menos que eso en condiciones húmedas. En vuelo el avión desarrolla una carga estática de la fricción del aire en la armadura de avión. Los parásitos atmosféricos se pueden descargar con los descargadores estáticos o los filtros estáticos.

4. Riesgos y contramedidas

El efecto es de una importancia industrial considerable en términos de la seguridad y del daño del potencial a los productos manufacturados. La chispa producida puede completamente encender los vapores inflamables, como por ejemplo, de la gasolina o del éter. Los medios tienen que ser encontrados para descargar los carros que pueden llevar tales líquidos en hospitales. Incluso donde solamente se produce una carga pequeña, ésta puede dar lugar a las partículas de polvo que son atraídas a la superficie frotada. En el caso de la fabricación del textil esto puede conducir a una marca mugrienta permanente donde se ha cargado el paño. Algunos dispositivos electrónicos, como sucede con los circuitos integrados tipo CMOS y los transistores tipo MOSFET, se pueden destruir accidentalmente por descarga estática de alto voltaje. Tales componentes se almacenan generalmente en una espuma conductora para su protección. Cuando el usuario se conecta a tierra tocando la mesa de trabajo, o usando una pulsera especial en la muñeca (o tobillo) se reduce el daño a los dispositivos electrónicos que son sensibles a las descargas electrostáticas.

Máquina de Wimshurst



Máquina de Wimshurst.

La **máquina de Wimshurst** es un generador electrostático de alto voltaje desarrollado entre 1880 y 1883 por el inventor británico James Wimshurst (1832 - 1903). Tiene un aspecto distintivo con dos grandes discos a contra-rotación (giran en sentidos opuestos) montados en un plano vertical, dos barras cruzadas con cepillos metálicos, y dos esferas de metal separadas por una distancia donde saltan las chispas. Se basa en el efecto triboeléctrico, en el que se acumulan cargas cuando dos materiales distintos se frotan entre sí.

1. Descripción

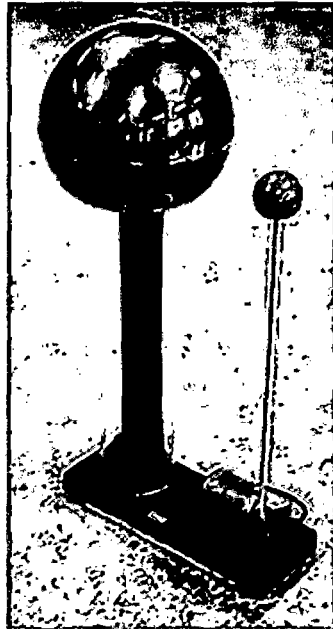
Estas máquinas pertenecen a una clase de grupos de generadores, que crean cargas eléctricas por inducción electrostática. En un principio las máquinas de esta categoría fueron desarrolladas por Wilhelm Holtz (1865 y 1867), Augusto Toepler (1865), y J. Robert Voss (1880). Las máquinas más antiguas son menos eficientes y exhiben una tendencia imprevisible a cambiar de polaridad. La máquina de Wimshurst no tiene este defecto.

En una máquina Wimshurst, los dos discos de aislamiento y sus sectores de metal giran en direcciones opuestas que pasan por las barras neutralizadoras cruzadas de metal y por sus pinceles. Un desequilibrio de cargas es inducido, amplificado y almacenado por dos pares de peines de metal con los puntos situados cerca de la superficie de cada disco. Estos colectores se montan sobre un soporte aislante y conectado a una salida terminal. La retroalimentación positiva, aumenta la acumulación de cargas en forma exponencial hasta que la tensión de ruptura dieléctrica del aire alcanza una chispa.

La máquina está lista para comenzar, lo que significa que la energía eléctrica externa no es necesaria para crear una carga inicial. Sin embargo, se requiere energía mecánica para tornar los discos en contra el campo eléctrico, y es esta energía que la máquina convierte en energía eléctrica. La salida de la máquina de Wimshurst es esencialmente una corriente constante ya que es proporcional al área cubierta por el metal y los sectores a la velocidad de rotación. El aislamiento y el tamaño de la máquina determinan la salida de voltaje máximo que se puede alcanzar. La chispa de energía acumulada se puede aumentar mediante la adición de un par de frascos Leyden, un tipo de condensador adecuado para la alta tensión, con los frascos en el interior de las placas conectados en forma independiente a cada una de las terminales de salida y conectados con las placas exteriores entre sí. Una máquina Wimshurst puede

producir rayos que son aproximadamente un tercio del diámetro del disco de longitud y varias decenas de microamperios.

Generador de Van de Graaff



Generador de Van De Graaff

El **generador de Van de Graaff** es una máquina electrostática que utiliza una cinta móvil para acumular grandes cantidades de carga eléctrica en el interior de una esfera metálica hueca. Las diferencias de potencial así alcanzadas en un generador de Van de Graaff moderno pueden llegar a alcanzar los 5 megavoltios. Las diferentes aplicaciones de esta máquina incluyen la producción de rayos X, esterilización de alimentos y experimentos de física de partículas y física nuclear.

1. Descripción

El generador consiste en una cinta, transportadora de material aislante motorizada, que transporta carga a un terminal hueco. La carga es depositada en la cinta por inducción en la cinta, ya que la varilla metálica o peine, esta muy próxima a la cinta pero no en contacto. La carga, transportada por la cinta, pasa al terminal esférico nulo por medio de otro peine o varilla metálica que se encarga de producir energía.

2. Historia

Este tipo de generador eléctrico fue desarrollado inicialmente por el físico Robert J. Van de Graaff en el MIT alrededor de 1929 para realizar experimentos en física nuclear en los que se aceleraban partículas cargadas que se hacían chocar contra blancos fijos a gran velocidad. Los resultados de las colisiones nos informan de las características de los núcleos del material que constituye el blanco. El primer modelo funcional fue exhibido en octubre de 1929 y para 1931 Van de Graaff había producido un generador capaz de alcanzar diferencias

de potencial de 1 megavoltio. En la actualidad existen generadores de electricidad capaces de alcanzar diferencias de voltaje muy superiores al generador de Van de Graaff pero directamente emparentados con él. Sin embargo, en la mayor parte de los experimentos modernos en los que es necesario acelerar cargas eléctricas se utilizan aceleradores lineales con sucesivos campos de aceleración y ciclotrones. Muchos museos de ciencia están equipados con generadores de Van de Graaff por la facilidad con la que ilustra los fenómenos electrostáticos.

El generador del Van der Graaff es un generador de corriente constante, mientras que la batería es un generador de voltaje constante, lo que cambia es la intensidad dependiendo que los aparatos que se conectan.

3. Generadores de Van de Graaff en exhibición

Uno de los generadores más grandes de Van de Graaff del mundo, construido por el mismo Robert J. Van de Graaff, está ahora en exhibición permanente en el museo de Boston de la ciencia. Con dos esferas de aluminio conjuntas de 4,5 metros que están estáticas en unas columnas altas, este generador puede alcanzar a menudo 2 millones de Voltios. Las demostraciones usando el generador Van Der Graaff y varias bobinas de Tesla se realizan varias veces cada día.

Michael Faraday

Michael Faraday



Michael Faraday

Nacimiento 22 de septiembre de 1791

Newington

Fallecimiento 25 de agosto de 1867 (75 años)

Residencia Reino Unido

Nacionalidad británico

Campo electromagnetismo, electroquímica

Instituciones Royal Institution

Conocido por Descubrimiento del benceno y de la inducción electromagnética
(motor eléctrico)

Firma

A handwritten signature of Michael Faraday in cursive script, written in dark ink. The signature is stylized and difficult to read, but clearly identifies the subject of the page.

Michael Faraday, FRS, (Newington, 22 de septiembre de 1791 - Londres, 25 de agosto de 1867) fue un físico y químico británico que estudió el electromagnetismo y la electroquímica. Fue discípulo del químico Humphry Davy, y ha sido conocido principalmente por su descubrimiento de la inducción electromagnética, que ha permitido la construcción de generadores y motores eléctricos, y de las leyes de la electrólisis, por lo que es considerado como el verdadero fundador del electromagnetismo y de la electroquímica.

En 1831 trazó el campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica (ya descubierto por Oersted), y ese mismo año descubrió la inducción electromagnética, demostró la inducción de una corriente eléctrica por otra, e introdujo el concepto de líneas de fuerza, para representar los campos magnéticos. Durante este mismo periodo, investigó sobre la electrólisis y descubrió las dos leyes fundamentales que llevan su nombre:

- La masa de sustancia liberada en una electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado a través del electrolito **masa = equivalente electroquímico, por la intensidad y por el tiempo ($m = c I t$)**
- Las masas de distintas sustancias liberadas por la misma cantidad de electricidad son directamente proporcionales a sus pesos equivalentes.

Con sus investigaciones se dio un paso fundamental en el desarrollo de la electricidad al establecer que el magnetismo produce electricidad a través del movimiento.

Se denomina faradio (F), en honor a Michael Faraday, a la unidad de capacidad eléctrica del SI de unidades. Se define como la capacidad de un conductor tal que cargado con una carga de un culombio, adquiere un potencial electrostático de un voltio. Su símbolo es F.¹

1. Primeros años

Recibió escasa formación académica, entrando a los 13 años a trabajar de aprendiz con un encuadernador de Londres. Durante los 15 años que pasó allí leyó libros de temas científicos y realizó experimentos en el campo de la electricidad, desarrollando un agudo interés por la ciencia que ya no le abandonó. A pesar de ello prácticamente no sabía matemáticas, desconocía el cálculo diferencial pero en contrapartida tenía una habilidad innata para trazar gráficos y diseñar experimentos.

2. Carrera científica

Realizó contribuciones en el campo de la electricidad. En 1821, después de que el químico danés Oersted, descubriera el electromagnetismo, Faraday construyó dos aparatos para producir lo que él llamó *rotación electromagnética*, en realidad, un motor eléctrico. Diez años más tarde, en 1831, comenzó sus más famosos experimentos con los que descubrió la inducción electromagnética, experimentos que aún hoy día son la base de la moderna tecnología electromagnética.

