

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA ELECTROSTÁTICA  
PARA LA SEGURIDAD DE LOS OPERARIOS**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**RUBEN LOO LEE**

**PROMOCIÓN  
2002 - I**

**LIMA – PERÚ  
2006**

**APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA ELECTROSTÁTICA  
PARA LA SEGURIDAD DE LOS OPERARIOS**

*Dedico este trabajo a:  
Mi Madre Choi Hop  
con la esperanza de un reencuentro  
en el anhelado nuevo orden,  
Mi Padre Pat Ho  
por sus esfuerzos inagotables  
y la confianza depositada,  
Mis Hermanos Tin Ming, King Chun y Rufino  
por el apoyo incondicional  
y constante inspiración en mi carrera,  
Mis sobrinos que son la esperanza  
de superación y progreso,  
Y a nuestro Dios Jehová  
por enseñarme el verdadero conocimiento,  
por brindarme siempre los frutos de su espíritu  
y enseñarme a seguir en el camino estrecho  
que conduce a la vida eterna.*

## **SUMARIO**

El presente trabajo examina y describe las principales aplicaciones prácticas de la electrostática en la ingeniería eléctrica de obras para que el profesional del campo pueda conducir e impartir pautas de seguridad que son necesarias para las labores de los operarios que estén bajo su cargo y también para las personas en general.

Se presenta en el primer capítulo con el desarrollo del planteamiento de la ingeniería en donde se describen los objetivos que se pretende conseguir, la evaluación de los resultados y de su viabilidad práctica, y las limitaciones que se tienen durante el desarrollo del trabajo. Luego en el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico conceptual, en la cual se hace una descripción detallada de los conceptos requeridos para el entendimiento del estudio de los fenómenos involucrados en la electrostática. Finalmente, el tercer capítulo se describe las metodologías, alternativas y recomendaciones para la solución al problema planteado que son imperiosamente útiles seguirlos, puesto que brindan de manera certera y efectiva la inhibición o mitigación del foco central del problema.

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DE LA INGENIERÍA</b>	
1.1. Descripción	2
1.2. Objetivos	2
1.3. Evaluación	2
1.4. Limitaciones del trabajo.	3
1.5. Síntesis del trabajo.	3
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b>	
2.1. Antecedentes	4
2.1.1. Interpretación de la Ley de Charles Coulomb.	6
2.1.2. Relaciones entre Cargas y punto en el espacio.	7
a) Fuerza de atracción o repulsión entre dos Cargas puntuales.	7
b) Intensidad del Campo Eléctrico de una Carga sobre un punto p.	8
c) Intensidad del Campo Eléctrico total de varias Cargas sobre un punto m.	8
d) Deslizamiento Eléctrico de una Carga hacia un punto p.	9
e) Potencial inducido desde una Carga sobre un punto p.	9
f) Diferencia de Potencial entre dos puntos del Campo Eléctrico.	9
g) Potencial inducido en un punto p respecto al infinito.	10
h) Potencial total en un punto m respecto al infinito.	10
2.1.3. Resumen de conceptos.	11
a) Vector intensidad del Campo Eléctrico.	11
b) Vector Deslizamiento Eléctrico.	11
c) Relación de los vectores del Campo Eléctrico y Deslizamiento.	11
d) Permitividad o Constante Dieléctrica.	12
2.2. Representación y fenómenos de Campo Eléctrico.	12
2.2.1. Espectro de Líneas de Fuerza.	12

2.2.2.Espectro de Superficies Equipotenciales.	14
a) Características de las líneas Equipotenciales.	16
b) Demostración de la ecuación de las líneas Equipotenciales.	16
2.2.3.Cuerpo conductor dentro de un Campo Eléctrico.	20
2.2.4.Cuerpo dieléctrico dentro de un Campo Eléctrico.	23
2.2.5.Principio de imágenes.	24
2.3. Determinación del Campo Eléctrico.	25
2.3.1.Presencia de un conductor.	25
2.3.2.Presencia de dos conductores.	34
2.4. Capacitancias eléctricas.	36
2.4.1.La Capacitancia.	36
2.4.2.El condensador.	38
2.5. Corrientes y Tensiones inducidas desde conductores de alta Tensión.	39
2.5.1.Determinación de la Carga inducida en objetos.	39
2.5.2.Extensión del principio del método de imágenes a cualquier objeto.	42
2.5.3.Áreas colectoras de Carga equivalente	44
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA</b>	
3.1. Conceptos previos y alternativas de solución.	44
3.1.1.Electricidad estática.	44
3.1.2.Procesos de electrización.	45
a) Metal y metal.	46
b) Metal y aislante.	46
c) Aislante y aislante.	47
d) Sólido y líquido.	48
3.1.3.Peligros asociados a la electricidad estática.	51
3.1.4.Descarga Disruptiva.	54
3.1.5.Descargas electrostáticas y peligros de incendio y explosión.	54
3.2. Soluciones	57
3.2.1.Principios de la prevención de electricidad estática.	57
a) Procedimientos para evitar la electricidad estática.	58
3.2.2.Supresión o reducción de la generación de Cargas electrostáticas.	59
3.2.3.Puesta a tierra a la electricidad estática.	60

3.2.4. Protección contra las descargas electrostáticas.	61
3.2.5. Protección electrostática.	61
3.2.6. Apantallamiento del Campo Eléctrico.	62
3.2.7. Reducción de la interferencia del Campo Magnético.	63
3.2.8. Electricidad estática por fricción de rodillos.	67
3.2.9. Electricidad estática por trasvasar productos.	68
3.2.10. Electricidad estática por frotamiento o fricción del aire.	68
3.2.11. Electricidad estática por cortar diferentes superficies de nivel eléctrico.	70
3.2.12. Electricidad estática por contacto de líquidos pulverizados.	71
3.2.13. Protección de trabajadores.	72
3.2.14. Protección de atmósferas explosivas.	72
3.2.15. Protección de la inducción electrostática del rayo.	73
a) Seguridad personal contra los rayos.	74
3.2.16. Protección contra la energización accidental.	75
a) Trabajos en líneas desenergizadas.	75
3.2.17. Condiciones de seguridad del operario.	77
3.3. Recursos humanos y equipamiento.	77
3.3.1. Depósitos de almacenamiento en los que se trasvasan productos.	77
3.3.2. Mantenimiento o lavado de una cadena de aisladores.	78
3.3.3. Trabajos en instalaciones desenergizadas.	78
3.3.4. Trabajos en instalaciones con Tensión.	79
3.3.5. Ropa apropiada para el trabajo eléctrico en general.	79
3.3.6. Equipos de protección personal.	80
3.3.7. Otros equipos de protección.	82
3.3.8. Las escaleras.	83
3.3.9. Las herramientas.	84
a) Recomendaciones para las herramientas de mano.	84
b) Recomendaciones para las herramientas eléctricas.	85
3.3.10. Educación de personal.	85
a) Trabajadores usuarios de equipos y/o instalaciones eléctricas.	85
b) Trabajadores cuya actividad, no eléctrica, se desarrolla en proximidad de instalaciones eléctricas con punto accesibles en tensión.	86
c) Trabajadores cuyos cometidos sean instalar, reparar o mantener instalaciones	

eléctricas.	86
<b>CONCLUSIONES</b>	87
<b>ANEXOS</b>	91
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	123

## PRÓLOGO

Este trabajo se consagra al estudio aplicado de la electrostática que es una de las formas más desconocidas de las manifestaciones de la energía eléctrica.

El desarrollo del estudio se realiza de acuerdo a normas nacionales e internacionales referentes a la ingeniería eléctrica, de modo que permite dar a conocer los principios electroestáticos que pueden conllevar peligros, así como las soluciones y recomendaciones más viables y certeras para la seguridad del operario y la prevención y mitigación del fenómeno de la electrostática cuando está presente en una instalación eléctrica.

El presente informe se dedica en primer lugar a salvaguardar la integridad física de los operarios que laboran en las instalaciones eléctricas y también a personas que están presentes en la instalación, y emplear las técnicas y métodos eficaces y eficientes para el trabajo y la prevención y atenuación de los riesgos que pueden ocasionarse. Asimismo, puede utilizarse como una herramienta eficaz para la prevención de riesgos eléctricos de manera genérica, no obstante, el tema principal es referente al campo de la electrostática.

El contenido del presente se pone a relieve en el primer capítulo con el desarrollo del planteamiento de la ingeniería en donde se detallan los objetivos, la evaluación de los resultados y las limitaciones que se tienen durante el desarrollo del trabajo. Luego en el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico conceptual, en la cual se despliega una descripción puntualizada de los conceptos requeridos para la comprensión del estudio de los fenómenos implicados en la electrostática. Finalmente, el tercer capítulo se describe las metodologías, alternativas y recomendaciones para la solución al problema planteado. Seguidamente, se presentan las conclusiones que se han llegado a obtener del presente estudio. Asimismo, se incluye información adicional y relevante en el anexo, y finalizando la presente investigación con una lista de referencias bibliográficas que fueron útiles como medio de consulta.

Por otro lado, agradezco de manera particular al Ing. Justo Yanque Montufar y a profesores distinguidos de la facultad que me brindaron el apoyo necesario para la búsqueda exhaustiva de información y la realización y conclusión de presente estudio de investigación de ingeniería.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DE LA INGENIERÍA**

### **1.1. Descripción**

La realización del presente estudio se debe a que los parámetros como las tensiones y corrientes inducidas mediante diversas formas de electrización, pueden ser peligrosas especialmente para todas aquellas personas que trabajan en el campo de la electricidad. Ya sea operarios de construcción o producción, o como personal de operación y mantenimiento.

### **1.2. Objetivos**

Proporcionar principios, criterios, conocimientos y sugerir las precauciones necesarias e imprescindibles para los operarios y personas en general, para evitar las consecuencias de las tensiones y corrientes inducidas a través de diversas formas de electrización hacia objetos o instalaciones que pueden resultar peligrosos por tal motivo.

### **1.3. Evaluación**

- Empleo de bibliografías referentes a los Campos Eléctricos y Magnéticos, a los fenómenos de inducción electrostática, y a los riesgos eléctricos; considerando también las sobretensiones externas e internas y las puestas a tierra.
- Mencionar recomendaciones de prevención y mitigación de los riesgos eléctricos en general y en particular los riesgos de naturaleza electrostática.

#### **1.4. Limitaciones del trabajo**

El presente trabajo requiere de una exhaustiva búsqueda y recolección de información sobre el tema, debido a que la electricidad estática es una de las formas más desconocidas de las manifestaciones de la energía eléctrica

#### **1.5. Síntesis del trabajo**

El presente trabajo se realizará en un principio mediante una introducción previa de los conceptos relacionados con la electrostática y luego se presentará las diversas soluciones a los problemas que se presentan y las recomendaciones pertinentes para la prevención y la mengua de los riesgos eléctricos y en particular los de carácter electrostático.

## **CAPÍTULO II MARCO TEORICO CONCEPTUAL**

### **2.1 Antecedentes**

La electrificación de un cuerpo por fricción, fue el primer descubrimiento en el campo de la electricidad. Los antiguos griegos descubrieron que el ámbar (y otras sustancias resinosas), al ser frotado con lana o piel, exhibía una atracción peculiar para cuerpos ligeros como las partículas de papel. El nombre que denominaron los griegos a la causa desconocida de éste fenómeno fue "electricidad", que se deriva de la palabra griega "Electrón" que significa ámbar. El simple hecho de la electrificación, y la repulsión mutua entre dos cuerpos electrificados similarmente, se conoció desde la antigüedad, pero sólo en los últimos ciento cincuenta años, se ha adquirido un conocimiento científico de la electricidad. En la actualidad, aunque la electricidad es uno de los campos más voluminosos de la ciencia moderna, y a pesar del hecho de que sus aplicaciones prácticas en la vida diaria son incontables, la naturaleza fundamental de la electricidad es oscura y a veces inexplicable.

Sin embargo, la mayoría de los fenómenos de electricidad se pueden describir en términos de dos entidades fundamentales, el "Electrón" y el "Protón". Se descubrió primero que había dos clases de electrificación, que se distinguían por los términos "positiva" y "negativa" respectivamente. De acuerdo a la teoría moderna, el Electrón es la carga negativa básica y el Protón es la carga positiva básica. Cuando un cuerpo contiene igual número de Protones y Electrones, se dice que es eléctricamente neutro. Una idea fundamental en la teoría actual de la electricidad, es que mientras que los Protones están íntimamente asociados con los átomos de la materia y son inseparables de ella, los Electrones (o al menos, algunos de ellos) pueden moverse de un lugar a otro en los alrededores. La densidad de "Electrones libres" y su Movilidad, determinan la Conductividad Eléctrica de un cuerpo. La diferencia esencial entre un conductor y otro que no es conductor eléctrico, reside en la libertad relativa del movimiento de los Electrones.

Debido a la gran movilidad de los Electrones en comparación con los Protones, muchos fenómenos eléctricos se describen en términos del movimiento de los Electrones. Así, un cuerpo que ha adquirido un exceso de Electrones se dice que está cargado negativamente, y otro que ha perdido algunos de sus Electrones se dice que está cargado positivamente. Uno de los primeros descubrimientos de electricidad, fue el de la existencia de una atracción entre Cargas de signo contrario y una repulsión entre Cargas de igual signo.

Al conectar un cuerpo metálico aislado con el polo de un generador de Tensión, se desplaza la electricidad desde éste hacia el cuerpo hasta que la Tensión en todos los puntos de su superficie sea igual a la del polo del generador a que se ha conectado. La cantidad de electricidad recibida por el citado cuerpo constituye su Carga Eléctrica. Según haya sido conectado con el polo positivo o con el polo negativo esa Carga será positiva o negativa, respectivamente. La cantidad de electricidad recibida, o sea la Carga, es directamente proporcional a la Tensión, lo que equivale a decir que la cantidad de electricidad por unidad de Tensión (por Volt) es una constante. Esta constante, que varía según la forma y el tamaño del cuerpo, constituye su Capacidad. Designando con  $Q$  la cantidad de Carga Eléctrica o electricidad recibida a la Tensión  $U$ , se deduce la Capacidad como:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (2.1)$$

expresándose  $Q$  en Coulomb (C),  $U$  en Volt (V) y  $C$  en Faradios (F). Por lo tanto, el Faradio es la unidad de Capacidad. Como esta unidad resulta excesivamente grande, se suele expresar la Capacidad en microfaradios ( $\mu F$ ). Según esto,  $1F = 10^6 \mu F$ .

La electricidad está compuesta por pequeños corpúsculos aislados cuya Carga es de  $1,59 \times 10^{-19}$  C. Estos corpúsculos se llaman Electrones y constituyen siempre cantidades de electricidad negativa, según lo indicado,  $1C = 6,3 \times 10^{18}$  *electrones*.

Un cuerpo con Electrones en exceso, es decir cargado negativamente, tiene tendencia a desprenderse de dicho exceso para volver al estado neutro. Asimismo, un cuerpo falto o con escasez de Electrones, o sea cargado positivamente, tiende también a neutralizarse haciendo desaparecer su pobreza en Electrones. Aproximando un cuerpo en las condiciones del primer caso a otro en las del segundo, resulta que ambos se atraen. Dos cuerpos con exceso de Electrones, o pobres de Electrones, se repelen. Esas fuerzas de atracción y de repulsión se propagan a través de los aislantes y en el vacío, variando su intensidad según

la clase de aislante. Uniendo mediante un conductor dos cuerpos cargados con cantidades de electricidad iguales pero de signo contrario, se iguala el estado eléctrico de dichos cuerpos y se anula la fuerza de atracción. El espacio en que pueden observarse dichas atracciones y repulsiones se llama Campo Eléctrico.

Al aproximar a un cuerpo cargado negativamente un cuerpo conductor completamente aislado, por ejemplo un cilindro metálico, son repelidos los Electrones del cilindro, puesto que son pequeñas Cargas negativas, por el citado cuerpo cargado negativamente. Como consecuencia, la superficie del cilindro próxima al cuerpo se empobrece en Electrones, mientras que la superficie opuesta se enriquece. Si en lugar de una Carga negativa el cuerpo tuviese una Carga positiva, el fenómeno se produciría en sentido inverso. Esta acción del referido cuerpo sobre el conductor se designa con el nombre de Influencia. Al unir dos cuerpos entre los cuales existe una diferencia de Tensión, por medio de un conductor, se desplazan los Electrones del cuerpo más rico en dichos elementos al más pobre. Un conductor de segunda clase, por ejemplo un ácido, contiene pequeñas partículas cargadas eléctricamente, llamadas iones. Estos iones se desplazan hacia los cuerpos cargados eléctricamente con signo contrario. La Corriente así formada por la materia en desplazamiento se llama Corriente iónica. En los conductores de primera clase, como son los metales, no se desplaza la materia, sino que son sólo los Electrones los que se desplazan a través del metal; la Corriente que forman se llama Corriente electrónica [16].

### **2.1.1. Interpretación de la ley de Charles Coulomb.**

Una manifestación habitual de la electricidad es la fuerza de atracción o repulsión entre dos cuerpos estacionarios que, de acuerdo con el principio de acción y reacción, ejercen la misma fuerza eléctrica uno sobre otro. La Carga eléctrica de cada cuerpo puede medirse en Coulomb. La fuerza entre dos partículas con Cargas  $q_1$  y  $q_2$  puede calcularse a partir de la ley de Coulomb. La ley de Coulomb se dedujo posteriormente a partir de consideraciones teóricas. Matemáticamente, la fuerza  $F$  entre dos Cargas puntuales  $q_1$  y  $q_2$  separadas por una distancia  $r$ , es decir, según la cual, la fuerza es proporcional al producto de las Cargas dividido entre el cuadrado de la distancia que las separa. La constante de proporcionalidad  $K$  depende del medio que rodea a las Cargas. La fórmula 2.2 se describe la expresión matemática de la ley de Coulomb.

$$F \propto K \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad (2.2)$$

Mediante una balanza de torsión, Coulomb encontró que la fuerza de atracción o repulsión entre dos Cargas puntuales (cuerpos cargados cuyas dimensiones son despreciables comparadas con la distancia  $r$  que las separa) es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

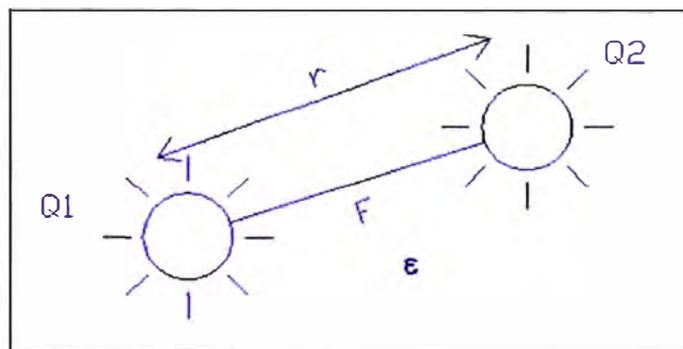
El valor de la constante de proporcionalidad depende de las unidades en las que se exprese:  $F$ ,  $q$ ,  $q'$  y  $r$ . En el Sistema Internacional de Unidades de Medida, dicho valor vale  $9 \times 10^{-9} \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

Los cuerpos electrizados o cargados, ocasionan según su polaridad, reacciones de atracción (polos opuestos), o de repulsión (polos iguales), con otros cuerpos cargados.

### 2.1.2. Relaciones entre Cargas y punto en el espacio [1], [16].

#### a) Fuerza de atracción o repulsión entre dos Cargas puntuales.

Esta fuerza se produce a través de la Permitividad del medio ( $\epsilon$ ) y siendo el factor de racionalización ( $4\pi$ ) se tiene:



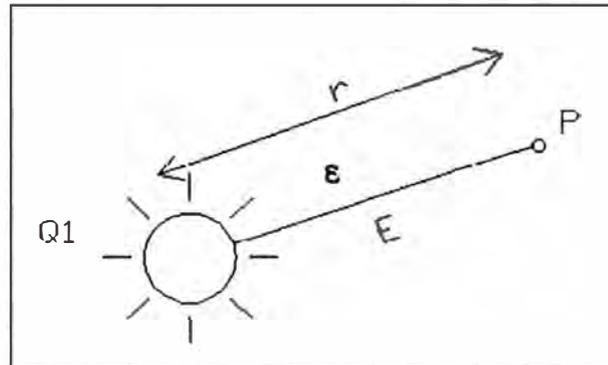
**Fig. 2.1: Fuerza de atracción y repulsión entre dos Cargas**

$$F = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon r^2} Q_2 \quad (2.3)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (2.4)$$

**b) Intensidad del Campo eléctrico de una Carga sobre un punto “P”.**

Mediante la fórmula 2.5, se determina el Campo Eléctrico de una Carga sobre un punto “P” cualquiera del espacio.

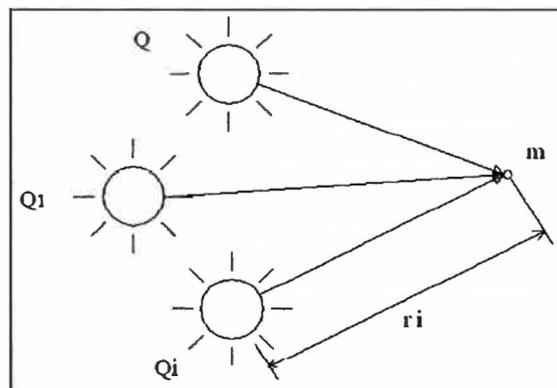


**Fig. 2.2: Intensidad del Campo Eléctrico de una Carga sobre un punto “P”.**

$$E = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon r^2} \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (2.5)$$

**c) Intensidad del Campo Eléctrico total de varias Cargas sobre un punto “m”.**

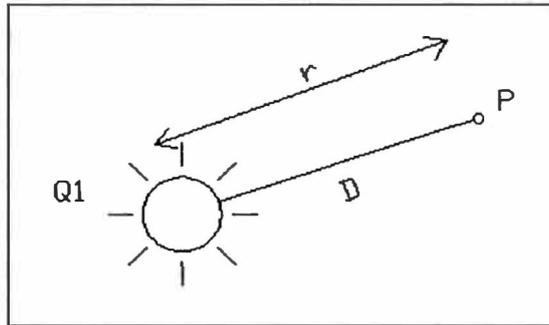
A través de la fórmula 2.6, se determina la influencia del Campo Eléctrico debido a varias Cargas en un punto “m” determinado. (ver Fig. 2.3)



**Fig. 2.3: Intensidad del Campo Eléctrico total de varias Cargas sobre un punto “m”.**

$$Em = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum \frac{Q_i}{r_i^2} \quad (2.6)$$

**d) Deslizamiento Eléctrico de una Carga hacia un punto “P”.**

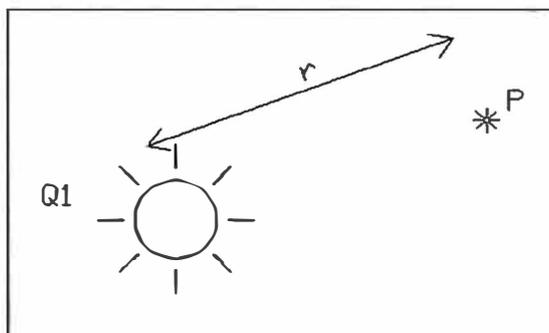


**Fig. 2.4: Deslizamiento Eléctrico**

$$D = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \quad (2.7)$$

**e) Potencial inducido desde una Carga sobre un punto “P”.**

Una Carga produce un Potencial en un punto “P” determinado del espacio, debido a la influencia del Campo Eléctrico.

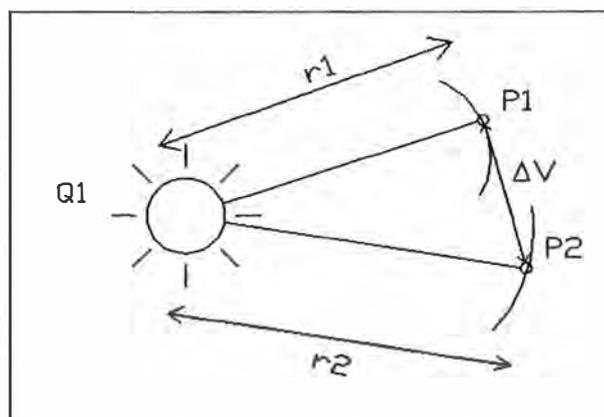


**Fig. 2.5: Potencial inducido desde una Carga sobre un punto “P”.**

$$U = E \cdot r = \frac{Q}{4\pi\epsilon r} \quad (2.8)$$

**f) Diferencia de Potencial entre dos puntos del Campo Eléctrico.**

Se tiene una diferencia de Potencial entre dos puntos del espacio, debido a la influencia de una Carga Eléctrica.

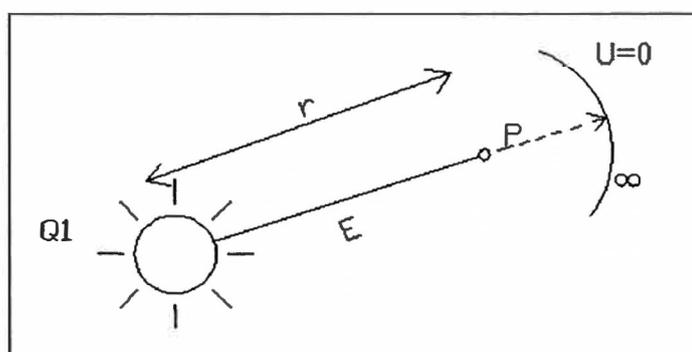


**Fig. 2.6: Diferencia de Potencial entre dos puntos del Campo Eléctrico.**

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (2.9)$$

**g) Potencial inducido en un punto “P” respecto al infinito.**

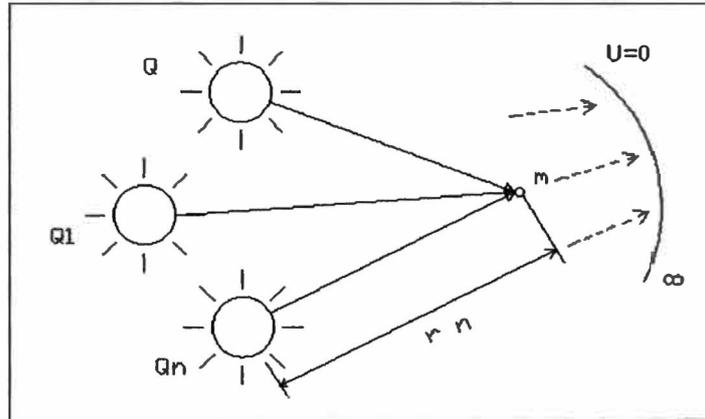
Se presenta un Potencial inducido de un punto “P” respecto del infinito debido a la presencia de una Carga Eléctrica, ver Fig. 2.7.



**Fig. 2.7: Potencial inducido en un punto “P” respecto al infinito.**

**h) Potencial total en un punto “m” respecto al infinito.**

Existe un Potencial respecto al infinito de un punto “m” que es influenciado por “n” Cargas, como se muestra en la Fig. 2.8, el cual es el principio de la superposición.



**Fig. 2.8: Potencial inducido en un punto “m” respecto al infinito.**

$$U_m = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum \frac{Q_i}{r_i} \quad (2.10)$$

### 2.1.3. Resumen de Conceptos [1], [14]

#### a) Vector intensidad del Campo Eléctrico

Este vector de la intensidad del Campo Eléctrico, verifica la integral de línea, es decir permite establecer la diferencia de Potencial entre dos puntos del espectro del Campo Eléctrico (E):

$$\int^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} = U_2 - U_1 \quad (2.11)$$

#### b) Vector Deslizamiento Eléctrico

El vector de Deslizamiento Eléctrico permite verificar la integral de superficie, es decir la magnitud invariable del Campo creado por la Carga repartida (Q) independientemente del medio ( $\epsilon$ ):

$$\int_S \vec{D} \cdot d\vec{r} = Q \quad (2.12)$$

#### c) Relación de los vectores del Campo Eléctrico y Deslizamiento

La relación de ambos vectores, son paralelos pero proporcionales por intermedio de la constante dieléctrica o Permitividad ( $\epsilon$ ), del medio, es decir:  $D = \epsilon \cdot E$

#### **d) Permitividad o constante dieléctrica.**

Es un parámetro ( $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ ) independiente de: (E), (U), (Q). Es el producto de las Permitividades del espacio libre ( $\epsilon_0 = 8,859 \times 10^{-12}$  F/m ó  $8,859 \times 10^{-6}$  uF/m) y de la Permittividad ( $\epsilon_r$ ) o constante dieléctrica relativa del aislante (para el aire,  $\epsilon_r = 1$ ). En medios homogéneos no hay diferencia entre líneas de Campo Eléctrico o Deslizamiento, su densidad en una superficie perpendicular es la misma (proporcional al vector en cada punto).

## **2.2 Representación y fenómenos de Campo Eléctrico.**

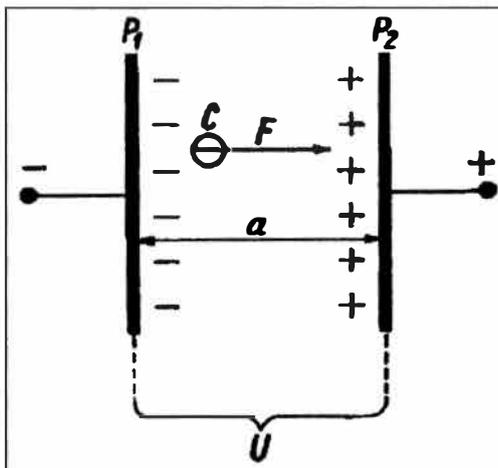
El Campo Eléctrico está formado por la superposición de los dos espectros que son de las líneas de fuerza o llamadas también líneas de Corriente y de las superficies equipotenciales, que aparecen entre Cargas de polaridad opuesta o de similar polaridad, respecto del infinito.

### **2.2.1 Espectro de líneas de fuerza.**

Se denomina también espectro de Líneas de Corriente. Por ejemplo, entre las placas  $P_1$  cargada negativamente y  $P_2$  cargada positivamente (ver Fig. 2.8) se halla un cuerpo C cargado negativamente. Entre las dos placas existe un Campo Eléctrico que actúa sobre el cuerpo con una fuerza F. Esta fuerza F es directamente proporcional a la diferencia de Tensión U entre  $P_1$  y  $P_2$  e inversamente proporcional a la distancia entre las placas. La fuerza que actúa sobre una cantidad de electricidad de 1 C, es la intensidad del Campo Eléctrico y se designa con la letra E. Esta intensidad resulta ser:

$$E = \frac{U}{a} \quad (2.13)$$

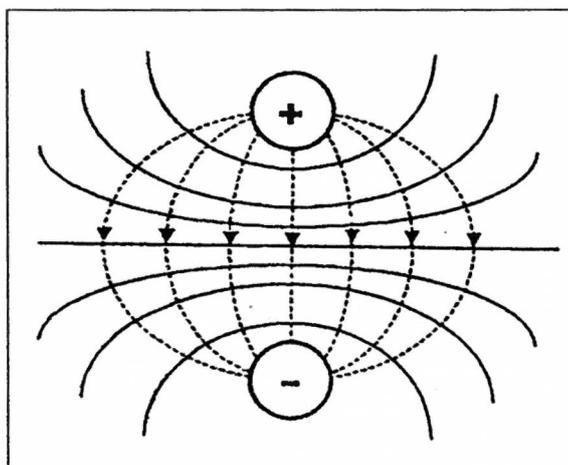
expresando (E) en V/cm cuando (U) está en V, o en KV/cm cuando (U) esté en KV y (a) en cm. La unidad de intensidad del Campo Eléctrico es el V/cm.



**Fig. 2.8: Un cuerpo “c” cargado negativamente entre dos placas [16].**

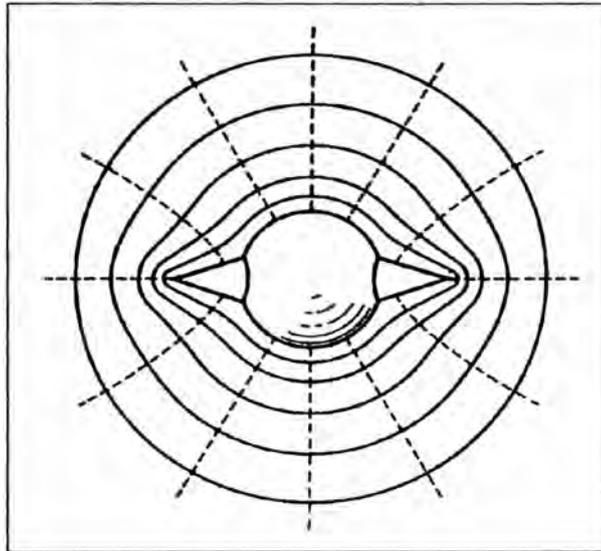
Como se mencionó anteriormente son llamadas también líneas de Corriente. En el aire realmente se forman líneas de Corriente por donde se transfiere Carga hacia los objetos opuestos según su proximidad en función de la superficie que estos presentan:

- Por convención, estas líneas (representado en forma discontinua) nacen o emergen en un punto de Carga (+) y terminan en un punto de Carga (-), como se muestra en la Fig. 2.9.
- Estas líneas salen y entran perpendicularmente a las superficies cargadas, ver Fig. 2.9.



**Fig. 2.9: Líneas de fuerza y superficies equipotenciales desde superficies regulares [16].**

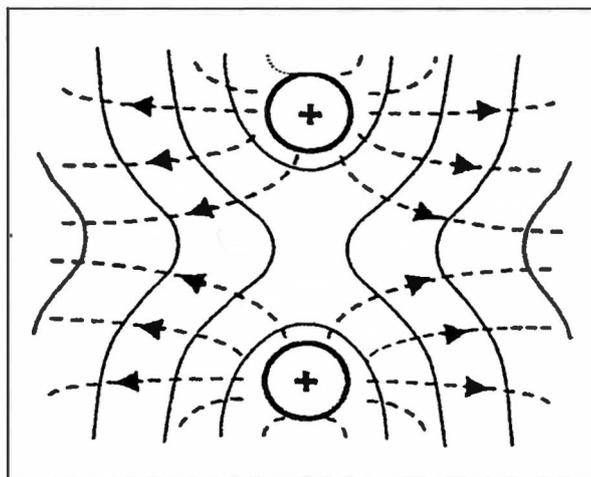
- Las líneas de fuerza se concentran en las protuberancias (efecto “punta”) de las superficies irregulares, donde el Campo es más intenso, y se ciñen a la forma del electrodo, ver Fig. 2.10 [1].



**Fig. 2.10: Líneas de fuerza y superficies equipotenciales desde superficies irregulares [14].**

- Al alejarse del electrodo se dispersan las líneas, produciendo efectos de borde.
- Estas líneas no pueden cerrarse sobre si mismas, son una sucesión de punto a diferente Potencial, y concatenan solo con Cargas de diferente polaridad, aún hacia el infinito.

