

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“DESARROLLO DE UNA MÁQUINA DE DESCARGAS
ELECTROSTÁTICAS PARA DETERMINAR LA
RESISTENCIA DE DETONADORES UTILIZADOS EN
MINERÍA”**

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON
MENCION EN ENERGÉTICA**

ELABORADO POR:

**OSWALDO MORLA MORALES TAQUIRI
SERAFÍN FILOMENO SOSA BARRERA**

ASESOR

DR. JAVIER FRANCO GONZÁLES

LIMA – PERU

2015

Dedicatoria

A mis padres Silvio y Lucila, a mi esposa Martha, a mis hijas Sofía y Claudia, a mi hermana Aurora, y a todos mis hermanos quienes siempre apostaron por mí para conseguir todos los proyectos planteados en mi vida.

Oswaldo Merla Morales Jaquiri

Dedicatoria

A Dios por ser todopoderoso, a la memoria de mis padres Aurelio y Leonor, y a todos mis hermanos quienes con sus consejos y ayuda supieron orientarme a ser un hombre de bien

Serafín Filomena Sosa Barrera

Agradecimientos

A Jesucristo y a la Virgen María, quienes siempre han estado velando para que mi ejercicio profesional sea con ética.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y la Facultad de Ciencias, lugares donde aprendí a desarrollar mi inquietud por la Investigación y Desarrollo con Maestros como el Ing. Federico Coz, el Dr. Anibal Valera y el Dr. Manfred Horn.

A mis colegas de la Universidad, en especial a Darío Vásquez que siempre estuvo levantando mi ego.

A mi familia que siempre estuvo al tanto de mis proyectos y avances.

Finalmente a mi asesor el MBA Javier Franco Gonzáles, por su paciencia para apoyarme en el desarrollo de esta Tesis de Investigación.

Oswaldo Morla Morales Jaquiri

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Ingeniería, a la Facultad de Ingeniería Mecánica, que me dio la oportunidad de poder acceder a esta maestría.

A nuestros Profesores que con su experiencia en el trabajo de la Ingeniería, supieron apoyarnos y aconsejarnos en esta rama del saber tan interesante y de mucho porvenir.

A los colegas, amigos y familiares que supieron darme esa fuerza y tenacidad para lograr estos objetivos.

A nuestro Asesor MBA Magister Javier Franco Gonzales, que siempre estuvo atento a nuestra solicitud.

Serafín Filomeno Sosa Barrera

RESUMEN

En la exploración y explotación mineras es imprescindible el uso de maquinaria, equipo y otros accesorios mineros, los cuales se ven afectados por la presencia de la energía electrostática la cual también afecta a las personas.

La energía electrostática ha sido siempre un problema grave para la industria de municiones y explosivos; en el proceso de fabricación, almacenaje y manipulación de los productos terminados utilizados en labores de obras civiles, militares y en la actividad minera. En todos ellos, el control de la electricidad estática tiene una importancia muy significativa.

En el Perú en los últimos años se viene exigiendo que los productos como explosivos y accesorios utilizados en estas labores cuenten con la certificación garantizada de funcionamiento y manipulación, principalmente en lo que concierne a la resistencia a la energía electrostática.

Al plantear dicho problema y bajo un estudio cuidadoso de las alternativas teóricas, prácticas y experimentales, hemos llegado a concebir una máquina de

descargas electrostáticas para determinar la resistencia de los detonadores utilizados en minería.

Para lograr este objetivo, primeramente hemos auscultado los problemas existentes en materia de riesgo tanto para las personas como para las máquinas y equipos, luego se ha recolectado material bibliográfico en bibliotecas en internet, siguiendo las pautas de un trabajo de investigación. Paralelamente se ha trabajado en los laboratorios de la Universidad Nacional de Ingeniería y en el laboratorio de Investigación y Desarrollo de la empresa FAMESA S.A.C., haciendo las distintas pruebas, después de haber buscado en el mercado local las diferentes partes que integran la citada máquina.

Todo este trabajo nos ha demandado una gran cantidad de tiempo para hacer realidad nuestro objetivo en forma teórica y experimental, se ha evaluado todos los componentes llegando a un alto nivel del comportamiento real de dicho fenómeno, al exponer los resultados de funcionamiento del equipo hemos llegado a una serie de conclusiones que ayudarán al proceso de evaluación de la resistencia a la electrostática de los diferentes tipos de detonadores y formas de manipulación.

Así mismo podemos mencionar que la búsqueda de material bibliográfico como trabajos similares, tesis, investigaciones no se han encontrado, del mismo modo conseguir los componentes que conforman la máquina no ha sido tarea fácil.

PALABRAS CLAVE: Equipo de descargas electrostáticas, Resistencia electrostática, detonadores.

ABSTRACT

In mining exploration and exploitation, the use of machinery, equipment and other accessories miners, which are affected by the presence of electrostatic energy which also affects people, is essential.

The electrostatic energy has always been a serious problem for the industry of munition and explosives; in the process of manufacture, storage and handling of finished products used in work of works civil, military and mining activity. In all, static control has very significant importance.

The Peru in recent years comes demanding that products such as explosives and accessories used in these tasks have the guaranteed certification of performance and handling, mainly with regard to resistance to electrostatic energy.

This problem and under a careful study of the theoretical, practical and experimental alternatives, have come to conceive an electrostatic machine to determine the resistance of the detonators used in mining.

To achieve this goal, we first examined the problems in terms of risk both for people and for machines and equipment, and then it has collected bibliographic material in libraries on the internet, following the guidelines of a research. At the same time is he has worked in the laboratories of the National University of engineering and in the laboratory for research and development of the company FAMESA S.A.C., doing various tests, after having sought the different parts that make up this machine in the local market.

All this work has demanded a great deal of time to fulfill our goal on theoretical and experimental way, all components have been evaluated reaching a high level of the actual behavior of the phenomenon, by exposing the results of operation of the equipment have arrived at a set of conclusions that will help the process of evaluation of the resistance of the different types of detonators and ways of handling electrostatic.

We can also mention that search of bibliographic material as similar works, theses, research not found, in the same way get the components that make up the machine has not been an easy task.

Key words: Electrostatic equipment, electrostatic resistance, detonators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vista de la Rampa 523.

Figura 2: Diseño de malla de perforación para la rampa 523.

Figura 3: Perforación con Jumbo Roket Boomer 282 de Rampa 523.

Figura 4: Taladro cargado.

Figura 5: Taladro cargado para voladura controlada.

Figura 6: Perforación de taladros largos con equipo Raptor.

Figura 1.1: Generador de Van der Graff.

Figura 1.2: Máquina de Wimshurst.

Figura 1.3: El Electrógrafo.

Figura 1.4: Disposición del prototipo de la máquina de descargas electrostáticas.

Figura 1.5: Puente de diodos de onda completa.

Figura 1.6: Atenuador de 1000 MΩ.

Figura 1.7: Pruebas intensivas de desempeño.

Figura 2.1: Las fuerzas fundamentales del universo.

Figura 2.2: La teoría de las cuerdas.

Figura 2.3: Vibración de las cuerdas.

Figura 2.4: Ecuación de las líneas de fuerza

Figura 2.5: Partícula moviéndose paralelamente al campo

- Figura 2.6:** Partícula moviéndose perpendicularmente al campo.
- Figura 2.7:** Campo eléctrico producido por un elemento dV de una distribución volumétrica uniforme de carga.
- Figura 2.8:** Campo eléctrico generado por una esfera maciza uniformemente cargada
- Figura 2.9:** Campo eléctrico producido por un elemento dS de una distribución superficial continua de carga.
- Figura 2.10:** Campo eléctrico generado por un plano Infinito de densidad de carga uniforme.
- Figura 2.11:** Campo eléctrico en el exterior de las placas.
- Figura 2.12:** Campo eléctrico generado por un disco cargado de grosor despreciable.
- Figura 2.13:** Campo eléctrico producido por un elemento dL de una distribución lineal uniforme de carga.
- Figura 2.14:** Campo eléctrico creado por un elemento dx de una línea infinita de carga.
- Figura 2.15:** Campo eléctrico creado por un elemento dx de una línea de carga de longitud l .
- Figura 2.16:** Campo eléctrico generado por dos hilos paralelos, infinitos y de densidad de carga uniforme.
- Figura 2.17:** Campo eléctrico generado por un anillo de densidad de carga uniforme sobre los puntos de su eje.
- Figura 2.18:** Campo eléctrico generado por una distribución discreta de cargas.
- Figura 2.19:** Campo eléctrico en los puntos de la bisectriz del eje del dipolo.
- Figura 2.20:** Puntos fuera de la línea de unión de las cargas.
- Figura 2.21:** Para otros puntos.
- Figura 2.22:** Campo generado por un cuadrupolo eléctrico lineal en su bisectriz.
- Figura 2.23:** Esquema de conexión de un autotransformador.

- Figura 2.24:** Representación esquemática del transformador.
- Figura 2.25:** Polarización directa de un diodo.
- Figura 2.26:** Polarización inversa de un diodo.
- Figura 2.27:** Curva característica del diodo.
- Figura 2.28:** Rectificador de onda completa con dos diodos.
- Figura 2.29:** Tensión de entrada positiva.
- Figura 2.30:** Tensión de entrada negativa.
- Figura 2.31:** Puente de Grätz o Puente Rectificador de doble onda.
- Figura 2.32:** Condensador ideal.
- Figura 2.33:** Circuitos equivalentes de un condensador en corriente alterna.
- Figura 3.1:** Esquema del equipo de descargas electrostáticas.
- Figura 3.2:** Diodo de selenio
- Figura 3.3:** Cuadruplicador para alto voltaje de 8 pasos
- Figura 3.4:** Divisor resistivo.
- Figura 3.5:** Detonadores de encendido eléctrico.
- Figura 3.6:** Cápsula de aluminio.
- Figura 3.7:** Elemento inflamador.
- Figura 3.8:** Detonador de encendido no eléctrico.
- Figura 3.9:** Estructura Interna del Detonador de Encendido No Eléctrico.
- Figura 3.10:** Tubo de choque.
- Figura 3.11:** Disposición del equipo de ensayo.
- Figura 4.1:** Configuración de manipulación A.
- Figura 4.2:** Configuración de manipulación B.
- Figura 4.3:** Configuración de manipulación C.

Figura 4.4: Configuración de manipulación D.

Figura 4.5: Configuración de manipulación A.

Figura 4.6: Configuración de manipulación B.

Figura 4.7: Configuración de manipulación C.

Figura 4.8: Configuración de manipulación D.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Cartera de proyectos mineros.

Tabla 2: Producción minero metálica, por principales productos.

Tabla 3: Víctimas en accidentes mortales.

Tabla 1.1: Indicadores y valores para ensayos electrostáticos.

Tabla 2.1: Valores de la constante dieléctrica relativa y de la resistencia dieléctrica.

Tabla 3.1: Condiciones de operación de los diodos de selenio.

Tabla 3.2: Potenciales electrostáticos generados por una persona.

Tabla 3.3: Capacidad de una persona estándar, de porte militar y de una máquina.

Tabla 3.4: Características técnicas del fulminante de retardo.

Tabla 3.5: Características técnicas de la manguera Fanel.

Tabla 4.1: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico sensible con condensador de 300pF.

Tabla 4.2: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico sensible con condensador de 500pF.

Tabla 4.3: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico insensible con condensador de 2500pF.

Tabla 4.4: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico altamente insensible con condensador de 2500pF.

Tabla 4.5: Plan de ensayos para detonadores iniciados mediante un tubo de conducción de onda de detonación con condensador de 2500pF.

Tabla 4.6: Metrado base.

Tabla 4.7: Presupuesto base.

Tabla 5.1: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico sensible con condensador de 300pF.

Tabla 5.2: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico sensible con condensador de 500pF.

Tabla 5.3: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico sensible con condensador de 500pF.

Tabla 5.4: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico insensible con condensador de 2500pF.

Tabla 5.5: Plan de ensayos para detonadores iniciados mediante un tubo de conducción de onda de detonación con condensador de 2500pF.

ÍNDICE

CARÁTULA	1
DEDICATORIAS.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABLAS.....	15
ÌNDICE.....	17
INTRODUCCIÓN.....	23
 CAPÍTULO 1	
DESCRIPCIÓN Y ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
1.1. ÁMBITO DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
1.2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	37
1.3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	53
1.3.1. Planteamiento de la realidad problemática.....	53
1.3.2. Formulación del problema.....	54
1.3.2.1. Problema general.....	54

1.3.2.2. Problemas específicos.....	54
1.4. OBJETIVOS.....	55
1.4.1. Objetivo general.....	55
1.4.2. Objetivos específicos.....	55
1.5. HIPÓTESIS.....	55
1.5.1. Hipótesis general.....	55
1.5.2. Hipótesis específicas.....	56
1.6. VARIABLES E INDICADORES.....	56
1.6.1. Variable independiente: X.....	56
1.6.2. Variable dependiente: Y.....	56
1.7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	57
1.7.1. Unidad de análisis.....	57
1.7.2. Tipo y nivel de investigación.....	59
1.7.3. Técnicas de recolección y procesamiento de datos.....	60
1.7.4. Período de análisis.....	60
1.8. IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN...60	
1.9. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	64
1.10. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	65
CAPÍTULO 2	
MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN.....	66
2.1. MARCO TEÓRICO.....	66
2.1.1. Las fuerzas fundamentales del universo.....	70
2.1.2. Conceptos básicos de la electrostática.....	74

2.1.2.1. Desarrollo histórico.....	75
2.1.2.2 Aislantes y conductores.....	77
2.1.3. Generadores electrostáticos.....	79
2.1.3.1. Carga inducida.....	80
2.1.3.2. Carga por fricción.....	81
2.1.4. Configuraciones típicas de campos electrostáticos.....	82
2.1.5. Principio de superposición.....	84
2.1.6. Representación gráfica del campo eléctrico.....	85
2.2. ANÁLISIS Y SOLUCIONES MATEMÁTICAS DE CAMPOS ELÉCTRICOS.....	91
2.3. MARCO CONCEPTUAL PARA EL DESARROLLO DE LA MÁQUINA ELECTROSTÁTICA.....	139
2.3.1. Autotransformador.....	139
2.3.2. Transformador de corriente alterna.....	141
2.3.3. Diodos.....	144
2.3.4. Condensador eléctrico.....	156
2.4. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS.....	170
2.4.1. Máquina.....	170
2.4.2. Descarga electrostática.....	171
2.4.3. Detonador.....	171
2.4.4. Detonador eléctrico.....	171
2.4.5. Detonador no eléctrico.....	171
2.4.6. Dieléctrico.....	172
2.4.7. Condensador eléctrico.....	172

2.4.8.	Carga eléctrica.....	172
2.4.9.	Máquina electrostática.....	172
2.4.10.	Máquina electrostática modelo humano.....	173
CAPÍTULO 3		
DESARROLLO DE LA MÁQUINA DE DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS.....		
		174
3.1.	CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO.....	174
3.1.1.	Características del autotransformador variable monofásico.....	175
3.1.2.	Características del transformador elevador monofásico.....	176
3.1.3.	Diodos.....	176
3.1.4.	Multiplicador de alto voltaje.....	177
3.1.5.	Condensadores planos.....	178
3.1.6.	Medidor de alto voltaje.....	181
3.1.6.1	Divisor de voltaje.....	181
3.1.6.2.	Divisor resistivo.....	182
3.2.	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS ACUMULADORES DE ENERGÍA ELECTROSTÁTICA.....	184
3.2.1.	Potenciales electrostáticos, en voltios, generados por una persona.....	185
3.2.2.	Capacidad en picofaradios de una persona estándar, de porte militar y de una máquina.....	185
3.3.	DETONADORES DE ENCENDIDO ELÉCTRICO.....	186
3.3.1.	Aplicación.....	186
3.3.2.	Descripción.....	187
3.3.3.	Recomendaciones generales de uso.....	188

3.3.4.	Características de los detonadores eléctricos importados.....	189
3.3.5.	Tipos de detonadores de encendido eléctrico.....	190
3.4.	DETONADORES DE ENCENDIDO NO ELÉCTRICO.....	190
3.4.1.	Carga explosiva.....	191
3.4.2.	Disco amortiguador.....	192
3.4.3.	Tren de retardo.....	192
3.4.4.	Amortiguador de retraso de encendido.....	192
3.4.5.	Sello antiestático.....	192
3.4.6.	Tubo de choque.....	193
3.4.7.	Características técnicas.....	193
3.4.7.1.	Del fulminante de retardo.....	193
3.4.7.2.	De la manguera FANEL.....	194
3.5.	DISPOSICIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYO.....	194

CAPÍTULO 4

	CONFIGURACIONES DE MANIPULACIÓN Y PLAN DE ENSAYOS DE DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE DETONADORES UTILIZADOS EN MINERÍA.....	196
4.1.	CONFIGURACIONES DE MANIPULACIÓN DE DETONADORES DE ENCENDIDO ELÉCTRICO.....	196
4.2.	PLAN DE ENSAYOS DE DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DETONADORES DE ENCENDIDO ELÉCTRICO.....	199
4.2.1.	Detonadores de encendido eléctrico sensible.....	199
4.2.2.	Detonadores de encendido eléctrico insensible.....	200
4.2.3.	Detonadores de encendido eléctrico altamente insensible.....	200

4.3. CONFIGURACIONES DE MANIPULACIÓN DE DETONADORES INICIADOS MEDIANTE UN TUBO DE CONDUCCIÓN DE ONDA DE DETONACIÓN.....	201
4.4. PLAN DE ENSAYOS DE DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DETONADORES INICIADOS MEDIANTE UN TUBO DE CONDUCCIÓN DE ONDA DE DETONACIÓN.....	204
4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	205
4.5.1. Análisis costo beneficio.....	205
4.5.1.1. Metrado base.....	205
4.5.1.2. Presupuesto base.....	207
CAPÍTULO 5	
ANALISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACION DE HIPÓTESIS.....	210
5.1. ANALISIS DE RESULTADOS.....	210
5.1.1. Referido al nivel de voltaje del equipo de descargas electrostáticas para la determinación de la resistencia de detonadores utilizados en minería.....	210
5.1.2. Referido a la capacidad de los condensadores del equipo de descargas electrostáticas para determinación de la resistencia de detonadores utilizados en minería.....	210
5.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....	211
CONCLUSIONES.....	213
RECOMENDACIONES.....	215
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	217
BIBLIOGRAFIA.....	218
ANEXOS.....	220

INTRODUCCIÓN

En el Perú, según el Ministerio de Energía y Minas¹, la cartera estimada de inversión en minería se encuentra compuesta por 51 proyectos importantes. Incluye proyectos de ampliación de unidades mineras, en etapa de exploración avanzada, así como con estudio ambiental aprobado o en proceso de evaluación y que en conjunto ascienden a US\$ 63,928 millones.

Algunos de los 51 proyectos mencionados no han definido su fecha de inicio de operación ni su fecha de construcción dado que aún se encuentran en etapa de estudios y permisos.

La Cartera de los Proyectos Mineros se presenta en la tabla 1.

¹ Ministerio de Energía y Minas (Febrero 2015). *Dirección de Promoción Minera de la Dirección General de Minería del. Boletín estadístico del subsector minero.*

EMPRESA	PROYECTO	REGION/PROVINCIA/DISTRITO	MINERAL	INVERSIÓN US\$ MM
AMPLIACIONES				
SPCC	Toquepala	TACNA, JORGE BASADRE, ILABAYA	Cu	1,200
COMPAÑIA MINERA MISKI MAYO S.R.L.	Bayóvar	PIURA, SECHURA, SECHURA	Fosfatos	520
SHOUGANG HIERRO PERU S.A.A.	Marcona	ICA, NAZCA, MARCONA	Fe	1,500
SOCIEDAD MINERA CERRO VERDE S.A.A.	Cerro Verde	AREQUIPA, AREQUIPA, YARABAMBA	Cu	4,600
MINERA CHINALCO PERÚ S.A.	Toromocho	JUNIN, YAULI, MOROCOCHA	Cu	1,320
COMPAÑIA MINERA MILPO S.A.A.	Cerro Lindo	ICA, CHINCHA, CHAVIN	Polimetálico	40
CIA DE MINAS BUENAVENTURA S.A.A.	Uchucchacua	LIMA, OYON, OYON	Polimetálico	100
CON E.I.A. APROBADO / CONSTRUCCIÓN				
ANGLO AMERICAN QUELLAVECO S.A.	Quellaveco	MOQUEGUA, MARISCAL NIETO, TORATA	Cu	3,300
INVICTA MINING CORP S.A.C.	Invicta	LIMA, HUAURA, LEONCIO PRADO	Polimetálico	93
MINERA YANACOCCHA S.R.L.	Minas Conga	CAJAMARCA, CAJAMARCA, BAÑOS DEL INCA	Cu, Au	4,800
HUDBAY PERU S.A.C.	Constancia**	CUSCO, CHUMBIVILCAS, CHAMACA Y LIVITACA	Cu	1,800
LAS BAMBAS MINING COMPANY S.A.	Las Bambas *	APURIMAC, COTABAMBAS, CHALHUAHUACHO	Cu	10,000
COMPAÑIA MINERA ARES S.A.C.	Inmaculada	AYACUCHO, PARINACOCCHAS	Au - Ag	427
RELIANT VENTURES S.A.C.	San Luis	ANCASH, YUNGAY, SHUPLUY	Au y Ag	En evaluación
COMPAÑIA MINERA ARES S.A.C.	Crespo	CUSCO, CHUMBIVILCAS, SANTO TOMAS	Au - Ag	110
MINERA SHOUXIN PERU S.A.	Explotación de relaves	ICA, NAZCA, MARCONA	Cu, Fe, Zn	239
SHAHUINDO S.A.C.	Shahuindo	CAJAMARCA, CAJAMARCA, CACHACHI	Au	132
BEAR CREEK MINING COMPANY	Corani	PUNO, CARABAYA, CORANI	Ag	600
COMPAÑIA MINERA KURI KULLU S.A.	Ollachea	PUNO, CARABAYA, OLLACHEA	Au	170
FOSFATOS DEL PACIFICO S.A.	Proyecto Fosfatos	PIURA, SECHURA, SECHURA	Fosfatos	500
ANABI S.A.C.	Anama	APURIMAC, ANTABAMBA, HUAQUIRCA	Au	40
SPCC	Tia María	AREQUIPA, ISLAY, COCACHACRA	Cu	1,400
CIA DE MINAS BUENAVENTURA S.A.A.	Tambomayo	AREQUIPA, CAYLLOMA, TAPAY	Au, Ag	256
JINZHAO MINING PERU S.A.	Pampa de Pongo	AREQUIPA, CARAVELI, BELLA UNION	Fe	1,500
COMPAÑIA MINERA MILPO S.A.A.	Pukaqaqa	HUANCAVELICA, HUANCAVELICA, HUANDO	Cu-Mo	630
CON EIA PRESENTADO				
BEAR CREEK MINING COMPANY	Santa Ana	PUNO, CHUCUITO, HUACULLANI	Ag	71
EN EXPLORACIÓN				
MARCOBRE S.A.C.	Marcobre (Mina Justa)	ICA, NAZCA, SAN JUAN DE MARCONA	Cu	744
ANGLO AMERICAN MICHQUILLAY S.A.	Michiquillay	CAJAMARCA, CAJAMARCA, LA ENCAÑADA	Cu	700
APURIMAC FERRUM S.A.C.	Hierro Apurímac	APURIMAC, ANDAHUAYLAS, ANDAHUAYLAS	Fe	2,300
CAÑARIACO COPPER PERU	Cañariaco	LAMBAYEQUE, FERREÑAFE, CAÑARIS	Cu	1,599

S.A.				
CANTERAS DEL HALLAZGO S.A.C.	San Gabriel (Ex-Chucapaca)	MOQUEGUA, GRAL.SANCHEZ CERRO, ICHUÑA	Au	700
COMPAÑIA MINERA MILPO S.A.A.	Hilarión	ANCASH, BOLOGNESI, HUALLANCA	Zn	470
COMPAÑIA MINERA QUECHUA S.A.	Quechua	CUSCO, ESPINAR, ESPINAR	Cu	490
JUNEFIELD GROUP S.A.	Don Javier	AREQUIPA, AREQUIPA, YARABAMBA	Cu	600
LUMINA COPPER S.A.C.	Galeno	CAJAMARCA, CELENDIN, CELENDIN	Cu, Mo, Au, Ag	2,500
MINERA ANTARES PERU SAC	Haqira	APURIMAC, COTABAMBAS, CHALHUAHUACHO	Cu-Mo	2,800
MINERA HAMPTON PERU S.A.C	Los Calatos	MOQUEGUA, MARISCAL NIETO, MOQUEGUA	Cu-Mo	1,320
MINERA CUERVO S.A.C.	Cerro Ccopane	CUSCO, PARURO, OMACHA	Fe	En evaluación
COMPAÑIA MINERA MILPO S.A.A.	Magistral	ANCASH, PALLASCA, CONCHUCOS	Cu	750
RIO BLANCO COPPER S.A.	Río Blanco	PIURA, HUANCABAMBA, CARMEN DE LA FRONTERA	Cu	1,500
RIO TINTO MINERA PERU LIMITADA SAC	La Granja	CAJAMARCA, CHOTA, QUEROCOTO	Cu	1000
SPPC	Los Chancas	APURIMAC, AYMARAES, POCOHUANCA	Cu	1,560
AMERICAS POTASH PERU S.A.	Salmueras de Sechura	PIURA, SECHURA, SECHURA	Potasio	125
COMPAÑIA MINERA VICHAYCOCHA S.A.C.	Rondoni	HUANUCO, AMBO, CAYMA	Cu	350
MINERA AQM COPPER PERU S.A.C.	Zafranal	AREQUIPA, CASTILLA, HUANCARQUI	Cu, Au	1,122
EXPLORACIONES COLLASUYO S.A.C.	Accha	CUSCO, PARURO, ACCHA	Zn, Pb	346
MANTARO PERU S.A.C.	Fosfatos Mantaro	JUNIN, CONCEPCION, ACO	Fosfatos	850
CORPORACION MINERA CENTAURO S.A.C	Quicay II	PASCO, PASCO, SIMON BOLIVAR	Au, Cu	En evaluación
ANABI S.A.C.	Anubia	APURIMAC, ABANCAY, CURAHUASI	Cu	90
MINSUR S.A.	Exploración de relaves Bofedal II	PUNO, MELGAR, ANTAUTA	Sn	165

Tabla 1: Cartera de proyectos mineros.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (Febrero 2015). *Dirección de Promoción Minera de la Dirección General de Minería del. Boletín estadístico del subsector minero.*

(*) Empresa anunció incremento del monto de inversión a US\$ 10,000 según los nuevos cálculos de MMG Limited, subsidiaria de China Minmetals.