Trabajando con la electricidad estática, demostró que la carga eléctrica se acumula en la superficie exterior del conductor eléctrico cargado, con independencia de lo que pudiera haber en su interior. Este efecto se emplea en el dispositivo denominado jaula de Faraday.

En reconocimiento a sus importantes contribuciones, la unidad de capacidad eléctrica se denomina faradio.

Bajo la dirección de Davy realizó sus primeras Investigaciones en el campo de la química. Un estudio sobre el cloro le llevó al descubrimiento de dos nuevos cloruros de carbono. También descubrió el benceno; investigó nuevas variedades de vidrio óptico y llevó a cabo con éxito una serie de experimentos de licuefacción de gases comunes.

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

En 1858 se le proporcionó una de las Casas de Gracia y Favor, de la reina Victoria, donde murió nueve años más tarde, el 25 de agosto de 1867. Tiene una placa de homenaje en la Abadía de Westminster, cerca de la tumba de Isaac Newton, ya que rechazó ser enterrado allí, y está enterrado en la zona sandemania del Cementerio de Highgate, Londres, Inglaterra; ya que era ferviente miembro de la comunidad sandemania.

3. Los seis Principios de Faraday




De una obra de Isaac Watts titulada *The Improvement of the Mind -La mejora de la mente-*, leída a sus catorce años, Michael Faraday adquirió estos seis constantes principios de su disciplina científica:

- Llevar siempre consigo un pequeño bloc con el fin de tomar notas en cualquier momento.
- Mantener abundante correspondencia.
- Tener colaboradores con el fin de intercambiar ideas.
- Evitar las controversias.
- Verificar todo lo que le decían.
- No generalizar precipitadamente, hablar y escribir de la forma más precisa posible.

James Clerk Maxwell



James Clerk Maxwell

Nacimiento	<u>13 de junio de 1831</u> <u>Edimburgo,  Reino Unido</u>
Fallecimiento	<u>5 de noviembre de 1879</u> (48 años) <u>Cambridge,  Reino Unido</u>
Residencia	 <u>Reino Unido</u>
Nacionalidad	<u>Británico</u>
Campo	<u>electromagnetismo, termodinámica</u>
Instituciones	<u>Marischal College de Aberdeen (1856-1860), Kings College de Londres(1860-1871), Cambridge(1871-1879)</u>
<u>Alma máter</u>	<u>Cambridge</u>
Conocido por	Creación de la teoría <u>electromagnética</u> y la <u>teoría cinética</u> de gases.
Premios destacados	<u>Medalla Rumford en 1860.</u>
Cónyuge	Katherine Maxwell

James Clerk Maxwell (Edimburgo, Escocia, 13 de junio de 1831 – Cambridge, Inglaterra, 5 de noviembre de 1879). Físico escocés conocido principalmente por haber desarrollado la teoría electromagnética clásica, sintetizando todas las anteriores observaciones, experimentos y leyes sobre electricidad, magnetismo y aun sobre óptica, en una teoría consistente.¹ Las ecuaciones de Maxwell demostraron que la electricidad, el magnetismo y hasta la luz, son manifestaciones del mismo fenómeno: el campo electromagnético. Desde ese momento, todas las otras leyes y ecuaciones clásicas de estas disciplinas se convirtieron en casos simplificados de las ecuaciones de Maxwell. Su trabajo sobre electromagnetismo ha sido llamado la "*segunda gran unificación en física*",² después de la primera llevada a cabo por Newton. Además se le conoce por la estadística de Maxwell-Boltzmann en la teoría cinética de gases.

Maxwell fue una de las mentes matemáticas más preclaras de su tiempo, y muchos físicos lo consideran el científico del siglo XIX que más influencia tuvo sobre la física del siglo XX habiendo hecho contribuciones fundamentales en la comprensión de la naturaleza. Muchos consideran que sus contribuciones a la ciencia son de la misma magnitud que las de Isaac Newton y Albert Einstein.³ En 1931, con motivo de la conmemoración del centenario de su nacimiento, Albert Einstein describió el trabajo de Maxwell como «el más profundo y provechoso que la física ha experimentado desde los tiempos de Newton».

1. Breve biografía científica

Maxwell, que desde un principio mostró una gran facilidad para las disciplinas científicas, inició sus estudios universitarios a la edad de 13 años, con 15 años redactó un importante trabajo de mecánica. A los 25 fue nombrado catedrático en Aberdeen, después en Londres y, en 1871, de un instituto especialmente construido para él en Cambridge. Además de su actividad profesional, Maxwell se dedicó a la realización de estudios de carácter privado en sus posesiones de Escocia. Es el creador de la electrodinámica moderna y el fundador de la teoría cinética de los gases. Descubrió las ecuaciones llamadas "ecuaciones de Maxwell", y que se definen como las relaciones fundamentales entre las perturbaciones eléctricas y magnéticas, que simultáneamente permiten describir la propagación de las ondas electromagnéticas que, de acuerdo con su teoría, tienen el mismo carácter que las ondas luminosas. Más tarde Heinrich Hertz lograría demostrar experimentalmente la veracidad de las tesis expuestas por Maxwell. Sus teorías constituyeron el primer intento de unificar dos campos de la física que, antes de sus trabajos, se consideraban completamente independientes: la electricidad y el magnetismo (conocidos como electromagnetismo). En el año 1859 Maxwell formuló la expresión termodinámica que establece la relación entre la temperatura de un gas y la energía cinética de sus moléculas.

2. Obra científica

Entre sus primeros trabajos científicos Maxwell trabajó en el desarrollo de una teoría del color y de la visión y estudió la naturaleza de los anillos de Saturno demostrando que estos no podían estar formados por un único cuerpo sino que debían estar formados por una miríada de cuerpos mucho más pequeños. También fue capaz de probar que la teoría nebular de la formación del Sistema Solar vigente en su época era errónea ganando por estos trabajos el Premio Adams de Cambridge en 1859. En 1860, Maxwell demostró que era posible realizar fotografías en color utilizando una combinación de filtros rojo, verde y azul obteniendo por este descubrimiento la Medalla Rumford ese mismo año.

3. Las ecuaciones de Maxwell



James C. Maxwell a los 23 años.

Algo más tarde, Maxwell publicó dos artículos clásicos dentro del estudio del electromagnetismo. Las relaciones de igualdad entre las distintas derivadas parciales de las funciones correspondientes a los campos eléctrico y magnético, denominadas ecuaciones de Maxwell, están presentes de ordinario en cualquier libro de texto de la especialidad. Sus aportes a la teoría electromagnética lo sitúan entre los grandes científicos de la historia. Sin embargo, Maxwell no escribió sus fórmulas en notación diferencial, sino que planteó todo en un sistema de ecuaciones en cuaterniones. Su planteamiento fue esencialmente algebraico, como fue el caso de Rogelio José Boscovich con su teoría de los "puncta". Originalmente fueron veinte ecuaciones, que el mismo Maxwell redujo a trece. Luego Heaviside y Hertz produjeron las fórmulas que actualmente maneja la ciencia. Aunque las fórmulas que lograron Heaviside y Hertz son un modelo de compacidad y síntesis, se considera que el tratamiento en cuaterniones es más intuitivo y permite deducir, "ver" y anticipar más que con las "menos digeribles" fórmulas diferenciales. Los cuaterniones se prestan muy bien para describir vectores que giran en el espacio. Es probable que Nikola Tesla y Marconi conocieran y manejaran las expresiones originales de Maxwell.

En el prefacio de su obra *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873) declaró que su principal tarea consistía en justificar matemáticamente conceptos físicos descritos hasta ese momento de forma únicamente cualitativa, como las leyes de la inducción electromagnética y de los campos de fuerza, enunciadas por Michael Faraday. Con este objeto, Maxwell introdujo el concepto de onda electromagnética, que permite una descripción matemática adecuada de la interacción entre electricidad y magnetismo mediante sus célebres ecuaciones que describen y cuantifican los campos de fuerzas. Su teoría sugirió la posibilidad de generar ondas electromagnéticas en el laboratorio, hecho que corroboró Heinrich Hertz en 1887, ocho años después de la muerte de Maxwell, y que posteriormente supuso el inicio de la era de la comunicación rápida a distancia.

Teoría de campos

En física, la **teoría de campos** describe el conjunto de principios y técnicas matemáticas que permiten estudiar la dinámica y distribución espacial de los campos físicos. Así por ejemplo la teoría de campos permite describir específicamente como cambia un campo físico con el tiempo por su interacción consigo mismo y con el entorno.

La teoría de campos fue desarrollada en el contexto de la mecánica clásica durante el siglo XIX para describir tanto al campo gravitatorio y el campo eléctrico como otras formas de materia continuas como son los fluidos. Actualmente la teoría cuántica de campos es un campo de investigación muy activo que trata sobre los constituyentes últimos y estructura de la materia.

1. Introducción

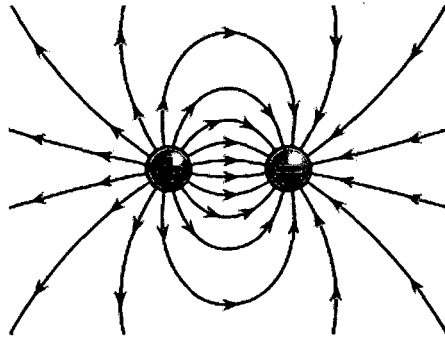
La variación en el espacio y la evolución temporal de formas de materia modelizables como campo físico se describe mediante una densidad lagrangiana. Por abuso de lenguaje, esta densidad lagrangiana también se llama "lagrangiano". Este "lagrangiano" es el análogo continuo del lagrangiano usado para describir la ecuación de movimiento de un sistema de partículas. Al igual que en el caso de partículas, además de describir la dinámica mediante un "lagrangiano" es posible en el caso de los campos describir su dinámica por medio de un "hamiltoniano".