Cuando las Cargas tienen la misma polaridad, como es el caso de los conductores fasciculados de líneas de AT y EAT, las líneas de Corriente no se concentran en el interior del haz, ellas emergen en forma divergente (líneas discontinuas) como se muestra en la Fig. 2.11:

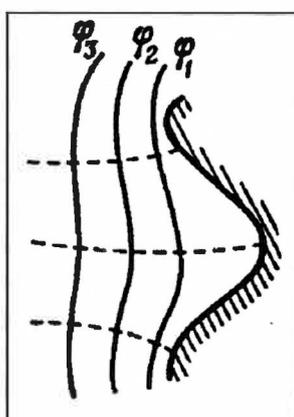


**Fig. 2.11: Líneas de fuerza entre dos Cargas idénticas [1].**

### 2.2.2 Espectro de superficies equipotenciales.

Estudiemos el Campo que crea el conductor cargado que representa la Fig. 2.10. A distancias grandes del conductor, las superficies equipotenciales tienen la forma de

esfera característica de una Carga puntual (con líneas discontinuas indican las líneas de intensidad del Campo). A medida que se aproximan al conductor, las superficies equipotenciales se hacen más semejantes a la superficie de este, que es equipotencial. Cerca de los salientes las superficies equipotenciales se sitúan más densamente, lo que significa que la intensidad del Campo aquí es mayor. De esto se deduce que la densidad de Cargas en los salientes es particularmente grande (ver Fig. 2.12). A esta misma conclusión se puede llegar teniendo en cuenta que, a causa de la repulsión mutua, las Cargas tienden a situarse lo mas lejos posible unas de otras. En las proximidades de las concavidades o entrantes del conductor, las superficies equipotenciales ( $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  y  $\varphi_3$ ) se encuentran más separadas entre sí (ver Fig. 2.12). Respectivamente, la intensidad del Campo y la densidad de Cargas en estos sitios serán menores. En general, la densidad de Cargas para un Potencial dado del conductor se determina por la curvatura de las superficies; aquella aumenta cuando crece la curvatura positiva (convexidad) y disminuye cuando crece la curvatura negativa (concavidad). Especialmente grande suele ser la densidad de Cargas en las puntas. Por eso la intensidad del Campo en las proximidades de estas puede ser tan grande que produce la ionización de las moléculas del gas que rodea el conductor. Los iones de signo contrario a “q” son atraídos por el conductor y neutralizan su Carga. Los iones del mismo signo que “q” empiezan a moverse, alejándose del conductor, y arrastran consigo las moléculas neutras del gas. Como resultado se produce un movimiento apreciable del gas, llamado viento eléctrico. La Carga del conductor disminuye como si se escapara por la punta y fuera arrastrada por el viento. Por eso este fenómeno se denomina escape de la Carga por la punta.



**Fig. 2.12: Superficies equipotenciales en las proximidades de los entrantes del conductor [14].**

**a) Características de las líneas equipotenciales:**

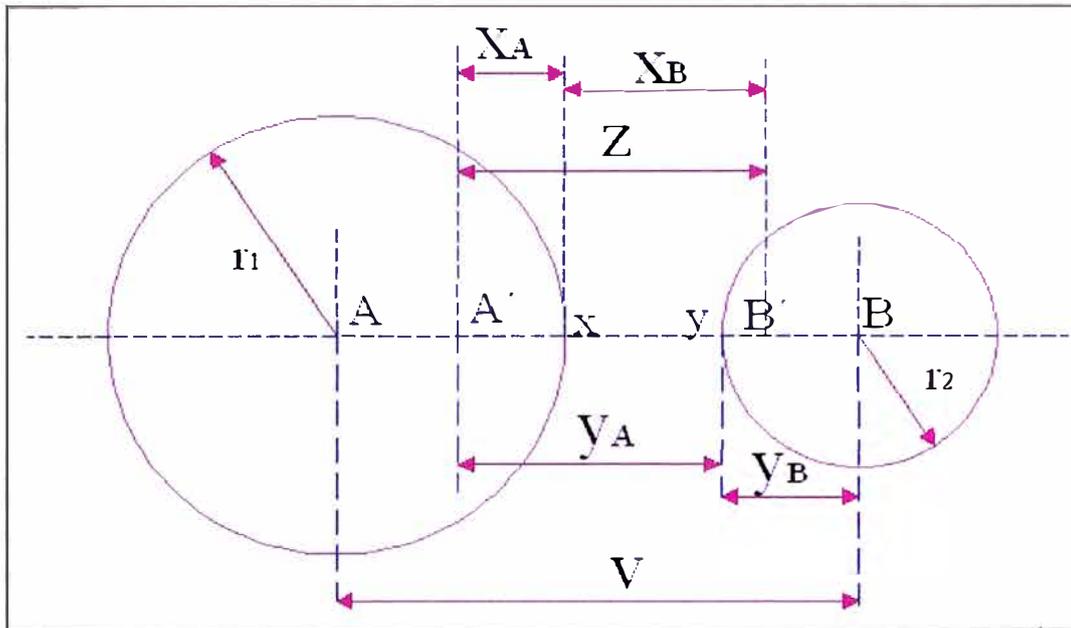
- Estas líneas rodean y encierran a los electrodos energizados, influyéndose si son muy cercanos.
- Están constituidos por superficies lugares geométricos de un Potencial único.
- Entre cada dos superficies existe una diferencia de Potencial constante aún a diferentes distancias.
- Se conforman siempre perpendicularmente al espectro de líneas de fuerza o de Corriente.
- Estas tienden a ser proporcionales respecto de la densidad de líneas de Corriente.

Las superficies equipotenciales alrededor de Cargas de idéntica polaridad, ver Fig. 2.11, pueden encerrar a cada Carga y las siguientes superficies a la vez a varias Cargas como una envolvente exterior de otras superficies equipotenciales. [1]

**b) Demostración de la ecuación de las líneas equipotenciales.**

Para demostrar la ecuación de las líneas equipotenciales se basará en el uso de dos cilindros de distinto diámetro colocados paralelamente. Se supone una Carga  $Q$  concentrada en cada uno de los cilindros en los respectivos ejes  $A'$  y  $B'$ . Estos ejes son perpendiculares al plano del dibujo de la Fig. 2.13. Cada una de las dos Cargas origina un Campo Eléctrico. El punto  $x$  tomado arbitrariamente sobre la línea  $A'B'$  se halla a la distancia  $x_A$  de  $A'$ . La intensidad de Campo producida en el punto por la Carga  $Q$  del eje  $A'$  resulta ser:

$$E = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 S} = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi x_A l} \quad (2.13)$$



**Fig. 2.13: Dos cilindros de distinto diámetro colocados paralelamente [16].**

De manera análoga la intensidad producida por la Carga  $Q$  del eje  $B'$  es:

$$E = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi x_B l} \quad (2.14)$$

Si las Cargas son una positiva y la otra negativa, las líneas de Campo en el punto  $x$  están orientadas en el mismo sentido y las intensidades se suman. Por lo tanto, la intensidad total en el punto  $x$  sería:

$$E_x = E_1 + E_2 = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi x_A l} + \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi x_B l} \quad (2.15)$$

$$E_x = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi l} \left[ \frac{1}{x_A} + \frac{1}{x_B} \right] \quad (2.16)$$

El Potencial originado en  $x$  por la Carga del eje  $A'$  se deduce de la forma siguiente:

$$E_1 = \frac{dU_1}{dx} = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi x_A l} \quad (2.17)$$

$$U_1 = \int \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi l} \cdot \frac{dx}{x_A} \quad (2.18)$$

$$U_1 = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi l} \ln x_A + K \quad (2.19)$$

siendo K, la constante de integración.

De manera análoga se determina el Potencial originado en x por la Carga de B':

$$U_2 = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi l} \ln x_B + K \quad (2.20)$$

como las Cargas son de signo contrario, el Potencial resultante en x será:

$$U_x = U_2 - U_1 = \left( \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi l} \ln x_B + K \right) - \left( \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi l} \ln x_A + K \right) \quad (2.21)$$

$$U_x = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi l} \ln \frac{x_B}{x_A} \quad (2.22)$$

Todos aquellos puntos para los cuales existe la misma relación ( $x_B/x_A$ ) tienen el mismo Potencial. Estos puntos constituyen una superficie equipotencial. Estas superficies son perpendiculares al plano del dibujo y paralelas a los ejes A' y B'. La determinación de las superficies equipotenciales se efectúa en la siguiente manera:



$$\frac{\overline{B'D_1}}{\overline{D_1E}} = \frac{\overline{B'D_1}}{\overline{D_1A'}} = \frac{x_B}{x_A} \quad (2.25)$$

Designando la longitud  $\overline{D_1B'}$  por  $w_1$  y  $\overline{D_1A'}$  por  $u_1$  se obtiene:

$$\frac{\overline{D_1B'}}{\overline{D_1A'}} = \frac{w_1}{u_1} = \frac{x_B}{x_A} \quad (2.26)$$

$$\frac{\overline{D_2B'}}{\overline{D_2A'}} = \frac{w_2}{u_2} = \frac{x_B}{x_A} \quad (2.27)$$

Para esta igualdad es preciso que  $\overline{D_1X}$  sea paralela a  $\overline{EA'}$  y que sea  $\gamma = 90^\circ$ . El lugar geométrico de los puntos  $D_1, D_2, D_3, \dots$  para que se cumpla la condición:

$$\frac{w_1}{u_1} = \frac{w_2}{u_2} = \frac{w_3}{u_3} = \frac{w}{u} = \frac{x_B}{x_A} \quad (2.28)$$

es un círculo de diámetro  $D_2x$  (radio  $r_1 = \frac{D_2x}{2}$ ). En consecuencia, la superficie equipotencial buscada es la de un cilindro cuyo eje pasa por el punto A perpendicularmente al plano del dibujo. Como observación, para el desarrollo de todas las ecuaciones se ha considerado toda la Carga concentrada en el eje  $A'$ . Y alrededor de este eje se ha determinado la superficie equipotencial que se considera ahora como superficie exterior del conductor.

### 2.2.3 Cuerpo conductor dentro de un Campo eléctrico.

Los conductores de Carga que hay en un conductor son capaces de trasladarse bajo la acción de una fuerza tan pequeña como se quiera. Por eso, para el equilibrio de las Cargas en un conductor es necesario que se cumplan las condiciones siguientes:

1. La intensidad del Campo en todas partes dentro del conductor debe ser nula, es decir:

$$E = 0 \quad (2.29)$$

De acuerdo con:  $E = -\nabla V \quad (2.30)$

esto significa que el Potencial dentro del conductor debe ser constante ( $V=\text{const}$ )

2. La intensidad del Campo en la superficie del conductor debe estar en cada punto dirigida según la normal a la superficie:

$$E = E_n \quad (2.31)$$

Por consiguiente, en el caso del equilibrio de las Cargas, la superficie del conductor será equipotencial.

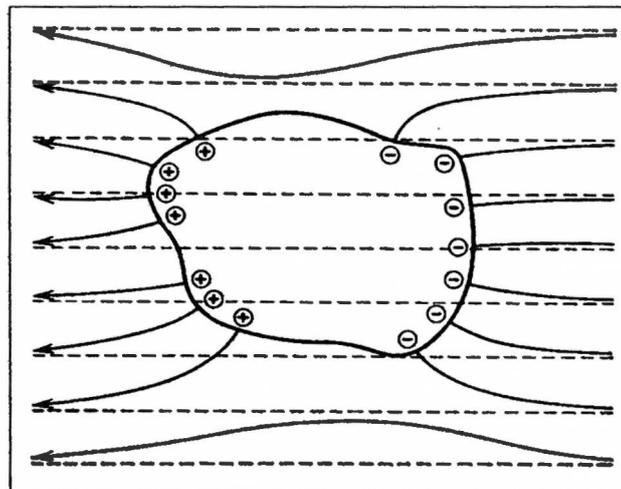
Si a un cuerpo conductor se le comunica cierta Carga  $q$ , esta se distribuye de modo que las condiciones de equilibrio se conserven. Imaginemos arbitrariamente una superficie cerrada comprendida totalmente dentro de los límites del cuerpo. Si las Cargas están en equilibrio, el Campo está ausente en cada punto dentro del conductor, por lo que el flujo del vector de desplazamiento eléctrico a través de la superficie será nulo. De acuerdo con el teorema de Gauss, la suma de las Cargas que hay dentro del recinto abarcado por la superficie también será nula. Esto es precisamente para una superficie de dimensiones cualesquiera extendida dentro del conductor de manera arbitraria. Por consiguiente, en equilibrio, en ningún sitio dentro del conductor puede haber Cargas excesivas; todas ellas se distribuyen por la superficie del conductor con cierta densidad  $\sigma$ .

Como en estado de equilibrio no hay Cargas excesivas dentro del conductor, la extracción de una porción de cierto espacio dentro de éste, no se reflejará en la disposición de equilibrio de las Cargas. Por lo tanto, la Carga excesiva distribuida en un conductor hueco, es lo mismo que en otro que sea macizo, es decir, por su superficie externa. En la superficie del hueco, en estado de equilibrio, no pueden situarse las Cargas elementales del mismo signo que forman la Carga  $q$ , ya que se repelen entre sí y, por lo tanto, tienden a situarse a las mayores distancias unas de otras.

Cuando un conductor sin Carga se introduce en un Campo Eléctrico, los portadores de Carga se ponen en movimiento: los positivos en el sentido del vector  $E$  y los

negativos en el sentido contrario. Como resultado, en los extremos del conductor surgen Cargas de signos contrarios llamadas Cargas inducidas (ver Fig. 2.15, las líneas de intensidad del Campo exterior se representan por medio de líneas discontinuas). El Campo de estas Cargas tiene sentido contrario al del Campo exterior. Por consiguiente, la acumulación de Cargas en los extremos del conductor hace que el Campo se debilite en él. La redistribución de los portadores de Carga continúa mientras no se cumplen las condiciones de las expresiones o fórmulas 2.29 y 2.31, es decir, hasta que la intensidad del Campo dentro del conductor se anula y las líneas de intensidad fuera de este último son perpendiculares a su superficie (ver Fig. 2.15). De este modo, un conductor neutro introducido en un Campo eléctrico interrumpe parte de las líneas de intensidad, las cuales terminan en las Cargas inducidas negativas y empiezan de nuevo en las positivas.

Las Cargas inducidas se distribuyen por la superficie externa del conductor. Si dentro del conductor existe una cavidad, con la distribución de equilibrio de las Cargas inducidas el Campo dentro de ella es nulo. [14]

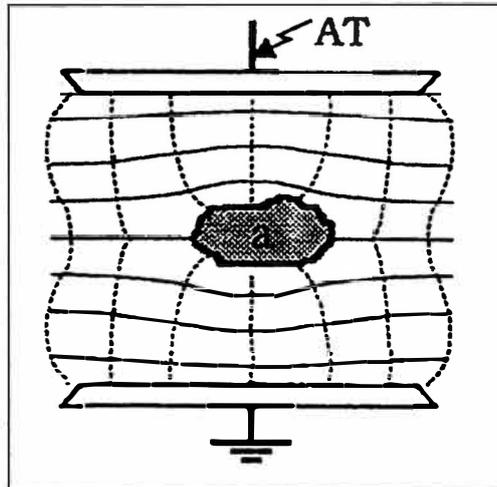


**Fig. 2.15: Conductor en un Campo Eléctrico externo [14].**

Cuando un cuerpo conductor adquiere el Potencial de su ubicación dentro del Campo Eléctrico, independientemente cual sea su tamaño, se identifica con una sola superficie equipotencial, como se muestra en la Fig. 2.16, y cuyas características son:

- La estructura de los cuerpos conductores tiene enlaces núcleo-electrón débiles y con una diferencia de Potencial, los electrones se deslizan de un átomo a otro produciendo la conducción.

- El Campo Eléctrico en el interior del cuerpo conductor es cero.
- Las Cargas libres se reparten en la superficie del cuerpo conductor.
- Habrá mayor densidad de Cargas a menor radio de curvatura externa.

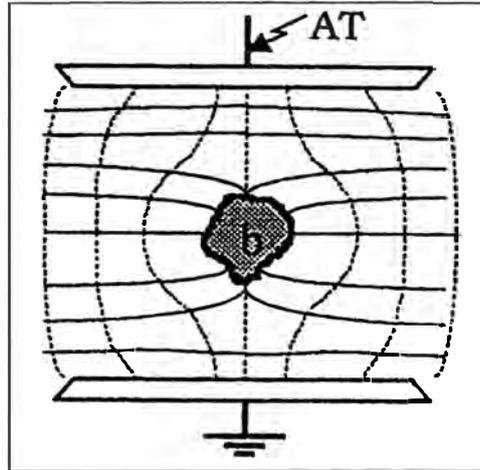


**Fig. 2.16: Conductor en un Campo Eléctrico externo y Líneas Equipotenciales [1].**

#### 2.2.4 Cuerpo dieléctrico dentro de un Campo Eléctrico

Un cuerpo dieléctrico conduce una sola línea de corriente independientemente cual sea el tamaño y ubicación dentro del Campo Eléctrico, como se aprecia en la Fig. 2.17, y cuyas características son:

- La estructura los cuerpos dieléctricos tienen enlaces núcleo-electrón fuertes, solo una alta diferencia de Potencial puede movilizar electrones ocasionando la disrupción.
- Pueden contener sin deterioro diferentes planos equipotenciales.
- Según el Campo eléctrico existen diferencias de Potenciales intrínsecas o propias en su interior.
- Pueden sufrir disrupción (perforación) si el gradiente disruptivo supera su rigidez dieléctrica, luego la provisión del aislamiento es fundamental.



**Fig. 2.17: Cuerpo dieléctrico en un Campo Eléctrico externo y líneas equipotenciales [1].**

### 2.2.5. Principio de imágenes

Sabemos que la ley de Coulomb solo es aplicable a Cargas puntuales si el Campo se halla entre una Carga puntual y una superficie plana como el suelo, por lo tanto, se tiene que recurrir al artificio de la Carga imagen para la representación analítica y la solución del Campo Eléctrico, es decir que [1]:

- La Carga en el suelo es la normalmente repartida sobre una superficie plana.
- Se asume que la tierra es un medio buen conductor de la electricidad.
- Se consideran las imágenes virtuales con Cargas opuestas en relación al plano del suelo, las misma se hallaran a idéntica distancia por debajo de la superficie del suelo.
- El principio se aplica a la solución de problemas de Campo Eléctrico que plantean las líneas eléctricas y las instalaciones de alta tensión.
- De ese modo la expresión de la ley de Coulomb toma la siguiente forma, como se muestra en la fórmula 2.32, que nos conduce a las soluciones definitivas sin necesidad de ulterior corrección.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q^2}{(2r)^2} \quad (2.32)$$

## 2.3. Determinación del Campo Eléctrico

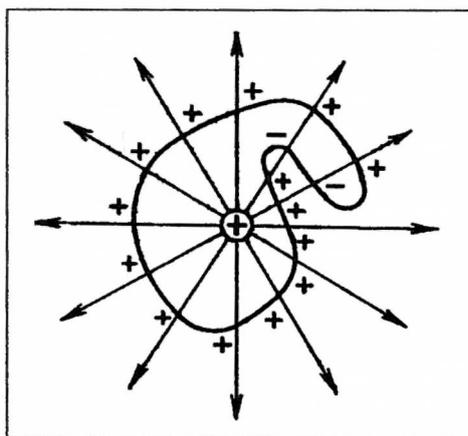
La determinación del Campo Eléctrico significa establecer la magnitud del Potencial y de la Capacitancia entre los electrodos conductores que lo forman, asimismo, el proceso se complica cuando se tienen configuraciones irregulares, es decir, con la presencia de diferentes dieléctricos o de Carga espacial. A las líneas eléctricas, se las considera paralelas, largas, con Carga uniforme y de pequeño radio [1].

### 2.3.1 Presencia de un conductor

Consideremos el Campo de una Carga puntual  $q$  y calculamos el flujo del vector  $E$  a través de la superficie cerrada  $S$ , (ver Fig. 2.18) que contiene dicha Carga. La cantidad de líneas del vector  $E$  que comienzan en una Carga puntual  $+q$  o que terminan en una Carga  $-q$  es numéricamente igual al número de líneas que salen al exterior ( $q/\epsilon_0$ ), se puede escribir que:

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.33)$$

El signo del flujo coincide con el de la Carga  $q$ .



**Fig. 2.18: Carga puntual  $q$  en una superficie cerrada [14].**

Supongamos ahora que dentro del recinto limitado por la superficie cerrada se encuentran  $N$  Cargas puntuales  $q_1, q_2, \dots, q_N$ . En virtud del principio de la superposición, la intensidad  $E$  del Campo creado por todas las Cargas será igual a la suma de las intensidades  $E_i$  creadas por cada Carga por separado:

$$E = \sum E_i \quad (2.34)$$

Por eso:

$$\Phi_E = \oint_S E \, dS = \oint_S \left( \sum_i E_i \right) dS = \sum_i \oint_S E_i \, dS \quad (2.35)$$

Cada una de las integrales que se encuentran bajo el signo de sumatoria es igual a  $q_i/\epsilon_0$ . Por lo tanto:

$$\Phi_E = \oint_S E \, dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i \quad (2.36)$$

La afirmación que acabamos de demostrar se llama teorema de Gauss. Este teorema dice que el flujo del vector intensidad de un Campo Eléctrico a través de una superficie cerrada es igual a la suma algebraica de las Cargas encerradas por esta superficie, dividida por  $\epsilon_0$ .

Cuando se estudian los Campos creados por Cargas macroscópicas (o sea, por Cargas formadas por un número enorme de Cargas elementales) se prescinde de la estructura discreta (discontinua) de estas Cargas y se supone que están distribuidas en el espacio de un modo continuo, con densidad finita en todas partes. La densidad volumétrica  $\rho$  de la Carga se determina, por analogía con la densidad de la masa, como la razón de la Carga  $dq$  al volumen físicamente infinitesimal  $dV$  en que se encuentra confinada dicha Carga:

$$\rho = \frac{dq}{dV} \quad (2.37)$$

En este caso, por volumen físicamente infinitesimal se debe entender un volumen tal, por una parte, sea suficientemente pequeño para que la densidad dentro de sus límites se pueda considerar igual, y por otra, sea suficientemente grande para que no pueda manifestarse el carácter discreto de la Carga.

Conociendo la densidad de la Carga en cada punto del espacio se puede hallar la Carga total comprendida dentro de la superficie cerrada  $S$ . Para esto hay que calcular la integral de  $\rho$  extendida al volumen limitado por la superficie:

$$\sum q_i = \int_V \rho \, dV \quad (2.38)$$

De esta forma, a la fórmula 2.36, puede dársele la siguiente forma:

$$\oint_S E \, dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dV \quad (2.39)$$

Asimismo, podemos sustituir la fórmula 2.39, mediante el teorema de Ostrogradski - Gauss, no obstante, definiremos antes el concepto de divergencia, es decir:

Supongamos dado el Campo del vector velocidad de un líquido continuo incompresible. Tomemos en el entorno del punto P una superficie cerrada imaginaria S (Fig. 2.19). Si en el volumen V limitado por esta superficie no mana ni desaparece líquido, el flujo que sale fuera a través de la superficie será, evidentemente, nulo. Si el flujo de líquido  $\Phi_v$  no es nulo, esto significará que dentro del volumen limitado por la superficie hay manantiales o sumideros de líquido, es decir, puntos por los cuales el líquido entra en el volumen (manantiales) o sale de él (sumideros). La magnitud del flujo determina la potencia algebraica total de los manantiales y sumideros. Si los manantiales predominan sobre los sumideros, el flujo será positivo, y si el predominio es de los sumideros, negativo.

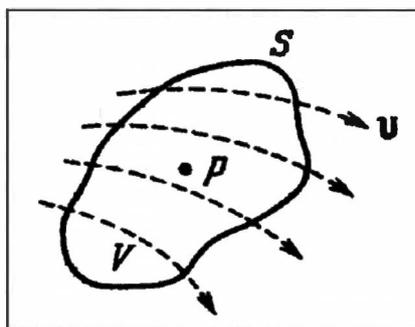


Fig. 2.19: Estudio de la divergencia [14].

La razón del flujo  $\Phi_v$  al volumen V del cual sale,

$$\Phi_v / V \quad (2.40)$$

resulta la potencia específica media de los manantiales comprendidos en el volumen V. En el límite, cuando V tiende a cero, o sea, cuando el volumen V se contrae

hacia el punto P, la fórmula 2.40 da la potencia específica de los manantiales que hay en el punto P, la cual se llama divergencia del vector  $v$  (y se designa por  $\text{div } v$ ). Es decir,

$$\text{div } v = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Phi_v}{V} \quad (2.41)$$

De modo análogo se determina la divergencia de cualquier vector “a”:

$$\text{div } a = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Phi_a}{V} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \oint a \, dS \quad (2.42)$$

La integral se toma sobre la superficie cerrada S que rodea el punto P; V es el volumen limitado por esta superficie. Como se efectúa el paso  $V \rightarrow P$ , en el cual S tiende a cero, es de suponer que la fórmula 2.41 no pueda depender de la forma de la superficie.

Conociendo la divergencia de un vector “a” en cada punto del espacio se puede calcular el flujo de este vector a través de cualquier superficie cerrada de dimensiones finitas. Primeramente vamos a hacer esto para el flujo del vector  $v$  (flujo de líquido). El producto de  $\text{div } v$  por  $dV$  da la potencia de los manantiales de líquido comprendidos en el volumen  $dV$ . La suma de estos productos, es decir,  $\int \text{div } v \, dV$  de la potencia algebraica total de los manantiales comprendidos en el volumen V sobre el cual se efectúa la integración. Como consecuencia de la incompresibilidad del líquido, la potencia total de los manantiales debe ser igual al flujo de líquido que sale fuera a través de la superficie S que limita el volumen V. Así, llegamos a la relación:

$$\oint_S v \, dS = \int_V \text{div } v \, dV \quad (2.43)$$

Una relación análoga se cumple para un Campo vectorial de cualquier naturaleza:

$$\oint_S a \, dS = \int_V \text{div } a \, dV \quad (2.44)$$

Esta relación lleva el nombre de teorema de Ostrogradski—Gauss. La integral de la parte izquierda de la relación se calcula sobre una superficie cerrada  $S$  arbitraria, y la integral de la parte derecha se extiende al volumen  $V$  limitado por dicha superficie.

Asimismo, se define el operador Nabla u operador de Hamilton ( $\nabla$ ), y se expresa como sigue:

$$\nabla = e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.45)$$

Aplicamos el operador nabla a la fórmula 2.44, y se tiene:

$$\oint_S a \, dS = \int_V \text{div } a \, dV = \int_V \nabla a \, dV \quad (2.46)$$

De la fórmula 2.39, se tiene:

$$\oint_S E \, dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dV \quad (2.47)$$

Sustituyendo de acuerdo con la fórmula 2.45, la integral de superficie por la de volumen, obtenemos:

$$\int_V \nabla E \, dV = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dV \quad (2.48)$$

La relación a que hemos llegado debe cumplirse para cualquier volumen  $V$  elegido arbitrariamente. Esto solo es posible si los valores de las funciones subintegrales son iguales en cada punto del espacio. Por consiguiente, la divergencia del vector  $E$  está relacionada con la densidad de Carga en el mismo punto por la igualdad:

$$\nabla E = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (2.49)$$

Esta igualdad expresa el teorema de Gauss en forma diferencial. En el caso de un líquido en movimiento  $\Delta v$  da la potencia específica de los manantiales de líquido en el punto dado. Por analogía, se dice que las Cargas son manantiales del Campo Eléctrico.

El teorema de Gauss permite en una serie de casos hallar la intensidad del Campo por medios mucho más simples que aplicando la fórmula 2.5, para la intensidad del Campo de una Carga puntual y el principio de superposición de los Campos.

Si la Carga está concentrada en una delgada capa superficial portadora de la Carga del cuerpo, la distribución de la Carga en el espacio se puede caracterizar por medio de la densidad superficial  $\sigma$ , que se determina por la expresión:

$$\sigma = \frac{dq}{dS} \quad (2.50)$$

donde,  $dq$  es la Carga comprendida en una capa de área  $dS$ . Se entiende por  $dS$  un fragmento de superficie físicamente infinitesimal.

Si la Carga está distribuida por el volumen o la superficie de un cuerpo cilíndrico (uniformemente en cada sección), se utiliza la densidad lineal de Carga:

$$\lambda = \frac{dq}{dl} \quad (2.51)$$

( $dl$  es la longitud de un segmento de cilindro físicamente infinitesimal, y  $dq$  la Carga concentrada en dicho segmento).

Estudiemos el Campo Eléctrico de un cilindro de longitud infinita cargado. Supongamos que el Campo lo crea una superficie cilíndrica infinita de radio  $R$ , cargada con la densidad superficial constante  $\sigma$ . De las razones de simetría se sigue que la intensidad del Campo en cualquier punto debe estar dirigida a lo largo de una recta radial, perpendicular al eje del cilindro, y su magnitud puede depender únicamente de la distancia  $r$  a dicho eje. Figuremos una superficie cilíndrica cerrada, de radio  $r$  y altura  $h$  (Fig. 2.20), coaxial a la superficie cerrada. Para las bases del cilindro  $E_n = 0$  y para la superficie lateral  $E_n = E(r)$  (la Carga se supone positiva). Por consiguiente, el flujo del vector  $E$  a través de la superficie considerada será igual a  $E(r) \times 2\pi r h$ . Si  $r > R$ , dentro de la superficie se encontrará la Carga  $q = \lambda h$  ( $\lambda$  es la densidad lineal de Carga). Aplicando el teorema de Gauss obtenemos:

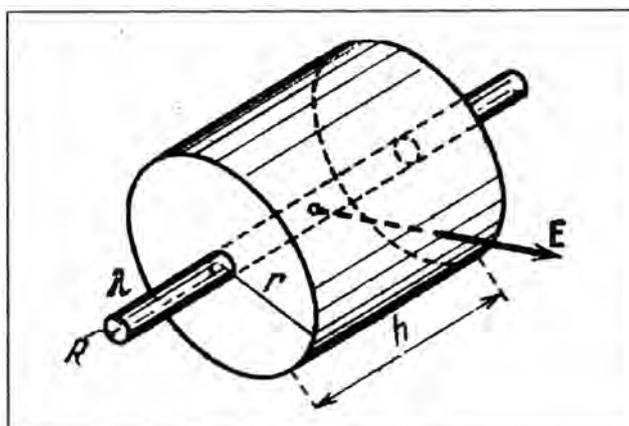
$$E(r) \ 2\pi r h = \frac{\lambda h}{\epsilon_0} \quad (2.52)$$

de donde obtenemos E, en el vacío:

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}, \quad (r \geq R) \quad (2.53)$$

es decir obtenemos E, para un medio igual a  $\epsilon$ :

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{\lambda}{r}, \quad (r \geq R) \quad (2.54)$$



**Fig. 2.20: Campo de un cilindro cargado de longitud finita [14].**

Si  $r < R$ , la superficie cerrada que se considera no contiene Cargas, por lo que el Campo,  $E(r) = 0$ . De este modo, dentro de una superficie cilíndrica de longitud infinita cargada no existe Campo. La intensidad del Campo fuera de la superficie se determina por la densidad lineal de Carga  $\lambda$  y la distancia  $r$  al eje del cilindro.

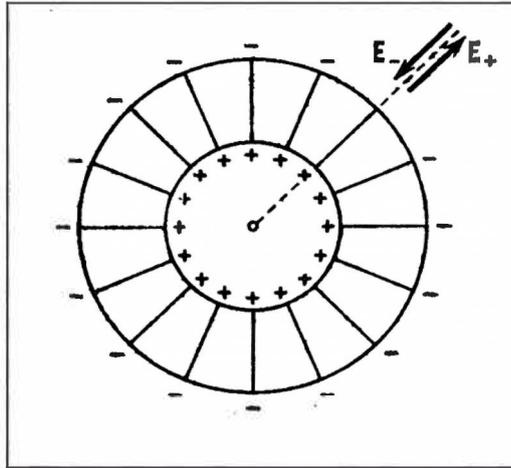
El Campo de un cilindro cargado negativamente solo se diferencia del Campo del cilindro cargado positivamente en el sentido del vector E.

De la fórmula 2.53 se deduce que, disminuyendo el radio R del cilindro (si permanece invariable la densidad lineal de Carga  $\lambda$ ), se puede obtener cerca de la superficie del cilindro un Campo de intensidad muy grande.

Sustituyendo en la fórmula 2.53, por  $\lambda = 2\pi R\sigma$  y suponiendo  $r = R$ , se obtiene para la intensidad del Campo en la inmediación de la superficie del cilindro el siguiente valor:

$$E(R) = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.55)$$

Valiéndose del principio de superposición es fácil hallar el Campo de dos superficies cilíndricas coaxiales con Cargas de igual magnitud, pero de signos distintos, de densidad lineal  $\lambda$  (Fig. 2.21). Dentro del cilindro menor y fuera del mayor, el Campo está ausente. En el hueco entre los dos cilindros la magnitud de la intensidad del Campo se determina por la fórmula 2.53. Esto es también válido para las superficies cilíndricas de longitud finita, si la distancia entre ellas es mucho menor que su longitud (condensador cilíndrico).



**Fig. 2.21: Superficies cilíndricas coaxiales [14].**

Comprobemos el cálculo del Campo Eléctrico mediante otro método, para ello tenemos un conductor único paralelo al suelo, y se dan adicionalmente las siguientes hipótesis:

- El conductor es horizontal de longitud infinita, paralelo al suelo.
- El suelo es plano, liso y conductivo para el Campo Eléctrico.
- La Carga ( $\lambda$ ) del conductor es única, se halla repartida en forma lineal.

En un punto “p” del espacio circundante, la influencia de la Carga ( $dQ$ ) de un segmento ( $d l$ ) de dicho conductor de radio ( $r_0$ ), se traducirá en un Campo ( $dE$ ) en la dirección que pasa por él, tal vector tendrá sus componentes normal ( $dE_n$ ) y tangencial ( $dE_t$ ), como mostrado en la Fig. 2.22.