(**) Permanece en cartera hasta que inicie producción comercial.

La Producción Minero Metálica de principales productos se presenta en la tabla 2.

Año	Cobre	Oro	Zinc	Plata	Plomo	Hierro	Estaño
	TMF	OzF	TMF	OzF	TMF	TMF	TMF
2006	1,048,472	6,521,008	1,203,364	111,584,354	313,332	4,861,155	38,470
2007	1,190,274	5,473,211	1,444,361	112,574,629	329,165	5,185,254	39,019
2008	1,267,867	5,782,971	1,602,597	118,505,446	345,109	5,243,278	39,037
2009	1,276,249	5,915,567	1,512,931	126,118,004	302,459	4,418,768	37,503
2010	1,247,184	5,275,436	1,470,450	117,043,680	261,990	6,042,644	33,848
2011	1,235,345	5,343,028	1,256,383	109,918,977	230,199	7,010,938	28,882
2012	1,298,761	5,193,782	1,281,282	111,912,163	249,236	6,684,539	26,105
2013	1,375,641	5,023,793	1,351,273	118,130,954	266,472	6,680,659	23,668
2014	1,379,626	4,499,817	1,318,660	121,459,361	278,487	7,192,592	23,105
2015*	211,606	741,760	226,539	19,437,997	49,612	1,392,300	2,910
Ene	111,888	368,885	113,439	9,895,540	25,421	733,008	1,286
Feb	99,718	372,875	113,100	9,542,457	24,191	659,292	1,625

Tabla 2: Producción minero metálica, por principales productos.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (Febrero 2015). *Dirección de Promoción Minera de la Dirección General de Minería del. Boletín estadístico del subsector minero.*

Donde los metales asociados a precios internacionales son denominados Commodities, que corresponden a materias primas sometidas a pequeñas transformaciones y que tienen la característica de representar un producto muy homogéneo. Es decir, su calidad no debería variar respecto a otros que se obtengan en diferentes lugares del mundo y, por ello sus precios tampoco deberían ser diferentes.

Estos Precios Internacionales o Commodities presentan las siguientes características para los diferentes productos mineros:

- Caso de Cobre

Se expresa en Centavos de Dólar por Libra (C/Lb) y corresponde a un Cátodo de calidad de 99.999% de Cu.

- Caso Oro

Se expresa en Dólar por Onza Troy (US\$/Oz) y corresponde a oro de alta pureza 99,99%. Es decir 24 kilates.

- Caso Plata

Se expresa en Dólar por Onza Troy (US\$/Oz) y corresponde a plata de alta pureza de 99.9999% de Ag

Durante el proceso de la actividad minera se presentan accidentes muchas veces de tipo mortal éstos deben ser reportados al Ministerio de Energía y Minas tal como se presenta en la tabla 3.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2000	6	4	2	3	3	6	8	-	-	7	8	7	54
2001	2	9	5	5	8	3	8	8	4	5	4	5	66
2002	20	2	4	6	5	5	4	6	4	8	8	1	73
2003	4	8	5	7	5	3	4	5	3	3	4	3	54
2004	2	9	8	5	2	9	1	3	4	7	5	1	56
2005	3	8	6	6	6	3	5	3	7	5	8	9	69
2006	6	7	6	3	6	5	6	5	4	9	4	4	65
2007	5	6	7	3	7	6	4	6	5	6	5	2	62
2008	12	5	7	6	3	5	6	6	5	3	3	3	64
2009	4	14	6	2	3	8	6	4	2	1	4	2	56
2010	5	13	1	6	5	9	6	4	3	4	4	6	66
2011	4	8	2	5	6	5	4	5	4	5	1	3	52
2012	2	6	8	2	4	2	5	5	3	8	4	4	53
2013	4	6	5	6	1	4	4	4	5	2	4	2	47
2014	6	1	1	1	1	3	7	2	2	0	1	7	32
2015	5	2	1										8

Tabla 3: Víctimas en accidentes mortales.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (Febrero 2015). *Dirección de Promoción Minera de la Dirección General de Minería del. Boletín estadístico del subsector minero.*

Ojeda R. (2003)², en su tesis de investigación “Diseño de mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia” expuesta en IV CONEINGEMMET – Huancayo 2003, describe los procesos de exploración y explotación de minerales en socavones en los cuales se hace uso de material y accesorios de voladura. En las figuras se muestra el proceso de preparación para un proceso de voladura. Asimismo se muestra el equipamiento utilizado.



Figura 1: Vista de la Rampa 523.

Fuente: Ojeda Mestas René Wilfredo (2003), *Diseño de mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia*, IV CONEINGEMMET – Huancayo – Perú.

² Ojeda Mestas René Wilfredo (2003), *Diseño de mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia*, IV CONEINGEMMET – Huancayo – Perú.

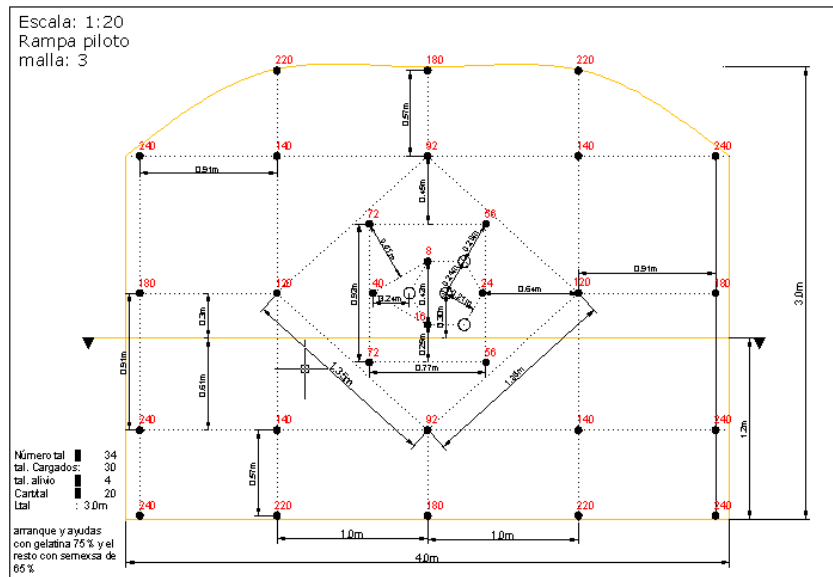


Figura 2: Diseño de malla de perforación para la rampa 523.

Fuente: Ojeda Mestas René Wilfredo (2003), *Diseño de mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia*, IV CONEINGEMMET – Huancayo – Perú.



Figura 3: Perforación con Jumbo Rokat Boomer 282 de Rampa 523.

Fuente: Ojeda Mestas René Wilfredo (2003), *Diseño de mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia*, IV CONEINGEMMET – Huancayo – Perú.

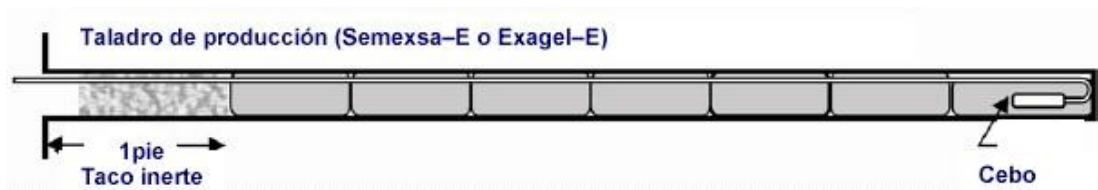


Figura 4: Taladro cargado.

Fuente: Ojeda Mestas René Wilfredo (2003), *Diseño de mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia*, IV CONEINGEMMET – Huancayo – Perú.

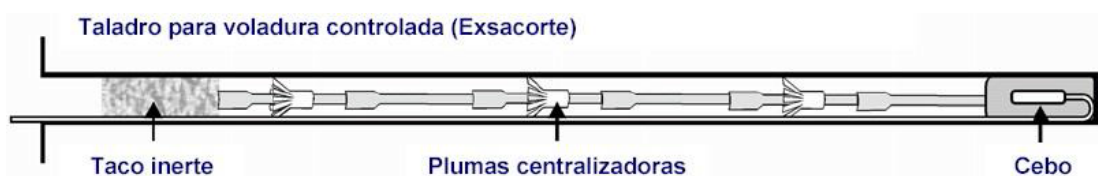


Figura 5: Taladro cargado para voladura controlada.

Fuente: Ojeda Mestas René Wilfredo (2003), *Diseño de mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia*, IV CONEINGEMMET – Huancayo – Perú.



Figura 6: Perforación de taladros largos con equipo Raptor.

Fuente: Ojeda Mestas René Wilfredo (2003), *Diseño de mallas de perforación y voladura subterránea aplicando un modelo matemático de áreas de influencia*, IV CONEINGEMMET – Huancayo – Perú.

En todo este proceso los accesorios utilizados se ven afectados por la presencia de la electricidad estática.

La electricidad estática representa un desequilibrio temporal en la repartición de las cargas eléctricas en la superficie de dos materiales en contacto por transferencia de electrones, creando un campo eléctrico y una diferencia de potencial entre éstos que puede ser muy elevada.

La magnitud de la carga depende, principalmente, de la velocidad de separación y/o fricción de los materiales y de su resistividad eléctrica. Cuando dos cuerpos conductores están separados por un aislante o incluso por el aire constituyen un condensador al quedar cargado uno de los polos con una carga positiva y el otro con carga igual pero negativa.

Al establecer una vía conductora se libera tal energía almacenada descargándose sobre el detonador.

Para nuestro caso, la magnitud de la energía cargada en el condensador (humano o máquina) y liberada en el detonador determinará la peligrosidad de explosión de éste.

Para que se produzca la explosión del detonador, deberá cumplirse conjuntamente las tres condiciones siguientes:

- La existencia de una configuración del detonador susceptible de explosión por encontrarse dentro del rango de iniciación.
- La acumulación de una carga electrostática lo suficientemente alta para crear una diferencia de potencial generadora de iniciación del detonador.
- La producción de la descarga electrostática iniciadora, de energía suficiente para iniciar el detonador.

Según el DOD-HDBK-263 (2 Mayo 1980)³, en condiciones especiales una persona puede alcanzar un potencial del orden de los 35000V.

Para condiciones de ensayo con el modelo del cuerpo humano la capacidad de una persona estándar actuando como condensador eléctrico es del orden de 300pF y una persona de porte militar de 500pF. En la labor minera, una máquina en el momento de perforación puede alcanzar un potencial de 40000V y formar la configuración de un condensador de 2500pF.

Ante la necesidad de querer determinar la resistencia de los detonadores de encendido eléctrico y no eléctrico utilizados en minería, hemos desarrollado una máquina de descargas electrostáticas que garantice los límites de seguridad a las

³ DOD-HDBK-263 (2 May 1980). Department of Defense – Handbook-263.

personas que manipulen estos artefactos así como a las máquinas que vienen desempeñando diferentes funciones dentro del campo de trabajo minero.

La determinación de la resistencia en las diferentes configuraciones de manipulación de los detonadores, servirán como estándares para el control de calidad en el proceso de fabricación y en la evaluación de productos importados.

Ante esta necesidad nos hemos propuesto realizar este trabajo de investigación consistente en desarrollar una máquina de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería, probando su eficacia de funcionamiento en las configuraciones de manipulación más críticas de los detonadores. El presente trabajo siguió la vertiente de la física experimental; en primer lugar, se desarrolló un profundo estudio de los fenómenos físicos a analizar y en segundo lugar se desarrollaron una serie de procesos físicos experimentales.

El desarrollo de la presente Tesis será efectuada de la siguiente manera:

En el Capítulo 1, se describe el ámbito del desarrollo de la investigación, se presenta los antecedentes bibliográficos, se realiza el planteamiento y formulación del problema, se trazan los objetivos, se plantea la hipótesis, las variables e indicadores, asimismo se plantea la metodología de la investigación, su importancia, justificación, sus alcances y sus limitaciones.

En el Capítulo 2, se plantea el marco teórico y conceptual de la investigación, en la que describen las fuerzas fundamentales del universo, los conceptos básicos de la electrostática, de los generadores electrostáticos, de los fenómenos electrostáticos, el principio de conservación y cuantificación de la carga, las configuraciones típicas de campos electrostáticos, el principio de superposición, la representación gráfica del campo eléctrico y el análisis y soluciones matemáticas. También se da el marco conceptual de los componentes eléctricos para el desarrollo de la máquina electrostática.

En el Capítulo 3, se dan las pautas para el desarrollo del equipo de descargas electrostáticas, se muestra sus configuraciones. También se presentan las características principales de los acumuladores de energía electrostática, de los detonadores de encendido eléctrico y no eléctrico y finalmente se presenta la disposición de la máquina y complementos para el ensayo.

En el Capítulo 4, se plantean las configuraciones de manipulación y el plan de ensayos de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de detonadores de encendido eléctrico y detonadores iniciados mediante un tubo de conducción de onda de detonación, utilizados en minería y se muestran los resultados de funcionamiento de la máquina de descargas electrostáticas. En este capítulo se incluye el análisis económico.

En el Capítulo 5, se hace un análisis de resultados y contrastación de hipótesis.

Asimismo se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Finalmente se indica la literatura utilizada como base para la redacción de la presente Tesis, así como los anexos correspondientes.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN Y ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. ÁMBITO DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo se desarrolló en la ciudad de Lima Perú entre los años 2010 al 2015; en diferentes ambientes como son el Laboratorio de Energías no Convencionales, a cargo del Dr. Aníbal Valera Palacios de la Facultad de Ciencias, en el Laboratorio de Electricidad de la Facultad de Ingeniería Mecánica, ambos ubicados en los ambientes de la Universidad Nacional de Ingeniería; así como en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de la Empresa de Explosivos FAMESA S.A.C. Como limitantes de este trabajo de investigación que hemos tenido es la poca existencia de literatura relativa al tema y casi nula la existencia de Tesis relativas al tema. Por las características propias de este trabajo de investigación consideramos que es del tipo exploratorio.

1.2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

En la búsqueda a través de internet no se ha encontrado trabajos similares con referencia al desarrollo de una máquina de descargas electrostáticas para certificar la resistencia de detonadores utilizados en minería. Pero si se ha encontrado material bibliográfico sobre la teoría del electromagnetismo, las características y comportamiento de los componentes que conforman la máquina, sobre el producto a evaluar y normas sobre descargas electrostáticas sobre diferentes productos.

Las principales fuentes bibliográficas encontradas son:

EUSEBIO (1746)⁴ trata de la teoría del electromagnetismo y se ocupa también de la electrostática que es la rama de la física que estudia los efectos mutuos que se producen entre los cuerpos como consecuencia de su carga eléctrica, es decir, el estudio de las cargas eléctricas en reposo, sabiendo que las cargas puntuales son cuerpos cargados cuyas dimensiones son despreciables frente a otras dimensiones del problema.

Históricamente, la electrostática fue la rama del electromagnetismo que primero se desarrolló con la postulación de la Ley de Coulomb que 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

⁴ **Eusebio Sguario** (1746), Dell'elettricismo, o sia delle forze elettriche de' corpi svelate dalla fisica sperimentale, Venecia. Italia. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Electrostatica>.

explicación, permitiendo 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.

http://es.wikipedia.org/wiki/Generador_de_Van_der_Graaff⁵, trata de la máquina electrostática creada por Van der Graaff que consiste en una cinta transportadora de material aislante motorizada, que transporta carga a un terminal hueco. La carga es depositada en la esfera por inducción en la cinta, ya que la varilla metálica o peine, está 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, esto hace que las partículas o moléculas de energía que se encuentran dentro de la esfera al hacer contacto con otro cuerpo similar (que produzca energía) absorba a aquella produciendo electricidad estática en el cuero capilar.

Este tipo de generador eléctrico fue desarrollado inicialmente por el físico Robert J. Van der Graff en el MIT⁶ 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 der Graff

⁵ http://es.wikipedia.org/wiki/Generador_de_Van_der_Graff

⁶ <http://web.mit.edu/>. The mission of MIT is to advance knowledge and educate students in science, technology and other areas of scholarship that will best serve the nation and the ...

había producido un generador capaz de alcanzar diferencias de potencial de 1 megavoltio.

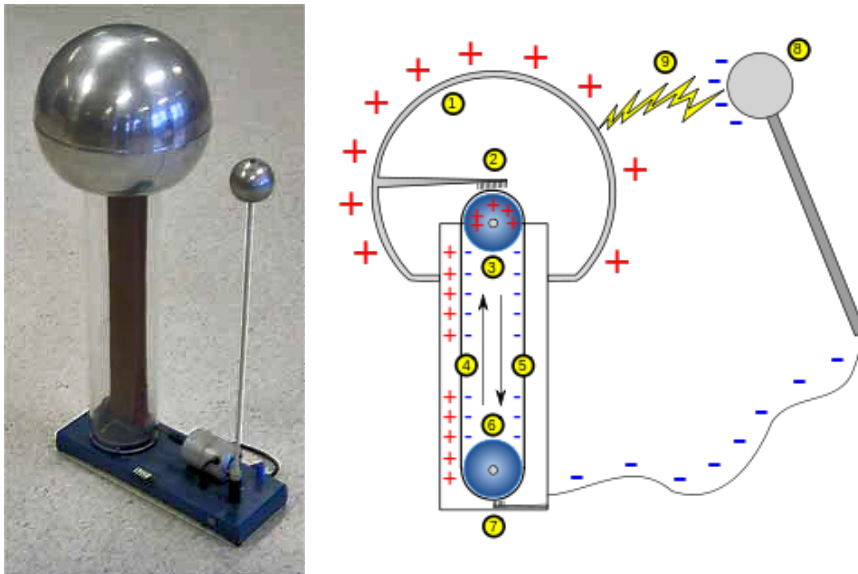


Figura 1.1: Generador de Van der Graff.
Fuente: Google, Van der Graff, imágenes

http://es.wikipedia.org/wiki/Maquina_de_Wimshurst⁷, se hace una descripción de la máquina de Wimshurst que es un generador electrostático de alto voltaje desarrollado entre 1880 y 1883 por el 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

⁷ http://es.wikipedia.org/wiki/Maquina_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 ...

las chispas. Se basa en el efecto triboeléctrico, en el que se acumulan cargas cuando dos materiales distintos se frotan entre sí.

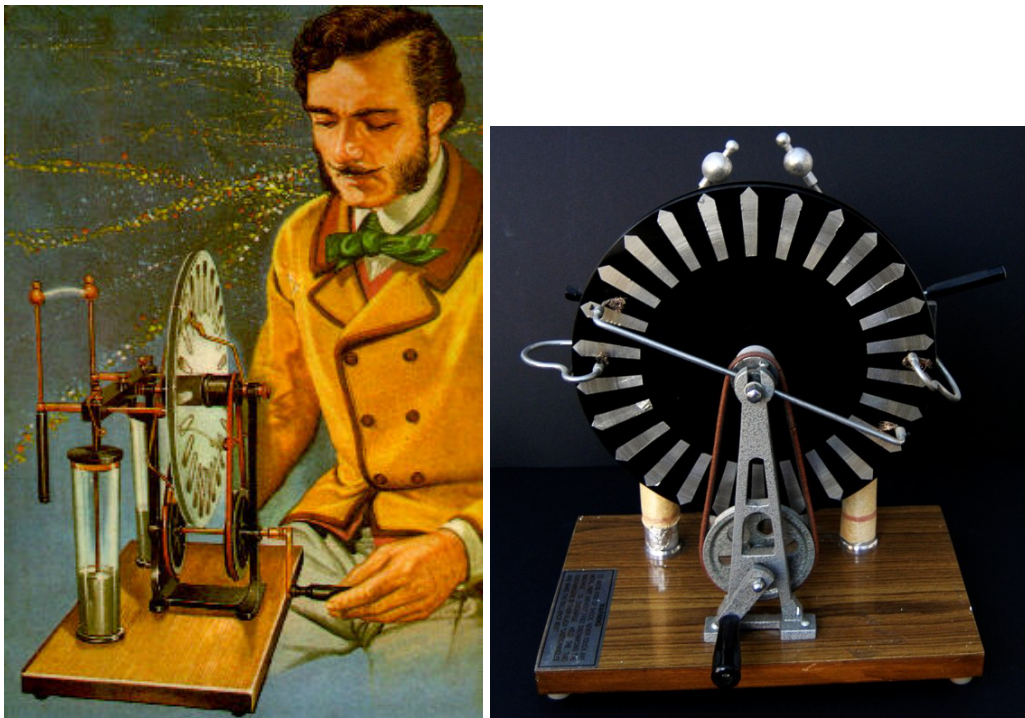


Figura 1.2: Máquina de Wimshurst.
Fuente: Google, Máquina de Wimshurst, imágenes.

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.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Electroforo>⁸, se describe el electróforo como un generador de electricidad estática de tipo capacitivo formado por un condensador de plato simple, operado manualmente. Produce cargas electrostáticas mediante un proceso de inducción electrostática.

El primer electróforo fue inventado en 1762 por el profesor sueco, Johannes Carl Wilcke. Luego el científico italiano Alessandro Volta perfeccionó y popularizó este dispositivo en 1775, lo que ha llevado a acreditarle erróneamente su invención.