El tratamiento clásico de los campos pasa por buscar ecuaciones diferenciales de evolución derivadas a partir del lagrangiano. Esto se hace introduciendo en lagrangiano en las llamadas ecuaciones de Euler-Lagrange. Por otro lado, el tratamiento cuántico de los campos involucra construir un hamiltoniano cuántico y un espacio de Hilbert adecuado, sobre el que se suele tratar el problema perturbativamente mediante diagramas de Feynman. Los resultados de ambas teorías resultan comparables si se examinan las secciones eficaces del *scattering* de partículas.

En Física Moderna, los campos más estudiados son los que nos dan las cuatro fuerzas fundamentales, para los cuales se han establecido la forma razonablemente exacta de sus respectivos "lagrangianos".

1.1 Historia

Michael Faraday fue el primero en introducir el concepto de campo, durante sus investigaciones sobre magnetismo. Varios trabajos posteriores formalizaron matemáticamente la idea de campo. En teoría clásica de campos matemáticamente estos se tratan como una función que varía continuamente a lo largo del espacio y con el tiempo. Aunque inicialmente el concepto de campo se consideró sólo como un artificio matemático conveniente, varias evidencias llevaron a considerar el campo electromagnético y el campo gravitatorio no sólo como campos de fuerzas definidos matemáticamente, sino como entidades físicas reales, detectables y medibles a las que era posible asociarles energía. De hecho en la moderna física cuántica se considera que no existen partículas materiales sino simplemente campos materiales. Cuando un campo está muy concentrado en una región del espacio razonablemente bien definida aparece a escala macroscópica como una partícula.



Representación matemática de un campo eléctrico como líneas que cruzan el espacio entre dos partículas cargadas eléctricamente.

La idea de los campos como entidades físicas reales y autónomas se hizo realmente notoria a partir de la formulación, por parte de James Clerk Maxwell, de la primera teoría unificada de campos en física. Maxwell reunió diversas leyes experimentales sobre los campos eléctricos y magnéticos, y las juntó en un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, añadiendo diversos términos por completitud teórica. Los nuevos términos postulados por Maxwell y la predicción de que los campos electromagnéticos en el vacío se propagan en formas de ondas electromagnéticas llevaron a la consideración del campo electromagnético como entidad física real, existente al margen de las cargas eléctricas que pueden estar asociadas a él. Las ecuaciones de la teoría de campo unificado formulada por Maxwell, se llaman ecuaciones de Maxwell. Al final del siglo XIX, el campo electromagnético fue comprendido como una colección de dos campos vectoriales en el espacio. Hoy en día, se lo puede reconocer como un solo campo tensorial antisimétrico de segundo orden en el espacio-tiempo.

La teoría de la gravitación de Einstein, llamada teoría general de la relatividad, es otro ejemplo de una teoría de campos. Aquí el principal campo es el tensor métrico, un campo tensorial simétrico de rango 2 en el espacio-tiempo.

2. Campos Clásicos

Los dos principales ejemplos de campos clásicos son la electrodinámica clásica y el campo gravitatorio. En la teoría clásica de campos, la variación dinámica de los campos se determina mediante la especificación de una densidad lagrangiana que es una función de las componentes del campo y sus derivadas primeras.

Más detalladamente las ecuaciones de variación dinámica se obtienen considerando, la integral de esta densidad lagrangiana sobre un dominio del espacio-tiempo. Así se puede permite construir el funcional de acción en forma integral y, subsiguientemente, mediante el uso de las ecuaciones de Euler-Lagrange se obtienen las ecuaciones en derivadas parciales que satisface el campo tanto en su variación en el espacio como en su evolución con el tiempo.

Interacciones fundamentales

De las 4 fuerzas fundamentales.

En física, se denominan **interacciones fundamentales** los cuatro tipos de campos cuánticos mediante los cuales interactúan las partículas. Según el modelo estándar, las partículas que interactúan con las partículas materiales, fermiones, son los bosones.

Existen 4 tipos de interacciones fundamentales: interacción nuclear fuerte, interacción nuclear débil, interacción electromagnética e interacción gravitatoria. Casi toda la historia de la física moderna se ha centrado en la unificación de estas interacciones, y hasta ahora la interacción débil y la electromagnética se han podido unificar en la interacción electrodébil.¹ En cambio, la unificación de la fuerza fuerte con la electrodébil es el motivo de toda la teoría de la gran unificación. Y finalmente, la teoría del todo involucraría esta interacción electronuclear con la gravedad.

La comunidad científica prefiere el nombre de interacciones fundamentales al de fuerzas debido a que con ese término se pueden referir tanto a las fuerzas como a los decaimientos que afectan a una partícula dada.

1. Historia

La historia de la física ha ido acompañada de la idea de unificación, de encontrar un conjunto de leyes simples que describan el universo. Galileo hizo una completa descripción de los efectos de la gravedad en la tierra y Kepler describió por primera vez el movimiento planetario. Para ese momento se creía que ambos fenómenos eran distantes hasta que Isaac Newton en su Principia de 1668 los describió bajo el mismo concepto, la fuerza gravitatoria.

Por otro lado, antes del siglo XIX, varios científicos como Stephen Gray, Joseph Priestley, Charles Coulomb y Alessandro Volta habían ya descrito casi en su totalidad el fenómeno eléctrico. En 1820, Hans Christian Ørsted fue el primero en descubrir perturbaciones magnéticas cercanas a corrientes eléctricas. A partir de este descubrimiento los experimentos no cesaron hasta que finalmente James Clerk Maxwell en 1861 fue el primero en derivar una ecuación de onda electromagnética,³ quedando unificados estos otros dos fenómenos en el electromagnetismo.

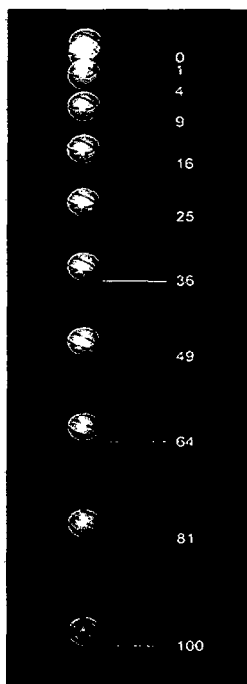
Con el desarrollo de la mecánica cuántica se descubrieron dos tipos más de fuerzas a las que no se las podía incluir en las dos ya existentes, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil. Con el posterior desarrollo del modelo estándar se encontró a las partículas *portadoras* de dichas *fuerzas*, los bosones. Los científicos prefieren el término de interacción al de fuerza debido a que se piensa en las fuerzas como interacciones entre bosones, además que la desintegración beta es causada por bosones W y Z de la interacción débil y ésta no es debida a la presencia de los bosones.²

Hasta que en 1960, Glashow, Salam y Weinberg postularon que la *fuerza* nuclear débil podía unificarse a la electromagnética en una sola interacción electrodébil. Estas dos interacciones a bajas energías parecen dos diferentes tipos de interacciones pero a temperaturas tan altas como las del big bang éstas corresponden a una sola.

En cuanto a la interacción fuerte, ésta y la electrodébil coexisten en el modelo estándar sin problemas pero se espera que las tres interacciones cuánticas puedan unificarse en una interacción electrodébil. Finalmente se cree que una unificación total que abarcaría a todas las cuatro interacciones pero hasta el momento no se ha encontrado una teoría contundente.

2. Interacciones

2.1 Interacción gravitatoria



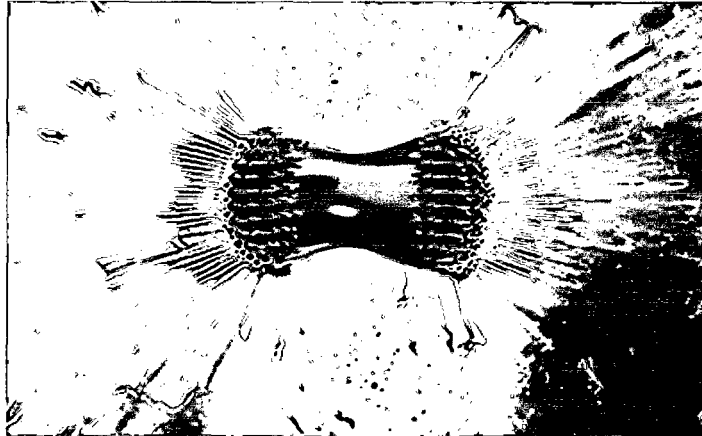
Es la más conocida de las interacciones debido a que a grandes distancias, por su efecto acumulativo con la masa, tiene mayor efecto que las demás. Junto al electromagnetismo, son las interacciones que actúan a grandes distancias y contrariamente al electromagnetismo, sólo tiene carácter atractivo. A distancias atómicas, y en comparación con el resto de interacciones es la más débil de todas.

La interacción gravitatoria, hace que cualquier tipo de materia provista de energía interactúe entre sí. Para formas de materia ordinaria cuyo tensor energía-impulso satisface ciertas condiciones de positividad, tendrá un carácter atractivo. La teoría de la relatividad general estudia el comportamiento de esta interacción a escala planetaria y supragaláctica describiéndola como una Curvatura del espacio-tiempo. En otras palabras, la interacción gravitatoria es una manifestación de la deformación que sufre el espacio-tiempo por la presencia de grandes masas. La teoría newtoniana de la gravitación es una aproximación no-relativista a la interacción gravitatoria.

Según la hipótesis del modelo estándar, la interacción gravitatoria, gravitación o fuerza de la gravedad, es transmitida por el gravitón. Cabe indicar que la teoría de la gravitación, en su formulación actual, no es una interacción que sea muy consistente con la descripción usual de la física de partículas. Sin embargo, debido a que la gravitación aparece sólo en

distancias muy por encima del radio atómico esto permite en la práctica usar ambas teorías simultáneamente sin encontrar conflicto, en la mayoría de situaciones prácticas.