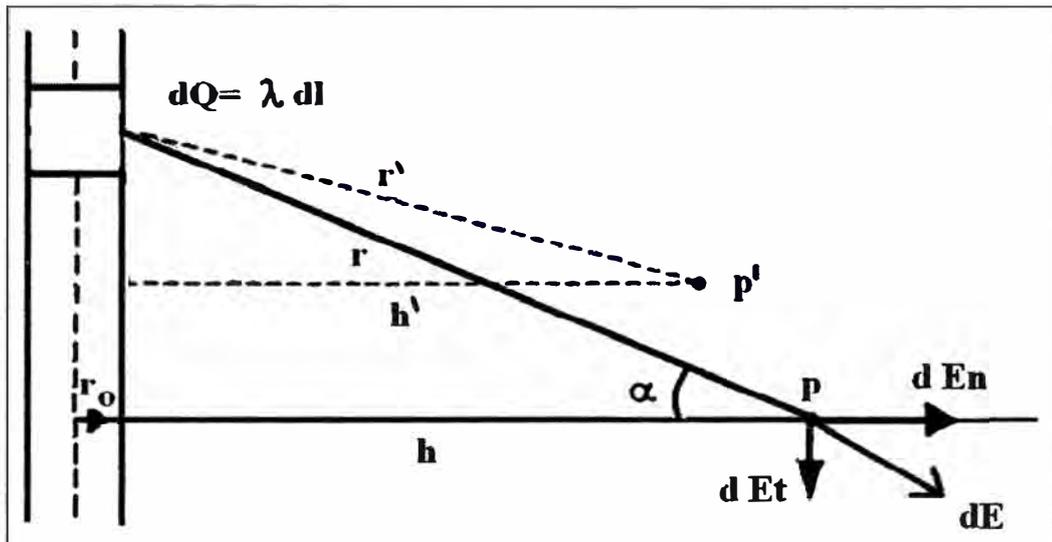


Fig. 2.22: Conductor de longitud infinita y paralelo al suelo [1].

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{\lambda dl}{r^2} \quad (2.56)$$

también:  $dE_n = dE \cos \alpha \quad (2.57)$

$$dE_t = dE \operatorname{sen} \alpha \quad (2.58)$$

Reemplazando en (dE) las magnitudes geométricas según la Fig. 2.22, se tiene

$$dE = \frac{\lambda d(h \operatorname{tg} \alpha)}{4\pi\epsilon \left( \frac{h^2}{\cos^2 \alpha} \right)} = \frac{\lambda \cos \alpha d\alpha}{4\pi\epsilon h} \quad (2.59)$$

Luego se obtiene la intensidad del Campo (E) en el punto "p" integrando (dE):

$$E = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon h} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \alpha d\alpha = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon h} \quad (2.60)$$

Comprobamos aquí que la fórmula 2.60 es igual a la fórmula 2.53, que fue determinado por el teorema de Gauss.

Luego se obtiene la diferencia de Potencial de conductor - punto (p)

$$U_0 - U_p = \int_{r_0}^{\infty} E dh = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \operatorname{Ln} \frac{h}{r_0} \quad (2.61)$$

También se halla la diferencia de Potencial entre dos puntos cualesquiera (p), (p'), mediante la siguiente expresión:

$$U_{p'} - U_p = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \left( \text{Ln} \frac{h}{r_0} - \text{Ln} \frac{h'}{r_0} \right) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \text{Ln} \frac{h}{h'} \quad (2.62)$$

### 2.3.2 Presencia de dos conductores

Las superficies equipotenciales que se expanden desde ambos conductores se empujan mutuamente, dejan de ser concéntricos a ellos y se densifican en el intervalo, anulándose en el plano límite flotante, por ende, según lo dicho, el lugar geométrico presenta las siguientes hipótesis:

- Un Potencial de referencia nulo ( $V = 0$ ) respecto de los conductores.
- Un Potencial real ( $V \neq 0$ ) respecto de tierra o de una PAT (puesta a tierra) próxima; es decir que mientras no haya una conexión sólida entre dicho plano flotante y tierra, existirá siempre una diferencia de Potencial commensurable que contribuye a los procesos de falla del aislamiento.

Como se trata de dos conductores paralelos que cumplen las hipótesis del caso anterior, se dan adicionalmente las siguientes hipótesis:

- Ambos tienen las Cargas repartidas siendo estas opuestas ( $-\lambda$ ), ( $+\lambda$ ).
- El Potencial en el punto medio de la línea equidistante entre ellos es:  $U = 0$ .

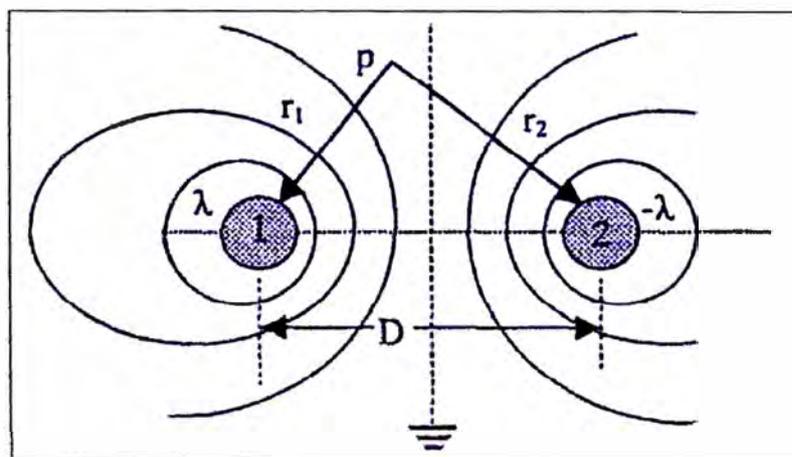


Fig. 2.23: Conductores de longitud infinita y paralelos entre sí [1].

Es decir:

- El Potencial parcial en un punto (p) debido a los conductores (1) y (2) distantes ( $r_1$  y  $r_2$ ), es:

$$U_{p1} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \operatorname{Ln} \frac{D}{2r_1} \quad (2.63)$$

$$U_{p2} = \frac{-\lambda}{2\pi\epsilon} \operatorname{Ln} \frac{D}{2r_2} \quad (2.64)$$

- El Potencial total en el punto (p) debido a la influencia de ambos conductores (1) y (2) es:

$$U_p = U_{p1} + U_{p2} \quad (2.65)$$

$$U_p = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \operatorname{Ln} \frac{r_2}{r_1} = K \quad (2.66)$$

- El Potencial en la superficie de un conductor por influencia del otro, para ( $D - r_0 \approx D$ ), es:

$$U_1 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \operatorname{Ln} \frac{D}{r_0} \quad (2.67)$$

$$U_2 = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \operatorname{Ln} \frac{D}{r_0} \quad (2.68)$$

De donde resulta la diferencia de Potencial entre los conductores (1) y (2)

$$U = U_1 - (-U_2) = \frac{\lambda}{\pi\epsilon} \operatorname{Ln} \frac{D}{r_0} \quad (2.69)$$

$$U = \frac{Q}{C} \quad (2.70)$$

- La distancia de cruce de las superficies equipotenciales con el eje de las abscisas X.

$$X_c = \pm D \left\{ \frac{1 + K^2}{1 - K^2} \right\} \quad (2.71)$$

## 2.4 Capacitancias eléctricas

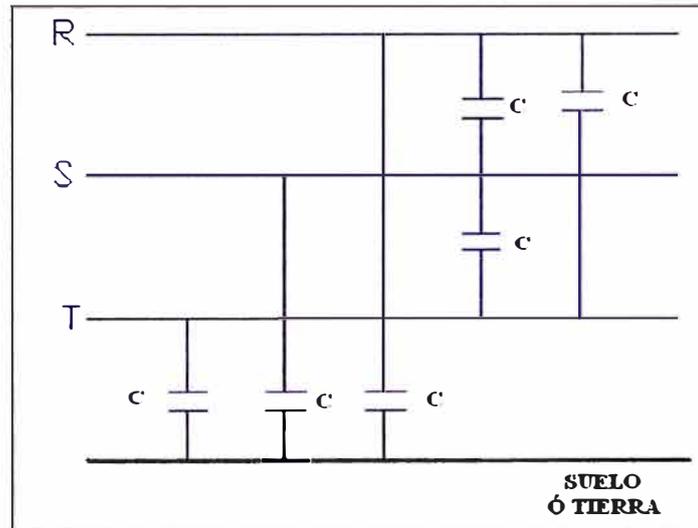
### 2.4.1. La Capacitancia

Cuando conectamos un electrodo a un polo de Tensión, hay desplazamiento de electricidad hasta que todos los puntos de su superficie adquieren igual tensión (U) que la fuente y la cantidad de electricidad recibida en una proporción (C) constituye su "Carga Eléctrica" (Q). Dicho de otra manera, la Carga es directamente proporcional a la Tensión aplicada, a través de una constante que define la capacidad natural de almacenamiento de energía eléctrica, que se denomina Capacitancia.

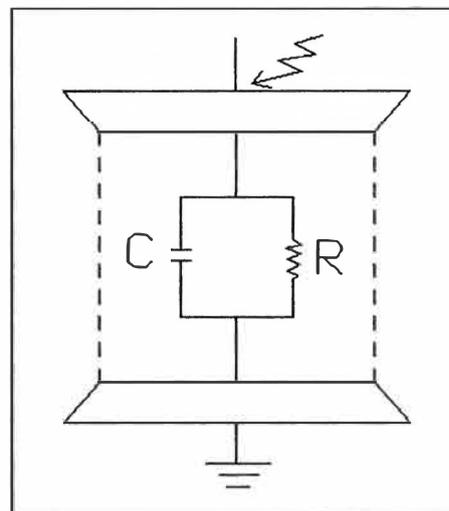
$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.72)$$

- La Capacitancia (C) se mide en Faradios ( $F = 10^{-6}$  uF), la Carga en Coulomb (Q) y la Tensión en Volt (U), la inversa de la Capacitancia es la Elastancia (S) dada en Siemens, representa la interacción de esfuerzos dinámicos que impone la Carga.

$$C = \frac{1}{S} \quad (2.73)$$



**Fig. 2.24: Capacitancias naturales parásitas [1].**



**Fig. 2.25: Capacitancias naturales intrínsecas [1].**

- Las Capacitancias intrínsecas de los aisladores y brechas de aire se cargan con la Corriente de pérdidas que circula hasta tierra por la Resistencia de los dieléctricos, luego la Conductancia (Perditancia) es la inversa de la Resistencia del aislamiento.
- La Corriente de Carga de la Capacitancia y la energía absorbida en Corriente Alterna están dadas por las fórmulas 2.74 y 2.75:

$$I = 2\pi f UC \quad (2.74)$$

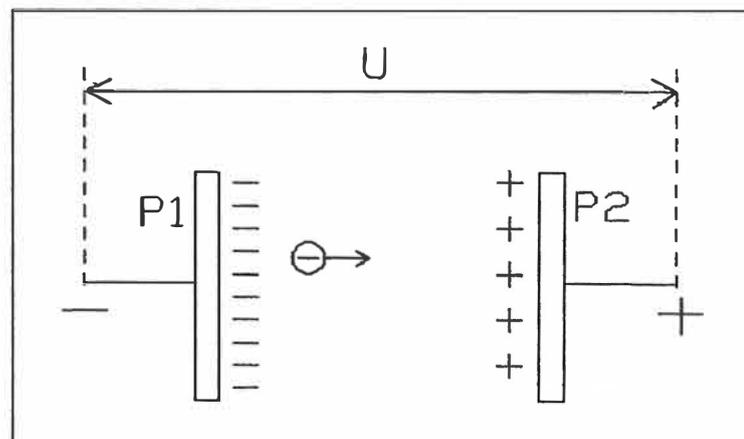
$$W = \frac{1}{2} U^2 C \quad (2.75)$$

Cuando se trata de cables subterráneos, el fenómeno capacitivo se acentúa debido al apantallamiento individual de las fases con flejes metálicos, a la proximidad de las superficies cargadas y a la elevada constante dieléctrica.

- Gran parte de los desbalances capacitivos en los sistemas de AT, provienen de:
  - las fallas a tierra, que anulan las Capacitancias del conductor fallado.
  - las descargas atmosféricas directas y en el cable de guarda que crean los coeficientes de acoplamiento respecto de los conductores de fase.
- Las Capacitancias en los conductores lineales implica:
  - la distribución uniforme de Cargas eléctricas en el conductor.
  - el cambio de polaridad no influye puesto que es lento respecto de la propagación.
  - las secciones del sistema forman Capacitancias agrupadas en las barras.

#### 2.4.2. El Condensador

- Está conformado por dos electrodos planos separados por un dieléctrico, que se cargan igual en oposición de polaridad (+), (-); en presencia de la Tensión aplicada (U), los electrones de la placa (P<sub>1</sub>) se dirigen hacia la placa (P<sub>2</sub>) a través de la fuente.



**Fig. 2.26: Dos electrodos planos que conforman el condensador [1].**

- La Carga (q) que admite cada placa por unidad de superficie (S<sub>0</sub>) constituye la Densidad Eléctrica de Desplazamiento (D); ellas se sitúan en las superficies internas.

$$D = \frac{Q}{S_0} \quad (2.76)$$

- A mayor Tensión (U) o menor distancia entre las placas, mayor será la cantidad de electricidad (E) y la densidad superficial; es decir, la intensidad de Campo Eléctrico que soporten los Condensadores; a Tensión constante, dependerá de la distancia entre placas.
- La relación entre el Deslizamiento Eléctrico (D) y la Intensidad del Campo Eléctrico (E), es a través de la Permitividad ( $\epsilon$ ) del dieléctrico, un mayor valor de ( $\epsilon$ ) significa una mayor densidad eléctrica.

$$D = \epsilon E \quad (2.81)$$

siendo: 
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.82)$$

donde:  $\epsilon_0$ : Coeficiente dieléctrico absoluto;  $\epsilon_0 = 8,869 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 8,869 \text{ pF}$

$\epsilon_r$ : Coeficiente dieléctrico relativo del material (sin unidades)

## 2.5. Corrientes y Tensiones inducidas desde conductores de alta tensión

Los objetos que se hallan próximos a las líneas eléctricas de alta tensión, reciben Corriente y Tensión inducidas, se requiere analizar el acoplamiento capacitivo a través del Potencial espacial, el Campo Eléctrico, los parámetros de los objetos y los fenómenos de descarga.

### 2.5.1 Determinación de la Carga inducida en objetos

- Los esquemas resultantes se resuelven aplicando el método de imágenes.
- Se establecen las matrices de relación de Cargas, Tensiones y coeficientes de Potencial.

Sea un conductor energizado a AT (1) y un objeto (2), que puede ser una persona que se halla cerca de tierra; la matriz general con los coeficientes de Potencial se escribirá de la forma siguiente:

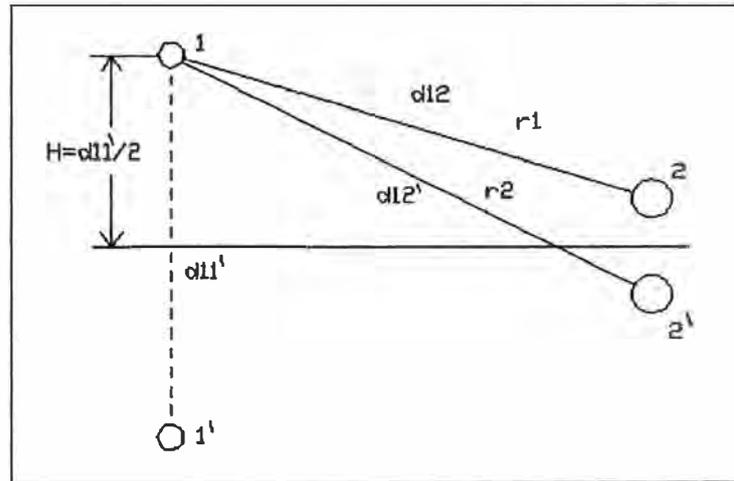


Fig. 2.27: Carga inducida en objetos [1].

$$[V] = [P] [Q] \quad (2.79)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \text{Ln} \frac{d_{11'}}{r_1} & \text{Ln} \frac{d_{12'}}{d_{12}} \\ \text{Ln} \frac{d_{21'}}{d_{21}} & \text{Ln} \frac{d_{22'}}{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

$$P_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \text{Ln} \frac{d_{11'}}{r_1} \quad (2.82)$$

$$P_{12} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \text{Ln} \frac{d_{12'}}{d_{12}} \quad (2.83)$$

Cuando el objeto (2) está cerca del suelo, su Carga no afecta al conductor (1), entonces la Carga en (2) es cero, es decir:

$$Q_2 = 0 \quad (2.84)$$

Por lo tanto, resulta las siguientes expresiones:

$$V_1 = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon} \text{Ln} \frac{d_{11'}}{r_1} \quad (2.85)$$

$$Q_1 = \frac{2\pi\epsilon V_1}{\text{Ln} \frac{d_{11'}}{r_1}} \quad (2.86)$$

Es imprescindible determinar la Corriente de descarga a tierra del objeto (2) y para ello dicho objeto deberá estar al Potencial de tierra, es decir:

$$V_2 = 0 = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon} \text{Ln} \frac{d_{12'}}{d_{12}} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon} \text{Ln} \frac{d_{22'}}{r_2} \quad (2.87)$$

$$Q_2 = -Q_1 \frac{\text{Ln} \frac{d_{12'}}{d_{12}}}{\text{Ln} \frac{d_{22'}}{r_2}} \quad (2.88)$$

mediante la siguiente expresión:

$$\text{Ln}(1 + \delta) = \delta \quad (2.89)$$

para  $\delta$  muy pequeño, y  $\text{Ln} \frac{d_{12'}}{d_{12}} \approx \frac{Hd_{22'}}{(d_{12})^2}$ , se tendrá lo siguiente:

$$Q_2 = \frac{-2Q_1 H}{2\pi\epsilon(d_{12})^2} \cdot \frac{d_{22'}}{2} \cdot \frac{2\pi\epsilon_0}{\text{Ln} \frac{d_{22'}}{r_2}} \quad (2.90)$$

Luego, disgregando la fórmula 2.90, se tiene:

$$\frac{-2Q_1 H}{2\pi\epsilon(d_{12})^2}, \text{ es el Campo de la línea "E"} \quad (2.91)$$

$$\frac{d_{22'}}{2}, \text{ es la altura del objeto "h"} \quad (2.92)$$

$$\frac{-2Q_1 H}{2\pi\epsilon(d_{12})^2} \cdot \frac{d_{22'}}{2}, \text{ es el Potencial del objeto} \quad (2.93)$$

$$\frac{2\pi\epsilon_0}{Ln \frac{d_{22'}}{r_2}}, \text{ es la Capacitancia del objeto a tierra "C}_{OT}\text{" (2.94)}$$

### 2.5.2 Extensión del principio del método de imágenes a cualquier objeto

- En la fórmula 2.90,  $Q_2$  se puede escribir en forma general:

$$Q = E.h.C_{OT} \quad (2.95)$$

- Luego se podrá calcular la Corriente inducida en el objeto " $I_{CT}$ " y estará dada por:

$$I_{CT} = J\omega Q = J\omega C_{OT}V_2 \quad (2.96)$$

- Además, participa la componente vertical (J) del Campo de la línea (E), que es normal al suelo.
- La Capacitancia promedio que es  $C_{OT}$  incluirá la Capacitancia del conductor al objeto, debido a que es de valor muy pequeño (1% de  $C_{OT}$ ).

**Tabla N° 2.1: Capacitancias promedio a tierra de objetos [1].**

<b>Capacitancias promedio a tierra (<math>C_{OT}</math>) de objetos</b>	
<b>Objeto sobre pavimento seco o sobre el suelo seco</b>	<b>Capacitancia (pF)</b>
Ser Humano	100
Persona con herramienta	150
Triciclo de carga	700
Automóvil compacto	800
Camioneta compacta	900
Limousina/camioneta	1000
Camioneta rural	1200
Camión estándar	1500
Autobús escolar o grande	2000
Vehículos acoplados	$\geq 3000$
Persona en plataforma	1900

- La Corriente de Desplazamiento por área unitaria es:

$$I = \frac{dQ}{dt} = J\omega D = J\omega\epsilon_0 E \quad (2.97)$$

$$I_{CT} = J\omega \cdot C_{OT} \cdot hE = J\omega\epsilon_0 E \cdot h \frac{C_{OT}}{\epsilon_0} \quad (2.98)$$

Si se disgrega la fórmula 2.98, se tiene lo siguiente:

$$J\omega\epsilon_0 E, \text{ Corriente de Desplazamiento } I_d \text{ en (mA/m}^2\text{)} \quad (2.99)$$

$$h \frac{C_{OT}}{\epsilon_0}, \text{ área colectora equivalente } S_C \text{ en (m}^2\text{)} \quad (2.100)$$

El área colectora equivalente “ $S_C$ ” es la superficie equivalente del suelo que captaría la misma Carga en ausencia del objeto.

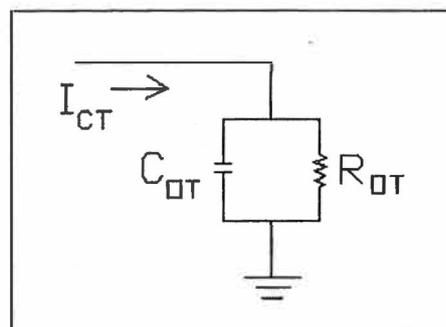
La fórmula 2.98, es aplicable para objetos próximos al suelo, siendo estos objetos aislados del suelo o mediante una impedancia ( $Z_{OT}$ ). Se conoce que si la frecuencia es de 60 Hz, entonces:  $\omega\epsilon_0 = 1/(3 \times 10^8)$ .

Por lo tanto, la Tensión de circuito abierto “ $V_{CA}$ ” debido al paso de  $I_{CT}$  a través de la impedancia  $Z_{OT}$  del objeto al suelo, esta expresado por:

$$V_{CA} = I_{CT} Z_{OT} \quad (2.101)$$

donde:

$$Z_{OT} = J\omega C_{OT} + \frac{1}{R_{OT}} \quad (2.102)$$



**Fig. 2.28: Representación circuital de la Resistencia y Capacitancia del objeto a tierra [1].**

Como  $R_{OT}$  es de valor grande, entonces  $V_{CA}$  se calcula solo con la Reactancia Capacitiva a tierra.

La posibilidad de las descargas disruptivas es debida a la energía (fórmula 2.103, expresado en Joules) involucrada que está en función de la Capacitancia del objeto a tierra y de la Tensión de circuito abierto en valor pico:

$$W = \frac{CV^2}{2} = \frac{1}{2}C_{OT}V_{CA}^2 = \frac{1}{2}C_{OT}(\sqrt{2} V_{CA})^2 = C_{OT}V_{CA}^2 \quad (2.103)$$

### 2.5.3 Áreas colectoras de Carga equivalente

La geometría de los objetos puede ser muy complicada, para ello se realiza una aproximación a formas sencillas regulares tanto planas como volumétricas.

Las expresiones para calcular el área colectoras se encuentra en la tabla N° A.1 del anexo A, asimismo se encuentra un ejemplo de cálculo práctico.

## **CAPÍTULO III METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA**

### **3.1 Conceptos previos y alternativas de solución.**

#### **3.1.1. Electricidad estática**

La electrostática es el campo de la ciencia dedicado a estudiar las Cargas o los cuerpos cargados en reposo.

Paradójicamente, la electrostática es una de las formas más desconocidas de manifestación eléctrica y son muy comunes y frecuentes que los derivados de la electricidad industrial.

Se tiene electricidad estática cuando en los objetos se forman Cargas Eléctricas que no se desplazan, y normalmente se halla en equilibrio en los cuerpos neutros. Si las Cargas circulan, se establece una Corriente y la electricidad ya no es estática o es deslizante [1].

No confundamos el término electricidad con la Corriente resultante de las Cargas en movimiento.

Electrización estática es el término utilizado para designar cualquier proceso que dé por resultado la separación de Cargas Eléctricas positivas y negativas.

Todos los materiales difieren en la medida en que permiten el paso de Cargas Eléctricas. Los materiales conductores permiten el paso de Cargas (las Cargas son “libres”) cuya conducción se mide con una propiedad denominada Conductancia, mientras que los aislantes obstaculizan su movimiento (las cargas son “fijas” a menos que se las movilice mediante una alta diferencia de Potencial, ocurriendo la disrupción) y se caracteriza por su Resistividad [1],[11].

La separación de Cargas que conduce a la electrización es resultado de procesos mecánicos como por ejemplo: el contacto entre objetos o por deslizamiento de carga, por inducción, la fricción o la colisión de dos superficies, por lo que puede tratarse de dos superficies sólidas o una sólida y otra líquida. Es decir, la electricidad estática se origina por intercambios de Carga Eléctrica que tienen lugar cuando se produce una fricción entre dos sustancias de distinta naturaleza. En la mayoría de los casos, la energía de la electricidad estática producida de forma espontánea es insuficiente para producir directamente efectos nocivos en el cuerpo humano. Sin embargo, las chispas producidas en las descargas constituyen un foco de ignición que puede dar lugar a incendios o explosiones. Por lo tanto, en todo lugar o proceso donde pueda producirse una acumulación de Cargas electrostáticas deberán tomarse las medidas preventivas necesarias para evitar las descargas peligrosas y particularmente, la producción de chispas en emplazamientos con riesgo de incendio o explosión. Entre los procesos que pueden originar descargas de electricidad estática se pueden distinguir dos clases, los cuales deberán ser objeto de una especial importancia y atención [1], [11]:

- Los procesos en los que se produce una fricción continua entre materiales aislantes o aislados, por ejemplo: La fabricación o empleo de rollos de papel (máquinas rotativas, etc.) Las máquinas que llevan incorporadas cintas o correas de transmisión. Las máquinas en las que giran rodillos de distinto material en contacto.
- Los procesos donde se produzca una vaporización o pulverización y el almacenamiento, transporte o trasvase de líquidos, gases o materiales en forma de polvo, en particular, cuando se trate de sustancias inflamables. Entre ellos se encuentran: Las operaciones de pintura con pistolas pulverizadoras. Las operaciones en las que se hacen circular fluidos combustibles a través de conductos y su trasvase entre depósitos. El transporte neumático de materiales pulverizados y su trasvase.

### **3.1.2. Procesos de electrización**

El fenómeno de generación de electricidad estática por fricción (triboelectrización) se conoce desde hace miles de años. Para inducir electricidad basta con que haya contacto entre dos materiales. La fricción sólo es un tipo de interacción que aumenta el área de contacto y genera calor: fricción es el término general que describe el movimiento de dos objetos en contacto; la presión ejercida, su velocidad de deslizamiento y el calor generado

son los determinantes principales de la Carga generada por fricción. Algunas veces, la fricción originará también el arranque de partículas sólidas.

#### a) Metal y metal.

Cuando los dos sólidos en contacto son metales (contacto metal-metal), hay migración de Electrones de uno al otro. Cada metal se caracteriza por un potencial inicial diferente (Potencial de Fermi), y la naturaleza tiende siempre al equilibrio; es decir, los fenómenos naturales trabajan para eliminar las diferencias de Potencial. Tal migración de Electrones da lugar a la generación de un Potencial de contacto. Como las Cargas de un metal son muy móviles (los metales son conductores excelentes), las Cargas se recombinarán incluso en el último punto de contacto antes de que los dos metales se separen. Por lo tanto, es imposible inducir electricidad por el hecho de poner en contacto dos metales y separarlos después; las Cargas se desplazarán siempre para eliminar la diferencia de Potencial.

#### b) Metal y aislante.

Cuando un metal y un aislante entran en contacto casi sin fricción en el vacío, el nivel de energía de los Electrones del metal se aproxima al del aislante. Impurezas superficiales o del volumen se encargan de que ocurra así e impiden también la formación de un arco en el momento de la separación. La Carga transferida al aislante es proporcional a la Afinidad Electrónica del metal, y cada aislante tiene también una Afinidad Electrónica, o atracción de Electrones, asociada con ella. Así pues, también es posible la transferencia de Iones positivos o negativos del aislante al metal. La Carga en la superficie después del contacto y separación de un metal y un aislante, se calcula mediante la fórmula 3.1.

En general, la Densidad Superficial de Carga ( $\sigma_s$ ) que sigue al contacto y separación, puede expresarse por:

$$\sigma_s = eN_E(\phi_m - \phi_i) \quad (3.1)$$

donde:  $e$ : Es la Carga de un Electrón =  $1,59 \times 10^{-19}$  C.

$N_E$ : Es la densidad de estados de energía en la superficie del aislante.

$\phi_i$ : Es la Afinidad Electrónica del aislante.

$\phi_m$  : Es la Afinidad Electrónica del metal.

### c) Aislante y aislante.

Cuando dos aislantes entran en contacto, tiene lugar una transferencia de Cargas a causa de los diferentes estados de su energía superficial, como se expresa en la fórmula 3.2, en la cual se tiene la Carga posterior al contacto entre dos aislantes. Las Cargas transferidas a la superficie de un aislante pueden migrar hacia capas más profundas del material. La humedad y la contaminación superficial pueden modificar en gran medida el comportamiento de las Cargas. La humedad superficial en particular incrementa las densidades de estados de energía superficial al aumentar la conducción superficial, que favorece la recombinación de Cargas, y facilita la movilidad iónica. El aumento o disminución del contenido de agua llega a invertir el sentido de la circulación de Cargas (su polaridad).

La siguiente fórmula general se aplica a la transferencia de carga entre dos aislantes con estados energéticos diferentes (sólo con superficies perfectamente limpias):

$$\sigma_s = e \frac{N_{E1} \cdot N_{E2}}{N_{E1} - N_{E2}} (\phi_1 - \phi_2) \quad (3.2)$$

donde:  $N_{E1}$  y  $N_{E2}$  son las densidades de estados de energía en la superficie de los dos aislantes, y  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son las Afinidades Electrónicas de los dos aislantes.

La polaridad (positividad y negatividad relativas) mutua de dos aislantes en contacto depende de la Afinidad Electrónica de cada material. Los aislantes se clasifican por sus Afinidades Electrónicas, algunos de cuyos valores ilustrativos se recogen en la Tabla 1.1, en la cual, un material adquiere Carga positiva cuando entra en contacto con un material que lo precede en la lista, y Carga negativa cuando entra en contacto con un material que le sigue en la lista. La Afinidad Electrónica de un aislante es una consideración importante en los programas de prevención.

**TABLA N° 3.1: Afinidades Electrónicas de determinados polímeros [11].**

<b>Carga</b>	<b>Material</b>	<b>Afinidad Electrónica (EV)</b>
-	PVC (cloruro de polivinilo)	4,85
	Policarbonato	4,26
	PTFE (politetrafluoretileno)	4,26
	PETP (tereftalato de polietileno)	4,25
	Poliestireno	4,22
	Poliamida (Nylon)	4,08

**d) Sólido y líquido.**

Aunque ha habido intentos de establecer una serie triboeléctrica que ordenaría los materiales de manera que los que adquieren Carga positiva al ponerse en contacto con materiales, aparecieran en la serie antes que los que adquieren Carga negativa al ponerse en contacto con esos mismos materiales, no se ha llegado a establecer una serie reconocida en todo el mundo. Cuando se juntan un sólido y un líquido (para formar una interfaz sólido-líquido), hay una transferencia de Cargas por la migración de los Iones existentes en el líquido. Tales Iones surgen de la disociación de posibles impurezas o por reacciones electroquímicas de oxidación-reducción. Como en la práctica no existen líquidos perfectamente puros, siempre habrá en el líquido algunos Iones positivos y negativos que puedan ligarse a la interfaz líquido-sólido. Hay muchos tipos de mecanismo mediante los cuales se pueda inducir esta ligadura (por ejemplo: adherencia electrostática a superficies metálicas, absorción química, inyección electrolítica, disociación de grupos polares.)

Como las sustancias que se disuelven (disocian) son eléctricamente neutras en principio, generarán igual número de Cargas positivas y negativas. La electrización sólo ocurre si las Cargas positivas o las negativas se adhieren con preferencia a la superficie del sólido. Si sucede esto, se forma una capa muy compacta conocida como la capa de Helmholtz. Como la capa de Helmholtz está cargada, atraerá hacia sí Iones de la polaridad opuesta. Tales Iones se agruparán en una capa más difusa, conocida como capa de Gouy, que se sitúa encima de la superficie de la capa compacta de Helmholtz. El espesor de la capa de Gouy aumenta con la Resistividad del líquido. Los líquidos conductores forman capas de Gouy muy delgadas.

La doble capa se separará si el líquido fluye y entonces la capa de Helmholtz permanecerá ligada a la interfaz y la capa de Gouy será arrastrada por el líquido que se desplaza. El movimiento de estas capas cargadas produce una diferencia de potencial (el potencial zeta), y la Corriente inducida por las Cargas móviles se conoce como la Corriente de gasto. La cantidad de Carga que se acumula en el líquido depende del ritmo al cual los Iones se difunden hacia la interfaz y de la Resistividad del líquido ( $r$ ). Ahora bien, la Corriente de gasto es constante a lo largo del tiempo.

Ni los líquidos muy aislantes, ni los que son conductores llegan a cargarse; los primeros porque hay muy pocos Iones en presencia, y los segundos porque en líquidos que conducen muy bien la electricidad, los Iones se recombinarán con gran rapidez. En la práctica, sólo habrá electrización en líquidos cuya resistividad sea mayor que  $10^7 \Omega \text{ m}$  o menor que  $10^{11} \Omega \text{ m}$ . Los mayores valores observados son de  $r = 10^9$  a  $10^{11} \Omega \text{ m}$ .

Los líquidos en movimiento inducirán acumulación de Carga en las superficies aislantes sobre las cuales discurren. La medida de la formación de densidad superficial de Carga estará limitada:

1. Por la rapidez con que los Iones del líquido se recombinen en la interfaz líquido-sólido.
2. Por la velocidad con que los Iones del líquido sean conducidos por el aislante.
3. Porque se originen arcos en la superficie o el volumen del aislante y por lo tanto se pierda la carga.

El régimen turbulento y el movimiento sobre superficies rugosas favorecen la electrización.

Si a un cuerpo cargado (un electrodo) que tiene un radio pequeño (por ejemplo, un alambre) se le aplica una Tensión alta (de varios Kilovoltios), el Campo Eléctrico en la proximidad inmediata del cuerpo cargado es elevado, pero disminuye en seguida con la distancia. Si hay descarga de las cargas almacenadas, dicha descarga estará limitada a la región en que el Campo Eléctrico es más intenso que la Rigidez Dieléctrica de la atmósfera circundante, fenómeno conocido como efecto Corona, porque el arco también emite luz.

La densidad de Carga en una superficie aislante se modifica también por los Electrones en movimiento generados por un Campo Eléctrico de gran intensidad. Tales Electrones generarán Iones a partir de las moléculas de gas existentes en la atmósfera con la cual entran en contacto. Cuando la Carga Eléctrica del cuerpo sea positiva, el cuerpo cargado repelerá los Iones positivos que se hayan generado. Los Electrones creados por objetos cargados negativamente perderán energía a medida que se retiran del electrodo, y se

ligarán a moléculas gaseosas de la atmósfera para formar Iones negativos que continuarán separándose de los puntos de Carga. Los Iones positivos y negativos quedan en reposo sobre cualquier superficie aislante y modifican la densidad de Carga de la superficie. Es un tipo de Carga mucho más fácil de controlar y más uniforme que las Cargas generadas por fricción. Las Cargas generadas de esta forma tienen un límite, es decir que la densidad superficial de Carga tiene un valor máximo, que se describe matemáticamente en la fórmula 3.3.