El objetivo del **electróforo** es cargar positivamente un disco de material conductor.

Está formado por:

- Un disco de material conductor, generalmente metálico, con un mango aislante para sostenerlo.
- Una lámina de material aislante. En la versión original era una torta de resina.

⁸ <http://es.wikipedia.org/wiki/Electroforo>

En la física experimental, **el electróforo** es un generador de electricidad estática de tipo capacitivo formado por un condensador de plato simple, operado ...

- Piel de gato, piel de conejo, o un simple tejido de lana bien seco.



Figura 1.3: El Electr6foro.

Fuente: Google, Electr6foro, im6genes.

El **DOD-HDBK-263**⁹ (Department Of Defense USA), ha elaborado un manual utilizado para el control descargas electrost6ticas para la protecci3n de partes el6ctricas y electr3nicas en el ensamblaje y equipamiento (Excluyendo artefactos explosivos iniciados el6ctricamente).

Este manual fue elaborado por la Marina de los Estados Unidos y aprobado el 02 de Mayo de 1980. Este manual provee guías para establecer un programa de control de descargas electrost6ticas sobre componentes el6ctricos y electr3nicos.

⁹ DOD-HDBK-263 (2 May 1980). Department of Defense USA – Handbook-263.

Así mismo, **Enrique Montero Montero (1999)**¹⁰, describe el fenómeno de la descarga electrostática y sus incidencias en dispositivos electrónicos. También señala los daños producidos por la descarga electrostática y sus posibilidades de neutralización. Menciona también el uso de modelos de ensayo, para simular las descargas electrostáticas sobre los componentes electrónicos.

También tenemos a la **ESDA.org. (2013)**¹¹, La Asociación de Descargas Electroestática ESDA con sede en Estados Unidos de Norte América que se ocupa del tema de descarga electrostática, (conocido por las siglas en inglés **ESD**, que significan *electrostatic discharge*) el cual es un fenómeno electrostático que hace que circule una corriente eléctrica repentina y momentánea entre dos objetos de distinto potencial eléctrico; como la que circula por un pararrayos tras ser alcanzado por un rayo.

La "chispa" se da cuando la fuerza del campo eléctrico supera la fuerza dieléctrica del aire (aproximadamente de 4 – 30 kV/cm). Esto puede causar un rápido incremento del número de electrones e iones libres en el aire, provocando que el aire se convierta de pronto en un conductor eléctrico mediante un proceso llamado “caída dieléctrica”.

¹⁰ Enrique Montero Montero, Una introducción al fenómeno de descargas electrostáticas en componentes electrónicos. Universidad de Cadiz. España.

¹¹ **ESDA.org. (2013)**. Standards ESD Association standards and specifications provide the guidance companies need to get their ESD control programs off and running.

Normalmente, los materiales del puesto de trabajo pueden ser divididos en tres categorías: ESD generadores, ESD neutrales y ESD disipadores (o ESD conductores):

Los estándares actuales de la ESDA, están divididos en tres grupos principales:

- Los que proveen de un programa de control de la ESD y sus requisitos.
- Los que cubren los requisitos para productos y procedimientos específicos.
- Los que establecen estándares para los métodos de prueba y evaluación de productos y materiales.

Las principales normas elaboradas por la ESDA son:

Norma ANSI/ESD S5.3.1-2009. Prueba de Sensibilidad a la Descarga Electroestática – Modelo de Dispositivo de Carga (MDL)- Nivel de Componente, en la cual se establece el procedimiento para pruebas, evaluación y clasificación de la Sensibilidad a la Descarga Electroestática de componentes definido en el Modelo de Dispositivo de Carga.

Norma ESD TR55.0-01-2004. Pautas de Electroestática y Consideraciones para Salas Limpias y la Producción Limpia. Este documento identifica consideraciones y proporciona las pautas para la selección e implementación de materiales y procesos para el control de la electrostática en salas limpias y ambientes de fabricación limpios.

Norma ESD TR53-01-2006. Verificación de Cumplimiento de Materiales y Equipos de Protección a Descargas Electroestáticas. Este informe técnico describe los métodos de prueba y la instrumentación que debe ser usada para verificar periódicamente el funcionamiento de equipos y materiales de protección a descargas electroestáticas.

Norma ESD DSTM7.1-2012. Caracterización Resistiva de Materiales – Materiales de Piso. Medición de la resistencia eléctrica de las cubiertas de varios materiales de piso, como revestimientos para pisos, alfombras y revestimientos de suelo. Proporciona métodos de ensayo para la calificación de materiales del piso antes de instalar o aplicar y para evaluar y vigilar los materiales después de la instalación o aplicación.

Norma ANSI/ESD STM97.1-2006. Materiales de Piso y Calzado – Medición de la Resistencia en Combinación con una Persona. Proporciona métodos de prueba para medir la resistencia del sistema eléctrico de los materiales del piso en combinación con la persona que usa calzado con control estático.

Norma ESD STM2.1-1997. Prendas de Vestir - Caracterización Resistiva. Proporciona métodos de prueba para medir la resistencia eléctrica de prendas de vestir. Cubre procedimientos para medir resistencia de manga a manga y resistencia de punto a punto.

Norma ESD TR2.0-01-00. Consideraciones para el Desarrollo de Especificaciones de Prendas de Vestir a Descargas Electroestáticas. Este informe técnico aborda lo concerniente acerca de la protección efectiva de las prendas de vestir a Descargas Electroestáticas, comenzando con una comprensión de mediciones electroestáticas y cómo se relacionan con la protección a Descargas Electroestáticas.

Norma ESD TR2.0-02-00. Riesgos de Electricidad Estática en Prendas de Vestir Cargadas Triboeléctricamente. En este informe técnico se pretende proporcionar una idea del peligro electrostático presente cuando una prenda se usa en un entorno inflamable o explosivo.

Norma ANSI/ESD S6.1-2009. Puesta a Tierra. Se especifica los parámetros, materiales, equipos y procedimientos de prueba necesarios para elegir, establecer, variar y mantener un Control de Descarga Electroestática con el uso de un Sistema de Puesta a Tierra dentro de un área de protección de ESD para la protección de elementos susceptibles de ESD y especifica los criterios para establecer la vinculación de ESD.

Norma ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2012 ESDA/JEDEC. Estándar Común para Probar la Sensibilidad de la Descarga Electroestática – Modelo del Cuerpo Humano – en Componentes. Se establece el procedimiento para probar, evaluar y

clasificar la sensibilidad de la descarga electrostática en componentes con el modelo definido de cuerpo humano (HBM).

Norma ESD TR50.0-02-99. Ohmímetros de Alta Resistencia - Mediciones de Voltaje. Este informe técnico analiza una serie de parámetros que pueden causar diferentes lecturas del medidor de alta resistencia cuando son usadas técnicas e instrumentación incorrectas y las precauciones a ser usadas con el fin de asegurar que la medición sea precisa y repetible como sea posible para la medición de resistencia de materiales.

Norma ANSI/ESD STM11.11-2006. Medición de la Resistencia Superficial de Materiales Disipadores Estáticos Planos. Este método de prueba estándar define un método de prueba de corriente directa para medir la resistencia eléctrica, sustituye a la ASTM D257-78. Este método de ensayo está diseñado específicamente para materiales disipadores estáticos planos utilizados en los empaques de componentes y dispositivos sensibles a la ESD.

Norma ESD DSP14.1-2012. Nivel del Sistema de Descarga Electroestática (ESD) Verificación del Simulador. Esta práctica estándar fue desarrollada para orientar a los diseñadores, fabricantes y servicios de calibración para la verificación y la especificación de los sistemas y aparatos utilizados para medir corrientes de descarga del simulador.

Norma ESD ADV53.1-1995. Protección de Estaciones de Trabajo a ESD. El presente documento consultivo define los requisitos mínimos para la protección básica de una estación de trabajo a ESD utilizados en las áreas sensibles a la ESD. Proporciona un método de prueba para evaluar y vigilar las estaciones de trabajo. Define una Estación de trabajo que tiene los siguientes componentes: estructura de soporte, superficie de disipación estática, un medio de conexión a tierra personal y de cualquier adjunto como estantes o cajones.

También a nivel de Europa se han encontrado las normas británicas (BS) en la web <http://europa.eu.int/comm/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/> (07-09 - 2005)¹². Que trata del uso civil de explosivos, estas normas son también de uso en la comunidad europea como (EN), obteniéndose la siguiente información:

Norma BS EN 13857. Terminología e información que debe proveer el fabricante o su representante al usuario.

Norma BS EN 13630. Se ha encontrado información sobre cordones de detonación y fusibles de seguridad referidos a la determinación de la transmisión de detonación de cordón detonante a cordón detonante, de la capacidad de iniciación de cordones de detonación, de la estabilidad térmica del cordón detonante, cables y fusibles de seguridad, de la sensibilidad a la fricción del

¹² <http://europa.eu.int/comm/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/>. (07-09-2005) Normas Británicas (EN BS) para el uso civil de explosivos.

núcleo del cordón de detonación, de la sensibilidad al impacto de cordones detonantes, de la resistencia a la tensión de cordones de detonación, de la fiabilidad de la iniciación del cordón detonante, de la resistencia al agua de cordones de detonación y fusibles de seguridad, de la velocidad de detonación de cordones detonantes, de la duración de quemado de los fusibles de seguridad, de la resistencia a la abrasión de cordones de detonación.

Norma BS EN 13763. Referida a temas de detonadores y relés. La información hallada ha sido sobre la determinación de la precisión del retardo, de la corriente de no encendido de los detonadores eléctricos, de la corriente de encendido de los detonadores eléctricos en serie, del impulso de encendido de detonadores eléctricos, del sobre voltaje de encendido de los detonadores eléctricos, de la capacitancia, resistencia de aislamiento y ruptura de aislamiento de los cables, de la resistencia al daño de corte de los cables y tubos de descarga, de la resistencia de los cables a la fisura a bajas temperaturas, de la resistencia mecánica de los cables, tubo de descarga, conexiones, plegadores y cierres, de la resistencia a las vibraciones de un grupo de detonadores, de la resistencia al daño por caída de detonadores y relés, de la resistencia a la presión hidrostática, de la resistencia eléctrica total de los detonadores eléctricos, de la estabilidad térmica, de la sensibilidad al impacto, de la velocidad de la onda de choque del tubo de descarga, de la no conductividad eléctrica del tubo de descarga, de la capacidad equivalente de iniciación, de la resistencia de los detonadores eléctricos a descargas electrostáticas, de la capacidad de transferencia de conectores de

superficie, relés y accesorios de acoplamiento, de la resistencia a la abrasión de cables y tubos de descarga, de la resistencia a la flexión de los detonadores, definiciones, métodos y requerimientos para sistemas de iniciación electrónicos, definiciones, métodos y requerimientos para los dispositivos y accesorios para el funcionamiento confiable y seguro de detonadores y relés.

Norma BS EN 136. Esta norma entrega información adicional como métodos para la verificación de los medios de iniciación, determinación de la sensibilidad a la fricción de los explosivos, detección y medición de gases tóxicos, especificaciones de impulsores con diferente capacidad de iniciación, cálculos de propiedades termodinámicas, determinación de la densidad, de la velocidad de detonación, de la estabilidad térmica de los explosivos, de la sensibilidad al impacto de los explosivos, de la resistencia al agua, de la resistencia a la presión hidrostática, de seguridad y fiabilidad en temperaturas extremas, de la transmisión de la detonación.

Norma BS EN 13938. Presenta información complementaria referida a propulsores y masa pirotécnica para la determinación de la deflagración a la transición de detonación, de las propiedades del polvo negro, de la resistencia a la energía electrostática, de la velocidad de encendido en condiciones ambientales de combustión.

Consultamos el trabajo de investigación de, Nuñez F. (1994)¹³, quien desarrolló la Tesis de Grado “Diseño, construcción y evaluación de simulador variable de cargas estáticas para pruebas de detonadores de iniciación eléctrica y no eléctrica utilizados en minería”, asesorado por el Ingeniero Oswaldo Morla Morales Taquiri. En esta Tesis se realizó un trabajo preliminar, indagándose principalmente sobre la mayor cantidad de características de los detonadores, como su sensibilidad, composición y seguridad de uso propuestos por fabricantes de detonadores Río Tinto - España y Du Pont- Francia. Finalmente se propuso construir una fuente de alto voltaje utilizando un sistema de oscilación con transistores 2N3055 en el lado primario (12 Volt) de un transformador con núcleo de ferrita (Fly Back de televisor), obteniéndose en el lado de alta voltajes hasta de 7000 VAC, pero de baja potencia. Tuvo problemas de regulación. Este fue el único trabajo encontrado a nivel de biblioteca.

Otra información revisada fue la **NTP 311.356-7 (2007)¹⁴**, Norma Técnica Peruana, elaborada por el Comité Técnico de Normalización de Explosivos y Accesorios de Voladura, durante los meses de Mayo a Junio del 2007, utilizando como antecedente la Norma UNE 31-360-94 Detonadores Eléctricos. Métodos y criterios de ensayo.

¹³ **Núñez Carrillo Fernando Augusto (1994)**. Tesis “Diseño, construcción y evaluación de simulador variable de cargas estáticas para pruebas de detonadores de iniciación eléctrica y no eléctrica utilizados en minería”.

¹⁴ **Indecopi Perú. Norma Técnica Peruana NTP 311.356-7: Explosivos y accesorios de voladura. Detonadores Eléctricos. 2007**

El Comité Técnico de Normalización de Explosivos y Accesorios de Voladura presentó a la Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales –CRT- con fecha 2007-08-29, el PNTP 311.356-7: 2007, para su revisión y aprobación, siendo sometido a la etapa de Discusión Pública el 2007-09-29. No habiéndose presentado observaciones, fue oficializada como Norma Técnica Peruana NTP 311.356-7:2007 Explosivos y Accesorios de Voladura. Detonadores Eléctricos.

Método de Ensayo para determinar la seguridad contra electricidad Electrostática 1ª Edición, el 09 de diciembre del 2007.

La presente Norma Técnica Peruana ha sido estructurada de acuerdo a las guías peruanas y GP 002:1995.

Indicadores	Valores
Niveles de voltaje	7kV, 8kV, 17kV, 30kV y 40 Kv
Capacidad de condensadores	300pF/40kV, 500pF/40kV y 2500pF/40kV

Tabla 1.1: Indicadores y valores para ensayos electrostáticos.
Fuente: NTP 311.356-7:2007.

1.3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

1.3.1. Planteamiento de la realidad problemática

En la exploración y extracción mineras, se requiere realizar el movimiento de grandes volúmenes de tierra, y de material rocoso, utilizando para ello maquinaria pesada y una serie de materiales explosivos que les permita a las empresas realizar un trabajo competitivo. Como consecuencia del empleo de estos materiales los trabajadores se ven expuestos al peligro pues la presencia de la electricidad estática ha generado una serie de accidentes no solamente a las personas sino a las máquinas y equipos.

Así podemos mencionar que todas las personas, equipos y máquinas que se encuentran aisladas con respecto a tierra forman un capacitor, cuya magnitud dependerá del tamaño de los materiales con los que se encuentran investidos. Al estar en movimiento se cargarán obteniendo un nivel de energía electrostática que puede resultar peligrosa cuando se descarga sobre productos utilizados en estas labores mineras.

Para evitar éstos probables accidentes causados precisamente por la presencia de la energía electrostática en las operaciones diarias en el campo minero, es que se ha desarrollado este equipo capaz de certificar los límites permisibles de

manipulación de los detonadores y con ello disminuir y evitar el peligro al que están expuestos los trabajadores y la propia maquinaria.

1.3.2. Formulación del problema

1.3.2.1. Problema general

¿De qué manera el desarrollo de una máquina de descargas electrostáticas ayudará a la determinación de la resistencia de detonadores utilizados en minería?

1.3.2.2. Problemas específicos

¿Cómo el nivel de voltaje de una máquina de descargas electrostáticas ayudará a determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería?

¿Cómo la capacidad de los condensadores ayudará a determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar una máquina de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería.

1.4.2. Objetivos específicos

Determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería mediante el nivel de voltaje del equipo de descargas electrostáticas

Determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería mediante la capacidad de los condensadores.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis general

Mediante el desarrollo de una máquina de descargas electrostáticas se logrará determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería.

1.5.2. Hipótesis específicas

Mediante el nivel de voltaje de la máquina de descargas electrostáticas se logrará determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería.

Mediante la capacidad de los condensadores se logrará determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería.

1.6. VARIABLES E INDICADORES

Para este trabajo de investigación las variables cuantitativas son:

1.6.1. Variable independiente: X

X: Desarrollo de una máquina de descargas electrostáticas

Indicadores: Estándar

Niveles de voltaje: 8kV, 17kV, 25kV, 30kV y 40kV

Capacidad de condensadores: 300pF/40kV, 500pF/40kV y 2500pF/40kV.

1.6.2. Variable dependiente: Y

Y: Determinación de la resistencia del detonador

1.7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

1.7.1. Unidad de análisis

La unidad de análisis es la máquina de descargas electrostáticas que se utilizará para determinar la resistencia de los detonadores, que se emplean en la exploración y extracción minera.



Figura 1.4: Disposición del prototipo de la máquina de descargas electrostáticas.
Fuente: Elaboración propia.

Se estudió cada una de las distintas partes de las cuales se compone la máquina, también se sometió a las pruebas de desempeño para verificar su eficacia de funcionamiento. La prueba de desempeño se realizó en los Laboratorios de la Facultad de Ciencias y de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad

Nacional de Ingeniería y finalmente en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de la fábrica FAMESA S.A.C. en las distintas probabilidades de uso de los detonadores (Esta prueba de desempeño se utilizará para probar nuestras hipótesis generales y específicas).

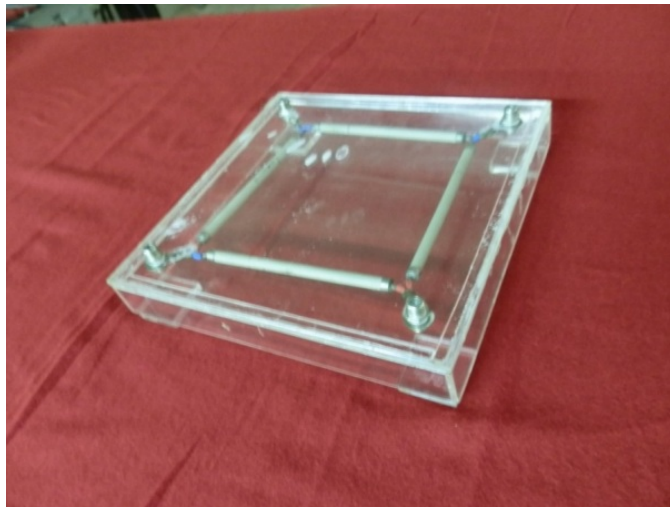


Figura 1.5: Puente de diodos de onda completa.
Fuente: Elaboración propia



Figura 1.6: Atenuador de 1000 MΩ.
Fuente: Elaboración propia



Figura 1.7: Pruebas intensivas de desempeño.
Fuente: Elaboración propia.

1.7.2. Tipo y nivel de investigación

El trabajo de investigación es del tipo aplicada y el nivel es descriptiva básica, porque no se han encontrado antecedentes específicos de trabajos similares desarrollados anteriormente, también es considerada descriptiva porque se hace una descripción de la aplicación de dicha máquina como también la descripción de la propia máquina. Finalmente podemos mencionar que es del tipo correlacional, pues se han medido y analizado el comportamiento de cada una de las variables, cuando éstas son manipuladas.

1.7.3. Técnicas de recolección y procesamiento de datos

Por ser el desarrollo de un producto nuevo, en este caso una máquina, ésta es la muestra que después de ser sometida a distintas pruebas de operación y funcionamiento, se obtuvieron valores que justificaron los rangos permisibles, dentro de los cuales se garantiza, la seguridad de las personas así como de las maquinarias y equipos que estarán operando en la exploración y extracción mineras.

Estos datos fueron procesados mediante el software Excel para la determinación de la energía entregada por la máquina y recibida por el producto ensayado.

1.7.5. Período de análisis

El período de análisis, desde que concebimos la idea de construir la máquina comprende desde el año 2008 hasta el 2013, tiempo en el que hemos investigando este tema intensamente para lograr esta realidad.

1.8. IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La energía electrostática ha sido un grave problema para la industria durante siglos. A principios del siglo XV, los fuertes Europeos y del Caribe usaban ya procedimientos de control y dispositivos para prevenir que las descargas

electrostáticas hiciesen explotar los almacenes de pólvora negra. En la década de 1860 aproximadamente, las fábricas de papel de EE.UU. Usaban las puestas a tierra básicos, técnicas de ionización de flama y tambores de vapor para disipar la electricidad estática de las redes de papel cuando pasaban a través del proceso de secado.

En todo negocio y/o proceso industrial han ocurrido en algún momento sus propios problemas con respecto a la carga y descarga electrostática. Ejemplos claros pueden ser el manejo inadecuado de las municiones y explosivos, en la industria farmacéutica, la misma agricultura, en el trabajo de impresión y las artes gráficas, la industria textil, en el proceso de pintura, en la industria de los plásticos, actualmente en los equipos electrónicos. En todos ellos, el control de la electricidad estática tiene una importancia significativa.

En el Perú los principales comercializadores de detonadores de encendido eléctrico y no eléctrico son las empresas FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. y EXSA S.A.

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. es una empresa peruana fabricante de explosivos en sus diferentes variedades, detonadores de encendido eléctrico y no eléctrico (FANEL) y accesorios de voladura, siendo exportador de todos estos productos y provee también al mercado nacional para aplicaciones en minería subterránea, superficial y obras civiles.

EXSA S.A. es una empresa peruana fabricante de explosivos en sus diferentes variedades siendo en este rubro exportador y proveedor en el mercado nacional. En cuanto a detonadores de encendido eléctrico y no eléctrico es importador y comercializador a nivel nacional, siendo sus principales clientes las empresas mineras.

En cuanto a los detonadores, cuya evaluación es motivo de nuestra investigación, en el mercado nacional existen los siguientes tipos.

- a) Fulminante de encendido Eléctrico Sensible.
- b) Fulminante de encendido Eléctrico Normal.
- c) Fulminante de encendido Eléctrico Insensible.
- d) Fulminante de Antiestático de encendido No Eléctrico.

A partir de 1990 ante la apertura de la importación, estas empresas se vieron en la necesidad de cumplir con los estándares del mercado global, pues las empresas mineras y usuarios de detonadores exigían el cumplimiento de éstos.

Uno de los problemas presentes según manifiestan los fabricantes y usuarios de los explosivos de detonadores y accesorios de voladura es la descarga electrostática.

La descarga electrostática sobre los detonadores y accesorios puede provenir de parte de una máquina o del operador, que dependiendo del nivel de energía acumulada lo puede llegar a iniciar, con resultados generalmente de tipo mortal.

Actualmente, las empresas mineras y las constructoras de obras civiles al momento de adquirir los detonadores contratan a empresas internacionales certificadoras para la verificación y la seguridad en el manipuleo de éstos.

Esta investigación tiene el objetivo de desarrollar una máquina de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería, lo cual evitará accidentes personales y/o a las máquinas y equipos debido a la presencia de la electricidad electrostática, así como en el sistema productivo de exploración y extracción mineras teniendo presente también que nuestro país es eminente minero, por lo que creemos que esta máquina será un aporte tecnológico a la industria.

Para llevar adelante esta investigación hemos revisado la teoría de la física, de la electricidad, de la electrostática y su aplicación en cada uno de los componentes de la máquina. De esta manera creemos haber llenado un vacío teórico y un proceso experimental con lo cual estamos cubriendo una necesidad en este campo productivo.

1.9. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

El éxito de las empresa e instituciones que se dedican a la minería o a la producción de bienes, deben estar relacionadas a la innovación, es decir a la propuesta de proyectos de innovación tecnológica o de mejoramiento de los procesos de producción en general y nuestra investigación mediante el desarrollo de una máquina de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería busca proponer una mejora en la productividad, en la seguridad personal, de equipos y maquinaria.