2.2 Interacción electromagnética



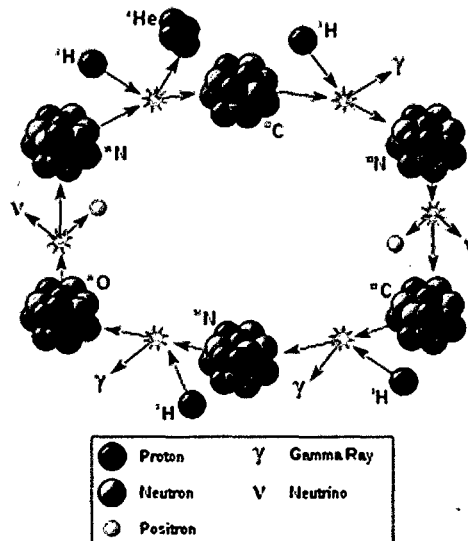
Fluido ferroso que se agrupa cerca de los polos de un imán.

El electromagnetismo es la interacción que actúa entre partículas con carga eléctrica. Este fenómeno incluye a la fuerza electrostática, que actúa entre cargas en reposo, y el efecto combinado de las fuerzas eléctrica y magnética que actúan entre cargas que se mueven una respecto a la otra.

El electromagnetismo también tiene un alcance infinito y como es mucho más fuerte que la gravedad describe casi todos los fenómenos de nuestra experiencia cotidiana. Estos van desde el rayo láser y la radio, a la estructura atómica y a fenómenos tales como la fricción y el arco iris.

Los fenómenos eléctricos y magnéticos han sido observados desde la antigüedad, pero fue a partir de 1800 que los científicos descubrieron que la electricidad y el magnetismo son dos aspectos fundamentales de la misma interacción. En 1864, las ecuaciones de Maxwell había unificado rigurosamente ambos fenómenos. En 1905, la teoría de Einstein de la relatividad especial resolvió la cuestión de la constancia de la velocidad de la luz. También Einstein explicó el efecto fotoeléctrico al teorizar que la luz se transmitía también en forma de cuantos, que ahora llamamos fotones. A partir de 1927, Paul Dirac unifica la mecánica cuántica con la teoría relativista del electromagnetismo, la teoría de la electrodinámica cuántica, que se completó en la década de 1940.

2.3 Interacción nuclear fuerte



La interacción fuerte, también conocida como *interacción nuclear fuerte*, es la interacción que permite unirse a los quarks para formar hadrones. La interacción electromagnética se da entre partículas cargadas eléctricamente, aquí las partículas también tienen carga, la carga de color. A pesar de que su radio de acción es el más fuerte, sólo se le aprecia a muy cortas distancias tales como el radio atómico. Según el modelo estándar, la partícula mediadora de esta fuerza es el gluón.⁴ La teoría que describe a esta interacción es la cromodinámica cuántica (QCD) y fue propuesta por David Politzer, Frank Wilczek y David Gross en la década de 1980.

Como resultado colateral de la interacción entre quarks, existe una manifestación de la fuerza nuclear fuerte que explica que dentro del núcleo atómico a los protones y neutrones. Debido a la carga positiva de los protones, para que éstos se encuentren estables en el núcleo debía existir una fuerza más *fuerte* que la electromagnética para retenerlos. Ahora sabemos que la verdadera causa de que los protones y neutrones no se desestabilicen es la llamada interacción fuerte residual.⁵ Esta interacción entre nucleones (protones y neutrones) se produce a través de parejas de quark-antiquark en forma de piones.

2.4 Interacción nuclear débil

La interacción débil, también conocida como *interacción nuclear débil*, se acopla a un tipo de carga llamada sabor, que la poseen los quarks y los leptones. Esta interacción es la causante de los cambios de sabor en estas partículas, en otras palabras es la responsable que de quarks y leptones decaigan en partículas más livianas, además es la que produce desintegraciones beta.⁶ La teoría de Glashow-Weinberg-Salam estudia la interacción débil y la electrodinámica cuántica de manera unificada en lo que se llama Modelo electrodébil.

Según el modelo estándar, la interacción débil es mediada por los bosones W y Z que son partículas muy masivas. Su intensidad es menor que la intensidad de la electromagnética y

su alcance es menor que el de la interacción fuerte. Al igual que la interacción fuerte y la gravitatoria es esta una interacción únicamente atractiva.

APENDICE 2

CARGA ELÉCTRICA

ELECTRIZACIÓN POR FROTAMIENTO

a) Carga eléctrica de varillas por frotamiento



Varillas de diferentes materiales frotadas con tela se acercan a trozos de algún material liviano tal como corcho, papel o semillas de grama. Se observa como dichos materiales son atraídos por las varillas debido a la carga eléctrica presente.

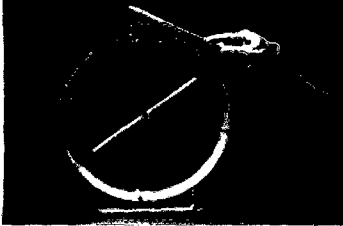
b) Carga eléctrica de un globo por frotamiento



Se frota con un paño un globo inflado y se puede observar que atrae pequeños trozos de un material liviano. También se puede observar que se adhiere a una superficie, como por ejemplo el pizarrón.

ELECTRIZACIÓN POR CONTACTO

a) Carga eléctrica de un electroscopio por contacto



Varillas de diferentes materiales previamente cargadas por frotamiento le transmiten carga por contacto al electroscopio, la cual se detecta por la separación de las láminas del mismo.

b) Carga eléctrica de peces de papel



Peces de papel dentro de un recipiente son atraídos por una superficie tensa previamente cargada por frotamiento. Se cargan entonces eléctricamente por contacto, luego son repelidos y se descargan al contactar a la parte metálica inferior.

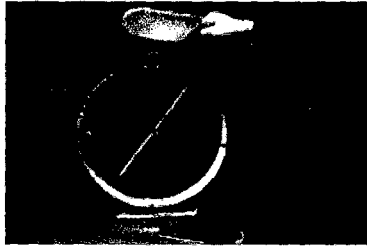
c) Sombrero electrostático



Pequeños conductores unidos a una superficie conductora colocada sobre la esfera mayor del generador de Van der Graff, son repelidos quedando dispuestos en forma radial.

ELECTRIZACIÓN POR INDUCCIÓN

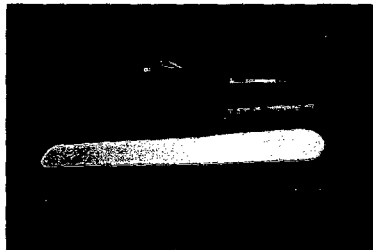
a) Electrización de un electroscopio por inducción



Un electroscopio se puede cargar eléctricamente por medio del acercamiento de una varilla cargada previamente por frotamiento, sin necesidad de que exista contacto entre el electroscopio y la varilla cargada.

CARGAS ELÉCTRICAS DE DISTINTO SIGNO

a) Clasificación de varillas cargadas eléctricamente



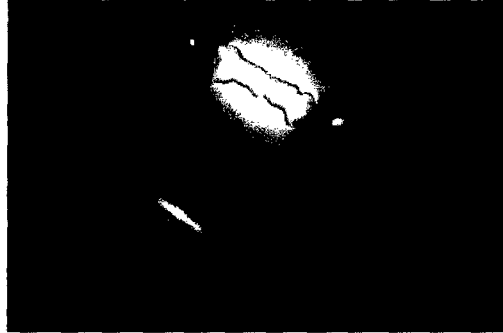
Se dispone de un conjunto de varillas de distintos materiales que pueden ser cargadas eléctricamente por frotamiento. Por medio del electroscopio y utilizando varillas patrones: ebonita (-) y vidrio (+), se puede determinar el signo de la carga eléctrica de las varillas.

b) Materiales que se frotan entre sí adquieren carga eléctrica de signo contrario



Esto se puede comprobar por medio del uso de dos materiales distintos, los cuales después de ser frotados entre ellos, se ponen en contacto con un electroscopio. Este experimento se realiza frotando plástico con tela y metal con plexiglás.

c) Descargas eléctricas



Por medio del uso de generadores electrostáticos tales como el generador de Whimsurt o generador de Van der Graff se pueden observar descargas eléctricas, a través del aire, entre las esferas cargadas eléctricamente con distintos signos en dichos generadores.

CONDUCTORES Y AISLANTES

MATERIALES AISLANTES Y CONDUCTORES

a) Clasificación de materiales



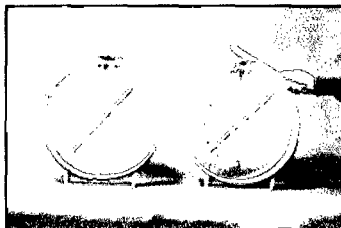
Se carga eléctricamente un electroscopio. Luego se pone en contacto utilizando distintos materiales con otro electroscopio, observándose como en algunas de estas situaciones se descarga y en otras no, pudiéndose discriminar entre materiales aislantes y conductores.

b) El cuerpo humano es conductor



Se carga eléctricamente un electroscopio. Luego una persona toca la parte superior de él y se observa como éste se descarga.

c) Carga eléctrica de dos electroscopios de manera simultánea

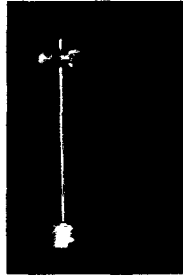


Se colocan dos electroscopios conectados por medio de una varilla conductora. Se observa que al cargar un electroscopio las láminas del otro también se separan por medio de la transferencia de carga a través de ellos.

LEY DE COULOMB

CARGAS DE IGUAL SIGNO SE REPELEN

a) Esferas suspendidas de un mismo punto cargadas con el mismo signo



Dos pequeñas esferas suspendidas de un mismo punto se cargan eléctricamente de igual signo. Se puede observar la separación entre ellas por efecto de la fuerza de repulsión.

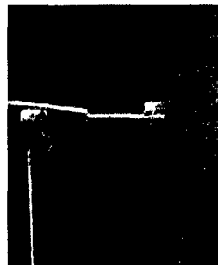
b) Esferas suspendidas independientes cargadas con el mismo signo



Dos pequeñas esferas suspendidas y las cuales se pueden ubicar a distintas distancias se cargan eléctricamente de igual signo. Se puede observar el aumento de la separación entre ellas por efecto de la fuerza de repulsión.