La Rigidez Dieléctrica ( $E_G$ ) del gas circundante impone un límite superior a la Carga que es posible generar en una superficie aislante plana. En el aire,  $E_G$  es de unos 3 MV/m. La densidad superficial de Carga máxima viene dada por:

$$\sigma_{s\max} = e_0 E_G = 2,66 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2 = 2,660 \text{ pC/m}^2 \quad (3.3)$$

Para generar Cargas más altas, es preciso incrementar la Rigidez Dieléctrica del ambiente, bien mediante la creación de un vacío, bien por metalización de la otra superficie de la película aislante. Por este último método se arrastra el Campo Eléctrico hacia dentro del aislante y por lo tanto se reduce la intensidad de Campo en el gas circundante.

Cuando un conductor sumergido en un Campo Eléctrico ( $E$ ) se pone a tierra, como se puede apreciar en la Fig. 3.2, pueden producirse Cargas por inducción. En estas condiciones, el Campo Eléctrico induce polarización (separación de los centros de gravedad de los Iones negativos y positivos del conductor). Un conductor que se ponga a tierra temporalmente en un solo punto adquirirá una Carga neta cuando se desconecte de tierra, a causa de la migración de Cargas en la proximidad del punto. De aquí que las partículas conductoras situadas en un Campo uniforme oscilen entre electrodos y produzcan cargas y descargas en cada contacto.

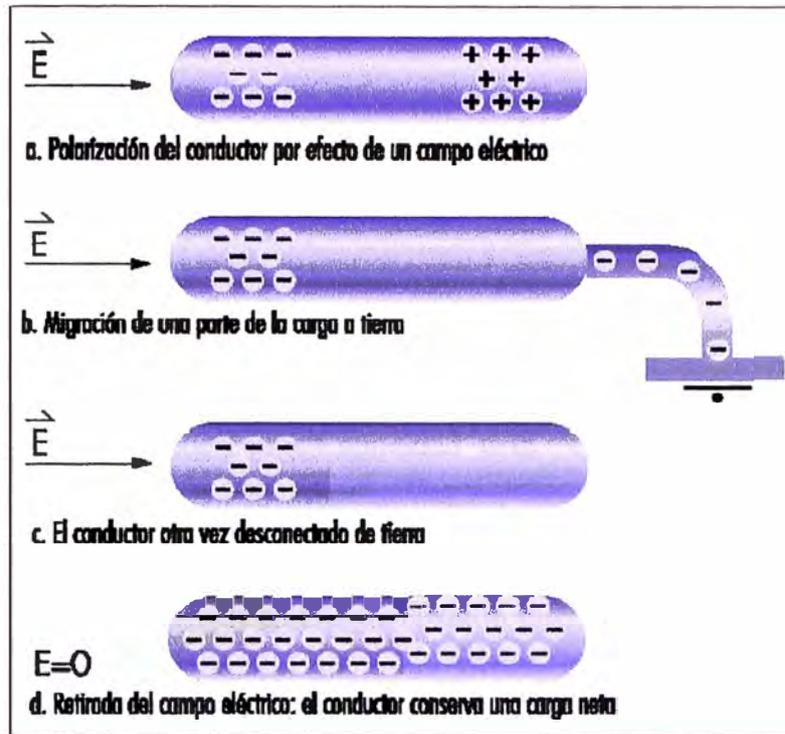


Fig. 3.2: Mecanismo de carga de un conductor por inducción [11].

### 3.1.3. Peligros asociados a la electricidad estática

Los efectos nocivos provocados por la acumulación de electricidad estática varían desde la incomodidad que se experimenta cuando al tocar un objeto cargado, como la manija de una puerta, hasta las lesiones muy graves, incluso fallecimientos, provocadas por una explosión debida a la electricidad estática. El efecto fisiológico de las descargas electrostáticas en seres humanos varía desde una picazón incómoda hasta acciones cuyos reflejos son violentos. Se trata de efectos producidos por la Corriente de descarga y, en especial, por la densidad de Corriente en la piel.

Describiremos algunas de las formas por las cuales las superficies y los objetos se cargan en la práctica (electrización). Cuando el Campo Eléctrico inducido supera la capacidad del ambiente circundante para resistir a la Carga (es decir, supera a la Rigidez Dieléctrica del ambiente), tiene lugar una descarga (En el aire, la Rigidez Dieléctrica viene descrita por la curva de Parchen, ver anexo E.1, y depende del producto de la presión por la distancia entre los cuerpos cargados) [1].

Las descargas disruptivas adoptan las formas siguientes:

- Chispas o arcos que forman un puente entre dos cuerpos cargados (dos electrodos metálicos)

- Descargas parciales, o en escobilla, que forman un puente entre un electrodo metálico y un aislante, o incluso dos aislantes; estas descargas se denominan parciales porque el camino de conducción no pone en cortocircuito dos electrodos metálicos, sino que en general es múltiple y en forma de escobilla.
- Descargas en corona, conocidas también como poder de las puntas, que surgen en el fuerte Campo Eléctrico formado alrededor de cuerpos cargados o electrodos de radio muy pequeño.

Los conductores aislados tienen una Capacidad neta “C” con respecto a tierra. En las fórmulas 3.4 y 3.5, se expresan la relación entre Carga y Potencial, concerniente a las descargas de un conductor.

Se conoce que el Potencial de un conductor aislado portador de una Carga Q viene dado por:

$$V = \frac{Q}{C} \quad (3.4)$$

y la energía almacenada está dada por:

$$W = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (3.5)$$

Una persona que lleve calzado aislante es un ejemplo común de conductor aislado. El cuerpo humano es un conductor electrostático, con una Capacidad típica respecto a tierra de unos 150 pF y un Potencial de hasta 30 KV. Como las personas son conductores aislados, pueden experimentar descargas electrostáticas, como la sensación (más o menos desagradable) que se nota cuando una mano se acerca a la manija de una puerta o a otro objeto metálico. Cuando el Potencial alcanza el valor aproximado de 2 KV, se experimentará el equivalente a una energía de 0,3 mJ, aunque este umbral varía de una persona a otra. Si las descargas son más fuertes, los movimientos de los reflejos involuntarios pueden originar caídas. En el caso de trabajadores que utilizan herramientas, ello puede dar lugar a lesiones en la víctima y en otras personas que se hallen trabajando cerca. Las fórmulas 3.6, 3.7, y 3.8, describen la evolución temporal del Potencial.

La evolución temporal en un conductor cargado por una Corriente constante ( $I_G$ ), la evolución temporal del Potencial es:

$$V = R_f I_G (1 - e^{-t/R_f C}) \quad (3.6)$$

Donde  $R_f$  es la Resistencia de pérdida de Corriente del conductor.

Mientras que el Potencial final de un conductor cargado, si el tiempo transcurrido es largo, es decir,  $t \gg R_f C$  entonces la ecuación anterior se convierte en:

$$V = R_f I_G \quad (3.7)$$

Y la energía almacenada (en Joules) de un conductor cargado viene dada por:

$$W = \frac{1}{2} C R_f^2 I_G^2 \quad (3.8)$$

El arco real saltará cuando la fuerza del Campo Eléctrico inducido supere a la Rigidez Dieléctrica del aire. Debido a la rápida migración de las Cargas en los conductores, casi todas éstas confluyen en el punto de descarga y liberan toda la energía almacenada en forma de chispa. Las consecuencias son graves cuando se trabaja con sustancias inflamables o explosivas o en un ambiente inflamable.

La aproximación de un electrodo puesto a tierra a una superficie aislante cargada modifica el Campo Eléctrico e induce una Carga en el electrodo. A medida que las superficies se acercan entre sí, la intensidad del Campo aumenta y puede llegar a originar una Descarga Parcial desde la superficie aislante cargada. Como las Cargas de las superficies aislantes no son muy móviles, en la descarga sólo participa una pequeña proporción de la superficie, y por consiguiente la energía liberada en este tipo de descarga es mucho menor que en los arcos.

La Carga y la energía transferida parecen ser directamente proporcionales al diámetro del electrodo metálico, hasta unos 20 mm. La polaridad inicial del aislante también influye en la Carga y en la energía transferida. Las Descargas Parciales de las superficies con Carga positiva son menos energéticas que si las Cargas son negativas. Es imposible determinar a priori la energía transferida por una descarga desde una superficie aislante, al contrario que ocurre en la situación que afecta a superficies conductoras. En realidad, como la superficie aislante no es equipotencial, ni siquiera es posible definir las Capacidades que intervienen.

### 3.1.4. Descarga disruptiva

En la fórmula 3.3 vimos que la densidad superficial de Carga de una superficie aislante en el aire no puede ser superior a  $2,660 \text{ pC} / \text{cm}^2$ .

Si consideramos una placa aislante o una película de espesor “a”, que descansa en un electrodo metálico o que tenga una cara metálica, es fácil demostrar que el Campo Eléctrico es arrastrado hacia el interior del aislante por la Carga inducida en el electrodo a medida que se depositan Cargas en la cara no metálica. El resultado es que el Campo Eléctrico en el aire se debilita y se hace menor que si una de las caras no fuera metálica. En este caso, la Rigidez Dieléctrica del aire no limita la acumulación de Carga en la superficie aislante y es posible alcanzar densidades de Carga muy elevadas ( $> 2,660 \text{ pC/cm}^2$ ). La acumulación de Carga aumenta la Conductividad superficial del aislante.

Cuando un electrodo se aproxima a una superficie aislante, tiene lugar una Descarga Disruptiva que afecta a una gran proporción de la superficie cargada, que se ha convertido en conductora. Debido a las grandes áreas superficiales que intervienen, este tipo de descarga libera grandes cantidades de energía. En el caso de películas, el Campo en el aire es muy débil, y la distancia entre el electrodo y la película no puede ser mayor que el espesor de la película para que suceda la descarga. La Descarga Disruptiva se produce también cuando un aislante cargado se separa de su alma metálica. En tales circunstancias, el Campo en el aire experimenta un aumento abrupto y toda la superficie del aislante se descarga para restablecer el equilibrio.

### 3.1.5. Descargas electrostáticas y peligros de incendio y explosión

En atmósferas explosivas pueden tener lugar violentas reacciones de oxidación exotérmicas, con transferencia energética a la atmósfera, provocadas por:

- Llamas francas.
- Chispas eléctricas.
- Chispas de radiofrecuencia en las inmediaciones de una emisora de radio potente.
- Chispas producidas por colisiones (por ejemplo, entre metal y hormigón).
- Descargas electrostáticas.

En este último caso, el peligro de incendio asociado a las descargas electrostáticas se calcula tomando como referencia el límite inferior de inflamabilidad de los gases, vapores y sólidos o de los aerosoles líquidos. El límite puede variar en términos considerables, como se ilustra en la Tabla N° 3.2.

**Tabla N° 3.2: Límites inferiores típicos de inflamabilidad [11].**

<b>Descarga</b>	<b>Límite</b>
Algunos polvos	Varios Joules
Aerosoles muy finos de azufre y aluminio	Varios miliJoules
Vapores de hidrocarburos y otros líquidos orgánicos	200 microJoules
Hidrógeno y acetileno	20 microJoules
Explosivos	1 microJoules

Una mezcla de aire y de un gas o vapor inflamable sólo explota si la concentración de la sustancia inflamable está situada entre sus límites explosivos superior e inferior. Dentro de este intervalo, la energía mínima de ignición (EMI), o energía que ha de poseer una descarga electrostática para incendiar la mezcla, depende íntimamente de la concentración. Se ha demostrado de modo concluyente que la energía mínima de ignición depende de la velocidad de liberación de energía y, por extensión, de la duración de la descarga. El radio del electrodo es otro factor condicionante:

- Los electrodos de pequeño diámetro (del orden de varios milímetros) dan lugar a descargas en Corona en vez de producir chispas.
- Con electrodos de diámetros mayores (del orden de varios centímetros), la masa del electrodo es suficiente como para enfriar las chispas.

En general, las EMI más bajas se obtienen con electrodos que tienen el tamaño justo para impedir descargas en Corona.

La EMI depende también de la distancia entre los electrodos, y es mínima a la distancia de amortiguación, distancia a la cual la energía producida en la zona de reacción se hace superior a las pérdidas térmicas en los electrodos. Se ha demostrado experimentalmente que cada sustancia inflamable tiene una distancia de seguridad máxima, correspondiente a la distancia entre electrodos mínima a la cual ocurre una explosión. En los hidrocarburos, esta distancia es menor que 1 mm.

La probabilidad de explosiones de polvo depende de su concentración. La probabilidad máxima va asociada a concentraciones del orden de 200 a 500 g/m<sup>3</sup>. La EMI también

depende del tamaño de las partículas, y las más finas son las que explotan con más facilidad. Tanto en gases como en aerosoles, la EMI disminuye con la temperatura.

Por ejemplo en la industria existen muchos procesos utilizados a diario para manipular y transportar sustancias químicas que generan Cargas electrostáticas. Entre ellas se encuentran lo siguiente:

- El vertido de polvos desde sacos.
- El cernido.
- El transporte por tuberías.
- La agitación de líquidos, sobre todo en presencia de varias fases, sólidos suspendidos o gotitas de líquidos no miscibles.
- El rociado o niebla de líquidos.

Las consecuencias de la generación de Cargas electrostáticas comprenden problemas mecánicos, peligro de descarga electrostática en los operadores y, si se utilizan productos que contengan disolventes o vapores inflamables, incluso explosión. En la Tabla N° 3.3, se muestran algunas de operaciones industriales que generan Cargas electrostáticas.

**Tabla N° 3.3: Carga específica asociada a determinadas operaciones industriales [11].**

<b>Operación</b>	<b>Carga específica (q/m) (C/Kg)</b>
Cernido	$10^{-8} - 10^{-11}$
Llenado o vaciado de silos	$10^{-7} - 10^{-9}$
Transporte por tornillo sin fin	$10^{-6} - 10^{-8}$
Molienda	$10^{-6} - 10^{-7}$
Micronización	$10^{-4} - 10^{-7}$
Transporte neumático	$10^{-4} - 10^{-6}$

Los hidrocarburos líquidos, como el petróleo, el queroseno y muchos disolventes comunes, tienen dos características que les confieren una sensibilidad especial a los problemas de electricidad estática:

- Resistividad alta, que les permite acumular elevados niveles de cargas,
- Vapores inflamables, que aumentan el riesgo de descargas de baja energía que disparan incendios y explosiones.

Pueden generarse Cargas durante el transporte (por ejemplo, en la circulación por tuberías, bombas o válvulas). El paso por filtros finos, como los utilizados durante el llenado de los

depósitos de aviones, genera densidades de Carga de varios centenares de microCoulombs por metro cúbico. La sedimentación de partículas y la generación de nieblas o espumas cargadas durante el llenado de depósitos también originan cargas.

Por ejemplo, entre 1953 y 1971 la electricidad estática fue la responsable de 35 incendios y explosiones durante el llenado o a continuación del llenado de depósitos de queroseno, y durante el llenado de depósitos de camiones se produjeron aún más accidentes en España. La presencia de filtros o chorros durante el llenado (que pueden generar espumas o nieblas) son los factores de riesgo que más veces fueron identificados. También hubo accidentes a bordo de barcos petroleros, sobre todo durante la limpieza de tanques [11].

## **3.2. Soluciones**

### **3.2.1 Principios de la prevención de electricidad estática**

Todos los problemas relativos a electricidad estática se derivan de:

- La generación de Cargas Eléctricas;
- La acumulación de estas Cargas en aislantes o conductores aislados,
- El Campo Eléctrico producido por estas Cargas, que a su vez dan lugar a una fuerza o a una Descarga Disruptiva.

Las medidas preventivas tratan de evitar la acumulación de Cargas electrostáticas, y la estrategia más recomendable es impedir que se generen las Cargas Eléctricas. Si esto no fuera posible, hay que aplicar medidas dirigidas a conectar las Cargas a tierra. Por último, si la formación de descargas es inevitable, los objetos sensibles deberán protegerse contra los efectos de las descargas.

Por ejemplo, cuando se quiera evitar la acumulación de Cargas electrostáticas deberá tomarse alguna de las siguientes medidas, o combinación de las mismas, según las posibilidades y circunstancias específicas de cada caso:

- Eliminación o reducción de los procesos de fricción.
- Evitar, en lo posible, los procesos que produzcan pulverización, aspersion o caída libre.

- Utilización de materiales antiestáticos (poleas, moquetas o alfombras, calzado, etc.) o aumento de su Conductividad (por incremento de la humedad relativa, uso de aditivos o cualquier otro medio).
- Conexión a tierra, y entre sí cuando sea necesario de los materiales susceptibles de adquirir carga, en especial, de los conductores o elementos metálicos aislados.
- Utilización de dispositivos específicos para la eliminación de Cargas electrostáticas. En este caso la instalación no deberá exponer a los trabajadores a radiaciones peligrosas (ver anexo E).
- Cualquier otra medida para un proceso concreto que garantice la no acumulación de Cargas electrostáticas.

#### **a) Procedimientos para evitar la electricidad estática**

Los principales procedimientos para evitar la acumulación de electricidad estática son los siguientes [8]:

- Mantener la humedad relativa del aire por encima del 50%. (de acuerdo con las disposiciones del Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, sobre lugares de trabajo).
- Conectar a tierra las partes metálicas que puedan acumular electricidad estática.
- Aplicar productos antiestáticos en las superficies susceptibles de electrizarse (ver anexo H).
- Emplear ionizadores de aire en las cercanías o junto a la zona donde se produce electricidad estática (ver anexo E).
- Reducir la velocidad relativa de superficies en rozamiento, por ejemplo, de las cintas transportadoras.
- Reducir la velocidad de los líquidos trasvasados o usar conductos de mayor diámetro para reducir la velocidad.
- Utilizar tubos sumergidos en las operaciones de llenado de recipientes (o realizar el llenado desde el fondo) para evitar la caída a chorro.
- Usar suelos o pavimentos de materiales disipadores (hormigón, cerámica, madera sin recubrimiento aislante, etc.).
- Utilizar calzado antiestático y ropa de algodón o tejido antiestático.

### 3.2.2. Supresión o reducción de la generación de Cargas electrostáticas

Es la primera medida que debe emprenderse en la prevención electrostática, porque es la única medida preventiva que elimina el problema en su origen. Pero, como se ha descrito antes, las Cargas se generan siempre que dos materiales, uno de los cuales como mínimo es aislante, entran en contacto y a continuación se separan. En la práctica, puede haber generación de Carga incluso por contacto y separación de un material consigo mismo. En realidad, la generación de Carga afecta a las capas superficiales de los materiales. Como la más ligera diferencia de humedad superficial o contaminación superficial da lugar a la generación de Cargas estáticas, es imposible impedir por completo la generación de Cargas.

Para reducir la cantidad de Cargas generadas por superficies que entran en contacto, es preciso:

- Evitar que los materiales entren en contacto mutuo si tienen afinidades electrónicas muy diferentes; es decir, si están muy separados en la serie triboeléctrica. Por ejemplo, evitar el contacto entre vidrio y Teflón (PTFE), o entre PVC y poliamida (nailon), ver la tabla 3.1.
- Reducir la tasa de flujo entre materiales, con lo cual disminuye la velocidad de deslizamiento entre materiales sólidos. Por ejemplo, puede reducirse el ritmo de extrusión de películas plásticas, del movimiento de materiales colocados en una cinta transportadora o el caudal de líquidos en una tubería.

No se han establecido límites definitivos de seguridad para medidas de caudal. No obstante, la Norma Británica BS-5958 - Parte 2 Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity recomienda que el producto de la velocidad (en metros por segundo) y el diámetro de la tubería (en metros) sea inferior a 0,38 para líquidos con conductividades menores que 5 pS/m (en picoSiemens por metro) y menor que 0,5 para líquidos con conductividades superiores a 5 pS/m. Tal criterio sólo es válido para líquidos de una sola fase transportados a velocidades no superiores a 7 m/s.

Debe ponerse de relieve que al reducir la velocidad de deslizamiento o de flujo no sólo se disminuye la generación de Cargas, sino que también se ayuda a disipar cargas que pudieran haberse generado. Y es así porque al disminuir las velocidades de circulación resultan tiempos de permanencia mayores que los asociados a las zonas de relajación,

donde los caudales se reducen por estrategias, como aumentar el diámetro de las tuberías, lo cual, a su vez, incrementa la puesta a tierra.

### **3.2.3. Puesta a tierra a la electricidad estática**

La regla básica de la prevención electrostática es eliminar las diferencias de Potencial entre objetos. Para conseguirlo, o bien se conectan entre sí, o se ponen a tierra. Con todo, los conductores aislados acumulan Cargas y por lo tanto se cargan por inducción, fenómeno exclusivo de ellos. Las descargas de conductores pueden adoptar la forma de chispas de alta energía y son peligrosas.

Se trata de una regla que se atiene a las recomendaciones en materia de prevención de descargas eléctricas, que también exigen la puesta a tierra de todas las partes metálicas accesibles, como se especifica en la Norma Francesa de Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión (NFC 15-100). Para conseguir la máxima seguridad electrostática, esta regla debe generalizarse a todos los elementos conductores. Se incluyen aquí cercos metálicos de mesa, manijas de puertas, componentes electrónicos, depósitos utilizados en las empresas químicas y el chasis de los vehículos que transportan hidrocarburos.

Desde el punto de vista de seguridad electrostática, el ideal sería que todo fuera conductor y estuviera siempre puesto a tierra, a la que se transferirían en todo momento las Cargas generadas. En estas circunstancias, todo tendría siempre el mismo potencial, y por lo tanto el Campo Eléctrico, y el riesgo de descarga, sería cero. Pero casi nunca es posible alcanzar esta situación ideal, por los motivos siguientes:

- No todos los productos que es necesario manipular son conductores, y muchos de ellos no pueden hacerse conductores mediante el uso de aditivos. Así sucede con numerosos productos agrícolas y farmacéuticos, así como con líquidos de gran pureza.
- Hay propiedades convenientes para el producto final, como por ejemplo la transparencia óptica o la baja conductividad térmica, que pueden excluir el empleo de materiales conductores.
- Es imposible disponer una puesta a tierra permanente en equipos móviles como carruajes metálicos, herramientas electrónicas inalámbricas, vehículos e incluso operadores humanos.

### 3.2.4. Protección contra las descargas electrostáticas

La importancia se centraliza en la protección de equipos sensibles a la electrostática contra descargas inevitables, la reducción de la generación de Cargas y la eliminación de éstas. La capacidad de proteger el equipo no suprime la necesidad fundamental de prevenir ante todo la acumulación de Carga electrostática.

Como se ilustra en la Fig. 3.3, todos los problemas electrostáticos incluyen una fuente de descarga electrostática (el objeto cargado inicialmente), un blanco que recibe la descarga y el medio por el cual circula la descarga (descarga dieléctrica). Debe subrayarse que el blanco o el medio pueden ser sensibles a la electrostática. Algunos ejemplos de elementos sensibles se acopian en la Tabla 3.2.



Fig. 3.3: Esquema del problema de la descarga electrostática [11].

Tabla 3.4: Ejemplos de elementos sensibles a descargas electrostáticas [11].

Elemento sensible	Ejemplos
Fuente	* Un operador que toca la manilla de una puerta o el chasis de un coche * Componente con carga electrónica que entra en contacto con un objeto puesto a tierra
Blanco	* Componentes o materiales electrónicos que tocan a un operador cargado
Entorno	* Mezcla explosiva inflamada por una descarga electrostática

### 3.2.5. Protección Electrostática

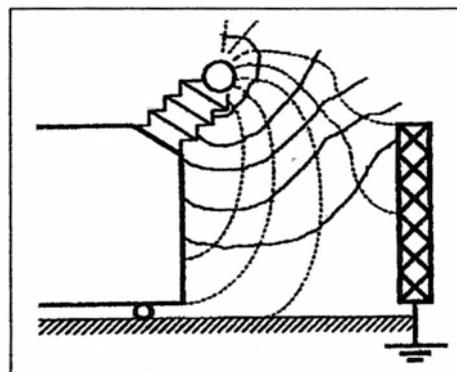
La protección electrostática se basa en la distribución equilibrada de las Cargas inducidas en la superficie del conductor y si dentro de dicho conductor existe una cavidad entonces el Campo Eléctrico dentro de ella es nulo. Por ejemplo, cuando se quiere proteger un aparato cualquiera de la acción de los campos exteriores, se rodea

dicho aparato de una pantalla conductora. El Campo exterior se compensa dentro de la pantalla con las Cargas inducidas que surgen en su superficie. La acción de la pantalla será efectiva siempre que dicha pantalla sea en forma de red densa. Este tipo de protección se basa en el principio de la jaula de Faraday [14].

### 3.2.6. Apantallamiento del Campo Eléctrico

Cuando se interpone una barrera conductora conectada a tierra (ver Fig. 3.4), entre la fuente de Potencial y el objeto o zona a proteger, se anula totalmente la influencia del Campo Eléctrico.

- La barrera electrostática puede ser densa o sencilla (jaula de Faraday o cable de guarda, respectivamente).
- Es una aplicación del principio de Faraday que señala que Campo es cero al interior de un conductor.
- Esta barrera no cancela el Campo Eléctrico sino que solo atenúa su presencia y los efectos del Campo Magnético. Por otro lado, ambos Campos son perjudiciales para la salud, ver anexo C.
- Este apantallamiento se aplica exitosamente en laboratorios, centros de cómputo, edificios de conmutación de comunicaciones, manejo de datos, etc. Para ello, se requiere una puesta a tierra de baja impedancia para dispersar la corriente de carga. Por ejemplo para grandes SSEE, líneas de transmisión y estaciones de generación se requiere una impedancia de  $1 \Omega$ ; para SSEE de plantas industriales, edificios y grandes instalaciones comerciales:  $1$  a  $5 \Omega$ ; y para un electrodo simple:  $25 \Omega$ . [13]

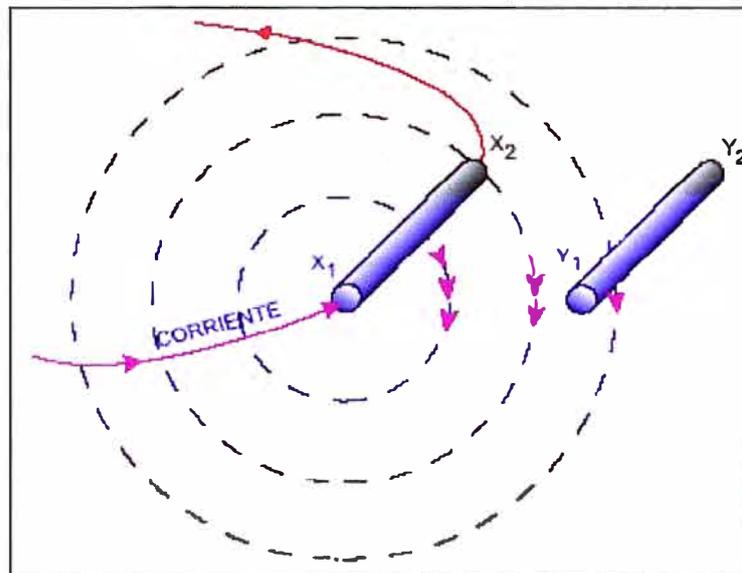


**Fig. 3.4: Protección del Campo Eléctrico generado por una SSEE mediante una barrera electrostática [1].**

### 3.2.7. Reducción de la interferencia del Campo Magnético

Este es un tipo de electrización llamada también por interferencia, causada por acoplamiento electromagnético, particularmente a frecuencia industrial. Se debe a los Campos Magnéticos.

La Fig. 3.5 ayuda a ilustrar cómo se produce el acoplamiento inductivo. La corriente que fluye en el conductor X crea un Campo Magnético en torno a él, como se muestra. El Campo Magnético se produce debido a que la Corriente en X es Alterna. La intensidad del Campo Magnético se reduce a medida que aumenta la distancia desde X. El conductor Y puede estar a cierta distancia, pero algunas líneas de flujo desde X lo rodean tal como se muestra. Como la Corriente en el conductor X cambia, el Campo Magnético que encierra el conductor Y también cambiará y esto a su vez, provocará una Tensión a lo largo de él. La Tensión que surge en el conductor Y es provocado por interferencia inductiva y aumenta con la tasa de cambio de la Corriente en el conductor X.



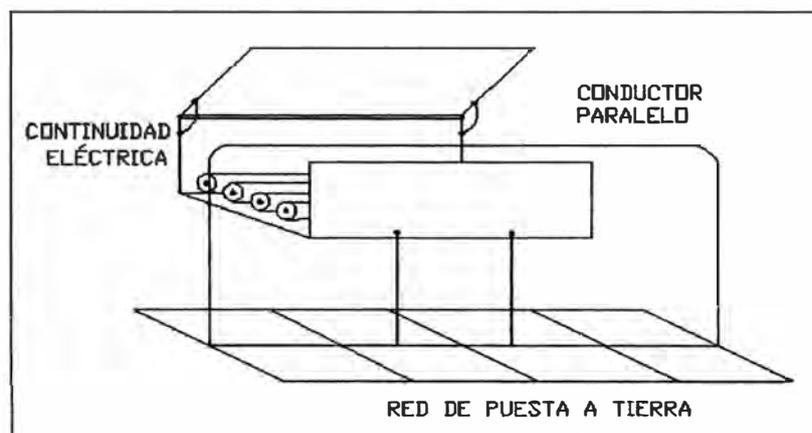
**Fig. 3.5: Acoplamiento inductivo [6], [17]**

Asimismo, las interferencias del Campo Magnético normalmente afectan a los circuitos de baja o muy baja tensión y dicha interferencia se da cuando:

- Existe una fuente de circulación de elevadas Corrientes
- Existe una canal de acoplamiento por ejemplo, de un circuito paralelo, como se mencionó líneas arriba.
- Existe un receptor susceptible por ejemplo, de equipos electrónicos.

Como consecuencia circularán Corrientes en todo lazo o circuito cerrado conductivo. Para el control de dichas Corrientes, se aplica el criterio de mínima superficie de lazo concatenado, haciendo correcciones en la instalación de la siguiente forma, como se muestra en la Fig. 3.6:

- Poner en el lado que recibe la influencia del Campo Magnético un conductor de tierra que tenga recorrido paralelo y junto al haz de cables y conductores aislados afectados en la bandeja.
- Las extremidades de dicho recorrido del conductor desnudo deberán estar solidamente conectadas a la puesta a tierra (PAT) de la instalación formando un lazo cerrado.
- Tanto la bandeja como las tapas y otras partes metálicas deben de tener conexiones de continuidad eléctrica y estar conectadas sólidamente a tierra.
- Si los cables en la bandeja o canaleta siguen recibiendo interferencia solo quedará forrar las paredes y las tapas con material conductor que sería conectado a tierra en dos o más puntos.
- Si la influencia proviene de juegos de barras en subestaciones MT/BT, se colocara un bastidor o armazón de malla metálica puesto a tierra, cubriendo la zona de equipos que se desea proteger.

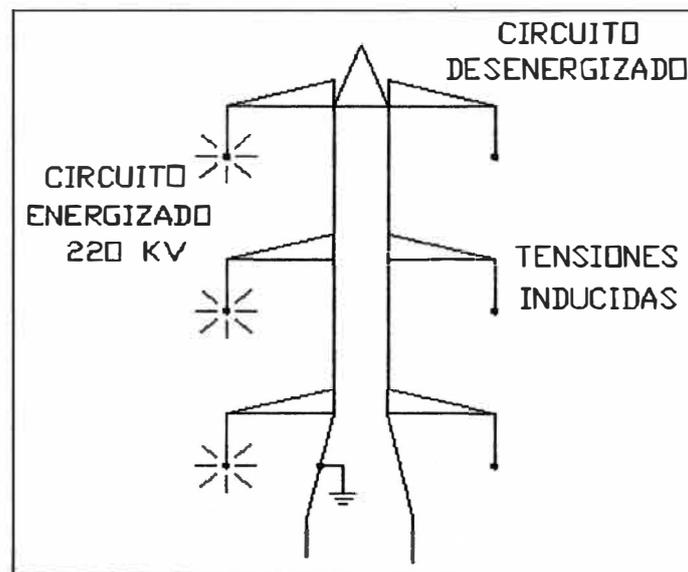


**Fig. 3.6: Reducción de la interferencia del Campo Magnético [1].**

Cuando se tiene una línea que está energizada y existen circuitos colindantes desenergizados (ver Fig. 3.7), cabe la posibilidad de inducir tensiones de valores considerables en dicho circuito vecino, debido al flujo que concatenan de otros circuitos energizados, y este fenómeno ocurre principalmente:

- En líneas eléctricas de doble terna o paralelas de diferentes tensiones.
- En estaciones de transformación y en los circuitos de celdas y barras.

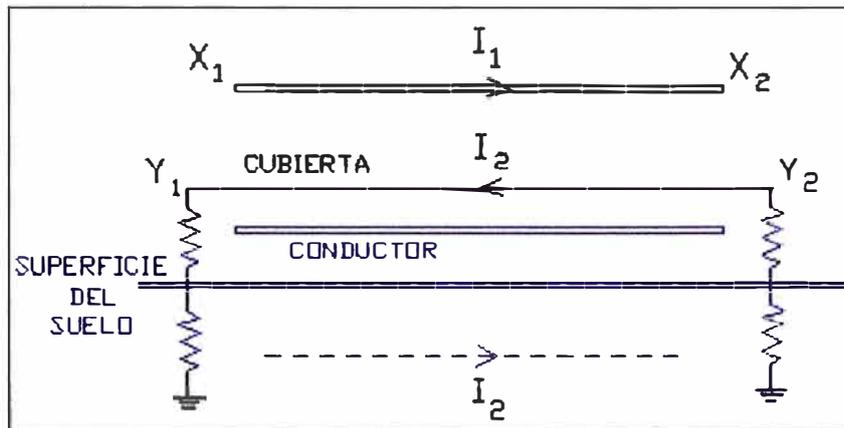
- En soportes de líneas sin PAT o con alta Resistencia de PAT o en el Cable de Guarda (CG) aislado.
- Se puede controlar dicho fenómeno con puestas a tierra temporales y aislamiento del operador.
- Por ejemplo en un vano corto de una línea de 220 KV, donde la Tensión en circuito abierto es pequeña ( $< 10V$ ), subsiste el peligro de la corriente inducida que puede superar 15 A [1].



**Fig. 3.7: Electrización por inducción [1]**

- La solución es el uso de puestas a tierra temporales en líneas de transmisión, cuando la electrización es por inducción.

Podríamos explicar este fenómeno de la manera siguiente: si el conductor Y se coloca a tierra en ambos extremos, como se muestra en la Fig. 3.8, entonces la diferencia de Potencial entre los extremos provocará un flujo de corriente a lo largo del conductor, hacia tierra y a través del terreno. La Corriente por Y tendrá dirección tal, que el Campo Magnético que ella produce se opondrá al existente alrededor del conductor X.