En términos generales podemos señalar entonces que las distintas experiencias realizadas, ya han sido encaminadas a buscar la mejora en la protección de la minería por iniciativas dadas por entidades del estado; no obstante éstas no se han concretado, en algunos casos por la falta de recursos económicos y por la falta de información y también de tecnologías disponibles.

Por esta razón es que nosotros como investigadores, procuramos generar estas nuevas experiencias de tecnología que puedan contribuir, a la producción de equipos que ayuden a proteger tanto a las personas como a la maquinaria y equipo que se desempeña en el campo minero.

Podemos por lo tanto decir que ésta investigación es del tipo tecnológica o aplicada como lo menciona Mario Bunge¹⁵, por lo tanto busca resolver problemas de carácter productivo y tecnológico de aplicación inmediata. En tal sentido el alcance de nuestra investigación es desarrollar una máquina de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería, lo cual llegará a resolver, principalmente, problemas de seguridad en el campo de la minería.

1.10. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La carencia de material bibliográfico teórico y técnico especializados en este tema, ha sido una de las limitantes más significativas, por lo que se hemos necesitado mucho tiempo en acopiar esta información.

Asimismo encontrar un local físico ha sido otra limitante donde desarrollar nuestra investigación pues la Facultad de Ingeniería Mecánica no ha previsto esto.

El aspecto económico ha sido otro factor al cual hemos tenido que afrontar con bastante realidad, puesto que las instituciones u organismos comprometidos con estos temas no están dispuestos a invertir en este tipo de investigación, teniendo que recurrir a nuestros pocos recursos para acceder a estos requerimientos.

¹⁵ BUNGE, M. (1970). La Investigación Científica.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO

Leston C.¹⁶ La generación de cargas electrostáticas es un fenómeno natural, asociado a la propia estructura atómica de la materia, que se produce como resultado del movimiento relativo entre dos superficies en contacto, generalmente de sustancias diferentes, tanto líquidas como sólidas, una de las cuales, o las dos, no son buenas conductoras de la electricidad. Los procesos fundamentales de formación de las cargas electrostáticas son dos: el contacto-separación de sustancias y la fricción.

La electricidad estática representa un desequilibrio temporal en la repartición de las cargas en la superficie de dos materiales en contacto por transferencia de electrones, creando un campo eléctrico y una diferencia de potencial entre aquellos que puede ser muy elevada.

¹⁶ **Leston Carlos Alberto**, Prevención de incendios – Fuentes de ignición electrostáticas.
http://www.ias.org.ar/down/asociados/reporter_ias/mredonda/fuentes-ignicion.electrostaticas.htm.

La magnitud de la carga depende principalmente de la velocidad de separación y/o fricción de los materiales y de su resistividad eléctrica. Cuando los cuerpos conductores están separados por un aislante o incluso por el aire constituyen un condensador al quedar cargados uno con una carga positiva y el otro con otra carga igual pero negativa. Al establecerse una vía conductora se libera tal energía almacenada descargándose para nuestro caso sobre el detonador.

El parámetro fundamental determinante de la peligrosidad de la carga electrostática es la cantidad de energía liberada en el instante de producirse. Esta energía se manifiesta en forma de radiaciones, de ionización y de calor. Esquemáticamente es esta última la desencadenante de la reacción de combustión.

RÍO TINTO- DUPONT (1989)¹⁷. Para que se produzca la explosión del detonador deberá cumplirse conjuntamente las tres siguientes condiciones:

- La existencia de una configuración del detonador susceptible de explosión por encontrarse dentro del rango de iniciación.
- La acumulación de una carga electrostática lo suficientemente alta para crear una diferencia de potencial generadora de iniciación del detonador.

¹⁷ **RÍO TINTO (ESPAÑA) – DUPONT (FRANCIA)** (1989).. Peligros de las ondas electromagnéticas en fulminantes. Revista de propiedad de la Empresa de Fabricación de Explosivos FAMESA S.A.C.

- La producción de la descarga electrostática iniciadora, de energía suficiente para iniciar el detonador.

Las personas pueden acumular también cargas tanto por su movimiento y contacto con el medio exterior como por la influencia de campos eléctricos a los que estén expuestos.

NTP 311.356-7: 2007¹⁸. En condiciones especiales una persona puede alcanzar un potencial del orden de los 35.000 V. La capacidad del cuerpo humano estándar actuando como condensador eléctrico es del orden de 300pF y una persona de porte militar de 500pF. En la labor minera, una máquina en el momento de perforación puede alcanzar un potencial de 40000V y formar la configuración de un condensador de 2500pF.

El contacto con cuerpos susceptibles de carga puede producir la transmisión de cargas electrostáticas a las personas, así como también puede hacerlo la proximidad a objetos cargados eléctricamente.

La acumulación de cargas también depende en gran medida de las características físicas de las personas, en especial del estado de su piel (seca o húmeda) y de su nivel de sudoración, aunque también influye la humedad ambiental. El cuerpo humano es considerado un buen conductor de la electricidad debido

¹⁸ **Norma Técnica Peruana NTP 311.356-7(2007)**. Explosivos y accesorios de voladura. Detonadores Eléctricos.

principalmente a su alto contenido en agua, aunque su vestimenta puede ser un factor negativo que facilite la acumulación de cargas, debido en ocasiones a la baja conductividad de aquélla.

El aislamiento de la persona del suelo por usar suelas de material no conductor (goma, plástico) o estar situada sobre pavimento no conductor es la condición necesaria para que ésta pueda acumular cargas electrostáticas considerables.

La acumulación de la electricidad estática es la resultante de dos acciones antagonistas: la formación y la disipación natural de las cargas eléctricas. Cuando la conductividad de un material es suficientemente elevada para asegurar la disipación rápida de las cargas formadas, no pueden crearse potenciales peligrosos y, en numerosos casos, las cargas se recombinan tras fracciones de segundo de haber sido formadas.

Como se ha mencionado, la generación de electricidad estática es inevitable. Ante ella las medidas a adoptar van encaminadas a controlar esta generación.

Cuando se estén realizando los ensayos de descarga electrostática es necesario considerar los tiempos de espera o de relajación, considerando para nuestro caso de un minuto.

El personal que esté realizando los ensayos no usará ropa de fibras sintéticas, y la vestimenta será preferiblemente de algodón, incluso la ropa interior y prohibir el uso de prendas de lana.

El calzado y en su caso los guantes, deberán ser conductores. Ello ofrecerá protección suficiente siempre que el suelo sea también conductor, aspecto éste que también tiene que ser considerado.

2.1.1. Las fuerzas fundamentales del universo

Fuentes fundamentales del Universo¹⁹. Las fuerzas o interacciones fundamentales del universo conocidas hasta ahora son cuatro: **gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil.**

La gravitatoria es la fuerza de atracción que un trozo de materia ejerce sobre otro, y afecta a todos los cuerpos.

La fuerza electromagnética afecta a los cuerpos cargados eléctricamente, y es la fuerza involucrada en las transformaciones físicas y químicas de átomos y moléculas.

¹⁹ **Fuerzas Fundamentales del Universo.**
<http://www.astronomia.com/astronomia/paradojaolbers.htm>.

La fuerza o interacción nuclear fuerte es la que mantiene unidos a los componentes de los núcleos atómicos, y actúa indistintamente entre dos nucleones cualesquiera, protones o neutrones.

La fuerza o interacción nuclear débil es la responsable de la desintegración beta de los neutrones; los neutrinos son sensibles únicamente a este tipo de interacción.

La teoría del todo o teoría unificada de estas fuerzas fue el sueño incumplido de Einstein. A este empeño dedicó con pasión los últimos 30 años de su vida. No lo logró, y hoy continúa sin descubrirse. Consiste en una teoría definitiva, una ecuación única que dé respuesta a todas las preguntas fundamentales del Universo.



Figura 2.1: Las fuerzas fundamentales del universo.

Fuente: Fuerzas Fundamentales del Universo.

<http://www.astronomia.com/astronomia/paradojaolbers.htm>

Anteriormente, ya se unificaron otras leyes de la Naturaleza. En el siglo XIX, Maxwell unificó las fuerzas eléctrica y magnética en el electromagnetismo. A comienzos del siglo XX, la relatividad de Einstein unificó espacio y tiempo, y posteriormente el espacio tiempo con la gravedad. Lo que nadie ha podido unificar aún es la relatividad con la cuántica. La relatividad es la ley de lo muy grande, de los astros y las galaxias. La cuántica rige en lo más pequeño, en las partículas subatómicas. Pero a veces están juntas, como en los agujeros negros o en el Big Bang, y la física aún no ha podido conciliarlas.

La teoría de cuerdas pretende convertirse en la gran teoría del todo. Hoy, es la teoría que ofrece mayores expectativas de unificar las cuatro grandes fuerzas de la Naturaleza: electromagnetismo, fuerza nuclear fuerte, fuerza nuclear débil y gravedad, lo que equivale a unificar física cuántica y relatividad. Retoma la tarea que Einstein dejó inacabada.

La teoría de cuerdas presupone que las partes más pequeñas son filamentos de energía, una especie de cuerdas que vibran, cada tipo de vibración produce un tipo u otro de partícula, con cualidades distintas. Las cuerdas serían muchísimo más pequeñas que un quark, por eso no podemos verlas. Aunque sí pueden deducirse matemáticamente.

La teoría de cuerdas tiene distintas versiones, una de ellas, la teoría M^{20} , cree que una especial vibración de cuerdas daría lugar a una partícula llamada gravitón, que sería la responsable de la gravedad. De esta forma unificaría la gravedad, algo que hasta ahora no ha logrado el modelo estándar.

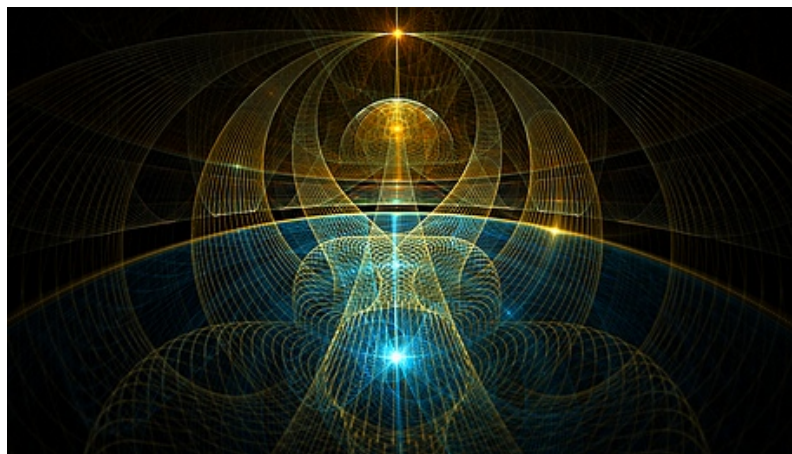


Figura 2.2: La teoría de las cuerdas.

Fuente: Fuerzas Fundamentales del Universo.

<http://www.astronomia.com/astronomia/paradojaolbers.htm>

Las cuerdas más grandes formarían una especie de membranas circulares o branas, cada membrana sería un universo. El choque entre dos branas produciría un nuevo Big Bang y un nuevo universo. El nuestro sería sólo uno entre muchos. No habría comienzo ni final, sino ciclos entre un big bang y el siguiente.

²⁰ [es.wikipedia.org/wiki/Introducción_a_la_Teoría_M](http://es.wikipedia.org/wiki/Introducci3n_a_la_Teor3a_M)

La teoría defiende la existencia de diez dimensiones espaciales y una temporal, esas dimensiones estarían en las propias cuerdas, y por eso no las vemos. Por ahora, no hay pruebas de que la teoría de cuerdas sea correcta ni de que no lo sea.

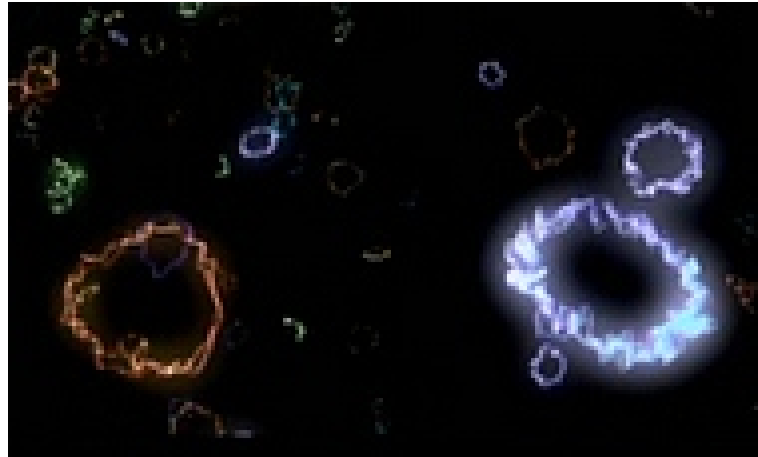


Figura 2.3: Vibración de las cuerdas.

Fuente: Fuerzas Fundamentales del Universo.

<http://www.astronomia.com/astronomia/paradojaolbers.htm>

2.1.2. Conceptos básicos de la electrostática

<http://es.wikipedia.org/wiki/Electrostática>²¹ . 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

²¹<http://es.wikipedia.org/wiki/Electrostática>

siglo XIX las Ecuaciones 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.

2.1.2.1. Desarrollo histórico

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 elektrón, este cuerpo adquiriría la propiedad de atraer pequeños objetos. Poco más tarde, otro griego, Teofrasto (300 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 británico William Gilbert utiliza por primera vez la palabra electricidad, creada a partir del término griego elektrón (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 Güricke 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 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 Clark Maxwell unificó las leyes de la electricidad y el magnetismo en un conjunto reducido de leyes matemáticas.

2.1.2.2 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.

2.1.3. Generadores electrostáticos

Los generadores de electricidad estática son máquinas que producen altísimas tensiones con una muy pequeña corriente eléctrica. Ejemplos de tales generadores son el Generador de Van der Graaff, la Máquina de Wimshurst y el Electrónimo.

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.

2.1.3.1. 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).

2.1.3.2. 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.

2.1.6. Configuraciones típicas de campos electrostáticos

a) Campo eléctrico creado por una carga puntual

El campo eléctrico 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 puntual Q . La fuerza entre ambas cargas, medida por un observador en reposo con 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:

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

Dónde:

\vec{E} : Campo eléctrico (N/C)

Q : Carga eléctrica (C)

u_r : Es un vector unitario en la dirección radial

$\epsilon_0 = 8,85 * 10^{-12} C^2/Nm^2$: Es la llamada permisividad del vacío

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

Dónde se tienen las equivalencias:

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

y

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi K}$$

Respectivamente.

La unidad de intensidad de campo eléctrico es (N/C) (Newton por Coulombio) o (V/m) (Volt por metro).

2.1.7. 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 eléctrico 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.

2.1.8. Representación gráfica del campo eléctrico

Una forma muy útil de esquematizar gráficamente un campo eléctrico 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, 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 \vec{E} en ese punto.
- b) El número de líneas de fuerza por unidad de área de sección transversal es proporcional a la magnitud de \vec{E} . Cuanto más cercanas estén las líneas, mayor será la magnitud de \vec{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 \vec{E} , se tiene que:

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

El subíndice n indica que ΔA es normal a \vec{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:

$$\frac{\Delta N}{\Delta A_n} = \varepsilon_0 \vec{E}$$

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:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

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

$$\varepsilon_0 E = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2}$$

Las líneas de fuerza atraviesan la superficie perpendicularmente puesto que 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:

$$N = \varepsilon_0 A E = q$$

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 sólo 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. 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 el \vec{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 se 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.

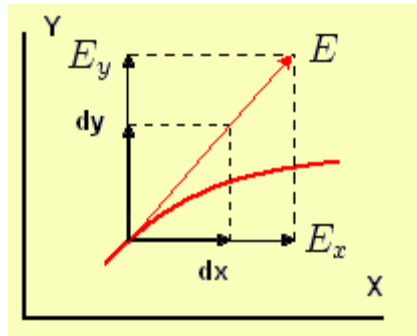


Figura 2.8: Ecuación de las líneas de fuerza
Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Electrostática>

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 y/x , por tanto:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y}{x}$$

Entonces

$$\ln(y) = \ln(x) + C$$

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.

2.2. ANÁLISIS Y SOLUCIONES MATEMÁTICAS DE CAMPOS ELECTRICOS

a) Comportamiento de una carga puntual 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.

b) 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.

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

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

Como $\vec{F} = q\vec{E}$, se cumple que $\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$

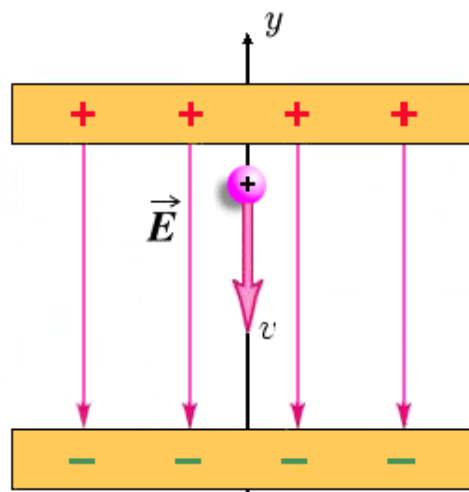


Figura 2.9: Partícula moviéndose paralelamente al campo
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

Aplicando las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado, con $v_0 = 0$, 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:

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

c) 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:

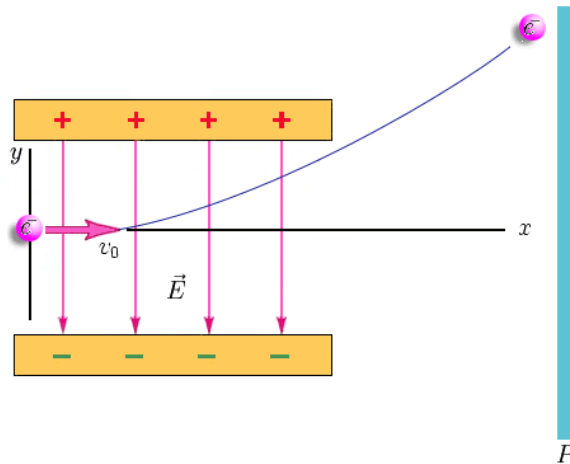


Figura 2.10: Partícula moviéndose perpendicularmente al campo.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

$$x = v_0 t$$

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

Sustituyendo a t se obtiene:

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

Que es la ecuación de la trayectoria de la partícula.

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.

c) **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.

Caso general

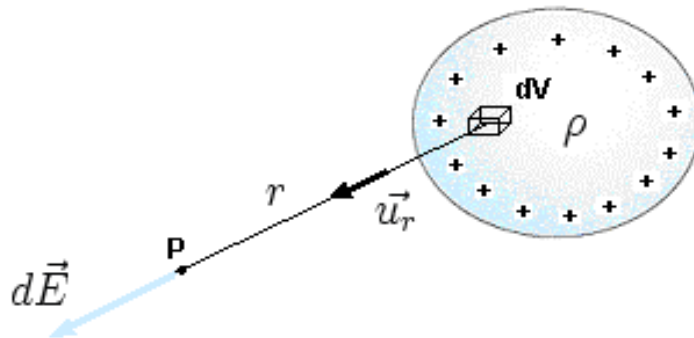


Figura 2.11: Campo eléctrico producido por un elemento dV de una distribución volumétrica uniforme de carga.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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 dE que produce cada elemento en el punto en cuestión, tratándolos como si fueran cargas "puntuales": La magnitud de dE está dada por:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} u_r$$

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

$$E = \int dE$$

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:

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

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,

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

- d) **Campo eléctrico generado por una esfera maciza uniformemente cargada**

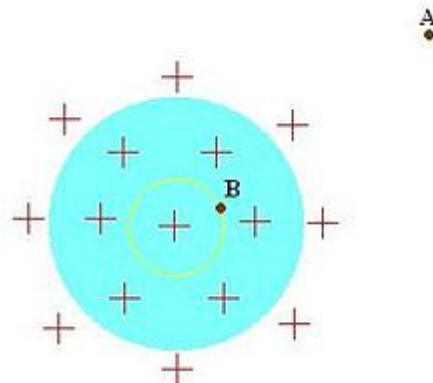


Figura 2.12: Campo eléctrico generado por una esfera maciza uniformemente cargada

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

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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

e) **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:

$$\int_S \vec{E} d\vec{S} = \int_V \frac{\rho dV}{\epsilon_0}$$

$$E \int_S dS = \frac{\rho}{\epsilon_0} \int_V dV$$

$$E 4\pi r^2 = \frac{\rho}{\epsilon_0} \frac{4}{3} \pi R^3$$

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

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

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

El campo eléctrico en el punto B (ver figura) 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.

g) 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.

Caso general

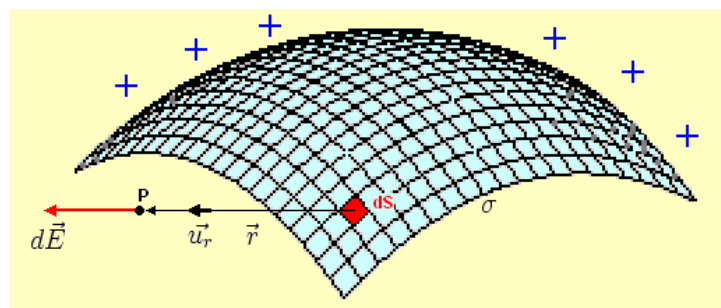


Figura 2.13: Campo eléctrico producido por un elemento dS de una distribución superficial continua de carga.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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,

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

h) **Campo eléctrico generado por un plano infinito de densidad de carga uniforme**

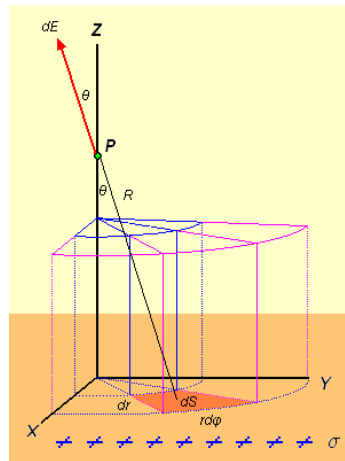


Figura 2.14: Campo eléctrico generado por un plano Infinito de densidad de carga uniforme.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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

$$dS = (dr)(rd\phi)$$

y

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

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:

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma z r dr d\phi}{(r^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{z\sigma}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{r dr d\phi}{(r^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{z\sigma}{4\pi\epsilon_0} (2\pi) \int_0^{+\infty} \frac{r dr}{(r^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$E = \frac{z\sigma}{2\epsilon_0} \int_0^{+\infty} r(r^2 + z^2)^{-3/2} dr = \frac{z\sigma}{2\epsilon_0} \left(\frac{-1}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right)_0^{+\infty} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

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.

i) Campo eléctrico generado por dos placas infinitas y paralelas

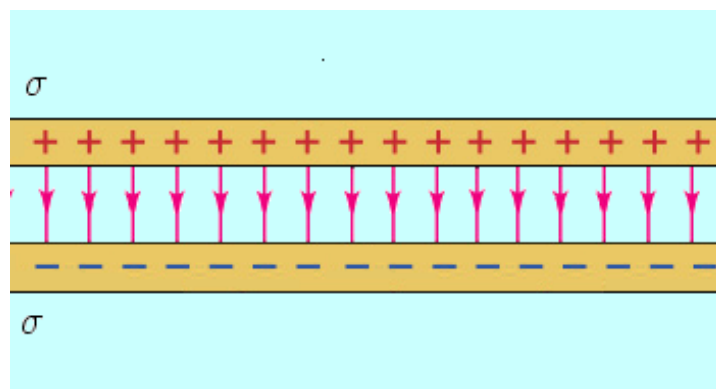


Figura 2.15: Campo eléctrico en el exterior de las placas.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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.

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

Campo eléctrico entre las dos placas

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

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

j) 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 .