CARGAS DE DISTINTO SIGNO SE ATRAEN

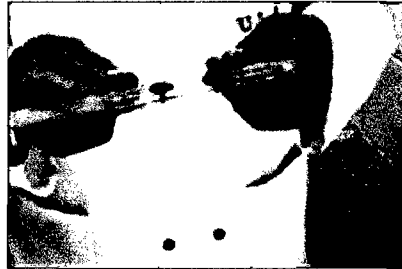
a) Esferas suspendidas independientes cargadas con signos contrarios



Dos pequeñas esferas suspendidas y las cuales se pueden ubicar a distintas distancia se cargan eléctricamente de distinto signo. Se puede observar la disminución de la separación entre ellas por efecto de la fuerza de atracción.

VARIACIÓN DE LA FUERZA DE ATRACCIÓN O REPULSIÓN CON LA DISTANCIA

a) Dos esferas cargadas

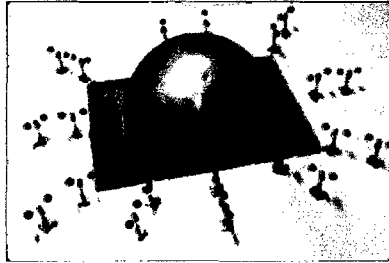


Dos pequeñas esferas suspendidas que se pueden ubicar a distintas distancias se cargan eléctricamente de igual o distinto signo. Se puede observar que al variar la separación entre ellas varía la fuerza interactuante.

CAMPO ELÉCTRICO

DIPOLOS EN UN CAMPO ELÉCTRICO

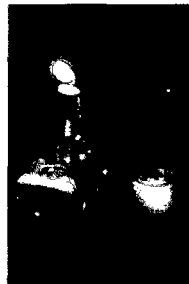
a) Orientación de dipolos en un campo eléctrico



Utilizando la esfera mayor del Generador de Van der Graff, se produce un campo eléctrico que es capaz de orientar pequeños dipolos, los cuales se alinean radialmente.

DENSIDAD DE CARGA ELÉCTRICA EN UN CONDUCTOR

a) Viento eléctrico



Un objeto puntiagudo es cargado eléctricamente por medio de un generador electrostático. Si este objeto está próximo a la llama de una vela encendida se puede observar que ésta se desvía.

b) Aspa giratoria



Un aspa de tres brazos ubicada sobre un soporte que le permite girar, se carga eléctricamente por medio de un generador electrostático. Se puede observar que el aspa gira en sentido contrario a la dirección de las puntas de cada brazo.

RELACION DE LOS CUADROS ,ESQUEMAS Y GRAFICOS EXPLICATIVOS DEL MODULO VISUALIZADOR DE CAMPOS ELECTRICOS	
Cuadro I	Relacion de Componentes del Equipo Visualizador de Campos Electricos y sus Accesorios
Esquema N°01	El tipo de Senal Electrica en cada etapa del Modulo en Funcion de la Tension y la Frecuencia
Esquema N°02	La Instalacion Electrica del Conexiado entre los diferentes Componentes y la señal en cada Paso.
Cuadro II	Relacion de los Tipos Electrodo Utilizados
Esquema N°03	Detalla la Forma Fisica de los Electrodo Utilizados , indicando las medidas de cada uno.
Esquema N°04	Detalla el tipo de material , perfil Utilizado,el medio que se sumergen a los Electrodo de las Pruebas.
Graficos N°1	Regulacion de la Tension de Prueba con el Variac.
Graficos N°2	Regulacion de la Tension de Prueba con el Voltmetro.
Graficos N°3	Prueba de los Electrodo Esfericos de Acero $\varnothing=1''$
Graficos N°4	Prueba de Laser con Electrodo de Bronce con Cara Paralela en Punta de una Longitud de 500mm y una seccion de 75x14mm
Graficos N° 5	Prueba de los Electrodo para la Rotura del Dielectrico Aire o Liquido (Aceite).

CUADRO I : RELACION DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO VISUALIZADOR DE CAMPOS ELECTRICOS Y SUS ACCESORIOS

N°	DESCRIPCION	Cantidad	Acrílico Cerrado en cm	Acrílico Abierto en cm	Datos	Terminales	
1.00	FUENTE DE ENERGIA ELECTRICA						
1.01	Red Normal del Concesionario "EDELNOR"	1			220V,1Ø,60Hz	Enchufe-5a-220V	
2.00	AUTOTRANSFORMADOR o VARIAC		c/Interruptor y Leed	En base de Madera	de 25x19x02cms	800W	
2.01	Powerstat Variable Autotransformer-Type:3PW2168-USA	1	IN -Entrada	OUT- Salida	50-60 Hz	0.98kVA	Potencia Salida
	The Superior Electric Co.Bristol.Conn.USA		240V	0-280V	1Ø-Monofasico	3.5A	Fuse de 4A
3.00	TRANSFORMADOR con a=0.22/15 kV		IN -Entrada	OUT- Salida	Model :	NT220B1530E	22X12X14cm
3.01	Transformador de Ignicion con base de madera20x32x1cm	1	220V,60Hz,2.1A	15000V,30mA	POWER FACTOR NORMAL	Atornillables	12cm,Ø=1/4
4.00	RECTIFICADOR			L=7 cm,Ø=1/4"	3EПe 84 03		
4.01	Rectificador Tipo Puente	1	22x22 x4	L=12 cm,Ø=1/4"	HS2S/1B→ - 68	4-Tipo TV	
5.00	CONDENSADOR DE PLACAS PARALELAS						
5.01	Condensador con Dielectrico Tipo Myler de 300µ	1	22x22 x4			2-Tipo TV-doble	
6.00	BANCO DE PRUEBAS						
6.10	VISUALIZADORA DE LINEAS DE FUERZA DEL CAMPO ELECTRICO						
6.11.a	Bandeja Acrilica	1		14x14x2			
6.11.b	Bandeja Acrilica	1		12.5x12.5x2			
6.12	Aceite Ricino de 30 ml	6			5 de 20 y 1 de 30 ml		
6.13	Semola en Frasco de 50 ml	1					
6.14	Colador Plastico Pequeño	1			2 1/2x1"		
6.15.a	Electrodo de Pruebas de Placas Paralelas	2	l=90mm,e=4mm	22x22	d1=18mm	2-Tipo TV-doble	d2=28mm
6.15.b	Electrodo de Pruebas de Esferas	1	Ø=20mm	22x22		Tipo TV-doble	
6.15.c	Electrodo de Pruebas de Placas y Esfera	1	l=90mm,e=4mm	22x22	d=20mm	Tipo TV-doble	Ø=20mm
6.16	Nivel de Mano	1			l=70mm		
6.20	VISUALIZADORA DE ROTURA DE DIELECTRICO EN AIRE CON ESFERAS DE ACERO						
6.21	Base Movable con Base de Madera y Estructura Plastica	1			de 20x20x10 cm		
6.22	Electrodos de Acero con base de Madera Ø =7/8"	2			de 11x6.5 cm		
6.23	Electrodos de Acero con base de Madera Ø =1"	2			de 11x6.5 cm		
6.24	Electrodos de Acero con base de Madera Ø =1 1/2"	2			de 11x6.5 cm		

6.30	VISUALIZADORA DE ROTURA DE DIELECTRICO EN AIRE CON PLACAS PARALELAS DE COBRE						
6.31	Base Movable con Base de Madera y Estructura Plastica	1			de 24x37x7 cm		
6.32	Electrodos de Cobre Placas Paralelas 3/8x2x6"	2			de 14x5x1 cm		
6.33	Electrodos de Cobre Placas Paralelas en Punta 3/8x2x6"	2			de 14x5x1 cm		
6.34	Electrodos de Cobre Placas Paralelas en Cuchilla 3/8x2x6"	2			de 14x5x1 cm		
6.40	VISUALIZADORA DE ROTURA DE DIELECTRICO EN LIQUIDOS COMO LA HIDROLINA CON ESFERAS DE ACERO						
6.41	Base Movable de Acrilico	1			de 40x20x40 cm		
6.42	Electrodos de Acero con base Metalica $\phi = 1-1/2"$	2					
6.43	Aceite tipo Hidrolina para Transmision Automotriz 200 ml	1					
6.50	VISUALIZADORA DE ROTURA DE DIELECTRICO EN AIRE CON ESFERAS DE ALUMINIO						
6.51	Base Movable con Base de Madera .	1			de 30x20x30 cm		
6.52	Electrodos de Aluminio Triangular $\phi = 4"$	2			con eje de 17 cm		
6.53	Electrodos de Aluminio Rayado $\phi = 4"$	2			con eje de 17 cm		
7.00	RESISTENCIA ATENUADORA		Extension de 25 cm	$l=48$ cm		con Banana y TV	
7.01	Resistencia atenuadora de 500 M Ω	3	Extension de 20 y 80 cm	$l=53$ cm	25 de 20M Ω -1/2W	con Bananas	
8.00	VOLTIMETRO						
8.01	Voltmetro Marca "Fluke" -87 V TRUE RMS MULTIMETER	1	Cat III 1000V	Cat IV 600V		Para Bananas	
9.00	ACCESORIOS						
9.01	Llave de Boca-Corona de 7/16"	1	Para Ajuste de Terminales de TV				
9.02	Cable Coaxial con Terminales TV de ,50 y 95 cms	2	Conexionado de los Equipos		Entre "R" y "C".		
9.03	Cable Coaxial con Terminal TV y banana de 40(2) y 90 cms	3	Conexionado de los Equipos		Para Voltmetro		
9.04	Cable Coaxial con Terminal TV y Terminal Redondo 40(2) cms	2	Conexionado de los Equipos		Para Transformador		
9.05	Cable Coaxial con Terminal TV y Terminal "U" de 100 cms	1	Conexionado de los Equipos		Banco de Pruebas		
9.06	Cable Coaxial con terminal TV y Cocodrilo de 100 cm	1	Conexionado de los Equipos		Banco de Pruebas		
9.07	Maletin Negro Marca "Trident"	1	Proteccion de los Equipos al guardarlo				
10.00	EQUIPOS DE APLICACION						
10.10	Pistola de Arco o inyectora de Corriente o Paralizadora.	1	1800k Voltage	JSJ-800TYPE	Direct current	UltraHigh	Voltage
10.20	Maquina Electrica para soldar	1					
10.30	Lampara de Bola emisora de Rayos	1					