**Fig. 3.8: Conexión del blindaje o cubierta de conductor a tierra [6], [17].**

Las fuentes de este tipo de interferencia pueden ser líneas de transmisión energizadas, Cables de Guarda con sobretensión. Y para proteger contra este tipo de interferencia es particularmente difícil y los métodos generales utilizados consideran:

- Incrementar la separación entre los cables (X a Y). Incrementar la separación no siempre se puede hacer y puede significar gastos considerables si no se consideran en la etapa inicial de construcción.
- Reducir el efecto de Campo Magnético en el circuito Y. Un método para obtener esto es usar cables de par trenzado pero esto sólo funciona para tipo de señalización diferencial balanceado.
- Reducir el Campo Magnético producido alrededor de los cables que se protegen. Si el blindaje o pantalla del cable se pone a tierra en ambos extremos, como se muestra en la Fig. 3.8, entonces mientras circule una Corriente en el cable X se inducirá también una Corriente en la pantalla del cable Y. Su dirección será tal que el Campo Magnético que produce actuará en oposición a aquel del conductor X. El resultado final es que el Campo Magnético y la interferencia en los conductores del cable se reducirán. Una terna de una línea de transmisión podría disponerse en forma triangular de manera de reducir el Campo Magnético producido en torno a ellos bajo condiciones normales de carga. Los cables de energía también pueden instalarse en bandejas de acero puestas a tierra para reducir el Campo Magnético generado. Si se usa un conducto plástico, entonces puede necesitarse un alambre de blindaje separado, puesto a tierra en cada extremo.
- Orientar el Campo Magnético lejos del conductor expuesto. Esto se logra empleando un material de alta permeabilidad (tal como el acero) como una pantalla.

Normalmente esta pantalla debe ponerse a tierra en un extremo. El Campo Magnético que la rodea se distorsionará y la densidad de Campo en el interior del acero aumenta, mientras que alrededor de los conductores disminuye.

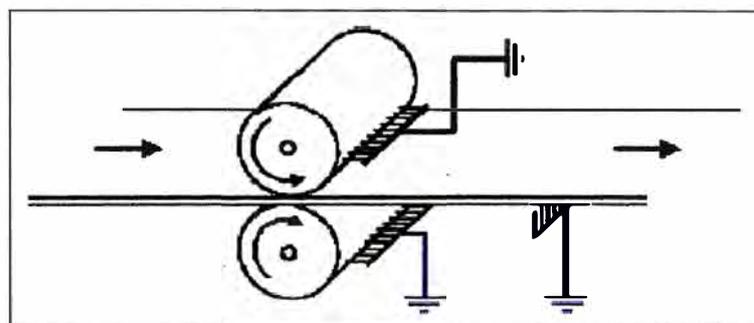
Asimismo debemos saber que en la inducción electrostática, la Carga inducida es de signo opuesto al de la Carga inductora, así como la Carga que inducen las nubes a los conductores [10].

Finalmente, como vemos, este tipo de energización por inducción es inminentemente peligroso debido a la Corriente inducida hacia un conductor desde líneas o barras paralelas contiguas. Como se mencionó líneas arriba, se soluciona instalando puestas a tierras temporales, no obstante, dicha solución solo reduce la Tensión inducida, y hallándose una de las líneas energizadas por inducción y no estando ambas adyacentes al operario, aún el peligro es inminentemente grave. Por ejemplo, en una línea de 220KV con un vano de 550 m (ver Fig. 3.7), estando ambas estructuras conectadas a tierra de manera temporal, se registra una corriente inducida que puede superar los 15 A, cuyo valor es alto y muy peligrosa para el operario [1].

Otro ejemplo, respecto a la magnitud de la Corriente inducida desde líneas energizadas a 220KV al Cable de Guarda, es de aproximadamente 145mA, y la magnitud de la Tensión inducida al mismo Cable de Guarda puede llegar al orden de 20KV. Cuyos valores son extremadamente peligrosos para el ser humano [1].

### 3.2.8. Electricidad estática por fricción de rodillos.

- Colocación de “peines metálicos”, conectados a tierra, cerca de la totalidad de las poleas, cintas o correas que puedan originar carga estática, ver Fig. 3.9.

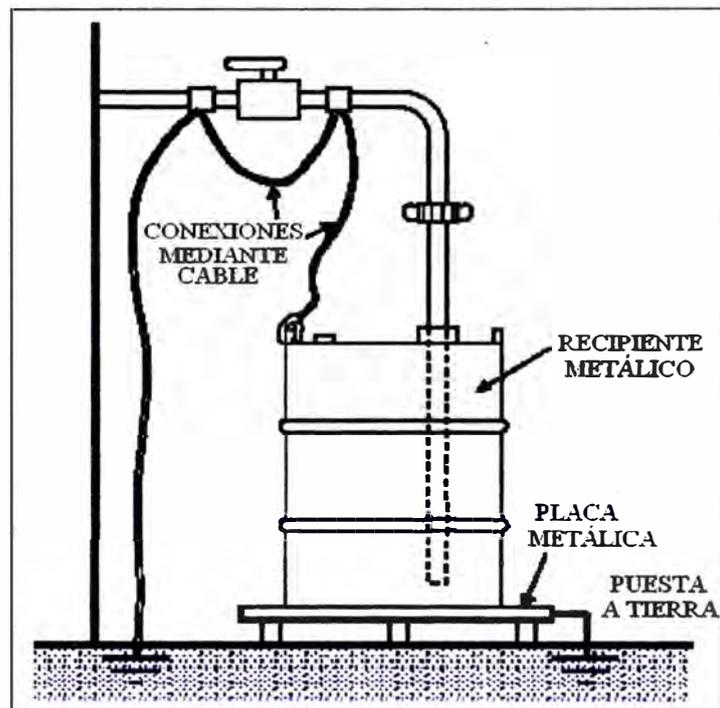


**Fig. 3.9: Eliminación de electricidad estática en rodillos y banda continua de papel [8].**

### 3.2.9. Electricidad estática por trasvasar productos.

- Conexión equipotencial y a tierra de los depósitos de almacenamiento entre los que se trasvasan los productos, ver Fig. 3.10.

En este caso, se debe de tomar a relieve, la velocidad del fluido o el caudal por la tubería, lo cual podríamos disminuirla, aumentando el diámetro del mismo (ver capítulo III, parte 3.2.2, respecto a la Norma Británica).

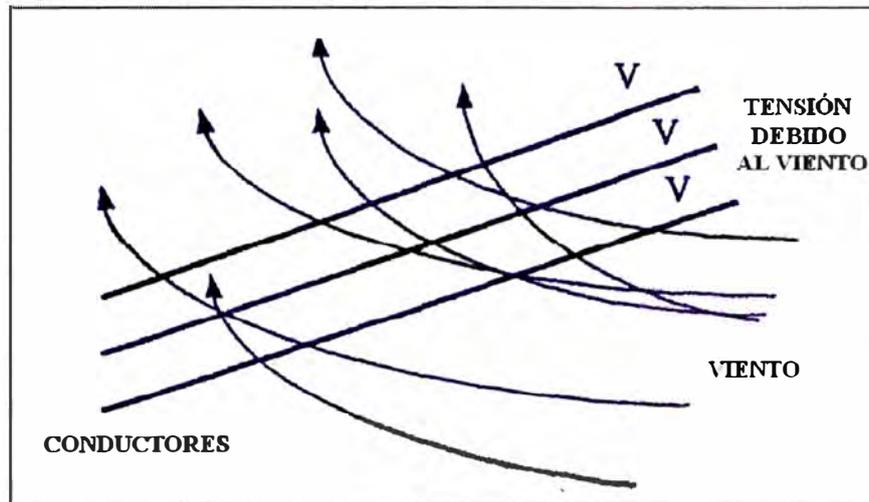


**Fig. 3.10: Conexión equipotencial en depósitos de almacenamiento entre los que se trasvasan los productos [8].**

### 3.2.10. Electricidad estática por frotamiento o fricción del aire.

- Una de las soluciones es la puesta a tierra temporal en líneas de transmisión, cuando la electrificación es por frotamiento o fricción.

Existe una formación de Carga estática, en las líneas eléctricas que están en servicio o fuera de servicio (con interruptores abiertos), por el frotamiento del viento en líneas largas, aun teniendo los seccionadores de tierra conectados en ambas extremidades. Esto se debe a que la electricidad estática se origina por intercambios de Carga eléctrica que tienen lugar en este caso, porque se produce una fricción entre dos sustancias de distinta naturaleza, como el conductor y el viento.



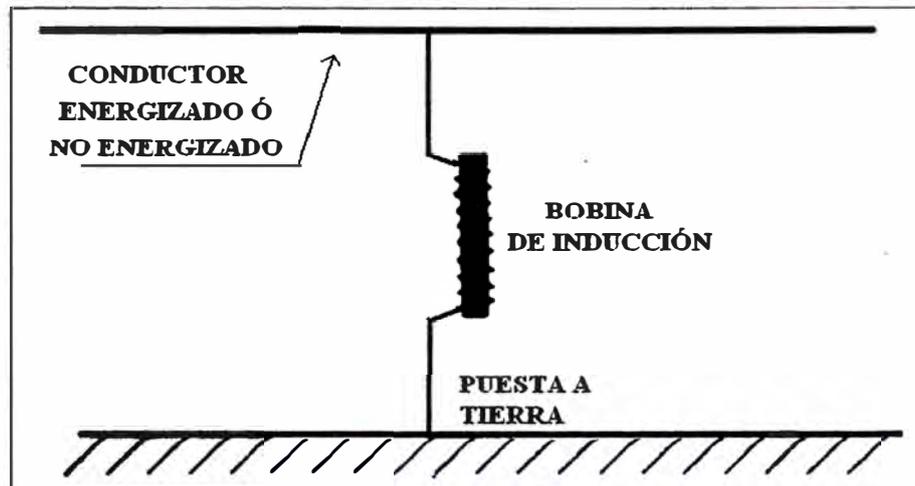
**Fig. 3.11: Electrización por frotamiento [1]**

Las características que pueden presentarse en la línea son:

- La Carga permanece independiente, aún en presencia de la Tensión de servicio.
- El Potencial de la Carga es variable, depende de la velocidad del viento.
- En líneas de alta Tensión de 220 KV, se han medido Potenciales de  $V_o \approx 10$  KV.
- En líneas de distribución de enlace se han medido Potenciales de  $V_o \approx 2,5$  KV.
- El peligro intrínseco se contrarresta, primero, con el uso de puesta a tierra temporal y luego con el adecuado aislamiento del operador.
- La primera descarga a tierra es la más peligrosa y destructiva.
- Otra solución es el uso de bobinas con núcleo de hierro, que se conectan entre línea y tierra, para la protección de sobretensiones debidas a cargas estáticas por fricción.

Por ejemplo, si varía el Campo terrestre paulatinamente por causas atmosféricas, una línea aérea puede adquirir a causa de ello una Carga estática. Tal Carga puede producirla una tempestad de arena, de granizo o de polvo. En estos casos, la línea se carga con una elevada Tensión Continua con respecto a tierra que se superpone a la Tensión normal de servicio. Debido a esto, surgen sobretensiones que pueden considerarse entre las de carácter duradero y que si rebasan la rigidez del aislamiento, producirán descargas. Debido a la escasa energía de estas Cargas estáticas, parece que las descargas deberían ser de poca duración, pero como el trayecto de las chispas tiene una Resistencia muy reducida al producirse la ruptura, la Tensión de servicio y la energía del generador de Corriente pueden dar lugar ahora al encendido de un arco de cortocircuito. Este arco de cortocircuito puede ser producido en ocasiones solamente por la intensa ionización de las descargas de efluvios y de abanico.

Estas Cargas estáticas se derivan a tierra a través bobinas de inducción. Estas bobinas de inducción para puesta a tierra, son unas bobinas con núcleo de hierro que se conectan entre línea y tierra (ver Fig. 3.12), las cuales tienen una Resistencia Reactiva tan grande que la Tensión normal de servicio no produce en ellas una Corriente apreciable; en cambio, para una Corriente Continua de descarga estática no opone apenas Resistencia.



**Fig. 3.12: Bobinas de inducción con núcleo de hierro [16].**

### **3.2.11. Electricidad estática por cortar diferentes superficies de nivel eléctrico.**

Como la tierra puede considerarse un cuerpo cargado, emite líneas de fuerza que terminan en nubes cargadas con potencial opuesto, o se extienden indefinidamente. Las superficies perpendiculares a estas líneas, que tienen todos sus puntos al mismo potencial, son las superficies equipotenciales, llamadas también superficies de nivel. Si un conductor corta una de estas superficies, en dicho conductor se induce una carga eléctrica.

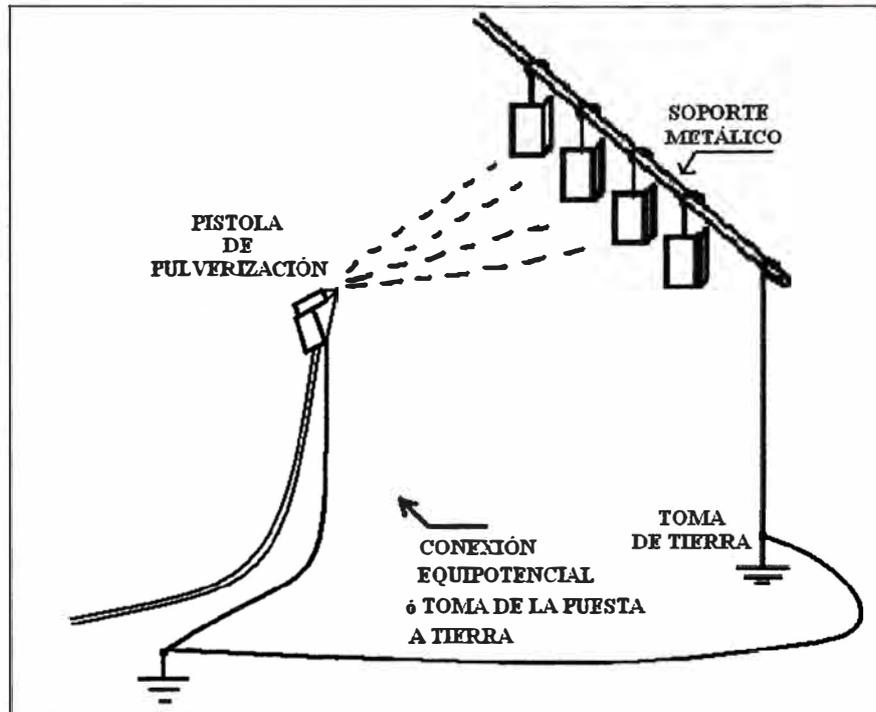
Cuando los conductores recorren terrenos llanos o casi llanos, estas causas de sobretensión son imperceptibles con tiempo tranquilo. Por el contrario, si cerca de la línea se desplazan nubes tempestuosas o si el aire está fuertemente cargado de electricidad, las superficies de nivel se deforman y las cargas inducidas en los conductores pueden alcanzar valores importantes. Se han observado diferencias de tensión de 50 a 250 V por metro de altura.

Esta causa de sobretensiones es particularmente importante cuando los conductores pasan por las cumbres de montañas, porque en estos sitios las superficies equipotenciales están muy próximas o muy juntas, pudiendo haber tensiones a tierra hasta de 10 KV [4].

En este caso, si se realizaran trabajos en la línea aérea se deberá tomar todas las medidas de precaución como el uso de puestas a tierra temporales cercanos al área de trabajo.

### 3.2.12. Electricidad estática por contacto de líquidos pulverizados.

- Una de las soluciones es la conexión equipotencial de las partes conductoras y asimismo conectarlas a tierra, entre la pistola de pulverización y los objetos metálicos que se pintan, ver Fig. 3.13.

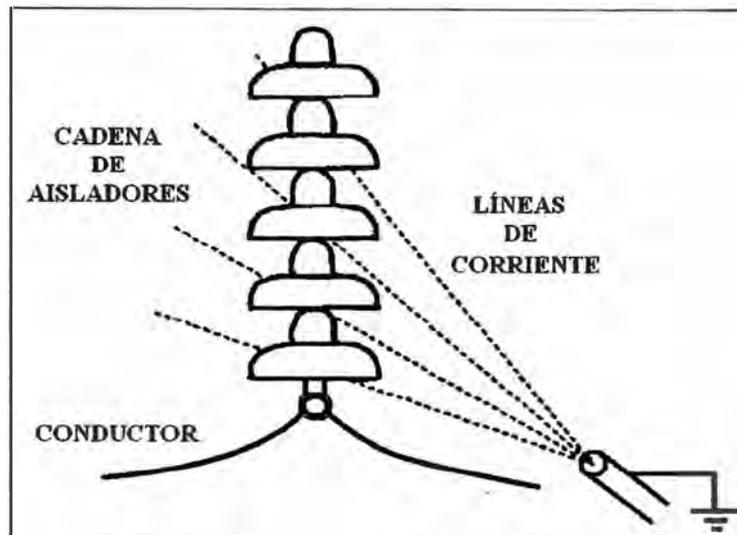


**Fig. 3.13: Conexión equipotencial y a tierra entre la pistola de pulverización y los objetos metálicos que se pintan [8].**

- La otra solución es la conexión equipotencial y a tierra entre la boquilla de la pistola de pulverización para el limpiado de los aisladores y de la cadena de aisladores, ver Fig. 3.14.

En este caso se origina la adquisición de Carga ya sea por aproximación o por contacto directo con el potencial durante el trabajo de mantenimientos bajo tensión.

La Carga por líneas de Corriente se controla con la distancia y derivándola con PAT temporales, tiene una onda fundamental  $<1.5 \text{ mA}$  e impulsos de 5 a 250 mA [1].



**Fig. 3.14: Electrificación por contacto [1].**

### 3.2.13. Protección de trabajadores

Los trabajadores que tienen motivos para creer que se encuentran cargados eléctricamente (por ejemplo, cuando desmontan un vehículo en tiempo seco o andan con determinados tipos de calzado), pueden adoptar numerosas medidas protectoras, como las siguientes:

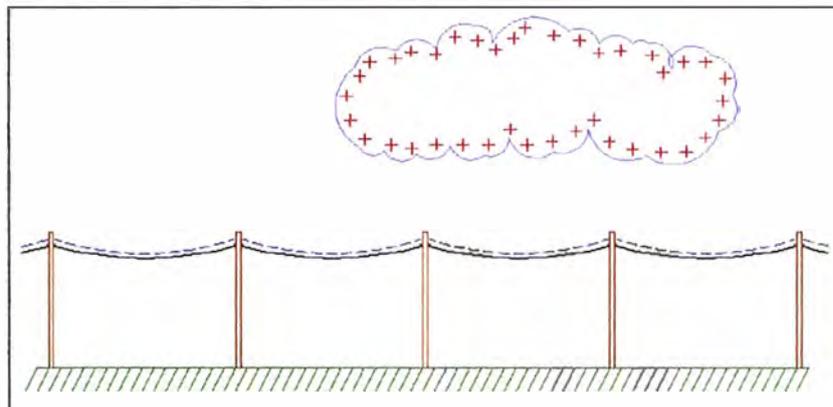
- Reducir la densidad de Corriente en la piel, para lo cual basta con tocar un conductor puesto a tierra con un elemento metálico, como una llave o herramienta.
- Reducir el valor de cresta de la Corriente mediante la descarga en un objeto disipador que se pueda tener a mano (un dispositivo de sobremesa o especial, como una muñequera protectora con resistencia en serie).

### 3.2.14. Protección de atmósferas explosivas

En atmósferas explosivas, es el propio ambiente el que resulta ser sensible a las descargas electrostáticas, que de ocurrir, podrían dar lugar a ignición o explosión. En estos casos, la protección consiste en sustituir el aire, bien por una mezcla gaseosa cuyo contenido de oxígeno sea inferior a la concentración mínima, para que la mezcla se inflame, o bien por un gas inerte, como el nitrógeno. Los gases inertes se han utilizado en silos y en vasijas de reacción de los sectores químico y farmacéutico. En este caso, es preciso tomar las precauciones debidas para garantizar que los trabajadores reciban un suministro de aire adecuado.

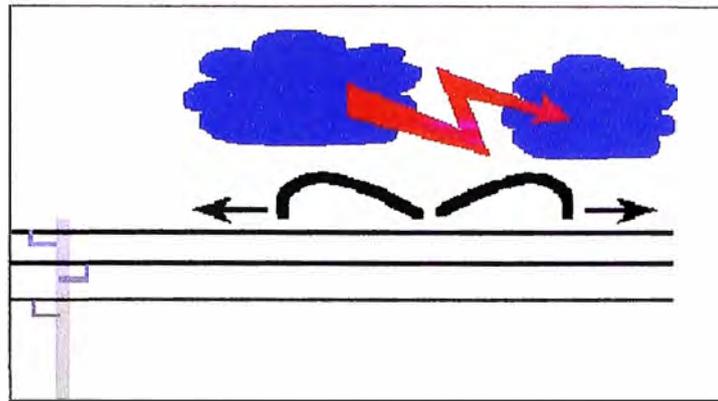
### 3.2.15. Protección de la inducción electrostática del rayo.

Un conductor cargado de electricidad obra inductivamente sobre otro cercano de tal modo que los elementos del primero situados en la proximidad del segundo y cargados con electricidad de cierto signo atraen a los del otro de signo contrario. Por lo tanto, si tal como se representa en la figura 3.15, una nube cargada positivamente se aproxima a una línea eléctrica e induce en ésta, cargas eléctricas de signo contrario, es decir, en este caso de signo negativo. Además, por el momento todavía no hay sobretensiones, ya que la nube se acerca lentamente a la línea y la carga eléctrica del mismo nombre, sobre la línea queda repelida, evacuándose a tierra por medio de elementos que están conectados a una puesta a tierra.



**Fig. 3.15: Efecto de una nube cargada positivamente sobre una línea aérea.**

Pero si por alguna causa ocurre una caída de un rayo entre una nube y otra nube de carga contraria o entre esta misma nube y tierra, en ese caso, desaparece la carga de la nube repentinamente, entonces las cargas de la línea quedan libres, puesto que ya no son atraídas por las de la nube. Esta circunstancia provoca en la línea la aparición de sobretensiones inducidas proporcionales a la carga, ver figura 3.16, que se propagan a ambos lados de la línea en forma de ondas errantes y con la velocidad de la luz, que incluso pueden provocar descargas eléctricas, de naturaleza ondulatoria en los puntos mal aislados de la línea [4].



**Fig. 3.16: Descarga de rayo entre nubes que generan sobretensiones inducidas.**

### **a) Seguridad personal contra los rayos**

La seguridad contra el rayo debería practicarse por todo individuo durante las tormentas eléctricas. La medición de la distancia al rayo es útil. Usando la técnica de “Flash/Bang (F/B)”, por cada cinco segundos (a partir del instante de ver el relámpago hasta oír el trueno asociado) entonces, el rayo está a una milla de distancia (1.6 Km). Un F/B de 10 = 2 millas; un F/B de 20 = 4 millas, etc. La distancia desde impacto A hasta el impacto B y al impacto C puede ser de 5 a 8 millas. El Instituto Nacional de Seguridad del Rayo recomienda la regla de 30/30: suspender las actividades en un F/B de 30 (6 millas), o cuando escuche el primer trueno. Las actividades al aire libre no deben ser reiniciadas hasta 30 minutos luego de haber expirado el último trueno o del último rayo observado. Esto es una medida conservadora, que quizás no es práctica en todas las circunstancias.

Si uno se expone repentinamente a un rayo cercano, se sugiere adoptar la llamada “Posición de Seguridad contra el Rayo” (LSP, Lightning Safety Position). LSP significa permanecer lejos de otra gente, quitándose los objetos metálicos, agachándose con los pies juntos, cabeza hacia abajo, y colocando sobre los oídos para reducir choque acústico del trueno cercano. Cuando el rayo amenaza, las medidas de seguridad estándares deberían incluir: evitar el agua y todos los objetos del metal; retírese de las elevaciones más altas incluyendo tejados; evite los árboles solitarios; permanezca fuera del teléfono. Un vehículo de carrocería completamente metálica, ya sea furgoneta, una camioneta, un coche o un camión, es un lugar seguro debido al efecto parcial de la jaula de Faraday. Un edificio invariablemente grande puede considerarse como un lugar seguro. En todas las situaciones, las personas deben evitar de formar parte de circuito eléctrico de la descarga [7].

### 3.2.16. Protección contra la energización accidental

#### a) Trabajos en líneas desenergizadas.

Cuando se realizan mantenimientos de líneas de transmisión, a ambos lados del punto de trabajo están los conductores de la instalación, que pueden energizarse de manera peligrosa, ya sea por sobretensiones internas o externas, o bien por diversas formas de electrización, que pueden ser por fricción, por inducción o por contacto, como se mencionó líneas arriba. Por ende, se instala puestas a tierra temporales en ambos lados, y se debe asegurar la condición de aislamiento de los puntos de contacto del operador con los conductores o equipos y con tierra, como se muestra en la Fig. 3.17, y también son validas las recomendaciones de las figuras 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21 [1], [2].

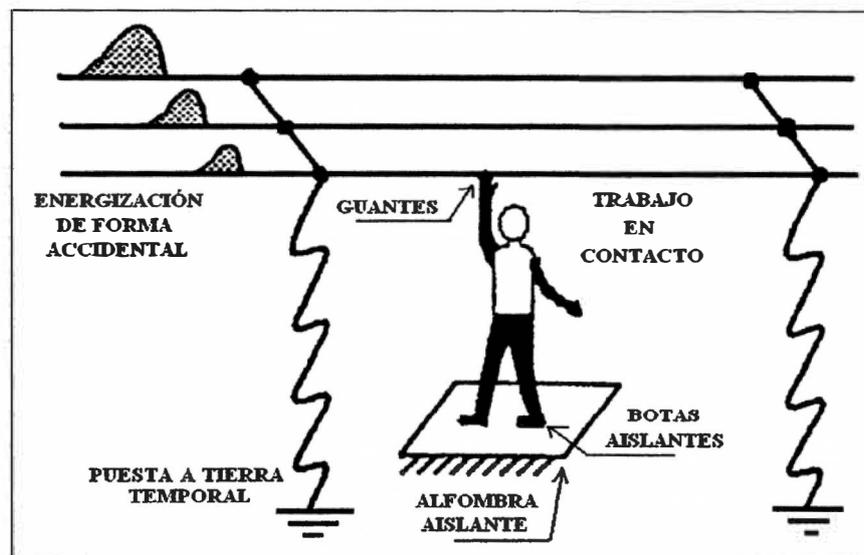


Fig. 3.17: Soluciones para la energización accidental [1].

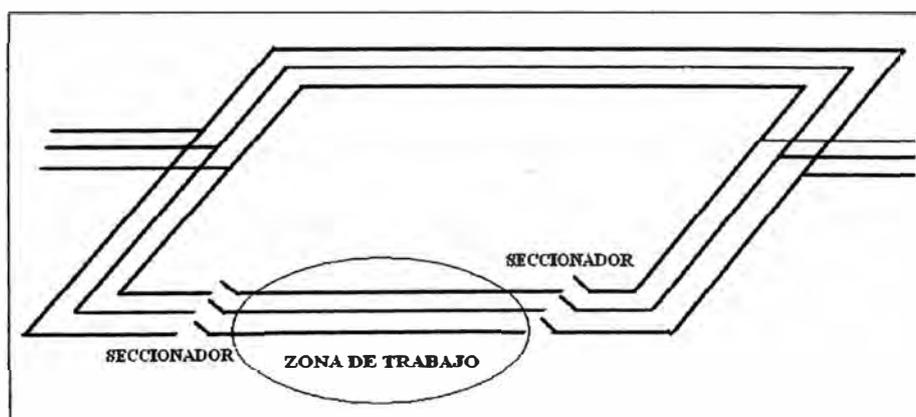
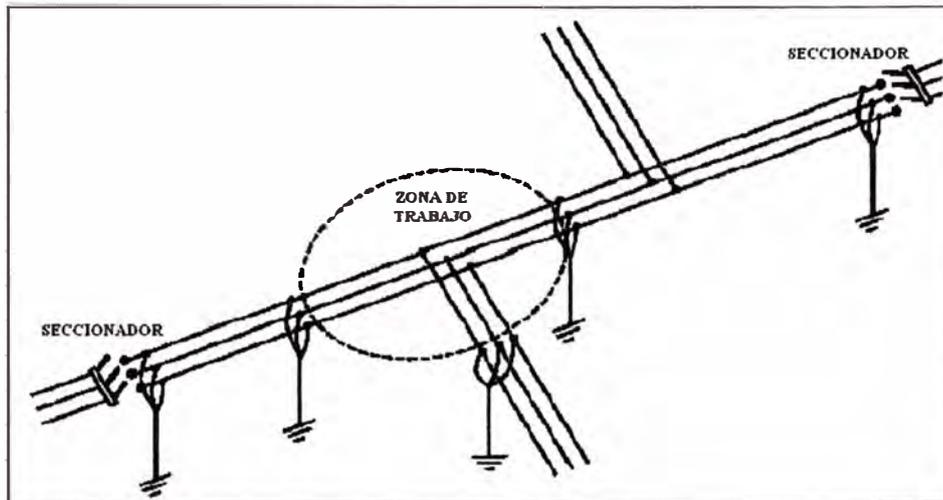
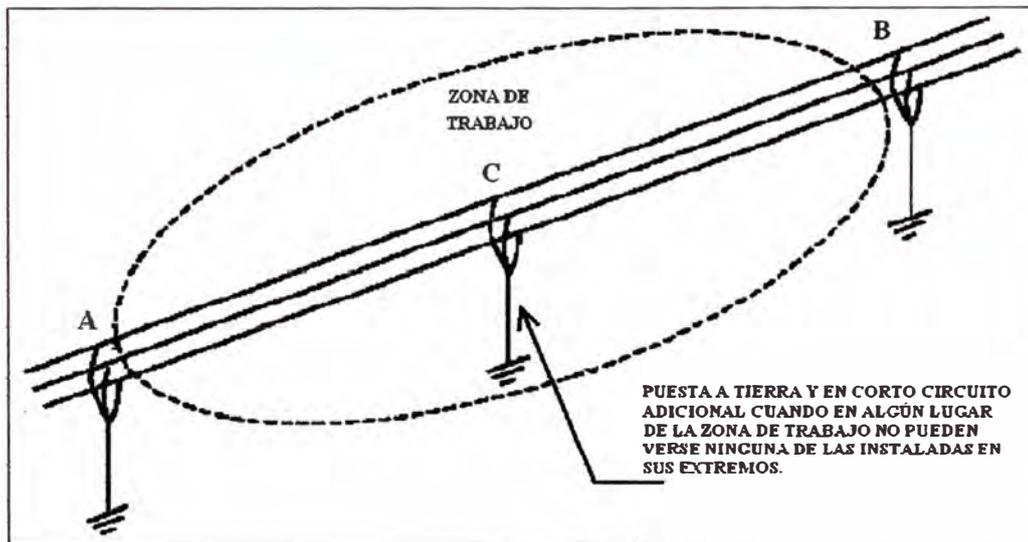


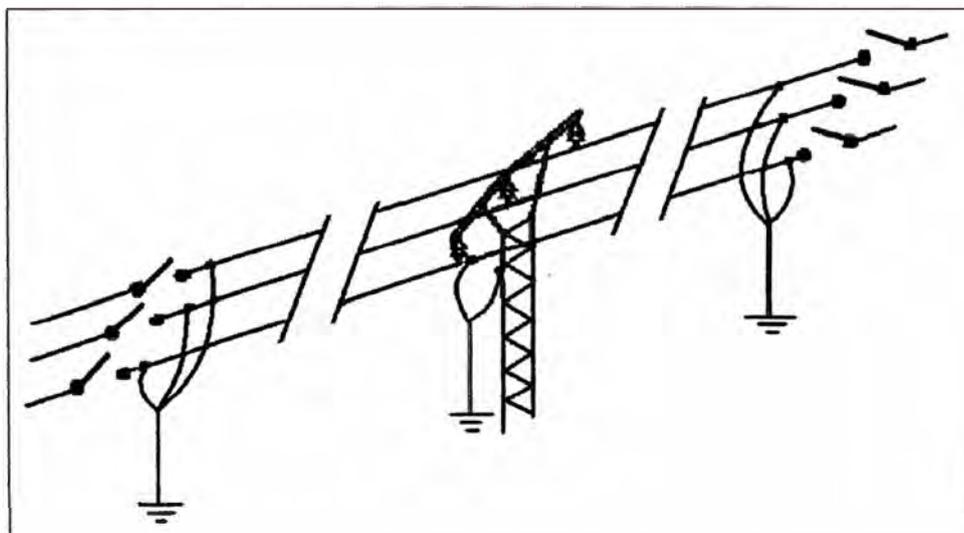
Fig. 3.18: Protección frente a elementos próximos con Tensión [8].



**Fig. 3.19:** Existencia de derivaciones en la línea, la puesta a tierra debe realizarse en todas ellas [8].



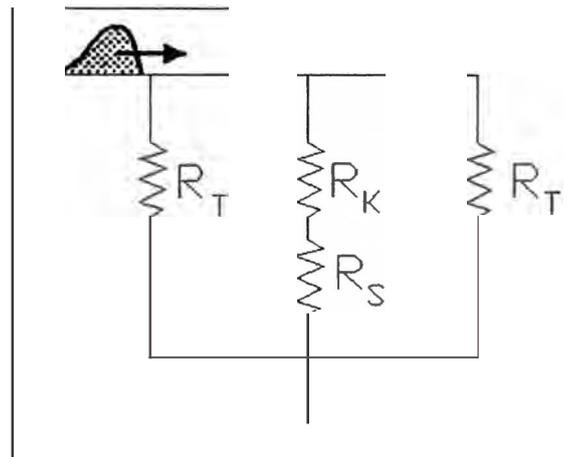
**Fig. 3.20:** Tener siempre a la vista al menos una de las puestas a tierra [8].



**Fig. 3.21:** Disposiciones de la PAT cuando el trabajo se realice en un solo conductor [8].

### 3.2.17. Condiciones de seguridad del operario

Es recomendable y necesario, incrementar la Resistencia eléctrica de la persona que involucre estar en el circuito, utilizando prendas aislantes tales como casco, guantes y calzado, como se muestra en la Fig. 3.17 y 3.22; también los accesorios aislantes como pisos, taburetes, escaleras, sogas, pértigas, etc.



**Fig. 3.22: Condición para la seguridad del operario [1].**

Siendo:  $R_T$  : Puesta a tierra temporal.  
 $R_K$  : Resistencia del cuerpo, aproximadamente  $1000 \Omega$ .  
 $R_S$  : Resistencia de contacto.

## 3.3. Recursos humanos y equipamiento

### 3.3.1. Depósitos de almacenamiento en los que se trasvasan productos.

En este caso, es un ejemplo de electrización por fricción, por ello se requiere que el operario o trabajador prevea del equipamiento adecuado.

- Se utilizará, por parte de los trabajadores de equipos de protección individual antiestáticos (EPI con marcado antiestático).
- Emplear conexiones equipotenciales y a tierra mediante puestas a tierra temporal o definitiva.

### 3.3.2. Mantenimiento o lavado de una cadena de aisladores

Este trabajo se realiza mediante una pistola de pulverización con agua, asimismo, es un ejemplo de electrización por contacto, ver Fig. 3.14.