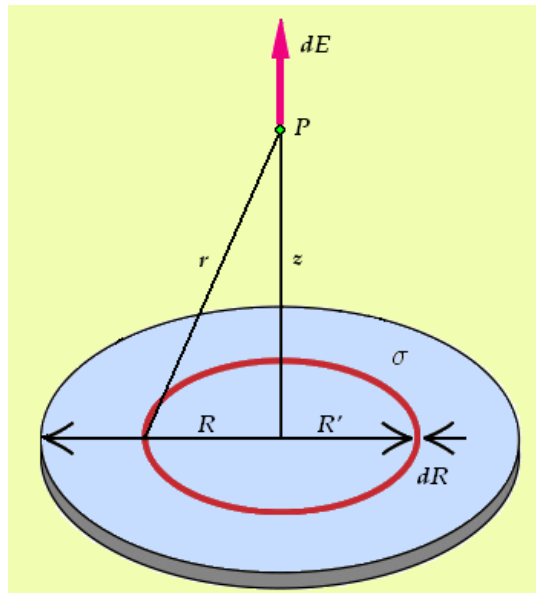


Figura 2.16: Campo eléctrico generado por un disco cargado de grosor despreciable.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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.

k) Campo eléctrico generado por una esfera hueca y de espesor despreciable

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.

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:

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

1) Campo eléctrico generado por una distribución lineal continua 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 lineal continua de carga puede ser calculado cómo se indica.

Caso general

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 .

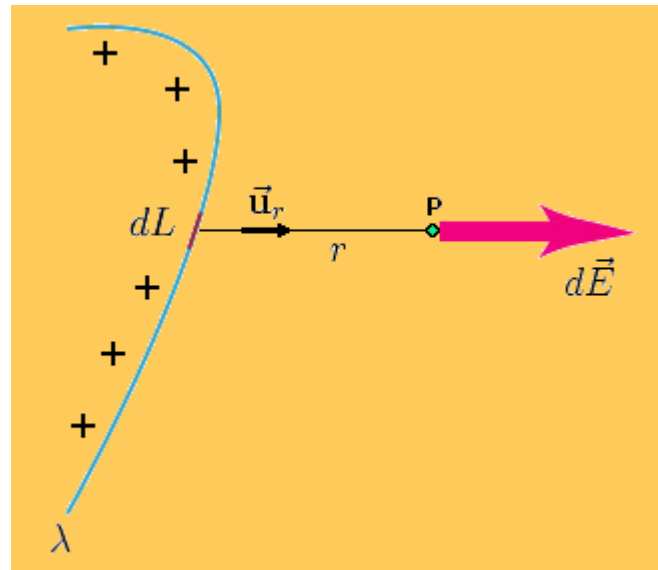


Figura 2.17: Campo eléctrico producido por un elemento dL de una distribución lineal uniforme de carga.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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:

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

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,

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

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

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

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

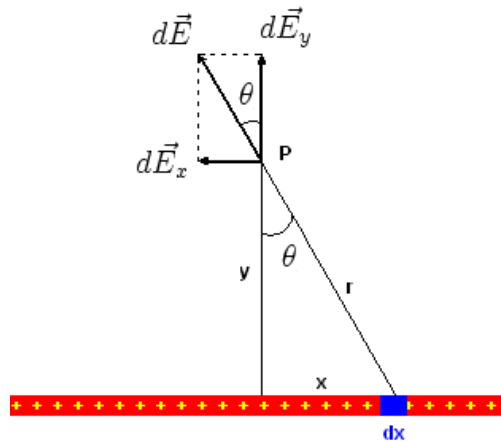


Figura 2.18: Campo eléctrico creado por un elemento dx de una línea infinita de carga.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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:

$$dE_x = -dE \sin\theta$$

y,

$$dE_y = dE \cos\theta$$

El signo menos delante de dE_x indica que dE_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:

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

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:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=+\infty} \cos\theta \frac{y \sec^2\theta d\theta}{x^2+y^2} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=+\infty} \frac{y}{x^2+y^2} \cos\theta \sec^2\theta d\theta \quad (3)$$

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

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

y cuando

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

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:

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

- n) **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.

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:

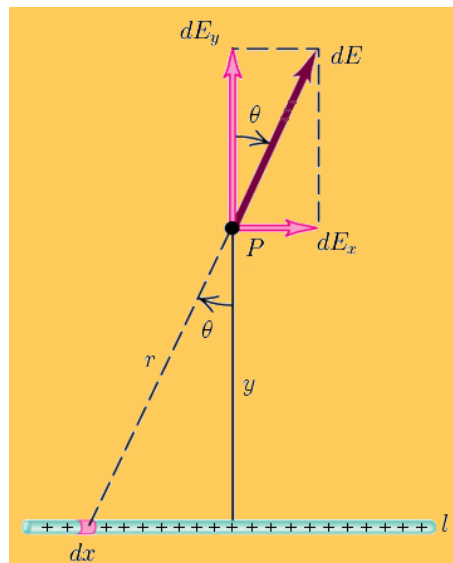


Figura 2.19: Campo eléctrico creado por un elemento dx de una línea de carga de longitud l .

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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

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:

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

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

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

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

En consecuencia

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

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

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

- o) **Campo eléctrico generado por dos hilos paralelos, infinitos y de densidad de carga uniforme**

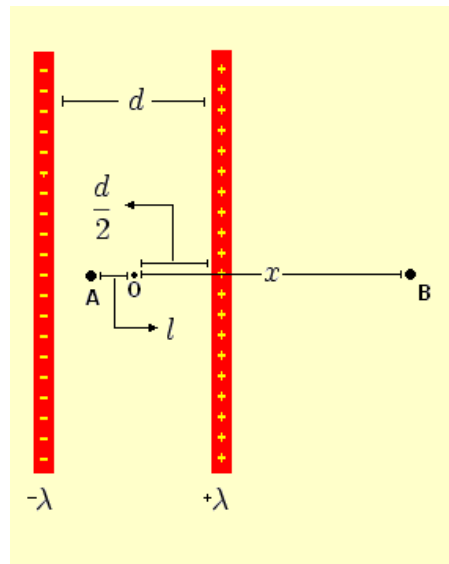


Figura 2.20: Campo eléctrico generado por dos hilos paralelos, infinitos y de densidad de carga uniforme.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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:

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

Operando, la expresión anterior se reduce a:

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

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:

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

Operando, la expresión anterior se reduce a:

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

p) **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:

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

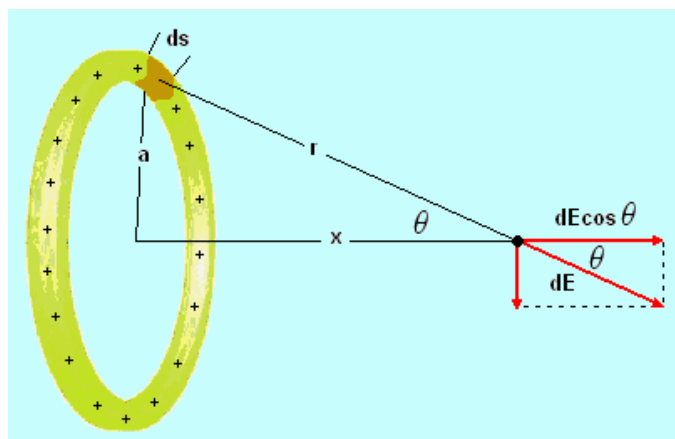


Figura 2.21: Campo eléctrico generado por un anillo de densidad de carga uniforme sobre los puntos de su eje.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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:

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

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:

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

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 .

q) **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.

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:

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

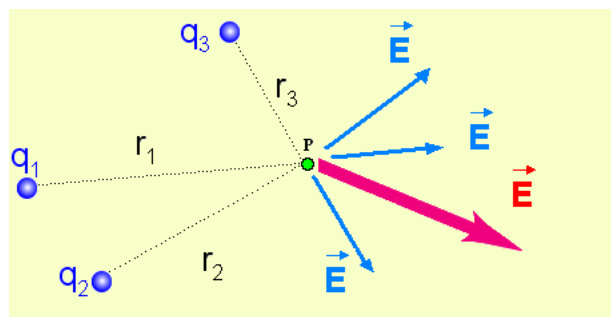


Figura 2.22: Campo eléctrico generado por una distribución discreta de cargas.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

r) **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.

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

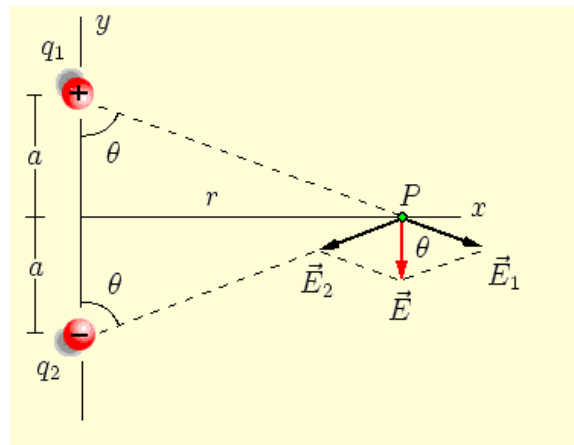


Figura 2.23: Campo eléctrico en los puntos de la bisectriz del eje del dipolo.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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 E_{1y} y 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:

$$E = \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{a^2 + r^2} \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2aq}{(a^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

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

$$E \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(2a)(q)}{r^3}$$

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

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

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

$$E \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$

Campo eléctrico en los puntos del eje del dipolo

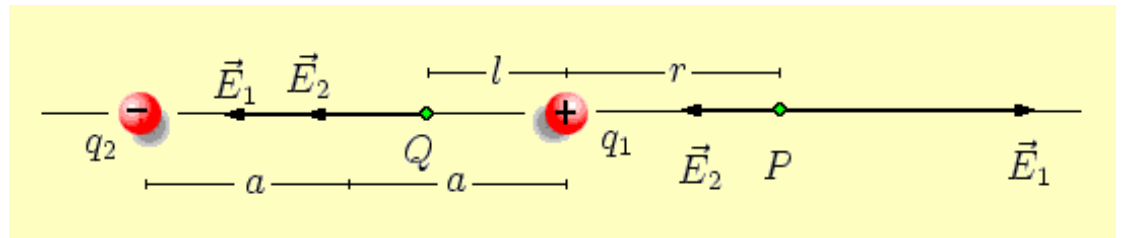


Figura 2.24: Puntos fuera de la línea de unión de las cargas.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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:

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

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

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

y si $r \gg a$:

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

s) **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:

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

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

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

t) **Otros puntos**

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

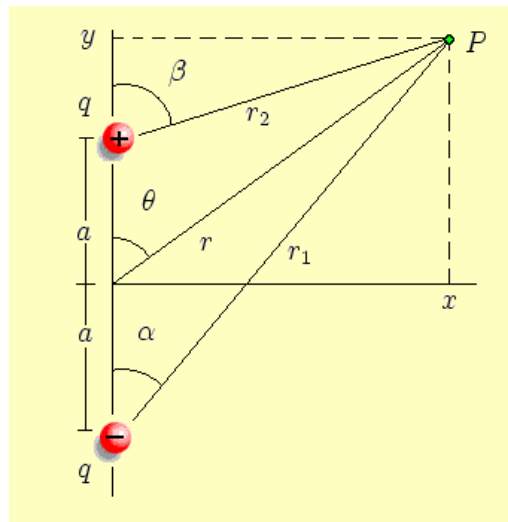


Figura 2.25: Para otros puntos.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

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 x :

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

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

Las componentes y serán:

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

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

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

Sumando se obtiene para la componente 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 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:

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

u) **Campo generado por un cuadrupolo eléctrico lineal en su bisectriz**

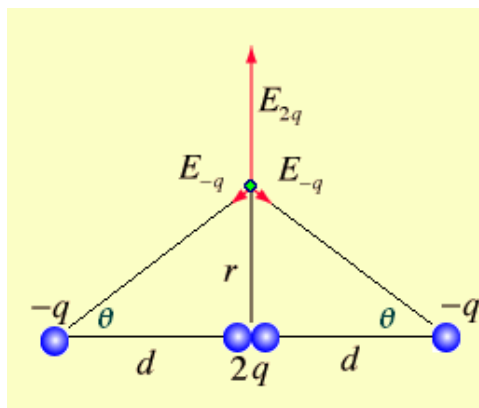


Figura 2.26: Campo generado por un cuadrupolo eléctrico lineal en su bisectriz.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/campo_electrostatico

Un cuadrupolo 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 cuadrupolo 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 cuadrupolo 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 cuadrupolo, 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 cuadrupolo, 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 cuadrupolo se reduce a:

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

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

2.3. MARCO CONCEPTUAL PARA EL DESARROLLO DE LA MÁQUINA ELECTROSTÁTICA

2.3.1. Autotransformador

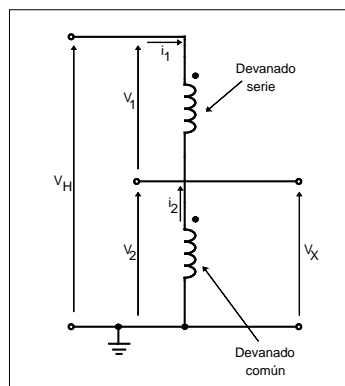


Figura 2.27: Esquema de conexión de un autotransformador.
Fuente: Google, autotransformador, imágenes

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).

Dónde:

- 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.

2.3.2. Transformador de corriente alterna

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.

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.

Funcionamiento:

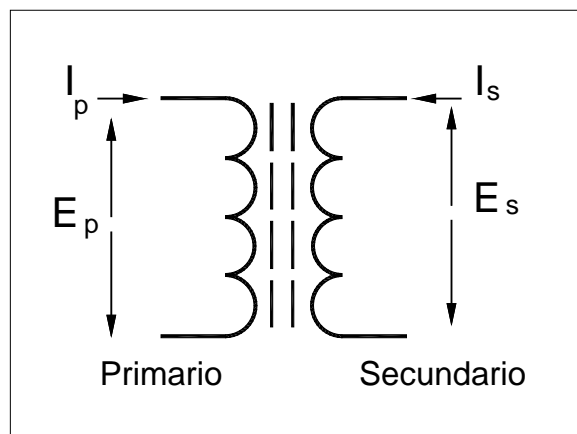


Figura 2.28: Representación esquemática del transformador.
Fuente: Google, transformador, imágenes.

Relación de Transformación

La relación de transformación nos indica el aumento o 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.

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

Dónde:

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

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

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

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

2.3.3. 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

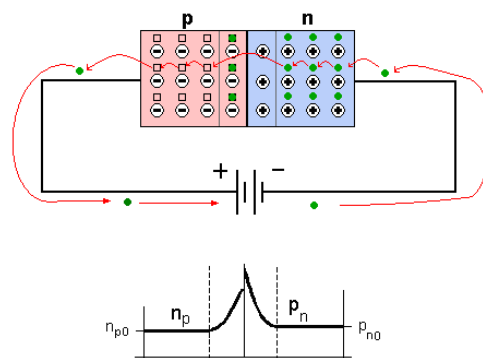


Figura 2.30: Polarización directa de un diodo.

Fuente: Google, diodos, imágenes.

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

- 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.

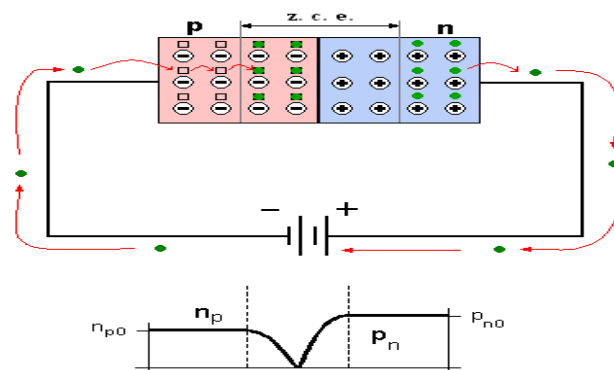


Figura 2.31: Polarización inversa de un diodo.
Fuente: Google, diodos, imágenes.

- 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 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:

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

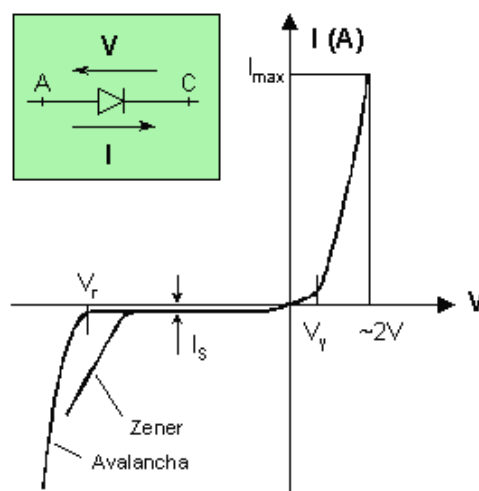


Figura 2.32: Curva característica del diodo.
Fuente: Google, diodos, imágenes.

- **Tensión umbral, de codo o de partida (V_{γ}).**

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:

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

Dónde:

- 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 $1.6 * 10^{-19}$
- 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 Grätz).

Rectificador con dos diodos.

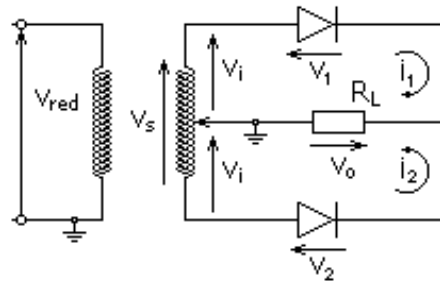


Figura 2.33: Rectificador de onda completa con dos diodos.
Fuente: Google, rectificador de onda completa, imágenes.

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

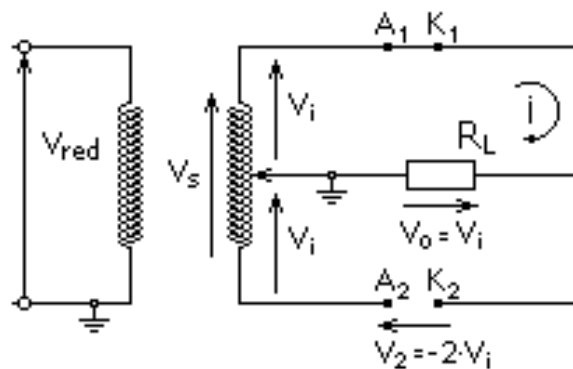


Figura 2.34: Tensión de entrada positiva.
Fuente: Google, rectificador de entrada positiva, imágenes

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

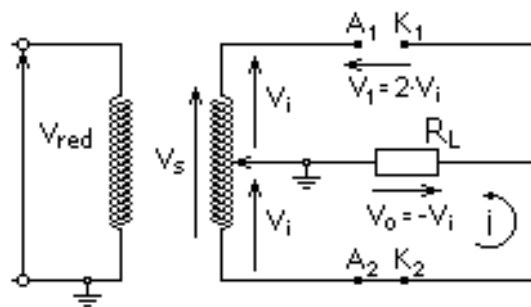


Figura 2.35: Tensión de entrada negativa.

Fuente: Google, rectificador de tensión de entrada negativa, imágenes

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 Grätz 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).

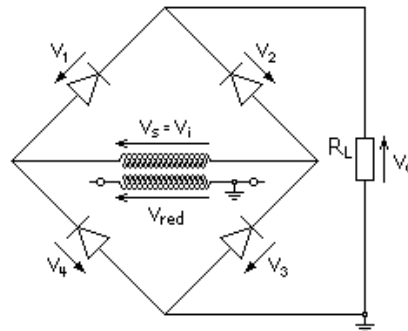


Figura 2.36: Puente de Grätz o Puente Rectificador de doble onda.
Fuente: Google, puente de Grätz, imágenes

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 Grätz.

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 $V_o = V_i - 1,2V$.

2.3.4. 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 superficie 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 llamada capacidad o capacitancia. En el Sistema Internacional de unidades se mide en Faradios (F), siendo un faradio la capacidad de un condensador en el que, sometidas sus armaduras a una diferencia de potencial de un voltio, éstas adquieren una carga eléctrica de un culombio.

La capacidad de un 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:

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

Dónde:

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

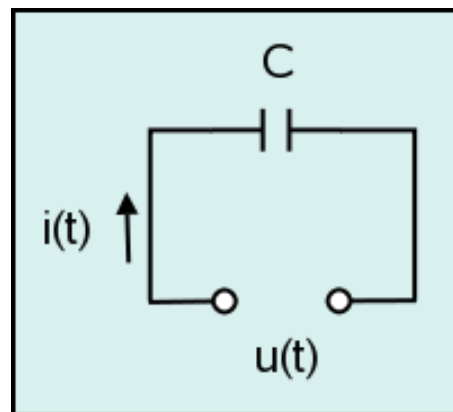


Figura 2.37: Condensador ideal.

Fuente: Google, Condensador ideal, imágenes.

El condensador ideal de la figura 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.

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.

La corriente en el condensador queda adelantada 90° respecto de la tensión aplicada. Considerando un condensador C , como el de la figura, 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 2.38), 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:

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

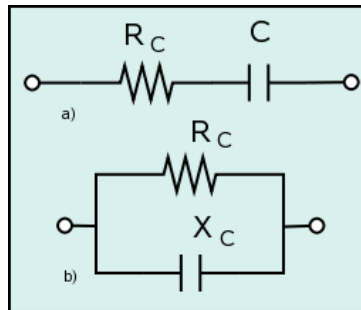


Figura 2.38: Circuitos equivalentes de un condensador en corriente alterna.

Fuente: Google, condensador en corriente alterna, imágenes

y operando matemáticamente:

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

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:

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

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, 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.

Carga

$$V(t) = V_0 \left(1 - e^{-t/RC}\right) \quad \text{e} \quad I(t) = \frac{V_0}{R} \cdot e^{-t/RC}$$

Descarga

$$V(t) = V_0 \cdot e^{-t/RC} \quad \text{e} \quad I(t) = -\frac{V_0}{R} \cdot e^{-t/RC}$$

Dónde:

$V(t)$: Tensión en el condensador.

V_0 : Tensión de la fuente.

$I(t)$: Intensidad de corriente que circula por el circuito.

Constante dieléctrica

La **constante dieléctrica** o **permisividad relativa** ϵ_r de un medio continuo es una propiedad macroscópica de un medio dieléctrico relacionado con la permisividad eléctrica del medio. En comparación con la velocidad de la luz, la rapidez de las ondas electromagnéticas en un dieléctrico es:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la onda electromagnética en el medio con permisividad relativa ϵ_r .

El nombre de constante dieléctrica proviene de los materiales dieléctricos, que son materiales aislantes o muy poco conductores por debajo de una cierta tensión eléctrica llamada tensión de rotura. El efecto de la constante dieléctrica se manifiesta en la capacidad total de un condensador eléctrico. Cuando entre los

conductores cargados o paredes que lo forman se inserta un material dieléctrico diferente del aire (cuya permisividad es prácticamente la del vacío), la capacidad de almacenamiento de la carga del condensador aumenta. De hecho, la relación entre la capacidad inicial C_i y la final C_f vienen dadas por la constante eléctrica:

$$\epsilon_r = \frac{C_f}{C_i} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Donde ϵ es la permisividad eléctrica del dieléctrico que se inserta.

Además el valor de la constante dieléctrica ϵ de un material define el grado de polarización eléctrica de la sustancia cuando ésta se somete a un campo eléctrico exterior. El valor de K es afectado por muchos factores, como el peso molecular, la forma de la molécula, la dirección de sus enlaces (geometría de la molécula) o el tipo de interacciones que presente.

Cuando un material dieléctrico reemplaza el vacío entre los conductores, puede presentarse la polarización en el dieléctrico, permitiendo que se almacenen cargas adicionales.

La magnitud de la carga que se puede almacenar entre los conductores se conoce como capacitancia, y ésta depende de la constante dieléctrica del material

existente entre los conductores, el tamaño, así como de la forma y la separación de los mismos.