ESQUEMA N° 01 DE LA ONDA DE TENSION ELECTRICA CON RESPECTO AL TIEMPO

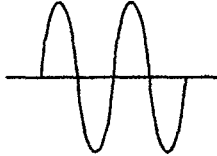
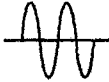
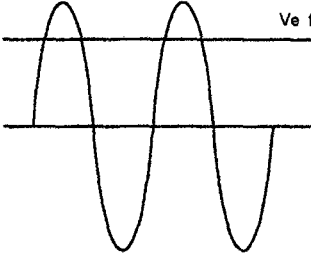
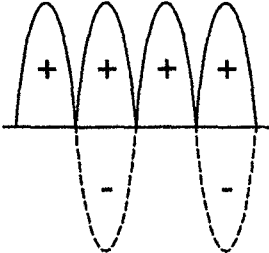
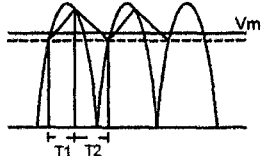
FASE	①	②	③	④	⑤
DISPOSITIVO	Red Electrica	Variac	Transformador	Rectificador	Condensador
ONDA ELECTRICA (Osciloscopio)					
TIPO DE ONDA	Entrada	Regulada	Amplificada	Rectifica	Filtrada
Tension en Voltios (V)	$V_{ef} = 220 \text{ VAC}$ BT	$V_{ef} = [0-220] \text{ VAC}$ BT	$V_{ef} = [0, 15] \text{ KVAC}$ MT	$V_m = [0, 15] \text{ KVDC}$ MT	$V_{mz} = [0, 15] \text{ KVDC}$ MT
Frecuencia en Hertz (Hz)	60	60	60		
Periodo de Onda (ms)	16.6	16.6	16.6	8.3	8.3

Figura 3.3

T1 = 3.3 carga
T2 = 5.0 Descarga
T = T1+T2 = 8.3ms

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA



TESIS:
"VISUALIZACION BIDIMENSIONAL Y SOLUCION MATEMATICADE CAMPOS ELECTRICOS PARA TENSIONES MAYORES A 5 000 VDC "

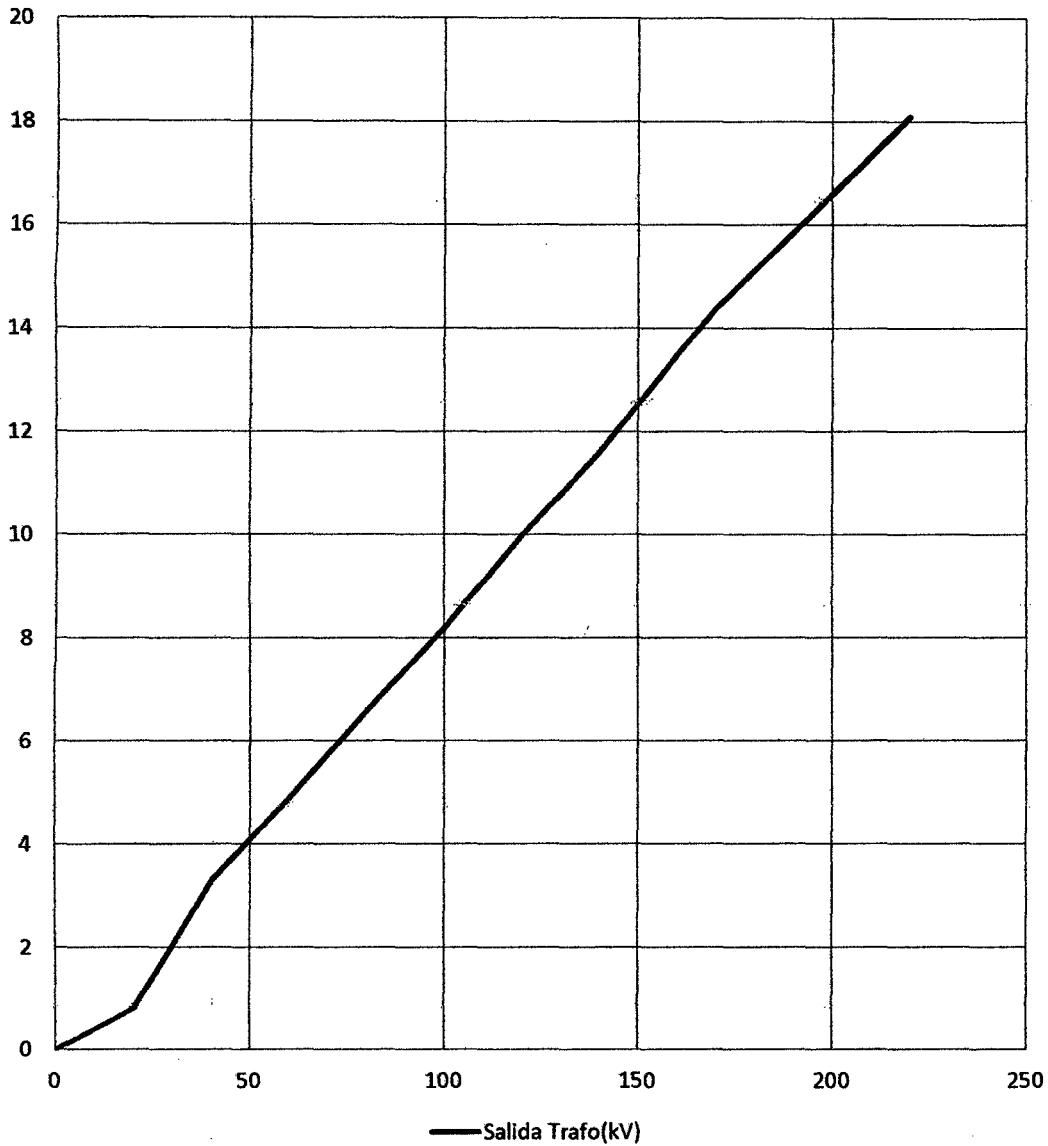
CUADRO DE LA ONDA DE TENSION ELECTRICA CON RESPECTO AL TIEMPO

ESQUEMA N°1		APROBADO: Ing. Oswaldo Morales Taquiri
DISEÑADO: CARLOS ALBERTO ALVARADO PANTOJA	REVISADO: Ing. Oswaldo Morales Taquiri	FECHA: OCTUBRE 2012
DIBUJADO: CARLOS ALBERTO ALVARADO PANTOJA	SIN ESCALA	HOJA: 01 DE 04

CUADRO II : RELACION DE LOS TIPOS DE ELECTRODOS UTILIZADOS

N°	DESCRIPCION	Cantidad	Acrílico Cerrado en cm	Acrílico Abierto en cm	Datos	Terminales
1.00	FUENTE DE ENERGIA ELECTRICA					
2.00	AUTOTRANSFORMADOR o VARIAC		c/Interruptor y Leed	En base de Madera	de 25x19x02cms	800W
3.00	TRANSFORMADOR con $a=0.22/15$ kV		IN -Entrada	OUT- Salida	Model :	NT220B1530E
4.00	RECTIFICADOR			L=7 cm, $\phi=1/4"$	3E1e 84 03	22X12X14cm
5.00	CONDENSADOR DE PLACAS PARALELAS					
6.00	BANCO DE PRUEBAS					
6.10	VISUALIZADORA DE LINEAS DE FUERZA DEL CAMPO ELECTRICO					
6.11.a	Bandeja Acrilica	1		14x14x2		
6.11.b	Bandeja Acrilica	1		12.5x12.5x2		
6.12	Aceite Ricino de 30 ml	6			5 de 20 y 1 de 30 ml	
6.13	Semola en Frasco de 50 ml	1				
6.14	Colador Plastico Pequeño	1			2 1/2x1"	
6.15.a	Electrodo de Pruebas de Placas Paralelas	2	l=90mm,e=4mm	22x22	d1=18mm	2-Tipo TV-doble
6.15.b	Electrodo de Pruebas de Esferas	1	$\phi=20$ mm	22x22		Tipo TV-doble
6.15.c	Electrodo de Pruebas de Placas y Esfera	1	l=90mm,e=4mm	22x22	d=20mm	Tipo TV-doble
6.16	Nivel de Mano	1			l=70mm	$\phi=20$ mm
6.20	VISUALIZADORA DE ROTURA DE DIELECTRICO EN AIRE CON ESFERAS DE ACERO					
6.21	Base Movable con Base de Madera y Estructura Plastica	1			de 20x20x10 cm	
6.22	Electrodos de Acero con base de Madera $\phi=7/8"$	2			de 11x6.5 cm	
6.23	Electrodos de Acero con base de Madera $\phi=1"$	2			de 11x6.5 cm	
6.24	Electrodos de Acero con base de Madera $\phi=1 1/2"$	2			de 11x6.5 cm	
6.30	VISUALIZADORA DE ROTURA DE DIELECTRICO EN AIRE CON PLACAS PARALELAS DE COBRE					
6.31	Base Movable con Base de Madera y Estructura Plastica	1			de 24x37x7 cm	
6.32	Electrodos de Cobre Placas Paralelas 3/8x2x6"	2			de 14x5x1 cm	
6.33	Electrodos de Cobre Placas Paralelas en Punta 3/8x2x6"	2			de 14x5x1 cm	
6.34	Electrodos de Cobre Placas Paralelas en CHaflan 3/8x2x6"	2			de 14x5x1 cm	
6.40	VISUALIZADORA DE ROTURA DE DIELECTRICO EN LIQUIDOS COMO LA HIDROLINA CON ESFERAS DE ACERO					
6.41	Base Movable de Acrilico	1			de15X10X10cm	Revisar Medicion
6.42	Electrodos de Acero con base Metalica $\phi=1-1/2"$	2				
6.43	Aceite tipo Hidrolina para Transmision Automotriz 200 ml	1				
6.50	VISUALIZADORA DE ROTURA DE DIELECTRICO EN AIRE CON ESFERAS DE ALUMINIO HUECA					
6.51	Base Movable con Base de Madera .	1			de30x20x30 cm	
6.52	Electrodos de Aluminio Triangular $\phi=4"$	2			con eje de 17cm	
6.53	Electrodos de Aluminio Rayado $\phi=4"$	2			con eje de 17cm	
7.00	RESISTENCIA ATENUADORA		Extension de 25 cm	l=48 cm		con Banana y TV
8.00	VOLTIMETRO					
9.00	ACCESORIOS					
10.00	EQUIPOS DE APLICACIÓN					