- Para el trabajo (en seco) a distancia con línea energizada (ver anexo B), se usan pértigas, accesorios y prendas aislantes.
- Para el trabajo en lavado bajo Tensión se utiliza equipo de seguridad y PAT, de manera que se realice una conexión Equipotencial y conectada a tierra [1].

### 3.3.3. Trabajos en instalaciones desenergizadas.

Cuando los trabajos se realizan en instalaciones con supresión de la Tensión o desenergizadas, entonces se debe tomar en cuenta los siguientes puntos (las cinco reglas de oro):

- Desconexión efectuada.

Todas las fuentes de Tensión deben estar con los seccionadores abiertos con corte visible o con corte efectivo y señalizado por un medio seguro.

- Prevención de cualquier posible realimentación.

Enclavamientos y señalización de los aparatos en posición abierta, cuando sea necesario, para prohibir la maniobra, mediante candados.

- Verificar la ausencia de tensión.

Comprobada la ausencia de Tensión en cada uno de los conductores separados de las fuentes de Tensión mediante un detector apropiado, ver anexo G, figuras G.2 y G.3.

- Puesta a tierra.

Conectar los equipos de puesta a tierra, ver anexo G, figura G.1 (primero a la toma de tierra y después a cada uno de los conductores de la instalación).

- Protección frente a elementos próximos en Tensión.

Colocados, si es posible, los elementos de protección, barreras u obstáculos. Delimitar y señalar la zona de trabajo.

### **3.3.4. Trabajos en instalaciones energizadas o con Tensión.**

Cuando los trabajos se realizan en instalaciones con Tensión o en caliente, se empleará lo siguiente:

- Los accesorios aislantes (pantallas, cubiertas, etc.) para el recubrimiento de partes activas o masas.
- Los útiles aislantes o aislados (herramientas, pinzas, puntas de prueba, etc.)
- Las pértigas aislantes.
- Los dispositivos aislantes o aislados (banquetas, alfombras, plataformas de trabajo, etc.)
- Los equipos de protección individual frente a riesgos eléctricos (guantes aislantes, gafas inactivas, casco aislante con barboquejo, pantalla facial, etc.)

### **3.3.5. Ropa apropiada para el trabajo eléctrico en general.**

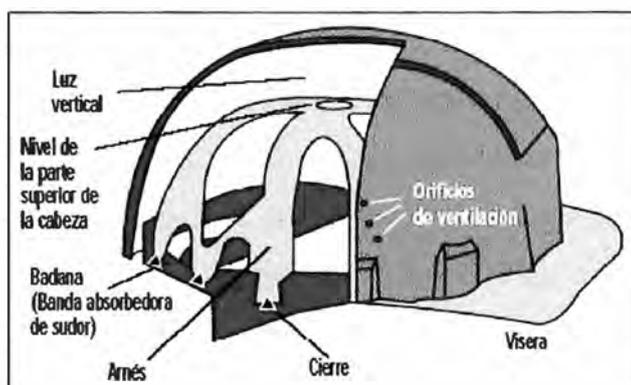
Utilice siempre ropa apropiada para su trabajo. Su ropa debe ser práctica y cómoda. Recuerde asimismo estos puntos básicos:

- Use un buen par de zapatos resistentes al aceite con suela y tacones antideslizantes
- No use la ropa que le quede demasiado apretada para no limitar su libertad de movimiento.
- Tampoco utilice ropa demasiado suelta. Ya que esta podría enredarse con los equipos o con algún objeto, en un momento de emergencia.
- Antes de comenzar a trabajar. Abotónese las mangas de la camisa. Quítese la corbata, al igual que cualquier cadena o bufanda.
- Quítese toda prenda, anillo o reloj de metal. El oro y la plata son excelentes conductores de electricidad. Cuando se trabaje cerca de las líneas o equipos energizados, los trabajadores deberán evitar usar artículos metálicos expuestos [5], [9].
- Si desea, utilice una correa para herramientas (ver anexo I, figura I.1) como las que usan los electricistas. Pero no permita que las herramientas cuelguen de sus estuches o de la correa, ya que estas podrían caer encima de equipos en funcionamiento entre contactos eléctricos.
- Quítese siempre la correa de herramientas antes de trabajar en espacios muy angostos.

### 3.3.6. Equipos de protección personal.

Verifique que sus equipos de protección personal le quede bien ajustados, que estén limpios y guardados en el lugar apropiado. Cuando hablamos de los equipos de protección personal, nos referimos a:

- Los cascos: El principal objetivo del casco de seguridad es proteger la cabeza de quien lo usa de peligros y golpes mecánicos. También puede proteger frente a otros riesgos de naturaleza mecánica, térmica o eléctrica.



**Fig. 3.23: Elementos esenciales de la estructura de un casco de seguridad [18].**

- Los lentes de seguridad: Este equipo permite proteger los ojos y la cara que impiden la penetración de partículas y cuerpos extraños. Los dos problemas básicos que plantea el uso de protectores de los ojos:
  - Cómo proporcionar una protección eficaz que resulte aceptable durante muchas horas de trabajo sin resultar excesivamente incómoda.
  - La impopularidad de este tipo de protectores a consecuencia de las limitaciones que imponen a la visión.



**Fig. 3.24: Gafas con protectores completos [18].**

- Los guantes aislantes de caucho: Se debe de considerarse la Tensión máxima de uso antes de emplear los guantes dieléctricos (ver anexo I, tabla N° I.1).



**Fig. 3.25: Guantes aislantes de caucho para 36 KV.**

- Las botas aislantes: Cuando hay peligro de descargas eléctricas, el calzado debe estar íntegramente cosido o pegado o bien vulcanizado directamente y sin ninguna clase de clavos ni elementos de unión conductores de la electricidad. En ambientes con electricidad estática, el calzado protector debe estar provisto de una suela externa de caucho conductor que permita la salida de las cargas eléctricas. Ahora es de uso común el calzado de doble propósito con propiedad antielectrostático y capaz de proteger frente a descargas eléctricas generadas por fuentes de baja tensión. En este último caso hay que regular la resistencia eléctrica entre la plantilla interna y la suela externa con el fin de que el calzado proteja dentro de un intervalo de tensiones determinado [18].



**Fig. 3.26: Botas aislantes.**

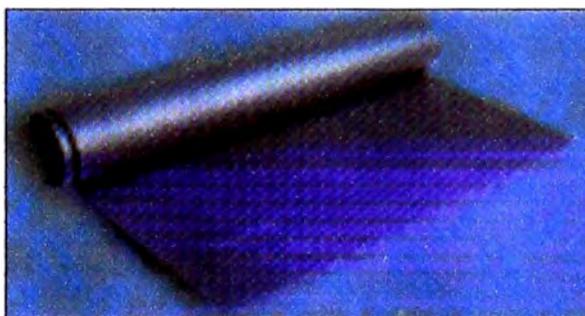
- Arnés o correa de seguridad: Se utiliza para detener la caída libre severa de una persona, siendo su uso obligatorio para todo el personal que trabaje en altura a 1,80 metros o más.



**Fig. 3.27: Arnés o cinturón o correa de seguridad.**

### **3.3.7. Otros equipos de protección.**

- Alfombra aislante.



**Fig. 3.28: Alfombra aislante.**

- Bancos de maniobra



**Fig. 3.29: Banco de maniobra de uso interno para 40 KV.**

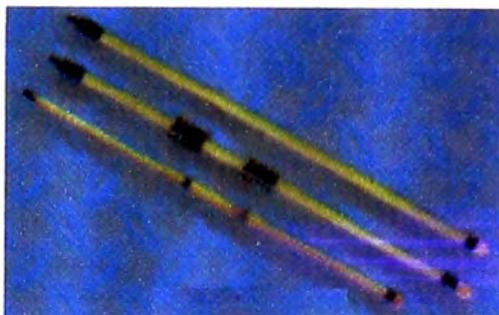


**Fig. 3.30: Banco de maniobra de uso interno para 63 KV.**



**Fig. 3.31: Banco de maniobra de uso externo para 63 KV.**

- **Pértigas**



**Fig. 3.32: Pértigas para trabajos con Tensión.**

### **3.3.8. Las escaleras.**

Las normas de seguridad para trabajos con escaleras incluyen:

- El uso de escalerillas no conductoras, firmes y hechas de madera o de fibra de vidrio.
- No utilizar escalerillas de aluminio, las cuales conducen electricidad [9].
- Colocar las escalerillas de tal forma que no se deslicen o caigan.
- Usar cubiertas de caucho para las patas de la escalerilla, las cuales añaden protección contra los choques y evitan el resbalo.

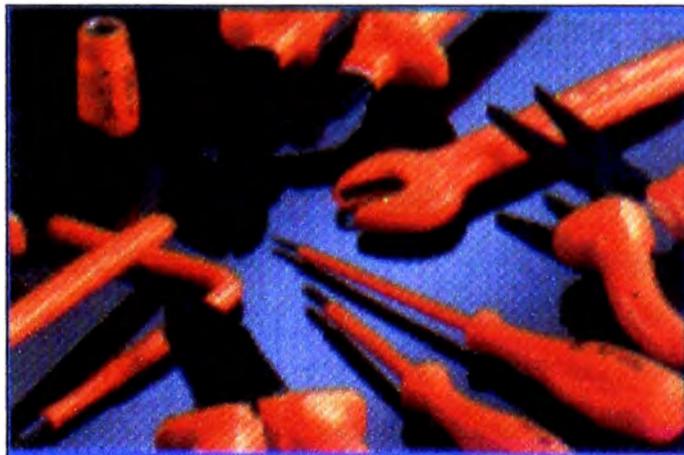
### 3.3.9. Las herramientas

Las herramientas descargadas físicamente, u operadas con descuido, son la causa directa de muchos accidentes eléctricos. Escoja siempre la herramienta apropiada para el trabajo que va a realizar y úsela correctamente.

Antes de comenzar cualquier trabajo, inspeccione todas sus herramientas para verificar que estén en buen estado, limpias, secas, libres de aceites o de depósitos de carbón. Nunca modifique las herramientas o equipos eléctricos sin autorización previa.

#### a) Recomendaciones para las herramientas de mano:

- Toda herramienta de mano debe tener aislamiento de fábrica en el parte de agarre o sostenimiento de la misma, ver figura 3.33.
- No asuma que las herramientas aisladas son seguras para todo tipo de trabajo, especialmente al trabajar, con circuitos energizados.
- No use ninguna herramienta con rajaduras, señales de desgaste o con grietas en su aislamiento.
- Nunca trate de aislar la herramienta usted mismo.



**Fig. 3.33: Herramienta de mano con aislamiento.**

## **b) Recomendaciones para las herramientas eléctricas**

- Inspeccionar la condición general de las herramientas para detectar desgaste o defectos.
- Revisar las herramientas para verificar todas las barreras de seguridad y las cubiertas protectoras están en su lugar.
- Inspeccionar todos los cables e interruptores eléctricos para detectar cortaduras, aislamiento rasgado, terminales expuestos y conexiones sueltas.

### **3.3.10. Educación de personal**

En el caso del riesgo eléctrico debido a la electricidad estática atañen a aquellos trabajadores que laboran en emplazamientos con riesgo de incendio o de explosión (más aún cuando exista la posibilidad de acumulación de electricidad estática), puedan estar expuestos a los riesgos que genera la electricidad. Para establecer la formación adecuada a cada destinatario, es preciso realizar un estudio de necesidades. Se podría hacer una distinción entre distintas clases de trabajadores [8]:

#### **a) Trabajadores usuarios de equipos y/o instalaciones eléctricas**

La formación e información debe ser de nivel básico, lo más sencilla y breve posible, expresada en términos de fácil asimilación, todo ello en función de la experiencia y formación de los trabajadores implicados.

En razón de la actividad que desarrolle el trabajador, es conveniente que se incida en los riesgos que se puedan presentar debido a la electricidad estática; esta formación se puede completar con indicaciones precisas sobre las prácticas concretas que deben evitarse o aplicarse, por ejemplo:

En emplazamientos o instalaciones de características especiales, es decir que sean húmedos, mojados, polvorientos, con riesgo de incendio o explosión, etc.

**b) Trabajadores cuya actividad, no eléctrica, se desarrolla en proximidad de instalaciones eléctricas con punto accesibles en Tensión**

Los trabajadores deben ser formados sobre las medidas de prevención que se deben adoptar para no invadir la zona de peligro, sobre las protecciones colectivas y los equipos de protección individual (EPI) antiestáticos, que en su caso, deban utilizarse. Con respecto a estos últimos, el trabajador tendrá la información o la formación suficiente para conocer las características que un determinado EPI presenta, con el fin de que no se vean expuestos a situaciones frente a las cuales el EPI no presente garantías.

**c) Trabajadores cuyos cometidos sean instalar, reparar o mantener instalaciones eléctricas**

En este caso la formación, deberá ser mucho más amplia y, a la vez, muy específica para cada tipo concreto de trabajo que deba realizarse.

Los siguientes puntos son situaciones típicas que constituyen riesgos eléctricos de carácter electrostático que se debe evitar:

- Falta de conexión a la puesta a tierra de elementos conductivos, en artefactos o equipos.
- Desconocimiento absoluto, sobre riesgos eléctricos de tipo electrostático.
- Impericia de los riesgos eléctricos que puedan ocasionar debido a sobretensiones externas y/o internas.

Asimismo, para que la educación del personal, en lo que a seguridad en el trabajo se trate, sea eficaz, se recomienda seguir una metodología que logre buenos resultados y a la vez la comprensión del problema de los riesgos de la electrostática (ver anexo F).

## CONCLUSIONES

1. Las medidas para evitar la acumulación de cargas electrostáticas es la de mitigar todos los procesos de fricción, procesos de contacto que produzcan pulverización, aspersión o caída libre y el fenómeno de acoplamiento inductivo mediante la conexión a tierra. Debido a que dichas cargas siempre se generan cuando dos materiales, una de las cuales como mínimo es aislante, entran en contacto y a continuación se separan. Desde el punto de vista de seguridad electrostática, lo ideal sería que todo sea conductor y estuviera siempre conectado a tierra para que las cargas generadas en todo momento sean mitigadas. No obstante, es poco probable que se llegue a esta situación ideal debido a que muchos productos no son conductores a causa de uso de aditivos; asimismo por las propiedades convenientes para el producto final, por ejemplo acerca de la transparencia óptica o la baja conductividad térmica, etc.
2. En la mayor parte de los casos, la energía de la electricidad estática producida en forma espontánea es insuficiente para que se produzca efectos nocivos en el cuerpo humano. No obstante, las chispas producidas en las descargas pueden ocasionar incendios o explosiones. Por ello es necesario evitar que se originen chispas o arcos de alta energía y peligrosas.
3. Cuando mantenemos la humedad relativa del aire por encima del 50 %, evitamos que se acumule electricidad estática. Mientras que un ambiente con una baja humedad relativa es propicio para la acumulación de Cargas estáticas en los materiales aislantes, los cuales se caracterizan por su resistividad al paso o movimiento de las cargas. Cuando hay humedad superficial, hace que se incremente las densidades de los estados de energía superficial al aumentar la conducción superficial, que favorece la recombinación de cargas y facilita la movilidad iónica.

4. Debemos tener en cuenta que no todos los líquidos se llegan a cargarse de electricidad estática, por más conductores o aislantes que sean estas. La razón por la cual es que los líquidos que son buenos conductores de la electricidad, los iones se recombinan con gran rapidez, mientras que los líquidos aislantes presentan muy pocos iones. Asimismo, en la práctica, solo habrá electrización cuando la resistividad de los líquidos sean mayores que  $10^7 \Omega \text{ m}$  ó menor que  $10^{11} \Omega \text{ m}$ .
5. Las descargas se forman cuando el Campo eléctrico inducido supera la capacidad del ambiente circundante para resistir a la carga, es decir que supera la rigidez dieléctrica del ambiente.
6. Debemos tener presente que los hidrocarburos líquidos tiene dos características que le confieren una sensibilidad especial a los problemas de electricidad estática que son: la resistividad alta que les permite acumular elevados niveles de cargas, y vapores inflamables que aumentan el riesgo de descargas de baja energía. Para evitar dichas descargas en este tipo de ambiente se sustituye el aire por una mezcla cuyo contenido de oxígeno sea inferior a la concentración mínima para que la mezcla se inflame o por gas inerte, como el nitrógeno.
7. Los trabajos de mantenimiento con línea desenergizada se requiere de gran conocimiento y responsabilidad, puesto que es necesario para dicho trabajo una persona calificada, quien posea todos los conocimientos y/o fenómenos de la electrostática y sus diversas formas de trabajos y soluciones que involucra en este tipo de mantenimiento.
8. En el trabajo con línea desenergizada debe de antes cerciorarse siempre que el emplazamiento o la instalación esté sin Tensión, mediante dispositivos que permitan realizar esta función, para luego realizar los trabajos o labores de mantenimiento. Asimismo, cuando se trabaja en líneas de alta Tensión es necesario realizar la puesta a tierra, ya que de esta forma se **minimiza** los riesgos producidos por sobretensiones de origen atmosférico o interno, y por electrización estática las cuales son de carácter imprevisible y peligroso.

9. Los trabajos de mantenimiento de una línea o emplazamiento con Tensión son de gran responsabilidad y de bastos conocimientos, puesto que se requiere para dicho trabajo una persona calificada, quien tenga todos los conocimientos necesarios para este tipo de trabajo. Por ejemplo, respetar las distancias de seguridad y el empleo de equipos y herramientas apropiadas.
10. Una forma eficaz de eliminar las diferencias de potencial entre objetos conductores, de las cargas electrostáticas acumuladas y de las descargas peligrosas, es la conexión de una puesta a tierra.
11. Se sugiere que toda área de trabajo libre de peligros debe mantenerse limpia y ordenada, es decir que las herramientas y equipos deben estar organizados eficientemente; el área de trabajo debe estar libre desperdicios u objetos inservibles, asimismo debe estar seco, libre de derrame de sólidos y líquidos.
12. Nunca debemos tocar un equipo para averiguar, si hay electricidad almacenada en un circuito desconectado, ni asumir que no está energizado. Se deberá emplear equipos detectores de Tensión, y si tiene alguna duda, consulte su supervisor, antes de proceder.
13. Las condiciones de trabajo seguras se dan cuando los procedimientos de trabajo son seguros y un buen nivel de responsabilidad del personal, los cuales son la mejor forma de evitar los accidentes eléctricos.
14. Las normas que se recomienda seguir en el trabajo son de acostumbrarse a mantener alerta en todo momento; si se observa algo inusual, entonces tendrá que investigar al respecto; cuando uno no conoce bien el procedimiento de trabajo, entonces tendrá que preguntar a alguien quien sepa de la materia.
15. Es recomendable jamás trabajar cerca de una fuente de electricidad si la persona, los alrededores, las herramientas o la vestimenta, están húmedas o mojadas.
16. Es preferible asegurarse que en el área de trabajo no hayan peligros atmosféricos tales como partículas de polvo, vapores inflamables y exceso de oxígeno.

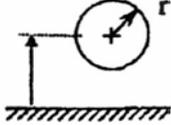
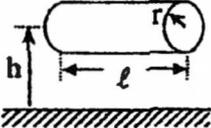
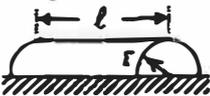
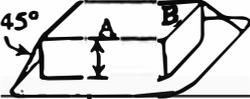
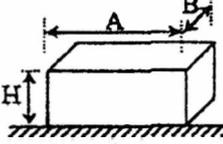
17. Para evitar sobretensiones de carácter electrostático, se recomienda suspender las actividades en un F/B de 30 (6 millas), o cuando escuche el primer trueno. Las actividades al aire libre no deben ser reiniciadas hasta 30 minutos luego de haber expirado el último trueno o del último rayo observado.
  
18. De manera genérica, todos los accidentes eléctricos y en especial debidos a la electrostática, se originan por factores como: acciones inseguras de las personas, por las condiciones, por acciones inseguras de terceros, por desinformación en la materia y por negligencia en las acciones y decisiones.
  
19. Finalmente, se puede reducir los accidentes eléctricos y mitigar los riesgos mediante una capacitación continua de los operarios y trabajadores, dentro de una instalación o emplazamiento eléctrico, de los principios básicos de la electricidad aplicados en el campo de trabajo y particularmente en la electrostática que es un campo muy desconocido, lo cual requiere poner gran énfasis y continuidad en su estudio e investigación de dichos fenómenos.

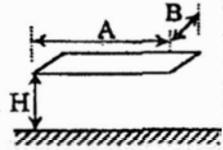
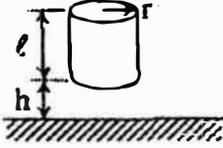
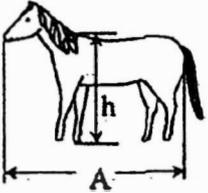
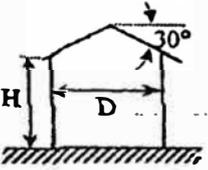
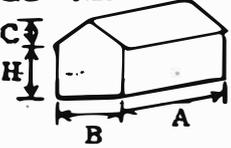
## **ANEXOS**

## ANEXO A

A continuación se muestra una tabla con las formas generales, de las cuales se determina el valor del área colectora equivalente.

**TABLA N° A.1: Expresiones de áreas colectoras equivalentes [15].**

Formas Generales	Áreas Colectoras (Sc) o Corrientes a Tierra (I <sub>CT</sub> )
Esfera por encima del suelo 	$= h \frac{4\pi}{\frac{1}{r} - \frac{1}{2h}}, \quad 4\pi rh \quad \text{para } 4 > r$
Semiesfera sobre el suelo 	$= 3\pi r^2$
Cilindro por encima del suelo 	$= \frac{2\pi h}{\text{Ln}(2h/r)} (\ell + 2r)$
Medio cilindro sobre el suelo 	$= 4r(\ell + 2r)$
Sólido rectangular, Aproximación ángulo de blindaje 45° 	$= AB + 2H(A+B) + \pi H^2$
Sólido rectangular, empírico* 	$= AB \left\{ 1 + \left[ 1.4 \frac{5}{(A/B)^{0.6}} \right] \right\} \left\{ 0.1 \left( \frac{H}{B} \right)^{0.5} + 0.78 \left( \frac{H}{B} \right) + 0.07 \left( \frac{H}{B} \right)^2 + 0.01 \left[ \frac{(H/B)^3}{(A/B)} \right] \right\}$

<p>Placa rectangular plana empírica*  <math>0.125 &lt; H/B &lt; 7.0</math>  y, <math>1 &lt; A/B &lt; 16</math></p> 	$= \left\{ AB \left[ 1 + \frac{8}{(A/B)^{0.6}} \right] \right\} \left\{ 0.3 \left( \frac{H}{B} \right)^{0.5} - 0.6 (H/B) + 0.07 \left( \frac{H}{B} \right)^2 + 0.0085 \left[ \frac{(H/B)}{(A/B)} \right]^3 \right\}$
<p>Un cilindro vertical</p> 	$= \frac{\pi \ell^2}{\text{Ln} \left[ \left( \frac{\ell}{r} \right) \left( \frac{4h + \ell}{4h - 3\ell} \right)^{0.5} \right]}$
<p>Caballo  h = alzada  C. = 180 pF  Vaca  C. = 200 pF</p> 	$I_{ct} = 17.0 \times 10^{-9} h^2 E_s A$ $I_{ct} = 17.5 \times 10^{-9} h^2 E_s A$
<p>Techo y silo ambos conductores</p> <p>Techo y silo, Techo conductor</p> <p>Techo y silo, Silo conductor</p> <p>Techo y silo, silo aislado</p> <p>Techo y silo Techo aislado, silo conductor</p>  <p>Límites datos empíricos  <math>1 &lt; H/D &lt; 4</math></p>	$= \frac{\pi D^2}{4} \left[ 1 + 8.32 \frac{H}{D} + 1.62 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \right]$ $= \frac{\pi D^2}{4} \left[ 1 + 1.5 \frac{H}{D} + 2.5 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \right]$ $= \frac{\pi D^2}{4} \left[ 5.181 \frac{H}{D} + 1.17 \left( \frac{H}{D} \right)^2 - 0.35 \left( \frac{H}{D} \right)^3 \right]$ $= \frac{\pi D^2}{4} \left[ 1 + 6.67 \frac{H}{D} + 0.33 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \right]$ $= \frac{\pi D^2}{4} \left[ 6.5 \frac{H}{D} + 1.5 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \right]$
<p>Casa aislada. Techo conductor</p> <p>Casa conductora, Techo aislado</p> <p><math>C/B = 0.25</math></p> 	$= AB \left[ 1 + \left( 4.7 + \frac{0.64}{A/B} \right) \frac{H}{B} \right]$ $= AB \left[ 1 + \left( 1.92 + \frac{4.6}{A/B} \right) \frac{H}{B} \right]$
<p>Casa y Techo conductores</p> <p>Total</p> <p>Techo</p> <p>Límites datos empíricos  <math>4 &lt; H/B &lt; 16</math>  <math>1 &lt; A/B &lt; 3.5</math></p>	$= AB \left[ 1 + \left( 3.94 + \frac{5}{A/B} \right) \frac{H}{B} \right]$ $= AB \left[ 1 + \left( 1.1 + \frac{1.4}{A/B} \right) \left( \frac{H}{B} + 0.55 \right) \right]$

Otra alternativa para calcular el área colectora es cuando los objetos que parecen a sólidos rectangulares, las relaciones de sus dimensiones, es decir, largo (A), ancho (B) y alzada (H), así como su área colectora ( $S_c$ ), entonces se puede utilizar la grafica de la Fig. A.1.

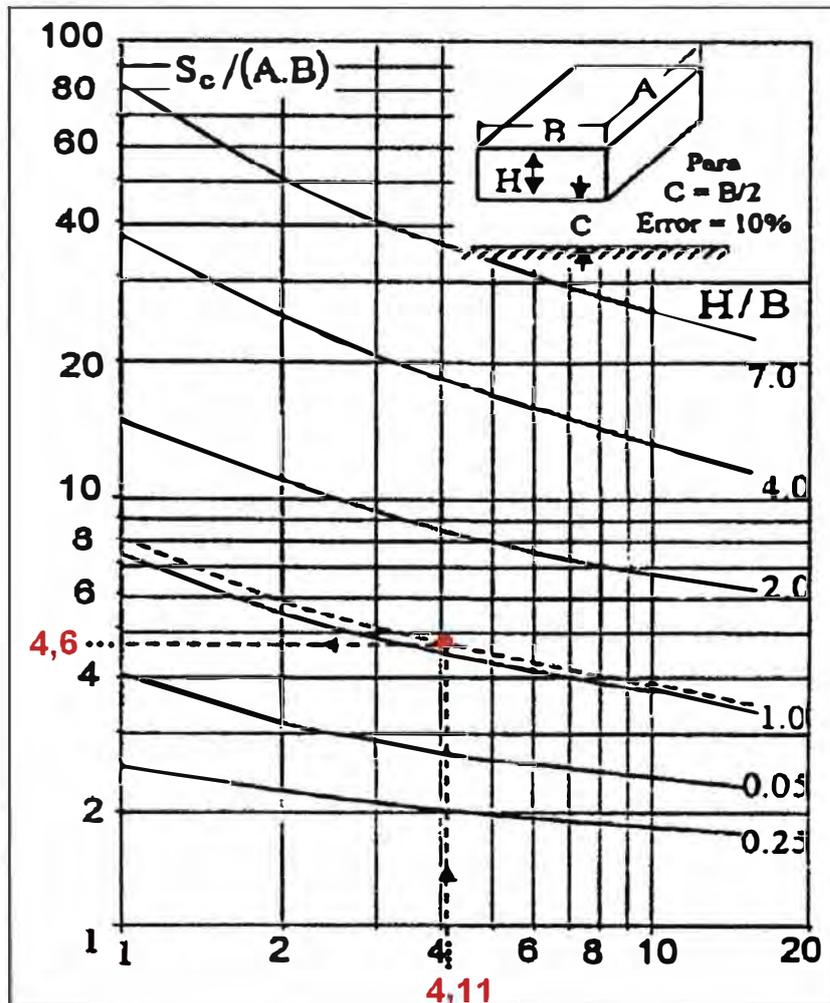
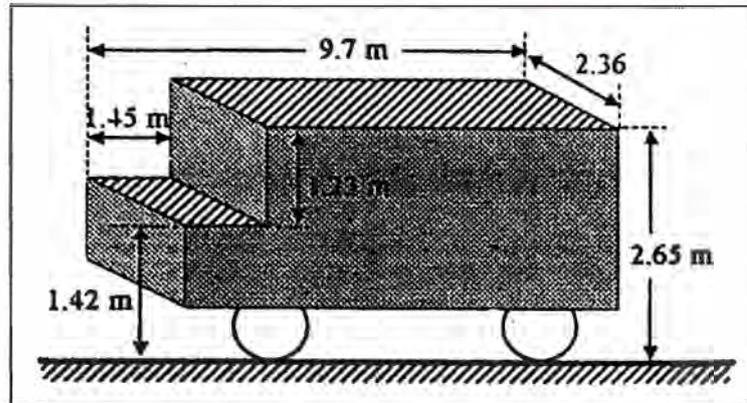


Fig. A.1: Gráfica con las relaciones de dimensiones para calcular el área colectora [1].

Cálculo gráfico del área colectora mediante el uso de la Fig. A.1:

- Determinar las dimensiones del largo (A) y el ancho (B) del objeto como una proyección de dicho objeto sobre el suelo.
- Calcular su altura media (H) con las sub áreas que forman el lado respectivo.
- Luego de tener la relación (A/B), ingresar al gráfico por las abscisas e interceptar verticalmente la curva de parámetro (H/B).
- A continuación, proyectar dicho punto en las ordenadas y hallar el valor de ( $S_c/A*B$ ).
- Para hallar la superficie equivalente ( $S_c$ ), multiplicar el valor o el parámetro leído en las ordenadas obtenido en el paso anterior por ( $A*B$ ).

Por ejemplo, determinar los parámetros de la Corriente y Tensión inducida, en un vehículo cuyas dimensiones se dan en la Fig. A.2, y se halla dicho vehículo a 12,5 m del eje de una línea eléctrica área de 220 KV.



**Fig. A.2: Dimensiones del vehículo para determinar la Tensión y Corriente inducida [1].**

Solución:

Datos:  $A = 9,7 \text{ m}$      $B = 2,36 \text{ m}$

Luego se tiene:  $A * B = 22,9 \text{ m}^2$

$$\frac{A}{B} = 4,11$$

La altura media es:  $H = \frac{[1,45 * 1,42] + [(9,7 - 1,45) * 2,65]}{9,7} = 2,47 \text{ m}$

$$\frac{H}{B} = 1,05$$

Tomando como referencia la Fig. A.1, entremos a la gráfica ubicándonos en el eje de las abscisas, con el valor calculado de  $A/B=4,11$ ; luego trazamos desde el valor anterior una recta vertical hasta interceptar la curva de parámetro  $H/B=1,05$ ; a continuación proyectamos dicho punto en el eje de las ordenadas y se tiene un valor de 4,6 correspondiente a la igualdad de la expresión:  $S_c / (A * B)$ . Por ende, cuando multipliquemos el valor obtenido de la ordenada con el valor que resulta del producto de A y B ( $A * B$ ), entonces tendremos el valor del área colectora ( $S_c$ ); para este ejemplo, se obtiene,  $S_c = 105,34 \text{ m}^2$ .

Luego teniendo un conductor con un diámetro de  $d=3 \text{ cm}$ . Y con  $r_{MG}$  (radio medio geométrico) de 12,5 mm y estando el punto más bajo a 8m de altura sobre el nivel del suelo y siendo 7m la distancia entre fases en plano horizontal, se calcula lo siguiente:

El campo eléctrico: 
$$E = \frac{U_f}{r_{MG} \ln \frac{D_{MG}}{r}} \quad (A.1)$$

$$\text{Diámetro medio geométrico: } D_{MG} = \sqrt[3]{(d_{ab} * d_{bc} * d_{ac})} \quad (\text{A.2})$$

Reemplazando los datos:

$$E = \frac{U_f}{r_{MG} \text{Ln} \frac{D_{MG}}{r}} = \frac{\frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{3}}}{12,5 \text{Ln} \left( \frac{\sqrt[3]{7 * 7 * 14}}{0,015} \right)} = \frac{179,6}{79,7} = 2,25 \text{ KV/m}$$

La Corriente inducida en el objeto es (ver fórmula 2.98):

$$I_{CT} = J\omega\epsilon_0 E \cdot h \frac{C_{OT}}{\epsilon_0}$$

se sabe que:

$$S_C = h \frac{C_{OT}}{\epsilon_0}$$

$$\text{Luego: } I_{CT} = \frac{E * S_C}{3 \times 10^8} = \frac{2250 \times 105,34 \times 10^3}{3 \times 10^8} = 79117 \times 10^{-5} = 0,791 \text{ mA}$$

La Tensión de circuito abierto debido al paso de  $I_{CT}$  (ver fórmula 2.101) y el valor de  $C_{OT}$  según la tabla 2.1, es:

$$V_{CA} = \frac{I_{CT}}{\omega C_{OT}} = \frac{0,791 \times 10^{-3}}{377 \times 2000 \times 10^{-12}} = 1049 \text{ V}$$

La energía posible de descargas disruptivas es (ver fórmula 2.103):

$$w = C_{OT} V_{CA}^2 = 2000 \times 10^{-12} \times 1049^2 = 0,0022 \text{ Joules} = 2,2 \text{ mJ}$$

## ANEXO B

### B.1 Distancias mínimas de seguridad cuando se trabaja en líneas energizadas.

**Tabla N° B.1: Distancias mínimas de acercamiento para trabajos con líneas energizadas con Corriente alterna [9].**

Tensión de fase a fase * (V)	Distancia al trabajador	
	Fase a tierra (m)	Fase a fase (m)
Hasta 50	No especificada	No especificada
51 a 300	Evitar contacto	Evitar contacto
301 a 750	0,31	0,31
750 a 15000	0,65	0,67
15,1 a 36 KV	0,77	0,86
36,1 a 46 KV	0,84	0,96
46,1 a 72,5 KV	1,00	1,20
72,6 a 121 KV	0,95	1,29
138 a 145 KV	1,09	1,50
161 a 169 KV	1,22	1,71
230 a 242 KV	1,59	2,27
* Para los sistemas monofásicos utilizar la máxima Tensión disponible Para las líneas monofásicas de sistemas trifásicos, utilizar la Tensión de fase a fase del sistema.		