Medición de la constante dieléctrica de los materiales

La constante dieléctrica puede ser medida de la siguiente manera, primero medimos la capacidad de un condensador de prueba en el vacío C_i (o en aire si aceptamos un pequeño error), y luego, usando el mismo condensador y la misma distancia entre sus placas, se mide la capacidad con el dieléctrico insertado entre ellas C_f .

La constante dieléctrica puede ser calculada como:

$$\epsilon_r = \frac{C_f}{C_i}$$

Factores de disipación y pérdidas dieléctricas

Cuando aplicamos una corriente alterna a un dieléctrico perfecto, la corriente adelantará al voltaje en 90° , sin embargo debido a las pérdidas, la corriente adelanta el voltaje en solo $90^\circ - \delta$, siendo δ el ángulo de pérdida dieléctrica. Cuando la corriente y el voltaje están fuera de fase en el ángulo de pérdida dieléctrica se pierde energía o potencia eléctrica generalmente en forma de calor.

El factor de disipación está dado por $FD = \tan \delta$ y el factor de pérdida dieléctrica es $FP = K \tan \delta$.

A mayor valor de la constante dieléctrica relativa (K) mejor nivel de conductividad eléctrica.

Constantes dieléctricas y resistencias dieléctricas de diversos materiales a temperatura ambiente.

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 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.

MATERIAL	CONSTANTE DIELECTRICA RELATIVA (ϵ_r)	RESISTENCIA DIELECTRICA E_{max} (kV/mm)
Vacío o Aire	1,00000	----
Aire (seco) (1 atm)	1,00059	3
Aire (100 atm)	1,0548	----
Baquelita	4,9	24
Cuarzo fundido	3,78	8
Vidrio	5 – 10	35
Vidrio Pyrex	5,6	14
Polietileno	2,25	----
Policarbonato	2,8	30
Poliestireno	2,56	24
Teflón	2,1	60
Caucho de neopreno	6,7	12
Nylon	3,4 – 8	14
Papel	3,7 – 7	16
Agua a 20°C	80	----
Aceite de silicón	2,5	15
Mica	3...4,9 ...6	10 – 100
Mylar	3,1	----
Cloruro de Polivinilo	3,18	----
Plexiglás	3,40	40
Neopreno	6,70	12
Germanio	16	----
Glicerina	42,5	----
Aceite de transformador	2,24	12
Poliéster	----	60
Polipropileno	2,25	70
Parafina	2,3	10
Porcelana	7	5,7
Aceite de ricino	4,6	----
Aceite mineral	2,7	----
Alcohol	15-30	----

Tabla 2.1: Valores de la constante dieléctrica relativa y de la resistencia dieléctrica.

Fuente: Google, constante dieléctrica, imágenes.

- **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 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.

2.4. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS

2.4.1. Máquina

Según la RAE (Real Academia Española), es un artificio para aprovechar, dirigir o regular la acción de una fuerza. / Conjunto de aparatos combinados para recibir

cierta forma de energía y transformarla en otra más adecuada o para producir un efecto determinado.

2.4.2. Descarga electrostática

Pérdida de carga eléctrica estática.

2.4.3. Detonador

Que provoca o causa detonación. Artificio con fulminante, que sirve para hacer estallar una carga explosiva.

2.4.4. Detonador eléctrico

Tipo de detonador cuya iniciación es de tipo eléctrico, realizado con una batería o máquina especialmente diseñada para este trabajo.

2.4.5. Detonador no eléctrico

Tipo de detonador cuya iniciación no es de tipo eléctrico, para iniciarlo se usa un accesorio especial.

2.4.6. Dieléctrico

Material que es poco conductor y través del cual se ejerce la inducción eléctrica.

2.4.7. Condensador eléctrico

Sistema de dos conductores, separados por una lámina dieléctrica, que sirve para almacenar cargas eléctricas.

2.4.8. Carga eléctrica

Es una propiedad física e intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante fuerzas de atracción o repulsión entre ellas por la mediación de campos electromagnéticos. La carga eléctrica puede ser positiva o negativa y se mide en Culombios.

2.4.9. Máquina electrostática

Máquina especialmente diseñada para simular descargas electrostática a nivel de laboratorio.

2.4.10. Máquina electrostática modelo humano

Es una máquina diseñada para modelar el comportamiento de una persona que se ha cargado electrostáticamente y sirve como probador, para nuestro caso, de detonadores eléctricos y no eléctricos.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE LA MAQUINA DE DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS

3.1. CONFIGURACION DEL EQUIPO

El equipo de descargas electrostáticas tendrá la configuración como se muestra en el esquema de la figura 3.1.

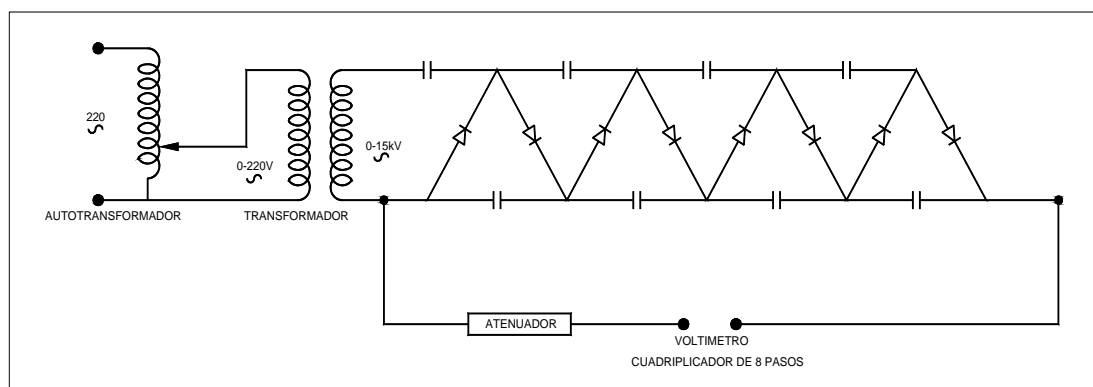


Figura 3.1: Esquema del equipo de descargas electrostáticas.
Fuente: Elaboración propia

La lista de los componentes que lo integran son los siguientes:

- a) Un autotransformador variable monofásico de 0 a 220 VAC.
- b) Un transformador elevador monofásico de 220/15000 VAC.
- c) Diodos de selenio de 24000 VIP.
- d) Un cuadriplicador de voltaje de 8 pasos.
- e) Condensadores de planos de 300, 500 y 2.500 pF/40.000 VDC.
- f) Un atenuador de 1000 M Ω para medición de alto voltaje.
- g) Un multímetro digital de 0 a 1000 VDC y capaz de medir 2000 M Ω .

3.1.1. Características del autotransformador variable monofásico

Para el desarrollo del equipo de descargas electrostáticas, es necesario contar con un transformador variable con las siguientes características:

Voltaje de entrada: 220 VAC

Voltaje de salida variable: 0 a 220 VAC

Eficiencia nominal: 98%

Temperatura de operación: Hasta 50°C

Frecuencia de operación: 60 Hz

Corriente nominal: 3 A

Potencia aparente: 660 VA.

3.1.2. Características del transformador elevador monofásico

El transformador elevador tendrá las siguientes características:

Voltaje del primario: 220 VAC

Corriente del primario: 3 A

Voltaje del secundario: 15000 VAC

Corriente del secundario: 0,044 A

Eficiencia nominal: 98%

Temperatura de operación: Hasta 50°C

Frecuencia de operación: 60 Hz

Potencia aparente: 660 VA

3.1.3. Diodos

Los diodos de selenio, que tienen como característica la de soportar alto voltaje de pico inverso y serán utilizados para la construcción de un rectificador de onda completa y de los multiplicadores de alto voltaje.

Las condiciones de operación de los diodos de selenio, según el manual ECG, son las siguientes:

Tipo ECG	Condiciones de operación			
	Salida DC (Volt)	Entrada pico (Volt)	I_F máx. a 50°C (mA)	Caída voltaje (Volt DC)
504	20000	24000	0,5	400 a 3 mA

Tabla 3.1: Condiciones de operación de los diodos de selenio.
Fuente: Manual ECG.

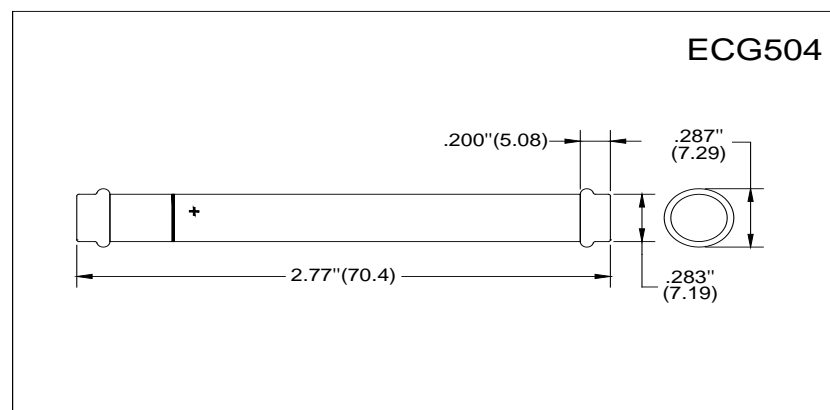


Figura 3.2: Diodo de selenio
Fuente: Manual ECG.

3.1.4. Multiplicador de alto voltaje

Nuestra necesidad es obtener voltajes variables de 0 a 40000 Volt para poder certificar la resistencia a las descargas electrostáticas a la gama de detonadores propuesta en la presente Tesis.

Para poder cumplir con lo solicitado desarrollaremos un cuádruplicador para alto voltaje de 8 pasos con las siguientes características:

Voltaje de entrada (pico a pico): 0 a 15 kV.

Voltaje de Salida: 0 a 60 kV.

Corriente a 60 kV: 1 mA

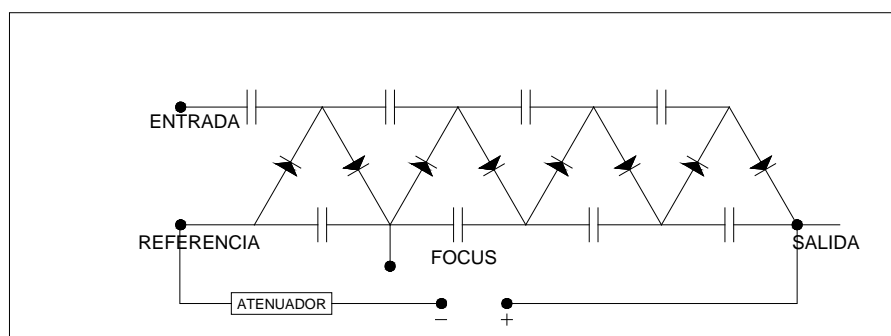


Figura 3.3: Cuadruplicador para alto voltaje de 8 pasos
Fuente: Manual ECG.

3.1.5. Condensadores planos

Para el desarrollo de los condensadores planos se debe tener en cuenta las siguientes relaciones:

La capacitancia del capacitor

$$C = \frac{Q}{V}$$

La intensidad del campo eléctrico entre dos placas:

$$E = \frac{V}{d}$$

A partir de la ley de Gauss:

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

Cuando el dieléctrico es vacío:

$$C_0 = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Para cualquier dieléctrico:

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

La constante dieléctrica se define como:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

C: Capacitancia (Faradio)

Q: Carga en cualquier placa (Coulomb)

V: Diferencia de potencial entre las placas (Volt)

E: Intensidad de campo eléctrico (Volt/metro)

d: Separación entre las placas (metro)

σ : Constante de Boltzmann ($5,670400 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

A: Área de cualquier placa (m^2)

ϵ_0 : Permisividad del vacío ($8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

C_0 : Capacitancia en vacío (Faradio)

ϵ : Permisividad del dieléctrico (F/m)

ϵ_r : Constante dieléctrica relativa

De la Tabla 2.1: Valores de la constante dieléctrica relativa y de la resistencia dieléctrica se toman los valores correspondientes para el Mylar, utilizado para la construcción de los condensadores.

Para el dimensionamiento de los condensadores planos utilizaremos los siguientes datos:

Capacitancia de los condensadores: 300×10^{-12} F, 500×10^{-12} F y 2500×10^{-12} F

Material dieléctrico: Mylar

Constante dieléctrica relativa: 3,1

Permisividad del vacío: $8,85 \times 10^{-12}$ F/m

Separación entre placas: 300×10^{-6} m

Fórmula para el cálculo del área de las placas conductoras:

$$A = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$

Para capacitancia de 300×10^{-12} F:

$$A = \frac{300 \cdot 10^{-12} \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,1} = 3,281 \cdot 10^{-3} m^2 = 32,81 cm^2$$

Para capacitancia de 500×10^{-12} F:

$$A = \frac{500 \cdot 10^{-12} \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,1} = 5,468 \cdot 10^{-3} m^2 = 54,68 cm^2$$

Para capacitancia de 2500×10^{-12} F.

$$A = \frac{2500 \cdot 10^{-12} \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,1} = 0,02734 m^2 = 273,4 cm^2$$

3.1.6. Medidor de alto voltaje

Para medir voltajes superiores a 1000 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.

3.1.6.1 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:

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

3.1.6.2. Divisor resistivo

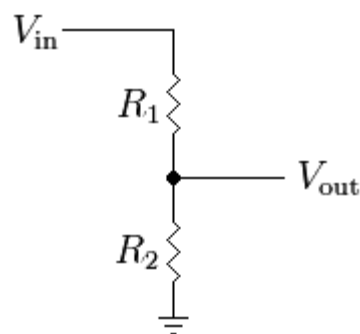


Figura 3.4: Divisor resistivo.
Fuente: Google, divisor resistivo, imágenes

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:

$$V_{in} = I(R_1 + R_2)$$

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:

$$I = \frac{V_{out}}{R_2} = \frac{10^3 V}{10^7 \Omega} = 10^{-4} A$$

El voltaje máximo a medir es 100 000 Volt = V_{in}

Entonces el valor de R_1 será:

$$R_1 = \frac{V_{in}}{I} - R_2$$

$$R_1 = \frac{10^5}{10^{-4}} - 10^7 = 10^9 - 10^7 = 10^6(10^3 - 10^1) = 990 \cdot 10^6 \Omega$$

$$R_1 = 990 \text{ M}\Omega$$

La potencia disipada total será:

$$P = V * I = 10^5 * 10^{-4} = 10W$$

En las tiendas de productos electrónicos venden resistencias de un valor máximo de 20 M Ω y de potencias de ½ y 1 Watt.

Se debe comprar 49 resistencias de 20 M Ω y una de 10 M Ω , de 1 Watt de potencia cada una, y colocarlos en serie para conseguir el atenuador de voltaje.

3.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS ACUMULADORES DE ENERGÍA ELECTROSTÁTICA

En primer lugar describiremos brevemente algunas formas de generación de cargas electrostáticas, el comportamiento como acumulador de energía de una persona de tamaño estándar y otra de porte militar, asimismo de una máquina perforadora utilizada en minería, indicando el valor de sus capacidades en picofaradios.

Después pasaremos a describir las características principales de los detonadores de encendido eléctrico y no eléctrico para luego pasar al plan de ensayos.

3.2.1. Potenciales electrostáticos, en voltios, generados por una persona

Medios para generación de estática	Humedad Relativa 10% a 20%	Humedad Relativa 65% a 90%
Caminar sobre alfombra	35 000 V	1 500 V
Caminar sobre suelo de vinilo	12 000 V	250 V
Persona en mesa de trabajo	6 000 V	100 V
Sobres de vinilo con instrucciones	7 000 V	600 V
Retirar bolsa de plástico de mesa de trabajo	20 000 V	1 200 V
Persona en silla forrada con poliuretano	18 000 V	1 500 V

Tabla 3.2: Potenciales electrostáticos generados por una persona.

Fuente: <http://www.electro-tools.com.ar>

3.2.2. Capacidad en picofaradios de una persona estándar, de porte militar y de una máquina

DESCRIPCION	CAPACIDAD
Persona estándar	300 pF
Persona de porte militar	500 pF
Máquina perforadora	2500 pF

Tabla 3.3: Capacidad de una persona estándar, de porte militar y de una máquina.

Fuente: NTP 311.356-7

3.3. DETONADORES DE ENCENDIDO ELÉCTRICO



Figura 3.5: Detonadores de encendido eléctrico.
Fuente: FAMESA S.A.C.

3.3.1. Aplicación

El detonador eléctrico, está diseñado para ser usado en voladuras de minería a cielo abierto, subterránea y obras civiles, en donde se requiere de una secuencia de salida de los tiros, logrando un mayor control de la voladura a través de una baja dispersión.

3.3.2. Descripción

El detonador eléctrico estándar, corresponde a un detonador de alta potencia (Dispositivo que contiene material altamente explosivo primario que se utiliza para iniciar una secuencia explosiva) capaz de convertir un impulso eléctrico en una detonación.

Los detonadores eléctricos están compuestos por tres partes fundamentales:

- a) Cápsula de aluminio o cobre, que contiene una carga primaria de explosivos, una carga secundaria y un tren de retardo excepto el detonador instantáneo.



Figura 3.6: Cápsula de aluminio.

Fuente: FAMESA S.A.C.

- b) Un elemento inflamador (eléctrico-pirotécnico) alojado en un dispositivo antiestático y soldado a dos alambres conductores.



Figura 3.7: Elemento inflamador.

Fuente: FAMESA S.A.C.

- c) Dos alambres conductores revestidos por un plástico semiconductor.

3.3.3. Recomendaciones generales de uso²²

- a) Dependiendo de la sensibilidad del detonador eléctrico, aplicar la energía necesaria para iniciar la serie.
- b) Siempre usar una fuente de disparo que entregue la energía suficiente al circuito de detonadores eléctricos para una óptima ejecución de voladura.
- c) Nunca manipule o utilice detonadores eléctricos en general, cuando exista en el ambiente presencia de electricidad estática, corrientes vagabundas y/o tormentas eléctricas.

²² FAMESA EXPLOSIVOS SAC

- d) Siempre mantenga los alambres semiconductores del detonador, cables de disparo y circuito de conexión de disparo en cortocircuito. Sólo abrir el circuito para verificar continuidad e iniciar el disparo.
- e) Nunca conecte algún detonador sísmico eléctrico insensible en la misma línea en serie con otros detonadores eléctricos de distinta sensibilidad o distinto fabricante, debido a que pueden presentarse diferencias en las características de disparo y puede ocurrir falla.
- f) Siempre utilice los detonadores eléctricos de acuerdo a las recomendaciones entregadas por el fabricante.

3.3.4. Características de los detonadores eléctricos importados

CARACTERISTICAS ELECTRICAS	SENSIBILIDAD DEL DETONADOR	
	NORMAL	INSENSIBLE
Resistencia del filamento	1,15 ± 0,1 Ohm	0,30 ± 0,05 Ohm
Energía de iniciación	2 ± 1 mJ	31 ± 19 mJ
Corriente máximo de no iniciación	0,25 A (5min)	0,85 A (5min)
Corriente mínima de iniciación	0,5 A	1,5 A
Corriente de disparo recomendado para serie de hasta 5 detonadores	1 A	3 A
Resistencia eléctrica cable de cobre 24 AWG	0,0878 Ohm/m	0,0878 Ohm/m

Tabla 3.4: Características eléctricas de los detonadores eléctricos importados.
Fuente: EXSA

3.3.5. Tipos de detonadores de encendido eléctrico.

Los detonadores de encendido eléctrico existentes en el mercado son de tres tipos:

- a) Sensible
- b) Insensible
- c) Altamente Insensible

3.4. DETONADORES DE ENCENDIDO NO ELÉCTRICO



Figura 3.8: Detonador de encendido no eléctrico.

Fuente: FAMESA S.A.C.

Diseñado por Per Anders Persson en 1960. Es un tubo plástico con un contenido de octógeno aluminizado (HMX) adherido al tubo en su parte interior (adherencia > 95%).

La carga del tubo es aproximadamente 0,015 gramos por metro de tubo. La velocidad de detonación del tubo de choque es de alrededor de 2000 m/s.

Este tipo de detonador es un sistema eficaz de iniciación para en minería subterránea, superficial y obras civiles, que ofrece los beneficios de sincronización sin riesgo, eliminando toda posibilidad de conexiones erróneas. Está formado por los siguientes componentes:

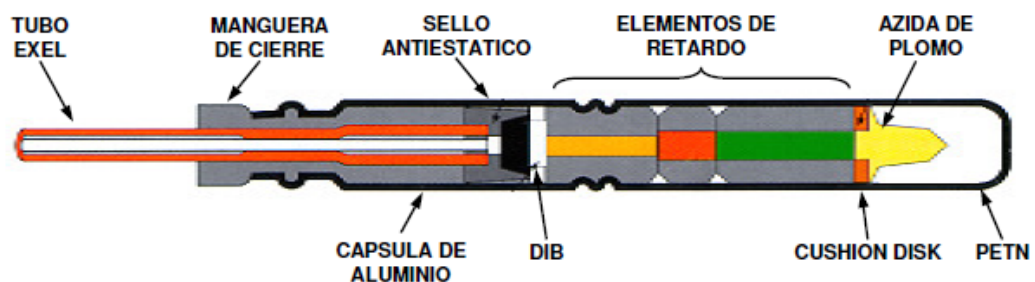


Figura 3.9: Estructura Interna del Detonador de Encendido No Eléctrico.
Fuente: FAMESA S.A.C.

3.4.1. Carga explosiva

El extremo inferior del detonador contiene una carga base de PETN y una carga primaria de Azida de Plomo lo que le confiere una potencia equivalente a fuerza N°12.

3.4.2. Disco amortiguador

Está diseñado para otorgar una gran resistencia al impacto y a la detonación por simpatía.

3.4.3. Tren de retardo

Formado por uno, dos o tres elementos pirotécnicos. En el mercado se ofrece dos escalas: período corto, período largo.

3.4.4. Amortiguador de retraso de encendido

Acelerador de energía, permite una mayor precisión y evita el problema de reversión de la onda de choque.

3.4.5. Sello antiestático

Elemento fundamental para eliminar el riesgo de iniciación por descargas estáticas accidentales.

3.4.6. Tubo de choque

Está fabricado con un material termoplástico de alta resistencia mecánica, la cual en su interior está cubierta uniformemente por una sustancia reactiva que al ser activada conduce una onda de choque cuya presión y temperatura son suficientes para iniciar al fulminante de retardo.

En uno de sus extremos está sellado por ultrasonido y en el otro extremo ensamblado con el fulminante de retardo.

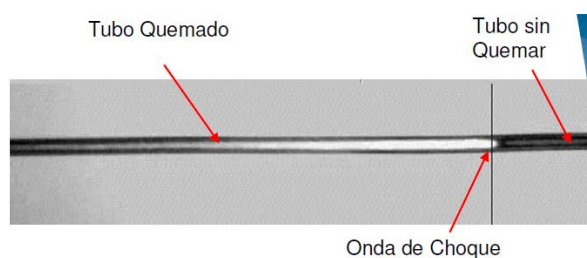


Figura 3.10: Tubo de choque.
Fuente: FAMESA S.A.C.

3.4.7. Características técnicas

3.4.7.1. Del fulminante de retardo

Diámetro (mm)	7,3
Longitud (mm)	60/68/88/92
Prueba de Esopo	11,0
Diámetro de perforación (mm)	
Volumen Trauzl (cm³)	34
Resistencia al impacto 2kg/1m	No detona

Tabla 3.5: Características técnicas del fulminante de retardo.
Fuente: FAMESA S.A.C.

3.4.7.2. De la manguera FANEL

Material	Termoplástico flexible y de gran resistencia mecánica
Diámetro (mm)	3,3
Longitud (m)	4,0/4,2/4,8/12/15/18
Resistencia a la tracción (kg)	18
Velocidad de onda (m/s)	2000 ± 200

Tabla 3.6: Características técnicas de la manguera Fanel.

Fuente: FAMESA S.A.C.

3.5. DISPOSICIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYO

El equipo de ensayo a utilizar para certificar la resistencia a descargas de energía eléctrica estática de detonadores de encendido eléctrico y no eléctrico utilizados en minería tendrá la disposición como se muestra en la figura.