**Grafico N°1 : Regulacion de la Tension
de Prueba con el Variac**

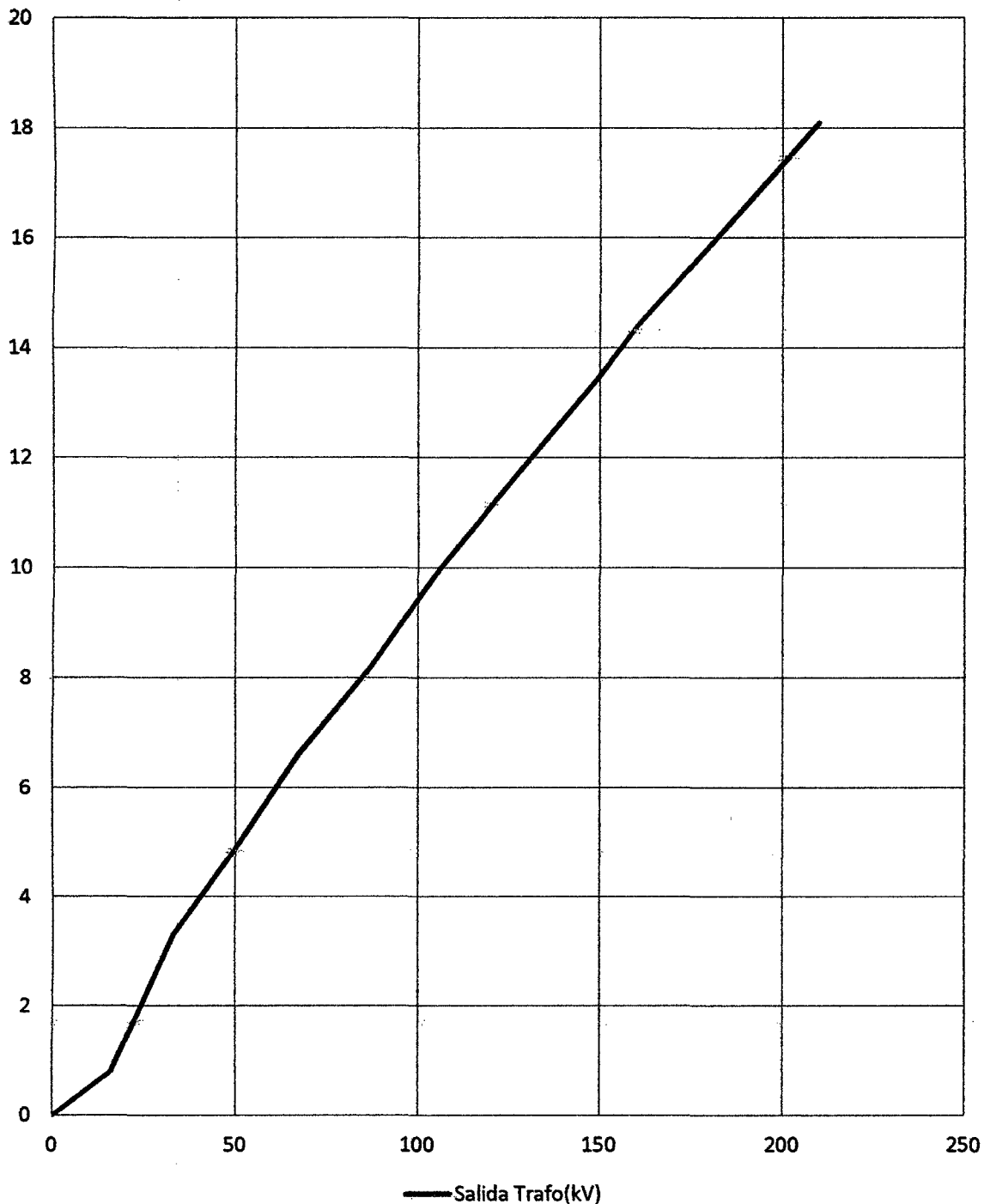


Variac (V)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	170	200	220
Salida Trafo(kV)	0	0.8	3.3	4.9	6.6	8.2	10	11.6	13.5	14.4	16.6	18.1

Nota: 1.-En la tension de 170V del Variac comienza a salir una Chispa del Condensador.
 2.-Se debe a que ya se esta saturando el transformador con una tension de 14,400V.
 3.-Se debera de probar los Electrodo a tensiones menores de 14,000VAC.

Grafico N°2

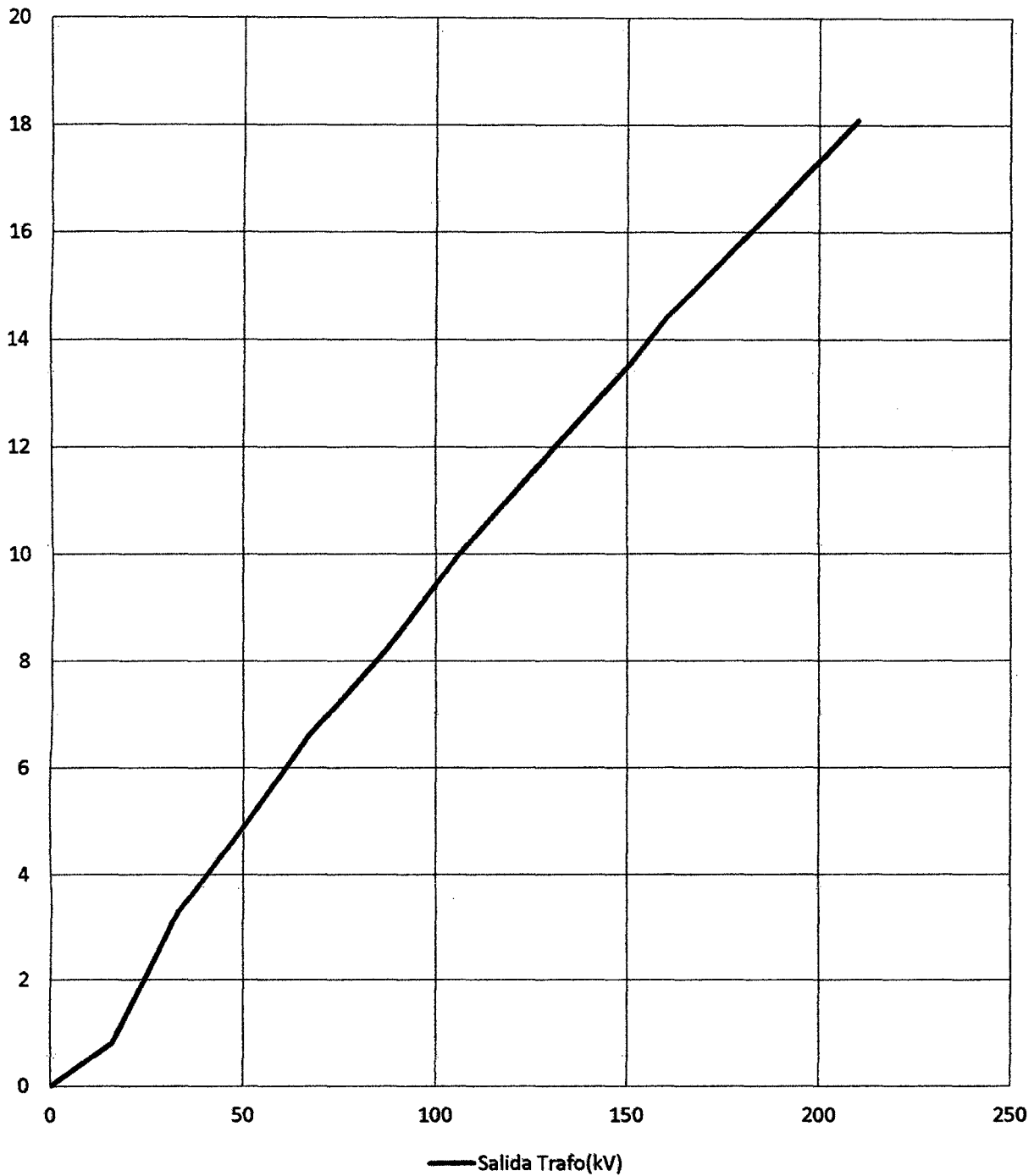
Regulacion de la Tension de Prueba con el Voltimetro



Voltimetro (V)	0	16	33	50	67	87	106	126	150	160	190	210
Salida Trafo(kV)	0	0.8	3.3	4.9	6.6	8.2	10	11.6	13.5	14.4	16.6	18.1

Nota: 1.-la Tension de Prueba se puede regular con el variac o con Voltimetro.
 2.-Ya que se ha demostrado que la tension regulada en los 2 casos son iguales.
 3.-El que define la tension de Prueba es el voltimetro en VDC en Serie con la Resistencia atenuadora.