**Tabla N° B.2: Factores de corrección por altitud [9].**

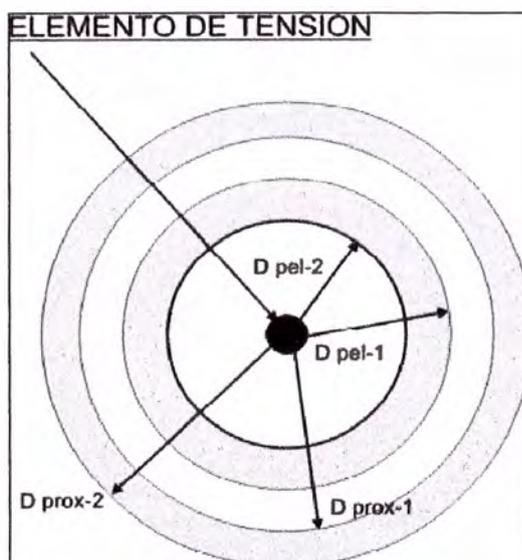
Altitud (m)	Factor de corrección
900	1,00
1200	1,02
1500	1,05
1800	1,08
2100	1,11
2400	1,14
2700	1,17
3000	1,20
3600	1,25
4200	1,30
4800	1,35
5400	1,39
6000	1,44

**Tabla N° B.3: Distancias límite de acercamiento de las zonas de trabajo [8].**

Un (KV)	Dpel-1 (cm)	Dpel-2 (cm)	Dprox-1 (cm)	Dprox-2 (cm)
<1	50	50	70	300
3	62	52	112	300
6	62	53	112	300
10	65	55	115	300
15	66	57	116	300
20	72	60	122	300
30	82	66	132	300
45	98	73	148	300
66	120	85	170	300
110	160	100	210	300
132	180	110	330	500
220	260	160	410	600
380	390	250	540	700

**De la tabla anterior:**

- $U_n$  = Tensión nominal de la instalación (KV).
- $D_{PEL-1}$  = Distancia hasta el límite exterior de la zona de peligro cuando exista riesgo de sobretensión por rayo (cm).
- $D_{PEL-2}$  = Distancia hasta el límite exterior de la zona de peligro cuando no exista el riesgo de sobretensión por rayo (cm).
- $D_{PROX-1}$  = Distancia hasta el límite exterior de la zona de proximidad cuando resulte posible delimitar con precisión la zona de trabajo y controlar que ésta no se sobrepasa durante la realización del mismo (cm).
- $D_{PROX-2}$  = Distancia hasta el límite exterior de la zona de proximidad cuando no resulte posible delimitar con precisión la zona de trabajo y controlar que esta no se sobrepase durante la realización del mismo (cm).
- Las distancias para valores de Tensión intermedios se calcularán por interpolación lineal.



**Fig B.1: Límites de las distancias de peligro y de proximidad del elemento de Tensión.**

**Tabla N° B.4: Distancias mínimas de trabajo [12].**

Tensión	Distancia mínima de aproximación
a) En líneas con Tensión de hasta 1 KV	1 m
b) En líneas con Tensión de 1,1 hasta 33 KV	2,5 m
c) En líneas con Tensión de 34 hasta 140 KV	4 m
d) En líneas con Tensión de 141 hasta 250 KV	5 m
e) En líneas con Tensión de 251 hasta 500 KV	9 m

**B.2. Espacio de trabajo [17].**

- **Condición 1:** Parte energizada expuestas en un lado en ninguna parte energizada o puesta a tierra en el otro lado del espacio de trabajo, o partes energizadas expuestas a ambos lados protegidas eficazmente por madera u otros materiales aislantes adecuados. No se consideran como partes energizadas los cables o aislados que funcionan a menos de 300 V a tierra.
- **Condición 2:** Partes energizadas expuestas a un lado y partes puestas a tierra en el otro. Las paredes de concreto, ladrillo o baldosa, se deben considerar como puestas a tierra.
- **Condición 3:** Partes energizadas expuestas en ambos lados del espacio de trabajo (no resguardadas como está previsto en la condición 1), con el operador entre ambas.

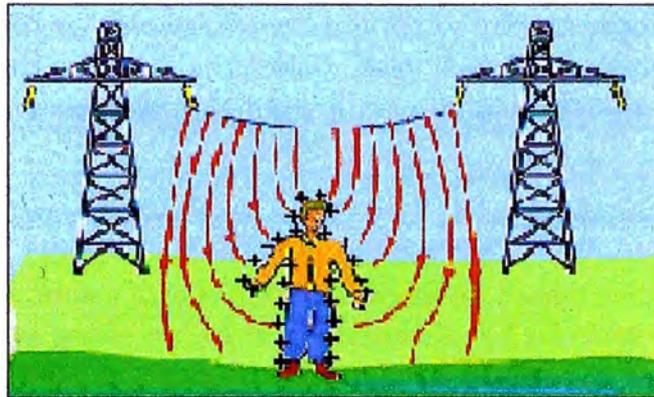
**Tabla N° B.5: Distancias mínimas de trabajo en pies [17].**

ESPACIO DE TRABAJO			
Tensión nominal a tierra (V)	Distancia libre mínima (pies)		
	Condición 1	Condición 2	Condición 3
0-150	3	3	3
151 - 600	3	3.5	4
601-2500	3	4	5
2501-9000	4	5	6
9001-25000	5	6	9
25001-75 kV	6	8	10
más de 75 kV	8	10	12

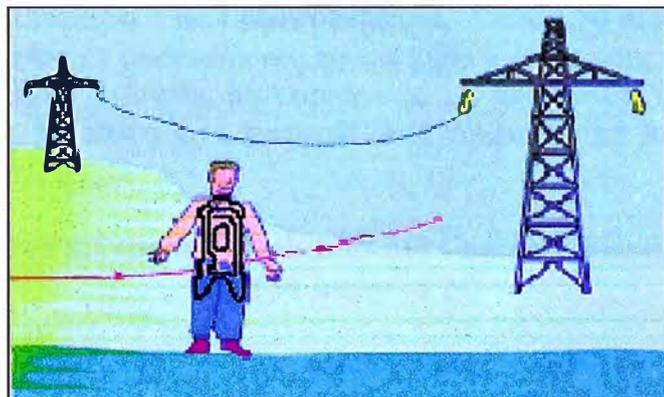
## ANEXO C

### C.1. Efectos de los Campos Electromagnéticos sobre la salud.

Los Campos Eléctricos de baja frecuencia influyen en el organismo, como en cualquier otro material formado por partículas cargadas. Cuando los Campos Eléctricos actúan sobre materiales conductores, afectan a la distribución de las Cargas Eléctricas en la superficie. Provocan una Corriente que atraviesa el organismo hasta el suelo. Asimismo, dichos Campos inducen Corrientes circulantes en el organismo. La intensidad de estas Corrientes depende de la intensidad del Campo Magnético exterior. Si es suficientemente intenso, las Corrientes podrían estimular los nervios y músculos o afectar a otros procesos biológicos. Por ello, tanto los Campos Eléctricos como los Magnéticos inducen Tensiones eléctricas y Corrientes en el organismo, es así que cuando estamos debajo de una línea de transmisión de electricidad de Alta Tensión se inducen Corrientes, sin embargo, son muy pequeñas comparadas con los umbrales para la producción de sacudidas eléctricas u otros efectos eléctricos.



**Fig N° C.1: Influencia del Campo Eléctrico [4].**



**Fig N° C.2: Influencia del Campo Magnético [4].**

Según estudios realizados, la exposición a corto plazo a los niveles presentes en el medio ambiente o en el hogar no produce ningún efecto perjudicial. No obstante, la exposición a niveles más altos, que podrían ser perjudiciales y está limitada por Normas Nacionales e Internacionales. La controversia que se plantea actualmente se centra en que si los niveles bajos de exposición a largo plazo pueden o no provocar respuestas biológicas e influir en el bienestar de las personas. Sin embargo, la OMS (Organización Mundial de la Salud) concluyó, basándose de una revisión profunda de las publicaciones científicas, que los

resultados existentes no confirman que la exposición a Campos Electromagnéticos de baja intensidad produzca ninguna consecuencia para la salud.

Algunas personas han atribuido un conjunto difuso de síntomas a la exposición de baja intensidad a Campos Electromagnéticos en el hogar. Los síntomas notificados incluyen dolores de cabeza, ansiedad, suicidios y depresiones, náuseas, fatiga y pérdida de la libido. Hasta la fecha, las pruebas científicas no apoyan la existencia de una relación entre estos síntomas y la exposición a Campos Electromagnéticos. Algunos estudios epidemiológicos sugieren que existen pequeños incrementos del riesgo de leucemia infantil asociados a la exposición a Campos Magnéticos de baja frecuencia en el hogar. Sin embargo, los científicos no han deducido en general de estos resultados la existencia de una relación causa-efecto entre la exposición a los Campos Electromagnéticos y la enfermedad, sino que se ha planteado la presencia en los estudios de efectos artificiosos o no relacionados con la exposición a Campos Electromagnéticos. Esta conclusión se ha alcanzado, en parte, porque los estudios con animales y de laboratorio no demuestran que existan efectos reproducibles coherentes con la hipótesis de que los Campos Electromagnéticos causen o fomenten el cáncer. Se están realizando actualmente estudios de gran escala en varios países que podrían ayudar a esclarecer estas cuestiones. No obstante, la mayoría de los científicos y de los médicos opinan de que los posibles efectos sobre la salud, si existen, de Campos Electromagnéticos de intensidad baja son probablemente muy pequeños comparados con otros riesgos para la salud a los que se enfrentan las personas de forma cotidiana [3].

## C.2. Niveles de exposición típicos en el hogar y en el medio ambiente

En los hogares que no están situados cerca de líneas de conducción eléctrica la intensidad de este campo de fondo puede ser hasta alrededor de  $0,2 \mu\text{T}$ . Los Campos de los lugares situados directamente bajo las líneas de conducción eléctrica son mucho más intensos. Las densidades de Flujo Magnético a nivel del suelo pueden ser del orden de hasta varios  $\mu\text{T}$ . La intensidad del Campo Eléctrico bajo las líneas de conducción eléctrica puede ser de hasta  $10 \text{ kV/m}$ . Sin embargo, la intensidad de los Campos (Eléctricos y Magnéticos) se reduce al aumentar la distancia a las líneas eléctricas. A entre  $50 \text{ m}$  y  $100 \text{ m}$  de distancia la intensidad de los Campos es normalmente equivalente a la de zonas alejadas de las líneas eléctricas de alta Tensión. Además, las paredes de las casas reducen substancialmente la intensidad de Campo Eléctrico con respecto a la existente en lugares similares en el exterior de las casas [3].

**Tabla N° C.1: Valores máximos permisibles del Campo Eléctrico y Magnético en el cuerpo humano [4]**

Fuente	Exposición máxima típica de la población	
	Campo Eléctrico (V/m)	Densidad de Flujo Magnético ( $\mu\text{T}$ )
<b>Campos naturales</b>	<b>200</b>	<b>70 (campo magnético terrestre)</b>
<b>Red eléctrica (en hogares que no están próximos a líneas de conducción eléctrica)</b>	<b>100</b>	<b>0,2</b>
<b>Red eléctrica (bajo líneas principales de conducción eléctrica)</b>	<b>10000</b>	<b>20</b>

**Tabla N° C.2: Algunos valores del Campo Eléctrico y Magnético inducidos en el cuerpo humano [4].**

Fuente	Exposición de algunos electrodomésticos	
	Campo eléctrico (V/m)	Densidad de flujo magnético ( $\mu\text{T}$ )
Secador de pelo	80 (a 30 cm de distancia)	6 - 2000 (a 3cm de distancia) 0,01 - 7 (a 30cm de distancia)
Aspiradora	50 (a 30 cm de distancia)	200 - 800 (a 3 cm de distancia) 2 - 20 (a 30 cm de distancia)

## ANEXO D

### **Accidentes eléctricos típicos [5].**

Los accidentes atribuibles a causas eléctricas pueden ser de dos tipos:

- Accidente sin que exista circulación de Corriente a través del cuerpo.
- Accidentes producidos por circulación de Corriente a través del cuerpo, o parte de él. (SHOK ELÉCTRICO).

#### **D.1. Riesgos de accidentes sin circulación de Corriente.**

Los riesgos eléctricos sin que exista circulación de Corriente a través del cuerpo son múltiples. Entre los principales podemos señalar: quemaduras por proyección de metal fundido en un corto circuito, lesiones a la vista por arco eléctrico, lesiones traumáticas o mutantes producidas por la puesta en marcha intempestivas o reenergización indeseada de maquinaria eléctrica, etc.

#### **D.2. Riesgos de accidentes con circulación de Corriente.**

Para que se produzca un accidente con circulación de Corriente a través del cuerpo de él, debe cumplirse invariablemente la condición de que cualquier parte o región del cuerpo de la persona se constituya en parte integrante de un circuito eléctrico o forme uno nuevo, si esta condición no se cumple, no existe posibilidad de que ocurra un accidente de este tipo en esta premisa se basan las técnicas de prevención de accidentes y también métodos de trabajo como los de conservación de líneas de alta Tensión energizadas.

Los riesgos principales que implica este tipo de accidentes son: muerte por fibrilación ventricular, muerte por paro respiratorio o cardíaco, lesión mortal o no producida por quemaduras internas, lesión mortal o no provocada por la acción tóxica de quemaduras extensas a la piel, lesión por destrucción de tejidos nerviosos, lesión traumática provocada por una contracción muscular violenta que incluso puede producir aceleraciones musculares y fracturas óseas, etc.

Otra clase de lesiones derivadas de un golpe eléctrico es las que resultan por ejemplo, cuando un obrero cae de un andamio o piso alto, después de haber entrado en contacto con un circuito eléctrico que le ha hecho perder el equilibrio. Esta clase de accidentes se debe a las contracciones musculares involuntarias, producidas por la electricidad.

#### **Otros accidentes eléctricos y recomendaciones.**

##### **D.3. Trabajos con circuitos energizados.**

A veces no hay otra opción que trabajar en circuitos energizados, ya que el análisis y el mantenimiento no pueden hacerse de ninguna otra forma. Los peligros presentes al trabajar con circuitos energizados son tan serios que la única forma de trabajar con seguridad es aplicando todos los principios relacionados con este tipo de operaciones.

##### **D.4. Protegerse a si mismo y a los demás.**

Cada persona tiene un nivel distinto de Resistencia a la energización eléctrica o choque accidental. Esto significa que el mismo nivel de Corriente puede causarle dolor a una

persona o un choque fatal a otra. Por ejemplo, una Corriente por debajo de 30 Volts puede ser fatal.

- Remueva los objetos agudos o cortantes del área de trabajo, además de cualquier cosa contra la cual puede ser arrojado o que lo puede hacer tropezar si recibe una energización eléctrica o choque.
- Limite el acceso a su área de trabajo con barreras y avisos.
- Piense en la manera como usted va a escoger y utilizar sus herramientas, equipos de análisis y equipos de protección personal antes de comenzara trabajar.
- Al trabajar en circuitos energizados, utilice únicamente herramientas eléctricas con doble aislamiento.
- Conozca el Voltaje y los niveles de frecuencia a los que puede ser expuesto para tomar las precauciones necesarias.
- No asuma que no hay peligro únicamente porque el Voltaje es bajo.
- Conecte a tierra todas las superficies de trabajo.
- Asegúrese de utilizar guantes de caucho aprobados en ambas manos.
- Nunca trabaje solo con un circuito energizado. Asegúrese de que un observador esté presente.

#### **D.5. La regla de una sola mano.**

Siga la regla de una sola mano al trabajar con circuitos eléctricos energizados, ya que de lo contrario, la electricidad que pasaría de un brazo a otro puede pasar a través de órganos vitales, causándole una parálisis o la muerte.

#### **D.6. Factores técnicos.**

Los factores técnicos que intervienen en un accidente eléctrico con circulación de Corriente son: la intensidad de la Corriente, el Voltaje aplicado y la Resistencia del cuerpo humano.

La mayoría de las personas posee una gran confusión sobre si es la intensidad de la Corriente, o el Voltaje aplicado, el factor que determina la gravedad del accidente eléctrico, al respecto debe dejar en claro que el factor decisivo es la intensidad de la Corriente y no el Voltaje.

Podemos citar a modo de ejemplo, que accidentes ocurridos en un mismo Voltaje han producido casos fatales y otros solamente de carácter leve.

El cuerpo humano posee una Resistencia propia que no es constante. La Resistencia a la circulación de un flujo de Corriente reside principalmente en la superficie de la piel. La piel dura, áspera, seca y callosa que ofrece una Resistencia relativamente elevada. En cambio la piel húmeda, delgada, suave, con peladuras o heridas presenta una Resistencia notablemente inferior.

Una vez vencida la Resistencia de la piel, la Corriente fluye fácilmente por la sangre y tejidos internos del cuerpo.

A continuación se muestra unos valores promedio, los cuales nos da una referencia sobre las variaciones que experimenta la Resistencia del cuerpo:

- Piel seca 600 000 a 100 000 Ohm
- Piel húmeda 10 000 a 1 000 Ohm
- Interior del cuerpo, desde las manos a los pies 600 a 400 Ohm

- Cabeza, de oreja a oreja sin considerar la piel 100 Ohm (aproximadamente.)

### D.7. Efectos fisiológicos de la Corriente eléctrica.

Generalmente cualquiera de los siguientes efectos de la corriente, puede causar lesiones al cuerpo humano e incluso la muerte.

- Contracción de los músculos del tórax, que imposibilita la respiración hasta el extremo de poder causar la muerte por asfixia, si se prolonga el paso de Corriente por el cuerpo.
- Parálisis normal del sistema nervioso, lo que también puede interrumpir la respiración.
- Dislocación del ritmo normal del corazón. La circulación sanguínea se interrumpe y sobreviene la muerte, porque el corazón no puede recobrase espontáneamente.
- Suspensión del funcionamiento del corazón, por contracción de los músculos del tórax. En este caso el corazón puede volver a latir normalmente al separar la víctima del circuito eléctrico.
- Hemorragias y destrucción de los tejidos, nervios y músculos, a causa del calor que desarrolla el paso de una Corriente muy intensa.

**Tabla N° D.1: Efectos de la Corriente eléctrica sobre el cuerpo humano.**

			Quemadura por arco
		Efectos térmicos	- Quemaduras por contacto - Calambres
	Efectos inmediatos		- Contracciones musculares - Tetanización de músculos respiratorios
	Directos	- Efectos musculares	- Fibrilación ventricular.
		- Nervioso	- Inhibición de centros nerviosos
			Cerebral
			Motor
			Circulatorios (gangrenas)
			Problemas renales
		Precoces	
Efectos	Efecto secundario		
		Tardíos	- Neuróticos - Trastornos mentales
	Indirectos		- Caídas - Golpes contra objetos - Cortes - Quemaduras al golpear o tocar elementos no protegidos

Estos efectos dependerán de una serie de factores o variables, entre los que podemos citar son:

- Tipos de Corriente.
- Intensidad.
- Tiempo de contacto.
- Resistencia del cuerpo.
- Tensión.
- Recorrido de la Corriente a través del cuerpo.

#### **D.8. Sideración de los centros nerviosos.**

Durante el periodo de inhibición nerviosa, la respiración y secundariamente, la circulación, cesan dando lugar por algunos minutos a lesiones encefálicas graves. Para que este tipo de lesión se produzca, es necesario que la Corriente eléctrica, o parte de ella, pase al bulbo.

Dato esencial es que esta inhibición es generalmente temporal. Luego de la prontitud con que se presentan los primeros auxilios y de su buena aplicación, dependerá que la víctima pueda mantenérsela en un estado de vida latente hasta que la desaparición de esta inhibición permita la vuelta a la normalidad de las funciones respiratorias y circulatorias.

#### **D.9. Fibrilación ventricular.**

Se caracteriza por una acción independiente de las fibras musculares del corazón que produce una contracción descoordinada. Entraña la supresión inmediata de la actividad fisiológica del corazón ya que no puede ejercer su función de hacer circular la sangre oxigenada y en particular de hacerla llegar al cerebro. De este modo se producen lesiones cerebro bulbar irreversible en pocos minutos.

El organismo no está capacitado para recuperarse por sí mismo, y que conduce entre cinco y diez minutos, al cese definitivo de los movimientos cardiacos.

Las condiciones en que se pueda producir fibrilación ventricular son:

- Que el trayecto de la Corriente, comprometa al corazón.
- Corriente eléctrica de intensidad comprendida entre 80 y 3000 miliAmperes.

#### **D.10. Tetanización de los músculos.**

Cuando un músculo esta expuesto a recibir una serie de excitaciones que lo obligan a contraerse varias veces en un tiempo relativamente breve, queda en un estado de contracción permanente llamado tétano.

Si pensamos que los músculos reaccionan de acuerdo con estímulos eléctricos dados por el cerebro; una Corriente industrial de 60 ciclos por segundo aplicada a un músculo producirá 120 potentes estímulos por segundo, como el músculo no puede seguir este tren de movimiento, se producirá su tetanización, impidiéndole finalmente efectuar todo movimiento.

#### **D.11. Cómo proceder en caso de accidentes.**

Los principales pasos a seguir en caso de ocurrir un shok eléctrico o electrocución, es preciso establecer el concepto de muerte real y que podamos diferenciar de ella, a la muerte aparente, que es lo que se pretende con los métodos de reanimación.

De las manifestaciones visibles de la vida oculta; en un estado en el cual los signos de la vida, principalmente los cambios nutritivos y la excitabilidad, parecen faltar. En el estado de muerte aparente no se percibe la actividad cardiaca ni la respiración, sin que ello signifique la detención definitiva de la vida celular.

De las manifestaciones visibles de la vida, es la conciencia la que desaparece primero: a continuación se suspende la respiración, mientras las contracciones cardiacas suelen persistir algún tiempo.

Los signos de una muerte definitiva son:

- El enfriamiento del cuerpo.
- La rigidez.
- Las livideces cadavéricas.

Todos aquellos científicos que han estudiado los mecanismos de la muerte por electrocución, consideran que cuando se produce una pérdida del conocimiento en el momento del accidente, esta muerte aparente no conduce a una muerte real sino que después de un tiempo determinado.

De lo anteriormente expuesto, podemos concluir que, el tiempo que existe entre la muerte aparente y la muerte real, definido comúnmente como muerte clínica, es cuando se debe actuar oportunamente para lograr la reanimación del electrocutado.

#### **D.12. Acciones que deben realizarse en caso de ocurrir un accidente.**

- a. Retire a la persona accidentada tan pronto como sea posible, del lugar o sitio en que está recibiendo la energía eléctrica, teniendo en cuenta no tocar a la víctima, y utilizar piezas de madera o paños secos, si es posible corte o desconecte la energía eléctrica.
- b. Si el accidente es en alta Tensión, hay que desconectar de inmediato la energía. No se debe actuar hasta no tener la certeza de que los equipos o líneas están desenergizadas.
- c. Mande a avisar a la oficina de la empresa o mande a buscar un médico.
- d. Evite aglomeraciones de personas en torno al accidentado.
- e. Preste los primeros auxilios adecuados lo más pronto posible.
- f. No suspenda las aplicación de los métodos de resucitación hasta que un facultativo lo determine así, a menos que el accidentado de francas muestras de recuperación.
- g. Abrigue el cuerpo de la víctima y de masajes para evitar que se enfríe.
- h. No suministre bebidas alcohólicas, estimulantes de ninguna clase, ni bebidas o alimentos.

#### **D.13. Cómo prevenir el shok eléctrico o electrocución.**

Se dice que una persona recibe un shok eléctrico cuando cualquier región de su cuerpo llega a ser parte de un circuito eléctrico.

Esto mismo dicho de otra manera significa que una persona no recibe un shok eléctrico si cualquiera región de su cuerpo no llega a formar parte de un circuito eléctrico.

Por ejemplo, un maestro electricista, que mediante un alicate no debidamente aislado y no este parado sobre un piso aislado o alfombra aislada, sino directamente sobre la tierra y sin ningún elemento de seguridad, la Corriente pasa a través del alicate hacia la mano, sigue por el cuerpo y se descarga a tierra por los pies. Esta persona se está electrocutando y para salvarla, hay que sacarla de este circuito.

¿Cómo sacarla? y ¿Qué hay que hacer?

Antes de hacer cualquier movimiento u ordenar la intervención para sacar la víctima es necesario recordar lo siguiente:

“Jamás se debe tomar a una persona que está en contacto con conductores energizados.”

Esta frase es la base y el fundamento para auxiliar a una persona que se está electrocutando. Son innumerables los accidentes eléctricos en los que se ha tenido que lamentar varias muertes por no conocer este principio.

A continuación se indicarán algunos casos de posible electrocución y las medidas a tomar para auxiliar a la víctima.

#### **D.13.1. Persona electrocutándose al tocar un conductor desnudo energizado.**

A pesar que se menciona para conductor desnudo es aplicable también para el caso del conductor forrado con mal aislamiento o bien con aislamiento insuficiente.

Para socorrer el accidentado, lo primero que se debe hacer es cortar o interrumpir el suministro de energía, actuando en los interruptores. Para que la persona que está socorriendo al afectado no pase a formar parte del circuito eléctrico.

Referente a conductores con aislamiento dañado o en mal estado, se debe revisar periódicamente este material y repararlo oportunamente.

#### **D.13.2. Personas electrocutándose al hacer puente entre fase y neutro o entre fase y fase.**

Como se puede presumir en este caso a las personas a pesar de estar parados sobre un elemento aislante, les circule Corriente por los brazos. En este caso la Corriente no fluye hacia tierra, sino que pasa hacia el neutro, o a la otra fase, por manos y brazos del accidentado, o cualquiera parte del cuerpo que hagan contacto.

Para salvar y atender a la víctima se debe proceder de la misma manera explicada en el punto D.13.1.

#### **D.13.3. Personas electrocutándose al hacer puente en una fase o en un neutro.**

Para salvar a los accidentados en este caso, se procede y se toman las mismas precauciones indicadas en los puntos D.13.1 y D.13.2.

Finalmente se puede expresar que para evitar accidentes eléctricos es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

- Material en buen estado y fabricado de acuerdo a las normas establecidas.
- Conservación de los materiales, los equipos y las instalaciones en buenas condiciones.
- Procedimientos de trabajo debidamente autorizados, incluyendo en ellos disposiciones tanto para situaciones de rutina como de emergencia.
- Conocimientos básicos de electricidad para comprender adecuadamente las instrucciones que se dan para cada trabajo.

## ANEXO E

## Descargas en medios gaseosos

El aire es el más importante y frecuentemente empleado de los aislantes. El aire es una mezcla de gases, los cuales son aproximadamente en peso: 75,5 % de nitrógeno, 23,2 % de oxígeno, 1,3 % de argón, criptón, xenón, helio, hidrógeno y monóxido de carbono en pequeñas cantidades. En la atmósfera varían poco las proporciones de dicha mezcla. Además pueden encontrarse en el aire, en mayor o menor cantidad, vapor de agua, polvo, anhídrido sulfuroso y otras impurezas.

Las moléculas gaseosas y las partículas de polvo se hallan en su mayor parte en estado neutro, es decir, que el número de Electrones corresponden a la Carga del núcleo. Existe una pequeña cantidad de los mismos pero que se halla cargada positiva o negativamente cuando contiene menos o más Electrones que los correspondientes al núcleo. Por ello, una molécula de gas cargada de esta manera, se llama Ion gaseoso.

Si se coloca aire entre dos placas metálicas y se aumenta la diferencia de Tensión entre las mismas, al principio aumenta la intensidad de Corriente casi proporcionalmente a dicha diferencia. Esta Corriente es creada por las partículas negativas que se dirigen a la placa positiva y las positivas que se dirigen a la negativa. A partir de cierto valor de la Tensión la Intensidad deja de aumentar y permanece constante. Si se sigue aumentando la Tensión, el gas empieza a hacerse luminoso, se producen descargas entre placas y, si la Potencia del generador de Corriente es suficiente, se forma un arco de cortocircuito. La intensidad de la Corriente empieza a subir notablemente poco antes de poderse apreciar con la vista los efectos luminosos. Podemos ver el comportamiento de la Tensión versus Corriente en una gráfica bidimensional, como mostrada en la figura N° E.1.

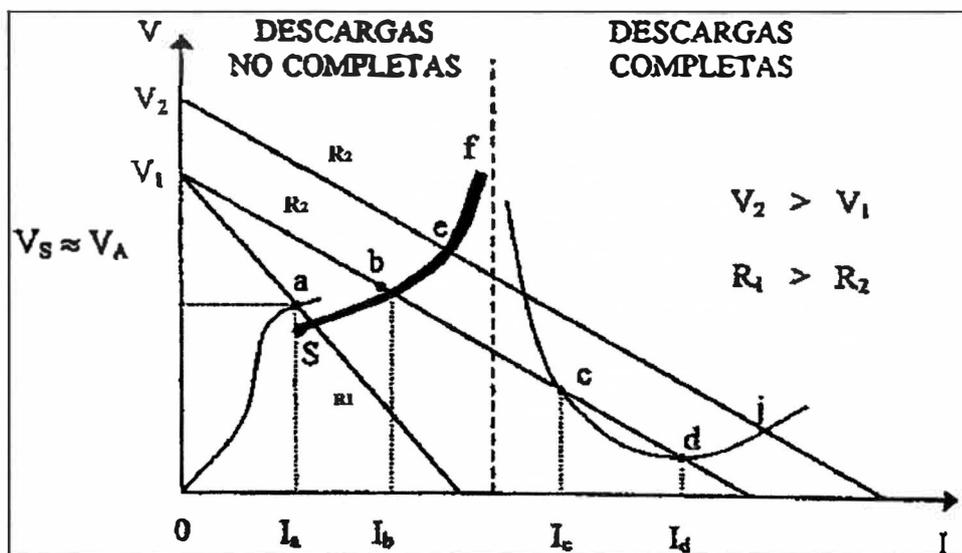


Fig N° E.1: Característica Tensión versus Corriente de las descargas gaseosas [1].

En la figura se puede apreciar cuatro tramos en la característica Tensión versus Corriente de las descargas gaseosas.

- De 0 – a, corresponden a las descargas de Townsend.
- De a – b, corresponden a las descargas luminiscentes normales.
- De b – e, corresponden a las descargas luminiscentes anormales.
- De c – j, corresponden a las descargas de baja Tensión y gran Potencia.

### E.1 Característica de Paschen para las descargas gaseosas [1], [14], [16]

La descarga por chispas se produce en aquellos casos en que la intensidad del Campo Eléctrico alcanza el valor de disrupción ( $E_{DISR}$ ) para el gas dado. El valor de  $E_{DISR}$  depende de la presión del gas; para el aire a la presión atmosférica es de cerca de 30 KV/cm. Asimismo, al aumentar la presión, el  $E_{DISR}$  crece. Según la Ley empírica de Paschen, la razón de la Tensión disruptiva del Campo a la presión, es aproximadamente constante, como se expresa en la fórmula N° E.1

$$\frac{E_{DISR}}{p} \approx cte \quad (E.1)$$

Además, la ionización durante las descargas sufre la influencia de la presión del gas y depende de la naturaleza del gas. Paschen estableció que la Tensión disruptiva de un gas, bajo un Campo uniforme ( $E$ ) depende del producto de la presión del gas ( $p$ ) por la longitud de la brecha ( $d$ ), y demostró que existe un valor mínimo a partir del cual:

- la Tensión disruptiva ( $V$ ) crece al aumentar la presión del gas. También crece la Tensión disruptiva ( $V$ ) al disminuir la presión pero solo en la zona de perforación corta, con pendiente negativa, es decir en condiciones de vacío.
- el comportamiento dieléctrico del aire se sitúa en solo una parte reducida de la zona de perforación larga (pendiente positiva), es decir relativamente lejos del punto mas bajo de la característica de la curva que indica la presión barométrica del lugar, mostrado en la fórmula N° E.2.

$$p * d = 5,7 \text{ mmHg.mm} \quad (E.2)$$

En la figura N° E.2, si se toma un punto P en la zona donde la ionización es menor que 1 y con  $V = 1,2$  KV, se observa que no se produce descarga. Sin embargo cuando se aproximan los electrodos, conservando la misma Tensión, se produce la descarga cuando la ionización es igual a 1, es decir en el punto Q. Continuando al aproximación de los electrodos siempre manteniendo la misma Tensión, la Corriente varia hasta llegar al máximo (punto de inflexión) para volver luego al valor del punto S, donde también resulta nuevamente con ionización igual a 1. Para una distancia aún menor, la descarga cesa, debido a que entra nuevamente en la zona de ionización menor que 1.

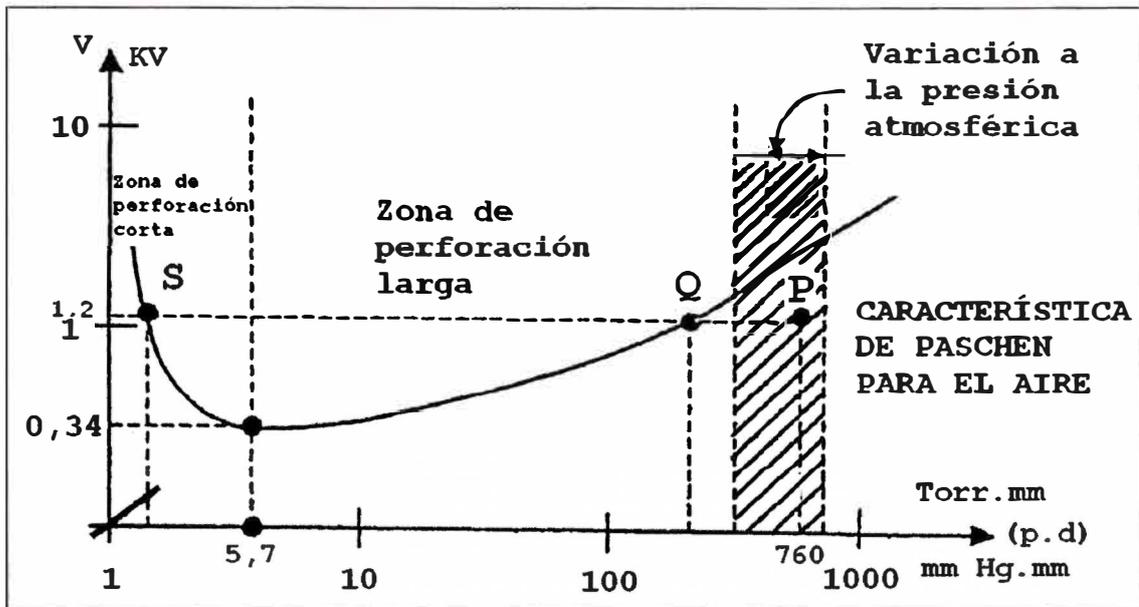


Fig N° E.2: Característica de Paschen para las descargas gaseosas [1].