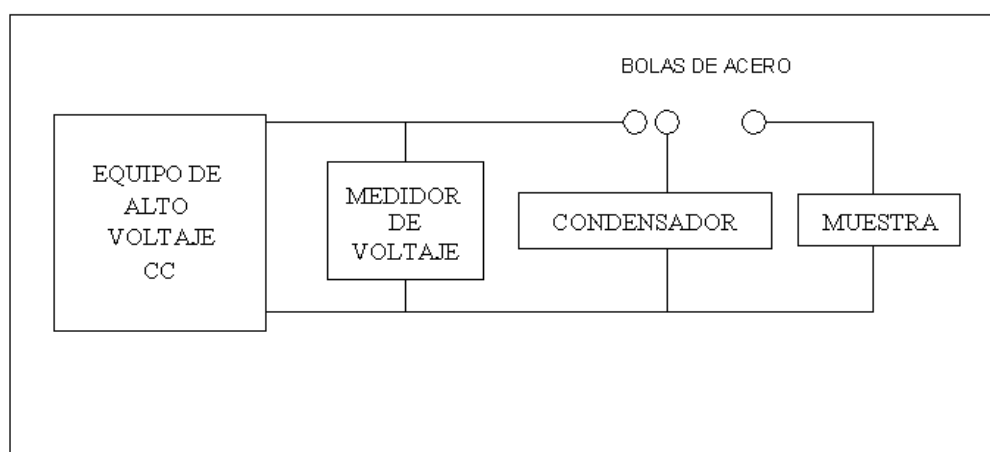


Figura 3.11: Disposición del equipo de ensayo.

Fuente: Elaboración propia

El equipo de alto voltaje será de tipo variable (0 a 40kV) en DC, proporcionará la energía necesaria al condensador elegido para el ensayo (300pF/40kV, 500pF/40kV y 2500pF/40kV), y la muestra será ubicada en un ambiente construido de concreto armado y una poza con arena donde estará ubicada.

Para realizar el ensayo, primero se debe cargar el condensador, para lo cual las bolas de acero del equipo de alto voltaje y del condensador estarán unidas y el voltaje de carga será medido con el multímetro enseriado con el atenuador.

Una vez que el condensador se ha cargado, esta energía debe ser descargada sobre la muestra colocada para el ensayo. Para ello será necesario unir las bolas de acero del condensador con la bola de acero de la muestra.

Se tomará nota del resultado de ensayo y se procederá a ensayar una nueva muestra.

CAPÍTULO 4

CONFIGURACIONES DE MANIPULACIÓN Y PLAN DE ENSAYOS DE DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE DETONADORES UTILIZADOS EN MINERÍA

4.1. CONFIGURACIONES DE MANIPULACIÓN DE DETONADORES DE ENCENDIDO ELÉCTRICO

a) Configuración de manipulación A

Se conecta el cuerpo del detonador al polo negativo del condensador y los terminales cortocircuitados al polo positivo, descargando así la energía almacenada en el condensador.

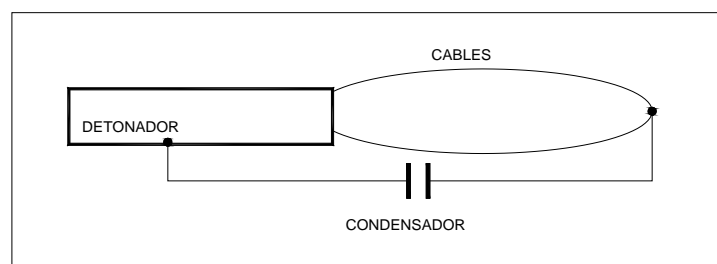


Figura 4.1: Configuración de manipulación A.
Fuente: Elaboración propia.

b) Configuración de manipulación B

Se conecta el polo negativo del condensador a la superficie de uno de los cables del detonador (sin perforar el forro) a aproximadamente 5 cm del engargolado, y los terminales cortocircuitados al polo positivo, descargando así la energía almacenada en el condensador.

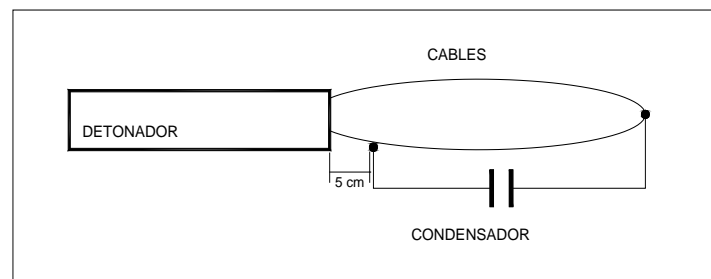


Figura 4.2: Configuración de manipulación B.
Fuente: Elaboración propia.

c) Configuración de manipulación C

Se conecta el polo negativo del condensador al cuerpo del detonador y uno de los cables al polo positivo, descargando así la energía almacenada en el condensador.

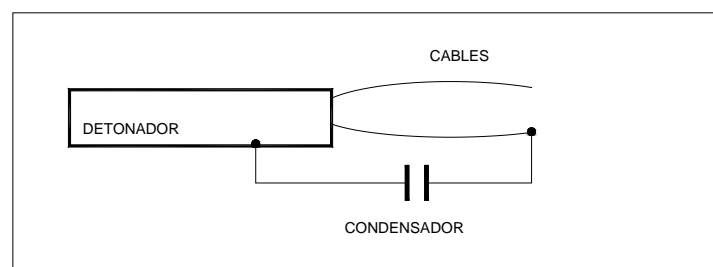


Figura 4.3: Configuración de manipulación C.
Fuente: Elaboración propia.

d) Configuración de manipulación D

Se conectan los cables del detonador a los polos negativo y positivo del condensador, descargando así la energía almacenada en ella.

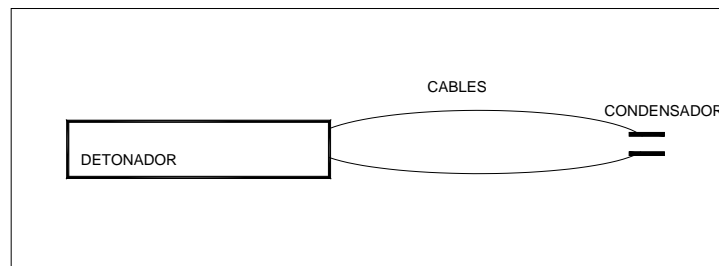


Figura 4.4: Configuración de manipulación D.

Fuente: Elaboración propia.

Se ha realizado el diseño de condensadores para poder realizar los ensayos tomando en cuenta que una persona estándar puede ser representada por un condensador de 300pF, una persona de porte militar puede ser representada por un condensador de 500pF y máquina perforadora puede ser representada por un condensador de 2500pF.

A continuación se presentan los cuadros de plan de ensayos de acuerdo al tipo de detonador.

4.2. PLAN DE ENSAYOS DE DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DETONADORES DE ENCENDIDO ELÉCTRICO

4.2.1. Detonadores de encendido eléctrico sensible

Para este tipo de detonadores se ha efectuado ensayos con condensadores de 300pF/40kV y 500pF/40kV, bajo las siguientes condiciones:

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	17000	300	0,043
B	17000	300	0,043
C	17000	300	0,043
D	17000	300	0,043

Tabla 4.1: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico sensible con condensador de 300pF.

Fuente: Elaboración propia.

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	17000	500	0,0723
B	17000	500	0,0723
C	17000	500	0,0723
D	17000	500	0,0723

Tabla 4.2: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico sensible con condensador de 500pF.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Detonadores de encendido eléctrico insensible

Para este tipo de detonadores sólo se han realizado mediciones de resistencia a descargas electrostáticas con el condensador de 2500pF/40kV, en las siguientes condiciones:

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	8000	2500	0,080
B	8000	2500	0,080
C	7000	2500	0,061
D	7000	2500	0,061

Tabla 4.3: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico insensible con condensador de 2500pF.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Detonadores de encendido eléctrico altamente insensible

Para este tipo de detonador se han realizado los ensayos con el condensador de 2500pF/40kV, en las siguientes condiciones.

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	30000	2500	1,125
B	30000	2500	1,125
C	30000	2500	1,125
D	30000	2500	1,125

Tabla 4.4: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico altamente insensible con condensador de 2500pF.

Fuente: Elaboración propia

4.3. CONFIGURACIONES DE MANIPULACIÓN DE DETONADORES INICIADOS MEDIANTE UN TUBO DE CONDUCCIÓN DE ONDA DE DETONACIÓN

a) Configuración de manipulación A

Se corta 500 mm de longitud de manguera, medida desde la superficie del retardo, y se conecta el cuerpo del detonador al polo negativo del condensador y se introduce por el tubo un alambre de cobre de 1 mm de diámetro, hasta que quede a 450 mm de distancia de la superficie del retardo, y este alambre se coloca al polo positivo del condensador, descargando así la energía almacenada en ella.

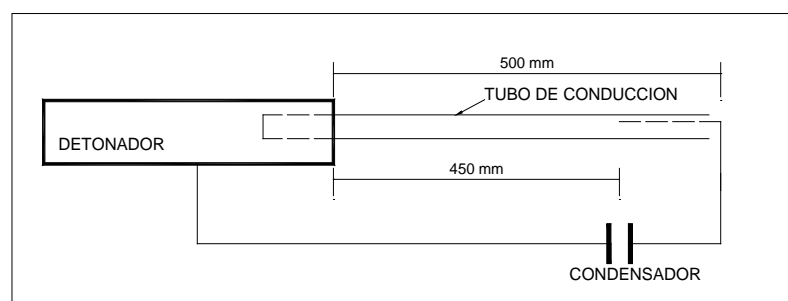


Figura 4.5: Configuración de manipulación A.
Fuente: Elaboración propia.

b) Configuración de manipulación B

Se corta 500 mm de longitud de manguera, medida desde la superficie del retardo, y se conecta el polo negativo del condensador a la superficie de la manguera a una

distancia de 300 mm del punto final de la manguera. Se introduce por el tubo un alambre de cobre de 1 mm de diámetro, hasta que quede a 450 mm de distancia de la superficie del retardo, existiendo por lo tanto una separación de 250 mm entre los terminales de los alambres de conexión, y este alambre se coloca al polo positivo del condensador, descargando así la energía almacenada en ella.

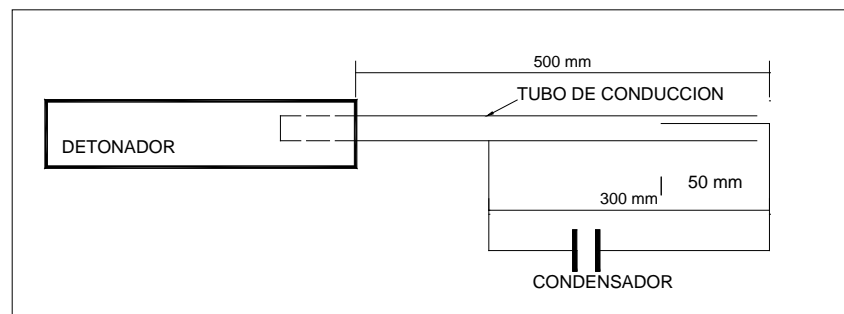


Figura 4.6: Configuración de manipulación B.
Fuente: Elaboración propia.

c) Configuración de manipulación C

Se corta 500 mm de longitud de manguera, medida desde la superficie del retardo, y se perfora la manguera con un alfiler a una distancia de 95 mm del punto final de la manguera, conectando dicho alfiler al polo negativo del condensador, luego se introduce por el tubo un alambre de cobre de 1 mm de diámetro, hasta que quede a 450 mm de distancia de la superficie del retardo, y separado de la punta del alfiler a 45 mm de distancia, finalmente este alambre se coloca al polo positivo del condensador, descargando así la energía almacenada en ella.

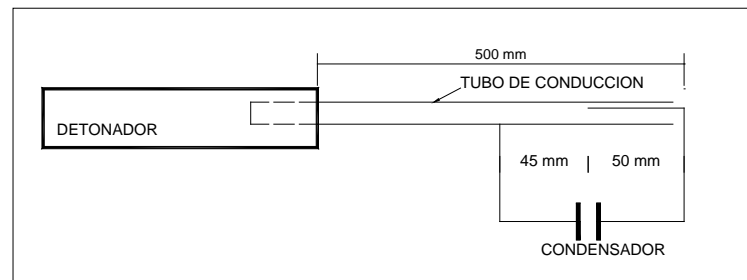


Figura 4.7: Configuración de manipulación C.
Fuente: Elaboración propia.

d) Configuración de manipulación D

Se corta 500 mm de longitud de manguera, medida desde la superficie del retardo, y se conecta el cuerpo del detonador al polo negativo del condensador y se introduce por el tubo un alambre de cobre de 1 mm de diámetro, hasta que quede a 25 mm de distancia de la superficie del retardo, y este alambre se coloca al polo positivo del condensador, descargando así la energía almacenada en ella.

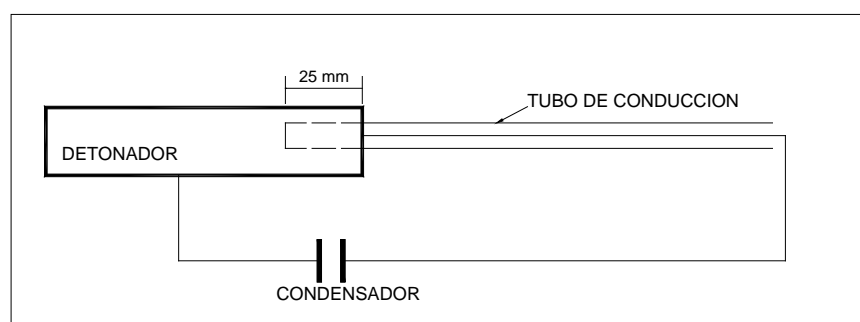


Figura 4.8: Configuración de manipulación D.
Fuente: Elaboración propia.

4.4. PLAN DE ENSAYOS DE DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DETONADORES INICIADOS MEDIANTE UN TUBO DE CONDUCCIÓN DE ONDA DE DETONACIÓN

Por ser los detonadores iniciados mediante un tubo de conducción de onda de detonación, altamente insensibles, de acuerdo a los fabricantes, se realizarán ensayos de descarga de energía electrostática sólo con el condensador de 2500 pF y con voltaje de 40000 Volt.

A continuación se presenta el cuadro de plan de ensayos.

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	40000	2500	2
B	40000	2500	2
C	40000	2500	2
D	40000	2500	2

Tabla 4.5: Plan de ensayos para detonadores iniciados mediante un tubo de conducción de onda de detonación con condensador de 2500pF.

Fuente: Elaboración propia

Para todos los ensayos la energía descargada sobre el producto estará regida por la ecuación:

$$E = \frac{C V^2}{2}$$

Dónde:

E: Energía en Joule

C: Capacidad en Faradio

V: Voltaje en Volt.

4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO

4.5.1. Análisis costo beneficio

El análisis costo beneficio de esta Tesis está enfocado al conocimiento teórico y práctico de la energía electrostática, así como la producción de conocimiento para la Universidad y estar al nivel de centros de investigación como ESDA de Estados Unidos de América y BS de Europa.

4.5.1.1. 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.

Los precios están en soles y referidos a Junio del 2013.

METRADO BASE			
Proyecto	Desarrollo de un equipo de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería		
Proyectistas	Oswaldo Morla Morales Taquiri – Serafín Filomeno Sosa Barrera		
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	Multímetro digital CIE, series 804655, 850384	Unidad	2,00
2.02	Condensador de 300pF/40kV.	Unidad	1,00
2.03	Condensador de 500pF/40kV.	Unidad	1,00
2.04	Condensador de 2500pF/40kV.	Unidad	1,00
2.05	Cámara Fotográfica	Unidad	1,00
2.06	Variador de voltaje 0 a 220 VCA	Unidad	1,00
2.07	Transformador elevador 220/15000 VAC	Unidad	1,00
2.08	Rectificador de voltaje con diodos de Selenio	Unidad	1,00
2.09	Atenuador de voltaje de 1000 Megaohm	Unidad	1,00
2.10	Bolas de acero de 20 mm de diámetro	Unidad	2,00
2.11	Bolas de acero de 50 mm de diámetro	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	Resistencia de detonadores de encendido eléctrico Sensible con Condensador de 300pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.	Equipo	4,00
4.02	Resistencia de detonadores de encendido eléctrico Sensible con Condensador de 500pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.	Equipo	4,00
4.03	Resistencia de detonadores de encendido eléctrico Insensible con Condensador de 2500pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.	Equipo	4,00
4.04	Resistencia de detonadores de encendido eléctrico Altamente Insensible con Condensador de 2500pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.	Equipo	4,00
4.05	Resistencia de detonadores de encendido no eléctrico con Condensador de 2500pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.	Equipo	4,00

Tabla 4.6: Metrado base.
Fuente: Elaboración propia.

Con el metrado base y los precios averiguados en el mercado local se establece el presupuesto base. En cuanto al costo de las pruebas se ha considerado el conocimiento especializado del tema y el costo de oportunidad.

4.5.1.2. Presupuesto base

PRESUPUESTO BASE						
Proyecto	Desarrollo de un equipo de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería					
Proyectistas	Oswaldo Morla Morales Taquiri – Serafín Filomeno Sosa Barrera					
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	500,00	500,00	
1.02	Trazo y replanteo	Global	1,00	200,00	200,00	
1.03	Transporte de materiales	Global	1,00	300,00	300,00	
1.04	Trabajos de Electricidad	Global	1,00	200,00	200,00	1200,00
2.00	EQUIPOS					
2.01	Multitester digital CIE, series 804655, 850384	Unidad	2,00	300,00	600,00	
2.02	Condensador de 300pF/40kV.	Unidad	1,00	240,00	240,00	
2.03	Condensador de 500pF/40kV.	Unidad	1,00	400,00	400,00	
2.04	Condensador de 2500pF/40kV.	Unidad	1,00	500,00	500,00	
2.05	Cámara Creative Web Cam Go	Unidad	1,00	600,00	600,00	
2.06	Variador de voltaje en CA	Unidad	1,00	490,00	490,00	
2.07	Transformador elevador 220/15000	Unidad	1,00	700,00	700,00	
2.08	Rectificador de voltaje	Unidad	1,00	390,00	390,00	
2.09	Atenuador de voltaje de 1000 Megaohm	Unidad	1,00	360,00	360,00	
2.10	Bolas de acero de 20 mm de diámetro	Unidad	2,00	50,00	100,00	
2.11	Bolas de acero de 50 mm de diámetro	Unidad	2,00	80,00	160,00	4540,00
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	100,00	100,00	
3.04	Resistencia de 20 Mega ohm	Unidad	100,00	0,50	50,00	
3.05	Llave termo magnética	Unidad	1,00	50,00	50,00	430,00
4.00	PRUEBAS					
4.01	Resistencia de detonadores de encendido eléctrico Sensible con Condensador de 300pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.	Equipo	4,00	150,00	600,00	
4.02	Resistencia de detonadores de encendido eléctrico	Equipo	4,00	150,00	600,00	

	Sensible con Condensador de 500pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.					
4.03	Resistencia de detonadores de encendido eléctrico Insensible con Condensador de 2500pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.	Equipo	4,00	150,00	600,00	
4.04	Resistencia de detonadores de encendido eléctrico Altamente Insensible con Condensador de 2500pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.	Equipo	4,00	150,00	600,00	
4.05	Resistencia de detonadores de encendido no eléctrico con Condensador de 2500pF/40kV, de acuerdo a las configuraciones A, B, C, D establecidas.	Equipo	4,00	150,00	600,00	
						3000,00
Costo Directo Total						9170,00
Gastos Generales, Administración y Dirección 10%						917,00
Utilidad 10%						917,00
Subtotal						11004,00
I.G.V. 18%						1980,72
TOTAL DE PRESUPUESTO (NUEVOS SOLES)						12984,72
TOTAL DE PRESUPUESTO (DOLARES AMERICANOS)						4637,40
TIPO DE CAMBIO (USA 1=2.80)						

Tabla 4.7: Presupuesto base.
Fuente: Elaboración propia.

La máquina de descargas electrostática fue utilizada en forma intensiva en las diferentes configuraciones de manipulación para determinar la resistencia de detonadores de encendido eléctrico utilizados en minería (sensible, insensible y altamente insensible), y también para determinar la resistencia de detonadores iniciados mediante un tubo de conducción de onda de detonación, y habiendo presentado un régimen de funcionamiento óptimo

El costo directo total es relativamente bajo (USA\$4637,40), justificándose la inversión por los beneficios científicos y económicos a obtenerse, mediante el uso de este equipamiento.

CAPÍTULO 5

ANALISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACION DE HIPÓTESIS

5.1. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1.1. Referido al nivel de voltaje del equipo de descargas electrostáticas para la determinación de la resistencia de detonadores utilizados en minería.

Durante los ensayos en laboratorio se ha comprobado el correcto funcionamiento del nivel de voltaje del equipo de descargas electrostáticas propuesto y por lo tanto se ha cumplido el objetivo de la investigación.

5.1.2. Referido a la capacidad de los condensadores del equipo de descargas electrostáticas para determinación de la resistencia de detonadores utilizados en minería.

Durante los ensayos en laboratorio los condensadores propuestos para la simulación de personas y máquinas han respondido a las expectativas planteadas en la investigación.

5.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La hipótesis planteada para el desarrollo de esta tesis ha sido cumplida a cabalidad como se demuestra en las tablas de evaluación de los detonadores:

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	17000	300	0,043
B	17000	300	0,043
C	17000	300	0,043
D	17000	300	0,043

Tabla 5.1: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico sensible con condensador de 300pF.

Fuente: Elaboración propia.

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	17000	500	0,0723
B	17000	500	0,0723
C	17000	500	0,0723
D	17000	500	0,0723

Tabla 5.2: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico sensible con condensador de 500pF.

Fuente: Elaboración propia.

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	8000	2500	0,080
B	8000	2500	0,080
C	7000	2500	0,061
D	7000	2500	0,061

Tabla 5.3: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico insensible con condensador de 2500pF.

Fuente: Elaboración propia.

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	30000	2500	1,125
B	30000	2500	1,125
C	30000	2500	1,125
D	30000	2500	1,125

Tabla 5.4: Plan de ensayos para detonadores de encendido eléctrico altamente insensible con condensador de 2500pF.

Fuente: Elaboración propia

CONFIGURACION DE MANIPULAC.	VOLTAJE (VOLT)	CONDENSADOR (pF)	ENERGÍA (Joule)
A	40000	2500	2
B	40000	2500	2
C	40000	2500	2
D	40000	2500	2

Tabla 5.5: Plan de ensayos para detonadores iniciados mediante un tubo de conducción de onda de detonación con condensador de 2500pF.

Fuente: Elaboración propia.

En las que se varió el nivel de voltaje de la máquina y la capacidad de los condensadores y por ende el nivel de energía lográndose determinar la resistencia de los detonadores utilizados en minería.

CONCLUSIONES

- 1) El Perú es un país minero, en la actualidad tiene 51 proyectos en desarrollo alcanzando una inversión aproximada de US\$ 64,000 millones, por lo que tiene mucho personal laborando en sus instalaciones, así mismo cuenta con inversiones importantes en maquinaria y equipo que debe cuidar.
- 2) La energía electrostática es uno de los grandes problemas que debe resolver la industria minera, la cual se presenta en las diferentes etapas del proceso de exploración, explotación, almacenaje y manipulación de diferentes productos principalmente los materiales pirotécnicos.
- 3) El desarrollo de una máquina de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de los detonadores utilizados en minería contribuirá a evitar problemas de seguridad en esa actividad.
- 4) Se han determinado las variables que influyen en la operatividad de los detonadores, se ha realizado las pruebas pertinentes dentro de los rangos que establecen las normas internacionales para estos casos, habiendo obtenido resultados óptimos.