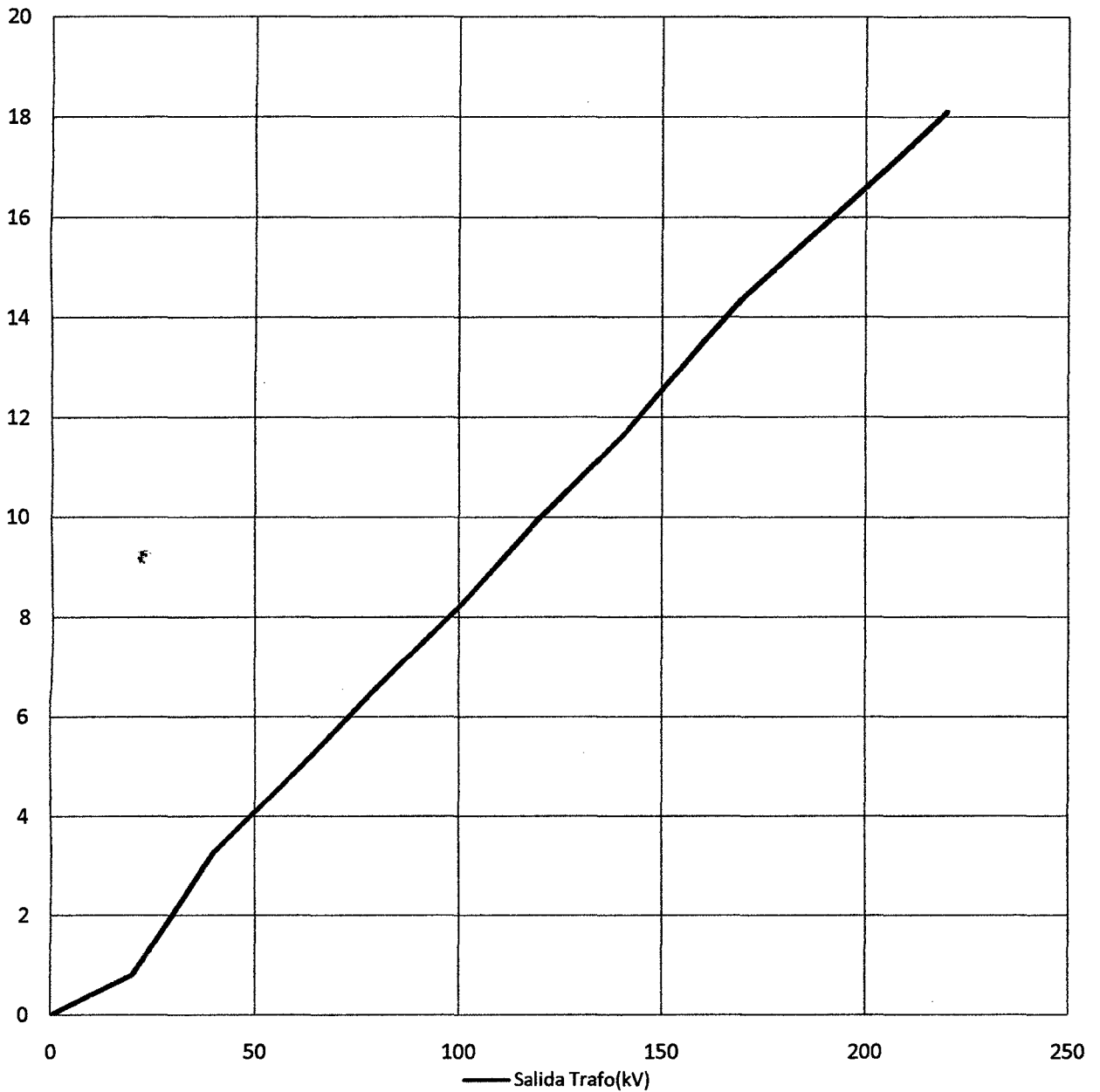
**Grafico N° 3 : Prueba de los Electrodo Esfericos
de Acero $\phi=1''$**



Punto Prueba	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Voltimetro (V)	0	16	33	50	67	87	106	126	150	160	190	210	220
Salida Trafo(kV)	0	0.8	3.3	4.9	6.6	8.2	10	11.6	13.5	14.4	16.6	18.1	

- Nota:**
- 1.-En el pto 6 a 10,000VAC se rompio el Dielectrico del Aire con una distancia de 4mm.
 - 2.-Se Aprecia un Arco Electrico entre eje de las Esferas,acompanado de un Ruido.
 - 3.-Al apreciar las fotos de la Experiencia Este Arco es un Elipse atravez del Eje.
 - 4.-El ruido Aumenta al aumentar la tension de Prueba ,es peligroso seguir Aumentando.

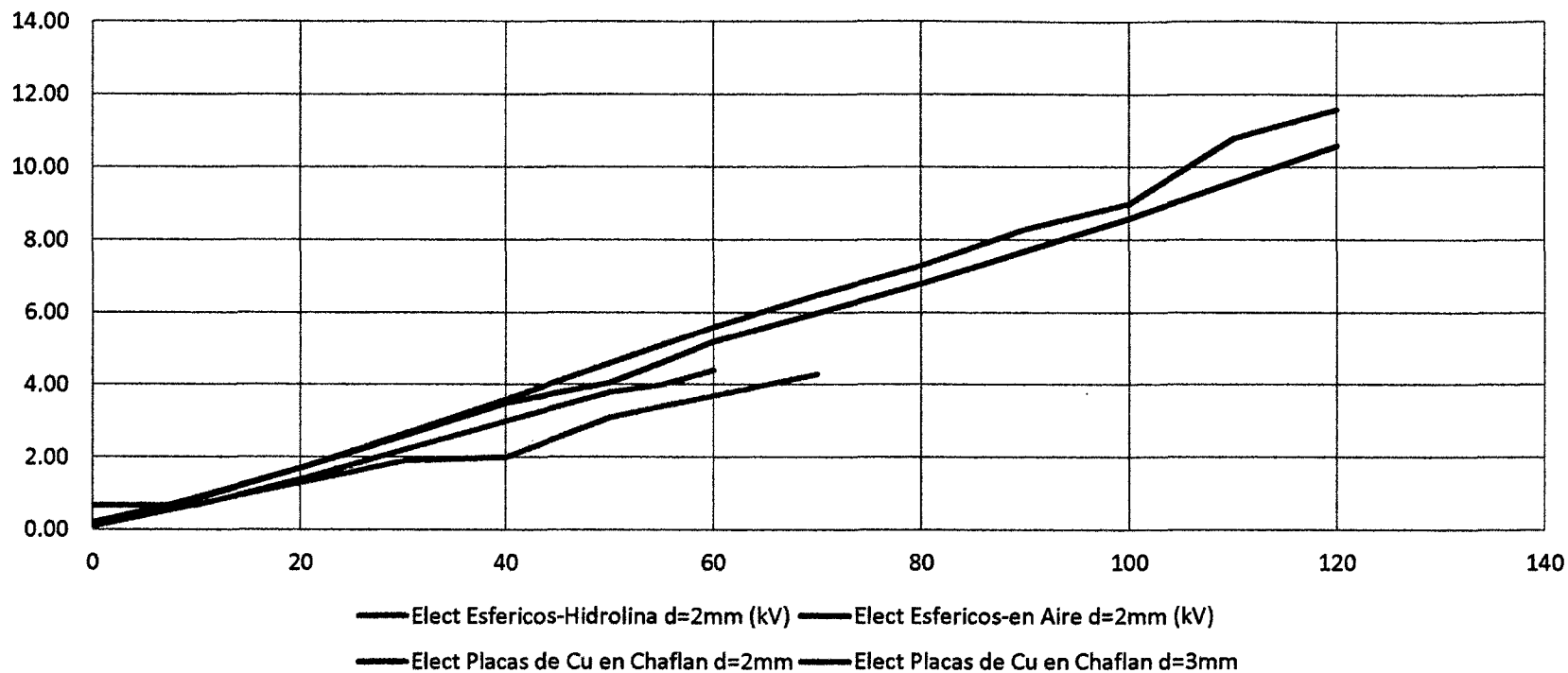
**Grafico N°4 : Prueba de Laser con electrodos de bronce
con cara Paralela en Punta de una longitud de 500mm y
una seccion de 75x14mm**



Punto Prueba	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variac (V)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	170	200	220	240
Salida Trafo(kV)	0	0.8	3.3	4.9	6.6	8.2	10	11.6	13.5	14.4	16.6	18.1	

- Nota:**
- 1.-La Placas de Bronce de $d=2.5\text{mm}$, pero en las puntas se desvio a 2.3 y 2.7mm de separacion.
 - 2.-La base de los Electrodo fueron Fijados a la mesa con un Miller como Aislante.
 - 3.-De 6,000 a 10,000 VAC se nota un Zumbido y no sale ningun Rayo de Luz.
 - 4.-De 10,000 a 14,000 VAC se nota un Doble Zumbido y se aprecia un Rayo de Luz.
 - 5.-Se aprecia que el Haz de luz Atravieza toda la seccion desde la parte angosta hacia arriba.

Grafico N°5 :Prueba de los Electodos para la Rotura del Dielectrico Aire o Liquido (Aceite)



CURVAS DE LOS ELECTRODOS AL PROBARSE LA ROTURA DE DIELECTRICO

Regulado con el VARIAC (V)	0	10	20	30	40	50	55	60	70	80	90	100	110	120
Elect Esfericos-Hidrolina d=2mm (kV)	0.10	0.90	1.70	2.65	3.60	4.60	5.10	5.60	6.50	7.30	8.30	9.00	10.80	11.60
Elect Esfericos-en Aire d=2mm (kV)	0.20	0.85	1.70	2.60	3.50	4.06	4.62	5.20	6.00	6.80	7.70	8.60	9.60	10.60
Elect Placas de Cu en Chaflan d=2mm (kV)	0.66	0.68	1.40	2.20	3.00	3.80	4.00	4.40						
Elect Placas de Cu en Chaflan d=3mm (kV)	0.09	0.70	1.30	1.90	2.00	3.10	3.40	3.70	4.30					