## E.2. Ionización

Los iones gaseosos se forman quitando o agregando un Electrón a una molécula en estado neutro. La causa de esta modificación puede ser un rayo de luz, un rayo X o un rayo ultravioleta. Estos rayos son llamados ionizadores, y este tipo de ionización se le denomina por absorción de energía. Por efecto de los rayos solares y de las sustancias radioactivas existen siempre iones en el aire, cuya cantidad por centímetro cúbico depende de las circunstancias y son designados con el nombre de iones fortuitos. Otra forma de ionización es por agitación térmica, en el cual al átomo pasa a un estado superior de energía debido al aumento de temperatura que origina dicha excitación. Por otro lado, cuando un ion, o un Electrón, chocan con una molécula o átomo, puede desprenderse de esta un Electrón y transformarla en ion, bajo la influencia de un Campo Eléctrico. Este efecto se denomina ionización por choque, que se puede apreciar en la figura N° E.3. Para conseguir esta ionización por choque es preciso que la energía de movimiento de los iones o Electrones sea suficientemente grande para asegurar el trabajo de separación (trabajo de disociación). Para cada ionización se requiere cierta cantidad de trabajo llamada trabajo de ionización [16].

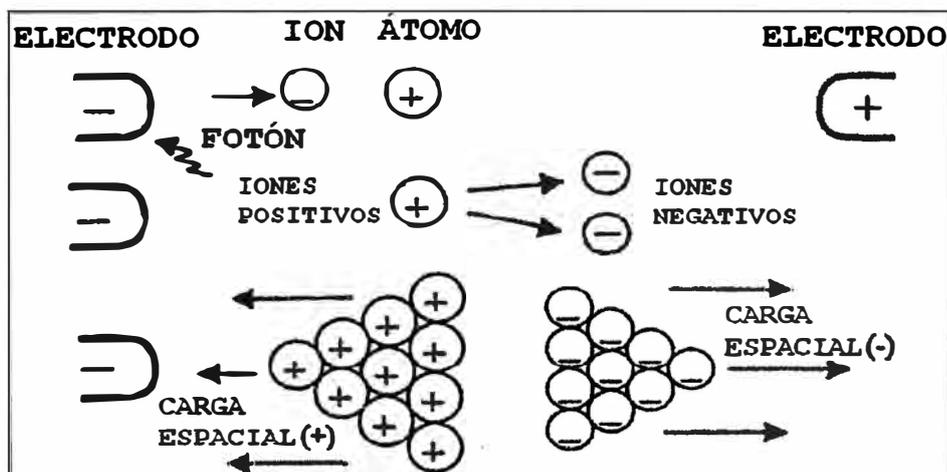


Fig N° E.3: Fenómeno inicial en los procesos de descargas en medios gaseosos [1].

De manera análoga a un rayo, cuya longitud suele ser de hasta 10 Km y el diámetro del canal puede ser hasta 40cm y la intensidad de Corriente puede alcanzar más de 100KA, y la duración del impulso es de cerca de  $10^{-4}$  s. Cada rayo consta de varios impulsos (hasta 50) que siguen el mismo canal cuya duración total (junto con los intervalos entre los impulsos) puede llegar a ser de varios segundos. La temperatura del gas en el canal de la chispa puede ser de hasta 10 000 K. El calentamiento rápido e intenso del gas hace que aumente bruscamente la presión y que se originen ondas de choque y sonoras. Por eso la descarga por chispas va acompañada de fenómenos acústicos, desde un chasquido leve, cuando la chispa es poco potente, hasta el fragor de los truenos que siguen al rayo.

El surgimiento de la chispa va precedido de la formación en el gas de un canal fuertemente ionizado que recibe el nombre de “streamer”. Este canal se forma por recubrimiento de las avalanchas electrónicas aisladas que surgen en el camino de la chispa. El precursor de cada avalancha sirve un Electrón generado por fotoionización. El esquema del desarrollo del “streamer” se muestra en la figura N° E.4. Supongamos que la intensidad del Campo es tal, que un Electrón desprendido del cátodo a expensas de un proceso cualquiera, adquiere en la longitud del recorrido libre la energía suficiente para la ionización. Por eso se produce la multiplicación de los Electrones y se origina la avalancha (los iones positivos que se forman al mismo tiempo, no desempeñan papel importante porque su movilidad es mucho menor; ellos solo condicionan la Carga espacial que ocasiona la redistribución del Potencial). La radiación de onda corta que emite el átomo al cual le fue arrancado uno de los Electrones internos durante la ionización (esta radiación se indica en el esquema por medio de líneas onduladas), excita la fotoionización de las moléculas, y los Electrones que se desprenden generan cada vez nuevas avalanchas. Una vez que estas avalanchas se recubren, se forma el canal “streamer” que es buen conductor, por el cual se lanza del cátodo al ánodo un potente flujo de Electrones y se produce la descarga disruptiva.

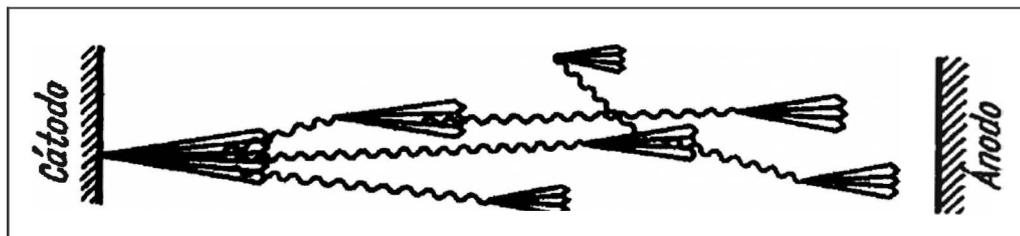


Fig N° E.4: Desarrollo del “streamer” [14].

### E.3. La ionización en interiores [20].

La ionización es una de las técnicas utilizadas para eliminar partículas del aire. Los iones actúan como núcleos de condensación para partículas pequeñas que, al aglutinarse, crecen y se precipitan.

La concentración de iones en espacios interiores cerrados es, como norma general y si no hay fuentes de iones adicionales, inferior a la existente en espacios abiertos. De ahí la creencia de que una mayor concentración de iones negativos mejora la calidad del aire en interiores.

Algunos estudios basados en datos epidemiológicos y en investigaciones experimentales planificadas afirman que el aumento de la concentración de iones negativos en ambientes

iones positivos tienen un efecto perjudicial. Con todo, se han hecho estudios paralelos donde se demuestra que los datos sobre los efectos de la ionización negativa en la productividad de los trabajadores son incoherentes y contradictorios. Por consiguiente, parece que todavía no es posible afirmar inequívocamente que la generación de iones negativos es realmente beneficiosa.

### E.3.1. Ionización natural

Las moléculas individuales de gas en la atmósfera pueden ionizarse negativa o positivamente ganando o perdiendo respectivamente un electrón. Para que esto ocurra, primero es necesario que una molécula determinada adquiera energía suficiente —que habitualmente recibe el nombre de energía de ionización de esa molécula en particular—. En la naturaleza existen muchas fuentes de energía, de origen tanto cósmico como terrestre, capaces de producir este fenómeno: la radiación de fondo en la atmósfera; las ondas solares electromagnéticas (especialmente las ultravioletas), los rayos cósmicos, la atomización de líquidos —como la producida por los saltos de agua—, el movimiento de grandes masas de aire sobre la superficie de la tierra, fenómenos eléctricos como los rayos y las tormentas, el proceso de combustión y las sustancias radiactivas.

Las configuraciones eléctricas de los iones así formados, aunque todavía no se conocen por completo, parecen incluir los iones de la carbonatación y  $H^+$ ,  $H_3O^+$ ,  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $OH^-$ ,  $H_2O^-$  y  $O^{2-}$ . Tales moléculas ionizadas pueden agregarse por adsorción a partículas suspendidas (niebla, sílice y otros contaminantes). Los iones se clasifican por su tamaño y movilidad. Esta última se define como la velocidad en un campo eléctrico y se expresa en centímetros por segundo por tensión por centímetro ( $cm/s/V/cm$ ), también expresado:  $cm^2/Vs$

Los iones atmosféricos tienden a desaparecer por recombinación. Su vida media depende de su tamaño y es inversamente proporcional a su movilidad. Los iones negativos son estadísticamente más pequeños y su vida media es de varios minutos, mientras que los iones positivos son más grandes y su vida media es de aproximadamente media hora. La *carga espacial* es el cociente de la concentración de iones positivos y de la concentración de iones negativos. El valor de esta relación es mayor que uno y depende de factores como el clima, la ubicación y la estación del año. En los espacios donde vive el ser humano, este coeficiente puede tener valores menores que uno. En la Tabla N se muestran las características.

**Tabla N° E.1: Características de los iones en función de la movilidad y el diámetro [20].**

Movilidad ( $cm^2/Vs$ )	Diámetro ( $\mu m$ )	Características
3,0 - 0,1	0,001 - 0,003	Pequeños, alta movilidad, vida corta
0,1 - 0,005	0,003 - 0,03	Tamaño intermedio, mas lento que los iones pequeños
0,005 - 0,002	> 0,03	Iones lentos, agregados a partículas (iones de Langevin)

### E.3.2. Ionización artificial

La actividad humana modifica la ionización natural del aire. Los procesos industriales y nucleares y los incendios pueden provocar ionización artificial. Las partículas suspendidas en el aire favorecen la formación de iones de Langevin (iones agregados en partículas).

Los radiadores eléctricos aumentan considerablemente la concentración de iones positivos. Los aparatos de aire acondicionado también aumentan la carga espacial del aire interior. Los lugares de trabajo tienen maquinaria que produce iones positivos y negativos al mismo tiempo, como en el caso de las máquinas que son importantes fuentes locales de energía mecánica (prensas, máquinas hiladoras y tejedoras), energía eléctrica (motores, impresoras electrónicas, fotocopadoras, instalaciones y líneas de alta tensión), energía electromagnética (pantallas de rayos catódicos, televisores, monitores de ordenador) o energía radiactiva (terapia con cobalto-42). Son equipos que crean ambientes con mayores concentraciones de iones positivos debido a la mayor vida media de estos últimos en comparación con los iones negativos.

### **E.3.3. Concentraciones de iones en el ambiente**

Las concentraciones de iones varían según las condiciones ambientales y meteorológicas. En zonas con poca contaminación, como bosques y montañas, o en lugares situados a gran altitud, aumenta la concentración de iones pequeños; en zonas próximas a fuentes radiactivas, saltos de agua o rápidos fluviales, las concentraciones pueden alcanzar miles de iones pequeños por centímetro cúbico. Por otra parte, en las proximidades del mar y cuando los niveles de humedad son altos, existe un exceso de iones grandes. En general, la concentración media de iones negativos y positivos en aire limpio es de 500 y 600 iones por centímetro cúbico respectivamente.

Algunos vientos pueden transportar grandes concentraciones de iones positivos: el Föhn en Suiza, el Santa Ana en Estados Unidos, el Siroco en Africa del Norte, el Chinook en las Montañas Rocosas y el Sharav en Oriente Medio.

En lugares de trabajo donde no hay factores de ionización significativos suele haber una acumulación de iones grandes. En especial, por ejemplo, en lugares herméticamente cerrados y en minas. La concentración de iones negativos disminuye bastante en espacios cerrados y en áreas contaminadas o polvorientas. Existen muchas razones por las que también se reduce la concentración de iones negativos en espacios interiores con sistemas de aire acondicionado. Una de ellas es que los iones negativos permanecen atrapados en conducciones y filtros de aire o son atraídos a superficies con carga positiva. Así, las pantallas de rayos catódicos y los monitores de ordenador tienen una carga positiva que crea en sus proximidades un microclima deficiente en iones negativos. Los sistemas de filtración de aire diseñados para "salas blancas", que requieren que los niveles de contaminación con partículas se mantengan al mínimo, también parecen eliminar los iones negativos. Por otra parte, un exceso de humedad condensa los iones, mientras que una falta de ella crea ambientes secos con grandes cargas electrostáticas. Tales cargas se acumulan en plásticos y fibras sintéticas, tanto en la habitación como en las personas.

### **E.3.4. Generadores de iones**

Los generadores ionizan el aire, con lo que suministran una gran cantidad de energía que puede proceder de una fuente de radiación alfa (como el tritio) o de una fuente de electricidad por aplicación de una alta tensión a un electrodo de punta afilada. Las fuentes radiactivas están prohibidas en la mayoría de los países debido a sus problemas secundarios de radiactividad.

Los generadores eléctricos consisten en un electrodo aguzado rodeado por una corona; el electrodo recibe una tensión negativa de miles de voltios y la corona se pone a masa. Los iones negativos son expulsados mientras que los positivos son atraídos hacia el generador.

La cantidad de iones negativos generados aumenta en proporción a la Tensión aplicada y al número de electrodos que contiene. Los generadores con mayor número de electrodos y que utilizan una Tensión más baja son más seguros, porque cuando la Tensión excede de 8.000 a 10.000 Volt, el generador no sólo produce iones, sino también ozono y algunos óxidos nitrosos. La diseminación de iones se consigue por repulsión electrostática.

La migración de iones dependerá de la alineación del Campo Magnético generado entre el punto de emisión y los objetos que lo rodean. La concentración de los iones que rodean a los generadores no es homogénea y disminuye significativamente cuanto más lejos están de ellos. La instalación de ventiladores en estos equipos aumentará la zona de dispersión iónica. Conviene recordar que es preciso limpiar periódicamente los elementos activos de los generadores para asegurar su correcto funcionamiento.

Los generadores también pueden funcionar por atomización de agua, efectos termoeléctricos o rayos ultravioleta. Existen generadores de muchos tipos y tamaños. Pueden instalarse en techos y paredes o colocarse en cualquier sitio si son pequeños y portátiles.

### **E.3.5. Medición de iones**

Los dispositivos medidores de iones se fabrican colocando dos placas conductoras con una separación entre ellas de 0,75 cm y aplicando una Tensión variable. Los iones recogidos se miden con un picoamperímetro y se registra la Intensidad de la corriente. Las Tensiones variables permiten la medición de concentraciones de iones de diferente movilidad. La concentración de iones ( $N$ ) se calcula a partir de la intensidad de la Corriente eléctrica generada utilizando la fórmula siguiente:

$$N = \frac{I}{VqA} \quad (\text{E.3})$$

donde  $I$  es la Corriente en amperios,  $V$  es la velocidad del aire,  $q$  es la carga de un ion univalente ( $1,6 \times 10^{-19}$ ) en culombios y  $A$  es el área efectiva de las placas colectoras. Se presupone que todos los iones tienen una carga simple y que todos ellos quedan retenidos en el colector. Hay que tener en cuenta que este método tiene sus limitaciones debido a la Corriente de fondo y a la influencia de otros factores, como la humedad y los Campos de electricidad estática.

### **E.3.6. Los efectos de los iones en el cuerpo**

Los iones negativos pequeños son los que supuestamente tienen el mayor efecto biológico debido a su mayor movilidad. Las altas concentraciones de iones negativos pueden matar o bloquear el crecimiento de microorganismos patógenos, pero no se han descrito efectos perjudiciales para los seres humanos.

Algunos estudios indican que la exposición a altas concentraciones de iones negativos produce en algunas personas cambios bioquímicos y fisiológicos que tienen un efecto relajante, reducen la Tensión y los dolores de cabeza, mejoran la atención y reducen el tiempo de reacción. Tales efectos podrían deberse a la supresión de la hormona neuronal serotonina (5-HT) y de la histamina en ambientes cargados con iones negativos; estos factores podrían afectar a un segmento hipersensible de la población. Ahora bien, otros estudios han llegado a conclusiones diferentes sobre los efectos de los iones negativos para

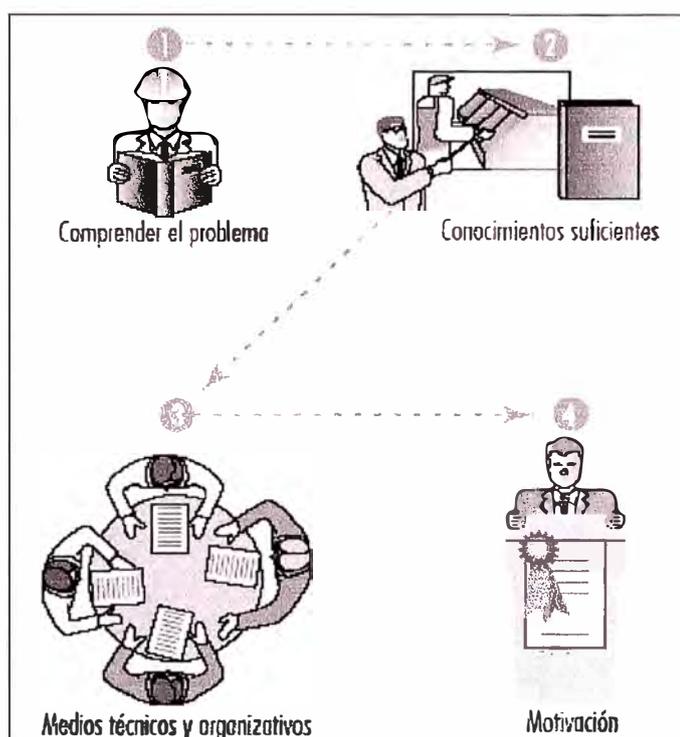
el cuerpo. Por consiguiente, sigue abierto el debate en cuanto a los beneficios de la ionización negativa y serán precisas más investigaciones antes de adoptar una posición.

## ANEXO F

### Las cuatro fases del éxito de un programa de seguridad.

Un conocimiento cabal, tanto teórico, como práctico, del problema y de los mecanismos que lo subyacen constituye la condición previa del éxito de un programa de seguridad. En esto se fundamenta la fijación de los objetivos del programa, por lo cual:

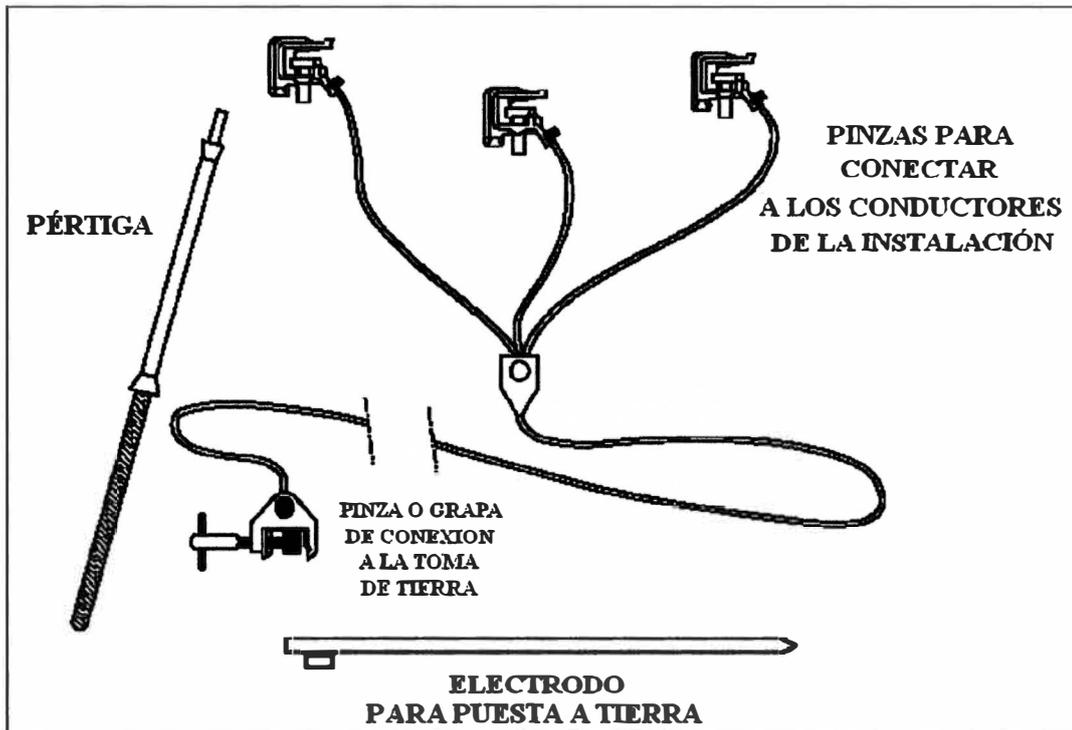
- a) Las personas deben conocer los objetivos,
- b) también deben poseer los medios técnicos y organizativos precisos para actuar en consecuencia, y
- c) finalmente deben de estar motivados (ver figura F.1).



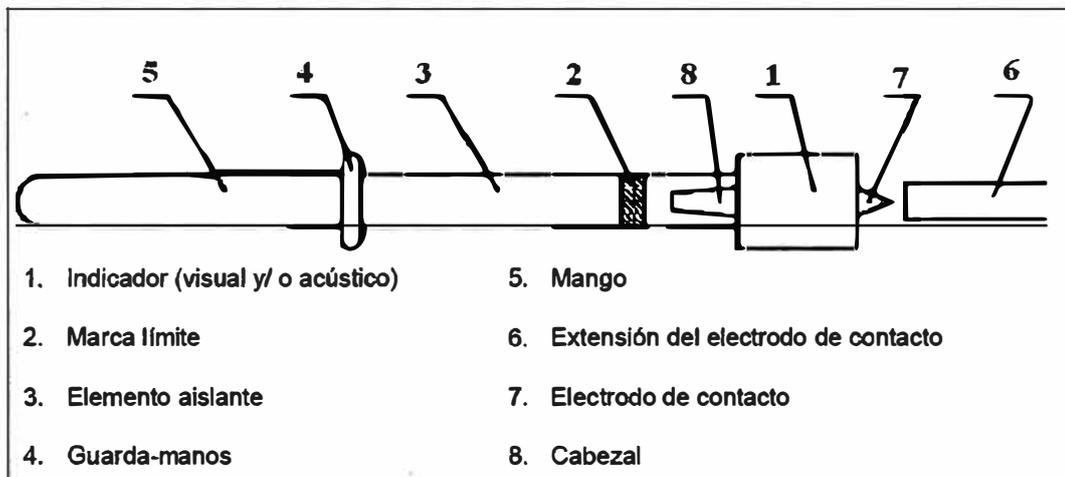
**Fig. F.1: Las cuatro fases del éxito de un programa de seguridad [19].**

Una campaña de seguridad puede ser un buen cauce de difusión de información relativa a un objetivo. No obstante, la campaña sólo influye en el comportamiento humano si se satisfacen los demás criterios. Por ejemplo, la exigencia de utilizar casco protector no surte efectos en una persona que carezca de él, ni en el caso de que los cascos sean extraordinariamente incómodos de usar, por ejemplo, por el tiempo frío reinante. A veces, las campañas de seguridad se dirigen a mejorar la motivación; sin embargo, resultan igualmente ineficaces si consisten en un simple mensaje abstracto, del tipo de "la seguridad es lo primero", a menos que los destinatarios posean el conocimiento necesario para traducir el mensaje en comportamientos concretos. Es preciso cumplir los cuatro criterios (Comprender el problema, conocimientos suficientes, medios técnicos y organizativos, y la motivación) indicados en la figura F.1, para que sea eficaz. Es decir, el programa de seguridad debe enfocarse a estas cuatro áreas simultáneamente; de lo contrario, los progresos serán limitados [19].

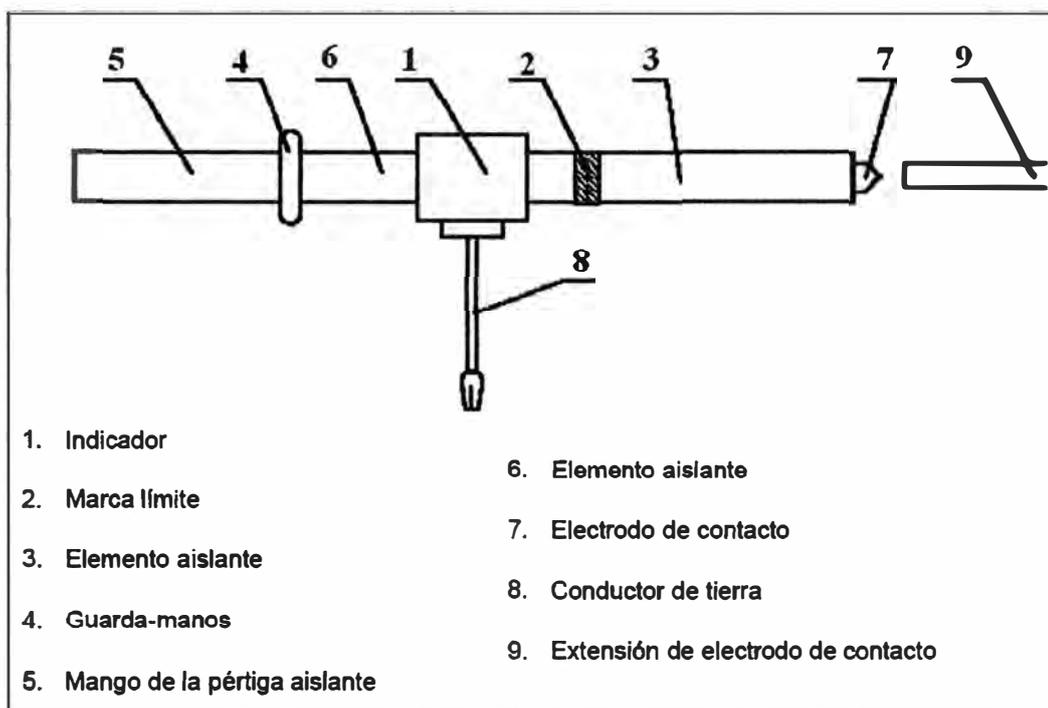
## ANEXO G



**Fig G.1: Elementos de un equipo portátil de puesta a tierra.**



**Fig G.2: Detector de Tensión tipo Capacitivo para AT.**



**Fig G.3: Detector de Tensión tipo Resistivo para AT.**

## ANEXO H

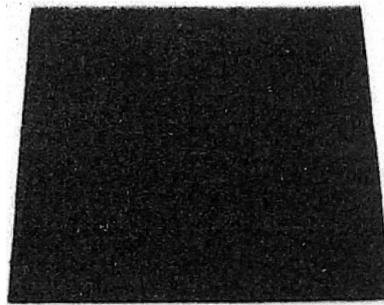
### Productos antiestáticos.

#### H.1. Gomaespuma [21]

Gomaespuma negra, conductora y no corrosiva en dos densidades, que se suministra en láminas de 6,4mm de espesor. La goma espuma de alta densidad es apropiada para almacenar y proteger Circuitos integrados sensibles a la electricidad estática. La gomaespuma de baja densidad es un material más suave y flexible, ideal para empaquetar componentes sensibles a la electricidad estática, ya sea para forrar bandejas, cajas, etc. o para ofrecer una protección envolvente. Presenta las características de acolchado protector de una gomaespuma normal junto con protección eléctrica por ser conductora.

Tamaño 1: 305×305×6,4mm

Tamaño 2: 1.000×1.000×6,4mm



**Fig H.1: Gomaespuma**

#### H.2. Rollos de envoltura de burbujas [21].

- Envoltura de burbujas que no genera electricidad estática, en modelos de burbuja grande y pequeña.
- Evita la acumulación de campos electrostáticos dañinos.
- Ofrece una excelente protección para productos manufacturados.
- Idóneo como embalaje externo de un producto ya apantallado.
- Cumple la norma EN100 015/1 IEC61340-5-1.
- Tamaños de: 0,5m x 25m, 0,75m x 25m y 1,5m x 25m.



**Fig H.2: Envoltura de burbujas**

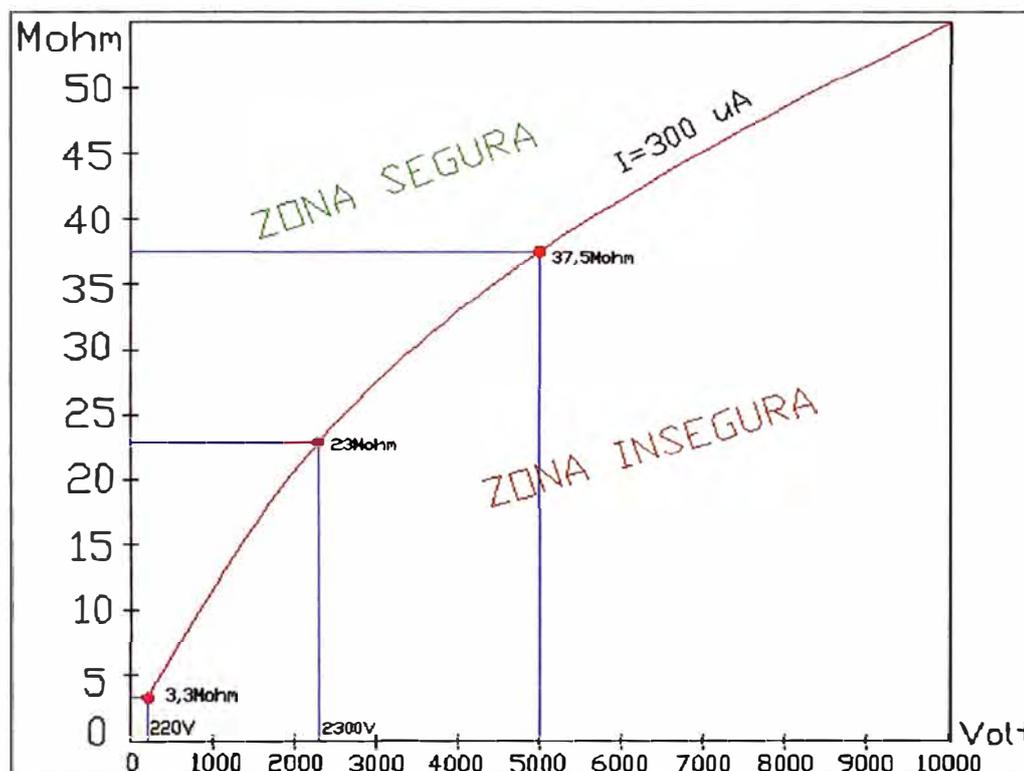
## ANEXO I

## I.1 Guantes Dieléctricos.

Según la IEC 903 (Comisión Electrotécnica Internacional) y la ASTM-D-120 (Sociedad Americana de Prueba de Materiales), nos proporciona el siguiente cuadro de valores de Tensiones referente a guantes dieléctricos.

**Tabla N° I.1: Máxima Tensión de uso de guantes dieléctricos.**

CLASE	TENSIÓN DE PRUEBA	MÁX TENSIÓN DE USO
00	2 500	500
0	5 000	1 000
1	10 000	7 500
2	20 000	17 000
3	30 000	26 500
4	40 000	36 000



	Volt	Ohm
	10000	R= 1 K (VI)
	2300	R= 2 K (VI)
Para:	220	R= 3 K (VI)

K=1,5 es el factor de seguridad (50% sobre "R" teórico).

1,2,3 son coeficientes por la forma y frecuencia de uso.

Prueba crítica es en húmedo.

**Fig I.1: Nivel de aislamiento permisible para los implementos de protección personal (casco, guantes, botines, etc.) para trabajar en diferentes tensiones a 60 Hz.**

**I.2 Correa de herramientas.****Fig I.2: Correa de herramientas de cuero.**

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ing. Justo Yanque Montufar, “Copias del Curso de Titulación de las Técnicas de la Alta Tensión”, Universidad Nacional de Ingeniería – Lima, Perú, 2005.
- [2] Ing. Manuel Carranza Arévalo. “Copias del Curso de Titulación de Control de Calidad de Máquinas Eléctricas”. Universidad Nacional de Ingeniería – Lima, Perú, 2005.
- [3] “Los Campos Electromagnéticos (CEM)”, Organización Mundial de la Salud. 2005. [www.who.int/topics/electromagnetic\\_fields/es/](http://www.who.int/topics/electromagnetic_fields/es/)
- [4] “Sobretensiones en Líneas de Transmisión Eléctrica”, Electrotecnia – Industria, España, 2005. [www.sapiensman.com/sobretensiones/sobretensiones.htm](http://www.sapiensman.com/sobretensiones/sobretensiones.htm)
- [5] “Riesgos Eléctricos”. Corporación Educacional. Universidad de Aconcagua – Chile, 2004. [html.rincondelvago.com/riesgos-electricos-en-el-trabajo.html](http://html.rincondelvago.com/riesgos-electricos-en-el-trabajo.html)
- [6] Procobre, “Sistemas de Puesta a Tierra”. Procobre Perú, 2004. [www.procobreperu.org](http://www.procobreperu.org)
- [7] Richard Kithil – Presidente y CEO, “Seguridad Contra Rayos del Siglo 21° para Ambientes que Contienen Electrónica Sensible, Explosivos y Sustancias Volátiles”. Instituto Nacional de la Seguridad del Rayo USA, 2003. [www.lightningsafety.com/nlsi\\_lls/21stcent\\_spanish.doc](http://www.lightningsafety.com/nlsi_lls/21stcent_spanish.doc),
- [8] INSHT, “Guía Técnica para la Evaluación y Prevención del Riesgo Eléctrico”, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Real Decreto 614/2001 – España, 2001. [http://www.mtas.es/insht/practice/g\\_electrico.htm](http://www.mtas.es/insht/practice/g_electrico.htm)
- [9] DGE - MEM, “Código Nacional de Electricidad. Suministro”. Ministerio de Energía y Minas. Dirección General de Electricidad – Perú, 2001.
- [10] Soto De la Vega Gustavo, Vazquez Soto Alicia, “Manual de Laboratorio de Física de la Inducción Electrostática”, Universidad Iberoamericana Departamento de Física, 1997.
- [11] Claude Menguy, “Electricidad – Riesgos Generales, Electricidad Estática, Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, Tomo 40”. INSHT – España, 1994. [www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo2/40.pdf](http://www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo2/40.pdf)
- [12] Ministerio de Nicaragua “Código de Instalaciones Eléctricas, Norma Ministerial sobre las Disposiciones Básicas de Higiene y Seguridad del Trabajo Aplicables a los Equipos e Instalaciones”, Nicaragua. 1993.

- [13] “Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, IEEE Standard 142-1991”, IEEE, 1991.
- [14] I.V.Savéliev. “Curso de Física General”. Editorial MIR – Moscú, URSS, 1984.
- [15] D.W Deno, “Electric and Magnetic Effects. Method of Calculation, IEEE Tutorial Course Pub.79 EHO145-3-PWR”, IEEE - USA, 1975.
- [16] La Escuela del Técnico Electricista, “Técnicas de la Alta Tensión, Tomo 12”, Editorial Labor S.A - España, 1970.
- [17] National Fire Protection Association, “Seguridad Eléctrica en el Campo de Trabajo, NFPA 70-E”, ANSI – USA, 2004.
- [18] Robert F. Herrick, “Protección Personal – Herramientas y enfoques, Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, Tomo 31”. INSHT – España, 1994.  
[www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo2/31.pdf](http://www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo2/31.pdf)
- [19] Jorma Saari, “Política de Seguridad y Liderazgo, Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, Tomo 59”. INSHT España, 1994.  
[www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo2/59.pdf](http://www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo2/59.pdf)
- [20] Juan Guasch Farrás, “Control Ambiental en Interiores, Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, Tomo 45”. INSHT España, 1994.  
[www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo2/45.pdf](http://www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo2/45.pdf)
- [21] RS Amidata, “Ingeniería y Diseño Electrónico - Productos Antiestáticos”. RS Amidata – Inglaterra 2002. <http://www.amidata.es/cgi-bin/bv/browse/Browse.jsp?catoid=-675336879&cacheID=esie>