- 5) En este trabajo se muestran también los daños que pueden sufrir los detonadores utilizados en minería en las diferentes configuraciones de su manipulación, tanto humana como con las máquinas de perforación.

- 6) Los costos de la máquina son relativamente bajos comparados con los beneficios que brindará a la actividad minera.

RECOMENDACIONES

- 1) Las empresas mineras y las entidades de gobierno deben preocuparse, por proteger el bienestar y la vida las personas así como las de sus inversiones en la actividad minera.
- 2) Para resolver el problema de la energía electrostática en la minería las empresas deberán tomarla muy en serio y por lo tanto deben buscar formas de evitarla, igualmente los organismos del estado tienen un rol importante que cumplir.
- 3) También deben crearse más organismos externos a la minería a quienes se pueda acudir para certificar sus productos, así como recibir asesoramiento técnico especializado.
- 4) Los ambientes requeridos para los ensayos de operatividad de la máquina deben ser dos, uno para la máquina de descargas y el otro para la ubicación de los detonadores, ambos construidos en material de concreto armado.

- 5) Se debe tener mucho cuidado y considerar todos los sistemas de protección posibles durante las pruebas de ensayo, tomando en cuenta siempre las tolerancias de tiempo de por lo menos tres minutos para concluir cada prueba.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><u>PROBLEMA GENERAL</u></p> <p>¿Cómo el desarrollo de una máquina de certificación de descargas electrostáticas ayudará a la determinación de la resistencia de detonadores utilizados en minería?</p> <p><u>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</u></p> <p>-¿Cómo el nivel de voltaje de una máquina de descargas electrostáticas ayudará a determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería?</p> <p>- ¿Cómo la capacidad de los condensadores ayudará a determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería?</p>	<p><u>OBJETIVO GENERAL</u></p> <p>Desarrollar un equipo de certificación de descargas electrostáticas para determinar la resistencia de detonadores utilizados en minería</p> <p><u>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</u></p> <p>- Determinar la resistencia del detonador mediante el nivel de voltaje del equipo de descargas electrostáticas</p> <p>- Determinar la resistencia del detonador mediante la capacidad de los condensadores</p>	<p><u>HIPÓTESIS GENERAL:</u></p> <p>Mediante el desarrollo de una máquina de certificación de descargas electrostáticas se logrará determinar la resistencia de detonadores.</p> <p><u>HIPOTESIS ESPECÍFICAS</u></p> <p>-Mediante el nivel de voltaje del equipo de descargas electrostáticas se logrará determinar la resistencia del detonador</p> <p>-Mediante la capacidad de los condensadores se logrará determinar la resistencia del detonador..</p>	<p><u>Variable Independiente:</u></p> <p>(X)</p> <p>X: Desarrollo de una máquina de certificación de descargas electrostáticas.</p> <p><u>Variable Dependiente :</u></p> <p>(Y)</p> <p>Y: Determinación de la resistencia del detonador</p>	<p>X1 =VOLTAJE</p>	<p>Niveles de voltaje : De 01 Voltio a 40 kilovoltios</p> <p><u>-Capacidad de condensadores:</u>De :300/500/2500 pF (picofaradios)</p>	<p><u>TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN:</u></p> <p>Exploratoria y Correlacional</p> <p><u>DISEÑO: Experimental</u></p> <p><u>POBLACIÓN Y MUESTRA:</u></p>

BIBLIOGRAFIA

1. Empresa de Fabricación de Explosivos. (2013). FAMESA S.A.C. Lima. Perú
2. www.mem/minería/estadística, Ministerio de Energía y Minas. (2015). Lima Perú.
3. BUNGE, M. (1970).La Investigación Científica.
4. **Eusebio Sguario**, Dell'elettricismo, o sia delle forze elettriche de' corpi svelate dalla fisica sperimentale, Venecia, 1746. Disponible en:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Electrostatica>
5. http://es.wikipedia.org/wiki/Generador_de_Van_de_Graaff
6. <http://web.mit.edu/>
7. http://es.wikipedia.org/wiki/Maquina_de_Wimshurst
8. <http://es.wikipedia.org/wiki/Electroforo>
9. ESDA.org.
10. <http://europa.eu.int/comm/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/>
11. **Núñez Carrillo Fernando Augusto**. Tesis “Diseño, construcción y evaluación de simulador variable de cargas estáticas para pruebas de detonadores de iniciación eléctrica y no eléctrica utilizados en minería”. 1994.
12. **Enrique Montero Montero**. Una introducción al fenómeno de descarga electrostática en componentes electrónicos. Universidad de Cádiz.

13. **Norma Técnica Peruana NTP 311.356-7:** Explosivos y accesorios de voladura. Detonadores Eléctricos. 2007.
14. **Department Of Defense USA.** Electrostatic Discharge Control Handbook for Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies, and Equipment (Excluding Electrically – Initiated Explosives Devices). 2 May 1980.

ANEXOS

Electrostática industrial

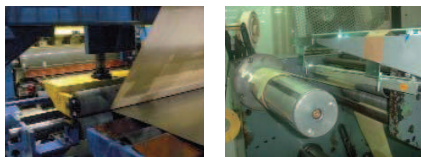
Soluciones electrostáticas para el sector industrial

Eliminadores de electrostática sin aire.....	4
Eliminadores de electrostática con aire	6
Eliminadores de electrostática con aire comprimido	8
Sistemas de limpieza electrostática	9
Eliminadores de electrostática especiales	12
Unidades de alimentación	13
Generadores de carga electrostática	14

Introducción a la electrostática industrial

Soluciones electrostáticas para industria del plástico, artes gráficas, embalaje, etiquetado, industria farmacéutica, automóvil...

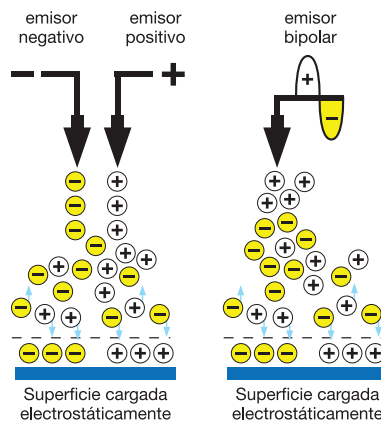
La carga electrostática se produce principalmente por fricción, mecanismo inherente a la mayoría de procesos industriales. Esta carga electrostática produce una fuerza que se traduce, en la práctica, en problemas que afectan a la productividad. Para evitarlo hay diversas técnicas siendo la principal, cuando se trata de plásticos, la ionización. Por otro lado la carga electrostática no siempre representa problemas productivos, en ocasiones su aplicación es utilizada de forma eficaz para fijar temporalmente dos superficies. Como ejemplos de esta técnica son el etiquetaje en molde y la fijación de láminas decorativas en tableros o láminas de protección en superficies metálicas.



Este capítulo presenta la extensa gama de equipos **electrostática** adecuados para optimizar la solución en función de las características del entorno de su empresa: eliminadores, sistemas de limpieza, unidades de alimentación, generadores de carga...

Eliminación de carga electrostática mediante ionización

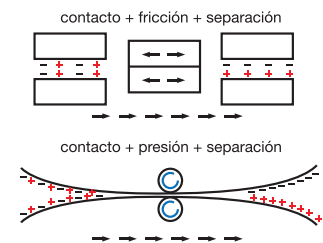
Los eliminadores de electrostática generan iones de ambas polaridades y los proyectan sobre la superficie que se pretende neutralizar, donde se recombinan los de signos opuestos y se rechazan los del mismo signo.



Es importante utilizar un eliminador de electrostática adecuado y verificar que su rendimiento no disminuya con el tiempo. Recomendamos utilizar el comprobador de liminadores Cod. 990.10721. Ver el capítulo Instrumentación electrostática.

Generación de carga electrostática

Los procesos de contacto y separación provocan que las superficies involucradas transfieran carga provocando un desequilibrio eléctrico que desemboca en un exceso de carga electrostática negativa (cargado neg.) o al revés (cargado pos.).



Sin aire

Habitualmente son barras y son la opción ideal para superficies planas (bandas) y distancias de trabajo inferiores a 1 metro.

Con aire

Son idóneos para distancias hasta 1500mm y cuerpos tridimensionales.

Con aire comprimido

Idóneos para distancias mayores de 1500mm y cuando el material a neutralizar está a una distancia de objetos metálicos mucho menor que del eliminador.

MILITARY HANDBOOK

**ELECTROSTATIC DISCHARGE CONTROL HANDBOOK FOR
PROTECTION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC PARTS,
ASSEMBLIES AND EQUIPMENT (EXCLUDING ELECTRICALLY
INITIATED EXPLOSIVE DEVICES) (METRIC)**



Comunicación de la Comisión en el marco de la aplicación de la Directiva 93/15/CEE del Consejo, de 5 de abril de 1993, relativa a la armonización de las disposiciones sobre la puesta en el mercado y el control de los explosivos con fines civiles

(2005/C 219/04)

(Texto pertinente a los fines del EEE)

(Publicación de títulos y referencias de normas armonizadas conforme a la directiva)

OEN (*)	Referencia y título de la norma (documento de referencia)	Referencia de la norma retirada y sustituida	Fecha límite para obtener presunción de conformidad respecto a la norma sustituida Nota 1
CEN	EN 13630-1:2003 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 1: Requisitos	—	
CEN	EN 13630-2:2002 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 2: Determinación de la estabilidad térmica.	—	
CEN	EN 13630-3:2002 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 3: Determinación de la sensibilidad al rozamiento del núcleo de los cordones detonantes.	—	
CEN	EN 13630-4:2002 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 4: Determinación de la sensibilidad al impacto de los cordones detonantes.	—	
CEN	EN 13630-5:2003 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 5: Determinación de la resistencia al rozamiento de los cordones detonantes.	—	
CEN	EN 13630-6:2002 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 6: Determinación de la resistencia a la tensión de los cordones detonantes.	—	
CEN	EN 13630-7:2002 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 7: Determinación de la fiabilidad de iniciación de los cordones detonantes.	—	
CEN	EN 13630-8:2002 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 8: Determinación de la resistencia al agua de los cordones detonantes y mechas de seguridad.	—	
CEN	EN 13630-9:2004 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 9: Determinación de la transmisión de la detonación de cordón detonante a cordón detonante.	—	

OEN (*)	Referencia y título de la norma (documento de referencia)	Referencia de la norma retirada y sustituida	Fecha límite para obtener presunción de conformidad respecto a la norma sustituida Nota 1
CEN	EN 13630-10:2005 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 10: Determinación de la capacidad de iniciación de los cordones detonantes.	—	
CEN	EN 13630-11:2002 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 11: Determinación de la velocidad de detonación de los cordones detonantes.	—	
CEN	EN 13630-12:2002 Explosivos para uso civil. Cordones detonantes y mechas de seguridad. Parte 12: Determinación del tiempo de combustión de las mechas de seguridad.	—	
CEN	EN 13631-1:2005 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 1: Requisitos.	—	
CEN	EN 13631-2:2002 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 2: Determinación de la estabilidad térmica de los explosivos.	—	
CEN	EN 13631-3:2004 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 3: Determinación de la sensibilidad al rozamiento de los explosivos.	—	
CEN	EN 13631-4:2002 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 4: Determinación de la sensibilidad al impacto de los explosivos.	—	
CEN	EN 13631-5:2002 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 5: Determinación de la resistencia al agua.	—	
CEN	EN 13631-6:2002 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 6: Determinación de la resistencia a la presión hidrostática.	—	
CEN	EN 13631-7:2003 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 7: Determinación de la seguridad y fiabilidad a temperaturas extremas.	—	
CEN	EN 13631-10:2003 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 10: Verificación de los medios de iniciación	—	
CEN	EN 13631-11:2003 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 11: Determinación de la transmisión de la detonación.	—	

OEN (*)	Referencia y título de la norma (documento de referencia)	Referencia de la norma retirada y sustituida	Fecha límite para obtener presunción de conformidad respecto a la norma sustituida Nota 1
CEN	EN 13631-12:2004 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 12: Especificaciones de los multiplicadores con diferentes capacidades de iniciación.	—	
CEN	EN 13631-13:2003 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 13: Determinación de la densidad.	—	
CEN	EN 13631-14:2003 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 14: Determinación de la velocidad de detonación.	—	
CEN	EN 13631-15:2005 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 15: Cálculo de las propiedades termodinámicas.	—	
CEN	EN 13631-16:2004 Explosivos para uso civil. Explosivos rompedores. Parte 16: Detección y medición de gases tóxicos.	—	
CEN	EN 13763-1:2004 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 1: Requisitos.	—	
CEN	EN 13763-2:2002 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 2: Determinación de la estabilidad térmica.	—	
CEN	EN 13763-3:2002 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 3: Determinación de la sensibilidad al impacto.	—	
CEN	EN 13763-4:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 4: Determinación de la resistencia al rozamiento de los hilos conductores y de los tubos de transmisión	—	
CEN	EN 13763-5:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 5: Determinación de la resistencia al corte de los hilos conductores y de los tubos de transmisión	—	
CEN	EN 13763-6:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 6: Determinación de la resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas de los hilos conductores.	—	
CEN	EN 13763-7:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 7: Determinación de la integridad mecánica de los hilos conductores, tubos de transmisión, conexiones, engarces y cierres	—	

OEN (*)	Referencia y título de la norma (documento de referencia)	Referencia de la norma retirada y sustituida	Fecha límite para obtener presunción de conformidad respecto a la norma sustituida Nota 1
CEN	EN 13763-8:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 8: Determinación de la resistencia a la vibración de los deto- nadores ordinarios.	—	
CEN	EN 13763-9:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 9: Determinación de la resistencia a la flexión de los detona- dores	—	
CEN	EN 13763-11:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 11: Determinación de la resistencia a la caída de los detona- dores y relés	—	
CEN	EN 13763-12:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 12: Determinación de la resistencia a la presión hidrostática.	—	
CEN	EN 13763-13:2004 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 13: Determinación de la resistencia de los detonadores eléc- tricos a las descargas electrostáticas.	—	
CEN	EN 13763-15:2004 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 15: Determinación de la capacidad de iniciación equivalente.	—	
CEN	EN 13763-16:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 16: Determinación de la exactitud del retardo	—	
CEN	EN 13763-17:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 17: Determinación de la corriente de no funcionamiento de los detonadores eléctricos	—	
CEN	EN 13763-18:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 18: Determinación de la corriente de encendido en serie de los detonadores eléctricos	—	
CEN	EN 13763-19:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 19: Determinación del impulso eléctrico de funcionamiento de los detonadores eléctricos	—	
CEN	EN 13763-20:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 20: Determinación de la resistencia eléctrica total de los deto- nadores eléctricos	—	

OEN (*)	Referencia y título de la norma (documento de referencia)	Referencia de la norma retirada y sustituida	Fecha límite para obtener presunción de conformidad respecto a la norma sustituida Nota 1
CEN	EN 13763-21:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 21: Determinación de la tensión de descarga de los detonadores eléctricos.	—	
CEN	EN 13763-22:2003 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 22: Determinación de la capacitancia, resistencia al aislamiento y la rotura del aislamiento de los hilos conductores.	—	
CEN	EN 13763-23:2002 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 23: Determinación de la velocidad de onda de choque en el tubo de transmisión.	—	
CEN	EN 13763-24:2002 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 24: Determinación de la no conductividad del tubo de transmisión.	—	
CEN	EN 13763-25:2004 Explosivos para uso civil. Detonadores y relés. Parte 25: Determinación de la capacidad de transferencia de los relés y accesorios de empalme.	—	
CEN	EN 13857-1:2003 Explosivos para uso civil. Parte 1: Terminología.	—	
CEN	EN 13857-3:2002 Explosivos para uso civil. Parte 3: Información a suministrar por el fabricante o su representante autorizado al usuario.	—	
CEN	EN 13938-1:2004 Explosivos para uso civil. Propulsantes y propulsores para cohetes. Parte 1: Requisitos.	—	
CEN	EN 13938-2:2004 Explosivos para uso civil. Propulsantes y propulsores para cohetes. Parte 2: Determinación de la resistencia a la energía electrostática	—	
CEN	EN 13938-3:2003 Explosivos para uso civil. Propulsantes y propulsores para cohetes. Parte 3: Determinación de la transición deflagración-detonación.	—	
CEN	EN 13938-4:2003 Explosivos para uso civil. Propulsantes y propulsores para cohetes. Parte 4: Determinación de la velocidad de combustión en condiciones ambientales.	—	

OEN ⁽¹⁾	Referencia y título de la norma (documento de referencia)	Referencia de la norma retirada y sustituida	Fecha límite para obtener presunción de conformidad respecto a la norma sustituida Nota 1
CEN	EN 13938-5:2004 Explosivos para uso civil. Propulsantes y propulsores para cohetes. Parte 5: Determinación de huecos y grietas.	—	
CEN	EN 13938-6:2004 Explosivos para uso civil. Propulsantes y propulsores para cohetes. Parte 6: Combustibles sólidos para cohetes. Guía para la determinación de la integridad de los recubrimientos de los inhibidores.	—	
CEN	EN 13938-7:2004 Explosivos para uso civil. Propulsantes y propulsores para cohetes. Parte 7: Determinación de las propiedades de la pólvora negra.	—	

⁽¹⁾ OEN: Organismo europeo de normalización:

— CEN: rue de Stassart 36, B-1050 Brussels, Tel. (32-2) 550 08 11; fax (32-2) 550 08 19 (<http://www.cenorm.be>)

— CENELEC: rue de Stassart 35, B-1050 Brussels, Tel. (32-2) 519 68 71; fax (32-2) 519 69 19 (<http://www.cenelec.org>)

— ETSI: 650, route des Lucioles, F-06921 Sophia Antipolis, Tel. (33) 492 94 42 00; fax (33) 493 65 47 16 (<http://www.etsi.org>)

Nota 1 Generalmente la fecha límite para obtener presunción de conformidad será la fecha de la retirada («dow»), indicada por el organismo europeo de normalización, pero se llama la atención de los usuarios de estas normas sobre el hecho de que en ciertas ocasiones excepcionales pudiera ser otro el caso.

Nota 3 En caso de Modificaciones, la norma referenciada es la norma EN CCCC:YYYY, sus modificaciones previas, si las hubiera, y esta nueva modificación; la norma retirada y sustituida (columna 4), por lo tanto, consiste en la norma EN CCCC:YYYY y sus modificaciones previas, si las hubiera, pero sin la nueva modificación

AVISO:

— Todas las informaciones sobre la disponibilidad de las normas pueden obtenerse o en los organismos europeos de normalización o en los organismos nacionales de normalización, podrán encontrar una lista que figura en anexo de la directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 98/34/CE ⁽¹⁾ modificada por la Directiva 98/48/CE ⁽²⁾.

— La publicación de las referencias en el *Diario Oficial de la Unión Europea* no implica que las normas estén disponibles en todos los idiomas comunitarios.

— Esta lista reemplaza las listas anteriores publicadas en el *Diario Oficial de la Unión Europea*. La Comisión garantiza la puesta al día de la presente lista.

Para obtener más información consulte la dirección siguiente:

<http://europa.eu.int/comm/enterprise/newapproach/standardization/harmstds/>

⁽¹⁾ DO L 204 de 21.7.1998, p. 37.

⁽²⁾ DO L 217 de 5.8.1998, p. 18.

**DIRECTIVA 1999/92/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO
de 16 de diciembre de 1999**

relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas (Decimoquinta Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE del Consejo)

EL PARLAMENTO EUROPEO Y EL CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA,

Visto el Tratado constitutivo de la Comunidad Europea y, en particular, su artículo 137,

Vista la propuesta de la Comisión ⁽¹⁾, presentada previa consulta al Comité consultivo de seguridad, higiene y protección de la salud en el lugar de trabajo y al Órgano permanente para la seguridad y salubridad en las minas de hulla y otras industrias extractivas,

Visto el dictamen del Comité Económico y Social ⁽²⁾,

Previa consulta al Comité de las Regiones,

De conformidad con el procedimiento establecido en el artículo 251 del Tratado ⁽³⁾, a la vista del texto conjunto aprobado el 21 de octubre de 1999 por el Comité de conciliación,

Considerando lo siguiente:

- (1) El artículo 137 del Tratado establece que el Consejo puede adoptar, mediante directivas, las disposiciones mínimas para promover la mejora, en concreto, del entorno de trabajo con el fin de garantizar una mejor protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.
- (2) Según dicho artículo, estas directivas evitarán establecer trabas de carácter administrativo, financiero y jurídico que obstaculicen la creación y el desarrollo de pequeñas y medianas empresas.
- (3) La mejora de la seguridad, la higiene y la protección de la salud en el lugar de trabajo constituye un objetivo que no puede subordinarse a consideraciones exclusivamente económicas.
- (4) El cumplimiento de las disposiciones mínimas tendentes a mejorar la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores con riesgo de exposición a atmósferas explosivas es imprescindible para garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores.
- (5) La presente Directiva constituye una directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1989, relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo ⁽⁴⁾. Por ello, las disposiciones de dicha Directiva, en particular las que se refieren a la información,

consulta y participación de los trabajadores y a la formación de los trabajadores, son también plenamente aplicables en el caso de exposición de los trabajadores a riesgos derivados de atmósferas explosivas, sin perjuicio de las disposiciones más rigurosas o específicas contenidas en la presente Directiva.

- (6) La presente Directiva constituye un avance concreto en el marco de la realización de la dimensión social del mercado interior.
- (7) En la Directiva 94/9/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de marzo de 1994, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosiva ⁽⁵⁾ se establece que está previsto preparar una directiva complementaria, basada en el artículo 137 del Tratado, relativa especialmente a los peligros de explosión relacionados con el uso o el tipo y los métodos de instalación de los aparatos.
- (8) La protección contra las explosiones es determinante para garantizar la seguridad de los trabajadores. En caso de explosión, los efectos incontrolados de las llamas y presiones, así como la presencia de productos de reacción nocivos y el consumo del oxígeno ambiental necesario para respirar, ponen en peligro la vida y la salud de los trabajadores.
- (9) El establecimiento de una estrategia coherente para la prevención de explosiones necesita de medidas de carácter organizativo que complementen las medidas de carácter técnico que se tomen en el lugar de trabajo. Con arreglo a la Directiva 89/391/CEE, el empresario debe disponer de una evaluación de los riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores. Este requisito se precisa en la presente Directiva al imponer al empresario la obligación de elaborar y mantener actualizado un documento de protección contra explosiones o una serie de documentos que satisfagan los requisitos mínimos que establece la presente Directiva. El documento de protección contra explosiones incluye la identificación de los supuestos, la evaluación de los riesgos y la definición de las medidas específicas que deben ser adoptadas para garantizar la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas, de conformidad con el artículo 9 de la Directiva 89/391/CEE. Dicho documento puede ser parte integrante de la evaluación de los riesgos en el lugar de trabajo que se establece en el artículo 9 de la Directiva 89/391/CEE.

⁽¹⁾ DO C 322 de 9.12.1995, p. 10, y DO C 184 de 17.6.1997, p. 1.

⁽²⁾ DO C 153 de 28.5.1996, p. 35.

⁽³⁾ Dictamen del Parlamento Europeo de 20 de junio de 1996 (DO C 198 de 8.7.1996, p. 160), confirmado el 4 de mayo de 1999 (DO C 279 de 1.10.1999, p. 55), Posición común del Consejo de 22 de diciembre de 1998 (DO C 55 de 25.2.1999, p. 45) y Decisión del Parlamento Europeo de 6 de mayo de 1999 (DO C 279 de 1.10.1999, p. 386). Decisión del Parlamento Europeo de 2 de diciembre de 1999 y Decisión del Consejo de 6 de diciembre de 1999.

⁽⁴⁾ DO L 183 de 29.6.1989, p. 1.

⁽⁵⁾ DO L 100 de 19.4.1994, p. 1.



EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA: DESCARGA ELECTROSTÁTICA (ESD)

**Enrique Montero Montero
Tecnología Electrónica**